

Primjena UHMWPE ojačala u izradi ploča za balističku zaštitu

Kušeković, Stjepan

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:235:120547>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-14**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Stjepan Kušeković

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Zdravko Schauperl

Student:

Stjepan Kušeković

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se svom mentoru prof. dr. sc. Zdravku Schauperlu na pruženoj pomoći i savjetima tijekom pisanja ovog rada, kao i doc. dr. sc. Zoranu Domitranu na omogućavanju izrade kompozitnih ploča.

Također, želio bih se zahvaliti i tehničkom suradniku Božidaru Bušetinčanu na izdvojenom vremenu i pomoći pri provedbi mehaničkih ispitivanja.

Stjepan Kušeković



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: **Stjepan Kušeković**

JMBAG: **0035219862**

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

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of UHMWPE 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 sve veću ulogu imaju polietilenska vlakna s ultra visokom molekularnom masom (UHMWPE) u kombinaciji s epoksidnom matricom.

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 UHMWPE 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.

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.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Zdravko Schauperl

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD	1
2. KOMPOZITI.....	2
2.1. Materijali kompozitne matrice.....	2
2.1.1 Epoksidne smole	3
2.2. Oblici kompozitnih ojačala.....	3
2.2.1. Strukturni kompoziti	4
2.2.2. Česticama ojačani kompoziti	5
2.2.3. Vlasknima ojačani kompoziti	6
2.3. Staklena vlakna.....	8
2.4. Polietilenska vlakna (UHMWPE)	9
3. BALISTIKA	10
3.1. Metak i njegovi dijelovi.....	10
3.2. Mehanizam balističkog udara u vlasknima ojačan kompozit	11
3.3. Antibalističke ploče	13
3.3.1. Čelične antibalističke ploče	13

3.3.2. Keramičke antibalističke ploče	14
3.3.3. Drvene antibalističke ploče	14
4. EKSPERIMENTALNI DIO	15
5. IZRADA ANTIBALISTIČKE KOMPOZITNE PLOČE	16
5.1. Ispitivanje ploče pucanjem	19
6. ISPITIVANJE UTJECAJA Al_2O_3 NANOČESTICA	22
6.1. Savojna čvrstoća i savojni modul elastičnosti	22
6.2. Vlačna čvrstoća.....	23
6.3. Udarni rad loma	25
7. ZAKLJUČAK	28
LITERATURA.....	29
PRILOZI.....	31

POPIS SLIKA

Slika 1. Podjela kompozita prema obliku ojačala [5].....	3
Slika 2. Shematski prikaz strukture sendvič konstrukcije [2]	4
Slika 3. Slojeviti kompozit sastavljen od različito usmjerenih slojeva vlakana [2].....	5
Slika 4. Podjela kompozita ojačanih česticama, a) s velikim česticama, b) s disperzijom [6] ..	5
Slika 5. Podjela kompozita s obzirom na orijentaciju vlakana [2].....	6
Slika 6. Vrste tkanja: a) kvadratno, b) keper, c) atlas [8].....	7
Slika 7. Ovisnost specifične čvrstoće i specifičnog modula elastičnosti o materijalu vlakna i matrice [2]	7
Slika 8. Staklena vlakna u raznim oblicima [9]	8
Slika 9. UHMWPE vlakna u obliku roving tkanja [12]	9
Slika 10. Dijelovi metka [13]	10
Slika 11. 2D prikaz dijela tkanine pogođene projektilom [14]	11
Slika 12. 3D prikaz dijela tkanine pogođene projektilom [14]	12
Slika 13. Izgled vlakna prije i poslije udara projektila [14]	12
Slika 14. Tablica internacionalnih balističkih standarda. [15]	13
Slika 15. Shema strukture hibridne kompozitne ploče.....	16
Slika 16. Slojevi UHMWPE i staklenih vlakana.....	17
Slika 17. Izrada ploče metodom ručnog polaganja	17
Slika 18. Nanošenje središnjeg sloja UHMWPE vlakna.....	18
Slika 19. Izrađena ploča u procesu skrućivanja	18
Slika 20. Prednja strana ploče nakon pucanja	19
Slika 21. Stražnja strana ploče nakon pucanja	20
Slika 22. Ulazna strana rupe kalibra 9 mm	20
Slika 23. Ulazna strana rupe kalibra Magnum .357	21

Slika 24. Ulazna strana rupe kalibra Magnum .44	21
Slika 25. Kidalica za provedbu ispitivanja čvrstoće.....	24
Slika 26. Slomljene epruvete nakon ispitivanja vlačne čvrstoće.....	24
Slika 27. Slomljena epruveta nakon ispitivanja na Charpyjevom batu	27

POPIS TABLICA

Tablica 1. Dimenzije epruveta za savojnu čvrstoću	22
Tablica 2. Savojna čvrstoća i modul elastičnosti epoksidnih ploča	23
Tablica 3. Vlačna čvrstoća epoksidnih ploča	25
Tablica 4. Dimenzije epruveta za udarni rad loma.....	26
Tablica 5. Vrijednosti žilavosti epoksidnih ploča	26

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis oznake
ρ	g/cm^3	gustoća
h	mm	debljina ispitnog uzorka
b	mm	širina ispitnog uzorka
R_{ms}	N/mm^2	savojna čvrstoća
E_s	N/mm^2	savojni modul elastičnosti
R_m	N/mm^2	vlačna čvrstoća
E	N/mm^2	Youngov modul elastičnosti
E_C	J	promjena potencijalne energije bata
A_{CN}	J/m^2	žilavost

SAŽETAK

U današnje se vrijeme za izradu zaštitnih antibalističkih ploča koriste raznovrsni materijali poput čelika, keramike, drva, polimera te kompozitnih materijala. Upravo kompoziti zbog svojih odličnih mehaničkih svojstava, koje je moguće „oblikovati“, nailaze na sve širu primjenu u području zaštite ljudi i materijalnih dobara. U ovom radu predložena je struktura antibalističke kompozitne ploče od staklenih i polietilenskih vlakna s ultra visokom molekularnom masom (UHMWPE) u matrici od epoksidne smole nakon koje je podvrgnuta ispitivanju otpornosti na kinetičke penetratore. Također, analizirana su i mehanička svojstva epoksidne smole ojačane nanočesticama aluminijskog oksida (Al_2O_3) kako bi se vidio utjecaj nanopunila, a ispitivanja su provedena u Laboratoriju za polimere i kompozite.

Ključne riječi: antibalističke ploče, kompozitni materijali, mehanička svojstva, UHMWPE

SUMMARY

Nowadays, various materials such as steel, ceramics, wood, polymers and composite materials are used to make protective anti-ballistic panels. Due to their excellent mechanical properties, which can be „designed“, composites are increasingly used in protection of people and goods. In this paper, the structure of an anti-ballistic composite panel made of glass fibres and ultra-high molecular-weight polyethylene (UHMWPE) fibres in an epoxy resin matrix was proposed, after which it was subjected to kinetic penetrator resistance testing. Additionally, the mechanical properties of epoxy resin reinforced with nanoparticles of aluminium oxide (Al_2O_3) were analyzed to see the effect of nanofillers and tests were carried out in the Laboratory of Polymers and Composites.

Key words: anti-ballistic panels, composite materials, mechanical properties, UHMWPE

1. UVOD

Povijest zaštitnih materijala duga je skoro kao i povijest čovječanstva. Čovjek je oduvijek imao potrebu zaštititi se, kako od okolnih uvjeta, tako i od drugih ljudi, a posebno uz prisustvo vatrenog oružja. Razvojem brzih i razornih projektila došlo je do evolucije u balističkim sustavima osobne zaštite sa zahtjevima da budu otporniji na oštećenja, fleksibilni i lagani te s visokim kapacitetom apsorpcije energije. Revolucija moderne generacije antibalističkih materijala započela je kasnih 1960-ih nakon razvoja novih sintetičkih vlakna s odličnim antibalističkim svojstvima [1]. U današnje se vrijeme antibalistički paneli ponajprije koriste u vojsci, policiji, zaštiti nekretnina, osobnoj zaštiti te zaštiti vozila za prijevoz šticećenih osoba i logističkih vozila. Veliku zastupljenost u balističkoj zaštiti imaju kompozitni materijali zbog svojih svojstava kao što su:

- mogućnost dobivanja željenih svojstava različitim kombinacijama strukture
- visoka čvrstoća i modul elastičnosti
- smanjena masa
- vatrootpornost i antikorozivnost
- ekonomičnost

U ovom radu istražuje se struktura kompozitnih materijala koji se koriste u izradi antibalističkih panela, objasniti zašto se baš takve kombinacije primjenjuju te ih usporediti s ostalim antibalističkim materijalima. Također, iznijet će se i osnovni pojmovi balističkih sustava poput oružja i streljiva te probijanja kinetičkim penetratorom.

2. KOMPOZITI

Kompozitni materijali definiraju se kao materijali sastavljeni od više različitih materijala s različitim fizikalnim i kemijskim svojstvima u svrhu dobivanja novih specifičnih svojstava poput krutosti, čvrstoće, mase, kemijske postojanosti ili toplinske vodljivosti. U tako dobivenom materijalu svaka komponenta i dalje zadržava svoja mehanička, fizikalna i kemijska svojstva, a granica između konstituenata jasno je uočljiva. Osnovni konstituenti kompozitnog materijala su matrica i ojačalo [2].

Glavna zadaća matrice je da povezuje ojačalo, štiti od vanjskih utjecaja i sudjeluje u prijenosu opterećenja na ojačalo, dok ojačalo služi kao nosivi dio kompozita i osigurava visoku čvrstoću, krutost ili otpornost na trošenje.

Ukupno ponašanje kompozita ovisi o:

- svojstvima matrice i ojačala
- raspodjeli i veličini konstituenata
- obliku i volumnom udjelu konstituenata
- prirodi i jakosti veze među konstituentima

S obzirom na konstituente od kojih su građeni kompoziti, oni se dijele prema dva kriterija. Prvi kriterij je prema materijalu od kojeg je izrađena matrica kompozita, a drugi prema obliku ojačala kojima je kompozit ojačan [2].

2.1. Materijali kompozitne matrice

Matrica u kompozitnim materijalima može biti metal, keramika ili polimer. Kod kompozita s metalnom matricom najčešće se primjenjuju aluminij, magnezij, titanij ili bakar i ti kompoziti uglavnom imaju visoku specifičnu krutost i specifičnu čvrstoću, vrlo dobra tribološka svojstva i dobri su vodiči. Kao keramičke matrice koriste se oksidne keramike poput aluminijevog ili silicijevog oksida te neoksidne keramike poput silicijevog karbida, a tako izrađen kompozit karakteriziraju odlična tribološka svojstva te odlična otpornost na povišene temperature.

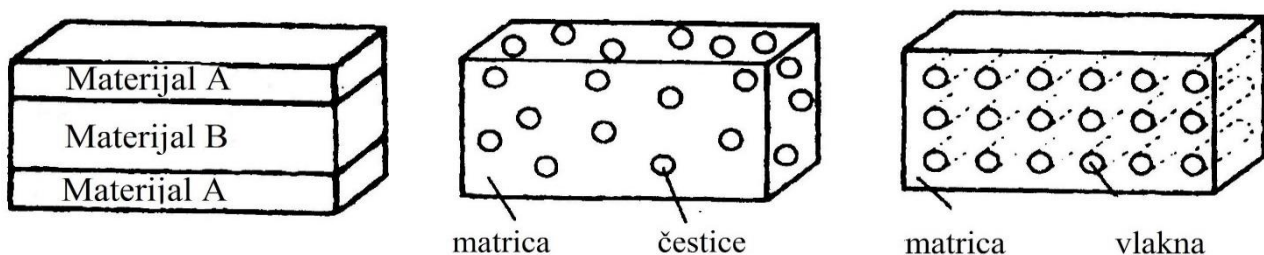
Kompoziti s polimernom matricom sadrže polimernu smolu i ojačani su vlaknima. Oni čine najveći udio u primjeni kompozita zbog svojih mehaničkih svojstava poput žilavosti i antikorozivnosti, lakoće proizvodnje i ekonomičnosti. Najčešći polimeri koji se koriste pri izradi tih kompozita su: poliesterske, fenolne i epoksidne smole [2].

2.1.1 Epoksidne smole

Epoksidne smole definiraju se kao skupina monomernih ili oligomernih materijala koji mogu dalje reagirati i formirati polimere s visokim stupnjem kemijske otpornosti i otpornosti na otapala, s odličnom adhezijom, žilavošću i s dobrim električnim svojstvima. Odabirom raznih modifikatora i umrežavala mogu se stvoriti specifične karakteristike epoksidne smole te se mogu primjenjivati kao ljepila, premazi te u proizvodnji ojačanih plastika i kompozita poput stakloplastike ili slojevitih konstrukcija ojačanih vlaknima [3]. Vrlo važnu ulogu u dobivanju odličnih svojstava kod kompozita s epoksidnom matricom ima i „post-curing“ postupak. Post-curing je izlaganje očvrstnute epoksidne smole na ili iznad temperature stvrdnjavanja tijekom duljeg razdoblja. Tim postupkom dobiva se povećana čvrstoća, povišena temperatura staklastog prijelaza i smanjeno zaostalo naprezanje. Obično se izvodi na temperaturama od 50°C do 150°C i to nakon što je epoksidna smola minimalno 12 sati bila izložena sobnoj temperaturi [4].

2.2. Oblici kompozitnih ojačala

Prema obliku ojačala kojima su kompoziti ojačani, kompoziti se dijele u tri skupine: strukturni kompoziti („sendvič“ konstrukcije i slojeviti kompoziti), česticama ojačani kompoziti i vlaknima ojačani kompoziti. Na slici 1 prikazana je podjela kompozita s obzirom na oblik ojačala.

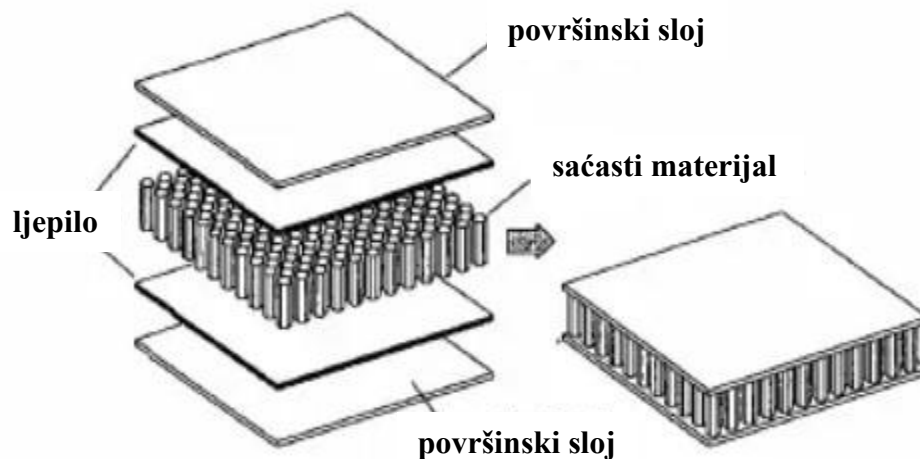


Slika 1. Podjela kompozita prema obliku ojačala [5]

2.2.1. Strukturni kompoziti

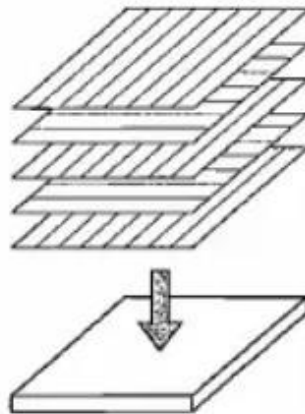
Strukturni kompoziti dijele se na „sendvič“ konstrukcije i slojevite (laminatne) konstrukcije. Kod strukturnih kompozita specifično je to što njihova svojstva ne ovise isključivo o materijalima od kojih su sastavljeni, već i o njihovom geometrijskom rasporedu [2].

„Sendvič“ konstrukcije sastavljene su od tanjih vanjskih slojeva koji su međusobno spojeni lakim materijalom za popunjavanje, poput polimerne ili aluminijske pjene. Najpoznatiji primjer takvog materijala je karton. Iako ni vanjski ni unutarnji slojevi nemaju značajnu čvrstoću i krutost, sendvič konstrukcija ima oba svojstva, a struktura je vidljiva na slici 2.



Slika 2. Shematski prikaz strukture sendvič konstrukcije [2]

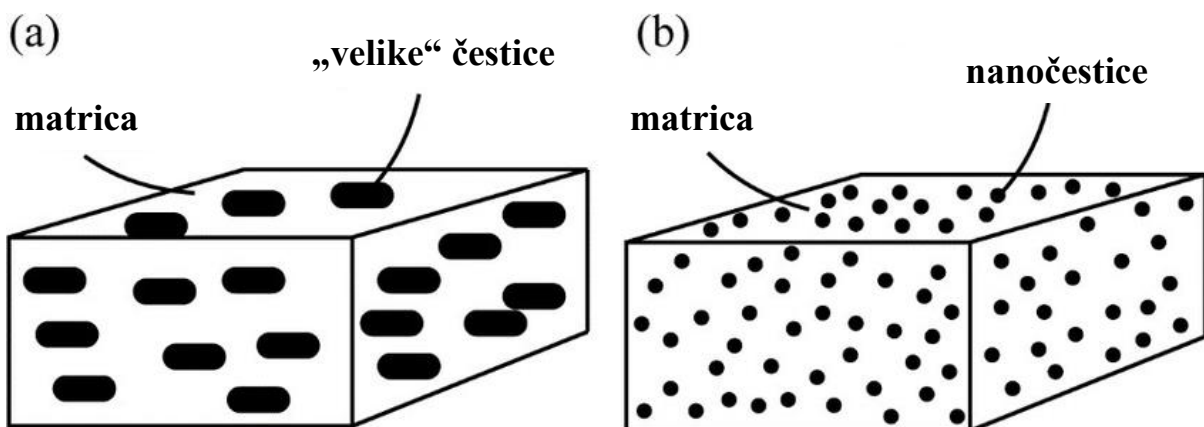
Slojeviti kompoziti sadrže dvodimenzionalne slojeve, odnosno panele koji imaju preferirani smjer visoke čvrstoće i oni su međusobno čvrsto povezani. Ti slojevi mogu biti slojevi furnira, papira, tkanine ili vlakana umočenih u matricu. Tako strukturirani kompoziti proizvode se u svrhu povišenja otpornosti na agresivnu okolinu, povišenja čvrstoće ili smanjenja mase. Njihova svojstva uglavnom su anizotropna te ovise o orijentaciji vlakana u slojevima. Primjeri takvih kompozita su materijali s debelim zaštitnim slojevima i tanjim prevlakama, s galvanskim prevlakama, bimetali, laminati te kompozitne ploče s staklenim i UHMWPE vlaknima proizvedene u svrhu ispitivanja za ovaj završni rad. Na slici 3 prikazana je građa jednog slojevitog kompozita.



Slika 3. Slojeviti kompozit sastavljen od različito usmjerenih slojeva vlakana [2]

2.2.2. Česticama ojačani kompoziti

Kompoziti s česticama sadrže tvrde i krhke jednoliko raspoređene čestice koje su obavijene mekanom i žilavijom matricom. Ovisno o veličini i načinu na koji djeluju na svojstva kompozita, kompozite s česticama dijelimo na: kompozite s disperzijom (do promjera $0,1 \mu\text{m}$) i kompozite s velikim česticama (promjer veći od $0,1 \mu\text{m}$) [2]. Na slici 4 prikazana je podjela česticama ojačanih kompozita.

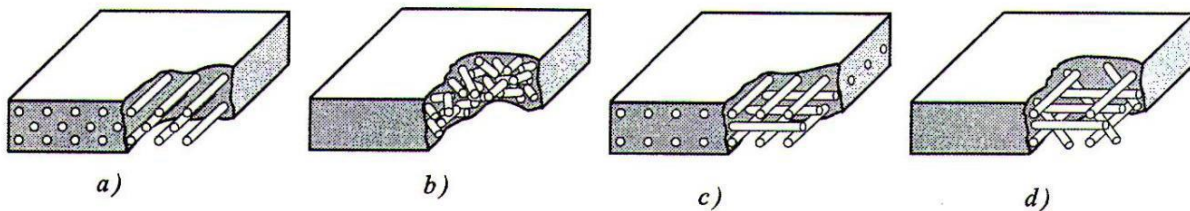


Slika 4. Podjela kompozita ojačanih česticama, a) s velikim česticama, b) s disperzijom [6]

2.2.3. *Vlaknima ojačani kompoziti*

Vlaknima ojačani kompoziti dobivaju se dodavanjem vlakana u mekanu matricu koja prenosi opterećenja sa vlakna na vlakno i osigurava duktilnost i oblikovljivost, dok vlakna služe kao nositelji opterećenja kompozita. Svojstva tako nastalog kompozita ovise o svojstvima konstituenata, ali i o orijentaciji vlakana. Slika 5 prikazuje podjelu kompozita s obzirom na orijentaciju vlakana:

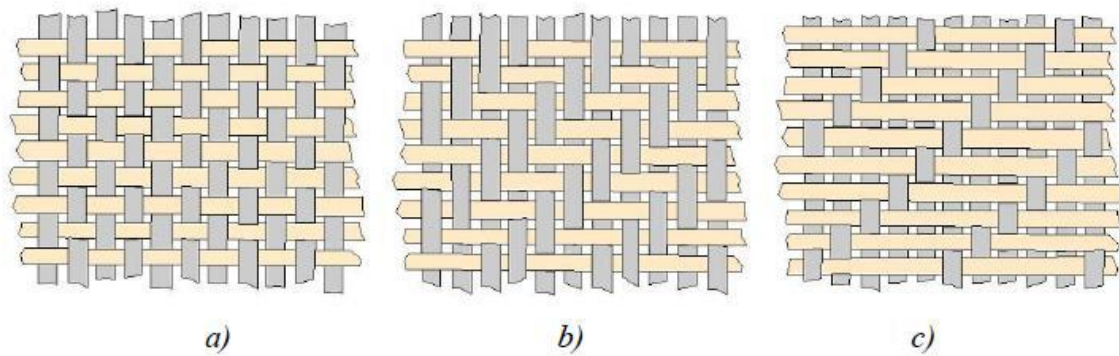
- a) kontinuirana jednosmjerna vlakna
- b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna
- c) ortogonalno raspoređena vlakna
- d) višesmjerno usmjerena vlakna



Slika 5. Podjela kompozita s obzirom na orijentaciju vlakana [2]

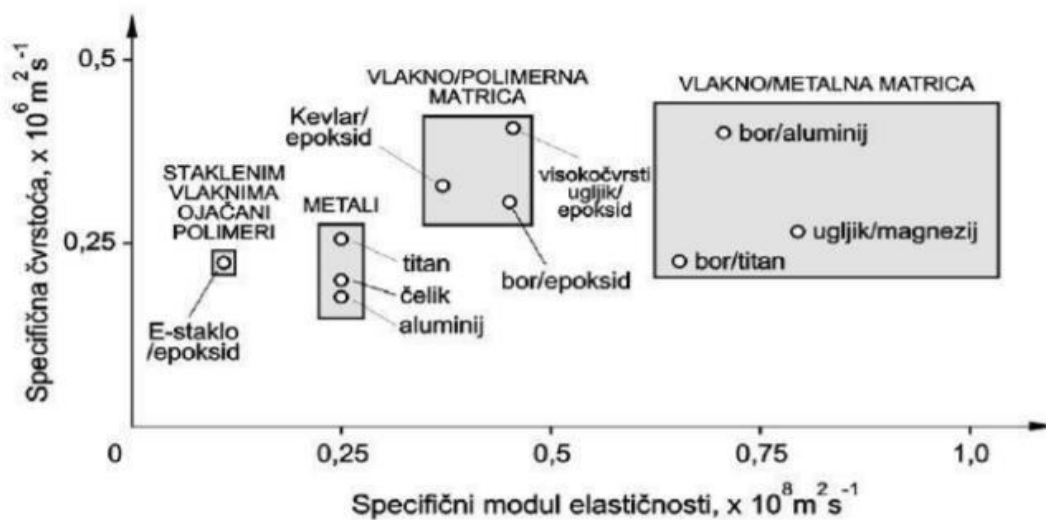
Ovisno o promjeru vlaknastih ojačala razlikuju se viskeri, žice i vlakna. Viskeri su visokočvrsti monokristali koji imaju velik omjer duljina/promjer i pravilnu građu. Žice su relativno velikog promjera i uglavnom su napravljene od čelika, molibdena ili volframa. Vlakna su snopovi tankih niti koji se dalje prerađuju u poluproizvode poput preprega, jednosmjernih traka, pletenih tkanina (roving), matova ili cijevasto oblikovanih pletenica. Prilikom proizvodnje vlakana nastoji se da ona budu što tanja jer se na taj način smanjuje mogućnost pojave grešaka u nitima, a niti su lakše savitljive [7].

Pletene tkanine (roving) najčešće dolaze u tri izvedbe, a to su: kvadratno (obično) tkanje kod kojeg se jedna traka naizmjenice provlači iznad i ispod mimoilaženih traka, keper te atlas tkanje, vidljivo na slici 6. Osim navedenih vrsta tkanja gdje vlakna prolaze pod kutom od 90° , postoje i drukčiji kutovi prolaza od 45° ili 60° . Orijetacija vlakana kod kompozita s polimernom matricom označava se oznakama 0° , $\pm 45^\circ$ i 90° [8].



Slika 6. Vrste tkanja: a) kvadratno, b) keper, c) atlas [8]

Vlakna s kojima se ojačavaju kompoziti mogu se podijeliti i s obzirom na materijal od kojeg su izrađeni. Najčešća vlakna koja se primjenjuju su: staklena, aramidna, ugljična, borova te organska poput poliesterskih, polipropilenskih ili polietilenskih. Ako je kompozit ojačan s različitim vrstama vlakana, onda se naziva hibridni kompozit. Na slici 7 vidi se kako specifična čvrstoća i specifični modul elastičnosti ovise o materijalu vlakna i matrice.

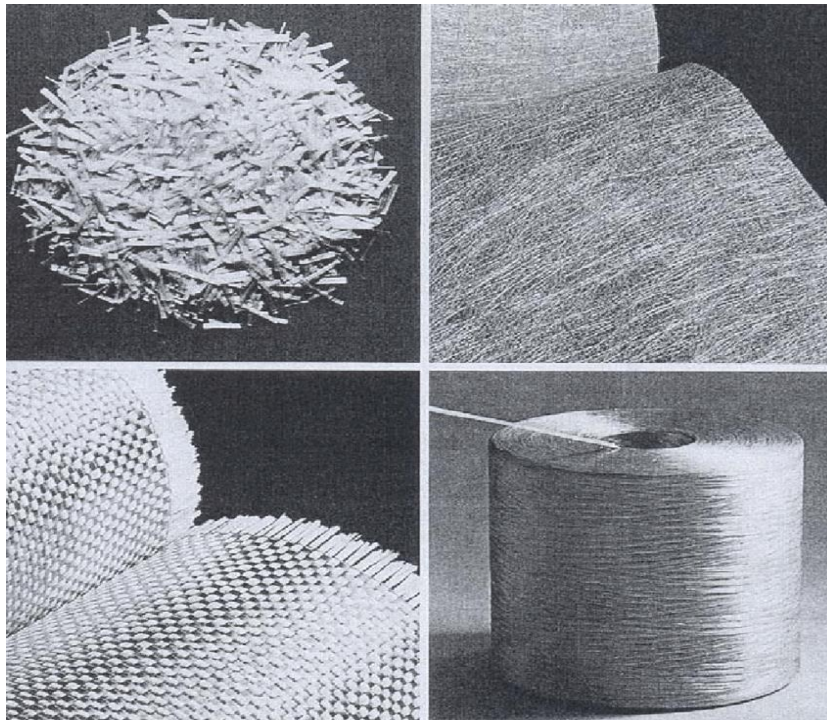


Slika 7. Ovisnost specifične čvrstoće i specifičnog modula elastičnosti o materijalu vlakna i matrice [2]

U ovom radu više pažnje posvetit će se samo staklenim i polietilenskim vlaknima ultra visoke molekularne mase (UHMWPE) zbog njihove uporabe pri izradi kompozitne ploče za balističku zaštitu.

2.3. Staklena vlakna

Staklena vlakna zauzimaju najveći udio u proizvodnji kompozita ojačanih vlaknima. Staklo je iznimno zahvalan i popularan materijal za ojačavanje zbog toga što ga se iz rastaljenog stanja lako izvlači u obliku visokočvrstih vlakana i lako ga se dobavlja. Također, s obzirom da su staklena vlakna relativno čvrsta, njihovim ugrađivanjem u polimernu matricu dobiva se kompozit vrlo visoke specifične čvrstoće, a tako nastao kompozit kemijski je inertan te se može koristiti u raznim korozivnim sredinama. Staklena vlakna dobivena izvlačenjem obično su promjera od 3 μm do 20 μm i ona dolaze u nekoliko oblika kao što su sjeckana staklena vlakna, tkanine, roving ili pređe, što je vidljivo na slici 8.



Slika 8. Staklena vlakna u raznim oblicima [9]

Najčešće korištene vrste staklenih vlakana su: E-stakla, C-stakla i S-stakla. Slovo E u E-staklima označava dobru električnu izolaciju, uz to što imaju dobru čvrstoću i zadovoljavajuć modul elastičnosti. Slovo C u C-staklima označava koroziju, odnosno dobru otpornost na korozivne medije, a slovo S u S-staklima odnosi se na velik udio silicijevog dioksida što im daje odličnu otpornost na visoke temperature i čvrstoću do 30% veću od E-stakla, no i cijena im je nekoliko puta veća [10].

2.4. Polietilenska vlakna (UHMWPE)

Polietilenska vlakna s ultra visokom molekularnom masom (UHMWPE) su visoko kristalna vlakna vrlo visoke krutosti i čvrstoće. To je rezultat inovativnih obrada i strukture polietilena. UHMWPE vlakna imaju vrlo visoku specifičnu čvrstoću i visok modul elastičnosti u smjeru vlakana te su jedni od najčvršćih umjetnih vlakana. Za razliku od drugih sintetičkih vlakana, njihova mehanička svojstva nisu osjetljiva na prisustvo vode. UHMWPE vlakna vrlo su kemijski postojana zbog toga što ne sadrže nikakve aromatične prstenove ili neke druge kemijske skupine koje bi bile osjetljive na utjecaj agresivnih medija [11]. Gustoća ovih vlakana je niska i iznosi $0,97 \text{ g/cm}^3$, a njihova deformacija pri lomu vrlo je mala te imaju odličnu sposobnost apsorpiranja energije, što ih čini vrlo otpornima na udarce. Upravo iz tog razloga ova vlakna sve se češće primjenjuju u izradi zaštitnih prsluka, kaciga, šljemova te drugih zaštitnih materijala poput oklopnih zaštitnih ploča za helikoptere, tenkove i brodove. Slika 9 prikazuje namotane tkanine UHMWPE vlakana.



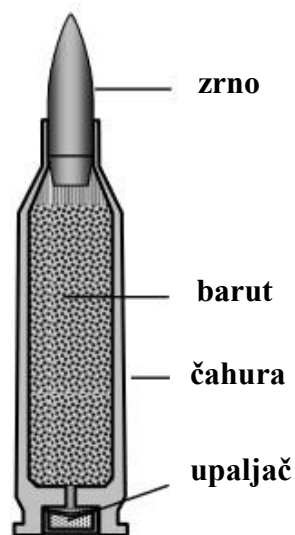
Slika 9. UHMWPE vlakna u obliku roving tkanja [12]

3. BALISTIKA

Balistika je znanost o tijelima u letu, koja obuhvaća analizu fizičkih pojava i kretanja projektila. Podijeljena je na više područja, ovisno o tome gdje se projektil nalazi, a to su unutarnja, posredna, vanjska balistika te balistika cilja, odnosno terminalna balistika koja se bavi interakcijom penetratora (projektila) i njegovog cilja u koji udara [13]. Da bi se moglo na pravi način zaštititi od kinetičkih penetratora, potrebno se prije toga upoznati s njihovim izgledom i karakteristikama.

3.1. Metak i njegovi dijelovi

Metak je projektil koji se ispaljuje iz oružja i on zapravo predstavlja cjelinu koja se sastoji od 4 dijela: zrno, barut, čahura i upaljač, što je vidljivo na slici 10. Metak se označava promjerom zrna [mm], duljinom čahure [mm] i dodatnim oznakama ako je potrebno, pa na primjer oznaka za metak najpoznatije puške na svijetu Kalašnjikov AK-47 glasi 7.62x39.



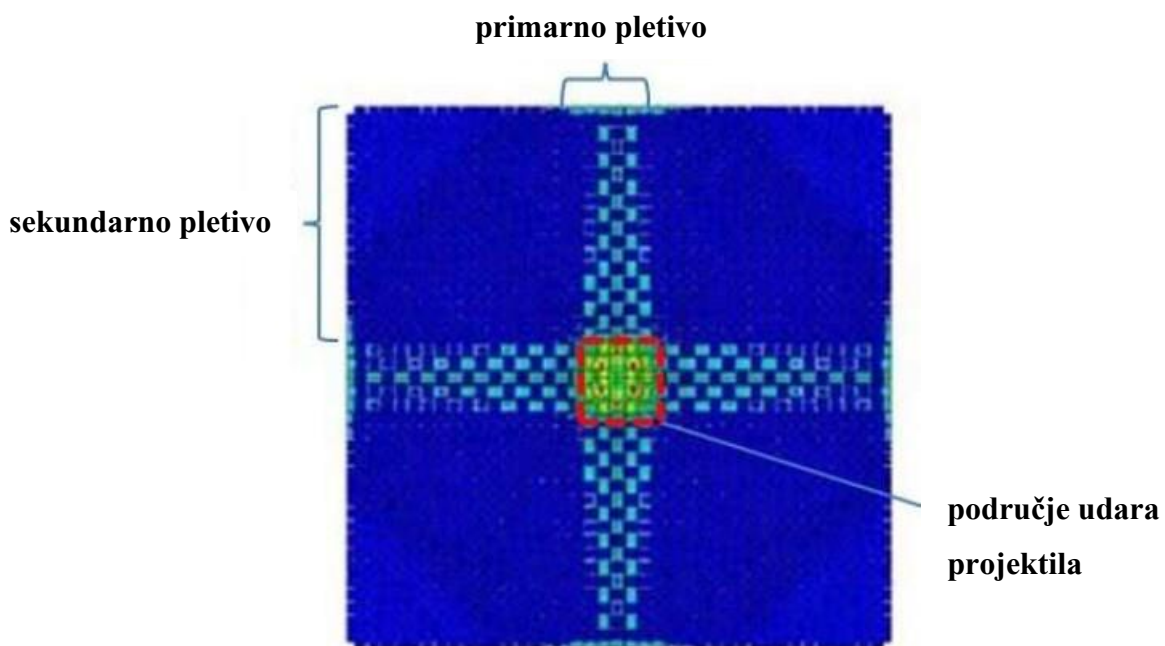
Slika 10. Dijelovi metka [13]

Zrno je dio koji se nakon pucnja odvajava od čahure i zapravo se samo njega smatra projektilom koji na kraju penetrira metu koju pogodi. Ono se najčešće izrađuje od olova ili mjedi, dok su košuljice kojima su zrna presvučena napravljene od bakra, bakrenih legura ili čelika. Kada zrno, odnosno projektil naiđe na prepreku, ono ju može potpuno probiti i nastaviti dalje kroz nju,

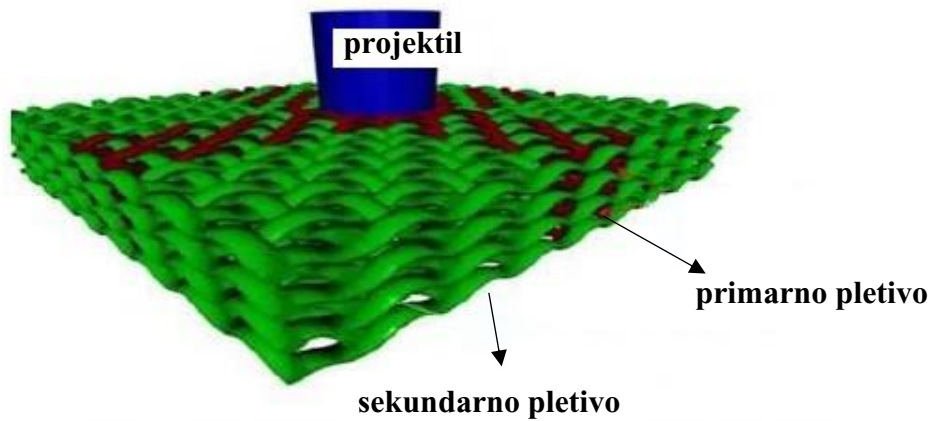
može doći do ukopavanja u prepreku gdje ne dolazi do potpunog proboja te može doći do odbijanja projektila pod određenim kutom. Energija kojom projektil udara u prepreku je kinetička energija projektila i ona je proporcionalna kvadratu brzine, a s obzirom da se ti procesi odvijaju u vremenu manjem od jedne milisekunde i uz velike brzine nastaju značajna oštećenja projektila i mete.

3.2. Mehanizam balističkog udara u vlaknima ojačan kompozit

S obzirom na oštećenja koja nastaju prilikom udara projektila u metu, u današnje se vrijeme provode brojna istraživanja kako napraviti materijal dovoljno čvrst da zadrži projektil i da ne nastanu velika oštećenja kako bi se mogao bezbrižno koristiti u balističkoj zaštiti. Trenutačno najveći udio u proizvodnji predmeta za balističku zaštitu imaju kompozitni materijali ojačani vlaknima zbog svojih odličnih svojstava. Poboljšanje performansi oklopa izrađenog od vlaknastih tkanina zahtijeva potpuno razumijevanje odziva na balistički udar i širenje valova tijekom procesa balističkog udara. Do sada su se razne tehnike koristile pri izvođenju konstitutivnih odnosa i modeliranju cjelokupnog balističkog ponašanja tkanine, poput analiziranja deformacije i pucanja pri balističkom udaru. Prilikom udarca projektila u kompozitnu ploču, može se uočiti formiranje dvije vrste pletiva, slika 11 i 12.

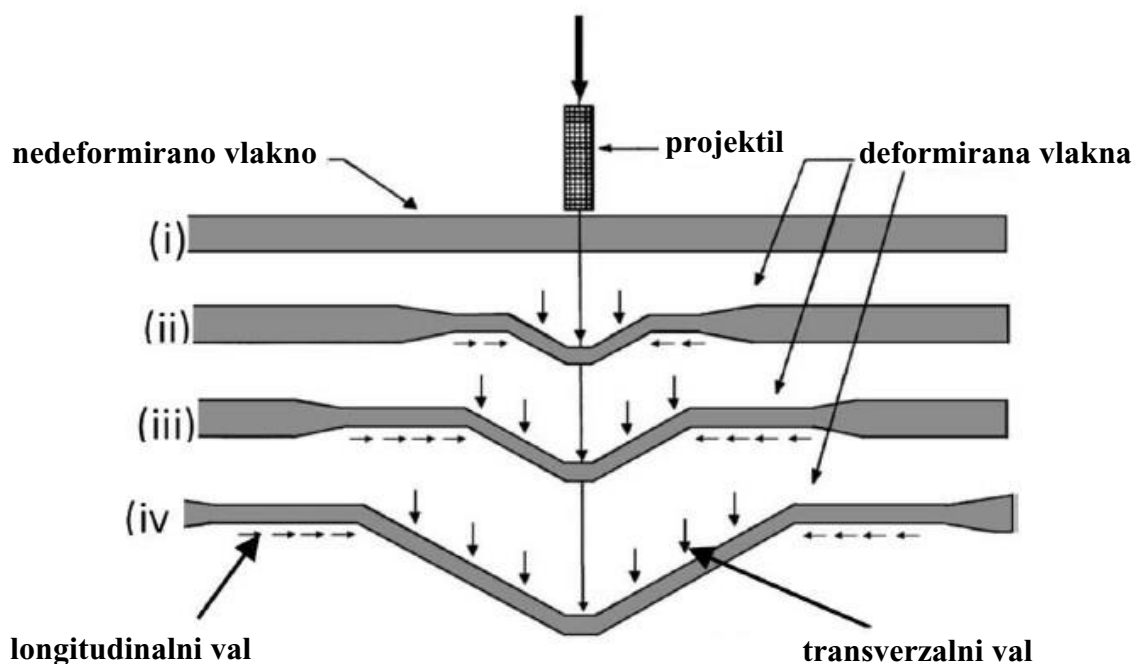


Slika 11. 2D prikaz dijela tkanine pogođene projektilom [14]



Slika 12. 3D prikaz dijela tkanine pogođene projektilom [14]

Vlakna koja su u direktnom kontaktu s projektilom nazivaju se primarno pletivo, a ostala vlakna koja nisu u direktnom kontaktu su sekundarno pletivo. Prilikom udara projektil stvara progib u primarnom pletivu u smjeru udara jer se vlakna kreću zajedno s projektilom, a u pletivu se stvaraju i longitudinalni valovi koji se zatim rapidno nastavljaju širiti po osima primarnog pletiva brzinom zvuka. Sekundarno pletivo nije toliko opterećeno kao primarno, no zbog ispreplitanja vlakana primarnog i sekundarnog pletiva, ono ima veliku ulogu u apsorpiranju kinetičke energije udarca. Vlakna u primarnom pletivu deformiraju se u smjeru udara sve dok ne dosegnu točku pucanja, slika 13 [14].



Slika 13. Izgled vlakna prije i poslije udara projektila [14]

3.3. Antibalističke ploče

Razina zaštite balističkih ploča određuje se ovisno o kalibru i oružju čiji udarac mogu izdržati. Postoji nekoliko internacionalnih balističkih standarda, vidljivo na slici 14.

ORUŽJE I STRELJIVO		USA NIJ 0108	USA UL 752	UK / AU AS 2343	EU EN 1063
	22 LRHV 38 Special	I	-	-	BR 1
	9mm FMU	II-A	Level 1	G 0	BR 2
	357 Magnum 9mm FMJ	II	Level 2	G 1	BR 3
	44 Magnum 9mm FMJ	III-A	Level 3/8	G 2	BR 4
	4.45mm (M16)	-	Level 5/7	R 1	BR 5
	9mm FMJ Automatic	-	Level 6	-	-
	7.62mm 308 FMJ - AK 47	III	-	R 2	BR 6
	30-06 AP AK 47	IV	Level 4	-	BR 7

Slika 14. Tablica internacionalnih balističkih standarda. [15]

Materijali koji se danas koriste pri izradi ploča za balističku zaštitu su: čelik, keramika, drvo te kompoziti ojačani vlaknima, koji su prethodno objašnjeni. Najveći udio u proizvodnji antibalističkih ploča u svijetu zauzimaju upravo kompozitni materijali.

3.3.1. Čelične antibalističke ploče

Čelične antibalističke ploče izrađene su od popuštenog čelika visoke tvrdoće od oko 500 HB (tvrdoća po Brinellu) i pogodne su za korištenje kod lakih naoružanih vozila jer im razina zaštite može doseći i do BR 7, ali ne i kod borbenih oklopnih. Povećanjem tvrdoće čelika raste i otpornost na penetraciju te se na taj način može smanjiti ukupna masa ploče, no posljedica toga je i smanjenje zavarljivosti i oblikovljivosti i strojna obrada takvih ploča može biti vrlo skupa i zahtjevna, ali je i dalje najjeftiniji materijal za ovu primjenu. Također, ako se čelici visoke tvrdoće ne tretiraju naknadnim postupcima, biti će krhki s tendencijom loma pri udarcu metka, a tako nastale krhotine mogu prouzročiti značajne ozljede. Masa čeličnih ploča daleko je najveća u odnosu na ostale.

3.3.2. Keramičke antibalističke ploče

Keramika je materijal izuzetno visoke tvrdoće, znatno više od metalnih materijala. Zbog svoje tvrdoće i visoke tlačne čvrstoće često se koristi pri izradi ploča za balističku zaštitu. Ploče od keramike poprilično su lagane i imaju veću sposobnost apsorpcije energije, a mogu se koristiti i u kombinaciji s aramidnim vlaknima čime se povećava otpornost na penetratore. S druge strane, njihova cijena znatno je veća od čelika i nisu otporne na rafalnu paljbu, odnosno mogu podnijeti do 3 metka u određenom području, a nakon toga ploča se počinje lomiti [16].

3.3.3. Drvene antibalističke ploče

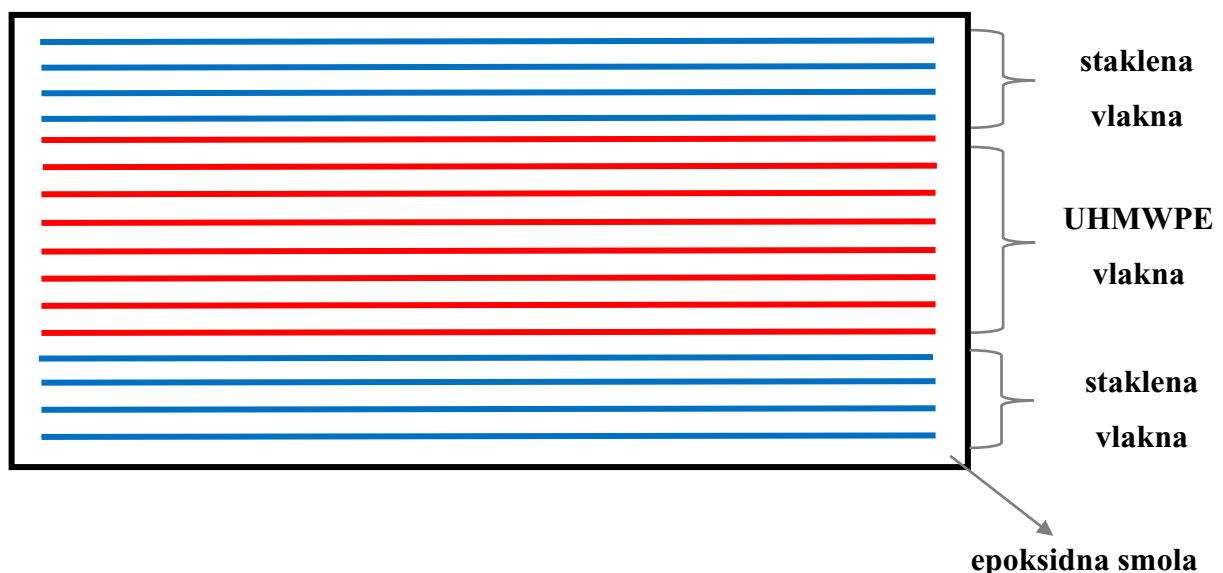
Neke vrste drva, kao što su hrast i javor, poznate su po svojoj čvrstoći. No jednostavnim i jeftinim procesima bilo koje drvo može se pretvoriti u materijal jači od čelika, pa čak i od titanovih legura i na taj se način koristiti u proizvodnji antibalističkih ploča. Proces započinje uranjanjem slojeva drveta u otopinu natrijevog hidroksida (NaOH) i natrijevog sulfita (Na_2SO_3) te se nakon toga vrućim prešanjem formiraju jake kemijske veze koje značajno očvršćuju materijal [17]. Velika prednost ovako nastalih ploča je njihova cijena jer je drvo izuzetno jeftin materijal. Uz ekonomičnost, drvene ploče su značajno lakše od čeličnih i keramičkih, a čvrstoća im je slična. Nedostatak im je niska razina zaštite, maksimalno BR 2. Ovaj postupak izrade zahtjeva još dodatna istraživanja kako bi se mogao primjenjivati u komercijalnoj proizvodnji antibalističkih ploča.

4. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu ovog rada, na temelju do sad analiziranih podataka o zaštitnim svojstvima određenih materijala, izrađena je antibalistička kompozitna ploča od epoksidne smole ojačana staklenim i UHMWPE vlaknima. Nakon izrade ploča je podvrgnuta testiranju u realnim uvjetima, odnosno u nju su iz pištolja ispaljeni metci kalibra 9 mm s punom metalnom košuljicom, Magnum .44 i Magnum .357 kako bi se uočilo kako i u kojoj mjeri predložena struktura utječe na otpornost materijala prema prodiranju. Osim te ploče izrađene su i dvije tanje ploče od epoksidne smole bez vlakana. U jednu ploču umiješane su nanočestice aluminijevog oksida (Al_2O_3), dok je druga bez ikakvih ojačala. Iz tih ploča izrezani su uzorci za ispitivanje mehaničkih svojstava. Ispitivana je savojna čvrstoća i savojni modul elastičnosti; vlačna čvrstoća i udarni rad loma, a ti su podaci naknadno analizirani kako bi se mogao donijeti zaključak o utjecaju nanopunila na poboljšanje mehaničkih svojstava.

5. IZRADA ANTIBALISTIČKE KOMPOZITNE PLOČE

Na temelju poznatih svojstava vlakana i matrice, predložena je struktura kompozitne ploče u kojoj se kombinacija mat i roving staklenih vlakna nalazi s obje strane na površini, a kvadratno isprepletenu UHMWPE vlakna u sredini i ona su međusobno povezana epoksidnom matricom, slika 15. Razlog tomu je što su staklena vlakna veće tvrdoće i bolje vatrootpornosti te mogu pomoći pri raspršivanju energije projektila prilikom udara, a ispod njih se nalaze visokočvrsta i visokožilava UHMWPE vlakna koja bi zaustavila projektil pri prodoru u materijal. S obzirom da se ne zna s koje strane ploče bi metak bio ispaljen, 4 sloja staklenih vlakana stavljena su s obje strane, a u sredini se nalazi 8 slojeva UHMWPE vlakana.



Slika 15. Shema strukture hibridne kompozitne ploče

Kompozitna ploča izrađena je u tvrtki specijaliziranoj za izradu kompozitnih proizvoda. Korištena je metoda ručnog polaganja gdje se tkanine isprepleteneh vlakana stavljaju na ravnu podlogu i zatim se kistom nanosi epoksidna smola. Specijalnim valjkom smola se ravnomjerno raspoređuje po tkanini, nakon čega se nanosi sljedeći sloj tkanine. Pri izradi ploče korištena su UHMWPE vlakna težine 160 g/m^2 i širine 1500 mm, te epoksidna smola SR InfuGreen 810.

Na slikama u nastavku prikazan je detaljan postupak izrade kompozitne ploče ručnim polaganjem.



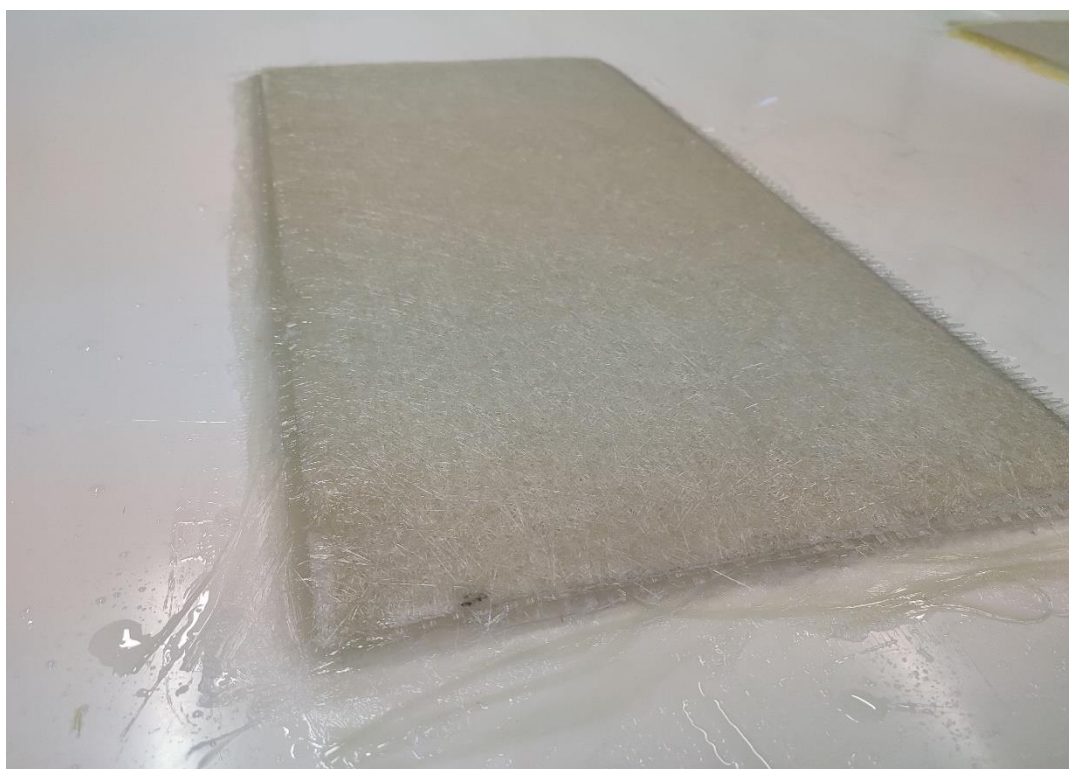
Slika 16. Slojevi UHMWPE i staklenih vlakana



Slika 17. Izrada ploče metodom ručnog polaganja



Slika 18. Nanošenje središnjeg sloja UHMWPE vlakna

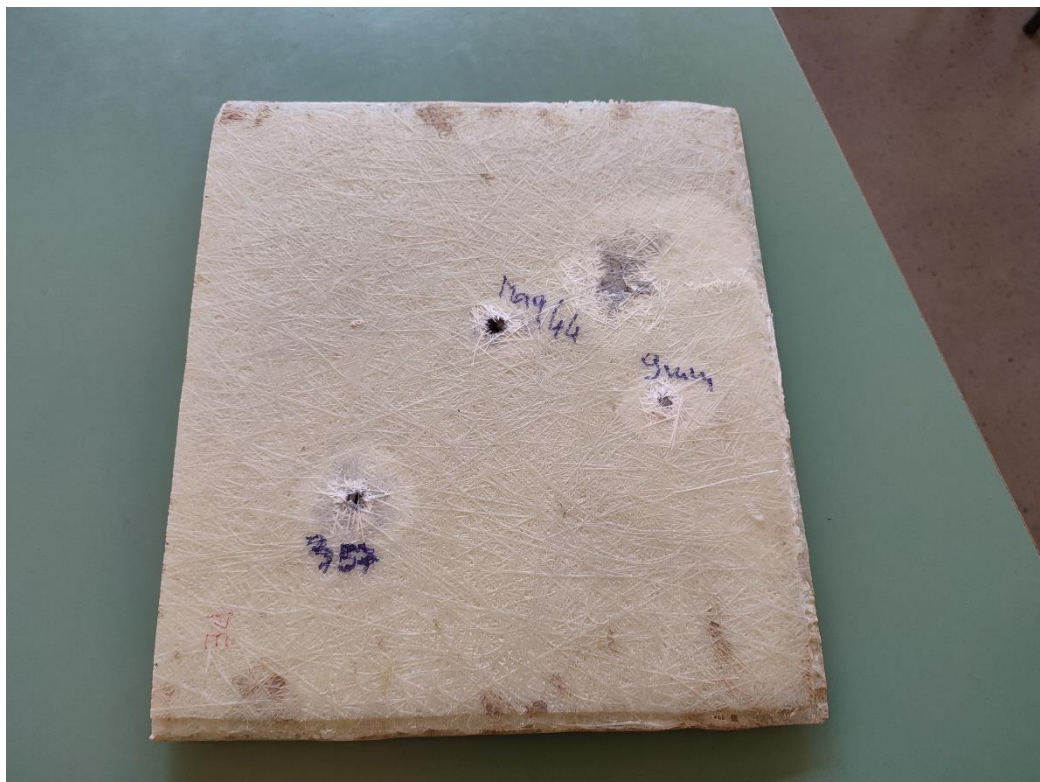


Slika 19. Izrađena ploča u procesu skrućivanja

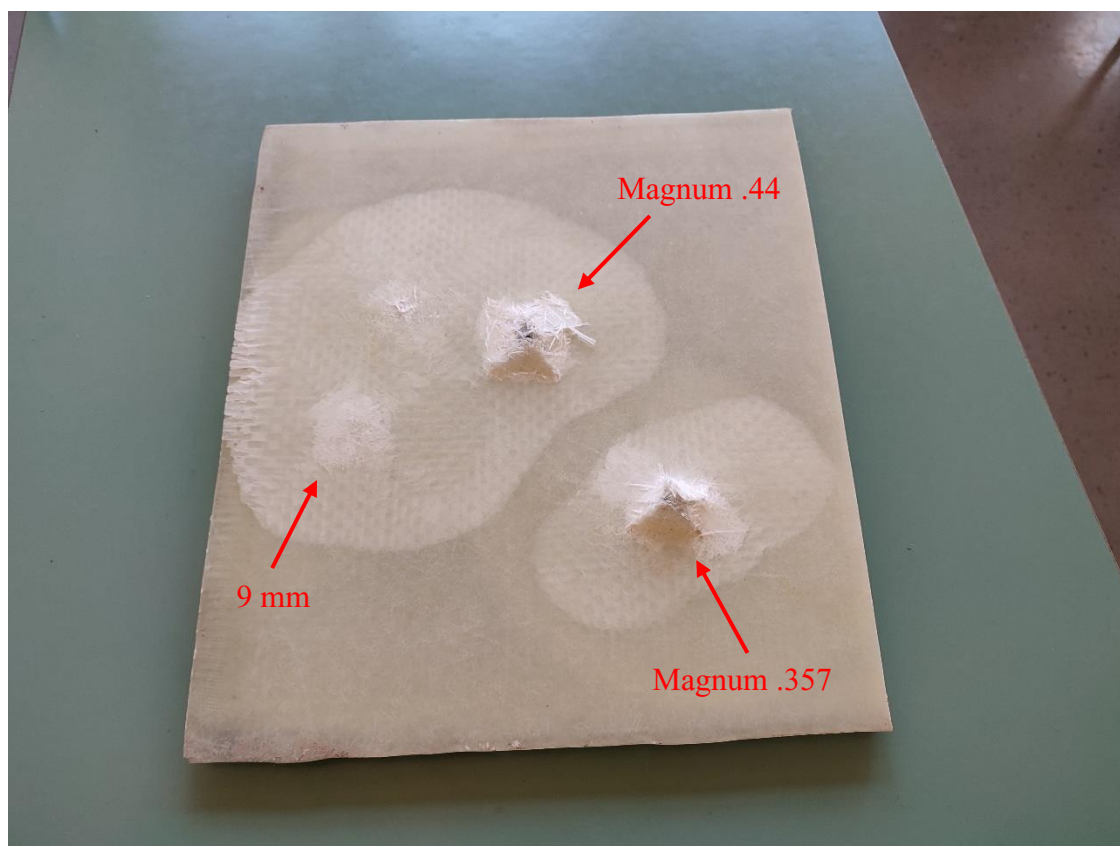
Nakon što je ploča hibridnog kompozita izrađena, ostavljena je na sobnoj temperaturi i atmosferskim uvjetima kako bi došlo do njenog skrućivanja. Zatim je u Laboratoriju za polimere i kompozite proveden post-curing postupak koji se odvijao na 60 °C pri trajanju od 2 sata kako bi došlo do još jačeg skrućivanja epoksidne smole i otklanjanja zaostalih naprezanja. Nakon toga je hibridna kompozitna ploča bila podvrgnuta ispitivanju otpornosti na prodiranje penetratora.

5.1. Ispitivanje ploče pucanjem

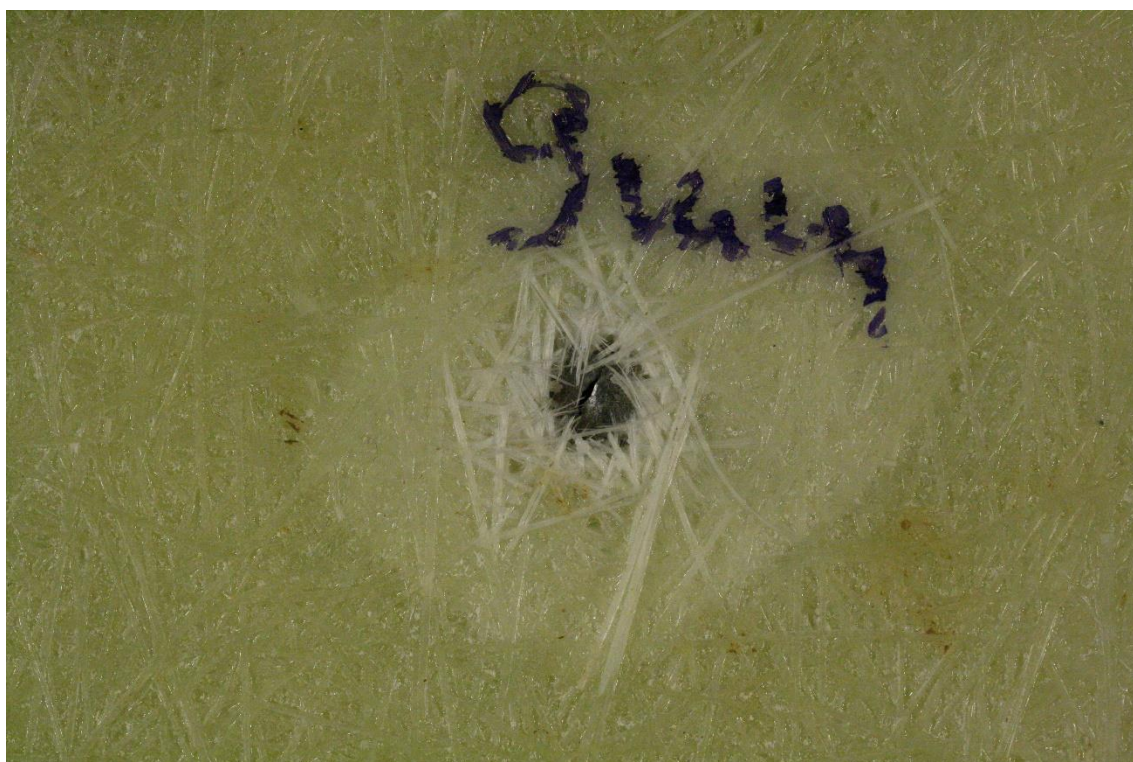
Kako bi se vidjelo koliko je napravljena kompozitna ploča čvrsta, odnosno otporna na kinetičke penetratore, u jednom lovačkom društvu provedeno je ispitivanje pucanjem iz pištolja. Ispitivanje se vršilo u osiguranim uvjetima, gdje je iskusni lovac s udaljenosti od 5 metara pucao u ploču. Korištena streljiva bila su tri različita kalibra: 9 mm s potpuno presvučenim zrnom, Magnum .357 i Magnum .44. Na slikama 20-24 vide se rezultati provedenog ispitivanja.



Slika 20. Prednja strana ploče nakon pucanja



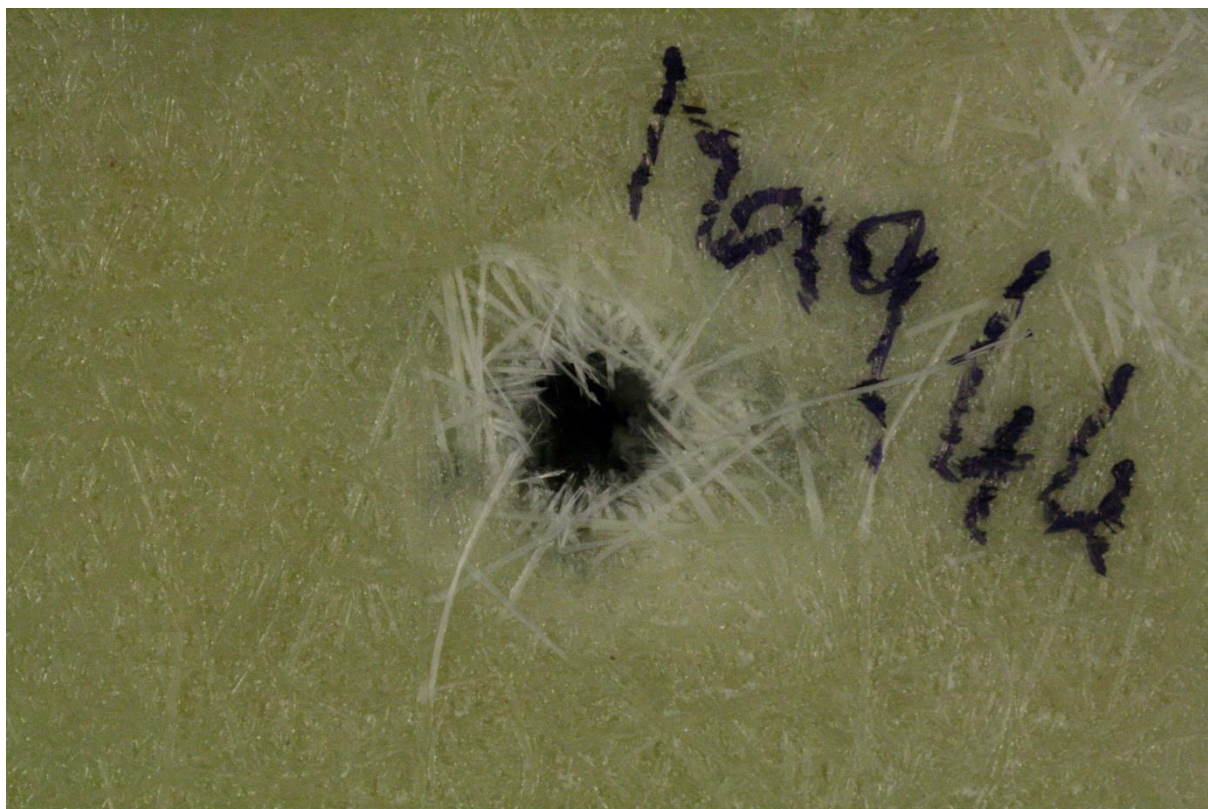
Slika 21. Stražnja strana ploče nakon pucanja



Slika 22. Ulazna strana rupe kalibra 9 mm



Slika 23. Ulazna strana rupe kalibra Magnum .357



Slika 24. Ulazna strana rupe kalibra Magnum .44

Na temelju provedenog ispitivanja i analize nastalih oštećenja može se zaključiti kako je hibridna kompozitna ploča s UHMWPE i staklenim vlaknima uspjela zadržati metak kalibra 9 mm s potpuno presvučenim zrnom, dok su veći kalibri Magnum .357 i Magnum .44 uništili vlakna i probili ploču. Ti rezultati govore da je ovakva kombinacija ojačala i matrice dovoljna za zaštitu do BR 2 razine, odnosno otporna je na penetriranje malim kalibrima do 9 mm.

6. ISPITIVANJE UTJECAJA Al_2O_3 NANOČESTICA

Kako bi se vidio utjecaj ojačala u obliku nanočestica aluminijevog oksida (Al_2O_3) na mehanička svojstva stvrdnute epoksidne smole, napravljene su dvije jednake kvadratne ploče debljine 4 mm od kojih je u jednu od njih prije skrućivanja dodano 0,5% raspršenih nanočestica aluminijevog oksida. Zatim su se iz tih ploča izrezali uzorci za provedbu ispitivanja savojne čvrstoće i modula elastičnosti, vlačne čvrstoće i žilavosti.

6.1. Savojna čvrstoća i savojni modul elastičnosti

Ispitivanje savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti provodi se po normi HRN EN ISO 178:2019. Dimenzije uzoraka za ispitivanje su 80 mm x 10 mm x 4 mm i iz svake je ploče izrezano po 5 uzoraka. U tablici 1 prikazane su točne dimenzije svake izrezane epruvete, a u tablici 2 su rezultati provedenog ispitivanja.

Broj epruvete	Debljina [mm]	Širina [mm]
Referentna_1	3,96	9,42
Referentna_2	3,22	9,78
Referentna_3	3,18	10,00
Referentna_4	3,38	10,06
Referentna_5	3,28	9,98
0,5%_1	3,60	9,76
0,5%_2	3,59	9,91
0,5%_3	3,32	10,01
0,5%_4	3,36	9,89
0,5%_5	3,80	9,77

Tablica 1. Dimenzije epruveta za savojnu čvrstoću

Broj epruvete	Savojna čvrstoća [N/mm ²]	Savojni modul elastičnosti [N/mm ²]
Referentna_1	80	1870
Referentna_2	107	3161
Referentna_3	93	2685
Referentna_4	92	2484
Referentna_5	102	3011
SREDNJA VRIJEDNOST	95	2642
0,5%_1	66	2701
0,5%_2	70	3233
0,5%_3	114	3366
0,5%_4	109	3173
0,5%_5	69	3179
SREDNJA VRIJEDNOST	86	3130

Tablica 2. Savojna čvrstoća i modul elastičnosti epoksidnih ploča

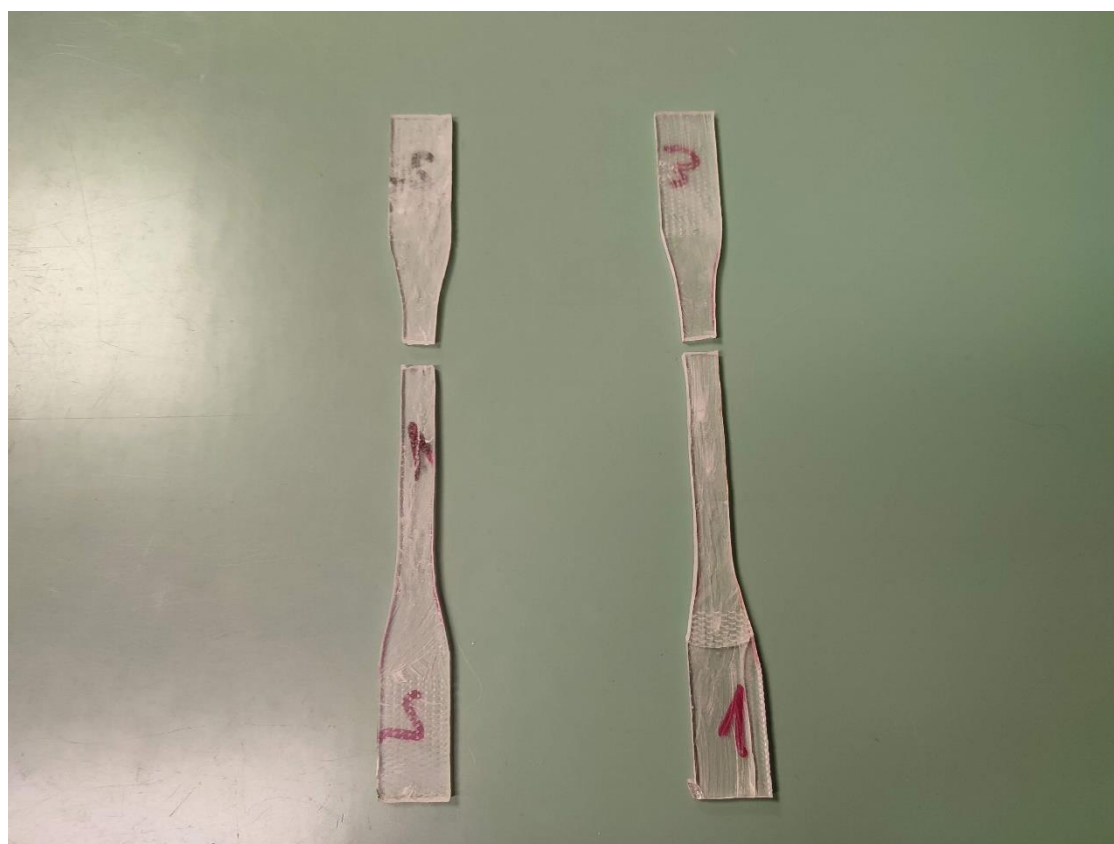
Iz dobivenih rezultata može se zaključiti da 0,5% nanočestica aluminijevog oksida ne utječe na poboljšanje savojne čvrstoće, dok se kod savojnog modula elastičnosti može primijetiti porast od oko 18% od početne vrijednosti. Na ovakva rasipanja rezultata ispitivanja može utjecati različita debljina uzoraka nastala pri lijevanju epoksidne smole u kalup ili mikropukotine nastale pri rezanju uzoraka.

6.2. Vlačna čvrstoća

Ispitivanje vlačne čvrstoće provodi se po normi HRN EN ISO 527-4:2008. Na slici 25 prikazana je kidalica na kojoj je vršeno ovo ispitivanje, a na slici 26 su uzorci bez i s nanočesticama fotografirani nakon ispitivanja. U tablici 3 prikazani su rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće epoksidnih ploča.



Slika 25. Kidalica za provedbu ispitivanja čvrstoće



Slika 26. Slomljene epruvete nakon ispitivanja vlačne čvrstoće

Broj epruvete	Vlačna čvrstoća [N/mm ²]	Modul elastičnosti [GPa]
Referentna_1	64	2,7
Referentna_2	71	2,7
Referentna_3	73	2,8
Referentna_4	69	2,8
Referentna_5	63	2,4
SREDNJA VRIJEDNOST	68	2,68
0,5%_1	72	3,0
0,5%_2	81	2,9
0,5%_3	81	3,1
0,5%_4	78	3,0
0,5%_5	58	2,7
SREDNJA VRIJEDNOST	74	2,94

Tablica 3. Vlačna čvrstoća epoksidnih ploča

Iz rezultata ispitivanja vlačne čvrstoće može se uočiti kako 0,5% raspršenih čestica aluminijevog oksida utječe na povećanje vlačne čvrstoće epoksidne smole za oko 8% uz povećanje modula elastičnosti za oko 10%.

6.3. Udarni rad loma

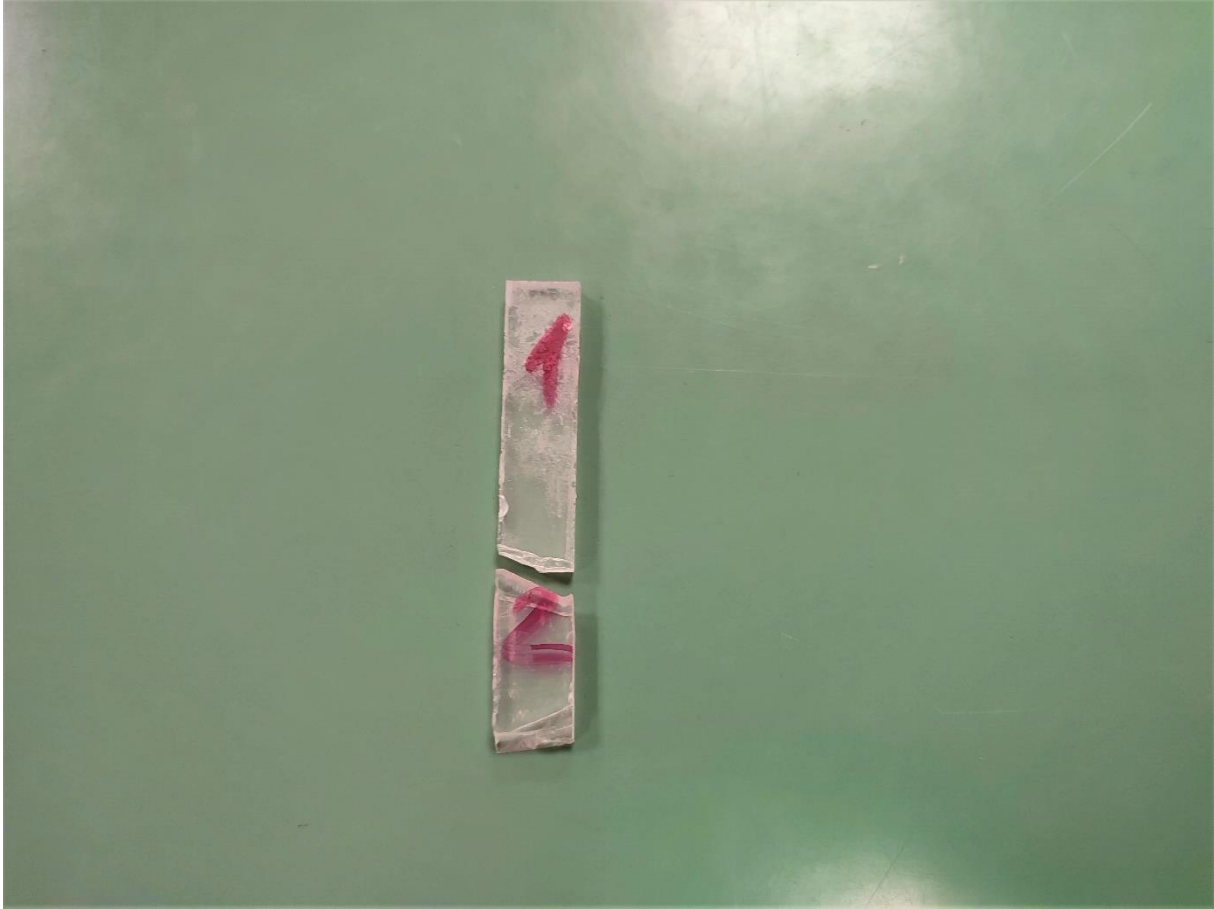
Ispitivanje žilavosti odnosno udarnog rada loma izvodi se na Charpyjevom batu prema normi HRN EN ISO 179-1:2005. Ono se vrši tako da se očitaju vrijednosti promjene potencijalne energije bata koji lomi epruvetu i zatim se te vrijednosti po formuli $A_{CN} = \frac{E_C}{b \cdot h} * 10^3$ preračunaju kako bi se dobile vrijednosti žilavosti. Iz svake ploče izrezano je 5 uzoraka dimenzija 80 mm x 10 mm x 4 mm. U tablici 4 prikazane su izmjerene vrijednosti debljine i širine epruveta, a u tablici 5 vrijednosti energije bata i žilavosti, a slika 27 prikazuje epruvetu nakon ispitivanja udarnog rada loma.

Broj epruvete	Debljina, h [mm]	Širina, b [mm]
Referentna_1	3,50	8,84
Referentna_2	3,48	9,32
Referentna_3	3,38	9,34
Referentna_4	3,30	9,12
Referentna_5	3,34	9,00
0,5%_1	3,44	10,42
0,5%_2	3,44	10,44
0,5%_3	3,35	10,44
0,5%_4	3,42	10,38
0,5%_5	3,38	10,34

Tablica 4. Dimenzije epruveta za udarni rad loma

Broj epruvete	Promjena potencijalne energije bata, E_C [J]	Žilavost, A_{CN} [Kj/m ²]
Referentna_1	0,90	29
Referentna_2	2,35	72
Referentna_3	1,85	59
Referentna_4	1,00	33
Referentna_5	0,60	20
SREDNJA VRIJEDNOST	1,34	43
0,5%_1	0,40	11
0,5%_2	0,94	26
0,5%_3	1,45	42
0,5%_4	0,70	20
0,5%_5	2,00	57
SREDNJA VRIJEDNOST	1,10	31

Tablica 5. Vrijednosti žilavosti epoksidnih ploča



Slika 27. Slomljena epruveta nakon ispitivanja na Charpyjevom batu

Rezultati ispitivanja udarnog rada loma pokazuju kako dodavanje 0,5% nanočestica aluminijevog oksida u epoksidnu smolu zapravo narušava žilavost, no ti se rezultati ne mogu smatrati mjerodavnima zbog velikog rasipanja rezultata i velikih oscilacija u dobivenim vrijednostima. Takve oscilacije moguće su zbog mikropukotina nastalih prilikom izrezivanja uzoraka te je svakako preporučljivo rezati ih vodenim mlazom kako ne bi došlo do pojave tih mikropukotina zbog izrazite krhkosti materijala.

7. ZAKLJUČAK

Antibalističke ploče svojim zaštitnim svojstvima već dugi niz godina pružaju sigurnost ljudima, pogotovo u profesionalnoj svrsi poput vojske i policije. Postoje razni materijali od kojih se one izrađuju, no svakako se najčešće primjenjuju antibalističke ploče od kompozitnih materijala. Kompoziti su vrlo zahvalni materijali jer se raznim kombinacijama njihove strukture mogu dobiti različita svojstva krajnjeg proizvoda. Pri izradi antibalističkih materijala i dalje se vrše ispitivanja kakva kombinacija matrice i ojačala pruža najveću zaštitu, ali sve se češće primjenjuju visokočvrsta polietilenska vlakna s ultra visokom molekularnom masom (UHMWPE).

Upravo iz tog razloga u ovom je istraživanju izabrana struktura hibridne slojevite kompozitne ploče od UHMWPE i staklenih vlakana u kombinaciji s epoksidnom matricom kako bi se vidjela njena otpornost na prodiranje metaka. Rezultati ispitivanja zadovoljavajući su s obzirom na debljinu ploča i mogu pružiti otpornost do BR 2 razine, odnosno otporni su na metke manjih kalibara do 9 mm. Tako proizvedena ploča mogla bi se primjenjivati za osobnu zaštitu poput zaštitnih prsluka.

Također, ispitivana je i ovisnost mehaničkih svojstava epoksidne smole o nanočesticama aluminijevog oksida (Al_2O_3). Provedena su ispitivanja savojne i vlačne čvrstoće i modula elastičnosti te udarnog rada loma, a ispitivani su uzorci od čiste epoksidne smole i s 0,5% raspršenih nanočestica aluminijevog oksida. Rezultati provedenih ispitivanja pokazali su kako dodavanje ojačala u obliku nanočestica utječe tek na modul elastičnosti i vlačnu čvrstoću. Kako bi se takva nanopunila mogla primjenjivati u kompozitima ojačanim vlaknima, potrebno je provesti daljnja ispitivanja utječu li nanočestice na adheziju između vlakana i matrice.

LITERATURA

[1] <https://pubs.rsc.org/en/Content/ArticleLanding/2016/RA/C6RA24016J>

(pristupio 05.01.2022.)

[2] Filetin, T., Kovačićek, F., Indof, J., Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.

[3] <https://dragonplate.com/an-overview-of-epoxy-resins> (pristupio 06.01.2022.)

[4] <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7077683/> (pristupio 06.01.2022.)

[5] <https://ironlady003.wordpress.com/2014/05/12/kompozitni-materijali/>

(pristupio 07.01.2022.)

[6] https://www.researchgate.net/figure/Types-of-particle-reinforced-composites-a-Large-particle-b-Dispersion-strengthened_fig3_343128161 (pristupio 08.01.2022.)

[7] Garafulić E., Detekcija i procjena oštećenja kompozitnih struktura primjenom aktivne metode infracrvene termografije, Doktorska disertacija, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split 2013.

[8] Matija Jagar, Kompoziti s plastomernom matricom ojačanom vlaknima, Završni rad, FSB, 2019.

[9] https://www.researchgate.net/publication/319554470_Manufacturing_Study_Of_Protective_Clothing_Specifications_And_Its_Wearing_Applications_In_Different_Fields

(pristupio 12.01.2022.)

[10] Chawla, K. K., Composite Materials: Science and Engineering, Third edition, Springer, New York, 2012.

[11] Dyneema, Ultra High Molecular Weight Polyethylene Fiber from DSM Dyneema, 2016.

[12] <https://guodunarmor.com/mg/vokatra/10d-200d-tena-tsara-fibra-uhmwpe-tsara/>

(pristupio 14.01.2022.)

[13] Kneubuehl, Coupland, Rothschild, Thali, Wound Ballistics Basics and Applications, Springer Verlag, 2011.

[14] Abtew M.A., Boussu F., Ballistic impact mechanisms - A review on textiles and fibre-reinforced composites impact responses, Lille, 2019.

[15] <https://rmaspecialvehicles.com/composite-panels/> (pristupio 29.01.2022.)

[16] <https://www.shotstop.net/blogs/blog/what-different-body-armor-steel-ceramic-polyethylene-vs-duritium-body-armor> (pristupio 30.01.2022.)

[17] <https://www.scientificamerican.com/article/stronger-than-steel-able-to-stop-a-speeding-bullet-mdash-it-rsquo-s-super-wood/> (pristupio 31.01.2022.)

PRILOZI

I. CD-R disc