

# Primjena aramidnih ojačala u izradi ploča za balističku zaštitu

---

**Tomić, Ante**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

*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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:663830>

*Rights / Prava:* [Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-17**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**ZAVRŠNI RAD**

Ante Tomić

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**ZAVRŠNI RAD**

Mentor:

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

Student:

Ante Tomić

Zagreb, 2022.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske 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 / 22 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ante Tomić** JMBAG: **0035224021**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena aramidnih ojačala u izradi ploča za balističku zaštitu**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of aramid reinforcements in the production of ballistic protection plates**

Opis zadatka:

U izradi ploča za balističku zaštitu danas se koriste napredni materijali što uključuje različite metale, keramike i kompozitne materijale. Za tu namjenu je vrlo česta primjena aramidnih ojačala u epoksidnoj matrici, što se pokazalo kao vrlo dobar kompozitni materijal za tu namjenu.

U teoretskom dijelu rada potrebno je objasniti mehanizme zaštite od kinetičkih penetratora te dati prikaz materijala koji se danas koriste u izradi ploča za balističku zaštitu s njihovim prednostima i manama. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je predložiti strukturu hibridne kompozitne ploče od aramidnih i staklenih ojačala u epoksidnoj matrici. Treba izraditi dvije ploče s predloženom strukturom, gdje će kod jedne ploče biti korištena epoksidna matrica ojačana s nanopunilima. Iz izrađenih ploča potrebno je izrezati uzorke za ispitivanje osnovnih mehaničkih svojstava te provesti ta ispitivanja.

Na temelju dobivenih rezultata ispitivanja potrebno je donijeti zaključke o utjecaju strukture i nanopunila na osnovna mehanička svojstva te navesti potencijalne mogućnosti primjene takvih materijala.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Zdravko Schauerl

Datum predaje rada:

1. rok: 24. 2. 2022.  
2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.  
3. rok: 22. 9. 2022.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 28. 2. – 4. 3. 2022.  
2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.  
3. rok: 26. 9. – 30. 9. 2022.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

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

Zahvaljujem se mentoru prof.dr.sc. Zdravku Schauperlu na savjetima, pomoći i na pruženoj prilici za izradu ovog završnog rada.

Zahvaljujem doc.dr.sc. Zoranu Domitranu na izradi uzoraka i na pruženim savjetima.

Također se zahvaljujem i Laboratoriju za polimere i kompozite, a posebno Božidaru Bušetinčanu bez kojega bi ovaj rad bio teže izvediv.

Ante Tomić

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ .....	1
POPIS SLIKA .....	3
POPIS TABLICA .....	5
POPIS OZNAKA .....	6
SAŽETAK .....	7
SUMMARY .....	8
1. UVOD .....	9
2. KOMPOZITNI MATERIJALI .....	10
2.1 Osnove kompozitnih materijala .....	10
2.2. Kompoziti ojačani vlaknima .....	11
2.2.1 Vlaknima ojačani kompoziti s polimernom matricom.....	12
2.2.2. Karakteristike kompozita ojačanih vlaknima.....	18
2.2.3. Predviđanje svojstava vlaknima ojačanih kompozita .....	20
2.3. Kompoziti ojačani česticama .....	22
2.4. Hibridni kompoziti.....	23
2.5. Strukturni kompoziti .....	24
2.5.1. Slojeviti kompozitni materijali (laminati).....	24
2.5.2. Sendvič konstrukcije.....	25
2.6. Proizvodnja kompozitnih dijelova .....	26
2.6.1. Ručno polaganje [3].....	27
2.6.2 Oblikovanje naštrcavanjem [3] .....	28
2.6.3. Ubrizgavanje smole u kalup.....	29
2.6.4. Preprezi .....	30
3. Eksperimentalni dio .....	32
3.1. Kompozitna ploča .....	32

3.1.1. Karakteristike kompozita .....	32
3.1.2. Izrada kompozita.....	33
3.1.3. Balistički test kompozitne ploče .....	37
3.2. Epoksidne ploče .....	41
3.2.1. Izrada ploča.....	41
3.2.2. Savojno ispitivanje.....	41
3.2.3. Vlačno ispitivanje .....	44
3.2.4. Udarni rad loma .....	46
3.3. Rasprava.....	49
4. ZAKLJUČAK.....	51
LITERATURA .....	52

## POPIS SLIKA

Slika 1. Vrste kompozita: a) kompoziti s česticama b) kompoziti s vlaknima c) slojeviti kompoziti [2].....	10
Slika 2. . Raspored vlakana u kompozitu: a) kontinuirana jednosmjerna vlakna, b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna, c) ortogonalno raspoređena vlakna, d) višesmjerno usmjerena vlakna [3].....	11
Slika 3. Usporedba duromernih materijala matrice [5].....	13
Slika 4. Polimerna matrica ojačana vlaknima [6] .....	13
Slika 5. Prikaz mat vlakana (vlastita fotografija).....	15
Slika 6. Rowing tkanje vlakana (vlastita fotografija) .....	15
Slika 7. Utjecaj volumnog udjela vlakana na svojstva kompozita [2].....	19
Slika 8. Utjecaj usmjerenja vlakana s obzirom na naprezanje [2] .....	19
Slika 9. Usporedba specifičnog modula elastičnosti i specifične čvrstoće za materijale matrice [2].....	20
Slika 10. Dijagram "naprezanje-istezanje" vlaknima ojačanog kompozita [3] .....	22
Slika 11. Svojstva najčešće korištenih hibridnih kompozita [11].....	23
Slika 12. Slojeviti kompozit [12] .....	24
Slika 13. Sendvič konstrukcija [12] .....	25
Slika 14. Sendvič konstrukcija s površinskim slojevima i jezgre u obliku pčelinjeg saća [12] .....	26
Slika 15. Postupak izrade kompozita ručnim polaganjem [3] .....	27
Slika 16. Postupak izrade kompozita naštrcavanjem [3] .....	28
Slika 17. Postupak ubrizgavanja smole u kalup [14].....	29
Slika 18. Postupak izrade kompozita u autoklavu [14].....	30
Slika 19. Struktura kompozitne ploče .....	32
Slika 20. Sicomin SR InfuGreen 810.....	33
Slika 21. Smola korištena u izradi kompozita .....	33



Slika 22. Sloj mata koji je podvrgnut: a) impregniranju smole valjkom, b) natapanju smolom pomoću kista .....	34
Slika 23. Rowing tkanje spremno za impregniranje smolom .....	35
Slika 24. Aramidna vlakna korištena u izradi kompozitnih ploča .....	35
Slika 25. Aramidna vlakna natopljena smolom .....	36
Slika 26. Kompozitna ploča nakon završetka postupka ručnog polaganja .....	37
Slika 27. Ulaz metka kalibra ".44 Magnum" u kompozitnu ploču .....	38
Slika 28. Izlaz metka kalibra ".44 Magnum" iz kompozitne ploče .....	38
Slika 29. Ulaz metka kalibra ".357" u kompozitnu ploču.....	39
Slika 30. Izlaz metka kalibra ".357" iz kompozitne ploče .....	39
Slika 31. Ulaz metka kalibra "9mm full metal jacket" u kompozitnu ploču .....	40
Slika 32. Oštećenje nastalo na stražnjoj strani kompozitne ploče od metka kalibra "9mm full metal jacket" .....	40
Slika 33. Shimadzu uređaj korišten za savojno ispitivanje.....	41
Slika 34. Nastavak za savojno ispitivanje.....	42
Slika 35. Shimadzu uređaj korišten za vlačno ispitivanje.....	45
Slika 36. Epruveta nakon vlačnog ispitivanja.....	45
Slika 37. Epruvete izrađene od epoksidne smole bez ojačala koje se podvrgavaju ispitivanja udarnog rada loma.....	47
Slika 38. Epruvete izrađene od epoksidne smole ojačane nanočesticama koje se podvrgavaju ispitivanju udarog rada loma.....	48
Slika 39. Charpyev bat .....	48

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Dimenzije epruveta namijenjenih za savojno ispitivanje izrađene od epoksidne smole bez ojačala .....	42
Tablica 2. Dimenzije epruveta namijenjenih za savojno ispitivanje izrađene od epoksidne smole ojačane nanočesticama .....	43
Tablica 3. Rezultati savojnog ispitivanja za epruveta bez ojačala.....	43
Tablica 4. Rezultati savojnog ispitivanja za epruvete ojačane nanočesticama .....	44
Tablica 5. Rezultati vlačnog ispitivanja.....	46
Tablica 6. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma .....	49

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$\rho_c$	$\text{g/cm}^3$	gustoća kompozita
$\rho_m$	$\text{g/cm}^3$	gustoća matrice
$\rho_f$	$\text{g/cm}^3$	gustoća vlakna
$V_m$	$\text{cm}^3$	volumen matrice
$V_f$	$\text{cm}^3$	volumen vlakna
$E_c$	MPa	modul elastičnosti kompozita
$E_m$	MPa	modul elastičnosti matrice
$E_f$	MPa	modul elastičnosti vlakna

## **SAŽETAK**

Zbog sve veće potrebe za balističkom zaštitom raste upotreba i potreba za kompozitnim materijalima u tom području. Teorijski dio ovoga rada opisuje kompozitne materijale te njihovu strukturu i primjenu. U eksperimentalnom dijelu rada izrađen je hibridni kompozit s matricom od epoksidne smole koja je ojačana staklenim i aramidnim vlaknima. Izrađeni kompozit podvrgnut je pucanju s tri različita kalibra metka kako bi se utvrdila njegova balistička svojstva. Osim toga, ispitana su svojstva epoksidne smole ojačane s 1 % nanočestica aluminijskog oksida ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) i epoksidne smole bez ojačala. Na kraju se nalaze rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava smola te je donesen zaključak o utjecaju nanočestica na mehanička svojstva smole.

Ključne riječi: kompozit, vlakna, nanočestice, epoksidna smola, mehanička svojstva, balistika

**SUMMARY**

Due to the increased need for the better ballistic protection the use of various composite materials is growing in this area. The theoretical part of this paper describes structure and possible application of commonly used composite materials . In the experimental part of the paper, a hybrid composite with an epoxy resin matrix reinforced with glass and aramid fibers was made. For determination of its ballistic properties, mentioned composite was subjected to the fring test with three different caliber bullets In addition, the properties of the epoxy resin reinforced with 1 % nanoparticles of alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) and epoxy resin without reinforcement was investigated. Finally, the results of testing the mechanical properties of resins are presented, as well as the influence of nanoparticles on the mechanical properties of the resin.

Key words: composite, fibers, nanoparticles, epoxy resin, mechanical properties, ballistic

## **1. UVOD**

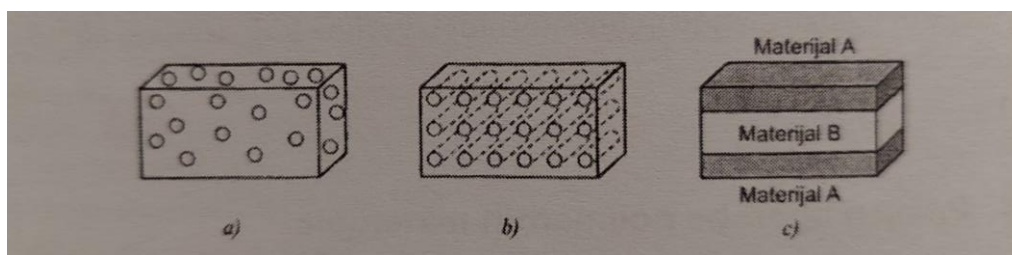
Kompozitni materijali počinju se upotrebljavati 1950-ih godina i već tada su bile jasne prednosti koje takvi materijali nose. Kompozitni materijali zbog mogućnosti kombiniranja velikog broja vrsti matrica i ojačala mogu postići odlična svojstva za balističku primjenu. Potreba za balističkom zaštitom raste, a zbog velike mase čelika poseže se za kompozitnim materijalima koji pružaju jednaka svojstva zaštite uz značajno smanjenje mase. Primjerice, vozila za prijevoz novca i dragocjenosti sve se češće zaštićuju s kompozitnim panelima zbog potrebe za mobilnošću i brzinom. Manja masa panela također smanjuje broj kvarova na vozilima zbog manjeg opterećenja na nosive dijelove.

Balistika je znanstvena i tehnička disciplina koja se bavi proučavanjem gibanja bačenih tijela, a pozornost se obraća na brzinu, domet i putanju bačenog tijela. Kod vatrenih oružja analizira se gibanje projektila ispaljenog iz vatrenog oružja. S obzirom na putanju metka balistiku dijelimo na tri područja: unutarnja balistika, vanjska balistika i balistika na cilju. Unutarnja balistika analizira putanju metka u cijevi, vanjska u atmosferi, a balistika na cilju prati gibanje projektila kroz prepreku [1].

## 2. KOMPOZITNI MATERIJALI

### 2.1 Osnove kompozitnih materijala

Kompozitni materijali ili skraćeno kompoziti nastaju umjetnim spajanjem dva ili više materijala kako bi se dobio materijal koji ima kombinirana svojstva komponenti. Kompoziti se sastoje od matrice i ojačala. Matrica je kontinuirana faza koja okružuje disperzirane faze (ojačala). Matrici se dodaju ojačala kako bi se modificirala početna svojstva matrice i postigla tražena svojstva materijala. Struktura kompozita je heterogena, odnosno vidljiva je jasna granica između komponenti. Kompoziti se dijele na kompozite s česticama, vlaknima ojačani kompoziti, slojeviti kompoziti i sendvič konstrukcije. Slika 1 prikazuje vrste kompozita [2].



Slika 1. Vrste kompozita: a) kompoziti s česticama b) kompoziti s vlaknima c) slojeviti kompoziti [2]

Matrica kompozita ima ulogu u povezivanju ojačala, prijenosu opterećenja na njih te u zaštiti od okolnih utjecaja i oštećenja. Kako bi ispunila zadanu ulogu, matrica mora dobro prijanjati uz ojačalo, mora biti otporna na koroziju te ne smije kemijski reagirati s ojačalima. S obzirom na materijal matrice, kompozite dijelimo na metalne, keramičke i polimerne. Najčešće se primjenjuju kompoziti s polimernom matricom. Ojačala moraju imati visoku čvrstoću i visok modul elastičnosti kako bi dobili tražena svojstva kompozita [3].

Ukupno ponašanje kompozita ovisi o:

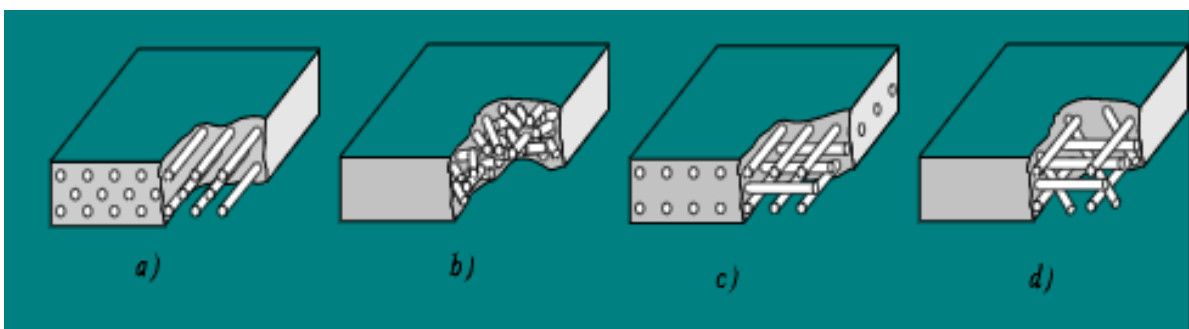
1. svojstvima matrice i ojačala
2. veličini i rasporedu konstituenata
3. volumnom udjelu konstituenata
4. obliku konstituenata

## 5. prirodi i jakosti veza među konstituentima [2].

S vremenom kompoziti zbog odličnih mehaničkih svojstava i mogućnosti „dizajniranja“ istih, postaju sve više zastupljeni u mnogim granama. Sve više se primjenjuju u medicini, balistici, sportu, zrakoplovstvu, automobilskoj industriji, građevini i drugima.

## 2.2. Kompoziti ojačani vlaknima

Najveću efikasnost ojačala postizemo kod vlaknima ojačanih kompozita. Vlakna imaju velik omjer duljine i promjera zbog čega u uzdužnom smjeru daju bolja svojstva nego u poprečnom. Opterećenje na kompozit se distribuira među vlaknima putem matrice koja je najčešće osrednje duktilna. Vlaknasta ojačala dijelimo prema promjeru na viskere, vlakna i žice. Vlakna mogu biti različito raspoređena u matrici što je prikazano na slici 2. Kod diskontinuiranih vlakana na svojstva bitno utječe duljina vlakana. Svaka kombinacija vlakno-matrica ima kritičnu duljinu vlakana, dok duljine kontinuiranih vlakana premašuju ovu kritičnu vrijednost [2].



*Slika 2. . Raspored vlakana u kompozitu: a) kontinuirana jednosmjerna vlakna, b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna, c) ortogonalno raspoređena vlakna, d) višesmjerno usmjerena vlakna [3]*

Na slici 2. vidimo 4 moguća rasporeda vlakana u kompozitu:

- a) kontinuirana jednosmjerna vlakna
- b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna



- c) ortogonalno raspoređena vlakna
- d) višesmjerno usmjerena vlakna [3].

Raspored vlakana ima veliki utjecaj na svojstva kompozita. Mehanička svojstva kompozita ojačanog kontinuirano jednosmjerno usmjerenim vlaknima su vrlo anizotropna. Čvrstoća je maksimalna u smjeru u kojem su vlakna usmjerena dok je u smjeru okomitom na vlakna minimalna. Kompoziti sa slučajno usmjerenim vlaknima imaju izotropna svojstva, ali se ne postižu visoke vrijednosti čvrstoće i krutosti kao u uzdužnom smjeru kontinuiranih vlakana. Stoga prilikom „dizajniranja“ kompozita moramo poznavati smjer djelovanja opterećenja kako bi znali odrediti usmjerenost vlakana [2].

Prema vrsti matrice vlaknima ojačane kompozite dijelimo na polimerne, keramičke, metalne. Najčešće se primjenjuje polimerna matrica koja se ojačava staklenim, ugljičnim i aramidnim vlaknima [2].

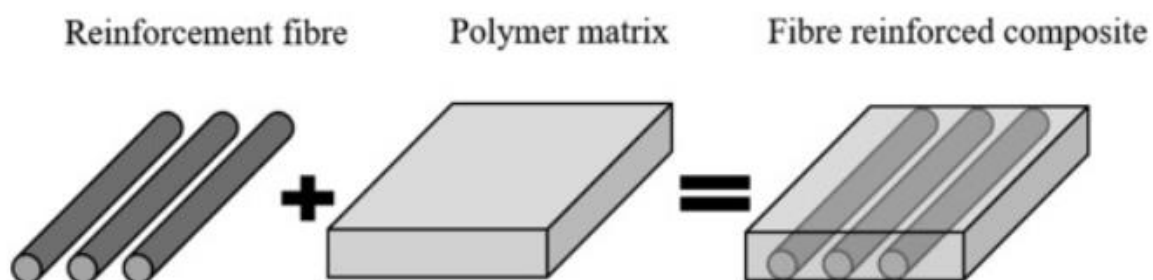
### ***2.2.1 Vlaknima ojačani kompoziti s polimernom matricom***

Svojstva matrice određuju otpornost kompozita na većinu degradacijskih procesa koji na kraju uzrokuju kvar konstrukcije. Za izradu matrice najčešće se primjenjuju poliesterske i vinile esterske smole („smole“ su polimeri visoke molekulske mase koje treba ojačati). Epoksidna smola u izradi kompozita ima bolja mehanička svojstva od poliestera i vinil estera, ali zbog toga što nije prikladna za komercijalnu upotrebu i veće cijene, manje je raširena u proizvodnji. Zbog odlične toplinske postojanosti na visokim temperaturama u proizvodnji se često koriste i poliamidi [2, 4]. Prednosti i nedostaci duromernih materijala matrice navedeni su na slici 3.

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)
		Veliko utezanje pri otvrdnjavanju
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	

Slika 3. Usporedba duromernih materijala matrice [5]

Slika 4 prikazuje „spajanje“ vlakana i polimerne matrice u kompozit ojačan vlaknima s polimernom matricom.



Slika 4. Polimerna matrica ojačana vlaknima [6]

Kao ojačanje u kompozitu se koriste vlakna koja mogu biti izrađena od raznih materijala. Najbitnije je da matrica i vlakna budu kemijski kompatibilni. Stoga imamo grupe materijala za izradu vlakana:

- Prirodna vlakna
- Staklena vlakna
- Poliesterska vlakna
- Polietilenska vlakna
- Aramidna vlakna
- Ugljična vlakna
- Metalna vlakna [7].

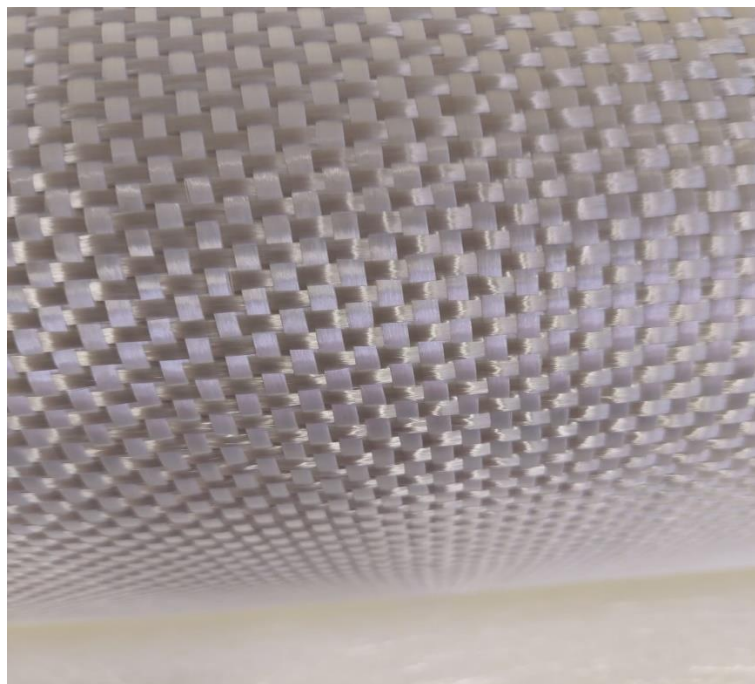
Vlakna se nakon procesa proizvodnje grupiraju u strukove koji se namataju u klupka. Moguće je direktno korištenje strukova, ali se većinom oblikuju u tkaninu, pletivo ili mat [7].

Jednoliko debeli sloj vlakana razbacanih u svim smjerovima povezan s posebnim ljepilom naziva se mat. Mat nam daje podjednaka svojstva u svim smjerovima [7]. Takav oblik vlakana vidljiv je na slici 5.



*Slika 5. Prikaz mat vlakana (vlastita fotografija)*

Rowing tkanja imaju strukove poredane pod pravim kutom te daju odlična svojstva u okomita smjera dok su u ostalim smjerovima svojstva značajno lošija [7]. Rowing tkanje vlakana je prikazano na slici 6.



*Slika 6. Rowing tkanje vlakana (vlastita fotografija)*

### 2.2.1.1 Staklenim vlaknima ojačani polimerni kompoziti

Staklena vlakna zbog svoje niske cijene i odličnih mehaničkih svojstava kao što su visoka vlačna čvrstoća, vatrootpornost i dobra kemijska postojanost, najčešće se koriste u kompozitima s polimernom matricom. Mogu se koristiti kontinuirana i diskontinuirana vlakna. Primjenu nalaze u raznim granama proizvodnje, automobilska industrija, zrakoplovstvo, cijevi, građevina, transportna industrija i slično [8].

Oko 90 % potrošnje staklenih vlakana otpada na E-staklo čiji je kemijski sastav približno 54 %  $\text{SiO}_2$ , 14 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 22 % ( $\text{CaO}+\text{MgO}$ ) te 10 %  $\text{B}_2\text{O}_3$ . Ostalih 10 % su posebna staklena vlakna za posebne zahtjeve [2, 8].

Staklo je popularno kao ojačalo iz više razloga:

1. Jednostavno izvlačenje visokočvrstih vlakana iz rastaljenog stanja
2. Lako se dobavlja
3. Mogućnost ekonomične proizvodnje polimernih materijala ojačanih staklenim vlaknima korištenjem brojnih tehnika proizvodnje kompozita
4. U kombinaciji s polimernom matricom zbog visoke čvrstoće vlakana dobivamo kompozit vrlo visoke specifične čvrstoće
5. Kombinacijom različitih polimera postiže se kemijska inertnost što daje kompozite korisne za primjenu u različitim korozivnim sredinama [2].

### 2.2.1.2. Polimerni kompoziti ojačani aramidnim vlaknima

Aramidna vlakna su visokočvrsti i visokomodulni materijali. Imaju visok omjer između čvrstoće i gustoće, koji je viši nego kod metala. Najčešći trgovački nazivi za aramid su „Kevlar“ i „Nomex“. Ime aramid dobili su od naziva aromatični poliamid. Zbog svojih svojstava, koja su 5 % - 10 % bolja od ostalih sintetičkih vlakana, istisnuli su iz primjene metalna vlakna i ostala anorganska vlakna s tržišta koja zahtijevaju visoke performanse kao što su: balistika, zrakoplovstvo, automobilska industrija, užad za naftne platforme. Osim toga su i vatrootporna zbog čega se primjenjuju u uvjetima visoke temperature [9].

U usporedbi s ostalim polimernim vlaknastim materijalima ova vlakna imaju višu uzdužnu vlačnu čvrstoću i vlačni modul elastičnosti. Nadalje, jako su kruta i žilava, te otporna na udare, puzanje i na umor materijala [2].

Najčešće se aramidna vlakna koriste s matricom od epoksidne i poliesterske smole. Vlakna imaju odličnu fleksibilnost i vrlo su duktilna te ih je moguće prerađivati većinom uobičajenih postupaka prerade tekstila.

### 2.2.1.3. Polimerni kompoziti ojačani ugljičnim vlaknima

Polimerna matrica ojačana ugljičnim vlaknima vrlo je lagan i čvrst kompozit te zbog svojih odličnih mehaničkih svojstava primjenu pronalazi u raznim granama proizvodnje. Vlakna nastaju kada se „Rayon“, poliakrilonitril ili katran karboniziraju na visokim temperaturama. Daljnjim procesom grafitizacije ili rastezanjem vlakana, povećava se čvrstoća i krutost [10].

Spomenuta vlakna najčešće se primjenjuju za ojačanje suvremenih kompozita s polimernom matricom. Ugljična vlakna u usporedbi s ostalim vlaknastim materijalima imaju najviši specifični modul i najvišu specifičnu čvrstoću. Odlična svojstva zadržavaju i pri visokim temperaturama, ali je moguća pojava oksidacije. Kemijski su postojani na vlagu, kiselinu, lužine i ostala otapala na sobnoj temperaturi. Važno je napomenuti da su razvijeni postupci proizvodnje vlakana i kompozita koji su relativno jeftini. Vlakna su, uobičajeno, promjera od 4 do 10  $\mu\text{m}$  te su dostupna kao kontinuirana i rezana. Kako bi se poboljšala adhezija između vlakana i polimerne matrice, vlakna se prevlače epoksidnim slojem [2].

Ugljična vlakna možemo klasificirati prema vlačnom modulu elastičnosti na 4 tipa:

- Tip sa standardnim modulom
- Tip sa srednjim modulom
- Tip s visokim modulom
- Tip s ultravisokim modulom [2].

Sportska i rekreacijska oprema, namotavana kućišta raketnih motora, spremnici pod tlakom, konstrukcijski dijelovi vojnih i komercijalnih letjelica su samo neke od primjena polimernih kompozita ojačanih ugljičnim vlaknima.

### **2.2.2. Karakteristike kompozita ojačanih vlaknima**

Brojni faktori se uzimaju u obzir pri konstruiranju vlaknima ojačanih kompozita:

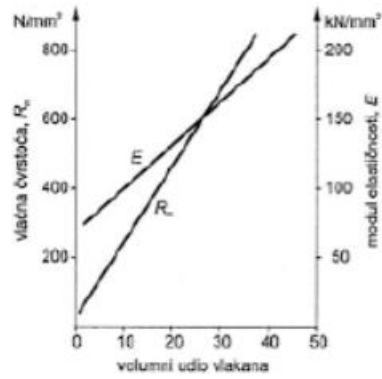
- Omjer „duljina/promjer“
- Volumni udio vlakana
- Usmjerenost vlakana
- Svojstva vlakana
- Svojstva matrice [2].

#### **2.2.2.1. Omjer „duljina/promjer“**

Najbolja svojstva se dobivaju od kontinuiranih vlakana, ali ih je teško proizvesti i ugraditi u matricu. Dok se diskontinuirana vlakna visokog omjera „duljina/promjer“ lakše ugrađuju u matricu te dovode do materijala visoke krutosti i čvrstoće [2].

#### **2.2.2.2. Volumni udio vlakana**

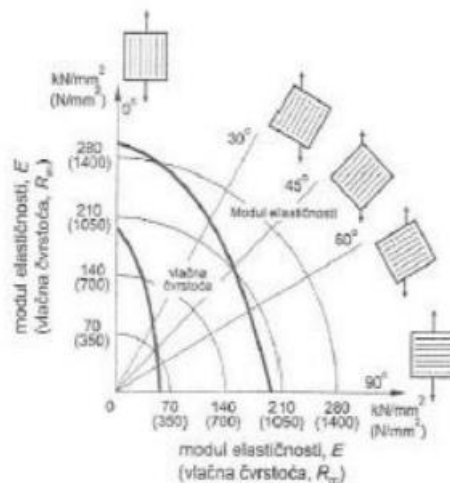
Kako bi dobili kompozit više čvrstoće i krutosti poželjan je što veći volumni udio vlakana, ali ne veći od oko 40 % kako bi sva vlakna mogla biti okružena materijalom matrice. Povećanjem volumnog udjela vlakana povećavaju se vlačna čvrstoća i modul elastičnosti što je vidljivo na slici 7 [2].



Slika 7. Utjecaj volumnog udjela vlakana na svojstva kompozita [2]

### 2.2.2.3. Usmjerenost vlakana

Najveći iznos krutosti i čvrstoće vlakana dobivamo kada je opterećenje paralelno s vlaknima. Svojstva kompozita mogu biti anizotropna ovisno o usmjerenosti vlakana u kompozitu. Na slici 8 je prikazan utjecaj usmjerenja vlakana s obzirom na naprezanje. Kako bi postigli što jednoličnija svojstva kompozita, vlakna možemo polagati ortogonalno ili pod nekim drugim kutom [2].



Slika 8. Utjecaj usmjerenja vlakana s obzirom na naprezanje [2]

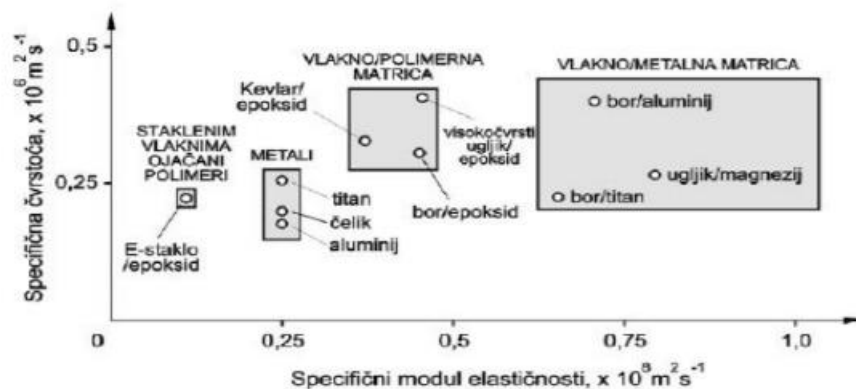


#### 2.2.2.4. Svojstva vlakana

Prilikom izbora materijala za vlakna, prednost imaju materijali visokog specifičnog modula elastičnosti ili čvrstoće. Također, vlakna moraju biti čvrsta, kruta, lagana te visokog tališta [2].

#### 2.2.2.5. Svojstva matrice

Glavni zahtjevi za materijal matrice su žilavost i duktilnost kako bi se mogla prenositi opterećenja na vlakna i spriječiti propagiranje pukotine od prekinutih vlakana kroz kompozit. Matrica također mora biti čvrsta kako bi doprinijela čvrstoći kompozita. Zadnji uvjet koji mora zadovoljiti je talište ovisno o radnim uvjetima kompozita (metalne matrice su postojane na višim temperaturama) [2]. Slijedi slika 9 na kojoj su uspoređeni materijali koji se koriste za izradu matrice s obzirom na njihov specifični modul elastičnosti i specifične čvrstoće.



Slika 9. Usporedba specifičnog modula elastičnosti i specifične čvrstoće za materijale matrice [2]

#### 2.2.3. Predviđanje svojstava vlaknima ojačanih kompozita

Kako bi se odredila gustoća vlaknima ojačanih kompozita koristi se zakon miješanja.

Izraz za računanje gustoće kompozita:

$$\rho_c = V_m \rho_m + V_f \rho_f \quad (2.1)$$

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> [2].

Zakon miješanja omogućava da se predvidi električnu i toplinska vodljivost u smjeru vlakana ako su jednosmjerna i kontinuirana

Pomoću zakona miješanja možemo predvidjeti modul elastičnosti kompozita kod kojih je opterećenje paralelno s kontinuiranim jednosmjernim vlaknima.

Izraz za računanje modula elastičnosti glasi:

$$E_c = V_m E_m + V_f E_f \quad (2.2.)$$

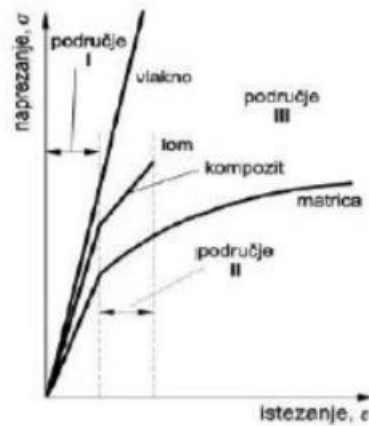
Gdje je:

$E_c$  – modul elastičnosti kompozita, MPa,

$E_m$  – modul elastičnosti matrice, MPa,

$E_f$  – modul elastičnosti vlakna, MPa [2].

Zbog visokih naprezanja matrica se deformira te veza između naprezanja i istežanja nije ista. Slika 10 prikazuje dijagram „naprezanje-istežanje“ u kojem je vidljiva veza istežanja o naprezanju za matricu, vlakna i kompozit izrađen od tih konstituenata.



Slika 10. Dijagram "naprezanje-istezanje" vlaknima ojačanog kompozita [3]

Kod opterećenja koje djeluje okomito na smjer vlakana, komponente djeluju neovisno jedna o drugoj te modul elastičnosti predviđamo izrazom:

$$1 / E_c = V_m / E_m + V_f / E_f \quad [2] \quad (2.3.)$$

Čvrstoća kompozita ovisi o vezama između matrice i vlakana. Zbog lošije čvrstoće matrice, čvrstoća kompozita ograničena je deformiranjem matrice. Utvrđena čvrstoća je zbog nesavršenosti u kompozitu uvijek manja od čvrstoće predviđene zakonom miješanja. Vlačna čvrstoća se relativno lagano predviđa, dok se ostala svojstva, kao što su duktilnost, žilavost, umor materijala i puzanje materijala, puno teže predviđaju [2].

Isto tako, svojstva kompozita se teže predviđaju ako su vlakna diskontinuirana. Krajevi vlakana nose puno manje opterećenje nego srednji dio vlakna zbog čega je teško predvidjeti svojstva. Čvrstoća utvrđena ispitivanjem je manja nego čvrstoća proračunata zakonom miješanja. Ukoliko je omjer „duljina/promjer“ veći od kritičnog dobivamo manja odstupanja u rezultatima [2].

### 2.3. Kompoziti ojačani česticama

Osim s vlaknima, kompoziti se ojačavaju i s česticama. S obzirom na veličinu čestica i način na koji utječu na svojstva, dijelimo ih na kompozite s disperzijom i kompozite s velikim

česticama. Čestice su kod kompozita s disperzijom manje od 0,1  $\mu\text{m}$ , a kod kompozita s velikim česticama veće od 1  $\mu\text{m}$ . Od čestica se zahtjeva da budu izrađene od tvrdog i krhkog materijala te da budu jednoliko raspoređene u mekanijoj i duktilnijoj matrici. Volumni udio čestica kod kompozita s disperzijom kreće se do 0,15, a za kompozite s velikim česticama je iznad 0,2. Kod kompozita s disperzijom učinak ovisi obliku, količini i rasporedu disperziranih čestica. Disperzirane se čestice ne smiju otapati i kemijski reagirati s matricom [11].

Za razliku od kompozita ojačanih vlaknima, koji su u većini slučajeva anizotropni, kompoziti ojačani česticama su izotropni,.

## 2.4. Hibridni kompoziti

Hibridni kompoziti spadaju u relativno nove vrste vlaknima ojačanih kompozita. Izrađeni su od više vrsta vlakana u jedinstvenoj matrici. Cilj ovih kompozita je postizanje boljih svojstava od kompozita ojačanih s jednom vrstom vlakana. Najčešće se primjenjuju ugljična i staklena vlakna u polimernoj matrici [12].

Svojstva ovih kompozita mogu biti vrlo različita zbog velikog broja načina slaganja vlakana u matrici. Često se primjenjuju u zrakoplovnoj industriji za izradu konstrukcijskih elemenata oplata, posebno kod Boeing zrakoplova [11].

Na slici 11. prikazani su hibridni kompoziti koji se najčešće koriste te njihova svojstva.

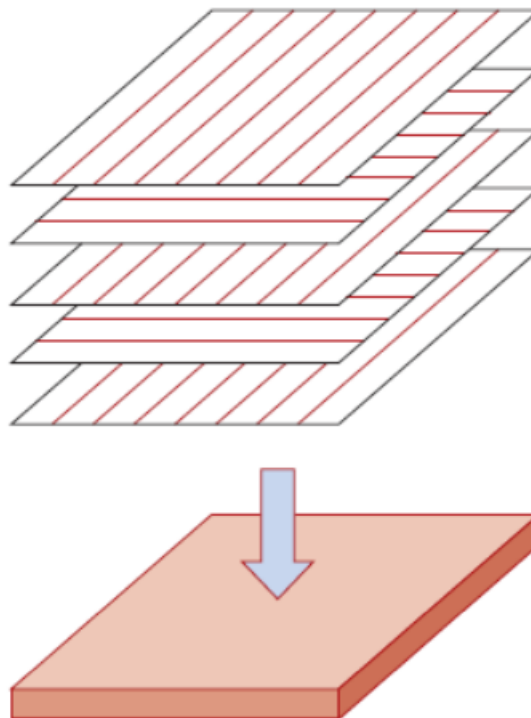
<b>Kompozit s ugljičnim i aramidnim vlaknima</b>	- dobra žilavost i vlačna čvrstoća od aramida; - dobra tlačna i vlačna čvrstoća od ugljičnih vlakana; - niska gustoća ali relativno visoka cijena
<b>Kompozit s aramidnim i staklenim vlaknima</b>	- mala gustoća, dobra žilavost i vlačna čvrstoća od aramida; - tlačna i vlačna čvrstoća od stakla; - niska cijena
<b>Kompozit s ugljičnim i staklenim vlaknima</b>	- dobra tlačna i vlačna čvrstoća, krutost i niska gustoća od ugljičnih vlakana; - niska cijena

Slika 11. Svojstva najčešće korištenih hibridnih kompozita [11]

## 2.5. Strukturni kompoziti

### 2.5.1. Slojeviti kompozitni materijali (laminati)

Slojeviti kompoziti sastavljeni su od čvrsto povezanih dvodimenzionalnih slojeva ojačanja. Na slici 12 prikazan je slojeviti kompozit. Slojevi imaju preferirani smjer visoke čvrstoće. Svojstva laminata su različita ovisno o smjeru opterećenja, no ta razlika nije toliko značajna kao kod kompozita ojačanih jednosmjernim vlaknima. Ovisno o traženim parametrima koje kompozit mora zadovoljit, izrađuju se kompoziti sa slojevima usmjerenima prema tim parametrima kako bi se osigurala najbolja svojstva kompozita [11].



Slika 12. Slojeviti kompozit [12]

Slojevite kompozite moguće je izrađivati različitim metodama. Najčešći postupak je valjanje.

Metode za izradu slojevitih kompozita:

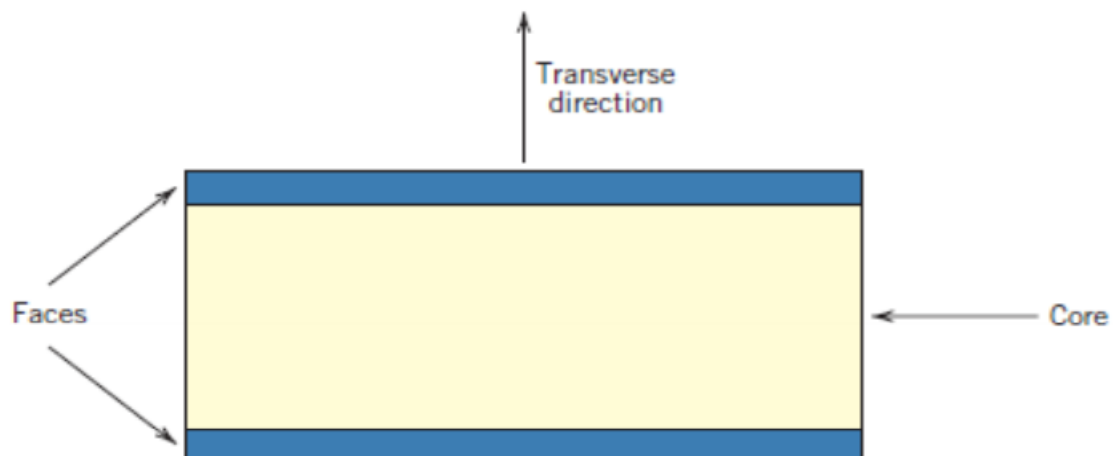
- Valjanje
- Spajanje eksplozijom
- Koekstruzija
- Prešanje

- Lemljenje [2].

### 2.5.2. Sendvič konstrukcije

Sendvič konstrukcije, koje spadaju pod strukturne kompozite, dizajnirane su kao lagane grede ili ploče relativno visoke krutosti i čvrstoće. Sastavljene su od dva vanjska tanka sloja koja su ljepljivo spojena na deblju jezgru što je prikazano na slici 13. Vanjski slojevi izrađeni su od relativno tvrdog i čvrstog materijala. Njihova uloga je da daju čvrstoću i krutost konstrukciji te moraju biti dovoljno debele da izdrže vlačna i tlačna naprezanja koja su posljedica opterećenja. Najčešće korišteni materijali za vanjski sloj su aluminijske legure, plastike ojačane vlaknima, titan i čelik [12].

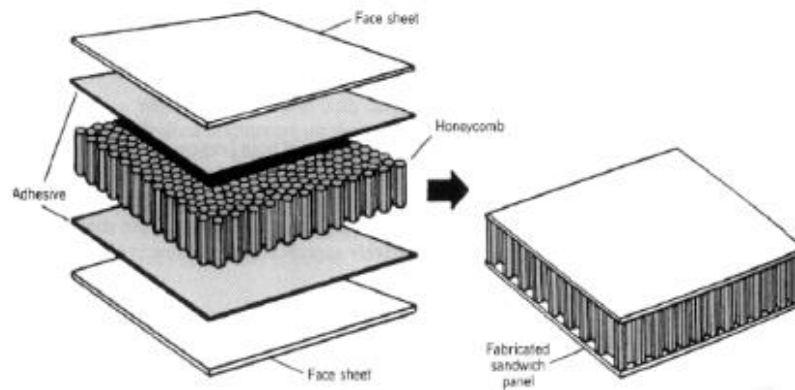
Materijal jezgre je u većini slučajeva lagan i obično ima nizak modul elastičnosti. Jezgra dijelimo u tri kategorije: polimerne pjene, drvo i saće [12].



Slika 13. Sendvič konstrukcija [12]

Primjer sendvič konstrukcije je valoviti karton. Valovita jezgra i površinski slojevi papira nisu kruti, ali njihova kombinacija jest. Značajan primjer su također i strukture u obliku pčelinjeg saća. Saće je izrađeno od šesterokutnih ćelija čije su osi okomite na površinske slojeve. Ćelije su oblikovane od tankih limova, trake ili folije od aluminija. Površinski materijal i materijal od kojeg je izrađeno saće mogu biti slični. Uz dobar izbor materijala sendvič konstrukcije su vrlo

postojane, krute, čvrste i izuzetno lagane. Slika 14 prikazuje sendvič konstrukciju sa jezgrom u obliku pčelinjeg saća [2].



Slika 14. Sendvič konstrukcija s površinskim slojevima i jezgre u obliku pčelinjeg saća [12]

## 2.6. Proizvodnja kompozitnih dijelova

Radi postizanja optimalnih svojstava kompozita, moramo paziti na raspored i razmak vlakana u matrici. Diskontinuirana vlakna mogu se miješati s matricom kako bi se postiglo slučajno ili preferirano orijentiranje. Kontinuirana vlakna možemo raspoređivati jednosmjerno, ortogonalno i namotavanjem [2].

Načini proizvodnje kompozita:

- Ručno polaganje
- Oblikovanje naštrcavanjem
- Pultrudiranje
- Ubrizgavanje smole u kalup
- Namatanje
- Prepreg [3].

### 2.6.1. Ručno polaganje [3]

U kalup se postavljaju tkanja različitog oblika te se na njih nanosi smola koja se impregnira u ojačala pomoću valjka ili kista. Nakon postupka ručnog polaganja koji je vidljiv na slici 15, kompozit se skrućuje u atmosferskim uvjetima.



Slika 15. Postupak izrade kompozita ručnim polaganjem [3]

Prednosti ručnog polaganja:

- Jednostavan postupak
- Dugo se primjenjuje
- Velik izbor materijala i dobavljača
- Veći udio vlakana i dulja vlakna u usporedbi s naštrecavanjem

Nedostaci ručnog polaganja:

- Kvaliteta postupka ovisi o kvaliteti radnika
- Kompoziti s malim udjelom smole u većini slučajeva imaju pukotine
- Koriste se smole male viskoznosti što nepovoljno utječe na svojstva



### 2.6.2 Oblikovanje naštrecavanjem [3]

Prilikom oblikovanja naštrecavanjem vlakno ulazi u pištolj u kojem se siječe na manje komade te dodaje u struju zraka i tekuće smole. Kao ojačalo možemo koristiti isključivo staklena vlakna, a matrica je najčešće poliesterska. Mješavina smole i vlakana se naštrecava u kalup gdje se u atmosferskim uvjetima skrućuje u kompozit. Slika 16. prikazuje oblikovanje naštrecavanjem.



Slika 16. Postupak izrade kompozita naštrecavanjem [3]

Prednosti oblikovanja naštrecavanjem:

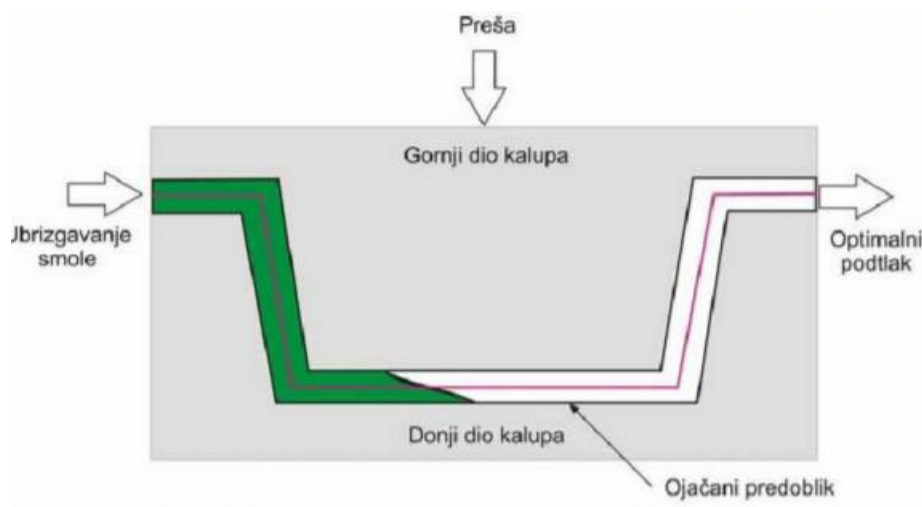
- Već dulji niz godina postupak ima široku primjenu
- Vrlo jeftin postupak
- Nisi troškovi izrade alata

Nedostaci oblikovanja naštrecavanjem:

- Veća masa zbog veće količine smole
- Ograničena svojstva jer se isključivo koriste kratka i sječena vlakna
- Mora se koristiti smola male viskoznosti što ide na štetu mehaničkim i toplinskim svojstvima

### 2.6.3. Ubrizgavanje smole u kalup

Predoblik od vlakna postavlja se u kalup, kalup se zatvara te se u njega ubrizgava smola. Osim toga, prilikom ubrizgavanja može se koristiti i vakuum. Predoblik može biti različitih oblika povezan vezivom. Popunjeni kalup se zatvara na mjestima na kojima se ubrizgavala smola te se kompozit skrućuje na sobnoj ili povišenoj temperaturi. Na slici 17 je vidljivo kako se smola ubrizgava u kalup te da ju podtlak raspoređuje u kalupne šupljine. U ovome postupku možemo koristiti gotovo sve vrste matrica i vlakana. [13]



Slika 17. Postupak ubrizgavanja smole u kalup [14]

Prednosti ubrizgavanja smole u kalup:

- Proizvode se kompoziti s visokim udjelom vlakana uz jako nizak udio pukotina u materijalu
- Smola ne predstavlja opasnost za okoliš
- Dobar izgled površine [14]

Nedostaci ubrizgavanja smole u kalup:

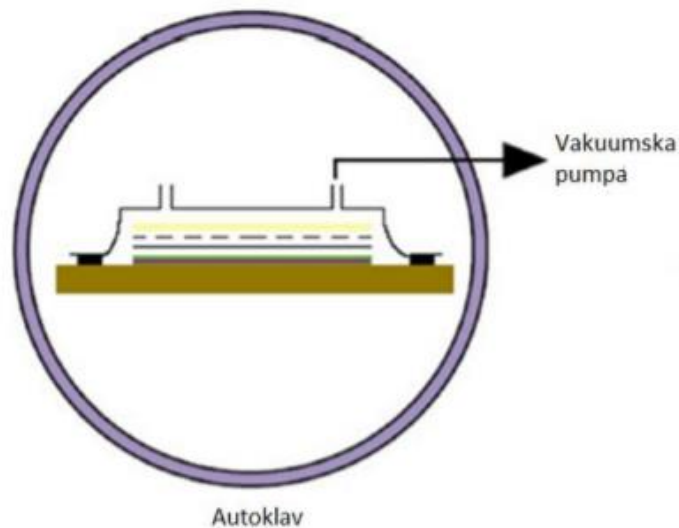
- Visoka cijena i težina alata
- Ograničena proizvodnja na manje komade

- Mogu se javiti mjesta na proizvodu koja nisu popunjena smolom što može dovesti do velikog škarta [14]

#### 2.6.4. Preprezi

Preprezi se proizvode tako da se polimernom matricom natopi svaki sloj tkanine. Takvi oblici se zamrzavaju kako bi se mogli skladištiti duže vrijeme. Prepreg je malo ljepljiv jer smola nije u potpunosti u krutom stanju. Isto tako, matrica se ne smije polimerizirati prilikom natapanja. Preprezi se nakon spomenutih koraka strojno polažu u kalup, vakuumski pakiraju i zagrijavaju na temperaturu od 120 – 180 °C. Moguće je sniziti temperaturu skrućivanja na 60 – 100 °C korištenjem kemijskih dodataka. Ako je za postizanje boljih svojstava kompozita nužno povećati tlak do 5 bara, sve se stavlja u autoklav. Postupak izrade kompozita u autoklavu je prikazan na slici 18. Kao materijal matrice koriste se: epoksidna smola, poliesteri, fenoli i visokotemperaturni plastomeri [2, 14].

Autoklav je posebna komora pod tlakom u kojoj se dovršava postupak izrade kompozita [13].



Slika 18. Postupak izrade kompozita u autoklavu [14]

Prednosti:

- Vrlo precizno podešavanje udjela smole i vlakana
- Koriste se ekološki prihvatljivi materijali

- Mogućnost impregniranja smola visoke gustoće
- Cijeli proces se može automatizirati [3].

Nedostaci:

- Visoki troškovi materijala
- Skupe autoklave ograničenih dimenzija
- Prilikom izbora materijala mora se uzeti u obzir odvijanje proces na visokim temperaturama [3].

### 3. Eksperimentalni dio

U sklopu završnog rada izrađen je hibridni kompozit od staklenih i aramidnih vlakana s matricom od epoksidne smole. Kompozit je podvrgnut pucanju s tri različita kalibra metka kako bi utvrdili njegovu otpornost na kinetičke penetratore. Također su ispitana mehanička svojstva epoksidne smole ojačane s nanočesticama  $Al_2O_3$  i obične epoksidne smole. Rezultati ispitivanja su uspoređeni kako bi se utvrdio utjecaj nanočestica na mehanička svojstva smole.

#### 3.1. Kompozitna ploča

##### 3.1.1. Karakteristike kompozita

Kompoziti su izrađeni s 4 vanjska sloja staklenih vlakana s obje strane, dok se u unutrašnjosti kompozita nalazi 6 slojeva aramidnih vlakana. Slijedi slika 19 koja prikazuje strukturu kompozitne ploče. Zbog kombinacije vlakana opisani kompozit je hibridni kompozit. Tkanje aramidnih vlakana je Twill 2x2. Debljina laminata je 0,25 cm, a težina  $170 \text{ g/m}^2$ . Korištene su dvije vrste laminata kod staklenih vlakana, rowing tkanje i mat. Na slici je prikazana struktura hibridnog kompozita. Težina staklenih laminata je  $600 \text{ g/m}^2$ .



Slika 19. Struktura kompozitne ploče

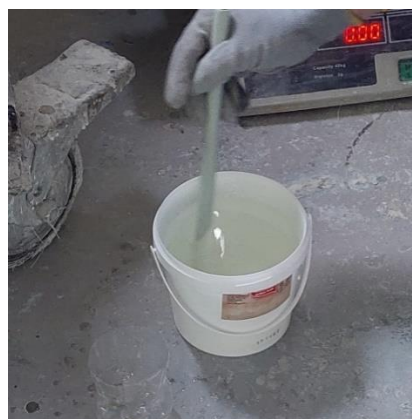
Za izradu kompozita korištena je smola tvrtke Sicomin, SR InfuGreen 810.



*Slika 20. Sicomin SR InfuGreen 810*

### **3.1.2. Izrada kompozita**

Izrađena je kompozitna ploča dimenzija 300x600 mm. Kompozit je izrađen tehnikom ručnog polaganja. Na slici 21 je prikazana smola neposredno prije korištenja za izradu kompozitnih ploča.



*Slika 21. Smola korištena u izradi kompozita*

Na slici 22 je vidljiv početak izrade kompozitne ploče. U prvom koraku mat od staklenih vlakana se natapa sa smolom i potom se s valjkom stišće kako bi se što bolje impregnirala smola u vlakna.



a)

b)

*Slika 22. Sloj mata koji je podvrgnut: a) impregniranju smole valjkom, b) natapanju smolom pomoću kista*

Nakon što se prvi sloj natopio smolom na njega postavljamo staklena vlakna rowing tkanja te ponavljamo postupak (slika 23).



*Slika 23. Rowing tkanje spremno za impregniranje smolom*

Kao baza kompozita korištena su aramidna vlakna prikazana na slici 24.



*Slika 24. Aramidna vlakna korištena u izradi kompozitnih ploča*



Sljedeći korak u izradi je polaganje tkanja aramidnih vlakana te impregniranje smole. Slika 25 prikazuje kompozit u izradi nakon što su svi slojevi aramidnih vlakana natopljeni smolom.



*Slika 25. Aramidna vlakna natopljena smolom*

Ponovljen je postupak polaganja staklenih vlakana kako bi dobili kompozit jednakih svojstava s obje vanjske strane. Nakon završetka ručnog polaganja kompozitna ploča prikazana na slici 26 skrućuje se na sobnoj temperaturi.



*Slika 26. Kompozitna ploča nakon završetka postupka ručnog polaganja*

Radi poboljšanja čvrstoće, smanjenja zaostalih naprezanja, otplinjavnja zaostalog zraka u kompozitu provodi se „post-curing“ metoda. Ona se provodi tako da se materijal zagrijava i zadržava na određenoj temperaturi u nekom vremenskom razdoblju [15].

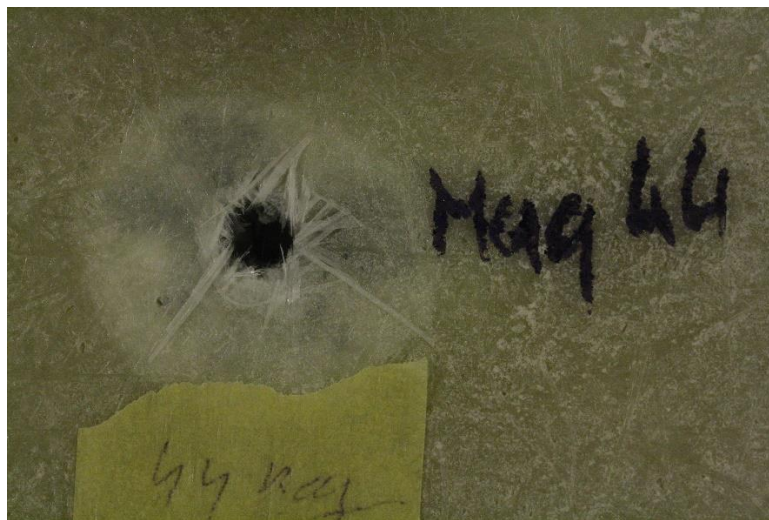
Kompozitna ploča nakon stvrdnjavanja na sobnoj temperaturi naknadno je obrađena „post-curing“ metodom. Ploča je zagrijana na 60 °C i držana na toj temperaturi dva sata.

Ploča je rezana water-jet metodom na dva jednaka dijela. Jedan dio je podvrgnut na balistički test.

### ***3.1.3. Balistički test kompozitne ploče***

Kompozitna ploča je podvrgnuta pucanju iz revolvera i pištolja. Pucano je s udaljenosti od 5 metara u kontroliranim uvjetima. Revolverom je pucano s metcima tri različita kalibra,

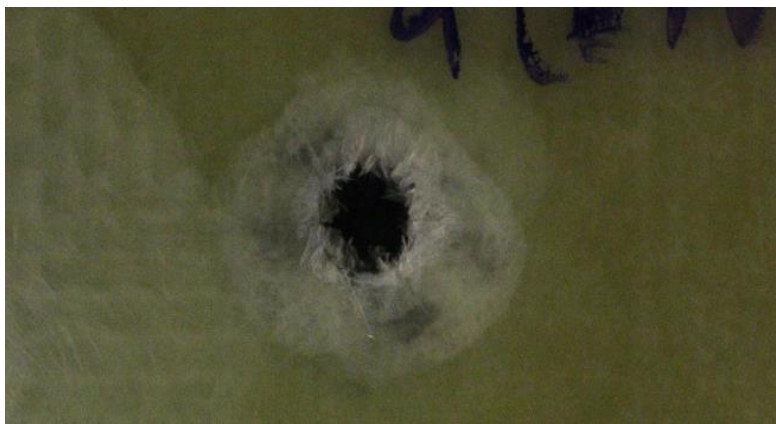
„.44 Magnum“ i „.357“. Osim s revolverom pucano je i s pištoljem koji je koristio metak kalibra „9 mm full metal jacket“. Kalibar „.44 Magnum“ i kalibar „.357“ uspjeli su probiti kompozitnu ploču, dok je ploča izdržala kalibar „9 mm full metal jacket“. Kalibri kojima je pucano iz revolvera prilikom udara u ploču deformiraju se i ostavljaju crni trag od olova. U nastavku na slikama (slika 27, slika 28, slika 29, slika 30) prikazani su ulaz u kompozitnu ploču i izlaz iz nje za metke kalibra „.44 Magnum“ i „.357“. Slika 31 prikazuje ulaz metka kalibra „9mm full metal jacket“ u kompozitnu ploču. Metak nije uspio probiti kompozitnu ploču te je nastalo oštećenje na stražnoj strani kompozitne ploče koje je prikazano na slici 32.



*Slika 27. Ulaz metka kalibra ".44 Magnum" u kompozitnu ploču*



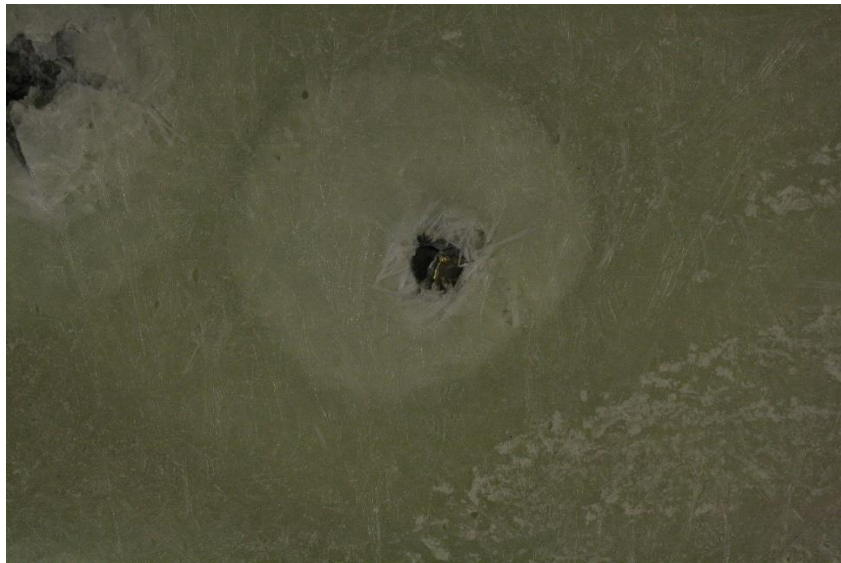
*Slika 28. Izlaz metka kalibra ".44 Magnum" iz kompozitne ploče*



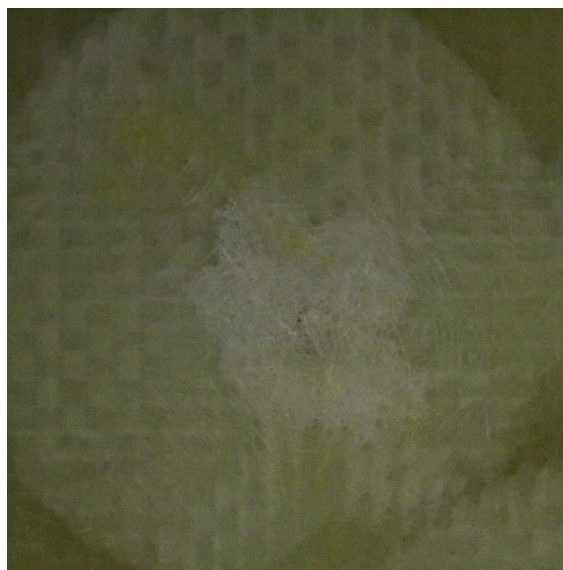
*Slika 29. Ulaz metka kalibra ".357" u kompozitnu ploču*



*Slika 30. Izlaz metka kalibra ".357" iz kompozitne ploče*



*Slika 31. Ulaz metka kalibra "9mm full metal jacket" u kompozitnu ploču*



*Slika 32. Oštećenje nastalo na stražnjoj strani kompozitne ploče od metka kalibra "9mm full metal jacket"*

## 3.2. Epoksidne ploče

### 3.2.1. Izrada ploča

Ploče su izrađene na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sveučilište u Zagrebu. Izrađene su dvije ploče, jedna od epoksidne smole bez dodataka nanočestica, a druga od epoksidne smole s dodatkom od 1 % nanočestica aluminijevog oksida ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Ploče su dimenzija 300x300 mm.

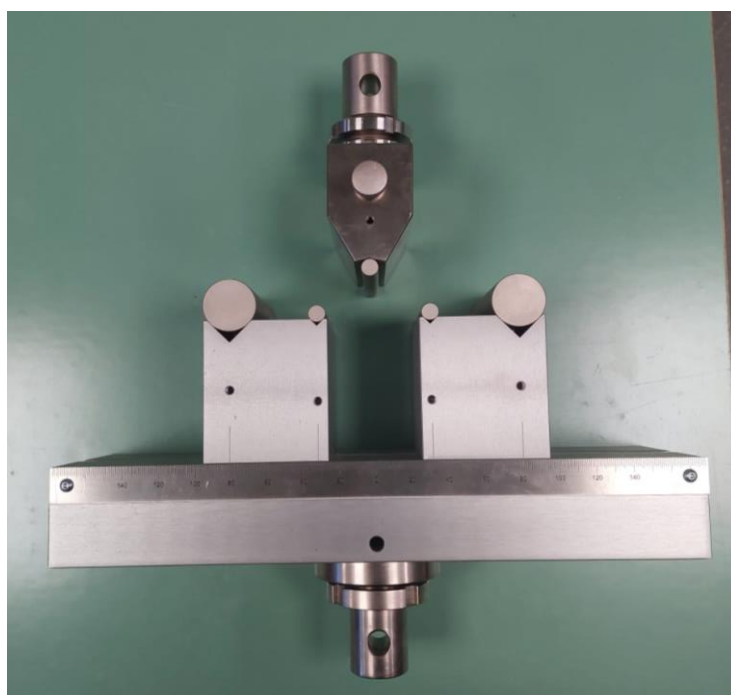
### 3.2.2. Savojno ispitivanje

Savojno ispitivanje provedeno je po normi HRN EN ISO 178 : 1993. Izrađeno je po 5 ispitnih uzoraka od svake ploče. Ispitni uzorci rezani su ručnom pilom te nakon toga brušeni kako bi se dobile što točnije dimenzije kako bi se zadovoljila norma. Savojna čvrstoća ispitana je savijanjem u tri točke, testom u Laboratoriju za polimere i kompozite. Ispitivanje je odrađeno na Shimadzu uređaju koji ima mogućnost ispitivanja na vlak, tlak i savijanje (slika 33). Duljina uzoraka je 80 mm, širina 10 mm, a debljina 4 mm.



Slika 33. Shimadzu uređaj korišten za savojno ispitivanje

Test se izvodi tako da se uzorak položi na dva oslonca i nakon toga se uzorak opterećuje s gornje strane dok računalo bilježi podatke o sili s kojom se opterećuje uzorak i automatski računa naprezanje. Uređaj ima mogućnost ispitivanja na vlak, tlak i savijanje tako da je potrebno postaviti određeni nastavak za svaku vrstu ispitivanja. Na slici 34 je prikazan nastavak korišten u savojnom ispitivanju u tri točke. Uređaj nam nudi mogućnost odabira željene brzine ispitivanja koja je u ovom ispitivanju 5 mm/min.



*Slika 34. Nastavak za savojno ispitivanje*

Ispitivanim epruvetama su prije savojnog ispitivanja određene dimenzije koje su prikazane u tablici 1 i tablici 2. Dimenzije su mjerene s mikrometrom.

*Tablica 1. Dimenzije epruveta namijenjenih za savojno ispitivanje izrađene od epoksidne smole bez ojačala*

Redni broj epruvete	Debljina, mm	Širina, mm
1	3,96	9,42
2	3,22	9,78

3	3,18	10,00
4	3,38	10,06
5	3,28	9,98

*Tablica 2. Dimenzije epruveta namijenjenih za savojno ispitivanje izrađene od epoksidne smole ojačane nanočesticama*

Redni broj epruvete	Debljina, mm	Širina, mm
1	4,25	9,87
2	4,10	9,89
3	4,24	9,85
4	4,20	9,95
5	4,11	9,75

Rezultati savojnog ispitivanja vidljivi su u tablici 3 (za epruvete bez ojačala) i tablici 4 (za epruvete s ojačalom).

*Tablica 3. Rezultati savojnog ispitivanja za epruveta bez ojačala*

Broj uzorka	Najveća sila, N	Savojna čvrstoća, MPa	Sila pucanja, N	Savojni modul elastičnosti, N/mm <sup>2</sup>
1	123	80	44	1869,9
2	113	107	40	3161,3
3	98	93	33	2685,3
4	110	92	66	2484,4
5	114	102	46	3010,7
Prosjek	112	95	46	2642,3



Tablica 4. Rezultati savojnog ispitivanja za epruvete ojačane nanočesticama

Broj uzorka	Najveća sila, N	Savojna čvrstoća, MPa	Sila pucanja, N	Savojni modul elastičnosti, N/mm <sup>2</sup>
1	106	57	106	3335,6
2	185	107	185	3265,8
3	214	116	103	3330,6
4	156	85	156	3117,1
5	223	130	113	3963,6
Prosjek	177	99	134	3402,5

Iz dobivenih rezultata je vidljivo da nanočestice utječu na sve vrijedosti ispitivanja osim na savojnu čvrstoću. Maksimalna sila, sila pucanja i savojni modul elastičnosti povećavaju se s udjelom nanočestica. Možemo zaključiti da nanočestice doprinose savojnim svojstvima epoksidne smole.

### 3.2.3. Vlačno ispitivanje

Vlačno ispitivanje provedeno je u Laboratoriju za polimere i kompozite na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu. Za ispitivanje korišten je uređaj Shimadzu na kojem je provedeno i savojno ispitivanje. Uređaj je prikazan na slici 35..

Izrađeno je 6 epruveta iz ploče bez ojačala i 5 epruveta iz ploče s ojačalima. Ispitni uzorci su rezani ručnom pilom. Provedeno je ispitivanje po normi HRN EN ISO 5274. Ispitni uzorci se stežu na uređaj i nakon toga vlačno opterećuju dok ne dođe do pucanja epruvete. Na slici 36 prikazana je puknuta epruveta nakon vlačnog ispitivanja.

Brzina mjerenja je 2 mm/min.



Slika 35. Shimadzu uređaj korišten za vlačno ispitivanje



Slika 36. Epruveta nakon vlačnog ispitivanja

Rezultati vlačnog ispitivanja epruveta vidljivi su u tablici 5.

*Tablica 5. Rezultati vlačnog ispitivanja*

Uzorak	Vlačna čvrstoća, MPa	Najveća sila, N
1 (relevantna)	64,1	2167
2 (relevantna)	70,5	2400
3 (relevantna)	73,2	2439
4 (relevantna)	68,8	2433
5 (relevantna)	63,5	2055
6 (relevantna)	72,0	2710
Srednja vrijednost	68,7	2367
1 (ojačana)	70,5	2833
2 (ojačana)	54,0	2282
3 (ojačana)	45,3	1724
4 (ojačana)	68,6	2678
5 (ojačana)	73,5	3142
Srednja vrijednost	62,4	2532

Iz rezultata se zaključuje da kod ojačanih epruveta imamo veliko rasipanje rezultata. Srednja vrijednost vlačne čvrstoće relevantnih epruveta je veća nego kod ojačanih. Zaključuje se nanočestice nepovoljno utječu na vlačnu čvrstoću. Za razliku od vlačne čvrstoće, srednja vrijednost najveće sile koju epruveta izdržava, veća je kod ojačanih epruveta.

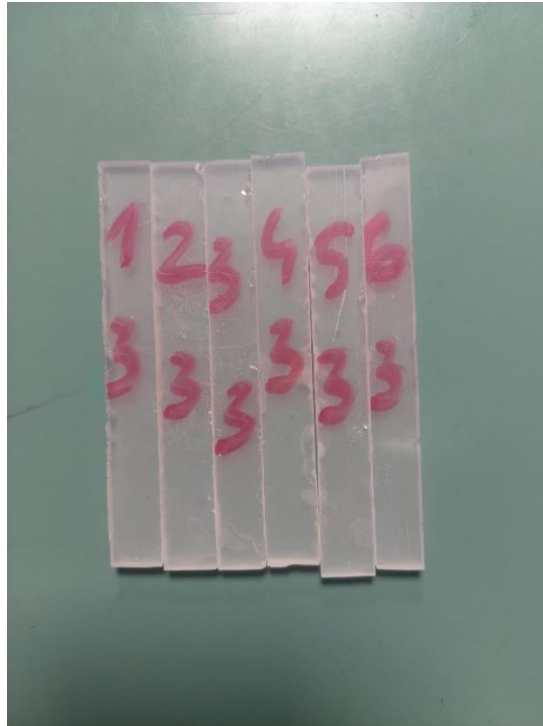
### **3.2.4. Udarni rad loma**

Kako bi se utvrdilo ponašanje polimernih i metalnih materijala u uvjetima udarnog opterećenja provodi se ispitivanje udarnog rada loma. Ispitivanje se provodi na Charpyevom batuu koji lomi epruvetu te se na njemu očitava vrijednost udarnog rada loma. Charpyev bat na kojemu je provedeno ispitivanje vidljiv je na slici 39. Određene su dimenzije epruveta te su nakon toga podvrgnute ispitivanju udarnog rada loma. U tablici 6 su vidljive dimenzije epruveta i rezultati mjerenja udarnog rada loma. Ispitivanje je provedeno u Laboratoriju za polimere i kompozite na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu.

U svrhu ovog ispitivanja izrađeno je po 6 epruveta iz svake ploče. Ispitivanje je provedeno po normi HRN EN ISO 179 – 1 : 2000. Duljina epruveta je 80 mm, širina 10 mm, a debljina 4 mm. Na slici 37 prikazane su epruvete bez ojačala namijenjene za ispitivanje udarnog rada loma, a na slici 38 s ojačalom.



*Slika 37. Epruvete izrađene od epoksidne smole bez ojačala koje se podvrgavaju ispitivanja udarnog rada loma*



*Slika 38. Epruvete izrađene od epoksidne smole ojačane nanočesticama koje se podvrgavaju ispitivanju udarog rada loma*



*Slika 39. Charpyev bat*

Tablica 6. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma

Redni broj epruvete	Širina, mm	Debljina, mm	Udarni rad loma, J
1 (referentna)	8,84	3,50	0,9
2 (referentna)	9,32	3,48	2,35
3 (referentna)	9,34	3,38	1,85
4 (referentna)	9,12	3,30	1
5 (referentna)	9,00	3,34	0,6
6 (referentna)	9,20	3,30	0,1
1 (ojačana)	10,38	4,28	0,75
2 (ojačana)	10,44	4,28	0,4
3 (ojačana)	9,22	4,25	2,25
4 (ojačana)	10,42	4,12	0,95
5 (ojačana)	10,24	4,12	0,5
6 (ojačana)	10,04	4,00	2

Analizom rezultata zaključuje se da uzorci izrađeni od epoksidne smole ojačane nanočesticama ne pokazuje bolje rezultate u odnosu na uzorke bez ojačala. Rasipanja rezultata su velika što može biti posljedica mikropukotina ili zaostalog zraka u materijalu.

### 3.3. Rasprava

U ovome završnom radu cilj je bio izraditi kompozitnu ploču koja će biti dovoljno kvalitetna za balističku primjenu. S obzirom na rezultate balističkog testa možemo zaključiti da kompozitna ploča, izrađena od epoksidne smole, staklenih i aramidnih vlakana, nije pokazala zadovoljavajuće rezultate otpornosti na prodiranje mehaničkih penetratora. Metci ispućani iz revolvera su zbog veće sile udarca uspjeli probiti kompozitnu ploču. Kako bi poboljšali otpornost na prodiranje mehaničkih penetratora trebao bi se povećati udio aramidnih vlakana koja su žilavija od staklenih ili povećati debljinu ploče.

Dvije ploče od epoksidne smole, jedna ojačana nanočesticama, a druga bez ojačala podvrgnute su ispitivanjima mehaničkih svojstava (vlačno ispitivanje, savojno ispitivanje, udarno ispitivanje). Suprotno očekivanju ploča ojačana nanočesticama nije pokazala značajno bolja

svojstva u odnosu na ploču bez ojačala. Možemo primijetiti da su nanočestice utjecale jedino pri savojnom opterećenju. Primjećujemo veliko rasipanje rezultata kod udarnog rada loma zbog čega rezultati nisu mjerodavni za analizu. To je posljedica mikropukotina koje se javljaju u materijalu. Moguće je da se u materijalu pojavljuje i zaostali zrak koji nepovoljno utječe na ovu analizu. Kod vlačnog ispitivanja nanočestice su utjecale negativno na vlačnu čvrstoću epruveta, ali su dovele i do povećanja najveće sile koju epruveta može izdržati prije puknuća. Obzirom da nisu uočene velike prednosti nanočesticama ojačane smole, donesen je zaključak da nema potrebe za ojačavanjem epoksidne smole nanočesticama aluminijevog oksida osim ako je potrebno poboljšati svojstva u savojnom području. Osim toga sam proces izrade smole ojačane česticama je zahtjevan i spor.

## 4. ZAKLJUČAK

Na temelju ispitivanja provedenih u ovom radu može se zaključiti:

- Hibridni kompoziti s matricom od epoksidne smole ojačane staklenim i aramidnim vlaknima nije pokazao visoku otpornost na prodiranje mehaničkih penetratora
- Kako bi kompozitna ploča osigurala dovoljno dobru zaštitu mora se povećati debljina ploče ili pokušati s nekom drugom kombinacijom vlakana
- Metci kalibra „.44“ i „.357“ uspijevaju probiti kompozitnu ploču te se pri udaru s pločom raspršuju i ostavljaju trag od olova
- Izrađene su dvije ploče od epoksidne smole, ojačana nanočesticama i bez ojačala
- Ploča ojačana nanočesticama ne pokazuje znatno bolja svojstva od ploče bez ojačala osim kod savojnog ispitivanja
- Nanočestice u epoksidnoj smoli ne utječu na vlačna svojstva
- Savojna svojstva se s povećanjem udjela nanočestica poboljšavaju
- Ispitivanje žilavosti na Charpyevom batu ima velike oscilacije u rezultatima iz čega možemo zaključiti da nanočestice ne utječu na žilavost



**LITERATURA**

- [1] B. Franjić, M. Milosavljević: Forenzička balistika, Sarajevo, 2009.
- [2] Filetin T., Kovačiček 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.
- [3] Z. Schauerl: Kompozitni materijali – nastavni materijali, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 2018.
- [4] Gibbons, J. H. : Advanced Materials by Design, Washington D.C., 1988.
- [5] Jauk F. : Karakterizacija materijala kompozitnih cijevi, završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2021.
- [6] Hesseler, S., Stapleton, S. E., Appel, L., Manin, B. : Advances in Modeling and Simulation in Textile Engineering, 2021.
- [7] <https://www.fsb.unizg.hr/kmb/200/230/kmb234.htm> , dostupno 10..02.2022.
- [8] Amer, A. A. R., Abdullah, M. M. A. B., Ming, L. Y., Tahir, M. F. M. : Performance and Properties of Glass Fiber and Its Utilization In Concrete, 2018.
- [9] Jassal, M., Ghosh, S., Aramid fibers – an overview, Indian Journal of Fibre and Textile Research, 2002.
- [10] Masuelli, M. A., : Fiber Reinforced Composite, 2013.
- [11] Danko Ćorić, Tomislav Filetin – Materijali u zrakoplovstvu, interna skripta, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 2011.
- [12] Hussein, G., : Composite Materials, University of Bagdad, Bagdad
- [13] Akovali G.: Handbook of Composite Fabrication, RAPRA Technology LTD., Shawbury, Shrewsbury, Shropshire, UK, 2001.
- [14] T. Filetin, G. Marić : Napredne tehnologije materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [15] Moller, J., Berry., R. J. : On the Nature of Epoxy Resin Post-Curing, 2020.