

Utjecaj nanočestica na mehanička svojstva polimera

Kolednjak, Ana

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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:235:851977>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-06**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Ana Kolednjak

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

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

Studentica:

Ana Kolednjak

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se mentoru profesoru dr. sc. Zdravku Schauperlu na pomoći te prenesenom znanju tijekom vremena studiranja i izradi ovog diplomskog rada.

Zahvaljujem se tehničkom suradniku Božidaru Bušetinčanu na izdvojenom vremenu i pruženoj pomoći tijekom pripreme ispitnih uzoraka kao i izvedbe mehaničkih ispitivanja na njima.

Također, željela bih se zahvaliti svojoj obitelji, mama, tata, Ivane hvala što ste mi bili podrška tijekom cijelom mog studiranja kao i tijekom pisanja ovog rada. Hvala mojim prijateljima, a posebno Ani i Eli bez kojih studiranje ne bi bilo isto.

Ana Kolednjak



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite
Povjerenstvo za diplomске ispite studija strojarstva za smjerove:
Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1	
Urbroj: 15 - 24 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Ana Kolednjak** JMBAG: 0035215447

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj nanočestica na mehanička svojstva polimera**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The influence of nanoparticles on the mechanical properties of polymer**

Opis zadatka:

U izradi ploča za balističku zaštitu danas se koriste napredni materijali što uključuje različite metale, keramike i kompozitne materijale. Vrlo česti materijali za tu namjenu su polimerni kompoziti čija svojstva se svakodnevno usavršavaju. Jedan od načina poboljšanja mehaničkih svojstava polimernih kompozita je dodavanje tvrdih i čvrstih nanočestica u polimernu matricu.

U ovom radu je potrebno istražiti utjecaj udjela i vrste nanočestica na mehanička svojstva polimera koji se koristi kao matrica polimernih kompozita. 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 naglaskom na polimerne kompozite. U eksperimentalnom dijelu radu potrebno je izraditi ploče od epoksidnog polimera s različitim vrstama i udjelima nanočestica. 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 nanočestica na osnovna mehanička svojstva te navesti potencijalne mogućnosti primjene takvih materijala.

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

Zadatak zadan:

7. ožujka 2024.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Zdravko Schauerl

Datum predaje rada:

9. svibnja 2024.

Predviđeni datumi obrane:

13. – 17. svibnja 2024.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivice Garašić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS KRATICA	VI
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY	X
1. UVOD.....	1
2. KOMPOZITNI MATERIJALI.....	3
2.1 Podjela kompozitnih materijala.....	5
2.2 Ojačala kompozita.....	5
2.2.1 Kompoziti ojačani česticama	6
2.2.2 Kompoziti ojačani vlaknima	7
2.2.3 Strukturni kompoziti	9
2.3 Matrica kompozita.....	10
2.3.1 Metalna matrica.....	11
2.3.2 Keramička matrica	11
2.3.3 Polimerna matrica	12
2.3.3.1 Epoksidna smola	15
3. NANOČESTICE.....	19
3.1 Klasifikacija nanomaterijala.....	20
3.2 Podjela nanočestica	21
3.3 Postupak dobivanja nanočestica	22
3.4 Primjena nanočestica.....	24
4. MATERIJALI BALISTIČKIH PLOČA.....	25
4.1 Balistika.....	25
4.2 Antibalističke ploče.....	25
4.2.1 Drvene antibalističke ploče	26
4.2.2 Metalne antibalističke ploče.....	27
4.2.3 Kompozitne antibalističke ploče	28
4.3.4. Keramičke antibalističke ploče	29
5. MEHANIČKA SVOJSTVA.....	30
5.1 Statičko – vlačni pokus	31
5.2 Savojna čvrstoća.....	36
5.3 Udarni rad loma.....	40
6. EKSPERIMENTALI DIO	43
6.1 Statičko – vlačno ispitivanje s pripremom uzoraka	46
6.2 Savojno ispitivanje s pripremom uzoraka	54
6.3 Ispitivanje udarnog rada loma s pripremom uzoraka	62

ZAKLJUČAK	70
LITERATURA.....	72

POPIS SLIKA

Slika 1. Usporedba između konvencionalnih materijala i kompozitnih materijala [2].....	4
Slika 2. Primjena kompozitnih materijala u različitim industrijama [5]	5
Slika 3. Podjela kompozita s obzirom na oblik i strukturu ojačala; a) kompoziti s česticama, b) kompoziti s vlaknima, c) slojeviti kompoziti [1]	6
Slika 4. Shematski 3D prikaz idealne disperzije i distribucije kompozita ojačanih česticama [6]	7
Slika 5. Ugljična, aramidna i staklena vlakna [7]	8
Slika 6. Prikaz različite usmjerenosti vlakna u matrici, a) kontinuirana jednosmjerna vlakna, b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna, c) ortogonalno raspoređena vlakna i d) višesmjerno usmjerena vlakna [1].....	8
Slika 7. Primjer slaganja slojevitih kompozita [1]	9
Slika 8. Shematski prikaz sendvič strukture sastavljene od površinskog sloja i jezgre [8]	10
Slika 9. Graf naprezanje – istezanje polimernog kompozita [1]	13
Slika 10. Globalno područje primjene epoksidnih smola iz 2017. godine [18]	18
Slika 11. Klasifikacija nanomaterijala s obzirom na različitu dimenzionalnost [19].....	21
Slika 12. Prikaz dva različita načina dobivanja nanočestica [20]	23
Slika 13. Tablica prikaza internacionalnih balističkih standarda [24]	26
Slika 14. Shematski prikaz epruvete sa četvrtastim (lijevo) i okruglim (desno) poprečnim presjekom [31].....	32
Slika 15. Prikaz mehaničke kidalice zajedno s njezinim dijelovima [32].....	33
Slika 16. Pravilan i nepravilan način postavljanja epruvete u čeljust kidalice [33].....	34
Slika 17. Karakteristični graf naprezanje – istezanje tehničkih materijala, A – krhki materijal, B – konstrukcijski čelik, C- duktilni materijal (legura aluminija), D – polimerni materijal [34]	35
Slika 18. Početni položaj uzorka na gredi prije ispitivanja savojne čvrstoće [35].....	38
Slika 19. Karakteristične krivulje u grafu savojno naprezanje- savojno istezanje, a – ispitni uzorak koji puca prije tečenja, b – ispitni uzorak koji doseže maksimalnu vrijednost te se zatim lomi prije nego dosegne konvencionalno savijanje, s_c , c – ispitni uzorak [35]	40
Slika 20. Prikaz Charpy-jevog bata [37]	42
Slika 21. Epoksidne ploče s metalnim nanočesticama SiO_2 – 1 wt% (lijevo) i 2 wt% (desno).....	44
Slika 22. Epoksidne ploče s metalnim nanočesticama TiO_2 – 1 wt% (lijevo) i 2 wt% (desno)	44
Slika 23. Izrezani ispitni uzorci s metalnim nanočesticama SiO_2 – 1 wt% (lijevo) i 2 wt% (desno).....	46
Slika 24. Izrezani ispitni uzorci s metalnim nanočesticama TiO_2 – 1 wt% (lijevo) i 2 wt% (desno).....	47
Slika 25. Mehanička kidalica za statičkog – vlačnog ispitivanja.....	48
Slika 26. Pravilno postavljen ispitni uzorak u prihvatnoj glavi čeljusti kidalice	49
Slika 27. Ispitni uzorci nakon provedenog statičkog – vlačnog pokusa, SiO_2 – 1 wt% (lijevo) i 2 wt% (desno).....	51
Slika 28. Ispitni uzorci nakon provedenog statičkog – vlačnog pokusa, TiO_2 – 1 wt% (lijevo) i 2 wt% (desno).....	51
Slika 29. Graf naprezanje – istezanje uzorka SiO_2 2%_2	53
Slika 30. Graf naprezanje – istezanje uzorka TiO_2 1%_5	53

Slika 31. Izrezani ispitni uzorci s metalnim nanočesticama SiO ₂ – 1 wt% (lijevo) i 2 wt% (desno).....	56
Slika 32. Izrezani ispitni uzorci s metalnim nanočesticama TiO ₂ – 1 wt% (lijevo) i 2 wt% (desno).....	56
Slika 33. Postavljeni ispitni uzorak na stroju za savojno ispitivanje	57
Slika 34. Ispitni uzorci s metalnim nanočesticama SiO ₂ – 1 wt% (lijevo) i 2 wt% (desno) nakon provedenog savojnog ispitivanja	59
Slika 35. Ispitni uzorci s metalnim nanočesticama TiO ₂ – 1 wt% (lijevo) i 2 wt% (desno) nakon provedenog savojnog ispitivanja	60
Slika 36. Graf savojno naprezanje – istežanje uzorka SiO ₂ 2%_3.....	61
Slika 37. Graf savojno naprezanje – istežanje uzorka TiO ₂ 2%_2.....	62
Slika 38. Izrezani ispitni uzorci s metalnim nanočesticama SiO ₂ – 1 wt% (lijevo) i 2 wt% (desno).....	64
Slika 39. Izrezani ispitni uzorci s metalnim nanočesticama TiO ₂ – 1 wt% (lijevo) i 2 wt% (desno).....	65
Slika 40. Charpy-jev bat za ispitivanje udarnog rada loma.....	66
Slika 41. Horizontalni položaj ispitnog uzorka na Charpy-jevom batu	66
Slika 42. Ispitni uzorci s metalnim nanočesticama SiO ₂ – 1 wt% (lijevo) i 2 wt% (desno) nakon provedenog ispitivanja udarnim radom loma	68
Slika 43. Ispitni uzorci s metalnim nanočesticama TiO ₂ – 1 wt% (lijevo) i 2 wt% (desno) nakon provedenog ispitivanja udarnim radom loma	69

POPIS TABLICA

Tablica 1. Prikaz mehaničkih svojstva epoksidne matrice sa staklenim, ugljičnim i aramidnim vlaknima [1].	16
Tablica 2. Podjela različitih vrsta mehaničkog ispitivanja s obzirom na način i trajanje djelovanja opterećenja [30].	30
Tablica 3. Rezultati vlačne čvrstoće i modula elastičnosti ploče ojačane SiO ₂ i TiO ₂ metalnim nanočesticama.	49
Tablica 4. Rezultati vlačne čvrstoće i modula elastičnosti referentne ploče [38].	50
Tablica 5. Izmjerene vrijednosti debljine i širine pripremljenih ispitnih uzoraka za savojno ispitivanje.	54
Tablica 6. Izmjerene vrijednosti debljine i širine pripremljenih ispitnih uzoraka referentne ploče za savojno ispitivanje [38].	55
Tablica 7. Vrijednosti savojne čvrstoće i savojnog modula ploče ojačane SiO ₂ i TiO ₂ metalnim nanočesticama.	58
Tablica 8. Vrijednosti savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti referentne ploče [38].	59
Tablica 9. Izmjerene vrijednosti debljine i širine pripremljenih ispitnih uzoraka za ispitivanje udarnog rada loma.	63
Tablica 10. Izmjerene vrijednosti debljine i širine pripremljenih ispitnih uzoraka referentne ploče za ispitivanje udarnog rada loma [38].	64
Tablica 11. Vrijednosti promjene potencijalne energije i žilavosti referentne ploče i ploče ojačane SiO ₂ i TiO ₂ metalnim nanočesticama.	67
Tablica 12. Vrijednosti promjene potencijalne energije i žilavosti referentne ploče [38].	68

POPIS KRATICA

KRATICA	OPIS
0D	nulta dimenzionalnosti
1D	jednodimenzionalno
2D	dvodimenzionalno
3D	trodimenzionalno
CCC	ugljik – ugljik kompozitni materijal (eng. <i>Carbon – carbon composite</i>)
CLT	križno – lamelirano drvo (eng. <i>Cross – laminated timber</i>)
CMC	kompozitni materijal s metalnom matricom (eng. <i>Ceramic matrix composite</i>)
DGEBA	diglicidil eter bisfenol-A
MMC	kompozitni materijal s metalnom matricom (eng. <i>Metal matrix composite</i>)
PE	polietilen
PEEK	polieter eter keton
PMC	kompozitni materijal s polimernom matricom (eng. <i>Polymer matrix composite</i>)
PP	polipropilen
PS	polistiren
PU	poliuretan
PVC	poli(vinil-klorid)
UHMWPE	polietilenska vlakna s ultravisokom molekularnom masom (eng. <i>Ultra – high – molecular – weight polyethylene</i>)
UV	ultraljubičasto zračenje (eng. <i>Ultraviolet</i>)

POPIS OZNAKA

Latinske oznake

Oznaka	Jedinica	Opis
a_0	mm	debljina četvrtastog ispitnog uzorka
A_{CN}	kJ/m^2	žilavost
Al_2O_3		aluminijev dioksid
b_0	mm	širina četvrtastog ispitnog uzorka
b	mm	širina ispitnog uzorka
CO_2		ugljikov dioksid
d_0	mm	početni promjer okruglog ispitnog uzorka
E	N/mm^2	Young-ov modul elastičnosti
E_C	J	promjena potencijalne energije
E_f	MPa	savojni modul elastičnosti
F_e	N	sila razvlačenja (tečenja)
F_k	N	konačna sila
F_m	N	maksimalna sila
F_{max}	N	maksimalna silu kojom je ispitni uzorak opterećen
G	N	težina bata
h	mm	debljina ispitnog uzorka
h_1	m	početna visina bata
h_2	m	konačna visina bata
$KU(V)$	J	udarni rad loma na ispitnom uzorku s U(V) utorom
L	mm	razmak između oslonaca
L_0	mm	početna duljina ispitnog uzorka
L_u	mm	početna mjerna duljina ispitnog uzorka
R_e	N/mm^2	granica razvlačenja (tečenja)
R_k	N/mm^2	konačno naprezanje
R_m	N/mm^2	vlačna čvrstoća
S_0	mm^2	površina početnog četvrtastog presjeka ispitnog uzorka
s_i (i=1 ili 2)	mm	pomak

SiO ₂	silicijev dioksid
TiO ₂	titanijev dioksid

Grčke oznake

ΔL_u	mm	konačno produljene ispitnog uzorka
ε	mm/mm	istezanje
ε_{fi}	mm/mm	odgovarajuće istezanje pri savijanju
ε_u	mm/mm	ukupno istezanje
σ	N/mm ²	naprezanje
σ_{f2}	MPa	naprezanje pri savijanju, izmjereno pri pomaku s_1
σ_{f1}	MPa	naprezanje pri savijanju, izmjereno pri pomaku s_2

SAŽETAK

Inovativni materijali, kao što su kompozitni materijali omogućuju revolucionarna rješenja i značajna poboljšanja u različitim industrijskim granama. Kompozitni materijali sastavljeni su od dva ili više različita materijala, a zahvaljujući sposobnosti kombiniranja svojstva pojedinih komponenti dobivaju se materijali s poboljšanim karakteristikama. Poseban značaj kompozitni materijali imaju u specijaliziranim područjima kao što je balistika, gdje nude inovativna rješenja za dizajn i izradu antibalističkih ploča, koje su ključne komponente u balističkoj zaštiti. Također, u proteklim desetljećima, s razvojem tehnologije sve je veće korištenje nanočestica u industrijskim procesima gdje imaju posebno važnu ulogu u izradi polimernih matrica kompozitnih materijala.

Cilj ovog diplomskog rada je odrediti utjecaj različitog volumnog udjela SiO_2 i TiO_2 nanočestica na mehanička svojstva epoksidne smole koja predstavlja polimernu matricu budućeg kompozitnog materijala. Usporedbom ispitnih uzoraka epoksidne ploče ojačane sa SiO_2 i TiO_2 nanočestica s ispitnim uzorcima referentne ploče bez ojačala, donijet će se zaključak o utjecaju nanočestica na mehanička svojstva epoksidne smole kao i o budućoj primjeni ojačane epoksidne polimerne matrice za izradu antibalističkih ploča. Diplomski rad podijeljen je na dva dijela, teorijski i eksperimentalni dio. Prvo u teorijskom dijelu rada općenito su opisani kompozitni materijali, njihova podjela te su detaljnije opisani kompozitni materijali čija je matrica od polimernih materijala s naglaskom na matricu od epoksidne smole. Zatim su u radu opisane nanočestice, njihova osnovna podjela, postupak dobivanja kao i popis njihove primjene. U teorijskom dijelu ukratko je opisana balistika te je naveden popis materijala kao i popis različitih materijala vlakana pomoću kojih se izrađuju antibalističke ploče. Na kraju su opisana i mehanička ispitivanja koja su provedena u ovom radu. U eksperimentalnom dijelu rada opisan je postupak statičkog – vlačnog pokusa, savojnog ispitivanja te ispitivanje udarnog rada loma. Prikazani su rezultati ispitivanja kao i njihova analiza, koja je popraćena slikama i grafovima dobivenim nakon provedenih mehaničkih ispitivanja.

Ključne riječi: SiO_2 nanočestice, TiO_2 nanočestice, epoksidna smola, polimerna matrica, kompozitni materijal, antibalističke ploče.

SUMMARY

Innovative materials, such as composite materials, enable revolutionary solutions and significant improvements in various industrial sectors. Composite materials are composed of two or more different materials, and thanks to the ability to combine the properties of individual components, materials with enhanced characteristics are obtained. Composite materials have particular significance in specialized areas such as ballistics, where they offer innovative solutions for the design and manufacture of antiballistic plates, which are key components in ballistic protection. Additionally, in recent decades, with the development of technology, there has been an increasing use of nanoparticles in industrial processes, where they play a particularly important role in the production of polymeric matrices for composite materials.

The aim of this master's thesis is to determine the influence of different volume fractions of SiO₂ and TiO₂ nanoparticles on the mechanical properties of epoxy resin, which represents the polymeric matrix of the future composite material. By comparing test samples of epoxy plates reinforced with SiO₂ and TiO₂ nanoparticles with test samples of reference plates without reinforcements, conclusions will be drawn regarding the influence of nanoparticles on the mechanical properties of epoxy resin, as well as on the future application of reinforced epoxy polymer matrices for the production of antiballistic plates. The master's thesis is divided into two parts: theoretical and experimental. Firstly, in the theoretical part of the work, composite materials are generally described, their division is outlined, and composite materials with a matrix of polymeric materials are described in more detail, with a focus on epoxy resin matrices. Then, nanoparticles are described in the work, including their basic division, production process, and list of applications. In the theoretical part, ballistics are briefly described, along with a list of materials and various fiber materials used in the production of antiballistic plates. Finally, the mechanical tests conducted in this work are described. In the experimental part of the work, the course of tensile testing, bending testing, and impact fracture testing are described. The results of the tests are presented along with their analysis, accompanied by images and graphs obtained after the mechanical testing.

Keywords: SiO₂ nanoparticles, TiO₂ nanoparticles, epoxy resin, polymeric matrix, composite material, antiballistic plates.

1. UVOD

Razvoj novih materijala ključan je za napredak u različitim granama industrije, poput automobilske i zrakoplovne industrije, u medicini kao i u građevinarstvu, gdje novi, inovativniji materijali omogućuju revolucionarna rješenja i poboljšanja. Stoga, razvoj i primjena novih materijala ne samo da potiču ekonomski rast i inovacije već i doprinose održivosti i industrijskom razvoju.

Među tim materijalima, kompozitni materijali zauzimaju posebno mjesto zbog svoje sposobnosti kombiniranja najboljih svojstava pojedinačnih komponenti kako bi stvorili materijale sa superiornim karakteristikama. Posebno se ističu kompozitni materijali čija je matrica izrađena od polimera. Takvi materijali su zahvaljujući svojstvima poput visoke čvrstoće, otpornosti na koroziju i odličnih adhezijskih svojstava, postali nezamjenjiv dio mnogih industrijskih grana, uključujući zrakoplovnu, automobilsku i građevinsku industriju. Polimerni kompoziti, osobito oni čija je matrica izrađena od epoksidne smole, omogućavaju razvoj laganih, no izuzetno čvrstih materijala. Svojstva epoksidnih smola značajno ovise o vrsti i udjelu ojačala, metodama obrade te uvjetima uporabe finalnog proizvoda. Modifikacijom epoksidnih smola kroz dodavanje specifičnih aditiva, moguće je precizno usmjeravati njihove mehaničke karakteristike, uključujući optimizaciju viskoznosti, poboljšanje duktilnosti i smanjenje modula elastičnosti. Takve prilagodbe također doprinose povećanju otpornosti materijala na inicijaciju i propagaciju pukotina, unaprjeđujući time njegovu strukturu i vijek trajanja. Kada su epoksidne smole u ulozi matrice kompozitnog materijala, ojačavaju se dodavanjem različitih vlakana poput staklenih, ugljičnih i aramidnih.

U posljednjih nekoliko desetaka godina, razvojem tehnologije sve je češća upotreba nanočestica, a posebice kao ojačala u kompozitnim materijalima. Nanočestice, definirane kao čestice s barem jednom dimenzijom manjom od 100 nm, imaju sposobnost da značajno mijenjaju svojstva materijala s kojima se kombiniraju. Ova jedinstvena svojstva nanočestica omogućuju stvaranje kompozitnih materijala s poboljšanim karakteristikama, uključujući veću čvrstoću, bolju otpornost na koroziju i poboljšanu toplinsku stabilnost. Posebno, kada je riječ o polimernim kompozitima, gdje se tvrde i čvrste nanočestice koriste kao ojačala za poboljšanje mehaničkih svojstava i trajnosti materijala polimerne matrice. Metalne nanočestice poput titanijeva dioksida (TiO_2) i silicijeva dioksida (SiO_2) često se koriste zbog svoje kompatibilnosti

s polimernim matricama i sposobnosti da poboljšaju mehanička svojstva kao što su čvrstoća, modul elastičnosti i žilavost. Integracijom nanočestica u polimerne matrice, moguće je stvoriti kompozitne materijale koji su lakši, jači i otporniji na razne oblike degradacije, što ih čini prikladnim za primjenu u različitim industrijskim granama.

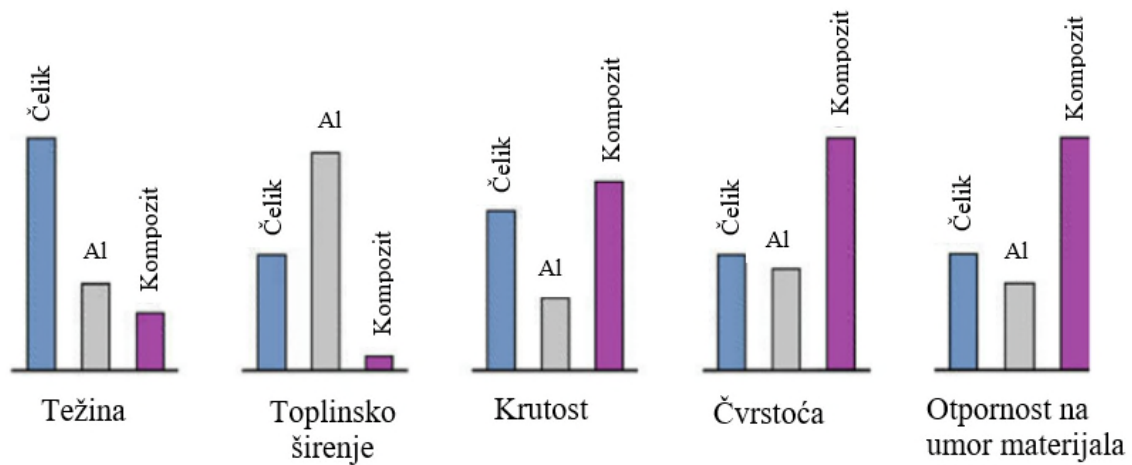
Kao što je već spomenuto, kompozitni materijali imaju široko područje primjene, a osobito u specijaliziranom području kao što je balistika, nudeći revolucionarna rješenja u dizajnu i izradi antibalističkih ploča koje su ključna komponenta u balističkoj zaštiti. Glavna zadaća antibalističkih ploča je sprječavanje prodiranja kinetičkih penetratora. Antibalističke ploče izrađene od kompozitnih materijala moraju imati izvanredna mehanička svojstva, uključujući visoku čvrstoću na udar i otpornost na penetraciju, kako bi uspješno zaustavile kinetičke penetratore bez probijanja. Ploče mogu biti izrađene od različitih materijala poput metala, keramike, drva, a u izradi se također mogu primjenjivati kompozitni materijali. Prilikom izrade ploča od kompozitnih materijala kao materijal matrice koristi se epoksidna smola, s ojačalima poput aramidnih vlakana, ugljičnih vlakana ili staklenih vlakana, stvarajući materijale koji su istovremeno lagani i sposobni apsorbirati ogromne količine kinetičke energije. Također, koriste se i ploče s integriranim nanočesticama u materijal kompozitne matrice. Integracijom nanočestica u kompozitne materijale, istraživanja se usmjeravaju na daljnje poboljšanje mehaničkih svojstava, poput čvrstoće, otpornosti na lom i modul elastičnosti, čime se omogućuju poboljšana mehanička svojstva antibalističkih ploča.

U ovom diplomskom radu potrebno je ispitati utjecaj nanočestica na mehanička svojstva polimernog kompozita. Metalne nanočestice titanijeva dioksida (TiO_2) i silicijeva dioksida (SiO_2) različitog volumnog udjela dodaju se u epoksidnu matricu polimernog kompozita s ciljem poboljšanja mehaničkih svojstava budućeg kompozitnog materijala. Kroz eksperimentalni dio rada potrebno je izraditi ploče od epoksidnog polimera s različitim vrstama i udjelima nanočestica te nakon njihove izrade izrezati ispitne uzorke te ispitati njihova mehanička svojstva. Prevest će se tri različita mehanička ispitivanja, statički – vlačni pokus, savojna čvrstoća te udarni rad loma. Temeljem rezultata ispitivanja usporedit će se mehanička svojstva epoksidne matrice koja nije ojačana nanočesticama te one koja je i donijeti će se zaključak o utjecaju nanočestica na osnovna mehanička svojstva polimernog materijala, odnosno epoksidne smole. Također, donijet će se zaključak o mogućnosti potencijalne primjene takvih materijala u balistici.

2. KOMPOZITNI MATERIJALI

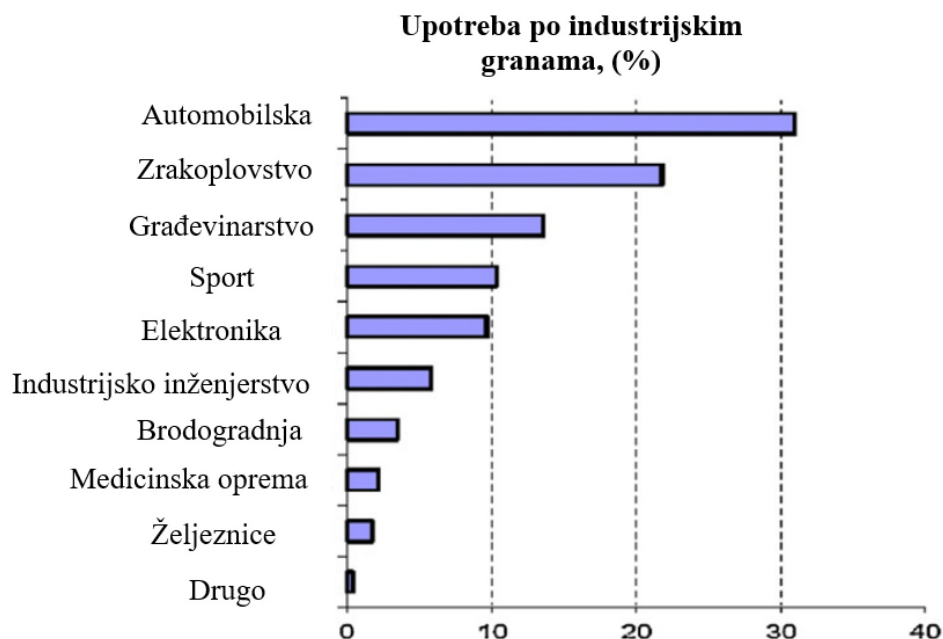
Kompozitni materijali predstavljaju složene materijale sastavljene od dva ili više kemijski različitih materijala. To su heterogeni materijali proizvedeni umjetnim spajanjem različitih komponenti kako bi se postigao novi, superiorniji materijal koji predstavlja rezultat kombinacije najboljih svojstva izvornih komponenti od kojih je nastao. Prilikom umjetnog spajanja materijala postoji jasna granica između komponenti. Sastavni dijelovi kompozitnih materijala su materica i ojačalo. Obično postoji jedna kontinuirana faza (matrica) koja okružuje ostale raspršene faze [1].

Budući da se mogu prilagoditi specifičnim potrebama primjene, kompozitni materijali imaju sve veći značaj u industriji, nudeći revolucionarna rješenja u pogledu čvrstoće, težine, krutosti, otpornosti na koroziju i visoke temperature te ostalih svojstva. Zahvaljujući izvrsnim mehaničkim svojstvima koje kompozitni materijali mogu postići, za industrijske primjene česta su zamjena tradicionalnim tj. konvencionalnim materijalima. Razlog većeg korištenja kompozitnih materijala je njihova financijska isplativost, odnosno bolji omjer cijene i kvalitete što znači da dobivamo znatno bolja mehanička svojstva iako su kompozitni materijali skuplji od konvencionalnih. Ključne prednosti u odnosu na konvencionalne materijale očituju se u lakšem i često jeftinijem održavanju te u dužem vijeku trajanja. Mehanička svojstva su također unapređena (npr. specifična čvrstoća, krutost), olakšana je izrada oblika složenih dimenzija, osigurana je dimenzijska postojanost pri radim temperaturama, otpornost na koroziju, kemijski su postojani na sobnoj temperaturi što osigurava otpornost na vlagu. Također, gustoća im je manja u usporedbi s konvencionalnim materijalima. S druge strane, iako kompozitni materijali nude brojne prednosti naspram konvencionalnih materijala, imaju određene nedostatke. Neki od glavnih nedostataka su visoka cijena materijala i postupka proizvodnje, otežano recikliranje i zbrinjavanje nakon prestanka upotrebe, poteškoće pri popravcima te prikazuju anizotropne karakteristike što znači da njihova svojstva variraju u različitim smjerovima. Slika 1. prikazuje grafički prikaz usporedbe konvencionalnih materijala (aluminij i čelik) s kompozitnim materijalima u pogledu težine, toplinskog širenja, krutosti, čvrstoće i žilavosti. Iako postoje određeni nedostaci, prednosti koje kompozitni materijali pružaju često prevladavaju te nedostatke, naročito u situacijama gdje su visoka čvrstoća, smanjena masa i izdržljivost na koroziju iznimno bitni. Napredak u tehnologiji kompozitnih materijala također nastoji riješiti neke od ovih izazova, poboljšavajući njihovu održivost, smanjujući troškove proizvodnje i proširujući područja primjene [1].



Slika 1. Usporedba između konvencionalnih materijala i kompozitnih materijala [2]

Danas su kompozitni materijali neizostavni dio inovacija i tehnološkog razvoja, pružajući ključne prednosti u efikasnosti, performansama i održivosti. Razvoj kompozitnih materijala pratio je tehnološki napredak, omogućavajući stvaranje materijala koji su lakši, jači i otporniji na ekstremne uvjete. Njihova primjena je prisutna u različitim industrijskim granama, poput zrakoplovne i automobilske industrije, u graditeljstvu pa sve do svakodnevnih proizvoda poput sportske i medicinske opreme, čime se potvrđuje njihova sveprisutnost i značaj u industriji. Slika 2. prikazuje upotrebu kompozitnih materijala u različitim industrijskim granama [3], [4].



Slika 2. Primjena kompozitnih materijala u različitim industrijama [5]

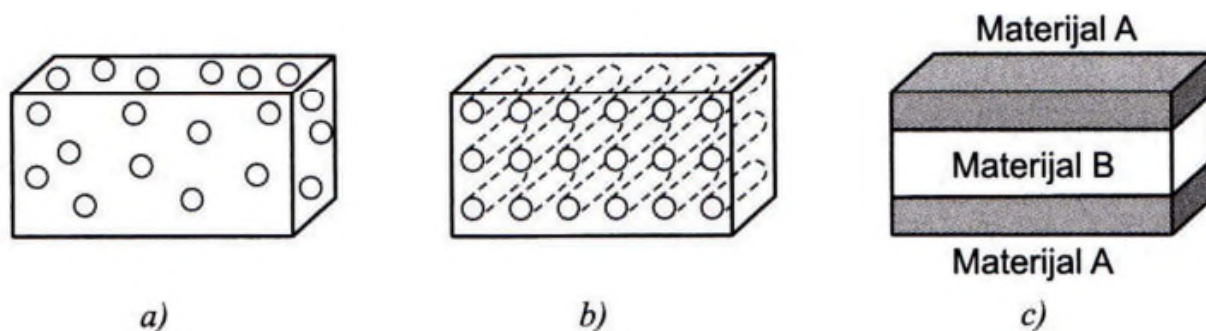
2.1 Podjela kompozitnih materijala

Kompozitni materijali se sastoje od matrice i ojačala, a daljnja se podjela vrši s obzirom na materijal matrice te oblik i strukturu ojačala. Matrica i ojačalo imaju određena uloge i zahtjeve koje moraju zadovoljiti kako bi kompozitni materijal bio siguran za korištenje. Ukupna svojstva kompozitnih materijala ovise o različitim faktorima, uključujući karakteristike matrice i ojačala, kao i njihovu veličinu i distribuciju. Osim toga, volumni udio matrice i ojačala, zajedno s njihovim oblikom, znatno utječe na konačna svojstva kompozita. Nadalje, moguće kemijske reakcije kao i prijanjanje matrice i ojačala igraju ključnu ulogu u određivanju mehaničkih i fizičkih karakteristika krajnjeg kompozitnog materijala [1].

2.2 Ojačala kompozita

Kompozitni materijali mogu biti prema obliku ojačala ojačani česticama ili vlaknima, dok s obzirom na strukturu ojačala razlikujemo laminate (slojeviti kompoziti) i sendvič konstrukcije koji se jednom riječju nazivaju strukturni kompoziti, a Slika 3. prikazuje njihovu podjelu. Glavna uloga ojačala u kompozitnim materijalima je unaprjeđenje njihovih mehaničkih svojstva. Bitno je da ojačalo osigura visoku čvrstoću kao i visoki modul

elastičnosti, odnosno visoku krutost. Uz to, uloga ojačala je da osigura otpornost na trošenje kao i toplinsku vodljivost [1].

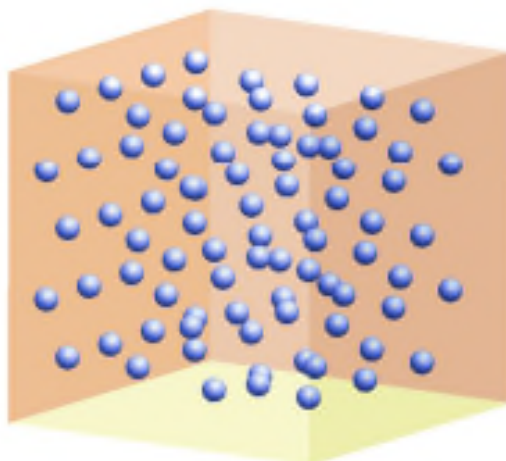


Slika 3. Podjela kompozita s obzirom na oblik i strukturu ojačala; a) kompoziti s česticama, b) kompoziti s vlaknima, c) slojeviti kompoziti [1]

2.2.1 Kompoziti ojačani česticama

Kompozit čija matrica sadrži nasumično, ali ravnomjerno raspoređene čestice predstavlja kompozit ojačan česticama. Slika 4. prikazuje shematski prikaz kompozita ojačanih česticama. Zahvaljujući rasporedu čestica u matrici, kompoziti ojačani česticama su izotropni, što omogućuje predviđanje njihovih svojstva. Uzimajući u obzir veličinu čestica te njihov utjecaj na karakteristična svojstva kompozita, kompozitni se materijali kategoriziraju u dvije glavne skupine: kompozite s disperzijom i kompozite s velikim česticama. Kriterij na kojem se temelji ova podjela je promjer čestica. Kompoziti s disperzijom odlikuju se primjenom čestica promjera do $0,1 \mu\text{m}$. Zahvaljujući malim dimenzijama čestica sprječava se gibanje dislokacija čime se ostvaruje ojačavanje materijala. Za te je potrebno do 15 % disperziranog materijala. Čestice čiji je promjer veći od $1,0 \mu\text{m}$ primjenjuju se u kompozitima s velikim česticama te one ne utječu na sprečavanje gibanja dislokacija u matrici i njihova glavna svrha nije postizanje čvrstoće [1].

Također, podjela nije ograničena samo na dimenzije čestica već se provodi i na temelju volumnog udjela čestica. Pri tome, kompozit čiji je volumni udio od $V_p = 0,15$ klasificira se kao kompozit s disperzijom, dok se kompoziti s volumnim udjelom većim od $V_p = 0,2$ klasificiraju kao kompoziti s velikim česticama [1].



Slika 4. Shematski 3D prikaz idealne disperzije i distribucije kompozita ojačanih česticama [6]

2.2.2 Kompoziti ojačani vlaknima

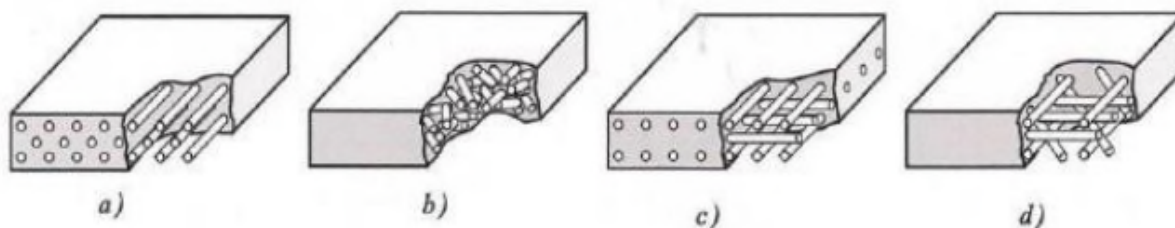
U kontekstu kompozitnih materijala, vlakna predstavljaju ojačala čija je jedna dimenzija znatno dominirajuća u odnosu na ostale. Matrica kompozita okružuje vlakna, prenosi opterećenje na njih, osigurava duktilnost i žilavost te služi kao zaštita od vanjskih utjecaja i prekomjernog trošenja materijala pri radu. Kako je matrica kompozita mekanija i duktilnija, a vlakna koja se ugrađuju u nju su čvrsta i kruta, pospješuju se mehanička svojstva kompozitnog materijala. Poboljšana je čvrstoća kao i žilavost i krutost te je povećan omjer čvrstoće i gustoće [1].

Vlakna se mogu podijeliti u nekoliko skupina s obzirom na vrstu, duljinu, promjer i orijentaciju. S obzirom na promjer i karakteristike vlakna, kompoziti ojačani vlaknima dijele se u tri skupine: viskeri, žice i vlakna. Viskeri su iznimno tanke niti monokristala pravilnih dimenzija koji zbog svoje strukture ne posjeduju sposobnost tečenja, što rezultira iznimno visokom čvrstoćom. Iako posjeduju iznimna mehanička svojstva, ne primjenjuju se često kao ojačalo, zbog visoke cijene i otežane ugradnje u matricu kompozita. Nadalje, žice čiji je promjer relativno velik imaju čestu primjenu u industriji, kao na primjer pri ojačavanju automobilskih guma. Uobičajeni materijal za žice su čelik, molibden i volfram. Vlakna mogu biti amorfna ili polimerna, s karakteristično malim promjerom, a s obzirom na materijal razlikujemo staklena, aramidna i ugljična vlakna, koja se često koriste za ojačavanje polimera. Slika 5. prikazuje izgled različitih vlakna s obzirom na materijal [1].



Slika 5. Ugljična, aramidna i staklena vlakna [7]

Obzirom da se materijal vlakna i matrice razlikuje važno je naglasiti da nužnost njihove kemijske usklađenosti. Orijentacija vlakna u matrici kao i omjer "duljina/promjer" iznimno su bitni i utječu na mehanička svojstva kompozitnog materijala. Vlakna se klasificiraju kao kontinuirana ili diskontinuirana temeljem omjera "duljina/promjer", gdje kontinuirana vlakna imaju omjer veći od $15 l_c$, a diskontinuirana manji od $15 l_c$. Ovdje l_c označava minimalnu kritičnu duljinu nužnu za efikasan prijenos opterećenja na vlakno. Slika 6. prikazuje različit način raspoređivanja vlakna u matrici [1].

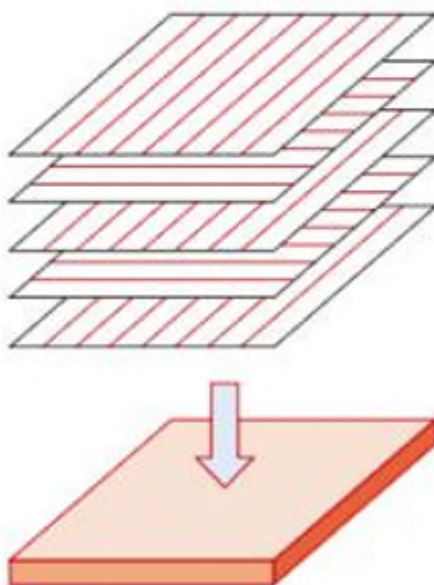


Slika 6. Prikaz različite usmjerenosti vlakna u matrici, a) kontinuirana jednosmjerna vlakna, b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna, c) ortogonalno raspoređena vlakna i d) višesmjerno usmjerena vlakna [1]

Ukoliko su vlakna u matrici diskontinuirana mnogo je teže predvidjeti svojstva kompozita. Također, vlakna čiji je omjer "duljina/promjer" iznimno velik, mnogo je lakše ugraditi u matricu te se njima dobivaju materijali visoke čvrstoće i krutosti. Iako kontinuirana vlakna osiguravaju najbolja mehanička svojstva, vrlo ih je teško ugraditi u matricu kompozita [1].

2.2.3 Strukturni kompoziti

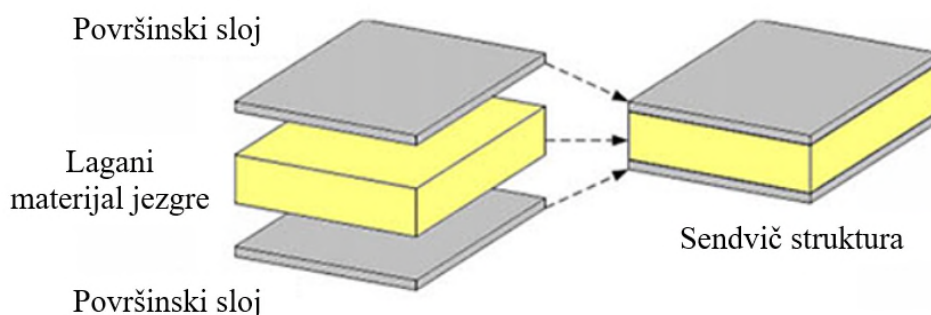
Strukturne kompozite čine slojeviti kompoziti (laminati) i sendvič konstrukcije. Svojstva strukturnih kompozita ne ovise nužno samo o svojstvima matrice i ojačala, već i o geometrijskoj raspodjeli elemenata konstrukcije. Struktura slojevitih kompozita dobiva se slaganjem međusobno povezanih dvodimenzionalnih slojeva tj. ploča jedne na drugu, a Slika 7. prikazuje primjer slaganja slojevitih kompozita. Moguća je nadogradnja slojeva istih kompozita jednih na druge, a njihova mehanička svojstva ovise o orijentaciji vlakna u svakom pojedinom sloju s ciljem poboljšanja istih [1].



Slika 7. Primjer slaganja slojevitih kompozita [1]

Sendvič kompoziti sastoje se od površinskog sloja i materijala za popunjavanje, tj. jezgre, koje međusobno povezuje ljepilo. Slika 8. prikazuje shematski prikaz nastajanja sendvič kompozita. Površinski, vanjski, slojevi dolaze u tankom sloju kao i materijal za popunjavanje. Iako se ne radi o materijalima velike debljine, koji ne trebaju posjedovati visoku krutost i čvrstoću, sendvič konstrukcije posjeduju oba svojstva. Uloga površinskih slojeva je nošenje opterećenja u smjeru ravnine. S druge strane, uloga jezgre je odvajanje dva površinska sloja kao i za pružanje otpora prema deformacijama u smjerovima koji su okomiti na ravninu. Također, jezgra osigurava krutost u ravninama postavljenim okomito na površinski sloj.

Primjeri materijala koji se mogu koristiti kao materijal za popunjavanje su: pjene (PVC, PS, PU, akrilne pjene), saće (aluminij, PP, PE) i drvo (balza, cedar) [1].



Slika 8. Shematski prikaz sendvič strukture sastavljene od površinskog sloja i jezgre [8]

2.3 Matrica kompozita

Prema materijalu matrice razlikujemo kompozitne materijale s metalnom (MMC), keramičkom (CMC) i polimernom matricom (PMC). U industriji je najčešća upotreba metalnih i polimernih matrica, iz razloga što trebaju biti ispunjeni zahtjevi za odgovarajućom duktilnošću. Također, postoji i ugljik - ugljik kompozit (CCC) koji ima matricu i ojačalo od ugljika i jedan je od najnaprednijih inženjerskih materijala. Ovakva kombinacija materijala se vrlo rijetko koristi zbog visoke sklonosti oksidacije pri radu na visokim temperaturama i financijski su neisplativi, budući da je cijena postupka dobivanja iznimno visoka [1].

Mnogi su zahtjevi koje matrica kompozita treba zadovoljiti, a glavna funkcija matrice je povezivanje vlakna unutar nje te prenošenje i ravnomjerno raspoređivanje opterećenja na njih. Pravilna orijentacija i raspored unutar matrice omogućuje vlaknima da izdrže predviđeno opterećenje i da budu ravnomjerno opterećeni. Također, matrica osigurava zaštitu vlakna od površinskog oštećenja uzrokovanom mehaničkim utjecajima ili kemijskim reakcijama. U slučaju oštećenja postoji opasnost od tečenja na površini koje može uzrokovati pukotine, stoga matrica služi kao prepreka napredovanju pukotina. Također, da bi matrica vršila svoju funkciju moraju biti ispunjeni određeni zahtjevi na matricu. Svojstva matrice koja moraju biti zadovoljena su otpornost na koroziju, dobra prionjivost uz vlakna, kemijska inertnost u doticaju s vlaknima ili punilima te poboljšavanje žilavost cijele konstrukcije [3].

2.3.1 Metalna matrica

Kompoziti čija je matrica od metala predstavljaju značajnu kategoriju kompozitnih materijala. Kao materijal metalne matrice najčešće se koriste superlegure, legure aluminija te legure magnezija, titana i bakra. Upotrebom metalne matrice, kompozitni se materijali mogu primjenjivati pri visokim temperaturama. Prednosti metalne matrice nad polimernom matricom uz postojanost i rad pri višim temperaturama je negorivost i povećana otpornost na degradaciju izazvanu izloženošću organskim tekućinama. S druge strane, cjenovno su znatno skuplje od polimernih matrica. Također, uz cijenu, nedostatak metalnih matrica odlikuje se i u kompliciranoj proizvodnji kao i u poteškoćama pri recikliranju. S obzirom na oblik ojačala metalna matrica može biti ojačana česticama te kontinuiranim i diskontinuiranim vlaknima, a svaki od tih oblika pruža jedinstvene prednosti za specifične primjene u industriji. Na primjer, vlakna mogu značajno povećati čvrstoću i modul elastičnosti, dok čestice mogu poboljšati otpornost na trošenje i toplinsku stabilnost. Općenito, ojačala u metalnoj matrici osiguravaju povišenu specifičnu krutost i specifičnu čvrstoću, kao i otpornost na abraziju i puzanje. Uz to ojačala osiguravaju dimenzijsku postojanost. Metalna se matrica primjenjuje se u automobilskoj i zrakoplovnoj industriji, kao i u vojnoj industriji zahvaljujući poboljšanim mehaničkim svojstvima i otpornosti na ekstremne uvjete [1].

2.3.2 Keramička matrica

Matrica kompozitnog materijala također može biti i od keramike, koja je posebno dizajnirana da prevladava ograničenja čiste keramike. Kao materijali keramičke matrice primjenjuje se oksidna i neoksidna keramika. Oba materijala imaju svoje prednosti kao na primjer, primjenom oksidne keramike kompozitna matrica kemijski je stabilnija, dok se primjenom neoksidne keramike osiguravaju bolja mehanička svojstva. Keramička matrica se odlikuje brojnim prednostima nad ostalim materijalima matrice. Kao na primjer, otporna je na oksidaciju i prikladna je za rad pri visokim temperaturama pri kojemu neće doći do slabljenja svojstva. Kemijski je postojana što ukazuje na otpornost prema koroziji i vlazi te ima vrlo dobra mehanička svojstva kao što su visoka tvrdoća i otpornost prema trošenju. Ukoliko keramička matrica ne bi bila sklona krhkom lomu, smatra bi se idealnim materijalom za upotrebu u automobilskoj i zrakoplovnoj industriji na području gdje je potrebna postojanost pri radu na visokim temperaturama i visokim opterećenjima. Dakle, negativna strana kompozita s keramičkom matricom je iznimno mala lomna žilavost zbog koje dolazi do krhkog loma. Zahvaljujući razvoju znanosti i razvojem novih materijala poboljšana je žilavost keramičke

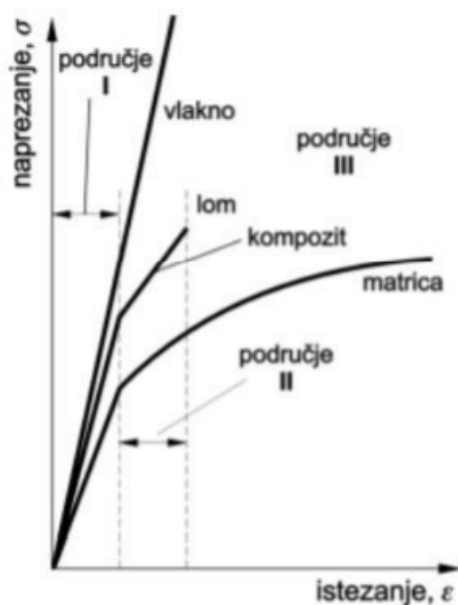
matrice na principu integracije keramičkih ojačala. Ojačala mogu biti čestice ili vlakna od potpuno druge vrste keramike. Ovakav postupak omogućuje deseterostruko povećanje žilavosti. Uz primjenu u automobilskoj i zrakoplovnoj industriji ovakvi se materijali primjenjuju najčešće za umetke reznih alata sa znatno produženim radnim vijekom u usporedbi s većinom materijala [1].

2.3.3 Polimerna matrica

Zahvaljujući pogodnim svojstvima pri sobnoj temperaturi, lakoći proizvodnje i time što su cjenovno pristupačni, kompozitni materijali s polimernom matricom (PMC) imaju najširu primjenu u industriji. PMC materijali se tipično kategoriziraju u dvije osnovne skupine: ojačane plastike i napredni kompoziti. Temeljna razlika između ove dvije skupine očituje se u njihovim mehaničkim svojstvima, poput čvrstoće i krutosti, iako jasna granica među njima ne postoji. Ojačane plastike su ekonomičnije, obično se sastoje od poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima s nižom krutošću (E-staklo) i koriste se u širokom rasponu primjena, od brodskih trupova i valovitih ploča do automobilskih panela i sportske opreme. S druge strane, napredni kompoziti, koji su se počeli koristiti kasnije od ojačane plastike i to uglavnom u zrakoplovstvu, sadrže kombinacije vlakana i matrica koje osiguravaju izuzetnu čvrstoću i krutost. Danas je sve veća upotreba ovakvog tipa kompozitnog materijala. Takvi su materijali skuplji i često uključuju velik udio kontinuiranih vlakana, kao što su staklena, ugljična i aramidna vlakna. Također, koriste se i drugi materijali vlaknastih ojačala, kao na primjer vlakna bora, vlakna silicijeva karbida i aluminijska oksida, ali se ovakvi materijali koriste u znatno rjeđe. Primjena ovakvih materijala je široka te se najčešće koriste u automobilskoj industriji pri izradi karoserijskih panela, branika, vrata, u zrakoplovnoj industriji za izradu strukturnih dijelova za vojne zrakoplove kako bi se smanjila težina i troškovi te poboljšale performanse. Nadalje, primjenjuju se u pomorstvu kao i za izradu sportske opreme te u biomedicinske svrhe za izradu medicinskih implantata i ortopedskih naprava [9], [10].

Svojstva polimernih kompozita određena su karakteristikama, geometrijom i dimenzijama matrice i ojačala, kao i vrstom i intenzitetom interakcija između njih. Polimerna matrica ima visoku žilavost i manju čvrstoću u usporedbi s vlaknima koji posjeduju veću vrijednost čvrstoće. Budući da polimerna matrica sama nema visoku čvrstoću, kombinacijom s vlaknima postižu se bolja mehanička svojstva. Slika 9. prikazuje graf naprezanje – istezanje iz kojeg iščitavamo da se kombinacijom polimerne matrice s vlaknima povećava žilavost materijala kao i njegova čvrstoća. Ovakvom kombinacijom dobiva se kompozitni materijal koji

posjeduje svojstva koja ni jedna od njegovih pojedinačnih komponenti ne posjeduje samostalno [1].



Slika 9. Graf naprezanje – istezanje polimernog kompozita [1]

Ojačavanjem polimerne matrice s ugljičnim, staklenim ili aramidnim vlaknima postižu se puno bolja mehanička svojstva. Kao što je već navedeno, ovakvom kombinacijom materijala povećana je specifična čvrstoća polimernog kompozita te i mnoga druga mehanička svojstva kao što su [9]:

- žilavost,
- otpornost na trošenje,
- otpornost na koroziju i vlagu,
- otpornost na umor materijala,
- otpornost na udarce,
- otpornost na lom i
- toplinska stabilnost.

Polimerna se matrica može primjenjivati za radne temperature do maksimalne temperature 80 °C za nezasićene poliesterske smole i do 315 °C za poliimide [1].

Proces dobivanja kompozita s polimernom matricom ojačanom vlaknima počinje odabirom odgovarajuće polimerne matrice i vrste vlakana. Ovisno o primjeni, vlakna unutar matrice mogu biti kontinuirana koja se često koriste u obliku tkanina ili pletiva ili kratka vlakna koja se mogu nasumično orijentirati u određenom smjeru. Zatim se vlakna impregniraju polimernom matricom koristeći tehnike poput ručnog postavljanja, injekcijskog prešanja ili vakuumske infuziranja kako bi se osiguralo njihovo dobro prijanjanje. Nakon impregnacije, materijal se oblikuje u željeni oblik koristeći metode poput stiskanja u kalupu, namotavanja filameta ili pultruzije. Na kraju dolazi do stvrdnjavanja, pri čemu se koristi toplina i tlak, kako bi se osigurala struktura i mehanička svojstva kompozita. Završna obrada uključuje dodatne postupke kao što su rezanje i brušenje [10], [11].

Materijal polimerne matrice može biti od plastomera, elastomera ili duromera. Plastomeri se prilikom obrade zagrijavaju do temperature više od točke taljenja, što rezultira stvaranjem viskozne tekućine koja otežava prožimanje vlaknima. Ova sposobnost prožimanja je iznimno važna za efikasno prenošenje tereta s matrice na vlakna. Nakon što se oblikuju, plastomeri se hlade u amorfni, polukristalni ili kristalni čvrsti oblik. Plastomeri obuhvaćaju materijale poput poliestera, polieterimida, poliamidimida, polifenilensulfida, proletera eter ketona (PEEK) i tekućih kristalnih polimera. Proces obrade plastomera je reverzibilan, pa se materijal jednostavnim ponovnim zagrijavanjem može preoblikovati. Zbog svoje sposobnosti brzog zagrijavanja i hlađenja, plastomeri će u budućnosti sve više biti zastupljeni kao materijali matrice. Generalno imaju bolja mehanička svojstva u odnosu na duromere, poput bolje čvrstoće na visokim temperaturama i bolje kemijske stabilnosti, uz to otporniji su na pucanje i oštećenja od udaraca. Trenutno se najčešće koriste s diskontinuiranim vlaknima, poput sjeckanog stakla ili ugljika/grafita, ali postoji značajan potencijal za njihovu upotrebu s kontinuiranim vlaknima, što bi moglo naći primjenu u naprednim kompozitnim strukturama, kao što su one u zrakoplovima nove generacije [9].

Elastomeri posjeduju izraženo svojstvo elastičnosti zahvaljujući rahloj umreženosti strukture zbog čega se mogu oblikovati u omekšanom stanju. Iznimno se rijetko primjenjuju kao materijali matrice kompozita [12].

Duromeri su izuzetno zastupljeni u proizvodnji te uključuju mnoge smole kao što su poliesterske, vinilesterske, epoksidne, bismaleimidne i poliamidne. Kao materijal matrice kompozita duromernih polimera najčešće se koriste epoksidne smole. Glavna razlika između duromera i ostalih skupina polimera je da duromeri nakon postignute umreženosti naknadnim

zagrijavanjem ne mekšaju. Prilikom postupka formiranja duromera, zagrijavanjem se postižu trajne kemijske veze između polimernih lanaca koji su međusobno čvrsto povezani, čineći trodimenzionalnu mrežu. Ovaj proces se naziva stvrđnjavanje. Zahvaljujući trodimenzionalnoj umreženoj strukturi, duromeri imaju tendenciju da posjeduju visoku dimenzijsku stabilnost, otpornost na visoke temperature i dobru otpornost na otapala. Kada se ponovno zagriju, oni ne prelaze u tekuće stanje, već zadržavaju svoju čvrstoću sve dok ne dođe do potpune razgradnje pod utjecajem visoke temperature. To ističe jedan od ključnih problema u njihovoj upotrebi, koji postaje sve značajniji. Odnosno, duromeri se ne mogu reciklirati omekšavanjem jer se njihove kemijske veze ne prekidaju lako pod utjecajem topline. Stoga, način recikliranja duromera je mehaničko usitnjavanje drobljenjem ili mljevenjem materijala na fine granule. Proces usitnjavanja je često prvi korak u reciklaži duromera, iako se time ne mijenja kemijska struktura materijala. Usitnjene granule se mogu koristiti kao punila u proizvodnji novih kompozitnih materijala. Zahvaljujući relativno niskoj cijeni i efikasnog povezivanja s vlaknima, duromeri su preferirani polimeri u proizvodnji kompozita [9], [12].

2.3.3.1 Epoksidna smola

Epoksidne smole, pripadaju skupini duromernih polimera te se vrlo često koriste kao materijal matrice zahvaljujući izvrsnom adhezivnom ponašanju prema vlaknima te se karakteriziraju povećanom čvrstoćom. Kada se kombiniraju s vlaknima poput staklenih, ugljičnih ili aramidnih, rezultiraju stvaranjem kompozitnih materijala čija su svojstva superiorna u odnosu na većinu drugih polimernih materijala. Tablica 1. prikazuje tablicu mehaničkih svojstva, vlačni modul elastičnosti, vlačna čvrstoća i istežljivost, kompozita s epoksidnom matricom ojačanim sa staklenim, ugljičnim i aramidnim vlaknima. Udio vlakana u sva tri slučaja je isti i možemo zaključiti da epoksidna matrica ojačana ugljičnim vlaknima posjeduje najbolja mehanička svojstva [1].

Tablica 1. Prikaz mehaničkih svojstva epoksidne matrice sa staklenim, ugljičnim i aramidnim vlaknima [1].

Svojstvo	Staklo (E-staklo)	Ugljik (visokočvrsti)	Aramid (Kevlar 49)
Gustoća, kg/m ³	2100	1600	1400
Vlačni modul elastičnosti, kN/mm ²			
Uzdužno	45	145	76
Poprečno	12	10	5,5
Vlačna čvrstoća, N/mm ²			
Uzdužno	1020	1240	1380
Poprečno	40	41	30
Istezljivost (prekidno istezanje), (%)			
Uzdužno	2,3	0,9	1,8
Poprečno	0,4	0,4	0,5

Epoksidne smole se prvi put pojavljuju 1891. godine, a komercijalno dostupne postaju tek 50 godina nakon prvog pojavljivanja. Pierre Castan iz Švicarske i Sylvan Greenlee iz SAD-a, neovisno su razvili prve komercijalne epoksidne smole. Castan je radio na materijalima za popravak zuba i otkrio je reakciju koja stvara epoksidnu smolu, dok je Greenlee radio na premazima i otkrio drugu vrstu epoksidne smole [13].

Epoksidne smole tipično su dvokomponentni sustavi, kojima se tijekom proizvodnje dodaje otvrdnjivač koji postaje dio strukturne matrice. Otvrdnivači omogućuju otvrdnjavanje epoksidnih smola. Miješanjem epoksidne smole, najčešće diglicidil eter bisfenol-A (DGEBA), i otvrdnjivača, pod utjecajem topline dolazi do procesa stvrdnjavanja koji traje nekoliko sati. Proces stvrdnjavanja naziva se polimerizacija, koja može biti potaknut toplinom ili UV svjetlošću, ovisno o vrsti otvrdnjivača. Tijekom ovog procesa, epoksidne grupe reagiraju s otvrdnjivačem stvarajući trodimenzionalnu umreženu strukturu. Polimerizacijom epoksidnih smola, odvijaju se egzotermne kemijske reakcije. Ukoliko se koriste prevelike količine otvrdnjivača ili previsoke temperature tijekom polimerizacije, može doći do termičke degradacije materijala matrice, što može utjecati i na kvalitetu samog kompozita. Stoga, ključno je detaljno obratiti pozornost na proces izrade kalupa, posebno kod izrade većih ili debljih proizvoda, kako bi se zajamčila pravilna polimerizacija i održala visoka razina kvalitete finalnog proizvoda. Nakon stvrdnjavanja, epoksidna smola se može procesima poput toplinske obrade, mehaničke obrade ili dorade površine dodatno obraditi kako bi se postigla specifična

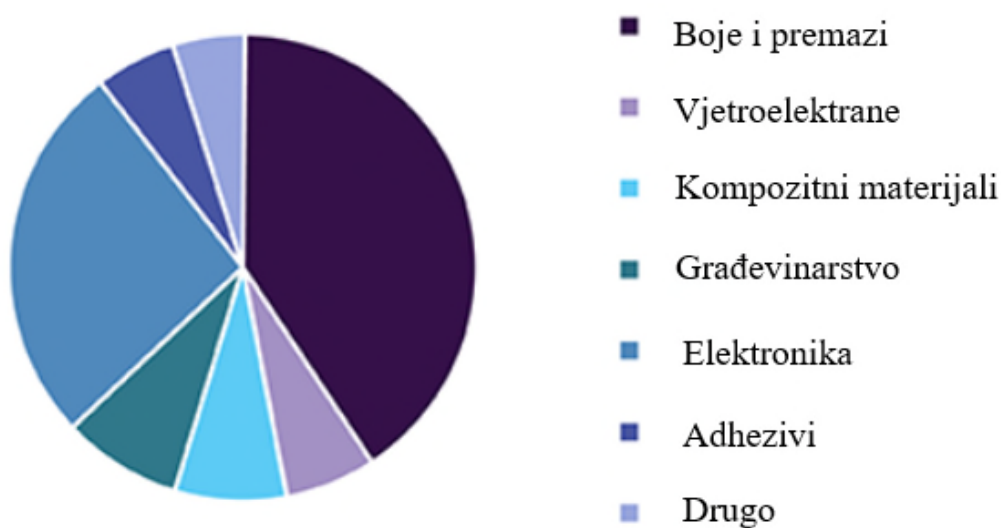
svojstva ili oblici. Završna struktura epoksidne matrice je prilično krhka, što povećava osjetljivost na nastanak pukotina. Kako bi se poboljšale te karakteristike, kao i povećala otpornost na vlagu i termička stabilnost, u epoksidne smole se danas često dodaju drugi polimeri poput elastomera [12].

Prilikom proizvodnje kompozitnih materijala, postoje dvije primarne metode korištenja epoksidne smole, koje se klasificiraju kao mokra i suha metoda. Mokra metoda uključuje aplikaciju epoksidne smole tijekom ili nakon što se ojačala postave koristeći različite tehnike proizvodnje kompozitnih materijala. Ova metoda omogućuje temeljito prožimanje ojačala smolom, što je ključno za postizanje željene čvrstoće. S druge strane, suha metoda uključuje dodavanje smole na ojačalo koje ne započinje s procesom umrežavanja sve dok nije izloženo određenim uvjetima, poput povišenog tlaka ili temperature. Za postizanje željene kvalitete i sjajne površine kompozitnih materijala, proizvodnja se obično odvija pod tlakom ili u vakuumu. Takvi uvjeti pomažu u uklanjanju plinskih molekula iz smole, čime se eliminiraju potencijalni nedostaci u gotovom proizvodu [14].

Karakteristike epoksidnih smola variraju obzirom na izbor komponenata ojačala, njihovih omjera, načina obrade i uvjeta u kojima se konačni proizvod koristi. Dodavanjem različitih tvari moguće je prilagoditi njihova mehanička svojstva, kao što su smanjenje viskoznosti, povećanje lomnog produljenja, smanjenje modula elastičnosti te poboljšanje otpornosti na širenje pukotina. Epoksidne smole i otvrdnjivači, tvore sustave s niskom viskoznošću koji su prilagodljivi. Njihovo stvrdnjavanje može se odvijati na temperaturama od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, ovisno o tipu otvrdnjivača koji se koristi, a poliamini i poliamidi najčešći su otvrdnjivači. Tijekom procesa stvrdnjavanja, epoksidne smole pokazuju minimalno skupljanje i ne ispuštaju hlapljive tvari. U odnosu na druge vrste duromera, epoksidne smole se odlikuju odličnim adhezijskim svojstvima, što znači da izvrsno prijanjaju na ojačalo. Otpornost na vlagu, kemijska postojanost na agresivne kemikalije i vanjske utjecaje te napredna mehanička svojstva ističu epoksidne smole kao superiornije u odnosu na druge duromerne polimere. Također, prednost ovih duromera očituje se i u prilagodljivošću u pogledu žilavosti, dimenzijskom i toplinskom stabilnošću te su jednostavne za proizvodnju. Cijena proizvodnje epoksidnih smola veća je u odnosu na druge duromere te je to jedan od glavnih nedostataka. Također uz cijenu, glavni nedostatak je relativno niska najviša temperatura primjene ovih polimera [12], [13].

Epoksidne smole se koriste u širokom rasponu primjena, zahvaljujući svojim izvanrednim mehaničkim svojstvima i kemijskoj otpornosti. Epoksidne smole mogu se koristiti kao premazi,

kao materijal izolacije u elektrotehnici i elektronici, kao ljepila, za izradu matrice kompozitnih materijala te u graditeljstvu. Slika 10. prikazuje zastupljenost korištenja epoksidnih smola za različite primjene. Budući da imaju široki raspon primjene, koriste se u različitim industrijama. Epoksidne smole ojačane staklenim vlaknima čine temeljne komponente u proizvodnji brodova, automobila, zrakoplova, medicinskih proteza i sportske opreme. U automobilskoj industriji, epoksidne smole služe kao zaštitni premazi i ljepila. U zrakoplovnoj industriji epoksidne smole u kombinaciji s staklenim vlaknima služe za izradu dijelova zrakoplova i lopatica za vjetroagregate. U svemirskim istraživanjima, epoksidni kompoziti se primjenjuju kao ljepila i kao materijali za električnu izolaciju. Zahvaljujući otpornosti na vlagu i izvrsnim adhezijskim svojstva često se koriste u brodogradnji kao zaštita trupa brodova. Koriste za izradu lijevaka i kao adhezivi u medicinskom i stomatološkom sektoru. U izradi sportske opreme, epoksidni kompoziti ojačani vlaknima imaju značajan utjecaj, osobito u sportovima kao što su tenis, golf i biciklizam, gdje su doprinijeli poboljšanju opreme kroz svoja mehanička svojstva i otpornost na različite uvjete korištenja [15-[17].



Slika 10. Globalno područje primjene epoksidnih smola iz 2017. godine [18]

3. NANOČESTICE

Nanočestice se definiraju kao sitni materijali čija je barem jedna dimenzija u rasponu od 1 nm 100 nm te predstavljaju ključnu komponentu u razvoju nanotehnologije. U posljednjih nekoliko desetljeća iznimno je porastao interes za nanotehnologijom i nanočesticama, a sve je počelo s nobelovcem Richardom P. Feynmanom, koji je 1959. godine predstavio koncept nanotehnologije u svom predavanju "*Ima mnogo prostora na dnu*" (eng. "*There's Plenty of Room at the Bottom*") [19].

Nanočestice imaju široku primjenu u raznim industrijskim granama, a u današnje vrijeme često se koriste kao punila pri izradi kompozitnih materijal. Zahvaljujući iznimno malim dimenzijama, postižu jedinstvena svojstva koja se razlikuju od konvencionalnih materijala s većim dimenzijama [19].

Također, zahvaljujući malim dimenzijama, imaju veliku specifičnu površinu u odnosu na svoj volumen. Što bi značilo da za isti volumen, nanočestice posjeduju mnogo više površine nego veće čestice istog materijala. Ovo omogućava nanočesticama da budu mnogo reaktivnije nego veće čestice jer imaju više atoma na površini koji su dostupni za reakciju. Uz veću reaktivnost, zbog velike specifične površine i povećanog broja atoma na površini, nanočestice se mogu taliti na nižim temperaturama, odnosno imaju nižu temperaturu tališta od većih čestica istog materijala. Također, s obzirom da nanočestice posjeduju više atoma na površini u odnosu na materijal s većim česticama, za određenu kemijsku reakciju nanočestice zahtijevaju manju količinu materijala, a reakcija može biti efikasnija [19].

Dva glavna fenomena koja objašnjavaju jedinstvena svojstva nanočestica, u odnosu na materijale većih dimenzija, su kvantni efekti i površinski efekti [19].

Pojava kvantnog efekta može promijeniti električna, magnetska i optička svojstva materijala. Promjenom ovih svojstva kod materijala stvaraju se nove mogućnosti za unapređenje proizvoda i procesa u raznim industrijama te dopuštaju inovativne primjene koje nisu moguće s materijalom većih čestica. Smanjenjem dimenzija materijala, pojačavaju se kvantni efekti, transformirajući nanomaterijale u kvantalne strukture gdje su nositelji naboja ograničeni unutar određenih fizičkih dimenzija. To znači da su elektroni i drugi nositelji naboja u materijalu ograničeni na vrlo male dimenzije, što može promijeniti način na koji se elektroni ponašaju. Ovo kvantno ograničenje može dovesti do značajnih promjena u svojstvima

materijala, kao što su promjene u magnetnim svojstvima ili sposobnosti prihvaćanja ili otpuštanja električnih naboja, što direktno utječe na katalitička svojstva nanomaterijala [19].

Specifičnosti površinskih efekata nanomaterijala proizlaze iz njihove velike specifične površine, povećanog udjela površinskih atoma i manjeg broja izravnih susjeda za te atome, što rezultira promjenama u kemijskim i fizikalnim svojstvima u odnosu na materijale s većim česticama. Nanočestice imaju veći udio atoma na svojim površinama u odnosu na one unutar materijala. Ovi površinski atomi nemaju toliko susjednih atoma kao oni unutar materijala i stoga imaju različite energije veze, što može dovesti do promjena u kemijskim i fizikalnim svojstvima. Smanjenje broja susjednih atoma na površini utječe na smanjenje energije vezanja po atomu, a što dalje utječe na snižavanje točke taljenja. Veća reaktivnost nanomaterijala proizlazi iz većih specifičnih površina i omjera površine i volumena [19].

Svojstva nanočestica koje omogućuju površinski i kvantni efekti otvaraju nove mogućnosti za primjenu nanočestica. Na primjer, mogu se stvarati materijali s boljom električnom vodljivošću te poboljšanim optičkim i magnetskim svojstvima. Zbog ovih svojstava, nanočestice se često koriste u razvoju novih tehnologija i materijala koji nude poboljšane ili potpuno nove karakteristike koje nisu dostupne s konvencionalnim materijalima većih dimenzija [19], [20].

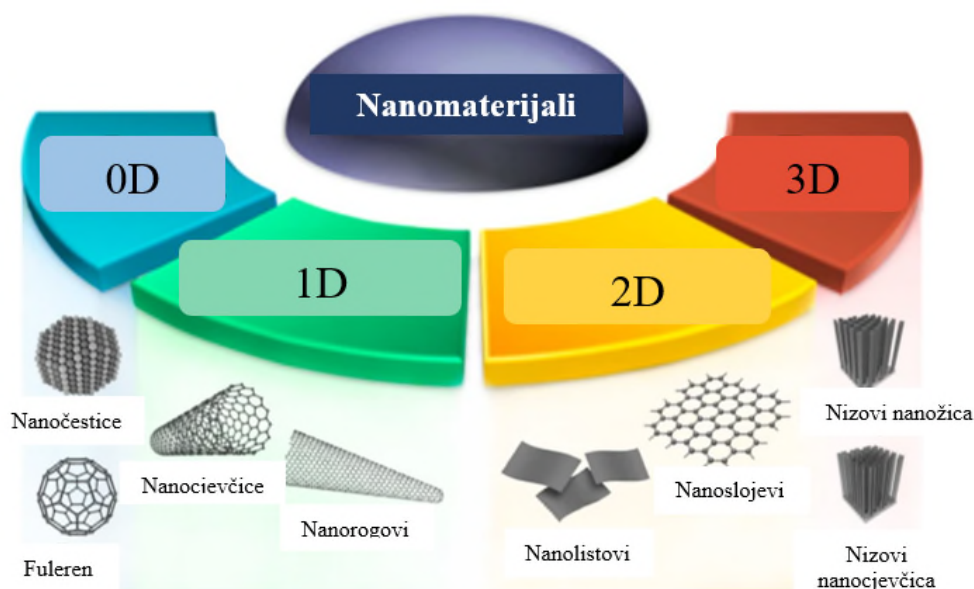
3.1 Klasifikacija nanomaterijala

S obzirom na dimenzionalnost nanomaterijali mogu se kategorizirati u četiri različite skupine. Slika 11. prikazuje shematski prikaz raspodjele.

Klasifikacija s obzirom na dimenzionalnost [19]:

- nanomaterijali nulte dimenzionalnosti (0D) - u ovoj skupini sve tri dimenzije nanomaterijala su u rasponu nanoskale te ovoj skupini pripadaju nanočestice, kvantne točke i fullerene.
- nanomaterijali jednodimenzionalni (1D) - nanomaterijali u ovoj skupini imaju jednu dimenziju izvan nanoskale. Primjeri su nanocijevi, nanovlakna, nanoprutići, nanovodiči i nanorogovi.
- nanomaterijali dvodimenzionalni (2D) - nanomaterijali ove skupine imaju dvije dimenzije izvan nanoskale. Primjeri uključuju nanolistove, nanofilmove i nanoslojeve.

- nanomaterijali trodimenzionalni (3D) ili masivni nanomaterijali - nanomaterijali ove skupine nisu ograničeni na nanoskalu u bilo kojoj dimenziji. Ova klasa sadrži masivne prahove, disperzije nanočestica, nizove nanovodiča i nanocijevi.



Slika 11. Klasifikacija nanomaterijala s obzirom na različitu dimenzionalnost [19]

3.2 Podjela nanočestica

Nanočestice se sastoje se od tri sloja [19]:

- površinskog sloja – uglavnom se sastoji od malih molekula, metalnih iona ili polimera,
- sloja ljuske - kemijski se razlikuje od jezgre,
- jezgre - predstavlja osnovni dio nanočestice i obično se odnosi na samu nanočesticu.

Nanočestice se općenito mogu klasificirati u različite skupine temeljem njihove morfologije, veličine i kemijskih svojstava. Na temelju sastava, nanočestice se općenito svrstavaju u tri različite skupine: organske, na bazi ugljika i neorganske nanočestice [19], [21].

Organske nanočestice izrađene su od proteina, ugljikohidrata, lipida, polimera ili bilo kojih drugih organskih spojeva. Najistaknutiji primjeri ove klase su dendrimeri, liposomi, miceli i proteinski kompleksi poput feritina. Te nanočestice su obično netoksične, biorazgradive su i u nekim slučajevima, na primjer kod liposoma, mogu imati šuplju jezgru. Negativna strana

organskih nanočestica je osjetljivost na termalno i elektromagnetsko zračenje poput topline i svjetlosti. Organske se nanočestice najčešće koriste u biomedicinskom području [19], [21].

Nanočestice na bazi ugljika, predstavljaju nanočestice koje su isključivo sastavljene od atoma ugljika. Poznati primjeri ove skupine su fulereni, nanočestice crnog ugljika i kvantne točke od ugljika. Zahvaljujući visokoj električnoj vodljivosti, visokoj čvrstoći te optičkim i toplinskim svojstvima, nanočestice na bazi ugljika koriste se u širokom rasponu primjena [19], [21].

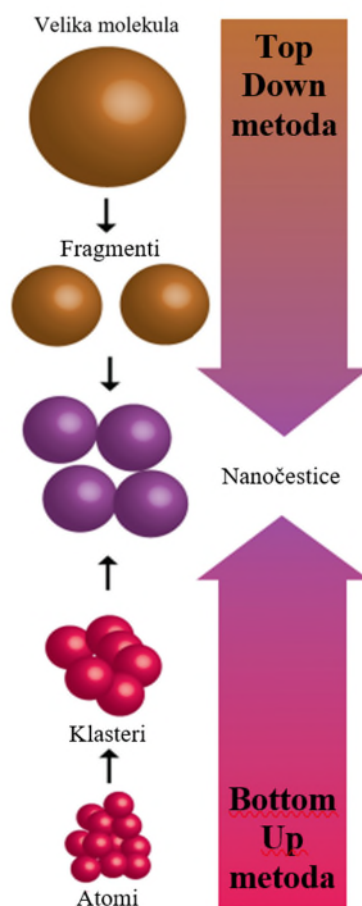
Skupini neorganskih nanočestica pripadaju nanočestice metala, keramike i poluvodiča. Metalne nanočestice posjeduju jedinstvena optička i električna svojstva. Također, većina metalnih nanočestica posjeduje jedinstvena toplinska, magnetska i biološka svojstva. Najčešće se koriste za izradu kompozitni materijala s polimernom matricom. Nanočestice koje se najčešće upotrebljavaju u izradi kompozitnih materijala su metalni oksidi poput TiO_2 , SiO_2 i Al_2O_3 . S druge strane, poluvodičke nanočestice su izgrađene od poluvodičkih materijala koji posjeduju svojstva između metala i nemetala. Ove nanočestice su važni materijali u fotokatalizi, optici i elektroničkim uređajima. Keramičke nanočestice su anorganski čvrsti materijali od karbonata, karbida, fosfata i oksida metala i metaloida, kao što su titan i kalcij. Obično se sintetiziraju putem zagrijavanja i naknadnog hlađenja te mogu biti u amorfnom, polikristalnom, gustom, poroznom ili šupljem obliku. Primarno se koriste u biomedicinskim primjenama zbog svoje visoke stabilnosti i velikog kapaciteta opterećenja [19], [21].

3.3 Postupak dobivanja nanočestica

Postupak proizvodnje nanočestica je složen i razlikuju se dvije metode njihovog dobivanja, a to su: top-down i bottom-up metoda. Slika 12. prikazuje shematski postupak dobivanja nanočestica koristeći navedene metode [20].

U top-down metodi koristi se destruktivni pristup. Počinje se od veće molekule koja se razlaže na manje jedinice, koje se zatim pretvaraju u odgovarajuće nanočestice. Veći se materijali mehanički, fizički ili kemijski smanjuju na nano veličinu. Primjeri top-down metode uključuju mehaničko mljevenje, gdje se kugličnim mlinovima materijal smanjuje na nano razinu, nakon kojeg slijedi kemijsko jetkanje (nagrizanje), raspršivanje ili elektro-eksplozija. Ove metode omogućuju proizvodnju nanostrukturiranih materijala iz masivnih blokova materijala [20].

Bottom-up metoda koristi potpuno drugačiji pristup od prve navedene top-down metode. Koristeći bottom-up metodu, nanočestice se stvaraju iz relativno jednostavnijih tvari, zbog čega se ovaj pristup naziva i pristup "izgradnje". Uključuju izgradnju nanočestica atom po atom ili molekula po molekula, što omogućuje veću kontrolu nad veličinom i oblikom nanočestica. Primjeri za to su tehnike sedimentacije i redukcije. Uključuje sol-gel, zelenu sintezu, vrtnju i biokemijsku sintezu. Ove metode često koriste kemijske reakcije u otopinama gdje se preciznim kontroliranjem uvjeta sinteze mogu formirati nanočestice željenih svojstava. Bottom-up pristupi omogućuju stvaranje homogenijih nanočestica, što je često poželjno za specifične inženjerske primjene [20].



Slika 12. Prikaz dva različita načina dobivanja nanočestica [20]

3.4 Primjena nanočestica

Interes za nanočestice porastao je i zbog njihovih jedinstvenih te unaprijeđenih svojstava u odnosu na obične, veće materijale. Zahvaljujući izvanrednim svojstvima nanočestice omogućuju inovativnu primjenu u različitim industrijskim granama, poput medicine, farmacije, elektronike, poljoprivrede te u kemijskoj i prehrambenoj industriji. Koriste se također i za detekciju te dekontaminaciju onečišćenja, uklanjanje teških metala iz vode, u katalizatorima za pročišćavanje zraka i vode, kao i za hvatanje ugljikovog dioksida (CO₂). Nanočestice se koriste u solarnim panelima za poboljšanje efikasnosti pretvaranja solarne energije u električnu, kao i u gorivnim ćelijama i baterijama za povećanje kapaciteta i efikasnosti. Imaju čestu primjenu u izradi kompozitnih materijala posebice onih čija je matrica izrađena od polimernog materijala [21], [22].

4. MATERIJALI BALISTIČKIH PLOČA

4.1 Balistika

Balistika je znanstvena disciplina, odnosno grana fizike koja proučava kretanje i dinamiku projektila te njihove interakcije s okolinom, fokusirajući se na analizu i razumijevanje različitih fizikalnih sila koje utječu na tijela u letu. Može se podijeliti na više područja, uključujući unutarnju balistiku, koja se odnosi na procese unutar oružja prije ispaljivanja projektila, vanjsku balistiku, koja se fokusira na putanju projektila kroz zrak i terminalnu balistiku, koja istražuje interakciju projektila s metom [23].









Antibalistička zaštita usmjerena je na primjenu tehnologija i materijala u svrhu obrane od kinetičkih penetratora, kao što su metci. Razvoj antibalističke zaštite evoluirao je tijekom vremena od jednostavnih metalnih oklopa do naprednih kompozitnih materijala koji kombiniraju različite slojeve i materijale s ciljem postizanja boljih mehaničkih svojstva kako bi se spriječilo prodiranje kinetičkih penetratora. U suvremenoj antibalističkoj zaštiti, naglasak je na razvoju tehnologije materijala koja omogućuje stvaranje lakših, fleksibilnijih i učinkovitijih zaštitnih rješenja [23].

4.2 Antibalističke ploče

Antibalističke ploče jedan su od ključnih elementa antibalističke zaštite. One se izrađuju od različitih naprednih materijala, uključujući keramiku, kompozitne materijale, polimere, drvo i metale, te su dizajnirane da apsorbiraju kinetičku energiju kinetičkih penetratora, sprječavajući njihov proboj. Napredak u nanotehnologiji, i inženjerstvu materijala omogućio je razvoj novih materijala s poboljšanim svojstvima zaštite, poput nanostrukturnih kompozita i polimernih materijala koji posjeduju izvrsna mehanička svojstva. Ovi materijali nude poboljšanu čvrstoću i otpornost na prodor, dok istovremeno smanjuju težinu zaštitne opreme.

Kako bi antibalističke ploče sprječavale prodiranje kinetičkih penetratora potrebo je da posjeduju izvrsna mehanička svojstva poput visoke čvrstoće na udar, otpornosti na penetraciju, sposobnosti apsorpcije energije udara, kao i efikasno raspoređivanje energije udara kroz svoju strukturu, čime se smanjuje mogućnost da kinetički penetrator prođe kroz ploču. Također, bitno je da su ploče otporne na vlagu kao i da ne apsorbiraju vodu te da budu otporne na izlaganje UV zrakama. Ova svojstva osiguravaju da ploče mogu učinkovito zaustaviti ili usporiti prodiranje kinetičkih penetratora [24], [25].

Razina zaštite koju pružaju balističke ploče određuje se prema njihovoj sposobnosti da izdrže udarce različitih vrsta oružja i kalibra metaka. Da bi se osigurala standardizacija i usporedivost, razvijeni su međunarodni balistički standardi koji kategoriziraju ploče prema razini zaštite koju pružaju. Slika 13. prikazuje popis kategorija balističkih ploča prema razini zaštite u različitim zemljama s obzirom na vrstu oružja i municije [24].

ORUŽJE I MUNICIJA		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 13. Tablica prikaza internacionalnih balističkih standarda [24]

4.2.1 Drvene antibalističke ploče

Drvo se najčešće koristi u građevinskoj industriji te se nije tradicionalno smatralo materijalom za izradu zaštitnih struktura zbog svoje relativno niske čvrstoće. Istraživanja su pokazala da dubina prodiranja projektila u drvu ovisi o njegovim fizičkim svojstvima. Nepravilnosti i čvorovi, odnosno nehomogena struktura drveta mogu značajno utjecati na njegovu čvrstoću i otpornost na metke. Ponašanje metka u drvetu također je nepredvidivo, zbog mnogih nevidljivih čvorova koji smanjuju čvrstoću i izdržljivost drva. Inovacije u obradi drva, poput križno – lameliranog drva (CLT) čiji su predstavnici Douglasova jela, europski bor i europski hrast, pružaju nove mogućnosti za njegovu upotrebu u zaštitnim strukturama. Kombiniranjem CLT-a s drugim materijalima poput čelika i polimera nastoji se povećati balistička otpornost. U budućnosti, kombiniranje drva s naprednijim materijalima moglo bi

stvoriti učinkovitije antibalističke zaštitne ploče. Također, znanstvenim istraživanjima moguće je jednostavnim i jeftinim postupcima pretvoriti bilo koju vrstu drva u materijal jači od čelika i nekih visokotehnoških titanijevih legura. Postupkom koji uključuje tretman drva s natrijevim hidroksidom i sulfatom te naknadnim vrućim prešanjem, kojim se drvo dodatno učvršćuje, dolazi do formiranja novih kemijskih veza unutar njegove strukture, čime se znatno povećava njegova otpornost i čvrstoća. Budući da je samo drvo lako dostupno i relativno jeftino, ovakav postupak ojačavanja drva nudi jednostavna rješenja u postizanju visoke čvrstoće. Ovakve antibalističke ploče, iako ekonomične i lake, trenutno nude ograničenu razinu zaštite. Daljnja istraživanja su ključna za poboljšanje njihove čvrstoće i potencijalnu komercijalnu primjenu u zaštiti od kinetičkih penetratora [26], [27].

4.2.2 Metalne antibalističke ploče

Metalne antibalističke ploče imaju najduži vijek upotrebe u antibalističkoj zaštiti. Najčešće se upotrebljavaju antibalističke ploče izrađene od čelika i aluminijskih legura, koje im omogućavaju da apsorbiraju i rasprše kinetičku energiju ispaljenih kinetičkih penetratora. Ove ploče su posebno dizajnirane da izdrže ekstremne uvjete, uključujući visoke brzine i nagle temperaturne promjene koje nastaju pri udaru. Posebno su zastupljene antibalističke ploče od popuštenog čelika, čija tvrdoća iznosi i do 500 HB (Brinellova tvrdoća). Iako ovaj postupak toplinske obrade čelika osigurava povećanje njegove tvrdoće, smanjuje se sposobnost prodiranja odnosno penetracije metaka kroz čeličnu ploču. Zahvaljujući poboljšanim mehaničkim svojstvima moguće smanjiti samu masu antibalističkih ploča koje su tanje i lakše, a pritom pružaju visoku razinu zaštite. Međutim, povećana tvrdoća čelika može negativno utjecati na njegovu zavarljivost i mogućnost oblikovanja, što stavlja dodatne zahtjeve na proces proizvodnje. Osim toga, daljnja strojna obrada ovako tvrdog čelika može biti izuzetno zahtjevna i skupa. Važno je naglasiti da, ukoliko se čelične ploče visoke tvrdoće ne podvrgnu naknadnim obradama, poput toplinske obrade, mogu postati krhke i podložne lomu prilikom kontakta s mehaničkim penetratorima. Iako postoje određeni nedostaci, čelične antibalističke ploče ostaju najisplativiji izbor za određene aplikacije zbog svoje efikasnosti u pružanju zaštite i dostupnosti materijala. Održavanje i provjera stanja metalnih antibalističkih ploča ključni su za očuvanje njihove funkcionalnosti i dugovječnosti [26].

4.2.3 Kompozitne antibalističke ploče

Kompozitne antibalističke ploče izrađene su od kombinacije dva ili više različita materijala, a najčešće se proizvode ploče čija je matrica od polimernog materijala u kombinaciji si različitim vlaknima poput aramidnih, ugljičnih, staklenih ili ultravisokomolekularni polietilen (UHMWPE) [28].

Polietilenska vlakna s ultravisokom molekularnom masom (UHMWPE) posjeduju dugačke lance molekula, što mu daje izvrsna svojstva poput velike čvrstoće i otpornosti na udarce. Ovo vlakno je vrlo lagano, ima nisku gustoću i izrazito je čvrsto, zbog čega je odlično za izradu laganih antibalističkih proizvoda poput osobnih oklopa. Iako je jače od nekih drugih materijala poput aramidnog vlakna, UHMWPE posjeduje negativne karakteristike poput, niske otpornosti na stalno opterećenje, nisku temperaturu taljenja te slabe adhezije vlakna s matricama zbog svoje glatke površine i nedostatka polarnih skupina u svojoj strukturi zbog čega se teško spaja s polimernom matricom. Unatoč tim ograničenjima, provode se dodatna istraživanja kako bi se ovaj materijal koristio u antibalističkoj zaštitnoj opremi [28].

Prednost upotrebe aramidnih vlakna prilikom izrade antibalističkih ploča je visoka otpornost na toplinu, raspadaju se tek na oko 400 °C, visoka specifična čvrstoća i visok modul elastičnosti. Ovakva svojstva se postižu zahvaljujući molekularnoj strukturi koja se sastoji od visoko orijentiranih linearnih lanaca te vodikovih veza u molekularnim strukturama kao i visokoj kristaliničnosti. Međutim, zbog visoke orijentacije molekularnih lanaca, aramidno vlakno ima glatku i kemijski neaktivnu površinu, što rezultira lošim prijanjanjem s polimernim matricama. Kemijskim i fizikalnim postupcima nastoji se poboljšati aktivnost površine i adhezija vlakna/matrice [28].

Ugljična vlakna, koja su čvrsta i lagana, posjeduju izvrsna svojstva poput, visoke čvrstoće i krutost kao i odlične kemijske otpornosti te visoku toplinsku stabilnost. Iako ploče od ugljičnih vlakana same po sebi nisu otporne na penetraciju metaka zbog svoje krhkosti, upotrebom jednog ili više slojeva ugljičnih vlakana u obliku kompozitnog materijala poboljšava se struktura kao i otpornost na penetraciju metaka. Također, lakša su i čvršća od čelika, stoga su odlična za ojačavanje materijala u balističkoj zaštiti [28].

Staklena vlakna poput E i S-staklenih vlakna zahvaljujući visokoj vlačnoj čvrstoći, istežljivosti, toplinskoj i kemijskoj stabilnosti te izvrsnom apsorpcijom energije i niskoj cijeni najčešće se primjenjuju u balistici. Međutim, postoje i njihova ograničenja uključujući nizak Young-ov modul, lošu otpornost na umor i nisku kompatibilnost s polimernim matricama [28].

4.3.4. Keramičke antibalističke ploče

Keramički materijali i kompoziti na bazi keramike, koji se široko koriste za balističku zaštitu, uključuju oksidnu keramiku i neoksidnu keramiku na bazi karbida, nitrída, borida i nekih drugih. Posjeduju visoku tvrdoću, veću nego kod metala, i sposobnosti apsorpiranja kinetičke energije metaka te zahvaljujući ovim svojstvima često se upotrebljavaju za izradu antibalističkih ploča. Često se kombiniraju s drugim materijalima, kao što su kompozitni materijali ili aramidna vlakna, kako bi se poboljšala njihova ukupna efikasnost. Općenito, što je keramička ploča tanja, potreban je veći broj slojeva aramidne tkanine ili drugih materijala za podupiranje. Međutim, unatoč svojim prednostima, keramičke ploče su skuplje od onih od čelika i imaju ograničenu otpornost na višestruke udarce što uzrokuje ranije pokazivanje znakova loma [29].

5. MEHANIČKA SVOJSTVA

Eksploatacijske karakteristike proizvoda, koje uključuju cijenu proizvodnje i njegovu trajnost, ključni su faktori koji određuju pozicioniranje proizvoda na tržištu. Među osnovnim skupinama svojstava koja formiraju eksploatacijske karakteristike proizvoda ističu se mehanička svojstva. Mehanička svojstva materijala imaju važnu ulogu među ostalim fizikalnim i kemijskim svojstvima jer se na temelju njih određuju dimenzije dijelova strojeva i uređaja.

Mehanička svojstva materijala određuju kako se materijal ponaša kada je izložen mehaničkim opterećenjima. Ona su zapravo posljedica strukturnog stanja materijala koja se postižu obradom materijala određenog sastava i korištenjem specifičnog postupka. Zato se može reći da su mehanička svojstva isključivo posljedica strukture materijala. Razumijevanje mehaničkih svojstava omogućava inženjerima da predvide kako će se materijal ponašati u radnim uvjetima, što je ključno za optimizaciju performansi i dugotrajnost proizvoda. Ispitivanja mehaničkih svojstava mogu se primijeniti na širok spektar materijala, uključujući metale, polimere, keramike i kompozitne materijale. Mehanička se svojstva određuju isključivo eksperimentalnim putem na način da se ispitivanje odvija u opremljenom laboratoriju pod imitiranim uvjetima opterećenja na posebno pripremljenim uzorcima, epruvetama. Mehanička svojstva mogu se podijeliti prema načinu i trajanju djelovanja opterećenja, a Tablica 2. prikazuje njihovu podjelu [30].

Tablica 2. Podjela različitih vrsta mehaničkog ispitivanja s obzirom na način i trajanje djelovanja opterećenja [30].

Način djelovanja opterećenja	Trajanje djelovanja opterećenja	
	KRATKOTRAJNO	DUGOTRAJNO
STATIČKI	Vlačno ispitivanje Tlačno ispitivanje Savojno ispitivanje Uvojno ispitivanje Smično ispitivanje	Ispitivanje puzanjem
DINAMIČKI	Ispitivanje udarnog rada loma	Ispitivanje umaranjem

Svako od ovih ispitivanja pruža uvid u različita ponašanja materijala pod opterećenjem, što inženjerima omogućava da precizno odrede koja će svojstva biti ključna za specifične primjene i kako odabrati odgovarajući materijal za buduću upotrebu. Mehanička ispitivanja koja će se nadalje detaljnije opisati su statički – vlačni pokus, savojno ispitivanje te ispitivanje udarnog rada loma [30].

5.1 Statički – vlačni pokus

Statički – vlačni pokus pripada skupini mehaničkih ispitivanja pod djelovanjem kratkotrajnih statičkih opterećenja. To je osnovni eksperimentalni postupak u mehanici materijala koji služi za određivanje mehaničkih karakteristika materijala pri statičkom opterećenju. Kroz ovaj pokus moguće je dobiti važne parametre kao što su R_e – granica razvlačenja, R_m – vlačna ili rastezna čvrstoća, E – Young-ov modul elastičnosti, R_k – konačno naprezanje, ϵ_u – ukupno istezanje epruvete kao i A – istezljivost. Ovi parametri su neophodni za projektiranje struktura i strojarških komponenti koje će biti podvrgnute različitim vrstama opterećenja tijekom svoje uporabe [30].

U procesu statičkog – vlačnog pokusa ispitivanje se provodi na ispitnom uzorku materijala koji se naziva epruveta. Uzorak za ispitivanje mora biti određenih dimenzija i u standardiziranom geometrijskom obliku, a dimenzije i oblik propisani su normama. Epruvete s obzirom na poprečni presjek mogu biti okruglog ili četvrtastog poprečnog presjeka, a Slika 14. prikazuje primjer oba presjeka. Epruvete s okruglim ili četvrtastim poprečnim presjekom dodatno se mogu podijeliti na kratke i duge epruvete. Ukoliko se radi o epruvetama s okruglim poprečnim presjekom početna duljina epruvete, L_0 , računa se na način [30]:

- kratka epruveta: $L_0 = 10 \cdot d_0$
- duga epruveta: $L_0 = 5 \cdot d_0$,

gdje je:

d_0 – početni promjer okruglog ispitnog uzorka, mm.

Kod epruvete četvrtastog poprečnog presjeka početna duljina epruvete, L_0 , računa se na način [30]:

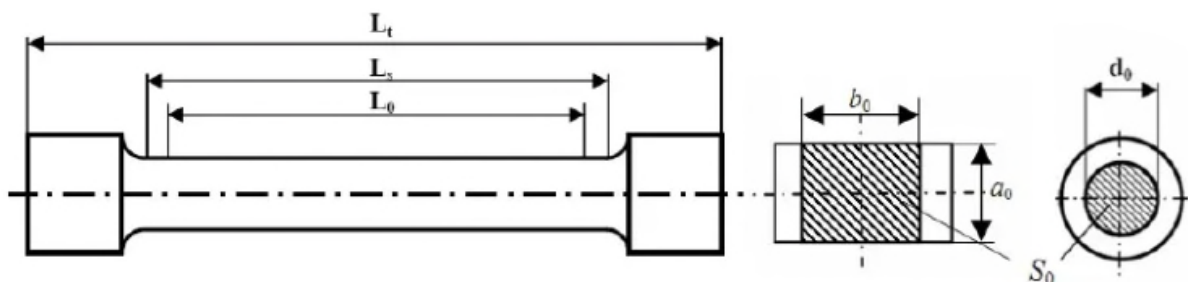
- kratka epruveta: $L_0 = 5,65 \cdot \sqrt{S_0}$, $S_0 = a_0 \cdot b_0$
- duga epruveta: $L_0 = 11,3 \cdot \sqrt{S_0}$

gdje je:

S_0 – površina početnog presjeka ispitnog uzorka, mm^2

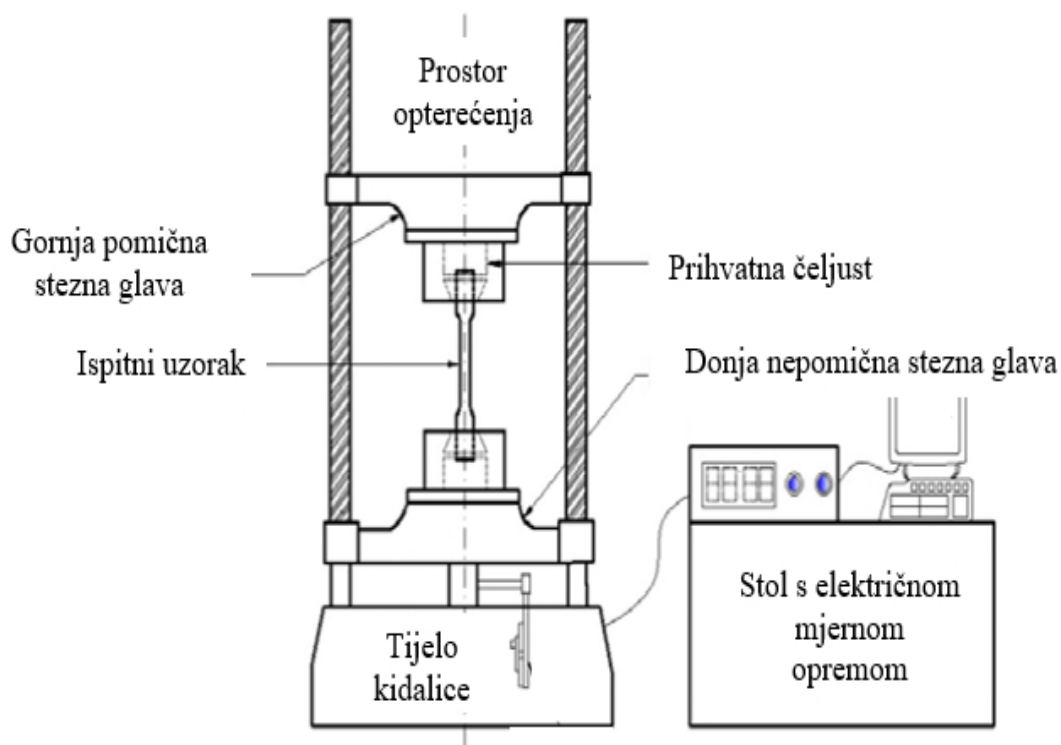
a_0 – debljina četvrtastog ispitnog uzorka, mm

b_0 – širina četvrtastog ispitnog uzorka, mm.



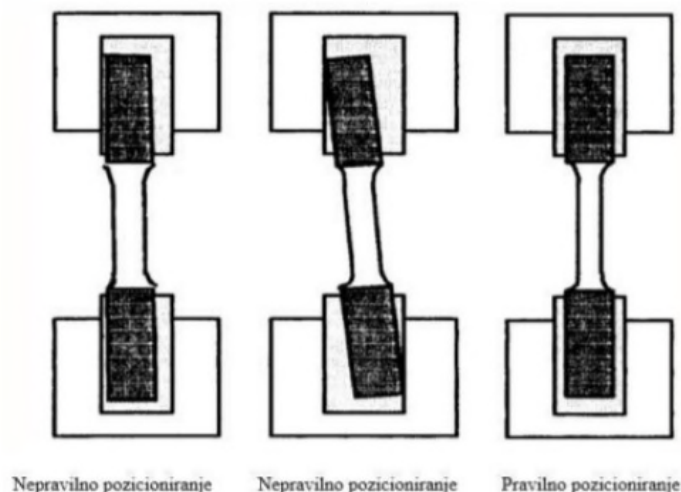
Slika 14. Shematski prikaz epruvete sa četvrtastim (lijevo) i okruglim (desno) poprečnim presjekom [31]

Radni uređaj pomoću kojeg se izvodi ispitivanje naziva se kidalica te razlikujemo hidrauličku i mehaničku kidalicu. Slika 15. prikazuje mehaničku kidalicu kod kojih se sila generira putem ručnog ili motornog pogona. S obzirom na maksimalnu silu opterećenja koje kidalica može postići, mehaničke kidalice su ograničene te se najčešće koriste kada je potrebno primijeniti manju silu za ispitivanje. Hidrauličke kidalice za generiranje sile koriste hidrauličko ulje i cilindre. Na taj način omogućuju primjenu znatno većih sila u usporedbi s mehaničkim kidalicama, što ih čini prikladnijima za ispitivanje epruveta koje zahtijevaju veća opterećenja. Također, imaju i bolju kontrolu nad brzinom kao i stupnjem primjene sile te su u usporedbi s mehaničkim kidalicama preciznije, što je ključno za dobivanje točnih podataka u statički – vlačnim ispitivanjima [31].



Slika 15. Prikaz mehaničke kidalice zajedno s njezinim dijelovima [32]

Čeljusti su sastavni dio kidalice te služe kao prihvat epruvete kao i za držanje te stezanje epruvete. Čeljusti moraju biti dizajnirane na način da mogu izdržati sile koje se primjenjuju tijekom procesa ispitivanja. Prilagođavaju se obliku i dimenzijama uzorka koji se ispituje. Čeljusti kidalice mogu biti izrađene od različitih materijala, kao što je na primjer čelik visoke čvrstoće, kako bi se osigurala njihova izdržljivost i dugovremeni rad pod visokim opterećenjima. Također za pravilno izvođenje pokusa i vjerodostojnost rezultata, epruveta mora biti postavljena na pravilan način u čeljusti kidalice, kako bi se izbjeglo njezino proklizavanje ili nepravilan prihvat epruvete. Slika 16. prikazuje pravilno i nepravilno postavljenje ispitnog uzorka u čeljust kidalice. Uz pravilan prihvat, poželjno je da površina epruvete bude što više prekrivena površinom čeljusti. Budući da je pravilan položaj epruvete u čeljusti bitan, kidalice su često opremljene s uređajima koji omogućavaju samocentriranje uzorka i raspodjelu sile ravnomjerno po cijeloj površini kontakta [33].



Slika 16. Pravilan i nepravilan način postavljanja epruvete u čeljust kidalice [33]

Nakon provedenog statičkog – vlačnog pokusa analiziraju se dobiveni rezultati koji rezultiraju izradom dijagrama napreznja i istežanja, koji služi kao grafički prikaz odnosa između primijenjenog napreznja i inducirane deformacije materijala. Slika 17. prikazuje primjer karakterističnog grafa napreznja – istežanje za različite materijale. Ishodište dijagrama je u nuli iz kojeg proizlazi pravac koji je opisan Hooke-ovim zakonom (1):

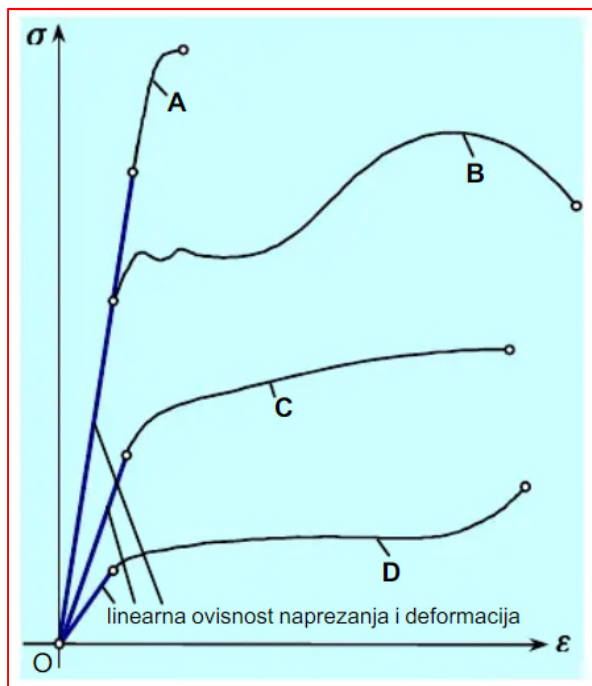
$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \text{ N/mm}^2 \quad [30] \quad (1)$$

gdje je:

E – Young-ov modul elastičnosti, N/mm^2

ε – istežanje, mm/mm .

Hooke-ov zakon vrijedi za elastična istežanja te opisuje da je umnožak Young-ovog modula elastičnosti E i istežljivosti ε jednako napreznju σ . Young-ov modul ili modul elastičnosti predstavlja mjeru krutosti materijala i određuje se kao nagib linearnog Hooke-ovog pravca. Odnosno, Young-ov modul elastičnosti prikazuje koliko se materijal rasteže pod utjecajem određene sile. Visoka vrijednost Young-ovog modula elastičnosti ukazuje na to da je materijal vrlo krut te da se malo deformira kada je podvrgnut napreznju, dok niska vrijednost Young-ovog modula ukazuje na veću deformaciju materijala [30].



Slika 17. Karakteristični graf naprežanje – istežanje tehničkih materijala, A – krhki materijal, B – konstrukcijski čelik, C- duktilni materijal (legura aluminija), D – polimerni materijal [34]

Točka završetka Hooke-ovog pravca označena je granicom razvlačenja R_e . Granica razvlačenja predstavlja prijelaz iz elastičnog u plastično ponašanje te predstavlja maksimalno naprežanje koje materijal može izdržati bez trajnih deformacija. Granica razvlačenja je omjer sile F_e i površine početnog presjeka S_0 . Za izračunavanje koristi se formula (2):

$$R_e = \frac{F_e}{S_0}, \text{ N/mm}^2 \text{ [30].} \quad (2)$$

Vlačna ili rastezna čvrstoća R_m predstavlja naprežanje pri maksimalnoj sili, a određeno je omjerom maksimalne sile F_m i površine početnog presjeka S_0 . Iako je iznos tog naprežanja najveći u grafu naprežanje – istežanje, vlačna čvrstoća ne predstavlja maksimalno naprežanje, jer se za računanje njezine vrijednosti koristi početna površina presjeka ispitnog uzorka, a ne stvarna površina presjeka koja je manja. Za izračunavanje koristi se formula (3):

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}, \text{ N/mm}^2 \text{ [30]}. \quad (3)$$

Konačno naprezanje R_k je naprezanje koje uzrokuje lom, odnosno pucanje epruvete. Omjer je konačne sile koja uzrokuje lom epruvete F_k i površine početnog presjeka S_0 , a formula glasi (4):

$$R_k = \frac{F_k}{S_0}, \text{ N/mm}^2 \text{ [30]}. \quad (4)$$

ϵ_u predstavlja ukupno istežanje epruvete te se izračunava izrazom (5):

$$\epsilon_u = \frac{L_u - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L_u}{L_0}, \text{ mm/mm [30]} \quad (5)$$

gdje je:

L_u – konačna mjerna duljina ispitnog uzorka, mm

L_0 – početna mjerna duljina ispitnog uzorka, mm

ΔL_u – konačno produljene ispitnog uzorka, mm.

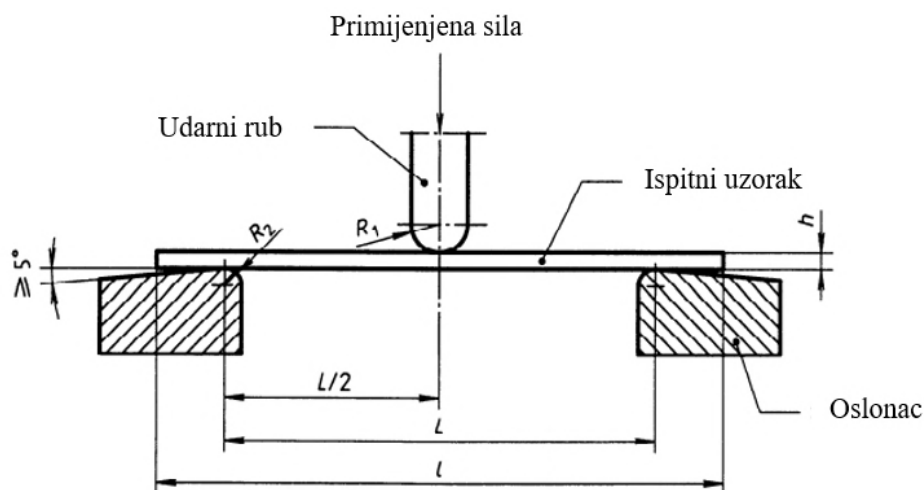
Također, površina ispod krivulje naprezanje-istežanje do točke loma predstavlja ukupnu energiju koju materijal može apsorbirati prije loma, odnosno površina ispod krivulje predstavlja žilavost materijala. Što je veća površina ispod krivulje, materijal je žilaviji [30].

5.2 Savojna čvrstoća

Savojna čvrstoća pripada skupini kratkotrajnih i statičkih mehaničkih ispitivanja te je jedno od ključnih parametara koji opisuje sposobnost materijala da se odupre savijanju pod određenim opterećenjem. Cilj savojnog ispitivanja je utvrditi može li ispitni uzorak izdržati silu savijanja bez pojave loma. Savojna čvrstoća opisuje maksimalno naprezanje unutar materijala nastalo pod djelovanjem vanjske sile koja pokušava uzrokovati njegov lom. Kada se provodi savojno ispitivanje u tri točke, sila se primjenjuje u središnjem dijelu ispitnog uzorka koji se nalazi između dva oslonca, uzrokujući tlačno naprezanje na gornjoj strani uzorka i vlačno naprezanje na donjoj strani. Metoda se koristi kako bi se odredilo savojno ponašanja uzorka

za ispitivanje kao i za određivanje savojne čvrstoće, savojnog modula i drugih aspekata savojnog odnosa naprezanja/deformacije pod definiranim uvjetima [35].

Savojna čvrstoća se obično određuje putem savojnog ispitivanja. Uzorak se postavlja tako da se njegovi rubovi oslanjaju na dva oslonca, dok se u središtu primjenjuje sila savijanja. Slika 18. prikazuje početni položaj ispitnog uzorka prije izvođenja savojnog ispitivanja. Na točki primjene sile, moment savijanja doseže svoju maksimalnu vrijednost. Metoda koja se najčešće primjenjuje je metoda savijanja u tri točke iako postoji još i metoda savijanja u četiri točke. Ispitivanja provedena na ispitnim uzorcima, koji se nazivaju epruvete, razlikuju se po dimenzijama, a dimenzije i oblik uzorak materijala pripisani su normom. Na ishod ispitivanja mogu utjecati i drugi čimbenici poput brzine provedbe ispitivanja i procesa pripreme uzoraka. Brzina ispitivanja odnosi se na to koliko brzo se primjenjuje sila na materijal tijekom metode ispitivanja. Proces pripreme uzoraka odnosi se na pripremu materijala prije ispitivanja, što može uključivati kontrolu temperature, vlažnosti ili drugih uvjeta. Oba ova čimbenika mogu promijeniti rezultate ispitivanja, pa je važno da su pažljivo kontrolirani kako bi se osigurala točnost i pouzdanost rezultata. Savojna svojstva materijala najbolje su primjenjiva isključivo za materijale koji pokazuju linearnu korelaciju između naprezanja i deformacije. Odnosno kada materijal pokazuje predvidljiv, pravolinijski odnos između sile koja se na njega primjenjuje (naprezanja) i promjene oblika koju ta sila izaziva (deformacije). Ako materijal ne pokazuje ovakav linearni odnos, odnosno ako se njegovo ponašanje mijenja na složeniji način kad se na njega primijeni sila, tada se savojna svojstva smatraju samo nominalnim, odnosno pružaju okvirne vrijednosti koje ne prikazuju točno ponašanje materijala pod opterećenjem. Ovako se ispitivanje izvodi na materijalima koji su položni krhkom lomu, budući da su za takve materijale testovi na vlak posebno izazovni [35], [36].



Slika 18. Početni položaj uzorka na gredi prije ispitivanja savojne čvrstoće [35]

Za ispitivanje savojne čvrstoće također se može koristiti mehanička kidalica kao ona za izvođenje statičkog – vlačnog pokusa, ali s drugačijim privatnim glavama. Naime, ispitni se uzorak postavlja se na dva oslonca, a sila se primjenjuje na središte uzorka. To uzrokuje stvaranje savijanja u materijalu, a savojna čvrstoća se izračunava iz maksimalnog momenta savijanja koji materijal može izdržati prije nego što doživi lom. Slika 19. prikazuje karakteristični graf koji se dobiva nakon provedenog savojno ispitivanja. Ukoliko se koristi metoda ispitivanja u tri točke, savojna čvrstoća računa se prema izrazu (6):

$$\sigma = \frac{3 \cdot F_{\max} \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}, \text{ N/mm}^2 \text{ [35]} \quad (6)$$

gdje je:

F_{\max} – maksimalna sila kojom je ispitni uzorak opterećen, N

L – razmak između oslonaca, mm

b – širina ispitnog uzorka, mm

h – debljina ispitnog uzorka, mm.

Savojni modul elastičnosti opisuje otpornost materijala na deformaciju pod savojnim opterećenjem. To je mjera krutosti materijala pri savijanju. Za određivanje modula elastičnosti pri savojnom opterećenju potrebno je izračunati pomake s_1 i s_2 koji odgovaraju danim

vrijednostima istezanja pri savijanju $\varepsilon_{f1} = 0,0005$ i $\varepsilon_{f2} = 0,0025$, a izračunava se prema izrazu (7):

$$s_i = \frac{\varepsilon_{fi} \cdot L^2}{6 \cdot h}, \text{ mm, (i = 1,2) [35]} \quad (7)$$

gdje je:

ε_{fi} – odgovarajuće istezanje pri savijanju, čije su vrijednosti ε_{f1} i ε_{f2} prikazane gore

L – razmak između oslonaca, mm

h – debljina epruvete, mm.

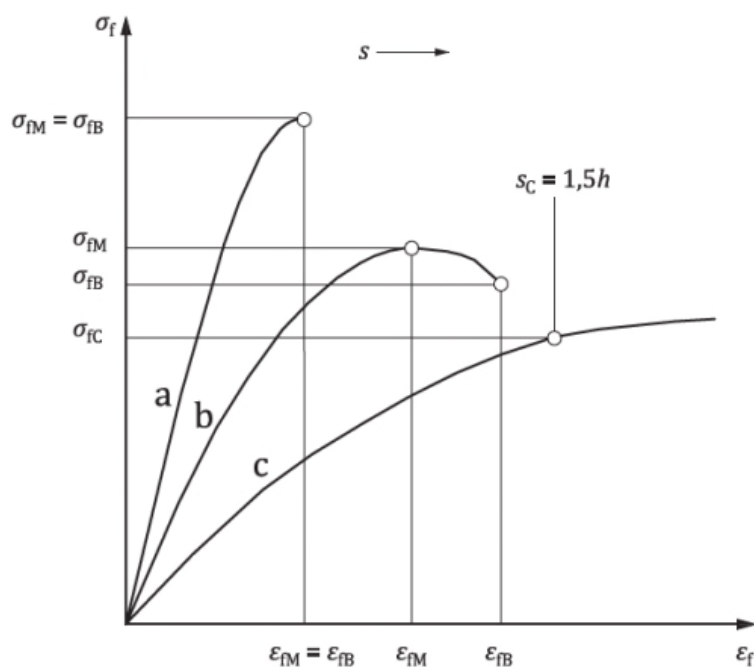
Nakon izračunatog pomaka moguće je izračunati savojni modul elastičnosti prema izrazu (8):

$$E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}}, \text{ MPa [35]} \quad (8)$$

gdje je:

σ_{f2} – naprezanje pri savijanju, izmjereno pri pomaku s_1 , MPa

σ_{f1} – naprezanje pri savijanju, izmjereno pri pomaku s_2 , MPa.



Slika 19. Karakteristične krivulje u grafu savojno naprezanje- savojno istezanje, a – ispitni uzorak koji puca prije tečenja, b – ispitni uzorak koji doseže maksimalnu vrijednost te se zatim lomi prije nego dosegne konvencionalno savijanje, $s_c = 1,5h$, c – ispitni uzorak [35]

Materijali s visokom savojnom čvrstoćom često su poželjni u konstrukcijama koje podnose značajna savojna opterećenja, poput mostova. Savojna čvrstoća nije konstantna za sve materijale, već varira ovisno o vrsti materijala i njegovim unutarnjim strukturama. Na primjer, metali poput čelika obično imaju visoku savojnu čvrstoću, što ih čini idealnima za upotrebu u konstrukcijskim primjenama gdje je savijanje čest način opterećenja. S druge strane, materijali poput stakla ili određenih polimera mogu imati nižu savojnu čvrstoću, što ograničava njihovu primjenu [35], [36].

5.3 Udarni rad loma

Ispitivanje udarnog rada loma također je jedno od ključnih mehaničkih svojstva materijala. S obzirom na način i trajanje djelovanja opterećenja, udarni rad loma pripada skupini dinamičkih i kratkotrajnih opterećenja. Ovakvim ispitivanjem nastoji se utvrditi na koji se način materijal ponaša u uvjetima udarnog opterećenja. Vrijednost udarnog rada loma služi kao pokazatelj da li je materijal uzoraka, kada je izložen udarnom opterećenju, žilav ili krhak.

Žilavost je sposobnost materijala da izdrži udarna opterećenja bez pojave loma. Stoga, što je udarni rad loma veći materijal je žilaviji. Ukoliko pojava loma nastup brzo, kažemo da je materijal krhak [30].

Za ispitivanje udarnog rada loma mogu se koristiti dvije metode; Charpy ili Izod. Iako su obje metode pouzdane, češće se koristi Charpy-jeva metoda za ispitivanje udarnog rada loma. Slika 20. prikazuje Charpy-jev bat na kojemu se provodi ispitivanje udarnog rada loma. Dimenzije kao i oblik ispitnog uzorka, epruvete, propisane su normom. Na središte epruvete urezuje se "U" ili "V" utor kako bi kod žilavijih materijala inicirao lom. Ukoliko se radi o krhkom materijalu nije potrebno raditi takav utor. Ispitivanje se provodi na način da se bat pripadne težine G spušta s početne visine h_1 te se njegova potencijalna energija pretvara u kinetičku energiju. Ukoliko se na osloncu ne nalazi ispitni uzorak bat se "penje" na situ visinu h_1 . Pripremljena se epruveta postavlja na oslonac na Charpy-jevom batu na način da bat dotiče stranu epruvete koja nema "U" ili "V". Nakon puštanja bata s početne visine h_1 uzorak lomi i bat dostiže novi visinu h_2 . Manja razlika u visini znači da je materijal apsorbirao više energije. Na Charpy-jevom batu nalazi se skala te se nakon loma epruvete očita vrijednost utrošene energije, KU ili KV ovisno kakav se utor nalazi na ispitnom uzorku. Utrošena energija predstavlja vrijednost udarnog rada loma te pokazuje količinu energije koju materijal može apsorbirati prije nego što dođe do loma [30]. Određuje se prema izrazu (9):

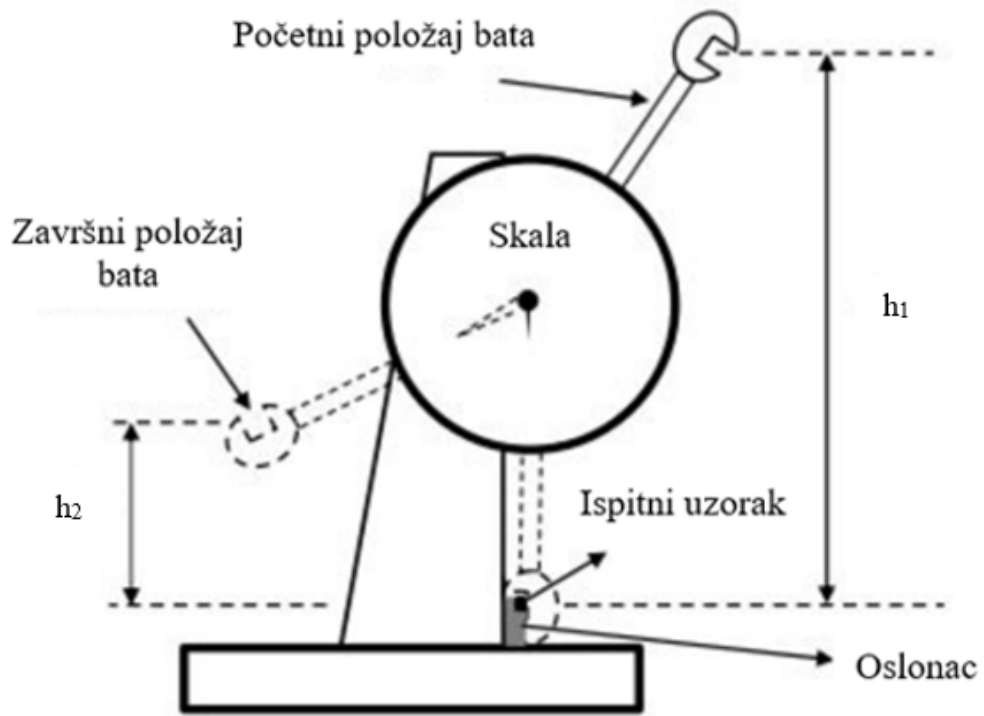
$$KU(V) = G \cdot h_1 - G \cdot h_2, J [30] \quad (9)$$

gdje je:

G – težina bata, N

h_1 – početna visina bata, m

h_2 – konačna visina bata, m.



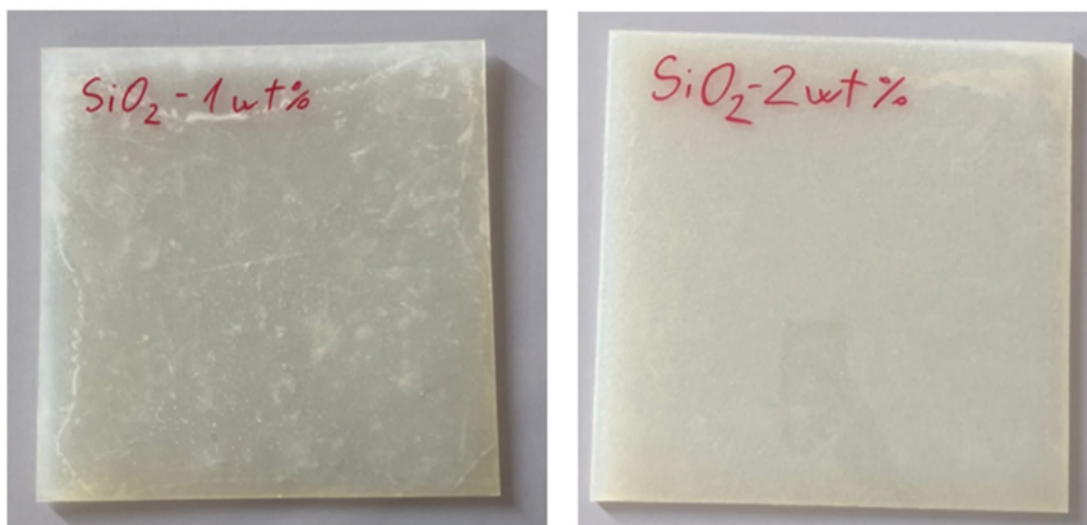
Slika 20. Prikaz Charpy-jevog bata [37]

6. EKSPERIMENTALI DIO

U ovom diplomskom radu će se ispitati utjecaj nanočestica na mehanička svojstva polimera, odnosno kompozitnog materijala čija je matrica izrađena od polimera. U tu svrhu, koristit će se metalne nanočestice, silicijev dioksid (SiO_2) i titanijev dioksid (TiO_2), koje se u različitim volumnim udjelima dodaju u polimernu matricu izrađenu od epoksidne smole kompozitnog materijala. Metalne nanočestice dodaju se u svrhu poboljšanja mehaničkih svojstva epoksidne polimerne matrice.

U eksperimentalnom dijelu rada, na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu izrađene su četiri različite ploče. Ploče su izrađene od epoksidne smole s dodanim metalnim nanočesticama. Bitno je da su nanočestice ravnomjerno raspoređene po volumenu prilikom miješanja s epoksidnom smolom. Budući da su nanočestice sklone aglomeraciji, odnosno nagomilavanju, kako bi se dobila njihova ravnomjerna raspodjela po volumenu korištena je posebna oprema s Fakulteta kemijskog inženjerstva i tehnologije, ultrazvučna miješalica. U dvije epoksidne ploče dodane su metalne nanočestice od silicijeva dioksida (SiO_2) različitog volumnog udjela od 1 % i 2 %, a u druge dvije epoksidne ploče metalne nanočestice titanijeva dioksida (TiO_2) također različitog volumnog udjela od 1 % i 2 %. Slika 21. i Slika 22. prikazuju izrađene ploče.

Također, izrađena je ploča od čiste epoksidne smole koja služi kao referentna ploča. Rezultati ispitivanja referentne ploče, odnosno ploče od čiste epoksidne smole preuzeti su iz prijašnjih ispitivanja. U prijašnjim ispitivanjima uz ispitivana mehanička svojstva ploče od čiste epoksidne, ispitana su i mehanička svojstva ploče ojačane nanočesticama Al_2O_3 volumnog udjela od 0,5 %. Odnosno, također se ispitalo utjecaj nanočestica na poboljšanje mehaničkih svojstva epoksidne smole, koja predstavlja matricu budućeg kompozitnog materijala [38].



Slika 21. Epoksidne ploče s metalnim nanočesticama SiO₂ – 1 wt% (lijevo) i 2 wt% (desno)



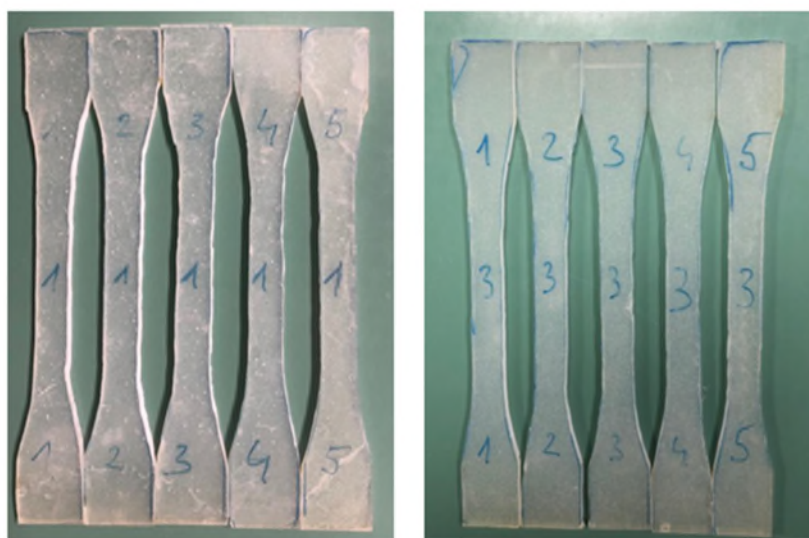
Slika 22. Epoksidne ploče s metalnim nanočesticama TiO₂ – 1 wt% (lijevo) i 2 wt% (desno)

Nakon izrade ojačanih ploča, izrezani su uzorci za ispitivanje, koji su zatim ispitani različitim mehaničkim metodama. Ispitivanja su provedena na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, u Laboratoriju za polimere i kompozite. Planirana su tri različita mehanička ispitivanja: statički – vlačni pokus, savojno ispitivanje te ispitivanje otpornosti udarnog rada loma. Na osnovu dobivenih rezultata, uspoređena su mehanička svojstva referentne ploče od čiste epoksidne

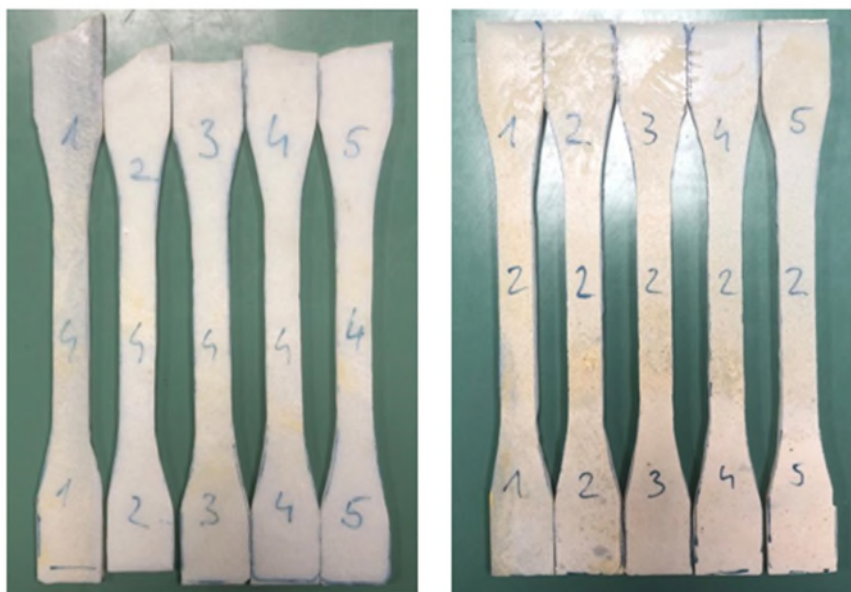
smole, rezultati preuzeti iz prijašnjih ispitivanja [literatura tj. završni rad]. i onih ojačanih metalnim nanočesticama. Na temelju mehaničkih ispitivanja su doneseni zaključci o utjecaju nanočestica na ključna mehanička svojstva polimera i o potencijalnoj primjeni ovakvih materijala u području balistike za izradu antibalističkih ploča.

6.1 Statičko – vlačno ispitivanje s pripremom uzoraka

Statičko – vlačno ispitivanje kao i priprema uzoraka provodi se prema normi HRN EN ISO 527 – 1:2019 [39]. Prije početka samog ispitivanja potrebno je izrezati ispitne uzorke, odnosno epruvete, iz gore prikazanih ploča dimenzija definiranih normom HRN EN ISO 527 – 1:2019. Iz svake ploče izrezano je pet ispitnih uzoraka. Slika 23. i Slika 24. prikazuju pripremljene ispitne uzorke za izvođenje statičkog – vlačnog pokusa.



Slika 23. Izrezani ispitni uzorci s metalnim nanočesticama SiO₂ – 1 wt% (lijevo) i 2 wt% (desno)



Slika 24. Izrezani ispitni uzorci s metalnim nanočesticama TiO_2 – 1 wt% (lijevo) i 2 wt% (desno)

Slika 25. prikazuje mehaničku kidalicu, model Autograph AGS-X 50kN, na kojoj se provodi ispitivanje. Slika 26. prikazuje ispitni uzorak u prihvatnoj glavi čeljusti kidalice. Ispitni se uzorci postupno i kontrolirano podvrgavaju opterećenju. Povećava se sila opterećenja dok materijal ne postigne svoju točku tečenja, nakon čega slijedi daljnje povećanje sile do konačnog loma ispitnog uzorka. Tijekom ispitivanja snimaju se podaci o sili koja se primjenjuje i deformaciji materijala. Ovi podaci se koriste za izračunavanje različitih mehaničkih svojstava materijala, poput vlačne čvrstoće i modula elastičnosti.



Slika 25. Mehanička kidalica za statičko – vlačna ispitivanja



Slika 26. Pravilno postavljen ispitni uzorak u prihvatnoj glavi čeljusti kidalice

Tablica 3. prikazuje rezultate ispitivanja ispitnih uzoraka izrezanih iz ploče ojačane metalnim nanočesticama od silicijeva dioksida (SiO_2) i titanijeva dioksida (TiO_2) s različitim volumnim udjelima, a Tablica 4. prikazuje rezultate ispitivanja referentne ploče. Slika 27. i Slika 28. prikazuju izgled istih ispitnih uzoraka nakon provedenog mehaničkog ispitivanja.

Tablica 3. Rezultati vlačne čvrstoće i modula elastičnosti ploče ojačane SiO_2 i TiO_2 metalnim nanočesticama.

Ispitni uzorak	Vlačna čvrstoća [N/mm^2]	Modul elastičnosti [GPa]
SiO_2 1%_1	59,4	2,779
SiO_2 1%_2	61,9	2,916
SiO_2 1%_3	55,1	2,970
SiO_2 1%_4	60,2	3,003
SiO_2 1%_5	52,1	3,140
SREDNJA VRIJEDNOST	$57,8 \pm 3,59$	$2,962 \pm 0,12$

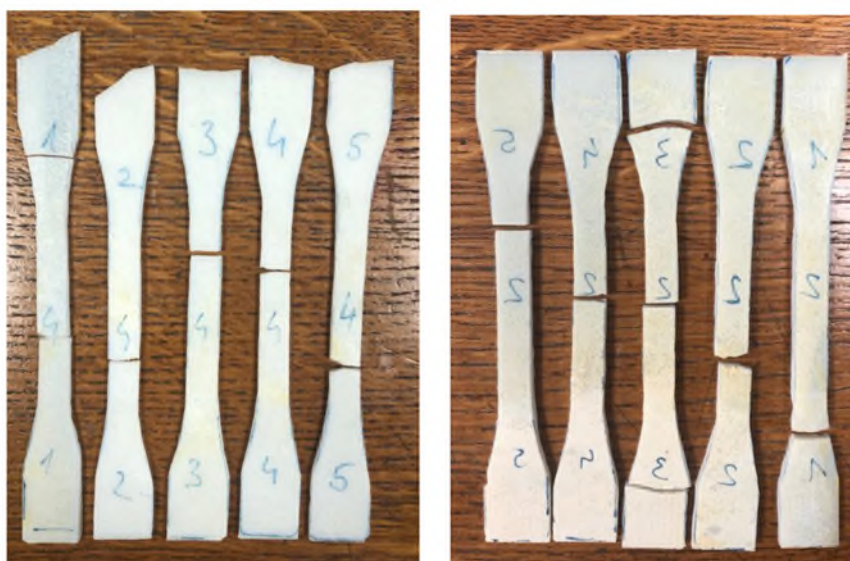
SiO ₂ 2%_1	59,4	3,048
SiO ₂ 2%_2	63,1	3,223
SiO ₂ 2%_3	56,6	3,145
SiO ₂ 2%_4	62,7	3,192
SiO ₂ 2%_5	61	3,141
SREDNJA VRIJEDNOST	60,6 ± 2,38	3,149 ± 0,06
TiO ₂ 1%_1	53,7	3,007
TiO ₂ 1%_2	46,8	2,602
TiO ₂ 1%_3	58,8	2,794
TiO ₂ 1%_4	57,7	2,945
TiO ₂ 1%_5	58,6	2,895
SREDNJA VRIJEDNOST	55,1 ± 4,55	2,849 ± 0,14
TiO ₂ 2%_1	52,1	2,545
TiO ₂ 2%_2	50,1	2,778
TiO ₂ 2%_3	52,8	2,809
TiO ₂ 2%_4	49,4	2,933
TiO ₂ 2%_5	51,6	3,143
SREDNJA VRIJEDNOST	51,2 ± 1,27	2,842 ± 0,19

Tablica 4. Rezultati vlačne čvrstoće i modula elastičnosti referentne ploče [38].

Ispitni uzorak	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 ± 3,89	2,68 ± 0,15



Slika 27. Ispitni uzorci nakon provedenog statičkog – vlačnog pokusa, SiO₂ – 1 wt% (lijevo) i 2 wt% (desno)

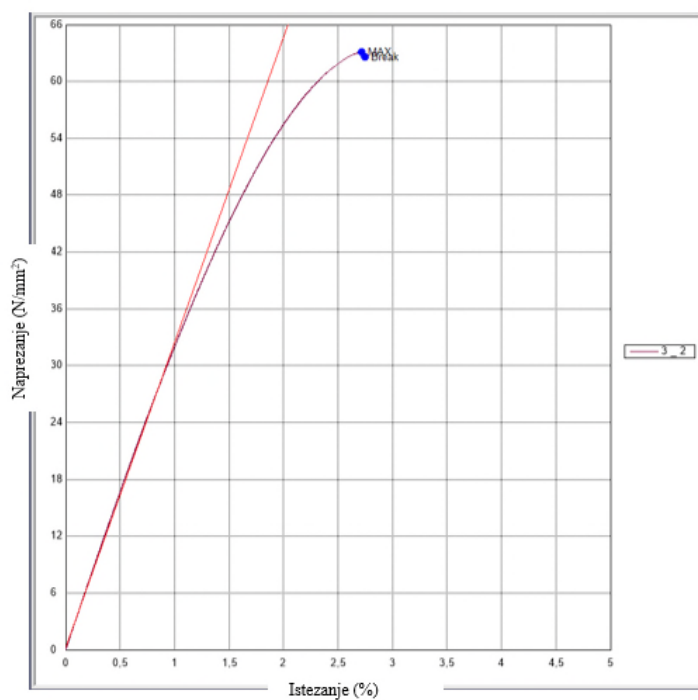


Slika 28. Ispitni uzorci nakon provedenog statičkog – vlačnog pokusa, TiO₂ – 1 wt% (lijevo) i 2 wt% (desno)

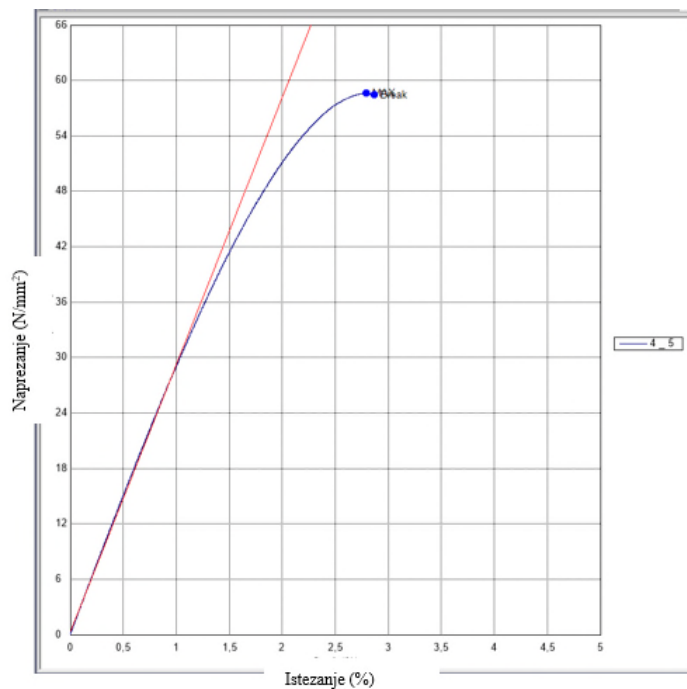
Ispitni rezultati ukazuju kako je vlačna čvrstoća referentne ploče, odnosno ploče izrađene od epoksidne smole, veća ($68 \pm 3,89 \text{ N/mm}^2$) od vlačne čvrstoće epoksidne ploče ojačane SiO₂ i TiO₂ nanočesticama (maksimalna vrijednost vlačne čvrstoće je kod uzorka TiO₂ 1 % i iznosi $60,6 \pm 2,38 \text{ N/mm}^2$). Dodatak nanočestica ne utječe na povećanje vlačne čvrstoće, dolazi do

smanjivanja. Vrijednost Young-ovog modula elastičnosti referentne ploče manja je ($2,68 \pm 0,15$ GPa) u usporedbi s epoksidnim pločama ojačanih SiO_2 i TiO_2 nanočesticama (minimalna vrijednost Young-ovog modula elastičnosti je kod uzorka TiO_2 2 % i iznosi $2,842 \pm 0,19$ GPa). Dodatak nanočestica povećava vrijednost Young-ovog modula elastičnosti. Uspoređujući vrijednosti vlačne čvrstoće epoksidnih ploča s dodatkom nanočestica, ploče ojačane SiO_2 posjeduju veću vrijednost vlačne čvrstoće nego ploče ojačane TiO_2 nanočesticama. Povećanje volumnog udjela nanočestica u SiO_2 pločama utječe na povećanje vlačne čvrstoće, ali ne znatno, dok se povećanjem volumnog udjela nanočestica u TiO_2 pločama smanjuje vrijednost vlačne čvrstoće. Također, ploče ojačane SiO_2 imaju veću vrijednost Young-ovog modula elastičnosti od ploče ojačane TiO_2 nanočesticama te se modul povećava s većim volumnim udjelom SiO_2 nanočestica.

Epoksidne ploče ojačane SiO_2 i TiO_2 nanočesticama posjeduju manju vrijednost vlačne čvrstoće i veću vrijednost Young-ovog modula elastičnosti u usporedbi s referentnom pločom čije su vrijednosti vlačne čvrstoće veće, a Young-ovog modula manje. Rezultati mehaničkih ispitivanja ukazuju da su epoksidne ploče ojačane SiO_2 i TiO_2 nanočesticama podložne lomu pri manjem naprezanju, budući da su im vrijednosti vlačne čvrstoće manje. Odnosno, dolazi do pucanja kod manjih vrijednosti naprezanja u usporedbi s referentnim pločama. Epoksidne ploče ojačane SiO_2 i TiO_2 nanočesticama su kruće, budući da su im vrijednosti Young-ovog modula elastičnosti veće od referentne ploče. Ojačane se ploče manje deformiraju pod određenim opterećenjem. Epoksidne ploče ojačane SiO_2 i TiO_2 nanočesticama će se manje deformirati prije nego što dožive lom, kruće su, ali ne mogu podnijeti visoka naprezanja zbog niske vrijednosti vlačne čvrstoće. Slika 29. i Slika 30. prikazuje grafove naprezanje – istezanje, dobivene nakon provedenog pokusa za SiO_2 i TiO_2 nanočestice s najvećim vrijednostima vlačne čvrstoće i Young-ovog modula elastičnosti.



Slika 29. Graf naprezanje – istezanje uzorka SiO_2 2%_2



Slika 30. Graf naprezanje – istezanje uzorka TiO_2 1%_5

Iz dobivenih grafova naprezanje – istežanje za ispitne uzorke SiO₂ 2%_2 i TiO₂ 1%_5 može se zaključiti kako se vrijednosti vlačne čvrstoće ne razlikuju od vrijednosti konačnog naprežanja pri kojemu nastupa lom ispitnog uzorka. Također, na grafu nema naznake znatnog tečenja što ukazuje na krhkost ojačanih ploča. Krhkost materijala odnosi se na njegovu sposobnost apsorpiranja energije prije loma. Krhki materijali apsorpiraju vrlo malo energije prije nego što dožive lom te se lome pri niskim vrijednostima deformacije. Tečenje se odnosi na plastičnu deformaciju koja se događa prije loma, a karakteristično je za duktilne materijale. Kod krhkog materijala, deformacija je minimalna prije loma, što znači da ojačane ploče ne pokazuju velike deformacije prije nego što dođe do loma. Ovakva krivulja upućuje na to da ojačane ploče ne pokazuju značajnu duktilnost, tj. nije bilo mnogo plastične deformacije prije loma. Iako su ojačane ploče krute, mogu izdržati veliko opterećenje bez znatne deformacije, do loma ispitnih uzoraka dolazi iznenadno bez mnogo prethodne deformacije, budući da su krhke.

6.2 Savojno ispitivanje s pripremom uzoraka

Savojno ispitivanje i priprema uzoraka provedeno je prema normi HRN EN ISO 178:2019 [35]. Ispitivanjem se dobivaju podaci o savojnoj čvrstoći i savojnom modulu elastičnosti. Prije samog ispitivanja, izrezano je iz ploča s dodanim nanočesticama šest ispitnih uzoraka, dok je iz referentne ploče izrezano pet ispitnih uzoraka. Svi ispitni uzorci, prema normi, izrezani su na dimenzije 80 mm x 10 mm x 4 mm. Slika 31. i Slika 32. prikazuje izrezane ispitne uzorke. Nakon izrezivanja uzoraka mjeri se debljina i širina. Tablica 5. prikazuje podatke o izmjerenim dimenzijama ispitnih uzoraka epoksidne ploče ojačane SiO₂ i TiO₂ nanočesticama, a Tablica 6. prikazuje podatke o izmjerenim dimenzijama ispitnih uzoraka referentne ploče.

Tablica 5. Izmjerene vrijednosti debljine i širine pripremljenih ispitnih uzoraka za savojno ispitivanje.

Ispitni uzorak	Debljina, h [mm]	Širina, b [mm]
SiO ₂ 1%_1	4,26	10,4
SiO ₂ 1%_2	3,96	10,38
SiO ₂ 1%_3	4,08	10,1
SiO ₂ 1%_4	4,02	10,22
SiO ₂ 1%_5	4,02	10,64
SiO ₂ 1%_6	4,16	10,08

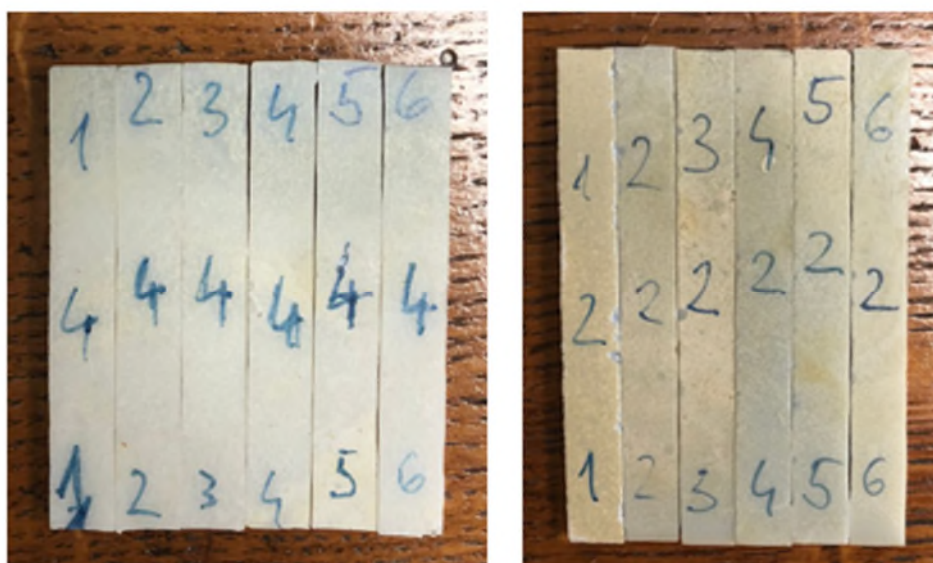
SiO ₂ 2%_1	4,02	10,1
SiO ₂ 2%_2	4,16	10,14
SiO ₂ 2%_3	3,94	10,18
SiO ₂ 2%_4	3,98	10,12
SiO ₂ 2%_5	3,9	10,18
SiO ₂ 2%_6	3,7	10,22
TiO ₂ 1%_1	3,04	10,26
TiO ₂ 1%_2	3,16	10,18
TiO ₂ 1%_3	3,2	10,2
TiO ₂ 1%_4	3,22	10,1
TiO ₂ 1%_5	3,36	10,22
TiO ₂ 1%_6	3,3	10,2
TiO ₂ 2%_1	4,12	10,16
TiO ₂ 2%_2	4,08	10,06
TiO ₂ 2%_3	4,2	10,22
TiO ₂ 2%_4	4,28	10,22
TiO ₂ 2%_5	4,18	10,36
TiO ₂ 2%_6	4,1	10,12

Tablica 6. Izmjerene vrijednosti debljine i širine pripremljenih ispitnih uzoraka referentne ploče za savojno ispitivanje [38].

Ispitni uzorak	Debljina, h [mm]	Širina, b [mm]
Referentna_1	3,5	8,84
Referentna_2	3,48	9,32
Referentna_3	3,38	9,34
Referentna_4	3,3	9,12
Referentna_5	3,34	9,0



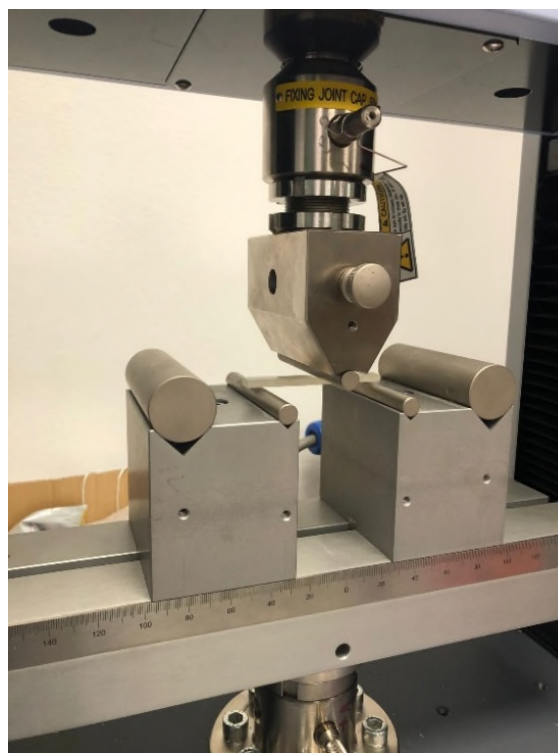
Slika 31. Izrezani ispitni uzorci s metalnim nanočesticama SiO₂ – 1 wt% (lijevo) i 2 wt% (desno)



Slika 32. Izrezani ispitni uzorci s metalnim nanočesticama TiO₂ – 1 wt% (lijevo) i 2 wt% (desno)

Ispitivanje uzoraka provodi se na kidalici Autograph AGS-X 50kN, metodom savijanja u tri točke prema normi HRN EN ISO 178:2019. Mehanička kidalica sastoji se od postolja s dva oslonca te s gornje strane nalazi se tlačni valjak koji prenosi silu te dolazi do savijanja ispitnog

uzorka. Slika 33. prikazuje početni položaj ispitnog uzorka prije savojnog ispitivanja. Ispitni uzorak postavlja se na dva oslonca, a razmak između oslonaca ovisi o duljini uzorka i propisan je normom. Sila se primjenjuje na sredini uzorka, između dvaju oslonaca pomoću tlačnog valjka te se opterećenje postupno povećava do pojave loma. Tijekom ispitivanja dobivaju se podaci o sili primijenjenoj na uzorak i odgovarajući pomak ili deformacija materijala. Ovi podaci se koriste za izračunavanje mehaničkih svojstava kao što su savojna čvrstoća i savojni modul. Tablica 7. prikazuje rezultate ispitivanja ispitnih uzoraka epoksidne ploče ojačane SiO_2 i TiO_2 nanočesticama, a Tablica 8. prikazuje rezultate ispitivanja ispitnih uzoraka referentne ploče. Slika 34. i Slika 35. prikazuje izgled ispitnih uzoraka nakon provedenog ispitivanja.



Slika 33. Postavljeni ispitni uzorak na stroju za savojno ispitivanje

Tablica 7. Vrijednosti savojne čvrstoće i savojnog modula ploče ojačane SiO₂ i TiO₂ metalnim nanočesticama.

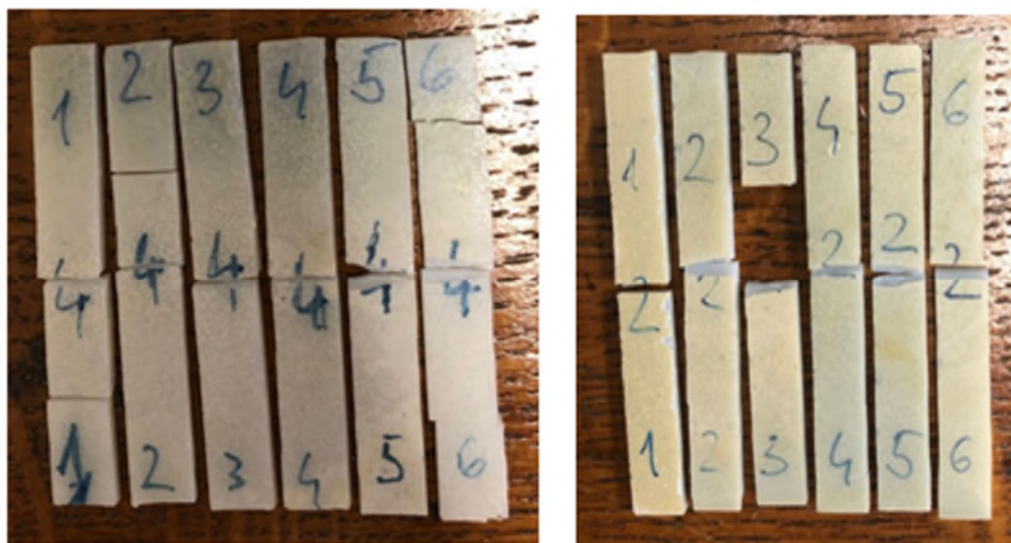
Ispitni uzorak	Savojna čvrstoća [N/mm ²]	Savojni modul elastičnosti [MPa]
SiO ₂ 1%_1	95,7	2716,5
SiO ₂ 1%_2	100,6	2981,8
SiO ₂ 1%_3	102,4	2981,5
SiO ₂ 1%_4	104	3137,8
SiO ₂ 1%_5	105,7	3125,4
SiO ₂ 1%_6	102,4	3002,9
SREDNJA VRIJEDNOST	101,8 ± 3,15	2991,03 ± 138,6
SiO ₂ 2%_1	110,5	3340,1
SiO ₂ 2%_2	105,9	3148,5
SiO ₂ 2%_3	111,3	3366,7
SiO ₂ 2%_4	110,5	3284,9
SiO ₂ 2%_5	106	3184,3
SiO ₂ 2%_6	102,3	3029,1
SREDNJA VRIJEDNOST	107,7 ± 3,26	3225,6 ± 117,4
TiO ₂ 1%_1	112	3398,4
TiO ₂ 1%_2	105,4	3088,7
TiO ₂ 1%_3	103,6	2991,5
TiO ₂ 1%_4	93,5	2748,1
TiO ₂ 1%_5	83,8	2242,2
TiO ₂ 1%_6	96,9	2681,5
SREDNJA VRIJEDNOST	99,2 ± 9,09	2858,4 ± 361,8
TiO ₂ 2%_1	88,7	2760,9
TiO ₂ 2%_2	94,6	3188
TiO ₂ 2%_3	91,7	2747,1
TiO ₂ 2%_4	93,6	3155,8
TiO ₂ 2%_5	99,3	3315,6
TiO ₂ 2%_6	59,5	-
SREDNJA VRIJEDNOST	93,6 ± 3,49	3033,5 ± 234,4

Tablica 8. Vrijednosti savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti referentne ploče [38].

Ispitni uzorak	Savojna čvrstoća [N/mm ²]	Savojni modul elastičnosti [MPa]
Referentna_1	80	1870
Referentna_2	107	3161
Referentna_3	93	2685
Referentna_4	92	2484
Referentna_5	102	3011
SRENJA VRIJEDNOST	94,8 ± 9,28	2642,2 ± 453,3



Slika 34. Ispitni uzorci s metalnim nanočesticama SiO₂ – 1 wt% (lijevo) i 2 wt% (desno) nakon provedenog savojnog ispitivanja

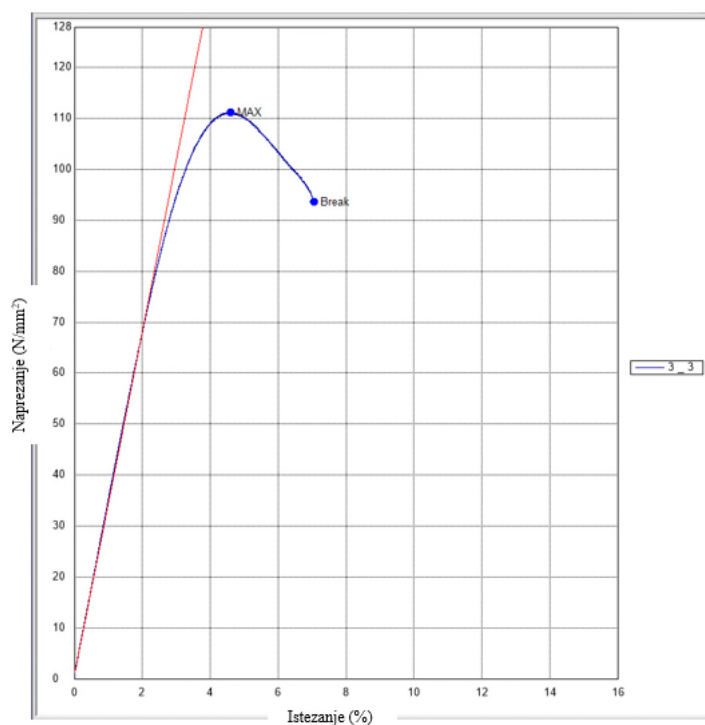


Slika 35. Ispitni uzorci s metalnim nanočesticama TiO₂ – 1 wt% (lijevo) i 2 wt% (desno) nakon provedenog savojnog ispitivanja

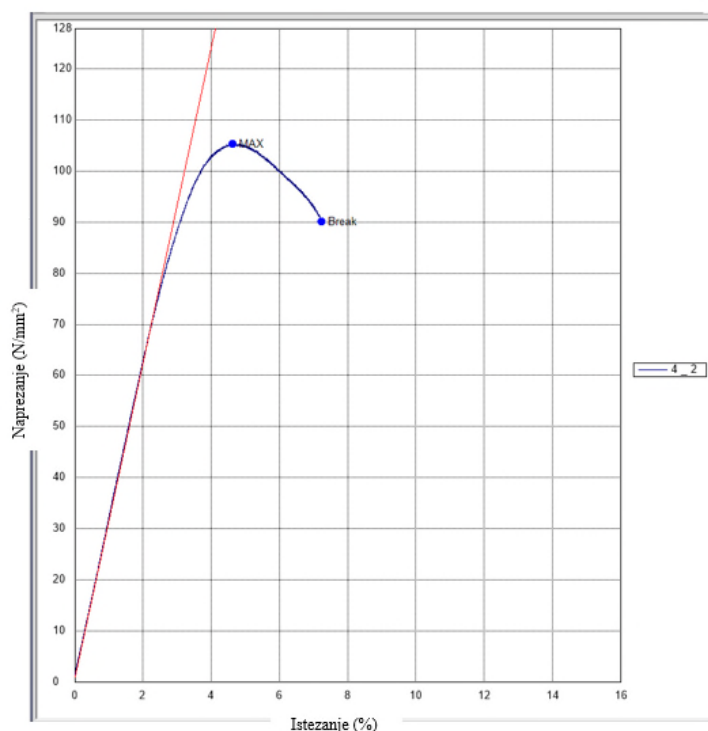
Nakon provedenog savojnog ispitivanja rezultati ukazuju da su vrijednosti savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti epoksidnih ploča ojačanih SiO₂ i TiO₂ nanočesticama veće (minimalne vrijednosti savojne čvrstoće su kod uzorka TiO₂ 1 % i TiO₂ 2 % i iznose $99,2 \pm 9,09$ N/mm² i $93,6 \pm 3,49$ N/mm², a minimalna vrijednost savojnog modula elastičnosti je kod uzorka TiO₂ 1% i iznosi $2858,4 \pm 361,8$ MPa) u usporedbi s vrijednostima referentne ploče (vrijednost savojne čvrstoće iznosi $94,8 \pm 9,28$ N/mm², a vrijednost savojnog modula elastičnosti iznosi $2642,2 \pm 453,3$ MPa). Dodatak metalnih nanočestica utječe na poboljšanje savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti. Povećavanjem volumnog udjela ploča ojačanih SiO₂ nanočestica povećava se i vrijednost savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti. Kod ploče ojačane TiO₂ nanočesticama povećanjem volumnog udjela smanjuje se vrijednost vlačne čvrstoće dok vrijednost savojnog modula elastičnosti raste. Također, ploče ojačane SiO₂ nanočesticama daju veću vrijednost savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti nego ploče ojačane TiO₂ nanočesticama. Rezultati srednje vrijednosti savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti ispitnih uzoraka epoksidne ploče ojačane TiO₂ 2 wt% nanočesticama izračunati su za pet ispitnih uzoraka. Rezultati ispitivanja ispitnog uzorka TiO₂ 2%_6 znatno odstupaju od prosječnih vrijednosti stoga su odbačeni.

Veće vrijednosti savojne čvrstoće ukazuju da epoksidne ploče ojačane SiO₂ i TiO₂ nanočesticama mogu podnijeti veće savojno naprezanje bez loma u odnosu na referentne ploče.

Veća vrijednost savojnog modula elastičnosti, koja predstavlja mjeru krutosti materijala pri savijanju, ukazuje da će se epoksidne ploče ojačane SiO_2 i TiO_2 nanočesticama manje deformirati pod određenim savojnim opterećenjem, odnosno kruće su u usporedbi s referentnim pločama. Slika 36. i Slika 37. prikazuje grafove savojno naprezanje – istežanje, dobivene nakon provedenog ispitivanja za SiO_2 i TiO_2 nanočestice s najvećim vrijednostima savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti.



Slika 36. Graf savojno naprezanje – istežanje uzorka SiO_2 2%_3



Slika 37. Graf savojno naprezanje – istezanje uzorka TiO₂ 2%_2

Graf savojno naprezanje – istezanje za uzorke SiO₂ 2%_3 i TiO₂ 2%_2 grafički prikazuje ponašanje materijala tijekom savojnog ispitivanja. Na grafovima prikazano je kakao je u početku prirast naprezanja i istezanja linearan što opisuje elastično ponašanje materijala. Najviša točka na krivulji označava maksimalno savojno naprezanje koje materijal može izdržati prije nego što nastupi lom. Nakon što je dostignuta maksimalna vrijednost naprezanja, krivulja pada. Na grafu je također označena i točka loma ispitnih uzoraka.

6.3 Ispitivanje udarnog rada loma s pripremom uzoraka

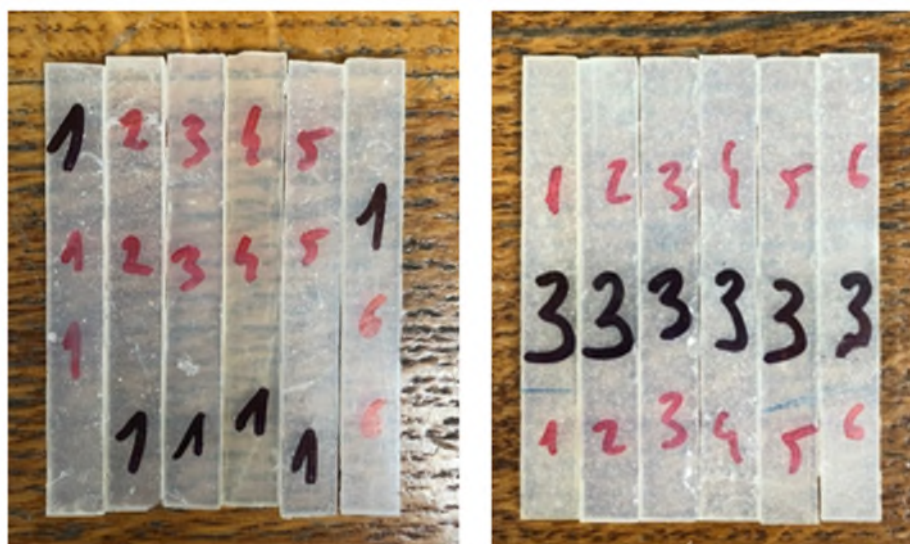
Ispitivanje udarnog rada loma kao i priprema ispitnih uzoraka provodi se prema normi HRN EN ISO 179-1:2010 [40]. Prije ispitivanja izrezuju se iz ploča ispitni uzorci dimenzija 80 mm x 10 mm x 4 mm koje se nakon izrezivanja mjere. Iz svake ploče s dodanim nanočesticama izrezano je šest ispitnih uzoraka, dok je iz referentne ploče izrezano pet ispitnih uzoraka. Tablica 9. prikazuje izmjerene dimenzije ispitnih uzoraka epoksidne ploče ojačane SiO₂ i TiO₂ nanočesticama, a Tablica 10. prikazuje izmjerene dimenzije ispitnih uzoraka referentne ploče. Slika 38. i Slika 39. prikazuje izgled pripremljenih ispitnih uzoraka.

Tablica 9. Izmjerene vrijednosti debljine i širine pripremljenih ispitnih uzoraka za ispitivanje udarnog rada loma.

Ispitni uzorak	Debljina, h [mm]	Širina, b [mm]
SiO ₂ 1%_1	4,4	10,02
SiO ₂ 1%_2	4,28	10,06
SiO ₂ 1%_3	4,34	10,1
SiO ₂ 1%_4	4,48	10,16
SiO ₂ 1%_5	4,44	10,26
SiO ₂ 1%_6	4,49	10,09
SiO ₂ 2%_1	4,24	9,82
SiO ₂ 2%_2	4,26	10,18
SiO ₂ 2%_3	41,22	9,98
SiO ₂ 2%_4	4,1	10,12
SiO ₂ 2%_5	4,18	10,06
SiO ₂ 2%_6	4,22	10,2
TiO ₂ 1%_1	3,16	10,19
TiO ₂ 1%_2	3,18	10,92
TiO ₂ 1%_3	3,18	10,22
TiO ₂ 1%_4	3,18	9,8
TiO ₂ 1%_5	3,17	10,31
TiO ₂ 1%_6	3,14	9,88
TiO ₂ 2%_1	4,72	10,04
TiO ₂ 2%_2	4,69	10,22
TiO ₂ 2%_3	4,64	10,3
TiO ₂ 2%_4	4,7	10,12
TiO ₂ 2%_5	4,64	10,06
TiO ₂ 2%_6	4,7	10,28

Tablica 10. Izmjerene vrijednosti debljine i širine pripremljenih ispitnih uzoraka referentne ploče za ispitivanje udarnog rada loma [38].

Ispitni uzorak	Debljina, h [mm]	Širina, b [mm]
Referentna_1	3,5	8,84
Referentna_2	3,48	9,32
Referentna_3	3,38	9,34
Referentna_4	3,3	9,12
Referentna_5	3,34	9,0



Slika 38. Izrezani ispitni uzorci s metalnim nanočesticama SiO₂ – 1 wt% (lijevo) i 2 wt% (desno)



Slika 39. Izrezani ispitni uzorci s metalnim nanočesticama TiO_2 – 1 wt% (lijevo) i 2 wt% (desno)

Slika 40. prikazuje Charpy-jev bat model KARL FRANK GMBH na kojemu se provodi ispitivanje udarnog rada loma. Ispitni se uzorak postavlja horizontalno na dva oslonca na Charpy-jev bat. Slika 41. prikazuje položaj ispitnog uzorka prije izvođenja ispitivanja udarnog rada loma. Izrezani ispitni uzorci nemaju "U" ili "V" utor budući da se radi o krhkim materijalima. Nakon provedenog ispitivanja očitava se količina energije apsorbirane tijekom loma ispitnih uzoraka, odnosno vrijednost promjene potencijalne energije. Temeljem tih podataka moguće je izračunati žilavost materijala prema (10):

$$A_{CN} = \frac{E_C}{b \cdot h} \cdot 10^3, \text{ kJ/m}^2 \text{ [40]} \quad (10)$$

gdje je:

E_C – promjena potencijalne energije, J

b – širina epruvete, mm

h – debljina epruvete, mm.

Tablica 11. prikazuje rezultate ispitivanja ispitnih uzoraka epoksidne ploče ojačane SiO_2 i TiO_2 nanočesticama. Tablica 12. prikazuje rezultate ispitivanja ispitnih uzoraka referentne ploče. Slika 42. i Slika 43. prikazuje ispitne uzorke nakon provedenog ispitivanja udarnog rada loma.



Slika 40. Charpy-jev bat za ispitivanje udarnog rada loma



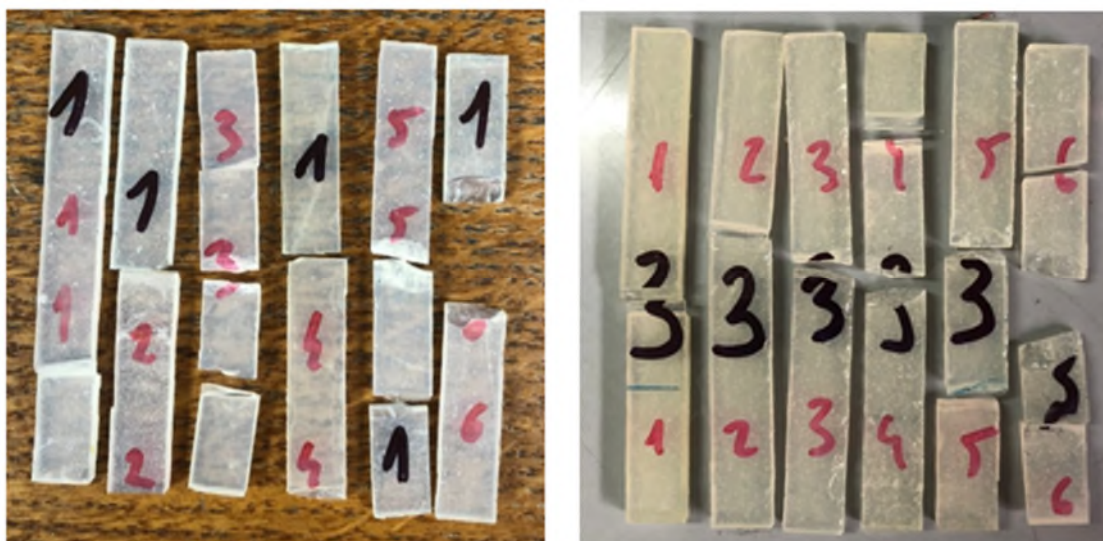
Slika 41. Horizontalni položaj ispitnog uzorna na Charpy-jevom batu

Tablica 11. Vrijednosti promjene potencijalne energije i žilavosti referentne ploče i ploče ojačane SiO₂ i TiO₂ metalnim nanočesticama.

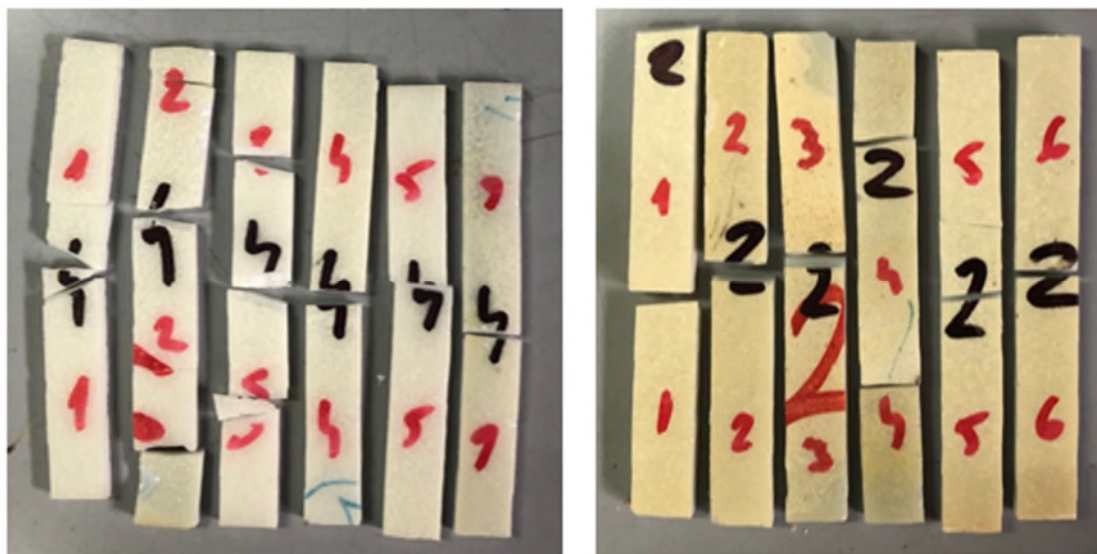
Ispitni uzorak	Promjena potencijalne energije, E _C [J]	Žilavost, A _{CN} [kJ/m ²]
SiO ₂ 1%_1	0,36	8,17
SiO ₂ 1%_2	0,07	1,63
SiO ₂ 1%_3	0,945	21,56
SiO ₂ 1%_4	0,55	12,08
SiO ₂ 1%_5	2	43,9
SiO ₂ 1%_6	3,1	68,47
SREDNJA VRIJEDNOST	1,17 ± 1,06	25,97 ± 23,27
SiO ₂ 2%_1	0,17	4,08
SiO ₂ 2%_2	0,41	9,45
SiO ₂ 2%_3	0,35	8,51
SiO ₂ 2%_4	0,95	22,89
SiO ₂ 2%_5	1,25	29,72
SiO ₂ 2%_6	1,95	45,3
SREDNJA VRIJEDNOST	0,85 ± 0,62	19,99 ± 14,37
TiO ₂ 1%_1	1,2	37,27
TiO ₂ 1%_2	1,85	53,27
TiO ₂ 1%_3	2,25	69,23
TiO ₂ 1%_4	0,6	19,26
TiO ₂ 1%_5	0,26	7,96
TiO ₂ 1%_6	0,25	8,06
SREDNJA VRIJEDNOST	1,07 ± 0,77	32,51 ± 23,01
TiO ₂ 2%_1	0,15	3,17
TiO ₂ 2%_2	0,35	7,3
TiO ₂ 2%_3	0,33	6,91
TiO ₂ 2%_4	0,4	8,41
TiO ₂ 2%_5	0,19	4,07
TiO ₂ 2%_6	0,17	3,52
SREDNJA VRIJEDNOST	0,27 ± 0,09	5,56 ± 2,04

Tablica 12. Vrijednosti promjene potencijalne energije i žilavosti referentne ploče [38].

Ispitni uzorak	Promjena potencijalne energije, E_C [J]	Žilavost, A_{CN} [kJ/m ²]
Referentna_1	0,9	29
Referentna_2	2,35	72
Referentna_3	1,85	59
Referentna_4	1,0	33
Referentna_5	0,6	20
SREDNJA VRIJEDNOST	1,34 ± 0,65	42,6 ± 19,6



Slika 42. Ispitni uzorci s metalnim nanočesticama SiO₂ – 1 wt% (lijevo) i 2 wt% (desno) nakon provedenog ispitivanja udarnim radom loma



Slika 43. Ispitni uzorci s metalnim nanočesticama TiO₂ – 1 wt% (lijevo) i 2 wt% (desno) nakon provedenog ispitivanja udarnim radom loma

Rezultati ispitivanja pokazuju da ploče ojačane nanočesticama SiO₂ i TiO₂, neovisno o njihovom udjelu, ne utječu na poboljšanje žilavosti, već ju smanjuju. Iako su rezultati srednje vrijednosti ojačanih ploča manji od vrijednosti referentne ploče, ne može se donijeti pravi zaključak o utjecaju dodanih nanočestica u ploču od epoksidne smole na mehanička svojstva, odnosno žilavost zbog velikog rasipanja rezultata kao i velikih oscilacija u rezultatima. Razlog tome mogu biti mikropukotine, nastale tijekom pripreme odnosno rezanja ispitnih uzoraka iz ploče. Kako bi se izbjegle pojave mikropukotina poželjno je rezati ploče vodenim mlazom kojim ne dolazi do toplinskog utjecaja, mehanička naprezanja su minimalna te je osigurana visoka preciznost prilikom rezanja.

ZAKLJUČAK

Cilj ovog diplomskog rada bio je istražiti utjecaj udjela i vrste nanočestica na mehanička svojstva polimera koji se koristi kao matrica budućeg polimernog kompozita. Odnosno, temeljem rezultata provedenih mehaničkih ispitivanja bilo je potrebno donijeti zaključke o utjecaju dodatka SiO_2 i TiO_2 nanočestica na mehanička svojstva epoksidne smole koja predstavlja buduću polimernu matricu kompozitnog materijala. Na osnovu dobivenih rezultata provedenih mehaničkih ispitivanja, uspoređena su mehanička svojstva referentne ploče od čiste epoksidne smole i ploča ojačanih SiO_2 i TiO_2 nanočesticama različitog volumnog udjela.

Na temelju rezultata dobivenih kroz provedena ispitivanja, doneseni su slijedeći zaključci:

- Dodatkom SiO_2 i TiO_2 nanočestica različitog volumnog udjela smanjuje se vlačna čvrstoća i povećava se Young-ov modul elastičnosti. Ojačane ploče manje će se deformirati prije nego što dožive lom, kruće su, ali ne mogu podnijeti visoka naprezanja zbog niske vrijednosti vlačne čvrstoće.
- Dodatkom SiO_2 i TiO_2 nanočestica različitog volumnog udjela povećava se savojna čvrstoća i savojni modul elastičnosti epoksidne smole. Ojačane ploče mogu podnijeti veće savojno naprezanje bez loma i mogu izdržati veće vanjske sile koje djeluju na njih. Ojačane ploče se manje deformiraju pod određenim savojnim opterećenjem, odnosno kruće su.
- Dodatak SiO_2 i TiO_2 nanočestica različitog volumnog udjela smanjuje vrijednost žilavosti, no budući da rezultati ispitivanja imaju velika rasipanja nisu mjerodavni, ne može se donijeti zaključak o utjecaju dodanih nanočestica na žilavost epoksidne smole. Predlaže se u budućim ispitivanjima udarnog rada loma rezanje ispitnih uzoraka vodenim mlazom kako bi se izbjegao nastanak mikropukotina koje su potencijalno uzrok velikih oscilacija u rezultatima.

Dodatak nanočestica utječe na poboljšanje mehaničkih svojstva epoksidne smole, a najviše vrijednosti se dobivaju dodatkom nanočestica SiO_2 2 wt%. Vrijednosti mehaničkih svojstava dobivenih ispitivanjem ispitnih uzoraka epoksidne smole s dodatkom nanočestica SiO_2 2 wt% veće su od vrijednosti mehaničkih svojstava dobivenih ispitivanjem ispitnih uzoraka epoksidne smole s dodatkom nanočestica SiO_2 1 wt%, TiO_2 1 i 2 wt%.

U završnom radu Stjepana Kušekovića: Primjena UHMWPE ojačala u izradi ploča za balističku zaštitu, Zagreb 2022., provedena su ista mehanička ispitivanja epoksidne ploče ojačane Al_2O_3 0,5%wt nanočesticama. Uspoređujući rezultate dobivene mehaničkim ispitivanjima (epoksidne ploče ojačane Al_2O_3) u radu [38] s rezultatima mehaničkih ispitivanja provedenih na ispitnim uzorcima izrađenim od epoksidne ploče ojačane SiO_2 2 wt%, vrijednosti Young-ovog modula elastičnosti, savojne čvrstoće kao i savojnog modula elastičnosti su manjih vrijednosti. Ploče ojačane nanočesticama Al_2O_3 0,5 wt% postižu veću vrijednost vlačne čvrstoće u usporedbi s pločama ojačanim nanočesticama SiO_2 2wt%. [38] Povećanje vrijednosti vlačne čvrstoće potencijalno je moguće uz povećanje volumnog udjela nanočestica SiO_2 , ali se predlaže ponoviti statičko – vlačno ispitivanje i usporediti rezultate ispitivanja.

Mogućnost izrade kompozitnih antibalističkih ploča čija bi matrica bila od epoksidne smole ojačane SiO_2 nanočesticama potencijalno je moguća. Budući da se radi o kompozitnom materijalu za izradu antibalističkih ploča, uz matricu potrebna su ojačala u obliku vlakana. Za izradu opisanih antibalističkih ploča potrebno je provesti daljnja ispitivanja poput adhezijskih svojstva ojačane polimerne matrice i vlakna.

LITERATURA

- [1] Filetin T.; Kovačiček F.; Indof J.: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 2007.
- [2] Krishan K. Chawla: Composite Materials Science and Engineering 3rd ed. New York: Springer, DOI 10.1007/978-0-387-74365-3, 2012.
- [3] Schauerl Z.: Kompozitni materijali – nastavni materijali, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 2020.
- [4] Gabrić I.; Šitić S.: Materijali 1, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Splitu, Split 2012.
- [5] Yang Y.; Boom R.; Irion B.; Van Heerden D.-J.; Kuiper P.; De Wit H.: Recycling of Composite Materials. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 51, 53-68., Elsevier, <https://doi.org/10.1016/j.cep.2011.09.007>, 2011.
- [6] Zhang G.; Lu H.; Mamidwar S.; Wang M.: Biomaterial Science, Composite 415 – 430., Society For Biomaterials, 2020.
- [7] Asmatulu E.; Alonayni A.; Alamir M.: Safety concerns in composite manufacturing and machining, DOI:10.1117/12.2296707, 2018.
- [8] <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=484>, pristupljeno 03.03.2024.
- [9] U.S. Congress, Office of Technology Assessment, Advanced Materials by Design, OTAE-351 (Washington, DC: U.S. Government Printing Office, June 1988), Chapter 3 Polymer Matrix Composites, n.d., from: <https://www.princeton.edu/~ota/disk2/1988/8801/880106>
- [10] Jose J.P.; Joseph K.: Advances in Polymer Composites: Macro- and Microcomposites – State of the Art, New Challenges, and Opportunities, Polymer Composites, 1-16., DOI:10.1002/9783527645213.CH1, 2012.
- [11] “Processing of polymer composites,” 2012, from: <http://www-materials.eng.cam.ac.uk/3C1archive/handout6.pdf>

- [12] Smojver I.: Mehanika kompozitnih materijala – interna skripta, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 2007.
- [13] Bilyeu B.; Brostow W.; Menard K.: Epoxy thermosets and their applications I: Chemical structures and applications, Journal of Materials Education Vol. 21(5&6): 281-286
- [14] May C.A.: Epoxy resins: Chemistry and technology (2nd Edition), Marcel Dekker, Wiley, New York, 1988.
- [15] Gibson, G.: Brydson's Plastics Materials, Epoxy Resins, 773–797., 2017.
- [16] Goodman, S. H.: Handbook of Thermoset Plastics, Epoxy Resins, 193–268., 1998.
- [17] Dornbusch M.; Christ U.; Rasing R.: Epoxy Resins, Fundamentals and Applications, Vincentz Network, Hanover, Germany, 2016.
- [18] <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/epichlorohydrin-ech-market#>, pristupljeno 5.3.2024.
- [19] Joudeh N.; Linke D.: Nanoparticle classification, physicochemical properties, characterization, and applications: a comprehensive review for biologists, Journal of Nanobiotechnology, 2022.
- [20] Altammar K. A.: A review on nanoparticles: characteristics, synthesis, applications, and challenges, Front. Microbiol, 2023.
- [21] Khan, I.; Saeed, K.; Khan, I.: Nanoparticles: Properties, applications and toxicities, Arabian Journal of Chemistry, 2017.
- [22] Dobson P.; Jarvie H.; King S.: "nanoparticle." Encyclopedia Britannica, 2024. <https://www.britannica.com/science/nanoparticle>., pristupljeno 13.3.2024.
- [23] Kneubuehl B. P.; Coupland R. M.; Rothschild M. A.; Thali M.: Wound Ballistics Basics and Applications, Springer, 2011.
- [24] <https://rmaspecialvehicles.com/composite-panels/>, pristupljeno 18.3.2024.
- [25] Stupar S.: Ballistic Composites, the Present and the Future; Smart and Advanced Ceramic Materials and Applications, IntechOpen, 2022.
- [26] Barone E.; Gaujena B.; Vilnitis M.: Literature Review of Applicable Ballistic Materials for Temporary Wooden Building Envelopes, Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, 2023.

- [27] <https://www.scientificamerican.com/article/stronger-than-steel-able-to-stop-a-speeding-bullet--it-s-super-wood/>, pristupljeno 18.3.2024.
- [28] Wu S.; Sikdar P.; Bhat G. S.: Recent progress in developing ballistic and anti-impact materials: Nanotechnology and main approaches, Defence Technology 21, 33 - 61, Elsevier, 2022.
- [29] Medvedovski E.: Ballistic performance of armour ceramics: Influence of design and structure. Part 2, Elsevier, 2010.
- [30] Ivušić V.; Franz M.; Španiček Đ.; Ćurković L.: Materijali 1, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2011.
- [31] Kladarić I.: Materijali 1, Mehanička svojstva materijala, nastavni materijal
- [32] Sabarinathan C.; Muthu S.; Md.Naushad Ali: Experimental Study On Tensile Behavior Of Multi Wall Carbon Nanotube Reinforced Epoxy Composites, Journal of Applied Sciences Research, 2012.
- [33] Tensile Testing, 2nd Edition, Publisher: ASM International, 2004
- [34] Interna skripta čvrstoća,
<https://www.scribd.com/document/401680834/%C4%8Cvrsto%C4%87a-skripta-pdf>, pristupljeno 19.3.2024.
- [35] HRN EN ISO 178 : 2019 Plastics – Determination of flexural properties
- [36] Yap, A. U. J.; Teoh, S. H.: Comparison of flexural properties of composite restoratives using the ISO and mini-flexural tests, Journal of Oral Rehabilitation, 2003.
- [37] Bozkurt Ö. Y.; Özbek Ö.; Abdo A. R.: The Effects of Nanosilica on Charpy Impact Behavior of Glass/Epoxy Fiber Reinforced Composite Laminates, Periodicals of Engineering and Natural Sciences, 2017.
- [38] Kušeković S.: Primjena UHMWPE ojačala u izradi ploča za balističku zaštitu, završni rad, Zagreb 2022.
- [39] HRN EN ISO 527 – 1:2019
- [40] HRN EN ISO 179-1:2010