

Ispitivanje polimernog kompozita ojačanog s UHMWPE vlaknima

Runje, Marin

Undergraduate thesis / Završni rad

2025

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:235:513755>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-26**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Marin Runje

Zagreb, 2025.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Zdravko Schauperl, dipl. ing.
Dr. sc. Dalibor Viderščak, mag. ing. mech.

Student:

Marin Runje

Zagreb, 2025.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Zdravku Schauperlu i komentoru dr. sc. Daliboru Viderščaku na savjetima i pomoći tijekom izrade ovog završnog rada.

Također se zahvaljujem i prof. dr. sc. Zoranu Domitranu i tvrtki Domitran Novitas d.o.o. na pomoći u praktičnom dijelu, kao i g. Miroslavu Kavuru koji je omogućio balističko testiranje.

Marin Runje



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 / 25 – 06 / 1	
Ur.broj: 15 – 25 –	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Marin Runje** JMBAG: **0035236414**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Ispitivanje polimernog kompozita ojačanog s UHMWPE vlaknima**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Testing of polymer composite reinforced with UHMWPE fibers**

Opis zadatka:

Polimerni kompoziti zbog svojih mehaničkih svojstava a male gustoće predstavljaju dobar materijal za sportsku i industrijsku primjenu. U ovom radu potrebno je izraditi uzorke polimernog kompozita ojačanog UHMWPE vlaknima.

U teorijskom dijelu potrebno je dati pregled kompozitnih materijala, njihovu podjelu te tehnološke postupke njihove proizvodnje.

U eksperimentalnom dijelu potrebno je napraviti uzorke kompozitnog materijala. Pri tome treba koristiti polimernu matricu i ojačalo od UHMWPE vlakana i od tog materijala izraditi uzorke različite debljine. Na uzorcima je potrebno provesti ispitivanja osnovnih mehaničkih i uporabnih svojstava te analizu mikrostrukture. Na temelju dobivenih rezultata potrebno je donijeti zaključke o povezanosti strukture i svojstava polimernih kompozita ojačanih UHMWPE vlaknima.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2024.

Datum predaje rada:

1. rok: 20. i 21. 2. 2025.
2. rok: 10. i 11. 7. 2025.
3. rok: 18. i 19. 9. 2025.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 24. 2. – 28. 2. 2025.
2. rok: 15. 7. – 18. 7. 2025.
3. rok: 22. 9. – 26. 9. 2025.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Zdravko Schauerl

dr. sc. Dalibor Vidrišćak

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Damir Godec

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS OZNAKA	III
POPIS KRATICA	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY	VII
1. UVOD.....	1
2. KOMPOZITNI MATERIJALI.....	2
2.2. Materijali matrice	3
2.2.1. Epoksidne smole	3
2.3. Kompozitna ojačala.....	4
2.3.1. Strukturni kompoziti	4
2.3.2. Kompoziti ojačani česticama	5
2.3.3. Kompoziti ojačani vlaknima	7
3. POLIMERNI KOMPOZITI OJAČANI POLIETILENSKIM VLAKNIMA (UHMWPE)	9
3.1. Svojstva UHMWPE vlakna	9
3.2. Proizvodnja polimernih kompozita koji su ojačani polietilenskim vlaknima.....	10
3.3. Primjena UHMWPE vlakna.....	12
4. EKSPERIMENTALNI DIO	14
4.1. Izrada uzoraka	15
4.2. Balističko testiranje kalota	23
5. ZAKLJUČAK.....	30
LITERATURA.....	32

POPIS SLIKA

Slika 1. Podjela kompozita prema obliku ojačala [5].....	4
Slika 2. Prikaz slojevitog kompozita [6]	5
Slika 3. Prikaz sendvič konstrukcije [7].....	5
Slika 4. Prikaz kompozita ojačanog disperzijom [8].....	6
Slika 5. Prikaz kompozita ojačanog velikim česticama [8]	6
Slika 6. Podjela kompozita s obzirom na orijentaciju vlakana [5].....	7
Slika 7. UHMWPE vlakna za pletenje [9]	9
Slika 8. Mokro ručno laminiranje [10].....	11
Slika 9. Raznovrsnost vlakna [11].....	11
Slika 10. Primjena UHMWPE vlakna [12]	13
Slika 11. Korištena UHMWPE vlakna.....	15
Slika 12. Katalizator i epoksidna smola	16
Slika 13. Izrezana UHMWPE vlakna.....	16
Slika 14. Kalup za prvu kalotu	17
Slika 15. Prva kalota nakon izrade	18
Slika 16. Površinska obrada prve kalote	18
Slika 17. Peć u kojoj su se pekle kalote	19
Slika 18. Izrada druge kalote.....	20
Slika 19. Vađenje kalote.....	20
Slika 20. Pečenje prve i druge kalote	21
Slika 21. Izrađena i osušena treća kalota.....	22
Slika 22. Rezanje i obrada treće kalote	22
Slika 23. Pečenje treće kalote.....	23
Slika 24. Prikaz klasifikacije oružja i kalibra [13]	24
Slika 25. Oružje korišteno za testiranje (a) .22 LR, b) 9 mm FMJ c) .38 Special FMJ ravni vrh)	24
Slika 26. Vanjska i unutarnja strana prve kalote (.22 LR)	25
Slika 27. Vanjska i unutarnja strana prve kalote (9 mm)	25
Slika 28. Vanjska i unutarnja strana druge kalote (.22 LR)	26
Slika 29. Vanjska i unutarnja strana druge kalote (9 mm)	26
Slika 30. Vanjska strana treće kalote (.22 LR).....	27
Slika 31. Vanjska i unutarnja strana treće kalote (9 mm)	28
Slika 32. Vanjska strana treće kalote (.38 special FMJ ravni vrh).....	28

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
d	μm	promjer disperzija i čestica
h	mm	razmak između hitaca
L	m	udaljenost mete od mjesta pucanja
T	$^{\circ}\text{C}$	temperatura
t	h	vrijeme
V	l	volumen
v	m/s	brzina metka
X_c	%	postotak kristalnosti

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
ASTM	Američko društvo za ispitivanje i materijale
EN	Europski standard (European Standard)
FMJ	zrno kod kojega je jezgra zrna u potpunosti obavijena metalnom košuljicom s izuzetkom baze zrna (full metal jacket)
ISO	Međunarodna organizacija za standardizaciju (International Organization for Standardization)
lr	dugačka puška (long rifle)
UHMPWPE	polietilen ultravisoke molekularne mase

SAŽETAK

U ovom završnom radu provedena je izrada i analiza kompozitnih kalota, odnosno njihovo balističko testiranje u funkciji kacige za vojnu industriju.

Teorijski dio obuhvaća uvod u kompozitne materijale, te njihovu podjelu, svojstva i primjenu. Poblize su opisana UHMWPE vlakna zbog svojih specifičnih karakteristika i širokog spektra upotrebe. Istaknuti su načini izrade polimernih kompozita, te svojstva zbog kojih su ovi materijali adekvatni za antibalističku zaštitu.

U eksperimentalnom dijelu izrađeni su uzorci u obliku kalota, te je provedeno balističko testiranje. Opisani su dobiveni rezultati i povezanost otpornosti na prodiranje s obzirom na broj slojeva UHMWPE vlakna.

Ključne riječi: polimerni kompoziti, kalote, balistika, otpornost na prodiranje, UHMWPE vlakna

SUMMARY

In this Bachelor thesis, composite spherical caps were manufactured and analyzed. They were ballistically tested to imitate military helmets.

Theoretical part covers introduction of composites, their classification, properties and applications. UHMWPE fibers were closely described for their specific characteristics and wide spectrum of usage. Methods of manufacturing polymer composites were pointed out and their properties benefiting ballistic protection equipment.

In the experimental part samples in the shape of spherical caps were manufactured and tested to withstand ballistic penetrators. Based on testing, results were described and number of UHMWPE layers were correlated to impact resistance.

Key words: polymer composites, spherical caps, ballistics, impact resistance, UHMWPE fibers

1. UVOD

Kompoziti su materijali sastavljeni od dvije ili više komponenti koje zajedno tvore sustav s poboljšanim svojstvima u odnosu na pojedinačne komponente. Kompoziti se obično sastoje od osnovne matrice (koja daje oblik i povezuje materijal) i ojačanja (koje povećava mehanička svojstva poput čvrstoće, žilavosti ili krutosti). Zbog toga imaju široku primjenu u raznim granama industrije. U ovom radu je istražena mogućnost primjene polimernog kompozita ojačanog UHMWPE vlaknima u balističkoj zaštiti.

Polietilen ultravisoke molekularne mase (UHMWPE) karakteriziraju izvrsna svojstva poput [1]:

- visoke vlačne čvrstoće,
- male gustoće,
- dobre otpornosti na udarce,
- izvanredne kemijske postojanosti,
- dobre otpornosti na koroziju.

UHMWPE se često koristi u vojnoj i zrakoplovnoj industriji, te ima primjenu u sportu i biomedicini. Uz sve navedeno balistička zaštita je glavni razlog primjene kompozita koji su ojačani UHMWPE vlaknima. Suprotno tradicionalnim kompozitima uloga matrice nije prijenos opterećenja na vlakna, već dopuštanje vlaknima da reagiraju s metkom ili drugim projektilom pri udarcu visoke brzine. Mehanička reakcija polimernog kompozita ojačanog s UHMWPE vlaknima tijekom balističkog opterećenja je rezultat zajedničkog djelovanja mehaničkih ponašanja kao što su vlačna, tlačna i međuslojna delaminacija, gdje je apsorpcija energije pri vlačnoj deformaciji temeljno svojstvo ovog materijala [2].

2. KOMPOZITNI MATERIJALI

2.1. Osnovno o kompozitima

Kompoziti su materijali koji se definiraju kao kombinacija dvaju ili više materijala u svrhu postizanja boljih i specifičnih svojstava nego što te komponente imaju zajedno. Svaki materijal u kompozitu zadržava svoja mehanička, fizikalna i kemijska svojstva.

Konstituenti koji čine kompozitni materijal se najčešće sastoje od dvije komponente: matrice i ojačala. Granica između konstituenata je vidljiva.

Najčešća zadaća matrice je zaštita i povezivanje ojačala, te ima ulogu prijenosa opterećenja na ojačalo.

Ojačalo je nosivi dio kompozita i osigurava visoku čvrstoću, otpornost na trošenje, krutost i sl.

Ponašanje kompozita ovisi o svojstvima, rasporedu, veličini i obliku konstituenata, te o vezi i kompatibilnosti matrice i ojačala [3].

Prednosti kompozita su:

- Dinamička izdržljivost
- Mala gustoća
- Jednostavnost naknadne obrade
- Dobra žilavost

Nedostaci kompozita su:

- Anizotropnost svojstava
- Mala mogućnost recikliranja i ponovne upotrebe
- Zbog sadržavanja polimera često nisu ekološki prihvatljivi

Glavne podjele kompozita su s obzirom na materijal matrice: metalna, polimerna i keramička, te s obzirom na oblik ojačala: čestice, vlakna i strukturni kompoziti.

2.2. Materijali matrice

Matrica može biti metalna, keramička ili polimerna.

Kod primjene metalne matrice to su najčešće aluminij, titan, magnezij ili bakar. Kompoziti s takvim matricama imaju visoku specifičnu čvrstoću i krutost, te su dobri vodiči. Jedan od glavnih razloga ojačavanja metalne matrice je poboljšavanje mehaničkih svojstava pri visokim temperaturama. Uporaba ove vrste kompozita je ograničena visokom cijenom i kompliciranom izradom.

Kod keramičkih matrica koriste se oksidne keramike kao npr. aluminijev i silicijev oksid, te neoksidne poput silicijevog karbida. Takve kompozite karakterizira dobra otpornost na visokim temperaturama, te odlična tribološka svojstva. Razlog ojačavanja keramike je taj što sama ima nisku lomnu čvrstoću, pa se u svrhu povećanja tog svojstva ojačava vlaknima.

Kompoziti s polimernom matricom sadrže polimernu smolu te su ojačani vlaknima. Najčešće se primjenjuju poliesterske, fenolne i epoksidne smole. Takvi kompoziti su najzastupljeniji jer postižu dobra mehanička svojstva poput žilavosti i otpornosti na koroziju, a prednost je i relativno niska cijena, te jednostavnost proizvodnje [4].

2.2.1. Epoksidne smole

Epoksidne smole su polimeri s najmanje dvije epoksidne skupine. Svojstva koja karakteriziraju ove smole su: odlična adhezija, kemijska postojanost, vrlo dobra žilavost i niska viskoznost. Uz pomoć raznih umrežavala i modifikatora mogu se stvoriti specifične karakteristike koje služe u svrhu primjene kao premazi, ljepila, te u proizvodnji ojačanih plastika i kompozita [5].

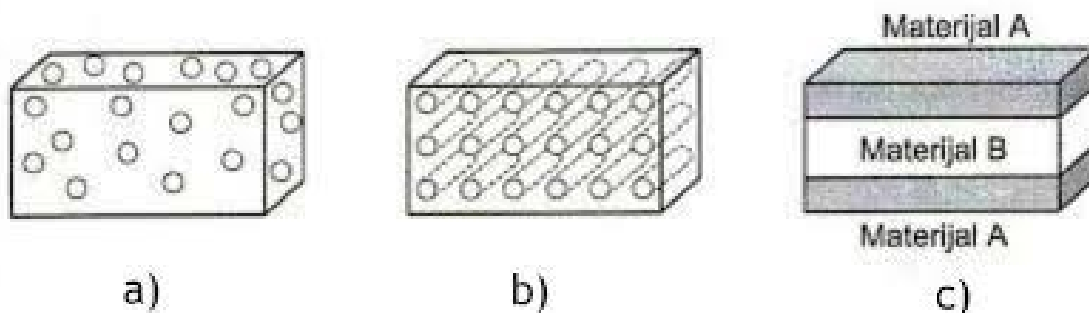
Bitan dio pri izradi kompozita s matricom od epoksidne smole je izlaganje očvrsnute smole na ili iznad temperature stvrdnjavanja tijekom dužeg perioda vremena (post-curing postupak). Na ovaj način se postiže veća čvrstoća i smanjuju zaostala naprezanja. Najčešće se izvodi nakon što je kompozit bio izložen sobnoj temperaturi preko 12 h, na temperaturama do 150 °C.

2.3. Kompozitna ojačala

Kompoziti s obzirom na oblik ojačala se dijele na (slika 1):

- a) Česticama ojačane kompozite
- b) Vlaknima ojačane kompozite
- c) Strukturne kompozite (slojeviti kompoziti i sendvič konstrukcije)

Slika 1 prikazuje gore navedenu podjelu.



Slika 1. Podjela kompozita prema obliku ojačala: a) čestice b) vlakna c) strukturni kompoziti [5]

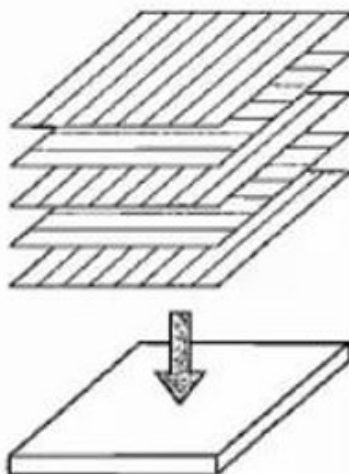
2.3.1. Strukturni kompoziti

Strukturni kompoziti se dijele na:

- slojevite konstrukcije
- sendvič konstrukcije.

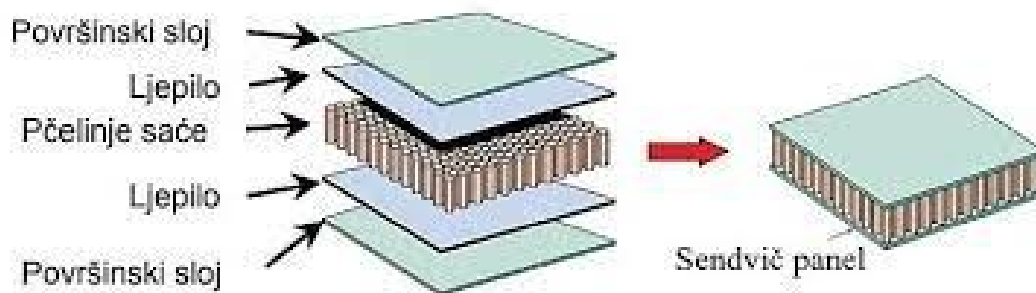
Kod ove vrste kompozita veliku važnost je potrebno posvetiti geometrijskom rasporedu konstituenata od kojih se kompozit sastoji.

Kompoziti sa slojevitom konstrukcijom (slika 2) se sastoje od dvodimenzionalnih slojeva, tj. panela s određenim smjerom visoke čvrstoće te su međusobno dobro povezani. To su često slojevi papira, tkanine, furnira ili vlakana. Primjeri ovakvih kompozita su materijali s galvanskim prevlakama, debljim zaštitnim slojevima i tankim prevlakama, laminati, bimetalni i sl.



Slika 2. Prikaz slojevitog kompozita [6]

Sendvič konstrukcije (slika 3) se sastoje od tankih vanjskih slojeva koji su međusobno povezani nekim lakšim materijalom koji se koristi za popunjavanje (najčešće polimerna ili aluminijska pjena). Bez obzira na to što vanjski i unutarnji slojevi nemaju veliku čvrstoću i krutost, kompoziti s ovakvom vrstom konstrukcije zadovoljavaju oba svojstva. Najpoznatiji primjer takvog materijala je karton.



Slika 3. Prikaz sendvič konstrukcije [7]

2.3.2. Kompoziti ojačani česticama

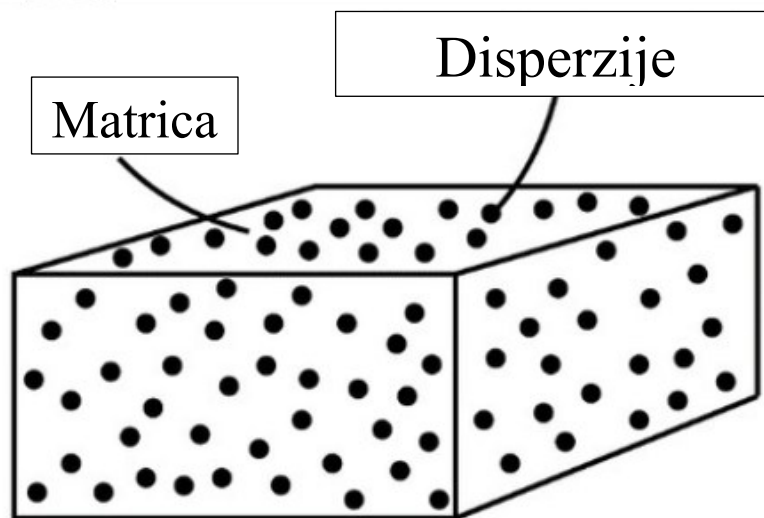
Kompoziti koji su ojačani česticama funkcioniraju na način da su tvrde i krhke čestice jednoliko raspoređene, te obavijene mekom i žilavom matricom.

Kod ove vrste kompozita razlikuju se dvije podskupine čestica:

- disperzije
- velike čestice.

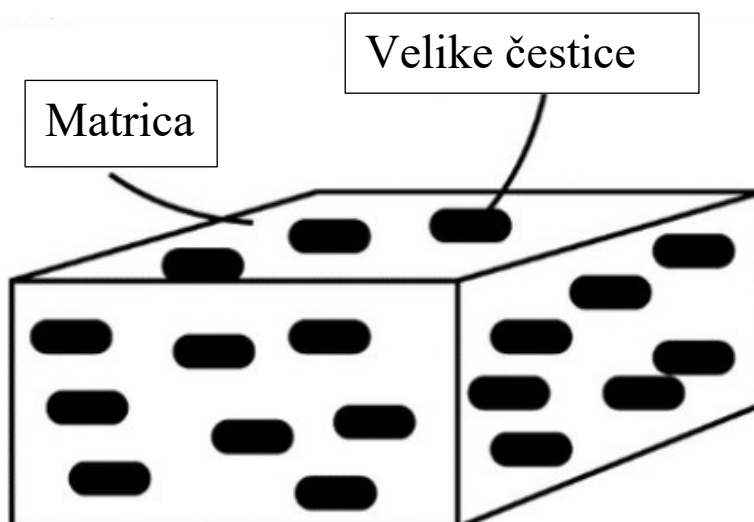
Disperzije imaju promjer manji od $0,1 \mu\text{m}$, a velike čestice veći od $0,1 \mu\text{m}$.

Kompoziti ojačani disperzijama (slika 4) imaju interakciju matrice i čestica na atomskoj i molekularnoj razini. Disperzije ometaju i ograničavaju gibanje dislokacija dok matrica nosi glavni dio opterećenja. Takvim mehanizmom se povećava čvrstoća zbog ograničene plastične deformacije.



Slika 4. Prikaz kompozita ojačanog disperzijom [8]

Kod kompozita koji su ojačani velikim česticama (slika 5), one imaju tvrdi i čvrstu fazu, koja ograničava kretanje matrice. Odnos matrice i čestica je na većoj razini od atomske i molekulske, a stupanj ojačanja ovisi o jakosti povezivanja između konstituenata.



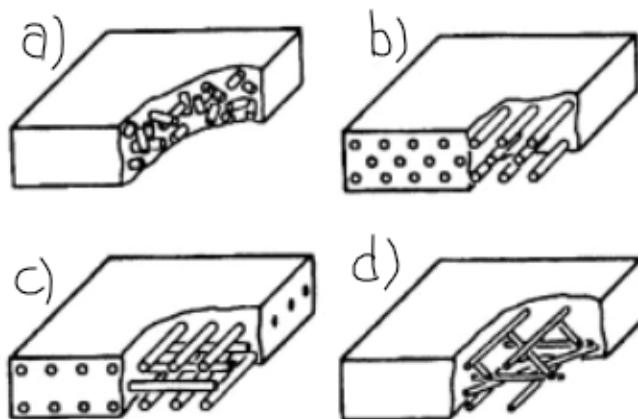
Slika 5. Prikaz kompozita ojačanog velikim česticama [8]

2.3.3. Kompoziti ojačani vlaknima

Kompoziti ojačani vlaknima nastaju tako da se u mekanu matricu dodaju vlakna raznih materijala i parametara. Uloga matrice je prijenos opterećenja s jednog vlakna na drugo, te na taj način kompozit postiže oblikovljivost i duktilnost, pošto vlakna imaju ulogu nositelja naprezanja.

Kompoziti ojačani vlaknima su podijeljeni s obzirom na raspored vlakna na (slika 6):

- diskontinuirana slučajno usmjerena vlakna
- kontinuirana jednosmjerna vlakna
- ortogonalno raspoređena vlakna
- višesmjerno usmjerena vlakna



Slika 6. Podjela kompozita s obzirom na orijentaciju vlakana [5]

Različiti načini orijentiranja i duljine vlakna uvelike utječu na svojstva kompozita. Najbolja svojstva daju kontinuirana vlakna, no teško ih je proizvesti i ugraditi u matricu. Diskontinuirana vlakna zbog duljine imaju utjecaj na smanjenje čvrstoće, te je teže predvidjeti svojstva kompozita, no njihova prednost je što se puno lakše ugrađuju u matricu.

S obzirom na promjer vlakna razlikuju se: viskeri, žice i vlakna

Viskeri su monokristali koje karakterizira velik omjer duljine i promjera, te pravilna građa. Imaju jako visok stupanj kristalnosti, te visoku čvrstoću, a mana im je visoka cijena.

Žice imaju relativno velik promjer, a najčešće su rađene od čelika, volframa i molibdena.

Vlakna su prepoznatljiva kao snopovi niti koje idu na daljnju preradu ovisno o cilju i funkciji. Način pletenja ima utjecaj na željena svojstva kompozita.

Vlakna polietilena ultravisoke molekularne mase (UHMWPE), korištena u ovom radu, spadaju u ovu skupinu ojačala.

3. POLIMERNI KOMPOZITI OJAČANI POLIETILENSKIM VLAKNIMA (UHMWPE)

3.1. Svojstva UHMWPE vlakna

Vlakna polietilena ultravisoke molekularne mase (slika 7) imaju mnoga izvrsna svojstva kao što su visoka vlačna čvrstoća, niska gustoća, otpornost na prodiranje i izvanredna kemijska postojanost. Svrstavaju se među najčvršća umjetna vlakna, a za razliku od mnogih drugih, nisu osjetljiva na prisustvo vode. UHMWPE vlakna imaju izrazito visok postotak kristalnosti (>99%) i makromolekularne orijentacije (>95%) što rezultira u visokom modulu elastičnosti i čvrstoći. Pri lomu, njihova deformacija je vrlo mala zbog dobre sposobnosti apsorpiranja energije [2].

Mana ovih vlakna je otežano integriranje u matricu epoksidne smole. Njihovi dugi lanci s gore navedenim svojstvima su izrazito inertni. Nizak afinitet prema vodi također ne ide u korist, pa ovaj problem ograničava širok spektar primjene UHMWPE vlakna. Ovaj problem povezanosti s matricom najčešće se rješava modifikacijama vlakna ili matrice.



Slika 7. UHMWPE vlakna za pletenje [9]

3.2. Proizvodnja polimernih kompozita koji su ojačani polietilenskim vlaknima

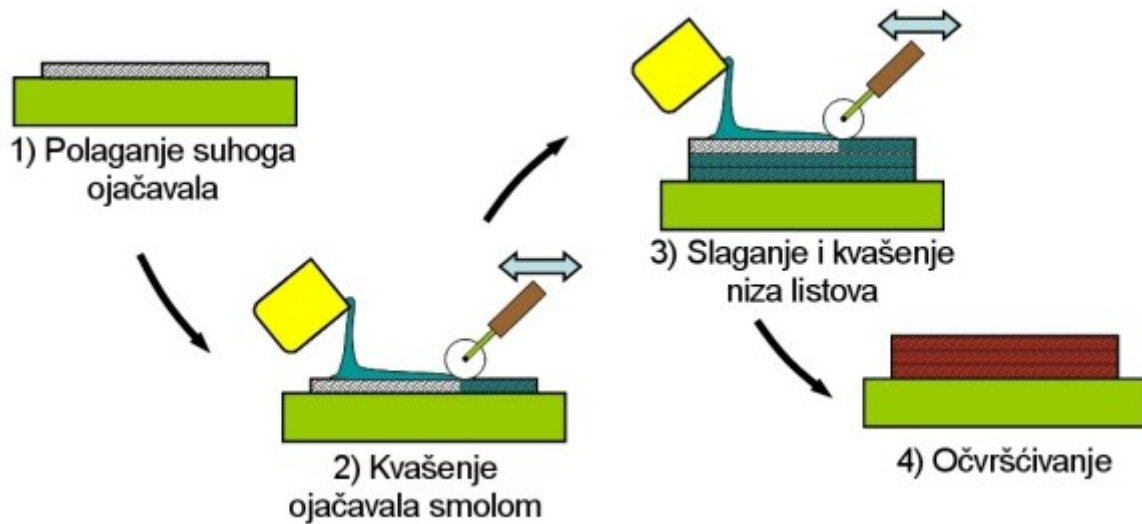
Zbog složene strukture kompozita i potrebe postizanja međudjelovanja na graničnoj površini, postupci proizvodnje moraju biti prilagođeni materijalima matice i punila te omogućiti dobivanje željenih oblika izratka.

Proizvodnja kompozita uključuje nekoliko procesa: oblikovanje ojačala, infuziju matice oko vlakana ili čestica punila, konsolidaciju kompozita, te prijenos topline unutar kompozita, što za duromere uključuje reakcije očvršćivanja, a za plastomere hlađenje i moguću kristalizaciju iz taline. Cilj proizvodnje je da ona bude što kvalitetnija, brža i jeftinija, no to je vrlo teško postići.

Najzastupljeniji postupci proizvodnje su:

- mokro ručno laminiranje
- štrcanje (raspršivanje)
- izravno prešanje
- slaganje preprega
- injekcijsko prešanje
- membransko oblikovanje
- prešanje kapljevina
- pultrudiranje
- oblikovanje valjcima
- namotavanje

Za izradu uzoraka u ovom radu korišten je postupak mokrog ručnog laminiranja (slika 8). To je ručni, jeftin način proizvodnje. Suho ojačalo se slaže na podlogu, kvasi smolom, te se impregnira valjkom (ručno). Za postizanje željenih dimenzija, odnosno debljine, niz slojeva se može slagati jedan na drugoga. Nakon postizanja željene debljine, kreće očvršćivanje smole, a uzorak je spreman za završnu obradu (rezanje, brušenje, bušenje i sl.) tek kad postane dovoljno čvrst. Prednosti ovog postupka je dobra kontrola nad ojačalom, ali mana je ljudski faktor odnosno, kvaliteta izrade ovisi o vještini operatera što ostavlja malo prostora za unapređenje postupka proizvodnje [10].



Slika 8. Mokro ručno laminiranje [10]

Za proizvodnju kompozitnih vlakna postoji širok spektar tehnika i metoda. Te metode uključuju tkanje, pletenje i šivanje u duge plahte ili mat strukture (slika 9). U današnje vrijeme brzu izradu vlakna potpomaže visoka razina automatizacije uz asistenciju robotike.



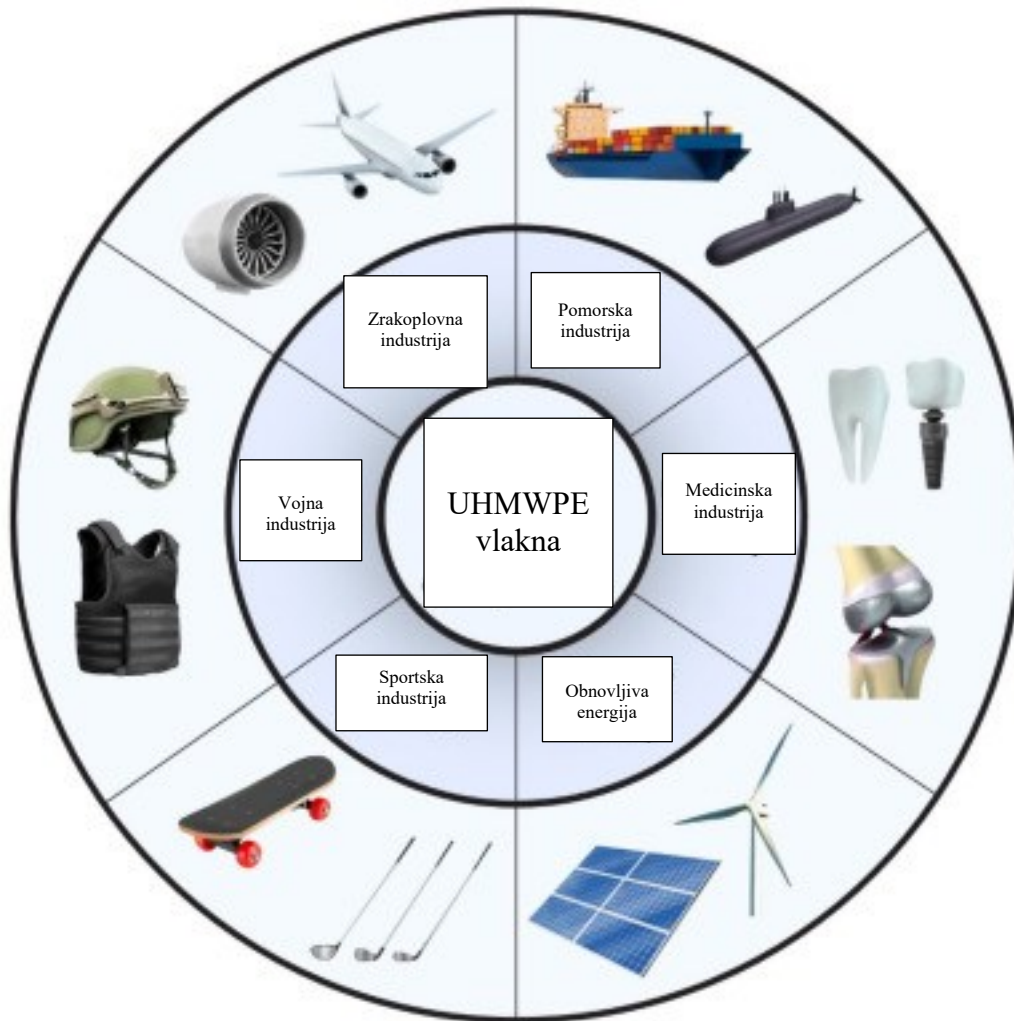
Slika 9. Raznovrsnost vlakna [11]

3.3. Primjena UHMWPE vlakna

Kompoziti izrađeni s UHMWPE vlaknima se koriste u nizu industrija, pretežito zbog izvrsnih mehaničkih svojstava.

Ključne industrije su (slika 10) [12]:

- Zrakoplovna – kompozitne strukture u svrhu efikasnosti i manje potrošnje goriva, paneli s unutrašnje strane kao zaštita od udarca
- Vojna – antibalistički paneli, oklopi, neprobojni prsluci, kacige i slično, s namjerom da spriječi prodiranje projektila
- Pomorska – široka primjena u izradi konopa i kablova visoke čvrstoće za potrebe pristajanja brodova, utovar, te istraživanja podmorja zbog niskog afiniteta prema vodi, te izdržljivost
- Sportska – zaštita oprema u sportovima kao što su npr. biciklizam, skijanje i sl.
- Automobilska – za izradu dijelova sa što manjom masom, te dijelova branika u svrhu zaštite pri sudaru
- Naftna – slično kao i kod pomorske industrije, za izradu konopa i kablova
- Medicinska – koristi se za proteze, kirurške alate
- Građevinska – za ojačavanje betona i sl.



Slika 10. Primjena UHMWPE vlakna [12]

4. EKSPERIMENTALNI DIO

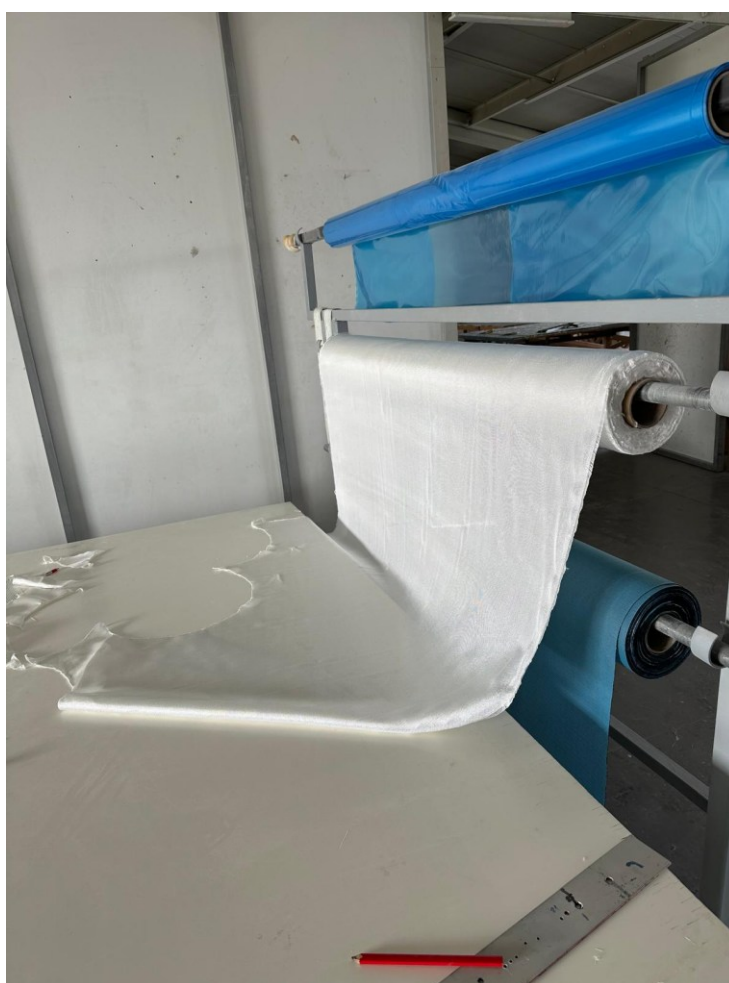
U eksperimentalnom dijelu ovog rada izrađen je prototip kompozitne kacige s ciljem postizanja optimalnih mehaničkih svojstava, uključujući visoku čvrstoću, elastičnost i sposobnost apsorpcije energije. Kaciga je izrađena od polimernog kompozita, konkretno epoksidne smole ojačane UHMWPE vlaknima, zbog njihove izuzetne otpornosti na udarce i male mase. Proces izrade uključivao je metode prešanja i laminiranja, uz poštivanje standardnih postupaka za obradu i oblikovanje kompozitnih materijala.

Nakon izrade prototipa, provedena su ispitivanja otpornosti na udarce i čvrstoće prema relevantnim ISO i ASTM standardima. Testiranja su obuhvatila balistička ispitivanja na strelištu, gdje je kaciga bila izložena projektilima ispaljenim iz pištolja (kalibar 9 mm i .38) i puške niskog kalibra (.22 LR), kako bi se analizirala otpornost materijala na prodiranje.

Na temelju provedenih analiza identificirane su prednosti i potencijalne mogućnosti poboljšanja dizajna i izbora materijala, s posebnim naglaskom na optimizaciju proizvodnog procesa te daljnju prilagodbu za primjenu u različitim industrijama poput vojne opreme, sportskih kaciga i zaštitne opreme za građevinske radnike.

4.1. Izrada uzoraka

Zbog prethodno navedenih i objašnjenih svojstava u poglavlju 3.1., za izradu ovih kalota upotrijebljen je polimerni kompozit ojačan UHMWPE vlaknima (slika 11). Izrađene su 3 kalote različitih debljina, odnosno različitog broja sloja vlakna. Prvi uzorak se sastoji od 6, drugi od 10 i treći od 12 slojeva UHMWPE vlakna. Za izradu je korištena epoksidna smola Sicomin SR InfluGreen 810 (slika 12) koju karakteriziraju tehnička svojstva (dobra močivost). Da bi se povećala kvaliteta izrade u smolu je dodan i katalizator Sicomin SD 8824 (slika 12) koji se preporučuje u svrhu postizanja maksimalne termomehaničke vrijednosti.



Slika 11. Korištena UHMWPE vlakna



Slika 12. Katalizator i epoksidna smola

Prije izrade uzoraka bilo je potrebno izrezati vlakna u adekvatne oblike (slika 13) kako bi se prilagodili kružnom obliku kalupa.



Slika 13. Izrezana UHMWPE vlakna

Prva kalota (slika 15) je izrađena na način da su se slojevi postupno slagali na kalup (slika 14). Smola je nanosena kistovima, nepoželjan zrak istisnut valjcima. Prilikom ovog postupka curenje smole s vrha prema dnu kalupa zahtijeva veću potrošnju smole. Nakon laminiranja kalota je ostavljena da se suši 24 sata. Nakon sušenja kalota je obrađena (slika 16), te su rubovi odrezani i ispolirani. Naknadno je grijana u peći (slika 17) 24 sata na 70 °C.



Slika 14. Kalup za prvu kalotu



Slika 15. Prva kalota nakon izrade



Slika 16. Površinska obrada prve kalote



Slika 17. Peć u kojoj su se pekle kalote

Prilikom izrade drugog uzorka kalote je upotrijebljena metoda slaganja slojeva s unutarnje strane kalupa. Složeno je 10 slojeva, a smola je nanescna kistom. Zrak je istisnut valjcima (slika 18), no kod ove metode problem je stvarala smola koja se slijevala prema dnu, odnosno vrhu kalote (slika 19). Za potrebu izrade ove kalote korišteno je oko 0,5 litara epoksidne smole. Nakon laminiranja i ova kalota je ostavljena da se suši 24 sata, te su rubovi odrezani i obrađeni. Naknadno je ostavljena u peći na 24 sata zajedno s prvom kalotom na 70 °C (slika 20).



Slika 18. Izrada druge kalote



Slika 19. Vađenje kalote



Slika 20. Pečenje prve i druge kalote

Treći uzorak kalote (slika 21) je izrađen istom metodom kao i drugi uzorak. 12 slojeva UHMWPE vlakna je postupno složeno unutar kalupa, uz konstantno nanošenje epoksidne smole. Zrak koji je ostao zarobljen između slojeva istisnut je valjcima, a nakon izrade kalota je ostavljena da se suši 24 sata na sobnoj temperaturi. Bila je potrebna naknadna obrada, tj. rezanje i brušenje rubova (slika 22). Kao i ostali uzorci, ova kalota je grijana u peći 24 sata na 70 °C (slika 23).



Slika 21. Izrađena i osušena treća kalota



Slika 22. Rezanje i obrada treće kalote



Slika 23. Pečenje treće kalote

4.2. Balističko testiranje kalota

U svrhu korištenja u stvarnim uvjetima, kalote su testirane u lovačkom domu Kušanec, kako bi se provjerila njihova otpornost na prodiranje penetratora, odnosno ponašanje pri pucanju iz malokalibarske puške i pištolja.









Testiranje je obavljeno prema normi EuroStandard EN 1522/3 koja se primjenjuje u Europi od 1999. godine za testiranja svih materijala otpornih na metke.

Na kalote je pucano s udaljenosti od 5 metara. Sva ispitivanja su provedena u osiguranim uvjetima.

Otpornost na prodiranje kalota je testirana koristeći kalibre (slika 25):

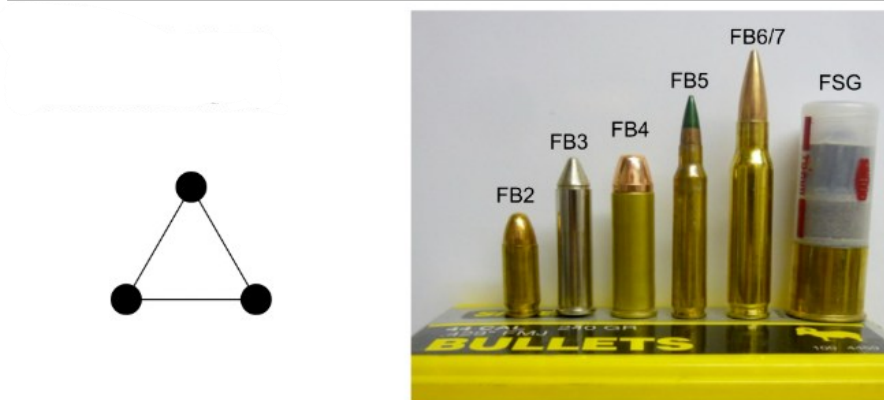
- a) .22 LR
- b) 9 mm FMJ
- c) .38 Special FMJ ravni vrh

Slika 24 prikazuje klasifikaciju oružja i kalibara.

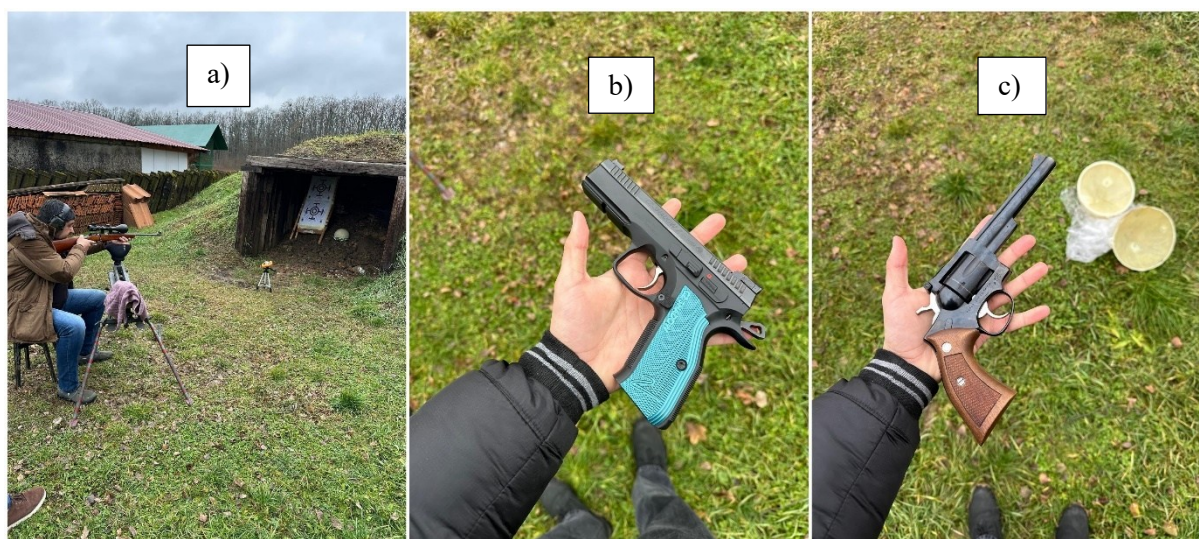
	Klasa	Vrsta oružja	Kalibar	Municija	Broj pucnjeva	Brzina	Daljina	Razmak
	FB1	Puška	.22 LR	L/RN	3	360 +/- 10	10	120 +/- 10
	FB2	Pištolj	9mm Luger	FJ1/RN/SC	3	400 +/- 10	5	120 +/- 10
	FB3		.357 Magnum	FJ1/CB/SC	3	430 +/- 10	5	120 +/- 10
	FB4		.44 Rem Magnum	FJ2/FN/SC	3	440 +/- 10	5	120 +/- 10
	FB5	Puška	5.56x45	FJ2/PB/ SCP 1	3	950 +/- 10	10	120 +/- 10
	FB6		7.62x51	FJ1/PB/SC	3	830 +/- 10	10	120 +/- 10
	FB7		7.62x51	FJ2/PB/ HC 1	3	820 +/- 10	10	120 +/- 10
	FSG	Sačmarica	12/70	Solid Slug 3	3	420 +/- 20	10	120 +/- 10

Ammunition Legend:

L - olovo	FN – ravni vrh	RN – zaobljen vrh
CB – konusni vrh	HC1 – čelična jezgra	SC – meka jezgra (olovo)
FJ – presvučeno zrno	PB – šiljasti vrh	SCP1 – meka jezgra i čelični penetrator



Slika 24. Prikaz klasifikacije oružja i kalibara [13]



Slika 25. Oružje korišteno za testiranje (a) .22 LR, b) 9 mm FMJ c) .38 Special FMJ ravni vrh)

Prvo je testirana prva kalota (6 slojeva) pucanjem iz puške malog kalibra .22 LR. Nakon provođenja ispitivanja došlo je do proboja metka kroz prednji dio kalote, te ulaska u stražnji dio gdje je zaustavljen (slika 26).

Zatim je ista kalota testirana pucanjem iz pištolja CZ Shadow 2, metak kalibra 9 mm. Nakon provođenja ispitivanja došlo je do potpunog proboja metka kroz sve slojeve kalote (slika 27).



Slika 26. Vanjska i unutarnja strana prve kalote (.22 LR)



Slika 27. Vanjska i unutarnja strana prve kalote (9 mm)

Druga kalota (10 slojeva) je prvo testirana pucanjem iz puške malog kalibra .22 LR. Nakon provođenja testiranja zaključeno je da je metak znatno usporen u prednjem dijelu kalote i zadnji dio nije probijen (slika 28).

Pri drugom testiranju druga kalota je testirana pucanjem iz pištolja CZ Shadow 2, metak kalibra 9 mm. Nakon ispitivanja metak je prošao kroz prednji dio i zadržan je u zadnjem dijelu kalote (slika 29).



Slika 28. Vanjska i unutarnja strana druge kalote (.22 LR)



Slika 29. Vanjska i unutarnja strana druge kalote (9 mm)

Treća kalota (12 slojeva) je prvo testirana pucanjem iz puške malog kalibra .22 LR. Nakon provedenog testiranja zaključeno je da je metak zadržan u prednjem dijelu kalote, odnosno probijena je ulazna, ali ne i izlazna rupa (slika 30).

Kod drugog testiranja treće kalote za pucanje je korišten pištolj CZ Shadow 2, metak kalibra 9 mm. Nakon ispitivanja pucanjem metak je prošao u potpunosti kroz prednji dio, no zaustavljen je pri prodiranju u stražnji dio kalote što se može vidjeti po vertikalnoj izbočini na unutarnjoj strani kalote (slika 31).

S obzirom na to da je ova kalota pokazala najveću otpornost na prodiranje odlučeno je testirati ju pucanjem iz revolvera Ruger security-six, metak kalibra .38 Special FMJ, ravni vrh. Nakon testiranja pucanjem zaključeno je da je metak zaustavljen unutar prednjeg dijela kalote, odnosno izlazna rupa nije probijena (slika 32).



Slika 30. Vanjska strana treće kalote (.22 LR)



Slika 31. Vanjska i unutarnja strana treće kalote (9 mm)



Slika 32. Vanjska strana treće kalote (.38 Special FMJ ravni vrh)

Provedena ispitivanja pokazala su značajan utjecaj broja slojeva UHMWPE vlakana na otpornost kompozitnih kalota na prodiranje projektila. Kalota s manjim brojem slojeva (6 slojeva) nije uspjela izdržati udarce, dok su kalote s 10 i 12 slojeva pokazale poboljšanu otpornost, pri čemu je kalota s 12 slojeva uspjela apsorbirati energiju metaka višeg kalibra. Ovi rezultati potvrđuju da povećanje broja slojeva doprinosi većoj razini zaštite, ali istovremeno može povećati masu kacige, što predstavlja izazov u optimizaciji balističke zaštite.

Metoda laminacije imala je važnu ulogu u mehaničkim svojstvima kalota, gdje se pokazalo da unutarnja laminacija doprinosi boljoj otpornosti na prodiranje. Prema normi EN 1522/3, kalota s 12 slojeva zadovoljila je kriterije za klase FB1 i FB3, čime se potvrđuje mogućnost njezine primjene u vojnim i zaštitnim kacigama. Međutim, daljnja istraživanja su potrebna kako bi se optimizirala raspodjela smole i orijentacija vlakana te povećala učinkovitost zaštite uz istovremeno smanjenje mase. Dodatna ispitivanja na različitim vrstama metaka, kao i biomehanička testiranja, mogu pridonijeti daljnjem unaprjeđenju konstrukcije i razvoju kaciga s poboljšanom otpornosti i ergonomijom.

5. ZAKLJUČAK

Kacige pružaju sigurnost policiji i vojsci već stoljećima, te su neizostavan dio sigurnosne opreme. Razvoj kompozita uvelike je imao utjecaj i na razvoj sigurnosti u ovim industrijama od kevlar prsluka, do kompozitnih kaciga. Ovaj rad je pobliže istražio svojstva UHMWPE vlakna i njihovo mjesto i važnost u ovim industrijama u kontekstu izrade kaciga.

Testiranjem kompozita s polimernom matricom i ojačalom UHMWPE vlakna na otpornost prema prodiranju penetratora prema normi EN 1522/3 možemo donijeti sljedeće zaključke:

- Količina i broj slojeva vlakna uvelike utječe na navedeno svojstvo, te povećanjem broja slojeva, dolazi i do poboljšane otpornosti
- Uz provođenje dodatnih testiranja 12 slojeva UHMWPE vlakna u kompozitnoj kaloti je dovoljno za zaustavljanje prodora metka iz oružja klase FB1 i FB3

Prva kalota (6 slojeva) izrađena je metodom laminiranja s vanjske strane rezultirala je manjom otpornošću na prodiranje penetratora, dok su druga i treća kalota (10 i 12 slojeva), izrađene metodom laminiranja s unutarnje strane, rezultirale većom otpornošću na prodiranje penetratora.

Metoda laminiranja s unutarnje strane pokazala je bolje rezultate kod testiranja otpornosti na prodiranje, no zbog razlike u broju slojeva potrebno je izraditi uzorke s istom količinom slojeva koristeći obje metode kako bi se pokazala uspješnija metoda.

Kako bi se unaprijedila svojstva kompozitnih kaciga izrađenih od epoksidne smole ojačane UHMWPE vlaknima, potrebno je provesti dodatna ispitivanja i optimizacije ključnih čimbenika koji utječu na njihovu mehaničku otpornost, balističku zaštitu i ukupnu učinkovitost. Mogući smjerovi daljnjeg istraživanja uključuju:

1. Optimizacija smjera i vrste vlakana
2. Analiza utjecaja oblika kalupa i metode laminacije
3. Istraživanje optimalnog broja slojeva i udjela epoksidne smole
4. Dodatna obrada površine i zaštitni premazi
5. Mehanička ispitivanja i balistički testovi
6. Biomehaničke simulacije i testiranja udobnosti

Daljnja istraživanja trebala bi biti usmjerena na optimizaciju konstrukcije kacige, smanjenje težine bez gubitka zaštitnih svojstava te povećanje trajnosti materijala. Iterativnim

testiranjima i kombinacijom eksperimentalnih metoda i numeričkih simulacija, moguće je razviti napredne kompozitne kacige s poboljšanom zaštitom i udobnošću, čineći ih pogodnijima za vojnu, policijsku i industrijsku primjenu.

LITERATURA

- [1] Yi C, Xu J, Tian L, Zhang C. Temperature and Strain Rate Related Deformation Behavior of UHMWPE Fiber-Reinforced Composites. *Polymers* 2024;16:1250.
Dostupno na: <https://doi.org/10.3390/polym16091250>
- [2] Han L, Cai H, Chen X, Zheng C, Guo W. Study of UHMWPE Fiber Surface Modification and the Properties of UHMWPE/Epoxy Composite. *Polymers* 2020;12:521.
Dostupno na: <https://doi.org/10.3390/polym12030521>
- [3] enciklopedija H. tehnički materijali. Hrvatska enciklopedija n.d.
Pristupljeno 6. 1. 2025.
Dostupno na: <https://www.enciklopedija.hr/clanak/tehnicki-materijali>.
- [4] *Matrix Composite - an overview | ScienceDirect Topics* n.d.
Pristupljeno 6. 1. 2025.
Dostupno na: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/matrix-composite>.
- [5] Lady I. KOMPOZITNI MATERIJALI. Metalurgija 2014.,
Dostupno na: <https://ironlady003.wordpress.com/2014/05/12/kompozitni-materijali/>
- [6] Filetin, T., Kovačićek, F., Indof, J., Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [7] Šimić, Josip, Primjena kompozitnih materijala u konstrukciji zrakoplova, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, 2023.
- [8] Egbo MK. A fundamental review on composite materials and some of their applications in biomedical engineering. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences* 2021;33:557–68.,
Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.07.007>
- [9] High Tenacity UHMWPE Sewing Thread High Strength High Modulus UHMWPE Fiber Yarn.,
Dostupno na:
<https://4d2d10eb612d8fb5.en.made-in-china.com/product/caNYTUMHamkX/China-High-Tenacity-UHMWPE-Sewing-Thread-High-Strength-High-Modulus-UHMWPE-Fiber-Yarn.html>.

- [10] Macan J., Kompozitni materijali, interna skripta za studente FKIT-a, Sveučilište u Zagrebu, veljača 2020.
- [11] *Composite Fiber Characteristics - Composite Envisions*. 18 Aug. 2022,
Dostupno na:
<https://compositeenvisions.com/document/composite-fiber-characteristics/>.
- [12] Shelly D, Lee S-Y, Park S-J. Compatibilization of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) fibers and their composites for superior mechanical performance: A concise review. *Composites Part B: Engineering* 2024;275:111294.,
Dostupno na: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111294>
- [13] *Architectural Armour | BS EN 1522 Bullet Resistant Standard n.d.*
Pristupio 30. 1. 2025.
Dostupno na: <https://www.architecturalarmour.com/tech-spec/bullet-specs/en1522-3>.