

Primjena kompozita za tjelesnu zaštitu

Kožuh, Vilim

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:024074>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-16**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Vilim Kožuh

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Zdravko Schauperl

Student:

Vilim Kožuh

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Zdravku Schauperlu na korisnim savjetima, pruženoj podršci i primjedbama tijekom izrade ovog rada.

Hvala tehničkom suradniku Ivanu Vovku na susretljivosti i pomoći pri korištenju opreme za eksperimentalni dio rada.

Zahvaljujem laborantu Božidaru Bušetinčaninu i vanjskom suradniku dipl. ing. Krešimiru Grljeviću na pomoći pri pravljenju i ispitivanju uzoraka za eksperimentalni dio rada.

Posebne zahvale djelatnicima tekstilno tehnološkog fakulteta Zagreb: prof. dr. sc Edita Vujasinović, prof. dr. sc Sandra Bischof i mag. ing. tech. text. Marijana Pavunc Samaržija na dodatnoj pomoći i savjetima.

(Vlastoručni Potpis)

Vilim Kožuh



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 / 23 – 6 / 1 | |
| Ur.broj: 15 - 1703 - 23 - | |

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Vilim Kožuh** JMBAG: **0035225520**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena kompozita za tjelesnu zaštitu**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of composites for body protection**

Opis zadatka:

Kompoziti predstavljaju atraktivan konstrukcijski materijal koji zbog svojih svojstava i prednosti u odnosu na tradicionalne konstrukcijske materijale ima sve veću primjenu. Sve češće se ti materijali koriste i u izradi dijelova za osobnu tjelesnu zaštitu. Tu se posebno ističu vlaknima ojačani polimerni kompoziti.

U radu je potrebno opisati svojstva i strukturu kompozitnih materijala te dati pregled primjene polimernih kompozita u izradi dijelova za tjelesnu zaštitu. U praktičnom dijelu rada potrebno je odabrati materijale matrice i ojačala koji bi se mogli primijeniti za tu namjenu. S tim komponentama treba izraditi uzorke za laboratorijska ispitivanja te provesti ispitivanja tog kompozita. Na temelju dobivenih rezultata potrebno je donijeti zaključke o primjenljivosti izabranih materijala i korištene tehnologije izrade kompozita za dijelove za tjelesnu zaštitu.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

Datum predaje rada:

1. rok: 20. 2. 2023.
 2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.
 3. rok: 18. 9. 2023.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27. 2. – 3. 3. 2023.
 2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.
 3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Zdravko Schauperl

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

| | |
|--|------|
| SADRŽAJ | III |
| POPIS SLIKA | IV |
| POPIS TABLICA..... | VII |
| POPIS OZNAKA | VIII |
| POPIS KRATICA | VIII |
| SAŽETAK..... | IX |
| SUMMARY | IX |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. KOMPOZITNI MATERIJALI..... | 2 |
| 2.1. Općenito o kompozitima..... | 2 |
| 2.1.1. Podjela kompozita..... | 3 |
| 2.1.1.1. Kompoziti s česticama | 4 |
| 2.1.1.2. Strukturni kompoziti | 5 |
| 2.1.1.3. Vlanknima ojačani kompoziti..... | 6 |
| 2.2. Matrica od poliesterske smole..... | 9 |
| 2.3. Izbor vlakana..... | 11 |
| 2.3.1. Aramidna vlakna | 12 |
| 2.3.2. Polietilenska vlakna | 14 |
| 2.3.3. Staklena vlakna | 16 |
| 3. EKSPERIMENTALNI RAD..... | 18 |
| 3.1. Izrada uzoraka | 18 |
| 3.2. Ispitivanje balistike | 22 |
| 3.2.1. Način provođenja balističkog ispitivanja i korištena oprema | 22 |
| 3.2.2. Analiza A uzorka nakon ispitivanja balistike | 24 |
| 3.2.3. Analiza PE uzorka nakon ispitivanja balistike..... | 29 |
| 3.2.4. Analiza S uzorka nakon ispitivanja balistike | 33 |
| 3.2.5. Usporedba uzoraka nakon ispitivanja balistike..... | 37 |
| 3.3. Ispitivanje udarnog rada loma..... | 38 |
| 3.3.1. Ispitivanje udarnog rada loma Charpy-evim batom..... | 38 |
| 3.3.2. Rezultati ispitivanja žilavosti epruveta izrezanih iz uzorka A..... | 40 |

| | |
|--|----|
| 3.3.3. Rezultati ispitivanja žilavosti epruveta izrezanih iz uzorka PE | 41 |
| 3.3.4. Rezultati ispitivanja žilavosti epruveta izrezanih iz uzorka S..... | 42 |
| 3.3.5. Usporedba uzoraka nakon ispitivanja žilavosti..... | 43 |
| 4. ZAKLJUČAK..... | 44 |
| LITERATURA..... | 45 |

POPIS SLIKA

| | | |
|-----------|--|----|
| Slika 1. | Usporedba svojstava kompozita s konstrukcijskim čelikom i aluminijem [2] | 3 |
| Slika 2. | Osnovni tipovi kompozita [1]..... | 4 |
| Slika 3. | Shematski prikaz kompozita ojačanog česticama [3]..... | 4 |
| Slika 4. | Shematski prikaz laminata [4]..... | 5 |
| Slika 5. | Shematski prikaz sendvič kompozita [5]..... | 6 |
| Slika 6. | Odnos čvrstoće i promjera kod ugljičnih vlakana [1] | 7 |
| Slika 7. | Različiti načini rasporeda vlaknastih ojačala [2]..... | 8 |
| Slika 8. | Struktura tipičnog poliestera [7]..... | 10 |
| Slika 9. | Struktura aramidnih vlakana [2]..... | 12 |
| Slika 10. | Oprema za tjelesnu zaštitu [10], [11] | 13 |
| Slika 11. | Kompoziti korišteni u avionu [12] | 13 |
| Slika 12. | Struktura polietilena [13]..... | 14 |
| Slika 13. | Puzanje polietilenskih vlakana [9] | 15 |
| Slika 14. | Struktura staklenih vlakana [2]..... | 16 |
| Slika 15. | Luk ojačan staklenim vlaknima [14] | 17 |
| Slika 16. | Shematski prikaz broda ojačanog staklenim vlaknima [15]..... | 17 |
| Slika 17. | Rezanje tkanine na željeni oblik i dimenzije..... | 19 |
| Slika 18. | Izrezana vlakna..... | 19 |
| Slika 19. | Poliester smola i katalizator | 19 |
| Slika 20. | Slaganje slojeva vlakana i premazivanje..... | 20 |
| Slika 21. | Gotovi uzorci..... | 20 |
| Slika 22. | Pneumatski pištolj, kapsula s plinom i zrna | 22 |
| Slika 23. | B472-ST Precision Light screen okvir za mjerenje brzine zrna..... | 24 |
| Slika 24. | A uzorak nakon pucanja | 25 |
| Slika 25. | Bliski prikaz otiska tri na uzorku A..... | 25 |
| Slika 26. | Presjek A uzorka (25.2:1)..... | 26 |
| Slika 27. | Presjek A uzorka na mjestu udara zrna (25,2:1 i detalj) | 26 |
| Slika 28. | Presjek A uzorka na mjestu udara zrna (50:1, površina)..... | 27 |
| Slika 29. | Presjek A uzorka na mjestu udara zrna (50:1, sredina)..... | 28 |
| Slika 30. | Presjek A uzorka na mjestu udara zrna (50:1, pozadina) | 28 |

| | | |
|-----------|---|----|
| Slika 31. | Uzorak PE nakon pucanja | 30 |
| Slika 32. | Bliski prikaz otiska dva na uzorku PE..... | 30 |
| Slika 33. | Presjek PE uzorka (45,3:1) | 31 |
| Slika 34. | Presjek PE uzorka na mjestu udara zrna (30,2:1 i detalj)..... | 31 |
| Slika 35. | Presjek PE uzorka na mjestu udara zrna (50:1, površina)..... | 32 |
| Slika 36. | Presjek PE uzorka na mjestu udara zrna (50:1, sredina) | 32 |
| Slika 37. | Presjek PE uzorka na mjestu udara zrna (50:1, pozadina) | 33 |
| Slika 38. | Uzorak S nakon pucanja..... | 34 |
| Slika 39. | Bliski prikaz otiska dva na uzorku S | 34 |
| Slika 40. | Presjek S uzorka (29,3:1) | 35 |
| Slika 41. | Presjek S uzorka na mjestu udara zrna (25,2:1 i detalj) | 35 |
| Slika 42. | Presjek S uzorka na mjestu udara zrna (50:1, površina) | 36 |
| Slika 43. | Presjek S uzorka na mjestu udara zrna (50:1, pozadina)..... | 36 |
| Slika 44. | Charpy-ev bat [16]..... | 38 |
| Slika 45. | Shematski prikaz rada charpy-evog bata [16] | 39 |
| Slika 46. | Epruvete izrađene iz A uzorka nakon ispitivanja žilavosti | 40 |
| Slika 47. | Epruvete izrađene iz PE uzorka nakon ispitivanja žilavosti..... | 41 |
| Slika 48. | Epruvete izrađene iz S uzorka nakon ispitivanja žilavosti | 42 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 1. Orijentacijske vrijednosti mehaničkih svojstava poliestera [1]..... | 10 |
| Tablica 2. Orijentacijske vrijednosti mehaničkih svojstava nekih ojačala [1], [8] | 11 |
| Tablica 3. Orijentacijske vrijednosti polietilena [2]..... | 14 |
| Tablica 4. Orijentacijski kemijski sastav staklenih vlakana [2] | 16 |
| Tablica 5. Svojstva korištenih vlakana..... | 18 |
| Tablica 6. Parametri gotovih uzoraka..... | 20 |
| Tablica 7. Pucanje u A uzorak..... | 24 |
| Tablica 8. Pucanje u PE uzorak..... | 29 |
| Tablica 9. Pucanje u S uzorak | 33 |
| Tablica 10. Usporedba rezultata balističkog ispitivanja..... | 37 |
| Tablica 11. Dimenzije i žilavost epruveta izrezanih iz uzorka A..... | 40 |
| Tablica 12. Dimenzije i žilavost epruveta izrezanih iz uzorka PE..... | 41 |
| Tablica 13. Dimenzije i žilavost epruveta izrezanih iz uzorka S | 42 |
| Tablica 14. Usporedba rezultata ispitivanja žilavosti..... | 43 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Mjerna jedinica | Opis oznake |
|---------------|------------------------|---|
| E | N/m^2 | Youngov modul elastičnosti |
| E_k | J | Kinetička energija |
| Fl | $1/\text{Nm}^2$ | Fleksibilnost |
| G | N | Težina bata |
| g | m/s^2 | Gravitacijska konstanta ubrzanja na zemlji ($9,81 \text{ m/s}^2$) |
| h_1 | m | Početna visina bata |
| h_2 | m | Krajnja visina bata |
| K | J | Udarni rad loma |
| MR | Nm^2 | Fleksualna krutost |
| m | kg | Masa |
| r | m | Duljina njihala |
| S_x | - | Standarda devijacija |
| s | m | Prijeđen put |
| t | s | Vrijeme |
| v | m/s | Brzina |
| \bar{x} | - | Prosječna vrijednost |
| α | ° | Početni kut |
| β | ° | Krajnji kut |

POPIS KRATICA

| Kratica | Opis |
|----------------|---------------------------------------|
| A uzorak | Uzorak ojačan aramidnim vlaknima |
| PE uzorak | Uzorak ojačan polietilenskim vlaknima |
| S uzorak | Uzorak ojačan staklenim vlaknima |

SAŽETAK

Cilj ovog završnog rada je napraviti i testirati kompozitne materijale za svrhu tjelesne zaštite od fragmenata ili ostalih projektila visoke brzine i male mase. U teorijskom dijelu rada je objašnjeno što su kompoziti, koje vrste kompozita postoje, kakva svojstva mogu imati i koja su tražena svojstva za ovu namjenu, oblik i konfiguracija ojačala, odnos i kompatibilnost ojačala i polimerne matrice, te očekivana mehanička svojstva koja se pokušavaju ispuniti. Eksperimentalni dio obuhvaća ručni postupak izrade kompozita, balistička ispitivanja pomoću pneumatskog pištolja na zrna, ispitivanje žilavosti Charpy-evim batom, analizu mikrostrukture prije i poslije balističkog ispitivanja te usporedbom dobivenih rezultata. Nakon usporedbe donesen je zaključak koji je korišteni kompozitni materijal pokazao najbolje karakteristike tokom ispitivanja i potencijalni načini za poboljšanje u realnoj primjeni.

Ključne riječi: Kompozit, matrica, ojačalo, balistika, žilavost, tjelesna zaštita, mikrostruktura

SUMMARY

The aim of this undergraduate thesis is to create and test composite materials for the purpose of body protection from fragments or high speed, low mass projectiles. In the theoretical part of this study it is described what composite materials are, what types of composites exist, what are their properties and what are the necessary properties for this undergraduate thesis, the type and the configuration of reinforcement and their configurations and relation to the matrix, the compatibility of the matrix and the reinforcement and expected mechanical properties that are trying to be achieved. The experimental part of this study will describe the process of making composite materials by hand, ballistic testing using a pneumatic powered pellet air pistol, toughness testing using Charpy impact test, microstructure analysis of the composite material before and after ballistic testing and the comparison of obtained results. After the comparison a conclusion will be made which of the composite materials used displayed the best characteristics during testing and potential ways to improve the material for real world application.

Key words: Composite, matrix, reinforcement, ballistics, toughness, body protection, microstructure

1. UVOD

Među svim modernim tehničkim materijalima kompoziti potencijalno imaju najviše prostora za razvoj i napredak zbog razvoja komponenti koje se koriste u njihovoj proizvodnji i širokog područja primjene u kojima drugi materijali nemogu ispuniti sve potrebne zahtjeve. Kompoziti su materijali koji se sastoje od dvaju ili više materijala, različitih kemijskih i fizičkih svojstava, koji su nakon međusobnog spajanja na molekularnoj razini i dalje jasno odvojeni (za razliku od legura). Kompoziti se sastoje od ojačala, koje podnosi opterećenje, i matrice, koja prenosi opterećenje na ojačalo. Svojstva matrice i ojačala, njihova međusobna kompatibilnost i njihov udio, orijentacija, veličina i oblik ojačala i način proizvodnje su neki od faktora koji značajno utječu na konačna svojstva gotovog kompozita. S toliko varijabli koje se mogu mijenjati moguća je konstrukcija materijala s točno određenim svojstvima koja su u standardnim materijalima međusobno isključiva (npr. visoka čvrstoća i mala masa). Općenito, kompoziti se koriste kada uobičajeni konstrukcijski materijali ne zadovoljavaju sve nužne uvjete, te je potrebno rješenje za neki točno definirani problem. S svojim širokim opsegom svojstava i mogućnošću dobivanja točno traženih karakteristika, kompoziti se primjenjuju u nizu modernih industrija, kao što su svemirska, transportna (avio, pomorska, cestovna), vojna industrija, u medicini, sportu, građevini itd. Najčešća primjena kompozita je u proizvodnji produkata koju nužno moraju imati malu masu i dobra mehanička svojstva, kao što su vatreno oružje, sportska oprema (skije, palice, reketi...), dijelova auta i aviona, boce za ronjenje, posebni konstrukcijski materijali, kacige i oprema za tjelesnu zaštitu. U sklopu ovog završnog rada proizvest će se tri kompozitna materijala s različitim ojačalima te će se nakon niza ispitivanja ti materijali međusobno usporediti i bit će donesen zaključak koji od njih je najbolje primjenjiv u svrsi tjelesne zaštite. Svrha napravljenih materijala je primjena kao tjelesna zaštita u popularnom sportu „*Airsoft*“ koji simulira bitku na bojnopolju s vatrenim oružjem. Umjesto vatrene opreme, koriste se pneumatske replike koje za municiju koriste plastična zrnca, ali su njihove brzine vrlo visoke i potencijalno mogu uzrokovati trajne ozljede i ožiljke.

2. KOMPOZITNI MATERIJALI

2.1. Općenito o kompozitima

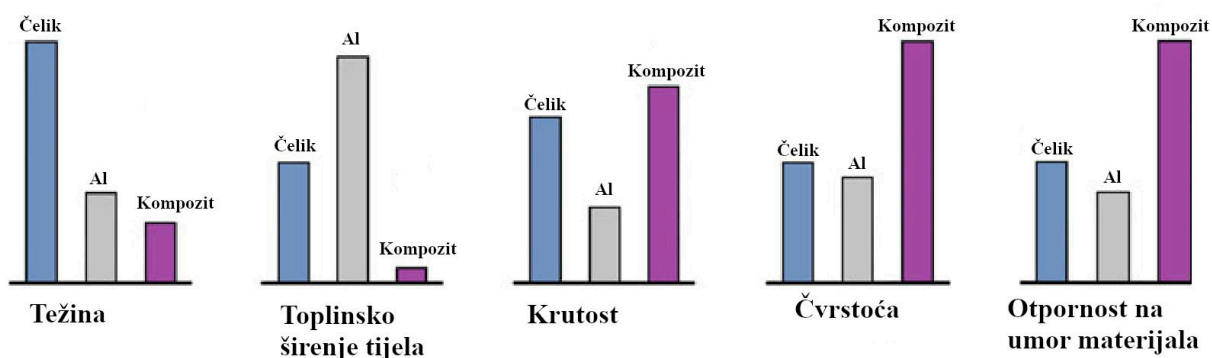
Kompoziti su po definiciji materijali sastavljeni od dvoje ili više faza koje su fizički i kemijski jasno odvojene i definirane (za razliku od legura). Posjeduju svojstva koja nijedna od njihovih pojedinačnih faza ne pokazuje, tj kombiniranjem različitih materijala dobivaju se nova obilježja materijala koja konstituenti pojedinačno nemaju, uključujući postizanje inače međusobno isključivih svojstava. Nadalje, potrebno je naglasiti da u tehničkom kontekstu kompoziti moraju biti proizvedeni umjetnim putem; u prirodi postoji mnogo primjera kompozita (drvo, list kokosove palme, kosti itd.) međutim za potrebe ovog završnog rada smisao kompozita je ograničen na umjetno proizvedene kompozite.

Svaki kompozitni materijal se sastoji od osnove (matrice) i ojačala. Svrha ojačala je da podnosi opterećenje dok je zadatak matrice opterećenje prenijeti na ojačalo, međusobno povezati ojačalo i držati ga na mjestu, te ga štititi od vanjskih utjecaja i oštećenja. Matrica i ojačalo međusobno imaju značajno različita mehanička i kemijska svojstva i upravo njihovim kombiniranjem se mogu ispuniti traženi zahtjevi za materijal. Potrebno je naglasiti da vrsta matrice i ojačala nisu jedini parametri koji utječu na svojstva kompozita, već je nužno sagledati:

1. svojstva matrice i ojačala
2. veličinu, orijentaciju i raspodjelu ojačala u matrici
3. omjer volumena ojačala i volumena matrice
4. oblik konstituenata
5. međusobnu kompatibilnost i povezanost matrice i ojačala,

kako bi se precizno mogla odrediti svojstva dobivenog kompozita [1]. Uz sve parametre koji inače ulaze u izbor i konstrukciju materijala, kompoziti su dodali još nekoliko varijabli koje omogućuju neusporedivu fleksibilnost svojstava u odnosu na standardne materijale. Čak u usporedbi s legurama, čija svojstva ovise o manje od 0,1% udjela nekog elementa, kompoziti imaju više mogućnosti modifikacije tj. dizajniranja potrebnih svojstava. Naposljetku, kompoziti u sebi mogu sadržati gotovo bilo koji materijal, koliko god da je on već sam po sebi kompleksan, te na njega mogu kombinirati druge, potencijalno jednako komplicirane materijale. Upravo zbog takvih mogućnosti, kompoziti su daleko najsloženiji materijali za

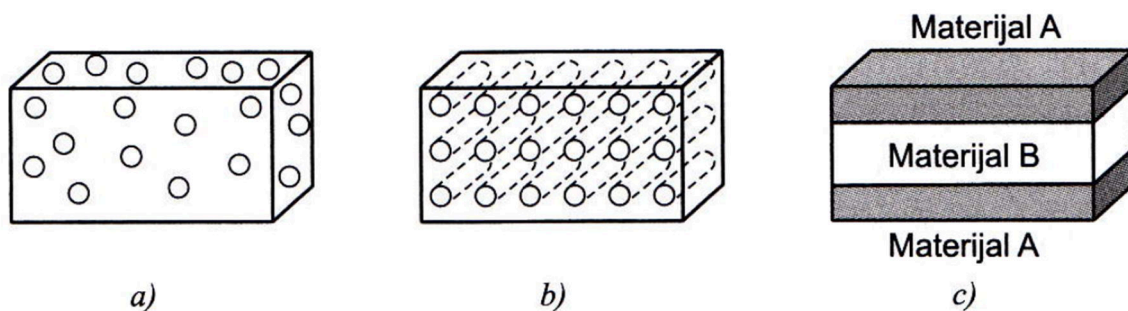
konstruirati i proizvesti; uključuju sve dotada nužne proizvodne postupke i račune te dodaju još nekoliko parametara s kojima se može raspolagati kako bi se mogla postići gotovo savršena svojstva za bilo koji dani problem. Zbog svojih unikatnih mogućnosti dizajniranja svojstava glavna svrha kompozitnih materijala je optimizacija i usavršavanje traženih svojstava materijala i minimiziranje nedostataka u zadanom kontekstu. U mnogo realnih slučajeva, kompoziti su jedino (logično) rješenje na dani problem upravo zbog svoje fleksibilnosti da se ispune točno traženi zahtjevi sa svojim specifičnim mehaničkim i kemijskim svojstvima i to je njihova najveća prednost. Opet je nužno naglasiti da kompoziti mogu kombinirati najbolja svojstva svojih konstituenata, te tako postići svojstva koja su kod standardnih materijala međusobno isključiva; npr. velika čvrstoća i mala masa ili visoka čvrstoća i žilavost (slika 1).



Slika 1. Usporedba svojstava kompozita s konstrukcijskim čelikom i aluminijem [2]

2.1.1. Podjela kompozita

S toliko mogućih opcija izbora matrice, ojačala i njihovog međusobnog odnosa, nužno je uvesti podjelu kompozita u svrhu lakšeg dizajniranja njegovih svojstava. Ima mnogo parametara prema kojima se kompoziti mogu podijeliti te stoga je nužno krenuti od najopćenitije i najosnovnije podjele; podjela po obliku ojačala i strukturi. Na temelju toga kriterija kompoziti se mogu podijeliti na tri osnovne skupine: kompoziti s česticama, kompoziti ojačani vlaknima i strukturni kompoziti (slika 2).

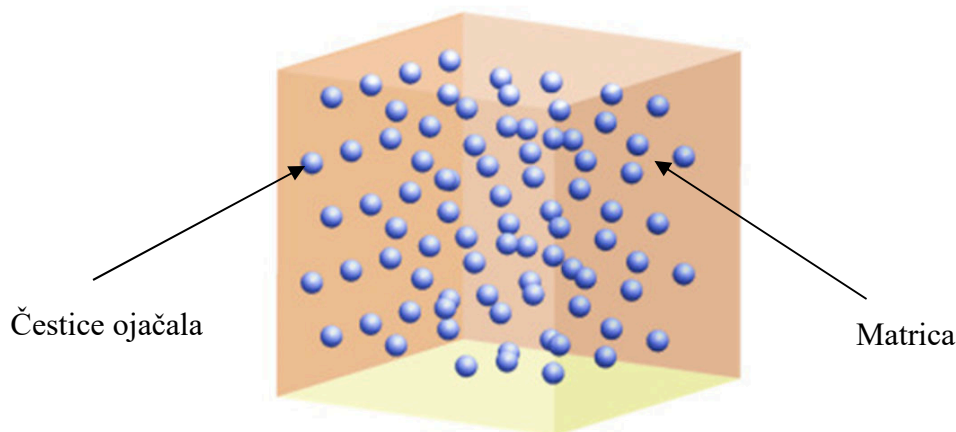


Slika 2. Osnovni tipovi kompozita: a) kompozit ojačan česticama, b) kompozit ojačan vlaknima, c) strukturni kompozit [1]

Ovi osnovni tipovi kompozita značajno se razlikuju po svojim svojstvima, neovisno o tome koji je materijal korišten ili o veličini i orijentaciji ojačala. Prije daljnjih podjela i odabira materijala i njegovih konfiguracija, nužno je izabrati jedan od ovih osnovnih tipova kompozita, te je za to potrebno razumjeti osnovna svojstva i karakteristike svake od navedenih vrsta.

2.1.1.1. Kompoziti s česticama

Kompoziti s česticama se sastoje od matrice u kojoj su nasumično (ali ravnomjerno) raspoređene čestice ojačala (slika 3).



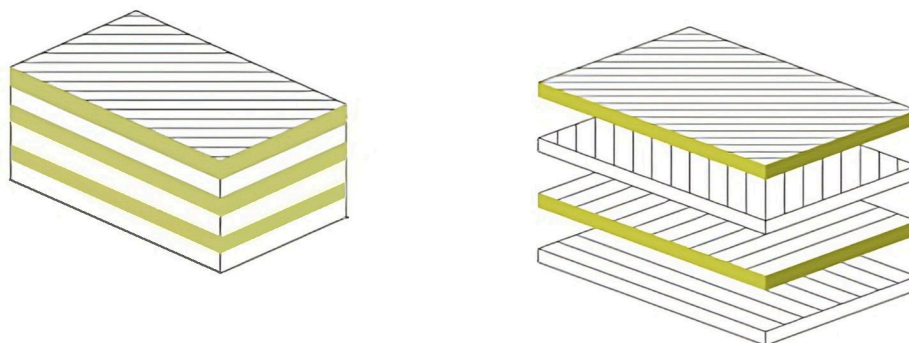
Slika 3. Shematski prikaz kompozita ojačanog česticama [3]

Njihova glavna karakteristika (u usporedbi s ostalim vrstama kompozita) je izotropnost mehaničkih svojstava. Izotropnost se postiže jednolikom raspodjelom ojačala (čestica) u matrici koje sprječava gibanje dislokacija i tako omogućava predvidljivo ponašanje u nizu primjena, te se stoga kompoziti ojačani česticama često primjenjuju kao (bolja) alternativa za

legure. Od mehaničkih svojstava karakteriziraju ih visoka otpornost na trošenje, visoka tlačna čvrstoća i tvrdoća, toplinska i električna vodljivost ili se mogu koristiti kao toplinski izolatori, ovisno o primjeni i sastavu. Kompoziti s česticama se najčešće koriste kao rezni alati, abrazivi (brusne ploče), električni kontakti, kalupi za lijevanje i jezgre i mnogo drugih primjena u kojima je ključna otpornost na trošenje (abrazija, adhezija, umor površine, toplinski umor itd). Na temelju navedenih svojstava može se donijeti zaključak da kompoziti ojačani česticama nisu prikladni za svrhu tjelesne zaštite, pri kojoj je najbitnije svojstvo fleksibilnost, mala masa, žilavost i raspršivanje kinetičke energije na veću površinu i također nije potrebna izotropnost mehaničkih svojstava pošto je najveće djelovanje sile uvijek okomito na gotovi proizvod.

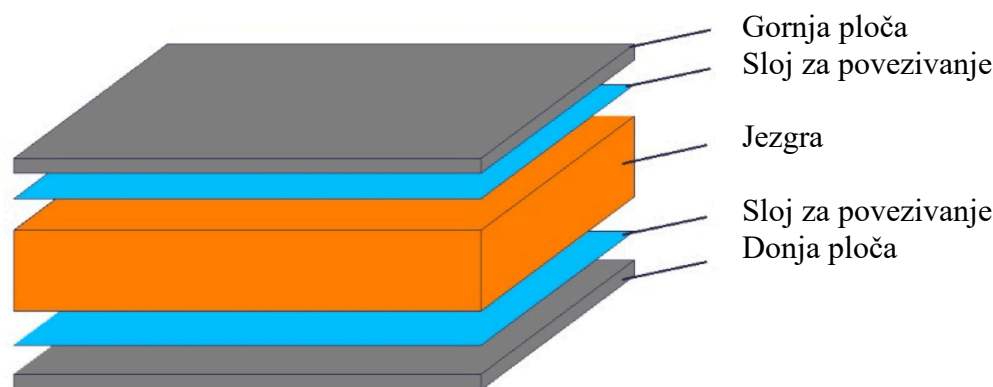
2.1.1.2. Strukturni kompoziti

Strukturni kompoziti se dijele na dvije glavne skupine: laminata i sendvič kompozite. Laminati su kompoziti sastavljeni od međusobno povezanih kompozita ili od nekog homogenog materijala s kompozitom, tj. sastoje se od slojevito složenih i međusobno povezanih ploča (slika 4). Njihova svojstva ovise o svakom pojedinačnom sloju, orijentaciji sloja i međusobnoj povezanosti između slojeva. Mehanička i kemijska svojstva značajno variraju i nema generalnog pravila po kojemu bi se mogli karakterizirati; laminati su za još dodatnu razinu kompliciraniji od ostalih kompozita, pošto sami po sebi mogu uključivati kompozite. Uglavnom se koriste za slaganje više jednakih kompozita jedan da drugi kako bi se postigla bolja mehanička svojstva (npr. više slojeva vlaknima ojačanih kompozita radi bolje tjelesne zaštite) ili u specifičnim slučajevima, npr. kada površinski sloj ima znatno drukčije zahtjeve od unutrašnjih slojeva (npr. vanjski sloj mora biti krut, otporan na trošenje i otpornost na vanjski agresivni medij, dok unutrašnji sloj mora biti žilav i niske gustoće).



Slika 4. Shematski prikaz laminata [4]

Druga skupina strukturnih kompozita su sendvič kompoziti koji se sastoje od tankih površinskih slojeva međusobno spojenih laganim materijalom za popunjavanje, kao što su spužva, polimerna pjena, stiropor i sl. (slika 5). Niti površinski sloj, niti materijal za popunjavanje ne moraju biti kruti ili čvrsti, ali njihovim kombiniranjem sendvič kompozit može imati oba navedena svojstva. Njihova glavna prednost je postizanje visoke savojne krutosti u kombinaciji s niskom masom, te se uglavnom koriste u privremenim konstrukcijama (zidovi, krovovi, podovi) ili u zračnoj industriji (oplate trupa, krila i repa zrakoplova). Unatoč svim navedenim dobrim mehaničkim svojstvima, sendvič kompoziti su izrazito osjetljivi na probijanje, a tjelesna zaštita se temelji upravo na sprječavanju probijanja stranih tijela kroz zaštitni materijal i stoga, sendvič kompoziti nisu prikladni za svrhu ovog završnog rada.



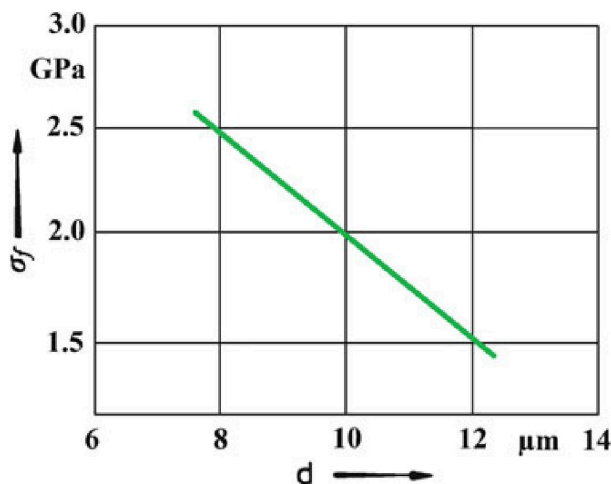
Slika 5. Shematski prikaz sendvič kompozita [5]

2.1.1.3. Vlaknima ojačani kompoziti

Vlaknima ojačani kompoziti danas su najčešći u primjeni i industriji zato što materijal u obliku vlakana ima veću čvrstoću i krutost nego u bilo kojem drugom obliku, a zadržava fleksibilnost, nisku gustoću i mogućnost oblikovanja i daljnje prerade. Kod kompozita, dodirna površina između ojačala i matrice je glavni faktor koji određuje prenošenje opterećenja na ojačalo, te niz slojeva vlakana ima znatno veću dodirnu površinu od bilo kojeg drugog oblika ojačala. Navedene podatke može se definirati kao niz razloga zbog kojih se vlakna koriste u inženjerskim materijalima visokih performansi:

1. Mali promjer u korelaciji s veličinom kristalnog zrna; takav odnos omogućava postizanje većeg dijela teoretske čvrstoće u usporedbi s “*bulk*” oblikom materijala. Ova pojava je

direktna posljedica takozvanog efekta dimenzija: što je manja veličina, manja je šansa nesavršenosti u materijalu. Slika 6 prikazuje odnos čvrstoće i promjera kod ugljičnih vlakana.



Slika 6. Odnos čvrstoće i promjera kod ugljičnih vlakana [1]

Prikazani odnos je linearan, no to nije generalno pravilo, već vrijedi samo u ovom konkretnom slučaju. Čvrstoća uvijek pada s povećanjem promjera, ali ne nužno linearno.

2. Veliki omjer duljina/promjer (vlakana) koji omogućuje veliku dodirnu površinu između ojačala i matrice, što nadalje omogućava prijenos velikog dijela opterećenja s matrice na ojačalo. Ojačala su uglavnom čvrsta, kruta i krhka dok matrica osigurava žilavost i duktilnost.

3. Vrlo visok stupanj fleksibilnosti vlakana (opisan jednačbom 1, [2]) koji omogućava niz mogućih daljnjih prerada kod kreiranja kompozita.

$$Fl = 1/MR = 64/(E\pi d^4) \quad (1)$$

gdje je:

Fl = fleksibilnost, $1/\text{Nm}^2$

MR = fleksualna krutost, Nm^2

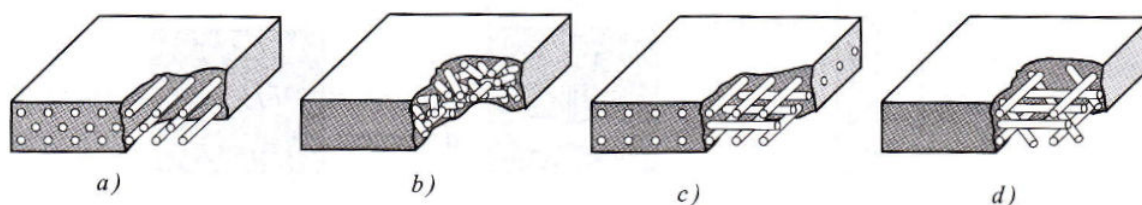
E = Youngov modul elastičnosti, N/m^2

d = promjer vlakna, m

Iz jednačbe se vidi da je fleksibilnost vrlo osjetljiva na promjenu promjera vlakna. U teoriji je neovisno o materijalu, uz dovoljno mali promjer moguće proizvesti vlakna jednako fleksibilna kao vlakna bilo kojeg drugog materijala, čak i od vrlo krhkih i krutih materijala kao što su staklo, silicijev karbid, aluminijev oksid itd., makar je sam proces proizvodnje takvih vlakana vrlo zahtjevan i kompliciran.

Navedena svojstva vlakana, tj kompozita ojačanim vlaknima su upravo ona koja su potrebna u kontekstu tjelesne zaštite: fleksibilnost, žilavost, visoka vlačna čvrstoća i niska gustoća su nužna obilježja materijala koji dobro raspršuje energiju, tj kinetičku energiju od stranog tijela raspršuje na veću površinu i tako sprječava penetraciju. Logično je donijeti zaključak da su vlaknima ojačani kompoziti idealni za kontekst ovog završnog rada i radi dosada navedenih razloga uzorci koji će biti ispitani u eksperimentalnom dijelu završnog rada će biti napravljeni od kompozitnog materijala s ojačalom u obliku vlakana.

Nadalje, postoje razne vrste ojačala u obliku vlakana i različite konfiguracije i oblici ojačala u matrici, stoga je potrebno razmotriti još neke parametre prije izbora materijala ojačala. Za početak, potrebno je odabrati raspored ojačala u matrici (slika 7).



Slika 7. Različiti načini rasporeda vlaknastih ojačavala: a) kontinuirana jednosmjerna vlakna, b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna, c) ortogonalno raspoređena vlakna, d) višesmjerno usmjerena vlakna [2]

Najbitnija karakteristika kompozita u kontekstu tjelesne zaštite je žilavost i dvo dimenzijska izotropnost, te odabrana konfiguracija mora zadovoljavati ta dva kriterija. Kontinuirana jednosmjerna vlakna nemaju izotropna mehanička svojstva u dvije dimenzije, što predstavlja problem zbog mogućnosti penetracije stranog tijela u proizvod pod određenim kutom. Kompoziti s kratkim diskontinuiranim vlaknima svojim svojstvima naginju kompozitima ojačanim česticama i žrtvuju žilavost za krutost i čvrstoću, te iz tih razloga nisu prikladni za tjelesnu zaštitu. Preostaju kompoziti s ortogonalno raspoređenim vlaknima i višesmjerno usmjerenim vlaknima. Obje konfiguracije su zadovoljavajuće i ispunjavaju sve nužne kriterije, međutim radi jednostavnosti kreiranja kompozita i uštede na višku materijala odabran je međusobno okomit raspored vlakana.

2.2. Matrica od poliesterske smole

Prije izbora matrice nužno je naglasiti da je u sklopu ovog završnog zadatka definirano da će biti korištena polimerna matrica, što je i logičan izbor, pošto polimerna matrica ima dobru duktilnost i nisku gustoću u usporedbi s metalnim i keramičkim matricama. Nadalje, dogovoreno je da će biti korištena poliesterska matrica, pošto je najdostupnija i najraširenija u komercijalnoj primjeni, a i dalje posjeduje sva nužna svojstva za kontekst tjelesne zaštite. U ovom poglavlju ukratko je predstavljena zadaća matrice i kako poliesterska smola ispunjava tu svrhu.

Funkcija matrice može se definirati kroz tri glavna zadatka [6]:

1. Povezivanje ojačala i zaštita od oštećenja

Matrica mora sva vlakna (općenito ojačalo) držati na mjestu, i zadržavati konkretni oblik. U ovom kontekstu, matrica također služi kao prepreka za napredovanje pukotina i u slučaju da pukne jedan dio ojačala ili čak i cijeli sloj, matrica može zaustaviti daljnji krhki lom. Matrica ima znatno niži modul elastičnosti od ojačala, te je stoga duktilnija tj. manje krhka i sklona nestabilnom lomu.

2. Prijenos opterećenja na vlakna

Matrica sama po sebi nema izrazito dobra mehanička svojstva, već što veći udio opterećenja koja djeluju na kompozit nastoji prebaciti na ojačala. Takav prijenos se postiže na dva načina: veća dodirna površina i razina povezanosti između matrice i ojačala. Poliesterska osnova ima izrazito dobru prionjivost, što je jedan od razloga njezine raširene upotrebe. Ove dvije točke biti će bolje razrađene u eksperimentalnom dijelu ispitivanja.

3. Zaštita od okolnih utjecaja (kemijska i toplinska zaštita)

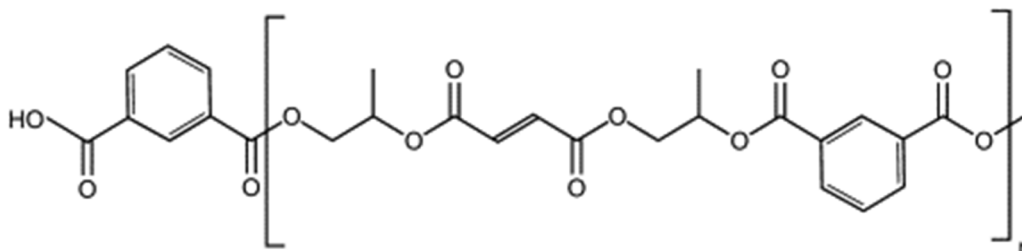
Poliester je u kontekstu tjelesne zaštite izvrsna kemijska zaštita. Ne reagira s vodom, ne razgrađuje se pod utjecajem bioloških faktora i radna temperatura mu je do 80°C, što je u strojarskom smislu niska randa temperatura, ali u kontekstu tjeselsne zaštite je zadovoljavajuća.

U tablici 1 su prikazane neke orijentacijske vrijednosti mehaničkih svojstava poliestera.

Tablica 1. Orijetacijske vrijednosti mehaničkih svojstava poliestera [1]

| Gustoća, ρ (g/cm ³) | Čvrstoća, σ (MPa) | Modul elastičnosti, E (GPa) | Poissonov omjer, ν | CTE, α (10 ⁻⁶ K ⁻¹) | Smanjenje uslijed umrežavanja (%) | Radna temperatura (°C) |
|---|-----------------------------|-----------------------------------|---------------------------|--|--|------------------------------|
| 1.1-1.4 | 30-100 | 2-4 | 0.2-0.33 | 50-100 | 5-12 | 80 |

Poliester se sastoji od duplih ugljik-ugljik jakih atomskih kovalentnih veza i linearne je građe i ima nepopunjenu molekulu tj. ima dobru mogućnost povezivanja s drugim molekulama. Takva građa (slika 8) mu omogućavaju solidna mehanička svojstva kombinirana s niskom gustoćom, ali velikom molekularnom masom i dobrom mogućnosti za vezanje s drugim materijalima. Uz sve navedene prednosti, poliester je jednostavno proizvesti (sam postupak proizvodnje je nebitan u kontekstu ovog završnog rada) i može se reciklirati.



Slika 8. Struktura tipičnog poliestera [7]

Zaključno, sa svim navedenim svojstvima logično je da je poliester najčešće korištena polimerna matrica. Primjenjiv je pri standardnim okolišnim uvjetima, jeftin za proizvesti i posjeduje zadovoljavajuća mehanička svojstva za niz primjena koje ne zahtijevaju iznimnu strukturnu stabilnost.

2.3 Izbor vlakana

Prvi korak kod izbora materijala vlakana je pogledati koja se ojačala već danas koriste u industriji i što preporuča dostupna literatura. Čak i bez ikakvog inženjerskog predznanja većina ljudi zna da prsluci otporni na metke u sebi sadrže „kevlar“, a to je komercijalni naziv za aramidna vlakna. Logika nalaže da će vlakna sa svojstvima sličnima aramidnim također imati dobru mogućnost primjene u tjelesnoj zaštiti, stoga je sljedeći korak pogledati orijentacijske vrijednosti mehaničkih svojstava vlakana kako bi se međusobno mogla usporediti svojstva i nadalje, primjena.

Tablica 2. Orijentacijske vrijednosti mehaničkih svojstava nekih ojačala [1],[8] (podatci za S-staklo preuzeti iz [8] i nadodani u tablicu)

| Materijal | Gustoća, kg/m ³ | Vlačna čvrstoća, N/mm ² | Specifična čvrstoća, (kNm/kg) | Module elastičnosti kN/mm ² | Specifični modul (kNm/kg) |
|------------------|-------------------------------|--|-------------------------------------|--|---------------------------------|
| Aluminijev oksid | 3950 | 1380 | 0,35 | 379 | 96 |
| Aramid | 1440 | 3600...4100 | 2,5...2,85 | 131 | 91 |
| Ugljik | 1780...2150 | 1500...4800 | 0,70...2,70 | 228...724 | 106...407 |
| E-staklo | 2580 | 3450 | 1,34 | 72,5 | 28 |
| S-staklo | 2530 | 4600 | 1,82 | 89 | 35,18 |
| Bor | 2570 | 3600 | 1,40 | 400 | 156 |
| Silicijev karbid | 3000 | 3900 | 1,30 | 400 | 133 |
| PE-UHMW | 970 | 2600 | 2,68 | 117 | 121 |

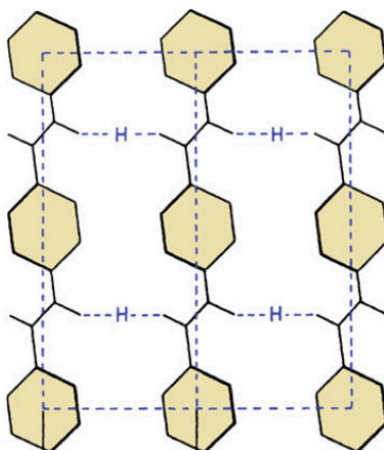
Koristeći aramidna vlakna kao referentnu vrijednost, dolazi se do zaključka da je sljedeći najbolji kandidat PE-UHMW (polietilenska vlakna ultra visoke molekularne mase), što nadalje podržava literatura: „Mnogo proizvođača svoja vlakna za balistiku izrađuje od aramida ili polietilena u mnogo različitih oblika i stilova.“ [2]

Za posljednji uzorak odabrana su staklena vlakna, ne zbog svojih svojstava, koja u kontekstu balistike nisu dobra kao kod aramidnih ili polietilenskih vlakana, već zbog svoje niske cijene, jednostavnosti primjene i široke komercijalne uporabe. Staklena vlakna se koriste u čak 90% polimernih kompozita [6] i imaju najveću fleksibilnost uporabe, što uključuje i tjelesnu zaštitu; „Komercijalna primjena staklenih vlakana je višestruka i uključuje ... i za balističke svrhe.“ [9]

Još je potrebno naglasiti da su sva odabrana vlakna kompatibilna s poliesterskom matricom, stoga nijedan materijal neće imati značajnu prednost u odnosu na ostale radi utjecaja matrice, već će do izražaja dolaziti njihova svojstva, makar je moguće različito raspršivanje matrice kroz ojačalo.

2.3.1 Aramidna vlakna

Aramidni su posebna vrsta vlakana s lančanom strukturom makromolekule koja se izrađuju od aromatskih poliamida u kojima je barem 85% amidnih veza (-CONH-) u makromolekuli povezano s dva aromatska prstena [9]. Takva lančana struktura je iznimno orijentirana (para-orijentacija; osnovna jedinica je simetrična molekula i veze od svakog aromatskog prstena su međusobno paralelne) i proteže se u smjeru vlakana, te također ima visok stupanj kristalnosti i jake kovalentne veze u smjeru vlakana i slabe vodikove veze okomito na smjer vlakna (slika 9).



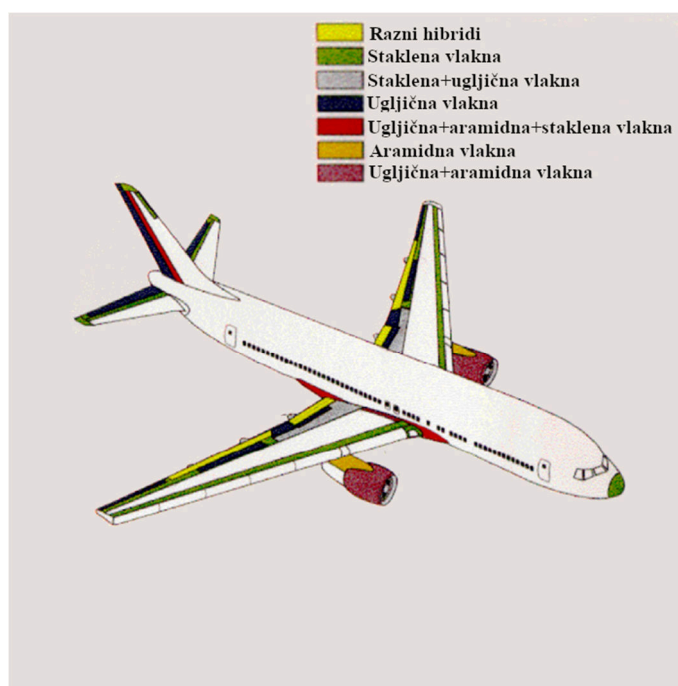
Slika 9. Struktura aramidnih vlakana [2]

Takva struktura aramidnim vlaknima daje njihova karakteristična svojstva: visoka vlačna čvrstoća i krutost, iznimno visoka žilavost, otpornost na umor materijala, ali i niska tlačna čvrstoća i loša otpornost na smično naprezanje. Takva kombinacija svojstava upućuje na izvrsnu otpornost na udarce, penetraciju i odlična mogućnost prigušivanja vibracija i stoga se aramidna vlakna najčešće primjenjivaju kao ojačalo u tjelesnoj zaštiti. Nadalje, potrebno je naglasiti i iznimno nisku gustoću aramida u odnosu na ostala komercijalna ojačala za polimerne matrice: oko 40% manja u odnosu na staklena vlakna i 20% manja u odnosu na ugljična vlakna. S niskom masom otvara se niz mogućnosti primjena, naročito u industriji transporta (zračnoj, pomorska), sportu, u vojnoj industriji, ne samo u zaštiti ljudi, već i strojeva, pa čak i u svemirskoj industriji. Uz sve svoje prednosti, polimerni kompoziti ojačani

aramidnim vlaknima imaju dobru dinamičku izdržljivost; uzorci s epoksidnom smolom i aramidnim vlaknima su izdržali 3 000 000 ciklusa opterećenja na 50% svoje vlačne čvrstoće [9]. Također postoje različiti vrste i oblici aramidnih vlakana i svaka vrsta modificira generalna svojstva za određenu svrhu. Zaključno, aramidna vlakna se koriste kada je potrebna dobra žilavost, mogućnost prigušivanja vibracija i niska masa, a krutost nije presudna. Najčešće primjene uključuju: tjelesna zaštita od vatrenog (uključujući i zaštitu od eksplozija) i hladnog oružja, užadi, dijelovi zrakoplova, helikoptera i raketa i u pomorskoj industriji se koriste kao dodatna potpora za prigušavanje vibracija uzrokovanih djelovanjem valova (slike 10 i 11).



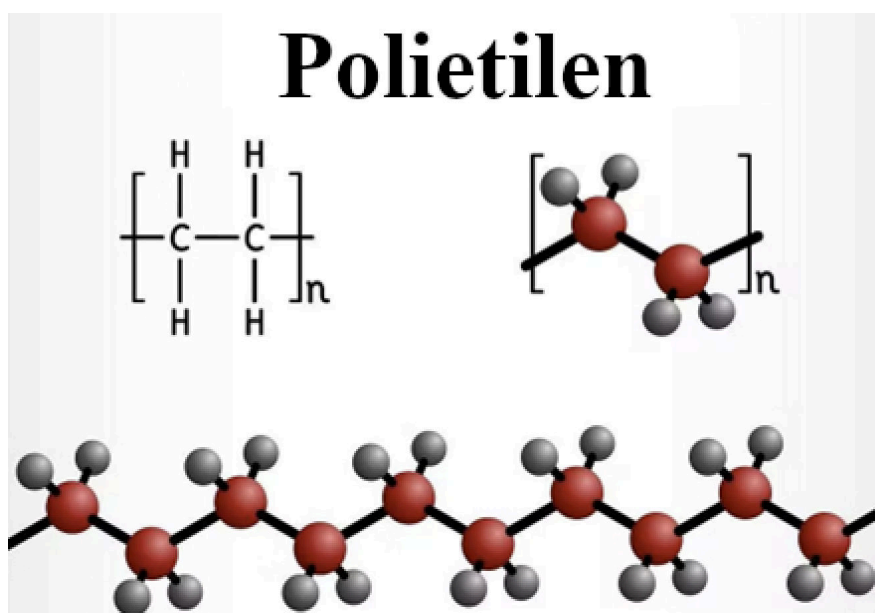
Slika 10. Oprema za tjelesnu zaštitu od aramidnih vlakana [10],[11]



Slika 11. Kompoziti korišteni u avionu [12]

2.3.2 Polietilenska vlakna

Polietilen ultra-visoke molekularne težine (ultra high molecular weight polyethylene, UHMWPE) je organsko vlakno vrlo visoke čvrstoće i krutosti i njegova struktura je vrlo linearna, organizirana i ima visok stupanj kristalnosti. Njegova makromolekula je vrlo jednostavna, formule $[-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-]_n$ (slika 12) i ima molekularnu masu između 3 mil i 6 mil g/mol (iznad 3 mil se smatra ultra-visokom masom).



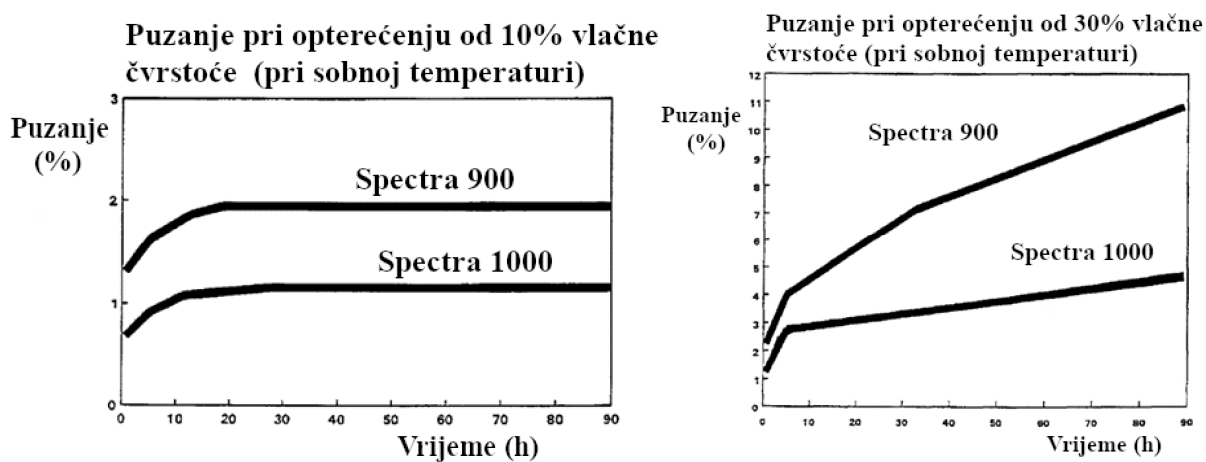
Slika 12. Struktura polietilena [13]

Zbog svoje jednostavne strukture u usporedbi s ostalim polimerima kod polietilena je lakše postići dugačke i linearno orijentirane lance. Uz vrstu veze između atoma, stupanj kristalnosti, orijentacija i razgranatost makromolekule značajno utječe na konačna svojstva materijala; što su navedeni parametri viši to su mehanička svojstva bolja, što nadalje znači da polietilen (naročito polietilen visoke gustoće) ima odlična mehanička svojstva u odnosu na svoju masu (tablica 3).

Tablica 3. Orijentacijske vrijednosti polietilena [2]

| | Spectra 900 | Spectra 1000 |
|-----------------------------|-------------|--------------|
| Gustoća (g/cm^3) | 0,97 | 0,97 |
| Promjer (μm) | 38 | 27 |
| Vlačna čvrstoća (GPa) | 2,7 | 3,0 |
| Modul elastičnosti (GPa) | 119 | 175 |
| Istezanje do loma (%) | 3,5 | 2,7 |

Polietilen ima svojstva vrlo slična svojem teoretskom maksimumu: usporedbom teorijske gustoće (0.9979 g/cm^3) 100% kristalnog polietilena i realne gustoće (0.97 g/cm^3) proizvedenog polietilena zaključuje se da su vrijednosti gustoće vrlo slične, što nadalje znači da polietilen ima vrlo visok stupanj kristalnosti, oko 95%-99%. U usporedbi s aramidnim vlaknima čvrstoća i modul elastičnosti su malo niži, ali ako se pogledaju njihove specifične vrijednosti (ovisne o masi) onda polietilen ima oko 30-40% bolja navedena svojstva (potrebno je naglasiti da ovaj podatak ne vrijedi za sve vrste aramidnih vlakana i polietilena!). Međutim, za razliku od aramidnih vlakana, polietilenska su osjetljiva na pužanje čak i pri sobnoj temperaturi i na umor materijala (slika 13) te nisu prikladna za dugoročna opterećenja.



Slika 13. Pužanje polietilenskih vlakana [9]

U kontekstu balistike, polietilenska i aramidna vlakna su vrlo slična i dijele svojstva potrebna za tjelesnu zaštitu kao žilavost, otpornost na udarce, vlačna čvrstoća itd. Polietilenska vlakna se koriste kao tjelesna zaštita niske mase, u proizvodnji štitova za vojsku i policiju, kao zaštita vozila od eksplozija uzrokovanih nagaznim minama i ultra-lagana zaštita za vojne letjelice. SAD trenutno detaljno istražuje ponašanje polietilenskih vlakana pri udaru kako bi postojeće vojne kacige od kevlaru bile zamjenjive polietilenskim modelom [9]. Također postoje primjene izvan zaštite, makar u manjoj mjeri u usporedbi s aramidnim vlaknima kao što su skije i snowboard daske, štapovi za skijanje itd. (polietilenska vlakna zadržavaju svoja svojstva i pri sniženim temperaturama).

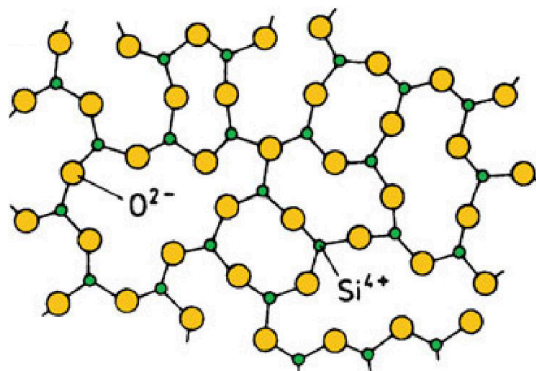
2.3.2 Staklena vlakna

Staklenim vlaknima ojačani polimerni kompoziti su najrašireniji polimerni kompoziti zbog svoje niske cijene i širokog područja primjene. Staklena vlakna dolaze u mnogo vrsta i imaju nekoliko značajno različitih varijacija; E staklo, koje se koristi kao električni izolator, C staklo, koje se primjenjuje u agresivnim medijima zbog svoje otpornosti na koroziju, S staklo koje podnosi više temperature i posjeduje bolja mehanička svojstva i dr. Međutim, osvrst na tablicu 2 upućuje na činjenicu da staklena vlakna imaju lošija svojstva od aramidnih i polietilenskih vlakana (u kontekstu balistike). Čak i S staklo koje posjeduje povišenu čvrstoću imao znatno lošija mehanička svojstva od ostalih vlakana koja će biti korištena u eksperimentalnom dijelu, te se nalaže pitanje zašto koristiti staklena vlakna? Odgovor na to pitanje je uglavnom gospodarski, staklena vlakna su komercijalno najpopularnija, najdostupnija i vrlo jeftina.

Približan sastav staklenih može se vidjeti u tablici 4 i struktura na slici 14:

Tablica 4. Orijentacijski kemijski sastav staklenih vlakana [2]

| | E staklo | C staklo | S staklo |
|--------------------------------|----------|----------|----------|
| SiO ₂ | 55,2 | 65,0 | 65,0 |
| Al ₂ O ₃ | 8,0 | 4,0 | 25,0 |
| CaO | 18,7 | 14,0 | - |
| MgO | 4,6 | 3,0 | 10,0 |
| Na ₂ O | 0,3 | 8,5 | 0,3 |
| K ₂ O | 0,2 | - | - |
| B ₂ O ₃ | 7,3 | 5,0 | - |

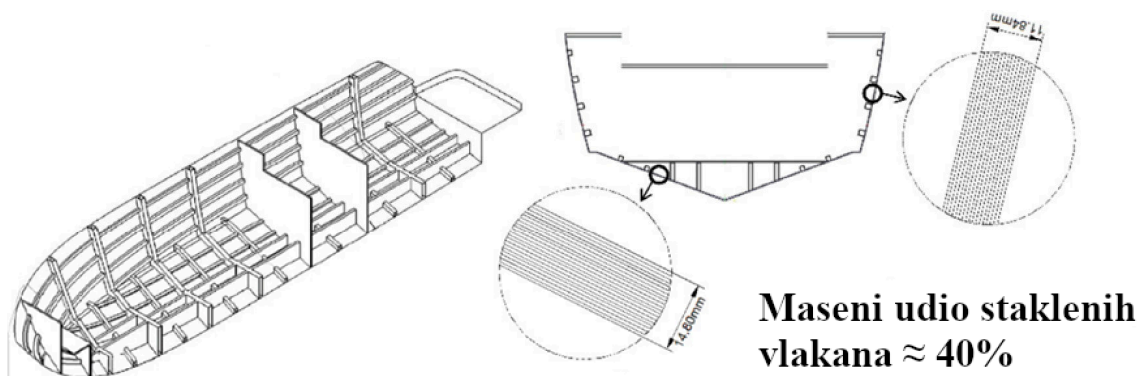


Slika 14. Struktura staklenih vlakana [2]

Staklena vlakna su amorfna, tj bez kristalne (organizirane) strukture i nemaju duge lance već je njihova struktura podjednaka u sve tri dimenzije i stoga su i njihova svojstva uglavnom izotropna, što znači da staklena vlakna imaju bolju tlačnu i smičnu čvrstoću u usporedbi s aramidnim i polietilenskim vlaknima (makar im je vlačna čvrstoća i modul elastičnosti i dalje niži). Potrebno je naglasiti da je izvor materijala za staklena vlakna efektivno neiscrpan, a i njihova proizvodnja je jednostavna, što rezultira u niskoj cijeni. Primjeri primjene staklenih vlakana uključuju: uređaji za filtraciju, toplinska i električna izolacija, strukturna potpora za vozila, unutar propelera helikoptera, u raznim cijevima (stupovi, podzemne cijevi), u lukovima, samostrijelima, lukovima (slika 15) i strelicama, palicama za hokej i vjerojatno najpoznatija primjena: za izradu trupa brodova (slika 16).



Slika 15. Luk ojačan staklenim vlaknima [14]



Slika 16. Shematski prikaz broda ojačanog staklenim vlaknima [15]

3. EKSPERIMENTALNI RAD

3.1. Izrada uzoraka

Na temelju teorijskog dijela ovog rada, izabrana su aramidna, polietilenska i staklena vlakna kao ojačala za kompozitne uzorke koji će biti izrađeni i ispitani. Podvrsta svakih od vlakana nije birana, već su se koristili materijali koji su bili dostupni. U tablici 5 su napisana neka od svojstava ojačala koja su korištena u izradi uzoraka.

Tablica 5. Svojstva korištenih vlakana

| | Gustoća (g/m ²) | Debljina sloja vlakana (mm) | Vrsta pletenja |
|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------|
| Aramidna vlakna | 160 | 0,2 | Platneni kroj |
| Polietilenska vlakna | 160 | 0,4 | Twil kroj |
| Staklena vlakna | 325 | 0,3 | Platneni kroj |

Potrebno je naglasiti da se gustoća u tablici 5 odnosi na težinu isprepletenih vlakana po metru kvadratnom, a ne na samu gustoću vlakana, koja bi se mjerila u g/m³. Gustoća se mjeri u metrima kvadratnim zato što se vlakna prodaju u namotanim rolama ili kao kvadratni uzorci tkanine.

Uzorci su pravljani ručnim postupkom koji se sastoji od rezanja tkanine na željeni oblik i dimenzije (slika 17, 18), miješanje poliestera s katalizatorom u omjeru 10 ml katalizatora na 1 kg smole (miješanje započinje egzotermnu reakciju umrežavanja polimera, slika 19), stavljanje izrezanog komada tkanine u kalup, premazivanje mješavinom smole i katalizatora i slaganjem novog sloja tkanine na prethodni, premazani sloj i ponovno premazivanje (slika 20). Zadnji korak se ponavlja potreban broj puta dok se ne postigne željen broj slojeva. Nakon slaganja slojeva, na uzorak je stavljeno zaštitno staklo i uteg, te su uzorci ostavljeni da se suše 48 sati, kako bi došlo do što boljeg međusobnog povezivanja matrice i ojačala. Gotovi uzorci su prikazani na slici 21.



Slika 17. Rezanje tkanine na željeni oblik i dimenzije



a)

b)

c)

Slika 18. Izrezana tkanina: a) aramidna vlakna, b) polietilenska vlakna, c) staklena vlakna



Slika 19. Poliester smola i katalizator



Slika 20. Slaganje slojeva vlakana i premazivanje



Slika 21. Gotovi uzorci

Prije balističkog ispitivanja izmjereni su neki parametri gotovih uzoraka te su prikazani u tablici 6. Iz izrađenih ploča su izrezane epruvete za ispitivanje žilavosti.

Tablica 6. Parametri gotovih uzoraka

| | Broj slojeva | Debljina (mm) | Debljina sloja smole (mm) | Masa (g) |
|----------------------|--------------|---------------|---------------------------|----------|
| Aramidna vlakna | 4 | 2,26 | 0,365 | 97,42 |
| Polietilenska vlakna | 4 | 2,876 | 0,319 | 105,38 |
| Staklena vlakna | 8 | 3,01 | 0,07625 | 202,31 |

Potrebno je naglasiti da unatoč tome što kompozit ojačan staklenim vlaknima ima osam slojeva njegova debljina nije znatno veća od ostalih uzoraka, a listovi staklenih vlakana su usporedive debljine s ostalim debljinama tkanina (tablica 6). To je moguće zbog geometrije samih vlakana i vrste pletenja, tj gustoće rasporeda vlakana; smola se znatno bolje raspoređuje kod staklenih vlakana nego kod ostalih uzoraka. Također, kod ručnog postupka izrade kompozita mogući su uključci zraka: područja koja zauzimaju volumen, ali ne pružaju nosivost, što isto može utjecati na debljinu sloja matrice.

Na temelju teoretskog djela rada prije provedenog balističkog ispitivanja i ispitivanja žilavosti donesene su neke pretpostavke kako će se pojedinačni kompoziti ponašati pri ispitivanjima:

Pri balističkom ispitivanju, svi uzorci će zaustaviti penetraciju zrna. Pošto uzorak ojačan staklenim vlaknima ima najviše slojeva, biti će najkrući i nakon ispitivanje će imati najmanju deformaciju. Kinetička energija zrna u ovom ispitivanju je relativno mala i stoga će i slojevi poliestera značajno utjecati na konačne rezultate, kojih uzorak ojačan staklenim vlaknima ima mnogo. Uzorci ojačani aramidnim, tj polietilenskim vlaknima će slično reagirati na udar zrna i povezanost matrice i ojačala će vjerojatno značajno utjecati na krajnji rezultat.

Radi jednostavnosti uvedene su kratice za pojedinačne uzorke:

A uzorak: kompozitni uzorak ojačan aramidnim vlaknima

PE uzorak: kompozitni uzorak ojačan polietilenskim vlaknima

S uzorak: kompozitni uzorak ojačan staklenim vlaknima

3.2. Ispitivanje balistike

3.2.1. Način provođenja balističkog ispitivanja i korištena oprema

Nužno je naglasiti da ispitivanje nije provedeno sukladno postojećim normama i stoga je potrebno definirati način na koji je izvedeno.

Oprema za ispitivanje se sastoji od: pneumatskog pištolja i njegove municije, okvira opremljenog osjetilima koji mjeri brzinu projektila i kompozitnog uzorka naslonjenog na potporu pod približnim kutom 85°. Korišteni pištolj je model „KWC Python 6 Inch Co₂“ i koristi CO₂ kapsule od 12 g koje sadrže stlačeni ugljikov dioksid koji služi kao sredstvo za ispućavanje zrna. Zrna su u obliku kuglice promjera 6 mm (slika 22), težine 0,32 g i napravljeni su od plastike (polilaktida).



Slika 22. Pneumatski pištolj, kapsula s plinom i zrna

U idealnim uvjetima zrno pri izlasku iz cijevi može postići brzinu do 150 m/s, tj kinetičku energiju od 3,6 J (prema formuli 2):

$$E_k = (mv^2)/2 \quad (2)$$

gdje je:

E_k = kinetička energija, J

m = masa zrna, kg

v = brzina zrna, m/s

U realnoj primjeni takve se energije ne postižu i stoga je ispitivanje fokusirano na češće situacije u *Airsoft*-u, tj na zaštitu na oko 2 m (2,2 m u ispitivanju), pošto je to najčešća

udaljenost koja se smatra bliskom. Cilj ispitivanja je pokazati da se kompozitni materijal može dugotrajno koristiti kao *Airsoft* oprema bez rizika od probijanja, te granične slučajeve nije niti potrebno ispitivati pošto je očekivano da tjelesna zaštita koja se koristi za zaštitu od pravog vatrenog oružja može zaustaviti pneumatske replike.

S opisanim pištoljem i municijom pucalo se u kompozitne uzorke s udaljenosti od 2,2 m. Za određivanje brzine zrna korišten je „B472-ST Precision Light Screen“ okvir koji sadrži senzore na početku i kraju konstrukcije koji mjere vrijeme od trenutka prolaska objekta ispred prvog senzora do trenutka prolaska objekta ispred drugog senzora (slika 23). Znajući da je okvir dugačak 2 m i vrijeme potrebno da zrna prođe između postavljenih senzora „B3000-BWF Software“ računa prosječnu brzinu zrna po formuli 3:

$$v = s/t \quad (3)$$

gdje je:

v = brzina zrna, m/s

s = prijeđeni put, m

t = vrijeme, s

Potrebno je naglasiti da ovakvo mjerenje daje prosječnu brzinu zrna, a ne stvarnu brzinu zrna u trenutku udara u uzorak. Prosječna brzina ne uključuje promjenu brzine zrna dok putuje kroz zrak već samo dijeli pređeni put s vremenom potrebnim da zrna prođe između senzora, što znači da konstanto usporavanje zrna uzrokovano otporom zraka nije uključeno. Unatoč tome što prosječna brzina dobivena mjerenjem nije jednaka realnoj brzini zrna pri udaru u uzorak, rezultati su i dalje uporabljivi, pošto je za svaki uzorak podjednaka greška, a utjecaj otpora zraka na udaljenosti od 2,2 m nije značajan.



Slika 23. „B472-ST Precision Light Screen“ okvir za mjerenje brzine projektila

Kompozitni uzorak je ispitivan nekoliko puta te su izmjerene dimenzije oštećenja i izrezan je uzorak na sredini jednog od otisaka zrna, kako bi se pod mikroskopom mogao gledati presjek kompozita na mjestu udara.

3.2.2. Analiza A uzorka nakon ispitivanja balistike

Tijekom i nakon izmjerene su dimenzije oštećenja i prosječna brzina zrna (tablica 7).

Tablica 7. Pucanje u A uzorak

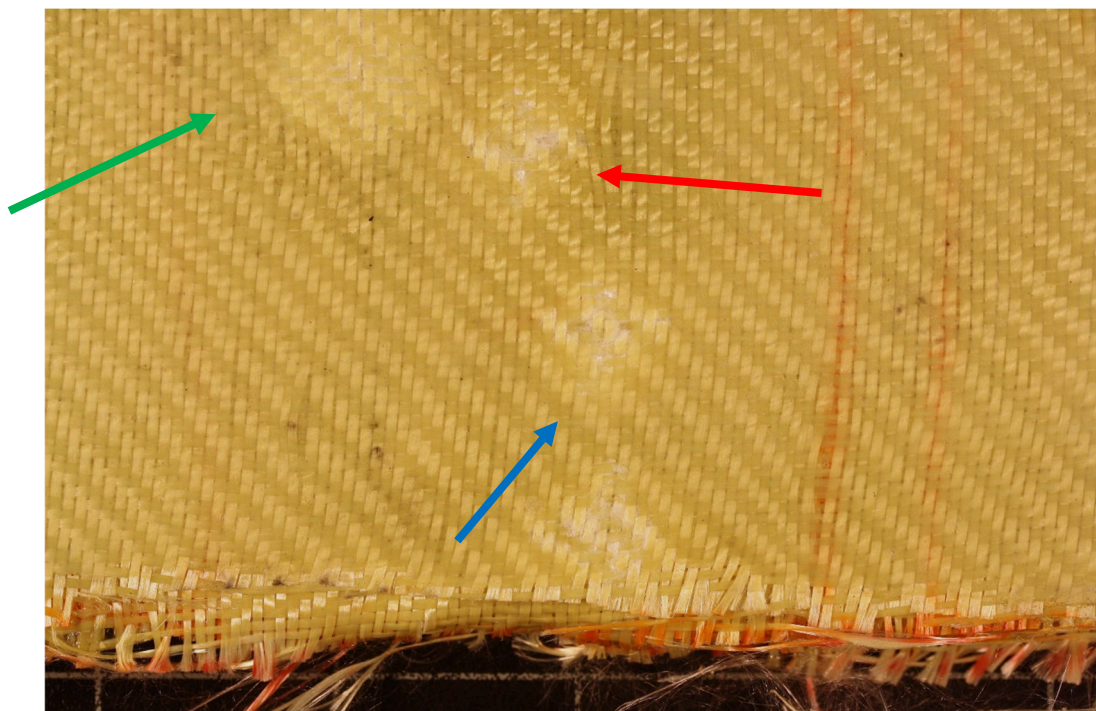
| Broj pucanja | Prosječna brzina (m/s) | Kinetička energija (J) | Promjer otiska na uzorku s prednje strane (mm) | Područje utjecaja zrna (mm) |
|--------------|---------------------------|------------------------------|---|-----------------------------------|
| 1. (plavo) | 116,62 | 2,176059 | 10,20 | 18,00 |
| 2. (crveno) | 113,47 | 2,060071 | 12,74 | 17,26 |
| 3. (zeleno) | 118,03 | 2,228973 | 14,02 | 16,50 |
| \bar{x} | 116,04 | 2,155034 | 12,32 | 17,25 |
| S_x | 2,334673 | 0,086391 | 1,944325 | 0,750022 |

gdje je:

\bar{x} = prosječna vrijednost parametra

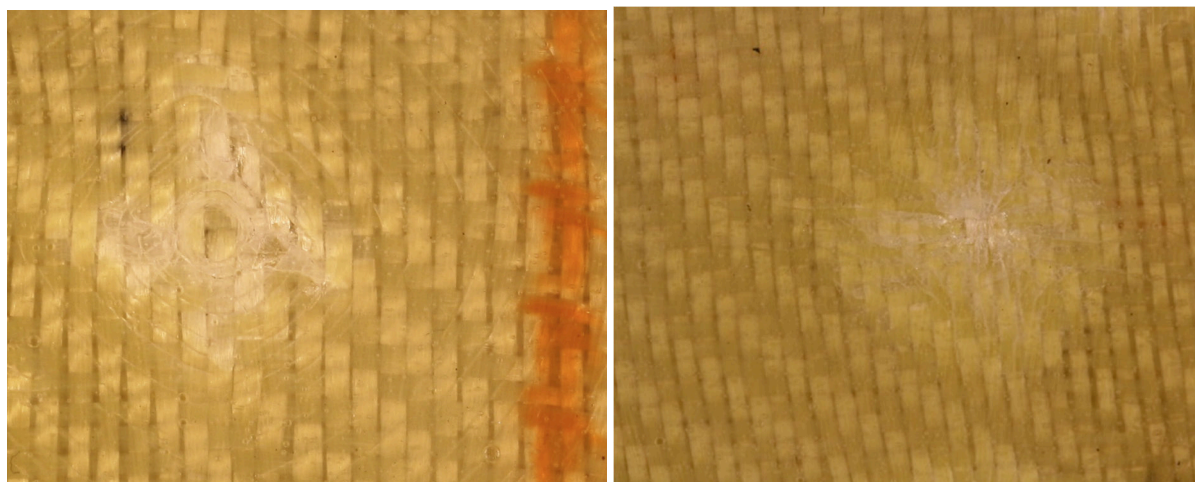
S_x = standardna devijacija parametra

Slika 24 prikazuje tragove zrna nakon pucanja. Plava strelica ukazuje na otisak od prvog pucanja, crvena od drugog i zelena od trećeg. Prvi i drugi otisak sa strane u koju je udarilo zrno, dok je treći otisak s pozadinske strane.



Slika 24. A uzorak nakon pucanja

Slika 25 predočava prikaz otiska trećeg pucanja, koje ima najveću brzinu zrna.



a)

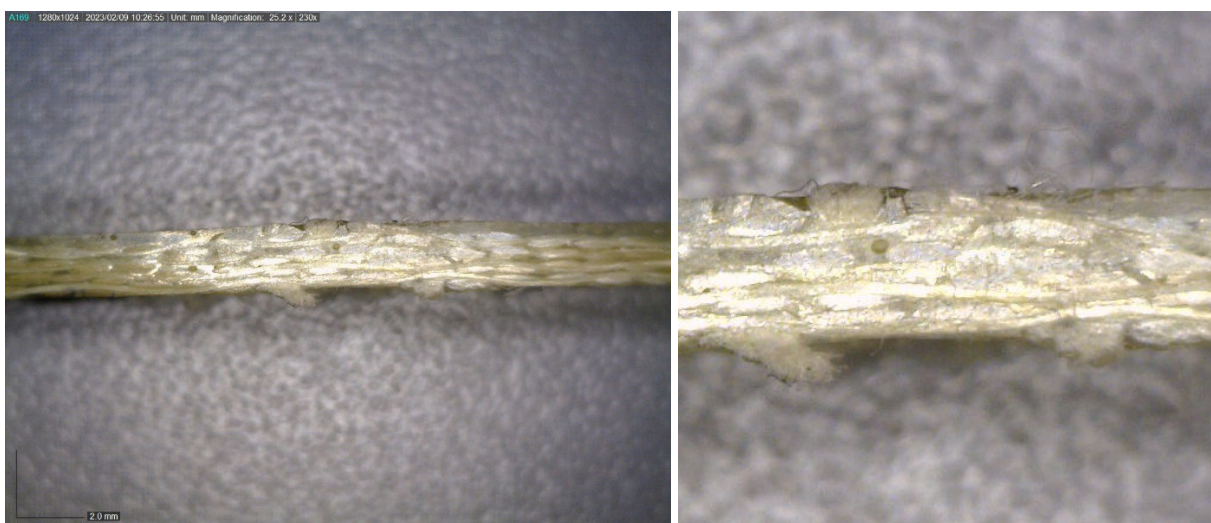
b)

Slika 25. Bliski prikaz otiska tri na uzorku A: a) prednja strana i b) stražnja strana

S prednje strane uzorka vide se koncentrične kružnice oko mjesta udara zrna (slika 25. a) koje su posljedica jednolikog raspršenja kinetičke energije kroz uzorak i oštećenja matrice.



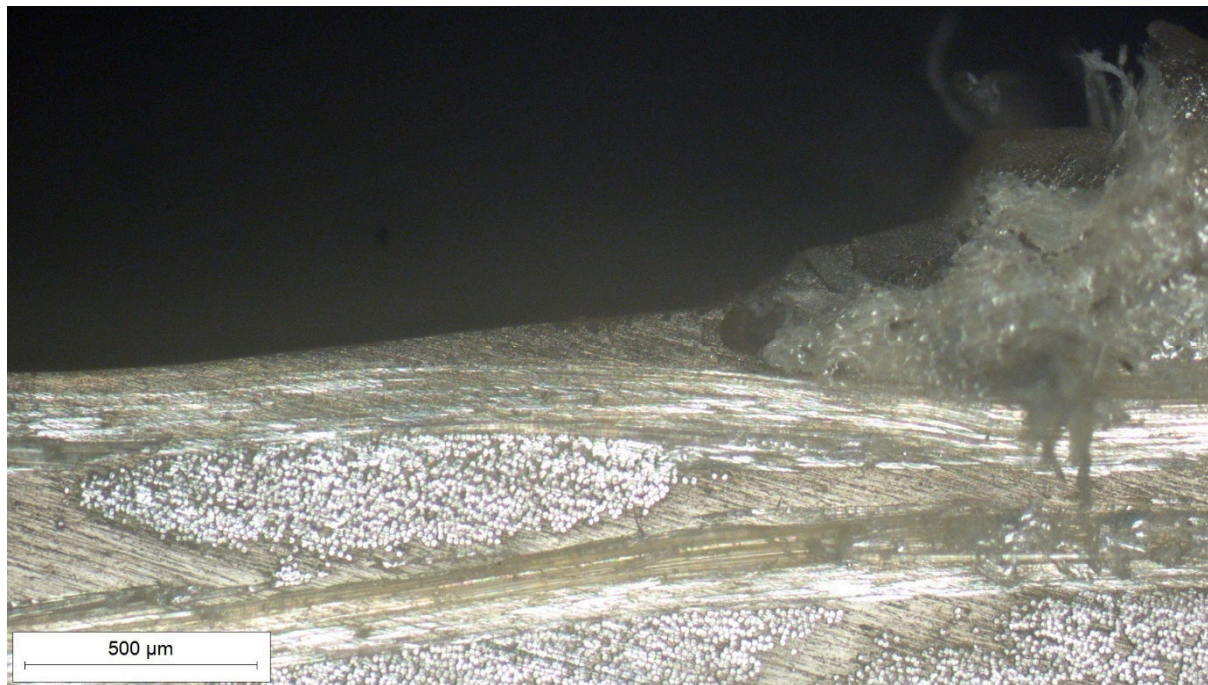
Slika 26. Presjek uzorka A (x25.2)



Slika 27. Presjek A uzorka na mjestu udara zrna (25,2:1 i detalj)

Digitalnim mikroskopom „Dino-Lite AM413T5-PRO-500X“ dobivene su slike 26 i 27 (imaju jednako povećanje od 25,2:1). Slika 26 prikazuje presjek neoštećenog djela uzorka, te se vidi paralelnost vlakana, tj svaki sloj vlakana je ravan kao što je bio za vrijeme izrade kompozita. Na slici 27 je prikazan presjek uzorka nakon udara zrna: očito je površinsko oštećenje na kontaktnom mjestu uzorka i zrna, te su i vlakna izgubila svoju paralelnost tj izvitoperila su se. Na površini je zrno oštetilo tj otkinulo dio matrice koja više ne drži vlakna na mjestu već ona nezaštićeno vire iz uzorka. S pozadinske strane se nalazi izbočina, gotovo paralelno s oštećenjem od zrna, ali je zbog nesavršenosti (uključci, nejednak raspored smole, oštećenje na vlaknima) malo translaticirana ulijevo.

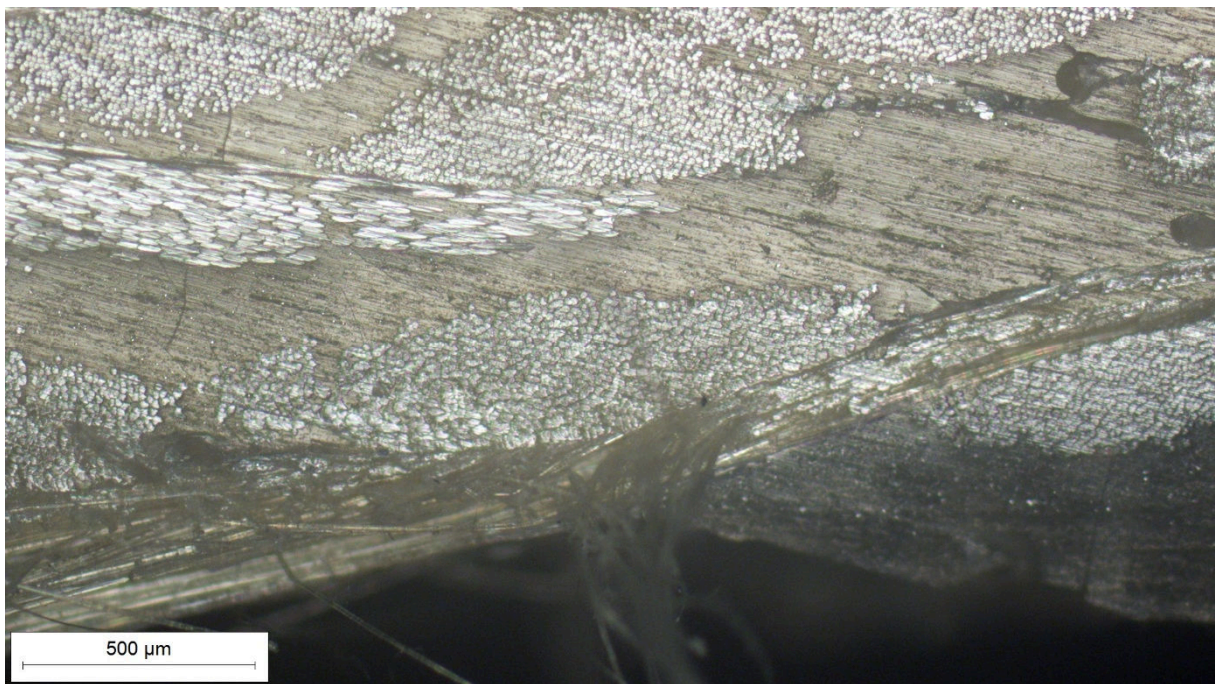
Mikroskopom „Olympus GX51F-5“ s integriranom digitalnom kamerom s većim povećanjem (50:1) je snimljena mikrostruktura uzorka. Slika 28 prikazuje mjesto udara zrna i vidi se površinsko oštećenje (smola više ne drži vlakna) i izvitoperenost vlakna na desnoj strani. Na slici 29 je prikazana sredina uzorka, te se vidi oštećenje matrice u obliku crnih pukotina i blage delaminacije na lijevoj polovici. Također se vidi deformacija nekih vlakana uzrokovana djelovanjem zrna ili opterećenjem pri izradi samog kompozita.



Slika 28. Presjek A uzorka na mjestu udara zrna (50:1, površina)



Slika 29. Presjek A uzorka na mjestu udara zrna (50:1, sredina)



Slika 30. Presjek A uzorka na mjestu udara zrna (50:1, pozadina)

Slika 30 prikazuje pozadinsku stranu uzorka na kojoj je došlo do izbočenja koje je uzrokovao pomak materijala u smjeru kretanja zrna. Izbočenje, tj brežuljak, je na površini, deformirao vlakna i polomio matricu, te vlakna slobodno vire izvan uzorka.

Potrebno je naglasiti da su sva navedena oštećenja u usporedbi s cijelim uzorkom mala. Nije došlo do pucanja vlakana već do blage deformacije i oštećenja matrice (naročito na površini). Na temelju ovih rezultata može se pretpostaviti da bi uzorak mogao zaustaviti projektil s nekoliko puta većom kinetičkom energijom, što je i očekivano od kompozita ojačanog aramidnim vlaknima (i općenito od kompozita ojačanog vlaknima).

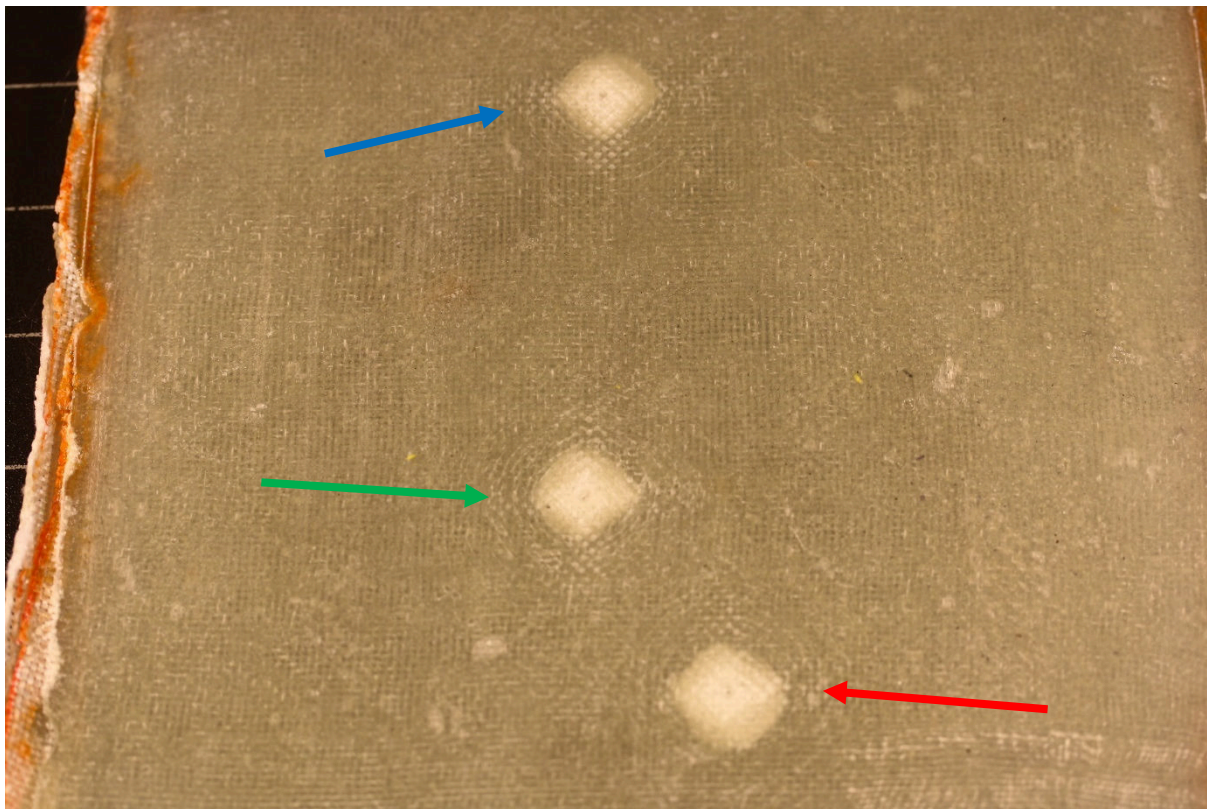
3.2.3. Analiza PE uzorka nakon ispitivanja balistike

Postupak analize rezultata je analogan (sukladan) analizi kompozita ojačanog aramidnim vlaknima. Kao i kod ispitivanja A uzorka, tijekom i nakon ispitivanja izmjerene su dimenzije oštećenja i prosječna brzina zrna (tablica 8).

Tablica 8. Pucanje u PE uzorak

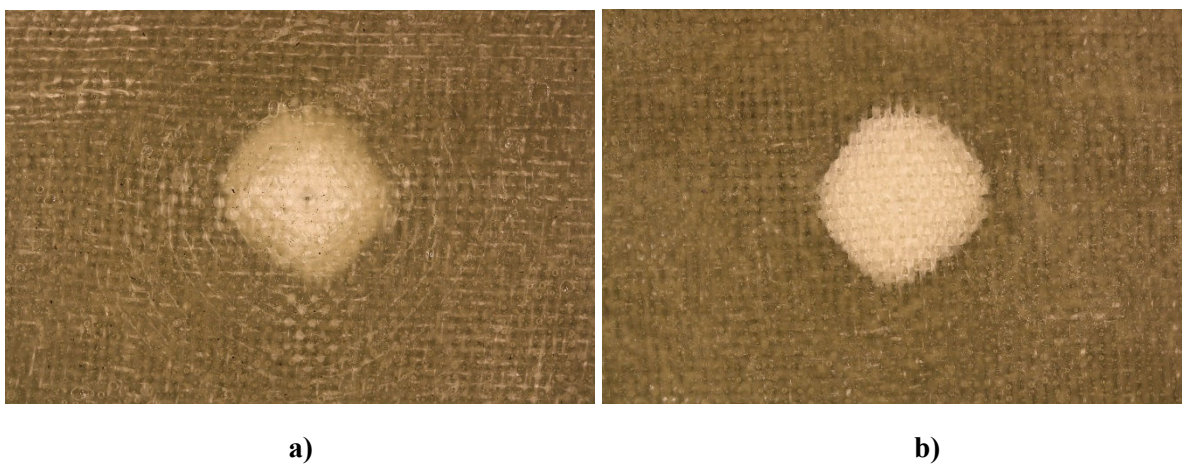
| Broj pucanja | Prosječna brzina (m/s) | Kinetička energija (J) | Promjer otiska na uzorku s prednje strane (mm) | Područje utjecaja zrna (mm) |
|--------------|------------------------|------------------------|--|-----------------------------|
| 1. (plavo) | 107,30 | 1,842126 | 6,08 | 21,06 |
| 2. (crveno) | 111,07 | 1,973847 | 6,22 | 21,64 |
| 3. (zeleno) | 106,92 | 1,829102 | 5,92 | 20,36 |
| \bar{x} | 108,43 | 1,881692 | 6,07 | 21,02 |
| S_x | 2,294188 | 0,080074 | 0,150111 | 0,620967 |

Slika 31 prikazuje tragove zrna nakon pucanja. Plava strelica ukazuje na otisak od prvog pucanja, crvena od drugog i zelena od trećeg. Svi prikazani otisci su na površini uzorka u koju je udarilo zrno.



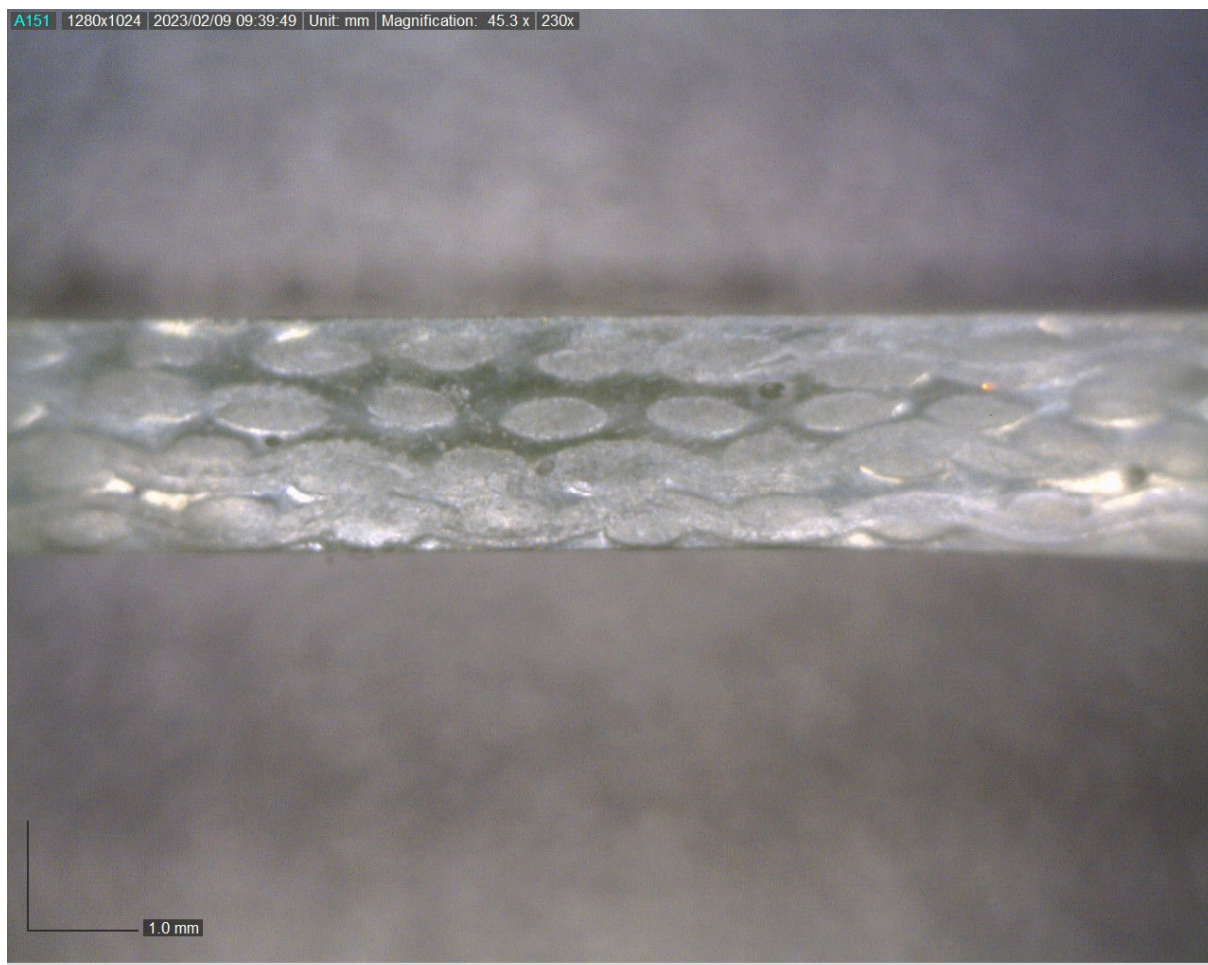
Slika 31. Uzorak PE nakon pucanja

Slika 32 prikazuje bliski prikaz otiska drugog pucanja, koje ima najveću brzinu zrna.

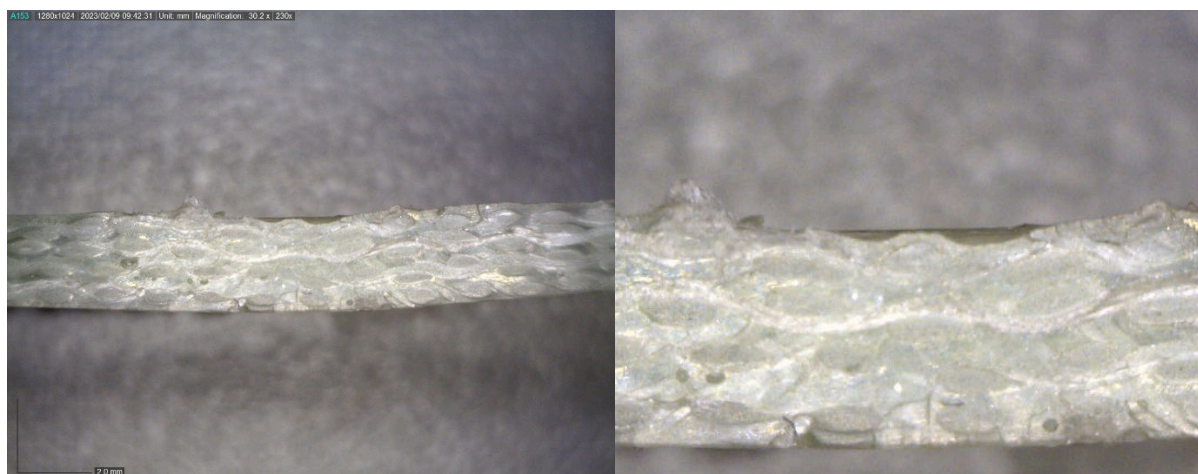


Slika 32. Bliski prikaz otiska dva na uzorku PE: a) prednja strana, b) stražnja strana

S prednje strane uzorka vide se koncentrične kružnice oko mjesta udara zrna (slika 28 a)), ali su znatno manje nego kod aramidnog kompozita, što upućuje na bolje raspršenje energije u dublje slojeve kompozita.



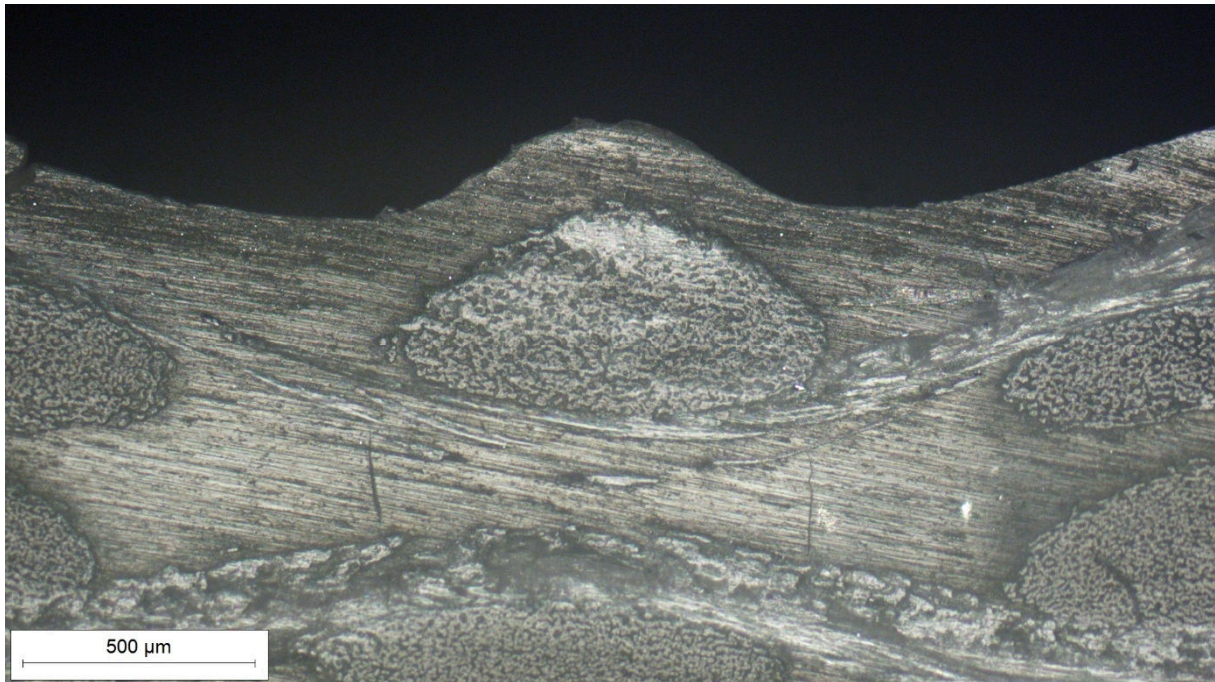
Slika 33. Presjek PE uzorka (45,3:1)



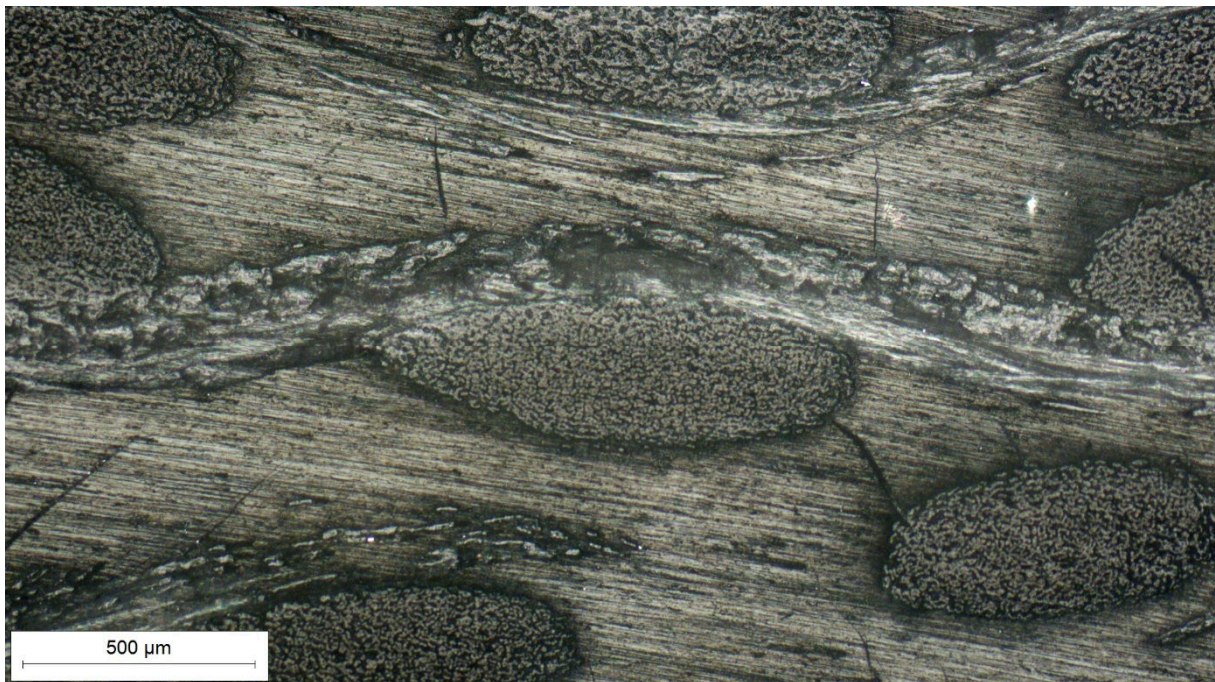
Slika 34. Presjek PE uzorka mjestu udara zrna (30,2:1 i detalj)

Slika 33 (povećanje 30,2:1) prikazuje neoštećeni dio uzorka, te se ponovno vidi paralelnost vlakana, makar je prisutna nesavršenost u sredini uzorka; jedan sloj vlakana je okružen predebelim slojem matrice te je malo razvučen u horizontalnom smjeru. Na slici 34 je prisutna deformacija na mjestu površinskog kontakta zrna i uzorka i izbočenje na pozadinskoj

strani. Pod još većim povećanjem (50:1) na slici 35 se jasno vidi deformacija matrice (zrno je pogodilo uzorak desno od brežuljka) i izvitoperenost vlakana, međutim nije prisutna deformacija pojedinačnih vlakana; vlakno je promijenilo putanju protezanja kroz kompozit, ali se presjek nije promijenio.

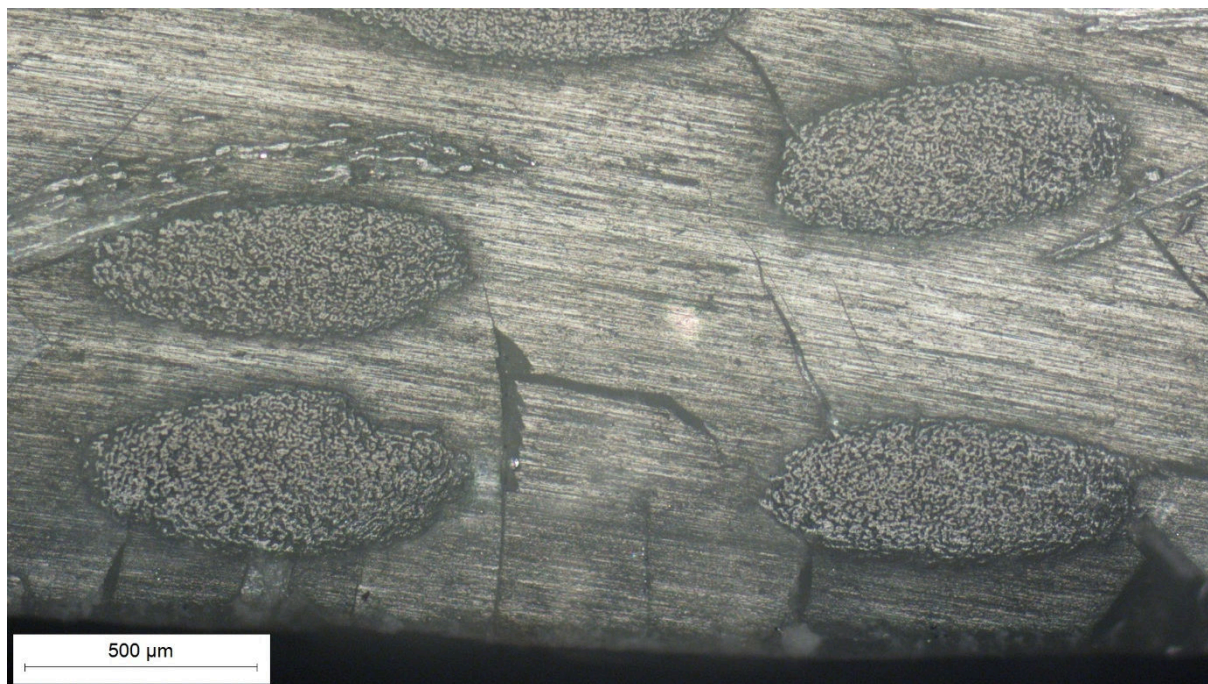


Slika 35. Presjek PE uzorka na mjestu udara zrna (50:1, površina)



Slika 36. Presjek PE uzorka na mjestu udara zrna (50:1, sredina)

Na slikama 35, 36 i 37 prisutna su značajna oštećenja matrice u smjeru kretanja zrna (naročito na stražnjoj strani gdje je prisutno izbočenje) što znači da matrica nije dobro prenijela opterećenje na ojačalo, te se stoga oštetila. Zato u tablici 8 je veličina oštećenja velika unatoč tome što je kinetička energija mala (u usporedbi s prvim uzorkom).



Slika 37. Presjek PE uzorka na mjestu udara zrna (50:1, pozadina)

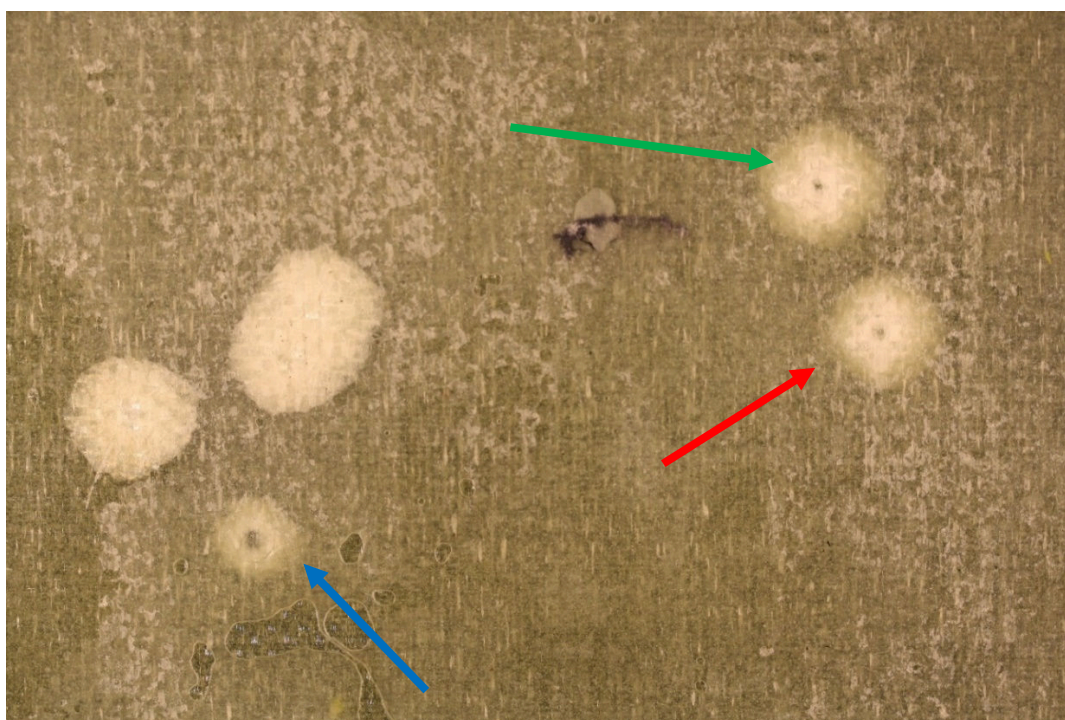
3.2.4. Analiza S uzorka nakon ispitivanja balistike

Postupak analize rezultata je analogan (sukladan) analizi prijašnjih uzoraka. Kao i kod ispitivanja A uzorka i PE uzorka, tijekom i nakon ispitivanja izmjerene su dimenzije oštećenja i prosječna brzina zrna (tablica 9).

Tablica 9. Pucanje u S uzorak

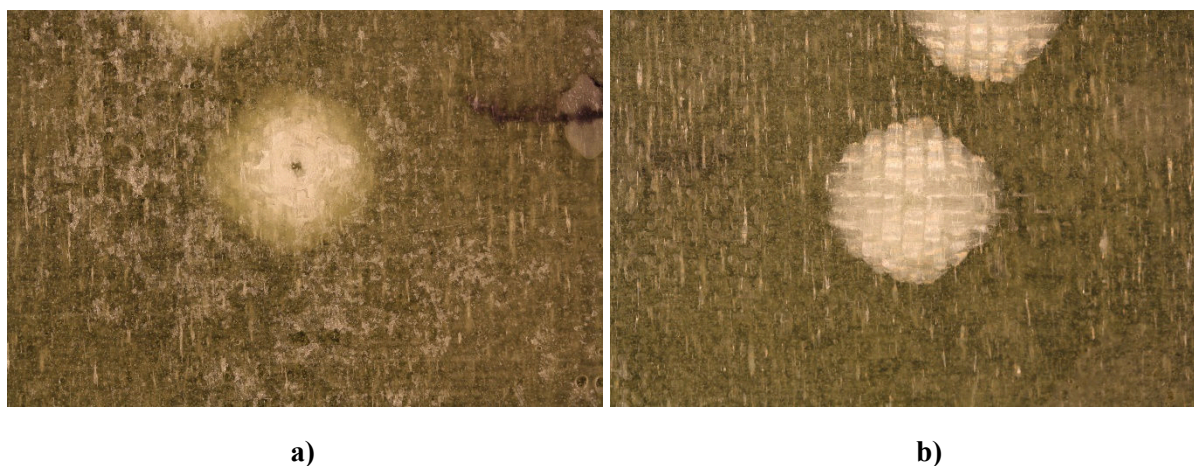
| Broj pucanja | Prosječna brzina (m/s) | Kinetička energija (J) | Promjer otiska na uzorku s prednje strane (mm) | Područje utjecaja zrna (mm) |
|--------------|------------------------|------------------------|--|-----------------------------|
| 1. (plavo) | 123,44 | 2,437989 | 6,78 | 14,46 |
| 2. (crveno) | 115,55 | 2,136288 | 9,32 | 19,92 |
| 3. (zeleno) | 116,02 | 2,153702 | 10,18 | 21,74 |
| \bar{x} | 118,33 | 2,242660 | 8,76 | 18,71 |
| S_x | 4,425860 | 0,169384 | 1,767823 | 3,788632 |

Potrebno je naglasiti da se za analizu mikrostrukture na presjeku dosada uzimalo pucanje s najvećom brzinom zrna, ali na ovom uzorku nije, pošto je pucanje s najvećom kinetičkom energijom ostavilo najmanje oštećenje, što je nije očekivano. Takva pojava je moguća ili zbog nepravilnosti u izradi kompozita (npr. uključak) ili je zrno pogodilo uzorak pod velikim kutem. Slika 38 prikazuje tragove zrna nakon pucanja. Plava strelica ukazuje na otisak od prvog pucanja, crvena od drugog i zelena od trećeg. Svi označeni otisci su s strane u koju je udarilo zrno.



Slika 38. S uzorak nakon pucanja

Slika 39 prikazuje bliski prikaz otiska drugog pucanja, koje ima najmanju brzinu zrna (odabran je otisak drugog pucanja pošto je najpravilniji).



a)

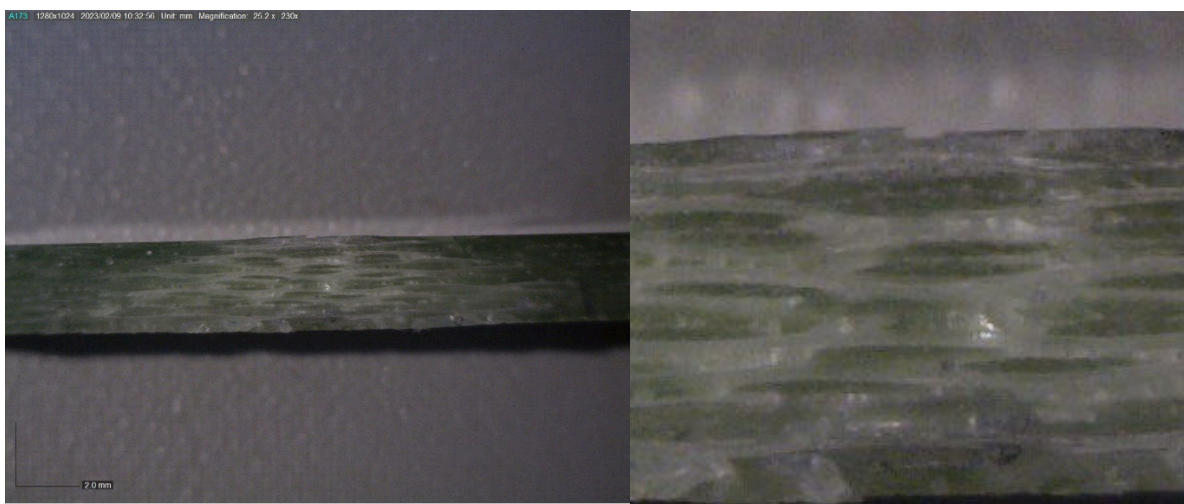
b)

Slika 39. Bliski prikaz otiska dva na uzorku S: a) prednja strana i b) stražnja strana

Za razliku od ostalih uzoraka, kružne linije nisu prisutne, tj. toliko su male da su nezamjetne, što znači da je matrica bolje prenijela opterećenje na vlakna nego kod ostalih uzoraka, što je očekivano s obzirom da je smola znatno bolje raspoređena između vlakana nego kod ostalih uzoraka.

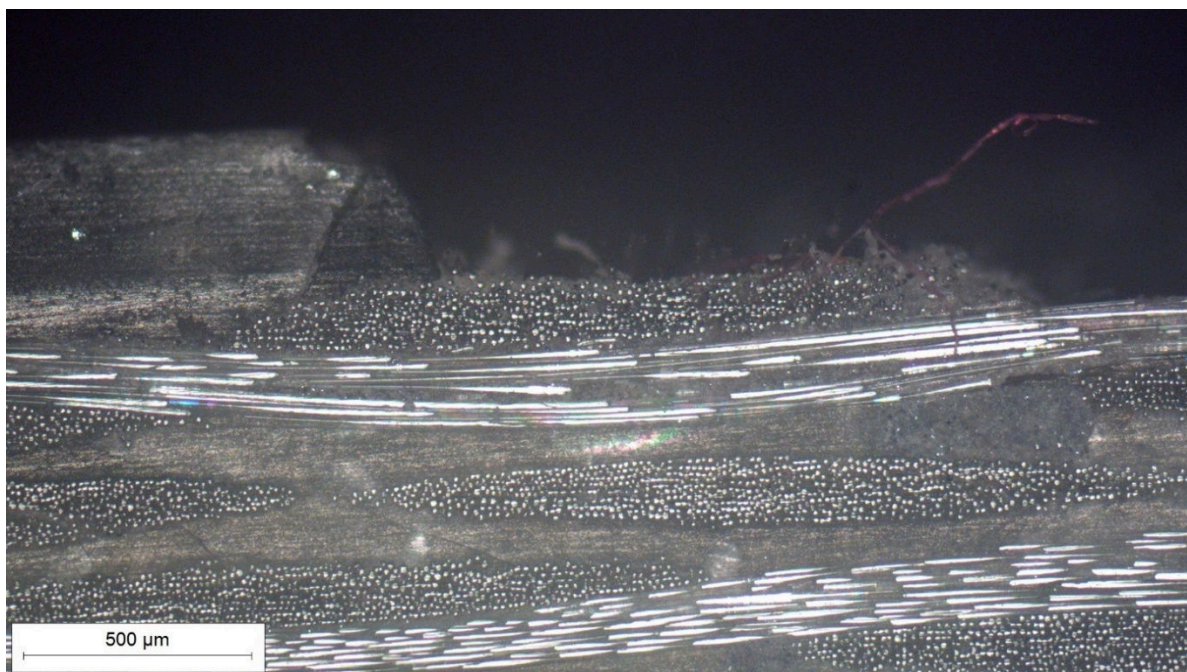


Slika 40. Presjek uzorka S (29,3:1)

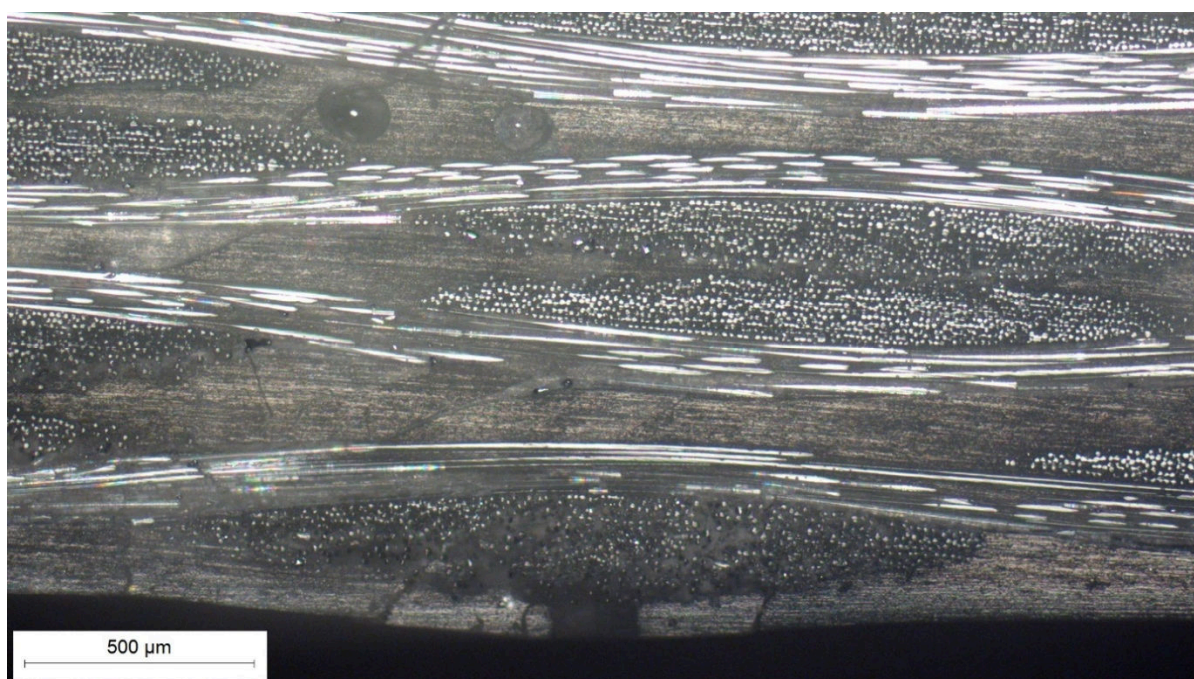


Slika 41. Presjek S uzorka na mjestu udara zrna (25,2:1 i detalj)

Slika 40 (povećanje 29,3:1) prikazuje neoštećeni dio uzorka i vlakna nisu toliko paralelna kao kod ostalih uzoraka, ali također su znatno ravnija (posljedica pletenja i geometrije vlakana). Slika 41 prikazuje minimalnu deformaciju uzrokovanu zrnom, što je očekivano zato što je uzorak ojačan s više slojeva i kao posljedica toga je znatno krući. Slika 42 (povećanje 50:1) prikazuje mjesto udara zrna i vidi se kako je dio matrice otkrhnut, a prvi sloj ojačala je deformiran, što znači da su vlakna nosila veći dio opterećenja.



Slika 42. Presjek S uzorka na mjestu udara zrna (50:1, površina)



Slika 43. Presjek S uzorka na mjestu udara zrna (50:1, pozadina)

Na slici 42 i 43 jasno je vidljivo da je geometrija vlakana znatno drukčija nego kod ostalih uzoraka (vlakna su mnogo plosnatija i imaju veću površinu u smjeru kretanja zrna) i slojevi matrice su znatno tanji, ali i bolje raspršeni između ojačala. Kao posljedica toga, uzorak ojačan staklenim vlaknima je najbolje raspršio kinetičku energiju zrna i najmanje se deformirao, što se moglo i očekivati s obzirom na broj slojeva vlakana.

3.2.5. Usporedba uzoraka nakon ispitivanja balisike

Slijedi usporedba uzoraka u kontekstu balistike.

Tablica 10. Usporedba rezultata balističkog ispitivanja

| | Prosječna brzina zrna (m/s) | Prosječni promjer oštećenja (mm) | Područje utjecaja zrna (mm) |
|-----------|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| A uzorak | 116,04 | 12,32 | 17,25 |
| PE uzorak | 108,43 | 6,07 | 21,02 |
| S uzorak | 118,33 | 8,76 | 18,71 |

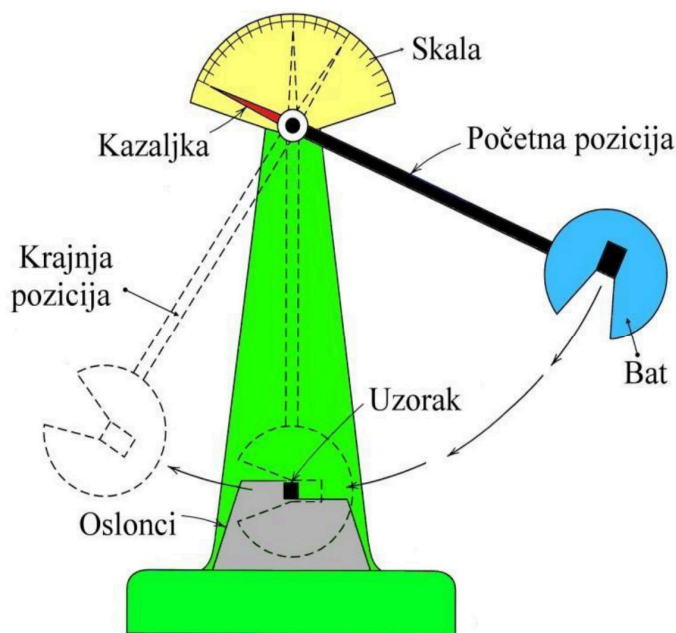
A uzorak ima najveća površinska oštećenja (tablica 10) što sugerira da je matrica loše prenijela opterećenje. Energija zrna je većinski utrošena u oštećivanje prvog površinskog sloja smole i nije raspršena kroz cijeli uzorak. Kod PE uzorka je matrica podnijela najveći dio opterećenja te je popucala kroz cijeli uzorak što se i vidi u tablici 10 i slikama 35, 36, 37. S uzorak ima najmanju ukupnu deformaciju što je posljedica većeg broja slojeva ojačala koji uzorku daju veliku krutost i bolje integracije matrice između vlakana ojačala. Pucanje matrice nije prisutno osim s pozadinske strane i na samoj kontaktnoj površini.

3.3. Ispitivanje udarnog rada loma

Pošto su kompozitni uzorci odlično izdržali ispitivanje balistikom, provedeno je dodatno ispitivanje žilavosti kako bi bila moguća dodatna usporedba rezultata.

3.3.1 Ispitivanje udarnog rada loma Charpy-evim batom

Ispitivanje udarnog rada loma provodi se s ciljem utvrđivanja ponašanja materijala u uvjetima udarnog opterećenja, te je iznos udarnog rada loma pokazatelj žilavosti ili krhkosti materijala.



a)



b)

Slika 44. Charpy-ev bat: a) shematski prikaz [16], b) korišten charpy-ev bat

Bat težine G podiže se na visinu koja je na slici 44 označena s h_1 (odgovara kutu pada α), te se spušta i udara u ispitni uzorak. U trenutku puštanja bata s visine h_1 , bat ima potencijalnu energiju koja se padanjem bata pretvara u kinetičku energiju. Zbog siline udarca bata, ispitni uzorak puca ili ga oštrica bata savine i provuče između oslonaca. Ukoliko na osloncu nije postavljen ispitni uzorak bat bi se vratio na istu visinu s koje je i pušten, ako je trenje u ležaju i otpor zraka zanemaren. U realnom slučaju, kada je ispitni uzorak postavljen između oslonaca, bat se penje na manju visinu od početne i dostiže visinu h_2 (koja odgovara kutu β). Kutovi se mogu odrediti pomoću kazaljki na mjerneoj skali koja se nalazi na batu.

Udarni rad loma (žilavost) računa se pomoću izraza:

$$K = G \cdot (h_1 - h_2), J \quad (4)$$

$$K = G \cdot r (\cos \beta - \cos \alpha), J \quad (5)$$

$$G = m \times g, N \quad (6)$$

gdje je :

K - udarni rad loma, J

G - težina bata, N

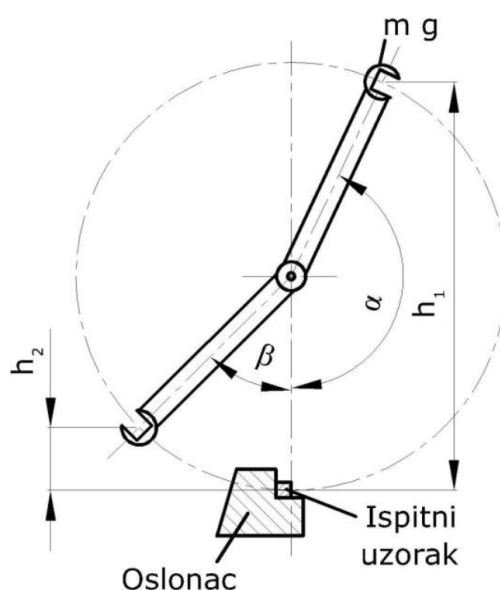
h_1 - početna visina bata, m

h_2 - krajnja visina bata, m

α - početni kut, °

β - krajnji kut, °

r - duljina njihala, m



Slika 45. Shemtski prikaz rada charpy-evog bata [16]

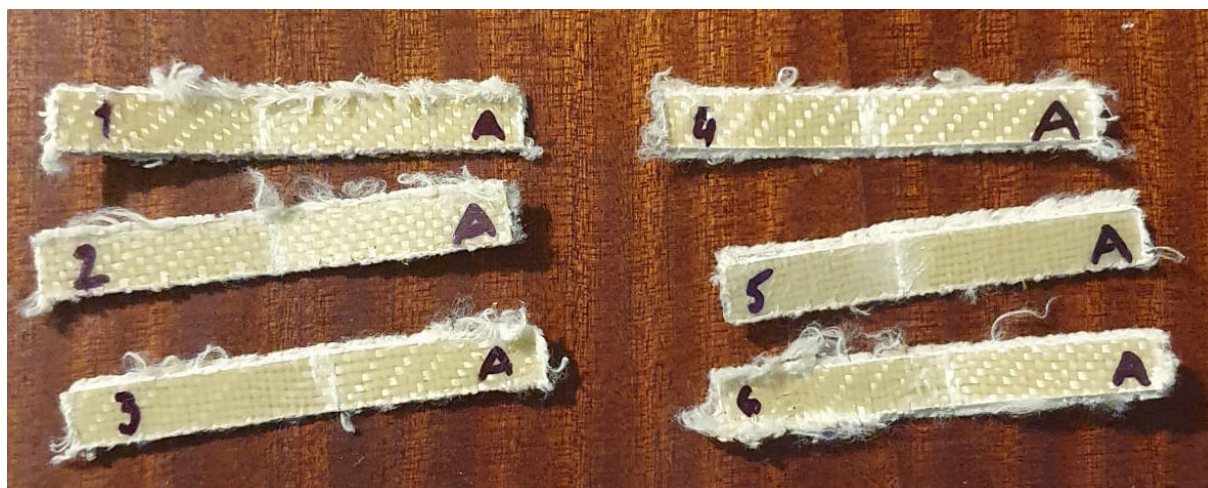
Prije ispitivanja nužno je izmjeriti debljinu, visinu i masu epruvete, kako bi se izmjerene energije za različite uzorke mogle uspoređivati ovisno o presjeku epruvete i masi (pošto epruvete imaju različitu debljinu i različitu masu). Ispitivanje je provedeno na sobnoj temperaturi (20°C).

3.3.2. Rezultati ispitivanja žilavosti epruveta izrezanih iz uzorka A

Nakon mjerenja mase i dimenzija, te ispitivanja epruveta na charpy-evom batu dobivene su sljedeće vrijednosti, zapisane u tablici 11:

Tablica 11. Dimenzije i žilavost epruveta izrezanih iz uzorka A

| Uzorak | Debljina (mm) | Visina (mm) | Presjek (mm ²) | Energija (J) | Energija/presjek (J/mm ²) | Masa (g) | Energija/masa (J/g) |
|-----------|---------------|-------------|----------------------------|--------------|---------------------------------------|----------|---------------------|
| 1 | 2,30 | 10,40 | 23,920 | 1,1000 | 0,04598662 | 1,9754 | 0,556849 |
| 2 | 2,06 | 10,10 | 20,806 | 1,5000 | 0,07209459 | 1,8730 | 0,800854 |
| 3 | 2,30 | 10,00 | 23,000 | 1,2000 | 0,05217391 | 1,8750 | 0,640000 |
| 4 | 2,38 | 10,20 | 24,276 | 1,2000 | 0,04943154 | 1,8970 | 0,632578 |
| 5 | 2,16 | 10,70 | 23,112 | 1,35000 | 0,05841121 | 2,0382 | 0,662349 |
| 6 | 2,40 | 10,00 | 24,000 | 1,2000 | 0,05000000 | 1,9026 | 0,630716 |
| \bar{x} | 2,27 | 10,23 | 23,186 | 1,2583 | 0,05468300 | 1,9269 | 0,653029 |
| S_x | 0,1318 | 0,2732 | 1,2723 | 0,142887 | 0,009471 | 0,066065 | 0,080338 |



Slika 46. Epruvete kompozita ojačanog aramidnim vlaknima nakon ispitivanja žilavosti

3.3.3. Rezultati ispitivanja žilavosti epruveta izrezanih iz uzorka PE

Nakon mjerenja mase i dimenzija, te ispitivanja epruveta na charpy-evom batu dobivene su sljedeće vrijednosti, zapisane u tablici 12:

Tablica 12. Dimenzije i žilavost epruveta izrezanih iz uzorka PE

| Uzorak | Debljina (mm) | Visina (mm) | Presjek (mm ²) | Energija (J) | Energija/presjek (J/mm ²) | Masa (g) | Energija/masa (J/g) |
|-----------|---------------|-------------|----------------------------|--------------|---------------------------------------|----------|---------------------|
| 1 | 2,80 | 10,00 | 28,000 | 1,6500 | 0,05892857 | 2,1183 | 0,778926 |
| 2 | 2,96 | 10,14 | 30,014 | 1,200 | 0,03998134 | 2,0334 | 0,590145 |
| 3 | 2,86 | 10,00 | 28,600 | 1,5500 | 0,05419580 | 2,1124 | 0,733763 |
| 4 | 2,86 | 10,00 | 28,600 | 1,4500 | 0,05069930 | 2,1059 | 0,688542 |
| 5 | 2,78 | 10,02 | 27,856 | 1,6500 | 0,05923320 | 2,0779 | 0,794071 |
| 6 | 3,00 | 10,00 | 30,000 | 1,7500 | 0,05833333 | 2,0787 | 0,841872 |
| \bar{x} | 2,88 | 10,03 | 28,85 | 1,5417 | 0,05356192 | 2,0878 | 0,737887 |
| S_x | 0,0871 | 0,0560 | 0,9500 | 0,196002 | 0,007440 | 0,031633 | 0,089368 |



Slika 47. Epruvete kompozita ojačanog polietilenskim vlaknima nakon ispitivanja žilavosti

3.3.4. Rezultati ispitivanja žilavosti epruveta izrezanih iz uzorka S

Nakon mjerenja mase i dimenzija, te ispitivanja epruveta na charpy-evom batu dobivene su sljedeće vrijednosti, zapisane u tablici 13:

Tablica 13. Dimenzije i žilavost epruveta izrezanih iz uzorka S

| Uzorak | Debljina (mm) | Visina (mm) | Presjek (mm ²) | Energija (J) | Energija/presjek (J/mm ²) | Masa (g) | Energija/masa (J/g) |
|-----------|---------------|-------------|----------------------------|--------------|---------------------------------------|----------|---------------------|
| 1 | 3,00 | 10,70 | 32,100 | 3,0000 | 0,09345794 | 4,0024 | 0,749550 |
| 2 | 3,00 | 11,00 | 33,000 | 3,9000 | 0,11818182 | 4,1158 | 0,947568 |
| 3 | 2,98 | 11,12 | 33,138 | 3,4000 | 0,10259505 | 4,1624 | 0,816836 |
| 4 | 3,00 | 10,80 | 32,400 | 3,6500 | 0,11265432 | 3,9223 | 0,930576 |
| 5 | 3,00 | 11,22 | 33,660 | 3,6500 | 0,10843731 | 3,9932 | 0,914053 |
| 6 | 2,98 | 11,00 | 32,780 | 3,4500 | 0,10524710 | 3,9608 | 0,871036 |
| \bar{x} | 2,99 | 10,97 | 32,85 | 3,5083 | 0,10676226 | 4,0262 | 0,871603 |
| S_x | 0,0103 | 0,1942 | 0,5534 | 0,305641 | 0,008539 | 0,093066 | 0,076088 |



Slika 48. Epruvete kompozita ojačanog staklenim vlaknima nakon ispitivanja žilavosti

3.3.5. Usporedba uzoraka nakon ispitivanja žilavosti

Tablica 14 prikazuje relevantne vrijednosti iz poglavlja ispitivanja žilavosti u kontekstu tjelesne zaštite.

Tablica 14. Usporedba rezultata ispitivanja žilavosti

| | Prosječna energija/presjeku (J/mm ²) | Prosječna energija/masi (J/g) |
|-----------|--|-------------------------------|
| A uzorak | 0,05468300 | 0,653029 |
| PE uzorak | 0,05356192 | 0,737887 |
| S uzorak | 0,10676226 | 0,871603 |

A uzorak i PE uzorak imaju vrlo sličnu žilavost, što je i bilo očekivano na temelju njihovih bliskih mehaničkih svojstava (tablica 2). PE uzorak pruža bolju žilavost ovisno o masi što je u kontekstu tjelesne zaštite iznimno bitan parametar, dok je energija ovisna o presjeku gotovo jednaka. Ipak, najbolje rezultate je pokazao S uzorak, što nije u skladu s teorijom; u djelu rada gdje je analizirana mikrostruktura pojedinačnih uzoraka, navedeno je da staklena vlakna imaju najbolju povezanost između matrice i ojačala. Može se pretpostaviti da je zbog dobre povezanosti konstituenata u materijalu i većeg broja slojeva ojačala S uzorak je pokazao najbolju žilavost. Potrebno je naglasiti da odnos utrošene energije/presjeku nije linearan, i unatoč svođenja vrijednosti na usporedive veličine, broj slojeva i dalje ima značajan utjecaj na krutost i žilavost.

4. ZAKLJUČAK

Nakon provedenih ispitivanja donesen je zaključak da su svi ispitani kompozitni materijali primjenjivi kao tjelesna zaštita u sportu *Airsoft*. Svi uzorci su pokazali odličnu otpornost na udar i nisku masu u odnosu na mehanička svojstva. Najbolji se pokazao kompozitni materijal ojačan staklenim vlaknima, koji se u industriji općenito ne koristi za tjelesnu zaštitu od vatrenog oružija, međutim, u kontekstu opreme za *Airsoft* je odličan. Staklena vlakna su znatno jeftinija od ostalih vlaknenih ojačala, a energije zrna su dovoljno male da nije potrebna iznimno visoka vlačna čvrstoća materijala. Staklena vlakna još imaju prednost zbog jednostavnog postupka proizvodnje i mogućnosti oblikovanja u željeni oblik (npr trup broda). Za potencijalni nastavak rada, bilo bi potrebno usporediti svojstva kompozita ojačanih staklenim vlaknima s tvrdom plastikom koja se inače koristi za proizvodnju zaštitne *Airsoft* opreme i cijenu proizvodnje i oblikovanja u željeni oblik (npr maska).

LITERATURA

- [1] Filetin, T., Kovačićek, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, FSB Zagreb, 2019.
- [2] Krishan K. Chawla: Composite Materials Science and Engineering 3rd ed. New York: Springer; 2012.
- [3] Česticama ojačani kompozit:
<https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/particle-reinforced-composites>
Pristupljeno 04.02.2023.
- [4] Yibre, A.M., Koçer, B., Esleman, E.A. et al. Weight optimization of hybrid composite laminate using learning-oriented artificial algae algorithm. SN Appl. Sci. 2, 1326 (2020).
Dostupno online: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-3126-0>
- [5] Li, Z.; Ma, J. Experimental Study on Mechanical Properties of the Sandwich Composite Structure Reinforced by Basalt Fiber and Nomex Honeycomb. Materials 2020, 13, 1870.
Dostupno online: <https://doi.org/10.3390/ma13081870>
- [6] Schauerperl, Z. Polimeri i kompoziti. Zagreb Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2020.
- [7] Struktura poliestera: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/polyester-resin>
Pristupljeno: 29.01.2023.
- [8] Svojstva S stakla: <https://jpscsm.com/products/e-glass-s-glass/>
Pristupljeno: 05.02.2023.
- [9] Department of defense Washington DC: Department od defense handbook, composite materials handbook volume 3: Polymer matrix composites material usage, design and analysis, 2002.
- [10] Prsluk otporan na metke: <https://bulletproofzone.com/collections/bulletproof-vests>
Pristupljeno: 05.02.2023.
- [11] Rukavice od aramidnih vlakana:
<https://www.amazon.com/Schwer-Resistant-Construction-Warehouse-Detecting/dp/B09CK9G2D6>
Pristupljeno: 05.02.2023.
- [12] Firas J. Khusiafan: Use of KEVLAR ® 49 in Aircraft Components

- [13] Struktura polietilena: <https://www.xometry.com/resources/materials/polyethylene/>
Pristupljeno: 02.02.2023
- [14] Luk ojačan staklenim vlaknima: <https://hch-shop.de/Haller-compound-bow-set-25-lbs-with-fiberglass-arrows-and-armguard>
Pristupljeno 03.02.2023.
- [15] Han, Z.; Jeong, S.; Noh, J.; Oh, D. Comparative Study of Glass Fiber Content Measurement Methods for Inspecting Fabrication Quality of Composite Ship Structures. *Appl. Sci.* 2020, *10*, 5130.
Dostupno online: <https://doi.org/10.3390/app10155130>
- [16] Bilić L. Priprema i karakterizacija Charpyevih ispitnih uzoraka sa V-zarezom za indirektnu provjeru uređaja [završni rad]. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2018.