

Utjecaj udjela ugljičnih vlakana na mehanička svojstva kompozita s plastomernom matricom

Kajinić, Maja

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:249224>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-27**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Maja Kajinić

Zagreb, 2019. godine

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Izv. prof. dr. sc. Tatjana Haramina, dipl. ing.

Student:

Maja Kajinić

Zagreb, 2019.

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

Zahvaljujem se profesorici Tatjani Haramini na iznimnoj susretljivosti i pomoći prilikom pisanja ovog završnog rada, te asistentu Danielu Pugaru i tehničkom suradniku Božidaru Bušetinčanu. Također se zahvaljujem obitelji koja mi je bila najveća podrška te salezijancima koji su uvijek bili tu za mene, a najveća hvala dragom Bogu koji je sve ovo učinio mogućim.

Maja Kajinić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student:

Maja Kajinić

Mat. br.: 0035206633

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**Utjecaj udjela ugljičnih vlakana na mehanička svojstva kompozita s
plastomernom matricom**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**The effect of fiber content on mechanical properties of carbon fiber
reinforced thermoplastic composites**

Opis zadatka:

Kompoziti su materijali napravljeni od najmanje dvije komponente koje se značajno razlikuju po svojim svojstvima. Najviše kompozita izrađuje se od duromernih smola ojačanih vlaknima. Tržište ovih materijala je već desetljećima stabilno. Nasuprot tome tržište kompozita s plastomernom matricom raste posljednjih 30tak godina. Trenutno je približno trećina svih polimernih kompozita na bazi plastomera.

U radu je potrebno:

- opisati kompozite ojačane kontinuiranim vlaknima, s posebnim naglaskom na jednoosno orijentirana vlakna,
- opisati najčešće vrste vlakana i objasniti razlike u njihovim svojstvima,
- opisati po čemu se razlikuju ugljična vlakna
- istražiti postupke izrade kompozita s plastomernom matricom i njihovih poluproizvoda,
- istražiti prednosti i nedostatke plastomernu u odnosu na duromernu matricu,
- izraditi dvije kompozitne ploče jednoosno ojačane s različitim udjelima ugljičnih vlakana u matrici od samoobnavljajućeg kopolimera etilena i metakrilne kiseline (E/MAA) (Surlyn 8940)
- opisati izradu kompozita i materijale izrade,
- opisati mehanizam samoobnavljanja E/MAA
- odrediti masene udjele vlakana u obje ploče, usporediti mehanička svojstva i usporediti mikrografije presjeka kompozita.

Zadatak zadan:

6. svibnja 2019.

Rok predaje rada:

2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2019.

3. rok: 20. rujna 2019.

Predvideni datumi obrane:

2. rok (izvanredni): 2.7. 2019.

3. rok: 23.9. - 27.9. 2019.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

T. Haramina

Izv. prof. dr. sc. Tatjana Haramina

Branko Bauer

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

1. Uvod.....	1
2. Kompoziti ojačani kontinuiranim vlaknima.....	3
2.1. Utjecaji na mehanička svojstva kompozita ojačanih kontinuiranim vlaknima.....	3
2.2. Materijali vlakana.....	6
2.2.1. Keramička vlakna.....	6
2.2.2. Aramidna vlakna.....	6
2.2.3. Staklena vlakna.....	7
2.2.4. Borova vlakna.....	8
2.2.5. Ugljična vlakna.....	8
3. Kompoziti s polimernom matricom.....	10
3.1. Plastomerna matrica.....	10
3.2. Duromerna matrica.....	11
3.3. Usporedba plastomerne i duromerne matrice.....	11
3.4. Postupci izrade kompozita s plastomernom matricom.....	12
3.4.1. Pultrudiranje.....	13
3.4.2. Namotavanje filamenata.....	13
3.4.3. Izravno prešanje.....	13
3.4.4. Podtlačno oblikovanje.....	14
3.4.5. Injekcijsko-posredno prešanje taline s uloženim trodimenzionalnim ojačavajućim predoblikom.....	14
4. Samoobnavljanje.....	16
4.1. Ionomeri.....	16
5. Eksperimentalni dio.....	17
5.1. Materijal matrice E/MAA Surlyn 8940®.....	17

5.2. Ispitivanje savojnog modula elastičnosti.....	17
5.3. Ispitivanje prividne smične međuslojne čvrstoće.....	19
5.4. Potupak izrade kompozitnih ploča.....	20
6. Rezultati mjerenja.....	22
6.1. Rezultati mjerenja prividne smične međuslojne čvrstoće ploče 1 s dva sloja vlakana.....	22
6.2. Rezultati mjerenja savojnog modula elastičnosti ploče 1 s dva sloja vlakana.....	22
6.3. Rezultati mjerenja savojnog modula elastičnosti ploče 2 s dva sloja vlakana.....	27
6.4. Maseni udio vlakana u kompozitu.....	32
6.5. Usporedba rezultata.....	33
7. Zaključak.....	35
8. Literatura.....	36

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Utjecaj duljine vlakana na čvrstoću kompozita [3].	3
Slika 2.2. Utjecaj usmjerenja vlakana s obzirom na naprezanje za Ti-leguru ojačanu vlaknima bora [2].	4
Slika 2.3. Svojstva vlakna: a) krivulja „naprezanje-istezanje“, b) usporedba specifične čvrstoće i specifičnog modula elastičnosti metala i nekih vlakana [6].	5
Slika 3.1. Podtlačno oblikovanje [14].	15
Slika 3.2. Injekcijsko-posredno prešanje kapljevite smole s uložnim trodimenzionalnim ojačavajućim predoblikom [14].	15
Slika 5.1. Shematski prikaz ispitivanja savijanja u tri točke [20].	18
Slika 5.2. Shematski prikaz ispitivanja prividne smične međuslojne čvrstoće u tri točke [20].	20
Slika 6.1. Dijagram naprezanje-istezanje ispitnog tijela 1.	23
Slika 6.2. Dijagram naprezanje-istezanje ispitnog tijela 2.	24
Slika 6.3. Dijagram naprezanje-istezanje ispitnog tijela 3.	25
Slika 6.4. Dijagram naprezanje-istezanje ispitnog tijela 4.	26
Slika 6.5. Dijagram naprezanje-istezanje ispitnog tijela 5.	27
Slika 6.6. Dijagram naprezanje-istezanje ispitnog tijela 6.	28
Slika 6.7. Dijagram naprezanje-istezanje ispitnog tijela 7.	29
Slika 6.8. Dijagram naprezanje-istezanje ispitnog tijela 8.	30
Slika 6.9. Dijagram naprezanje-istezanje ispitnog tijela 9.	31

POPIS TABLICA

Tablica 5.1. Neka svojstva Surlyn® 8940 [20].	17
Tablica 5.2. Parametri izrade kompozitnih ploča.	20
Tablica 6.1. Rezultati ispitivanja prividne smične međuslojne čvrstoće ploče 1 s dva sloja vlakana.	22
Tablica 6.2. Dimenzije ispitnih tijela prve ploče i maksimalne sile.	22
Tablica 6.3. Rezultati savojnog ispitivanja ispitnog tijela 1.	23
Tablica 6.4. Rezultati savojnog ispitivanja ispitnog tijela 2.	24
Tablica 6.5. Rezultati savojnog ispitivanja ispitnog tijela 3.	25
Tablica 6.6. Rezultati savojnog ispitivanja ispitnog tijela 4.	26
Tablica 6.7. Dimenzije ispitnih tijela druge ploče i maksimalne sile.	27
Tablica 6.8. Rezultati savojnog ispitivanja ispitnog tijela 5.	27
Tablica 6.9. Rezultati savojnog ispitivanja ispitnog tijela 6.	28
Tablica 6.10. Rezultati savojnog ispitivanja ispitnog tijela 7.	29
Tablica 6.11. Rezultati savojnog ispitivanja ispitnog tijela 8.	30
Tablica 6.12. Rezultati savojnog ispitivanja ispitnog tijela 9.	31
Tablica 6.13. Pregled savojnih svojstava ploče 1 i ploče 2, obje s dva sloja vlakana.	32
Tablica 6.14. Rezultati mjerenja masenih udjela ugljičnih vlakana.....	33
Tablica 6.15. Rezultati ispitivanja Matije Jagara [22].	33
Tablica 6.16. Usporedba srednjih vrijednosti savojnog modula elastičnosti i međuslojne smične čvrstoće plastomernih kompozita s jednim i s dva sloja vlakana.	34

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
E	N/mm ²	Modul elastičnosti
R_e	N/mm ²	Granica razvlačenja
ρ	g/cm ³	Gustoća
E_c	N/mm ²	Modul elastičnosti kompozita
E_m	N/mm ²	Modul elastičnosti matrice
E_f	N/mm ²	Modul elastičnosti vlakana
T_g	°C	Temperatura staklišta
T_m	°C	Temperatura tališta
σ	N/mm ²	Naprezanje
F	N	Sila, narinuto opterećenje
l	mm	Razmak između oslonaca
b	mm	Širina ispitnog tijela
h	mm	Debljina ispitnog tijela
ε	mm/mm	Istezanje
f	mm	Progib
R_m	N/mm ²	Svojna čvrstoća
F_{max}	N	Maksimalna sila
w_v	%	Maseni udio vlakana
m_{uzorak}	g	Masa kompozitnog uzorka
$m_{ostatak}$	g	Masa anorganskog ostatka (vlakana)
τ	N/mm ²	Prividna međuslojna čvrstoća

SAŽETAK

U radu su ispitana mehanička svojstva kompozita s plastomernom matricom od kopolimera etilena i metil metakrilatne kiseline ojačanog ugljičnim vlaknima. Izrađene su dvije kompozitne ploče, svaka s dva sloja jednoosno orijentiranih vlakana pri jednakim uvjetima proizvodnje. Ispitna tijela izrezana su paralelno, te su ispitana svojstva prividne smične međuslojne čvrstoće, savojnog modula elastičnosti i savojne čvrstoće. Dobivene vrijednosti ukazuju na ponovljivost kvalitete izrade ploče.

Svojstva ploče s dva sloja vlakana uspoređena su sa svojstvima ploče sa samo jednim slojem. Savojni modul je porastao za red veličine, a prividna smična međuslojna čvrstoća za 14,6 %. Zbog vrlo male krutosti ploče s jednim slojem vlakana, nije bilo moguće odrediti čvrstoću pri savojnom opterećenju.

Ključne riječi: kompozit s plastomernom matricom, jednoosno ojačanje prividna smična međuslojna čvrstoća, savojni modul elastičnosti, savojna čvrstoća

SUMMARY

The mechanical properties of a composite with a thermoplastic matrix made of copolymers of ethylene and methyl methacrylic acid reinforced with carbon fibers were investigated. Two composite sheets were made, each of them was reinforced with two layers of uniaxially oriented fibers under the same manufacturing conditions. The values obtained indicate the reproducibility of the sheet quality.

The properties of the sheet reinforced with the two layers were compared with those uniaxially reinforced with a single layer. The flexural modulus increased by an order of magnitude and the apparent shear interlayer strength by 14,6 %. Due to the very low stiffness of the single-layer sheet, it was not possible to determine its flexural strength

Key words: thermoplastic based composites, uniaxial reinforcement, apparent interlaminar strength, flexural modulus, flexural strength.

Key words: thermoplastic based composites, uniaxial reinforcement, apparent interlaminar shear strength, flexural modulus, flexural strength

1. Uvod

Kompozit ili kompozitni materijal je građen od dva ili više različitih materijala s ciljem dobivanja novog materijala sa svojstvima koja nadmašuju svojstva pojedinačnih dijelova (komponentata) ili sa svojstvima koja ti dijelovi sami nemaju. Pritom se ne radi samo o povećanju specifične čvrstoće i specifičnoga modula elastičnosti, lomne žilavosti, toplinske postojanosti, otpornosti prema abraziji i puzanju, nego i prijevoznih (transportnih), skladišnih, otpadnih svojstava, uključujući konačno i cijenu. Većina kompozita sadrži jedan materijal kao kontinuiranu fazu (matricu), a u nju su uklopljeni odvojeni dijelovi druge faze, koja najčešće ima funkciju ojačala.

Velik dio kompozita na tržištu napravljen je za lake konstrukcije sa svrhom redukcije mase. Pri tome je materijal matrice zbog svoje niske gustoće najčešće polimer. Ojačala koja se dodaju polimerima su staklena, aramidna i ugljična. Dok su staklena vlakna cjenovno najpovoljnija i najraširenija, ugljična vlakna su za većinu primjena superiorna drugim vlaknima.

Polimerna matrica najčešće se radi od duromernih smola. Tržište duromernih kompozita je zasićeno. Postoji niz proizvoda koji se izrađuje od njih, ali ne javljaju se novi, te stoga tržište ovih kompozita stagnira. S druge strane tržište kompozita s plastomernom matricom je rastuće. Postoji cijeli niz naprednih plastomera koji se mogu koristiti kao materijal matrice i proizvoda gdje bi se mogli primijeniti, ali je proizvodnja još uvijek ograničena zbog potrebe da se ovi kompoziti prerađuju pri temperaturi iznad tališta, a i viskoznost im je čak i u rastaljenom stanju visoka te je impregnacija vlakana otežana.

U ovom završnom radu su obrađeni kompoziti koji imaju polimernu matricu izrađenu od smole trgovačkog naziva Surlyn® 8940 koja je kopolimer etilena i metakrilne kiseline (E/MAA), te ojačanu s dva sloja jednoosno orijentiranih ugljičnih vlakana. Posebnost ove matrice je što ima sposobnost samoobnavljanja mehaničkih oštećenja uz pomoć dovedene topline. Ojačanje je jednoosno kako bi se dobiveni rezultati kasnije mogli lakše usporediti s numeričkim modelima. U radu su objašnjeni postupci izrade pojedinih dijelova kompozita, ispitana su i analizirana mehanička svojstva, provjerena je ponovljivost kvalitete, odnosno

svojstava kompozita i napravljena je usporedba svojstava ploče s jednim slojem i s dva sloja jednoosno orijentiranih vlakana.

2. Kompoziti ojačani kontinuiranim vlaknima

U tehnološkom smislu najvažniji su kompoziti oni u kojima je ojačalo u obliku vlakana. Vlakna često poboljšavaju specifičnu čvrstoću i specifični modul matrice, a definirani su izrazima:

$$\text{Specifična čvrstoća} = \frac{R_m (R_e)}{\rho}$$

$$\text{Specifični modul elastičnosti} = \frac{E}{\rho},$$

gdje su:

E – modul elastičnosti [N/mm²],

R_m – rastezna čvrstoća [N/mm²],

R_e – granica razvlačenja [N/mm²],

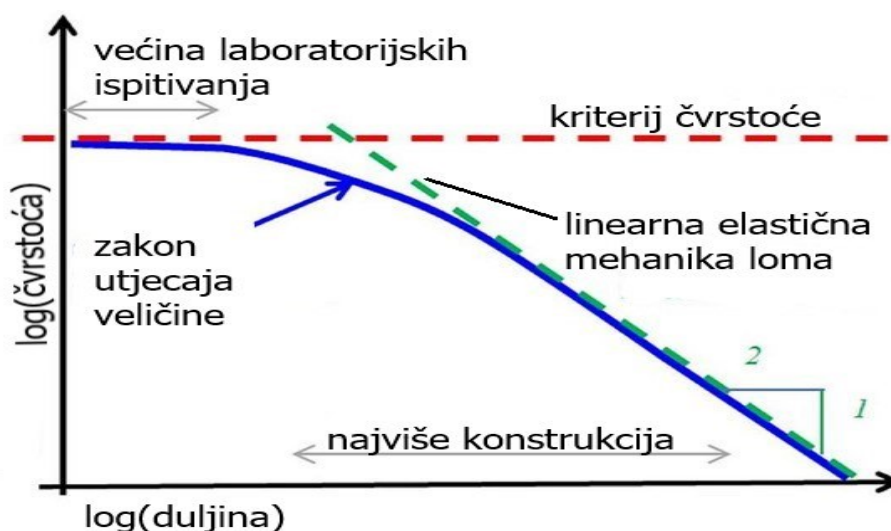
ρ – gustoća [g/cm³].

Kompoziti ojačani vlaknima s iznimno visokom specifičnom čvrstoćom i modulom se izrađuju od materijala vlakana i matrice koji su niske gustoće [1].

2.1. Utjecaj vlakana na mehanička svojstva kompozita

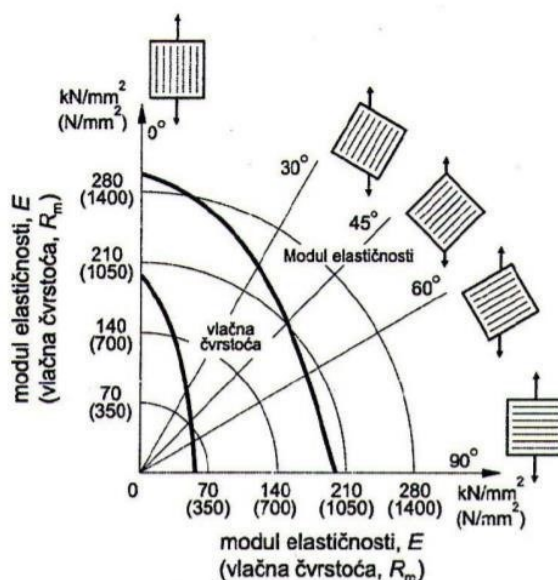
Glavna četiri svojstva vlakana koja doprinose mehaničkim performansama kompozita su:

1. Dužina: Vlakna mogu biti dugačka ili kratka. Duga kontinuirana vlakna mogu se lako orijentirati i obrađivati, kratka vlakna ne mogu se u potpunosti kontrolirati za pravilnu orijentaciju. Duga vlakna pružaju brojne prednosti u odnosu na kratka vlakna kao što su otpornost na udarno opterećenje, olakšan proces završne obrade površine i dimenzijska stabilnost. Međutim, kratka vlakna su jeftinija, te se lako i brzo izrađuju. Kratka vlakna imaju manje pukotina i zbog toga imaju veću čvrstoću što je prikazano na slici 2.1. [2]



Slika 2.1. Utjecaj duljine vlakana na čvrstoću kompozita [3].

2. Orijentacija: Vlakna koja su orijentirana jednoosno imaju optimalnu krutost i čvrstoću kada opterećenje djeluje paralelno s vlaknima što je prikazano na slici 2.2. No, svojstva kompozita jednoosno ojačanog vlaknima vrlo su anizotropna. Vlakna se, umjesto u jednom smjeru, mogu polagati ortogonalno ili pod nekim drugim kutom; time se reducira maksimalna čvrstoća, ali se postižu jednoličnija svojstva kompozita



Slika 2.2. Utjecaj usmjerenja vlakana s obzirom na naprezanje za Ti-leguru ojačanu vlaknima bora [4].

Pri opterećenju koje djeluje paralelno s kontinuiranim jednosmjernim vlaknima može se zakonom miješanja predvidjeti teorijska vrijednost modula elastičnosti :

$$E_c = V_m \cdot E_m + V_f \cdot E_f$$

gdje je : E_c - modul elastičnosti kompozita [N/mm^2]

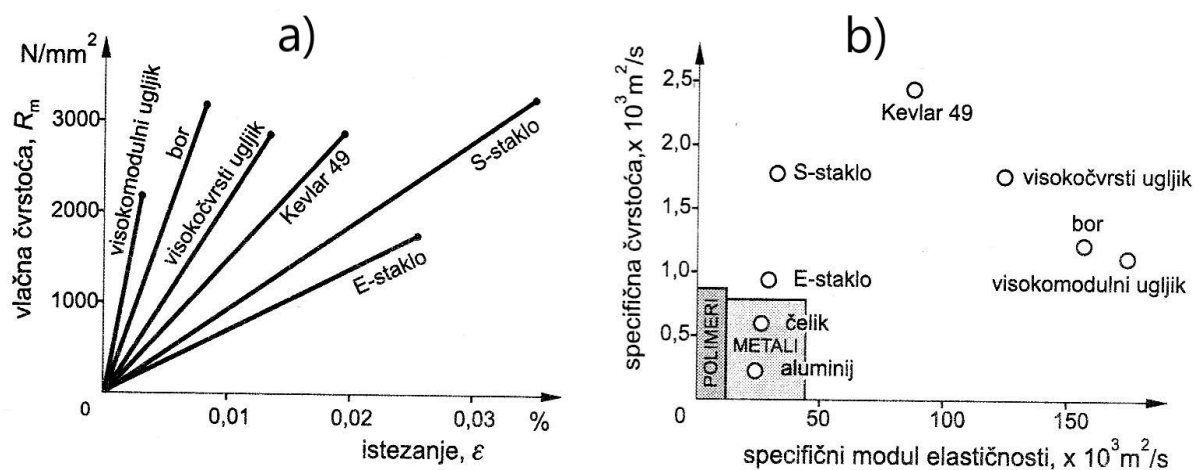
E_m - modul elastičnosti matrice [N/mm^2]

E_f - modul elastičnosti vlakna [N/mm^2].

Realni kompoziti uvijek imaju manji modul od teorijskog, uslijed nesavršenosti u materijalu [5].

3. Oblik: Najčešći oblik presjeka vlakana je kružni zbog laganog rukovanja i jednostavne proizvodnje. Šesterokutni i kvadratni oblici su mogući, ali njihove prednosti zbog visoke čvrstoće i visokog modula elastičnosti nisu dovoljne da bi se zanemarile poteškoće u rukovanju i procesu proizvodnje [2].

4. Materijal: Materijal vlakana izravno utječe na mehanička svojstva kompozita i vlakna će u pravilu imati visoku čvrstoću i modul elastičnosti. Osim dobrih svojstava, pri izboru materijala cijena ima bitnu ulogu [2]. Na slici 2.4. vidimo usporedbu materijala vlakana.



Slika 2.3. Usporedba materijala vlakana: a) krivulja „naprezanje-istezanje“, b) usporedba specifične čvrstoće i specifičnog modula elastičnosti metala i nekih vlakana [4].

2.2. Materijali vlakana

Staklena, ugljična i aramidna vlakna su najčešća vrsta vlakana u polimernim matricama. Ostali vlaknasti materijali koji se koriste u manjoj količini su bor, silicijev karbid (keramička vlakna) i aluminijski oksid.

2.2.1. Keramička vlakna

Kod keramičkih vlakana prisutne su kombinacije svojstava visoke čvrstoće i modula elastičnosti čak i kod visokih temperatura te općenito imaju veliku otpornost na utjecaj okoliša. Te karakteristike čine ih prikladnim ojačanjima konstrukcijskih materijala za primjenu pri povišenim i visokim temperaturama. Osnovna podjela keramičkih vlakana je na oksidna te neoksidna vlakna. Neki od predstavnika ovih skupina su keramička vlakna bazirana na silicijevom karbidu (SiC), silicijevom nitridu (Si₃N₄), aluminijskom oksidu (Al₂O₃), borovom karbidu (B₄C) i borovom nitridu (BN) [6].

2.2.2. Aramidna vlakna

Aramidi su aromatski poliamidi. Od nekih aramida mogu se izvlačiti vlakna. Aramidna vlakna su materijali visoke čvrstoće i visokog modula elastičnosti. Posebno su poželjna zbog izvanredne specifične čvrstoće bolje od metala. Kemijski je ta skupina materijala poznata kao poli (parafenilen tereftalamid). Postoji niz aramidnih materijala; trgovačka imena za dva najčešća su Kevlar i Nomex. Za prve postoji nekoliko stupnjeva (npr. Kevlar 29, 49 i 149) koji imaju različita mehanička ponašanja [1].

Navedene vrste kevlarnih vlakana imaju slične specifične čvrstoće, ali Kevlar 49 ima veću specifičnu krutost.

Vlakna se proizvode iz otopine polimera i jakih kiselina poput sumporne kiseline. Otopina se zatim ekstrudira u vruće boce pri 200 °C, ispere i osuši na špulama. Vlakna se zatim izvlače kako bi se povećala njihova čvrstoća i krutost. [2]

Ova vlakna imaju uzdužnu rasteznu čvrstoću i modul elastičnosti viši od ostalih vlaknastih polimernih materijala, no ona su ipak relativno slaba pri tlačnom opterećenju. Osim toga aramidna vlakna imaju visoku krutost i žilavost, otporni su na udar, otporni na puzanje te su otporni na umor materijala. Iako su aramidi polimeri oni su otporni na zapaljenje te su stabilni

pri povišenim temperaturama. Primjenjivi su pri temperaturama od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Podložni su razgradnji s jakim lužinama i kiselinama. Ova vlakna se najčešće koriste kod kompozita s polimernom matricom. Primjeri proizvoda koji su izrađeni od aramidnih vlakana su: neprobojni prsluci, sportski artikli, gume, užad, spojke, britve i ostalo. [4]

2.2.3. Staklena vlakna

Staklena vlakna su među najraširenijim industrijskim materijalima današnjice. Lako se proizvode od sirovina koje su gotovo neograničeno dostupne. Gotovo sva staklena vlakna su izrađena od sirovina koje sadrže silicijev dioksid. Ova vlakna imaju visoku tvrdoću, prozirnost, kemijsku otpornost, stabilnost i inertnost, kao i visoku čvrstoću, fleksibilnost i krutost. Neke od vrsta staklenih vlakana su: E – staklena vlakna, S – staklena vlakna, C – staklena vlakna [7].

"E" u E – staklu znači električno jer je kreirano za električne primjene. Međutim, može se koristiti i u druge svrhe, poput ukrasa i izradu konstrukcijskih dijelova. "S" u S – staklu znači veći sadržaj silicijevog dioksida. Nešto je čvršće od E stakla, a čvrstoća pri visokim temperaturama je postojana. Koristi se uglavnom za izradu zrakoplovnih dijelova. C staklena vlakna („C“ za koroziju) se koriste u kemijski agresivnim okruženjima, kao što su spremnici. Također postoje i R – staklo koje se koristi u konstrukcijskim primjenama kao što su gradnja; D – staklo (dielektrično) koristi se za dijelove koji zahtijevaju niske dielektrične konstante, poput; i A – stakla („*appearance*“ – izgled) koji se koristi za poboljšanje površinskog izgleda. Postoje i kombinacije poput E – CR stakla („E – CR“ znači električna i korozijska otpornost) i AR stakla (otpornog na alkalne medije) [2].

Površinske karakteristike staklenih vlakana su izuzetno važne jer čak i minimalne površinske greške mogu štetno utjecati na rastezna svojstva. Površinske greške lako se unose trljanjem ili brušenjem površine drugim tvrdim materijalom. Također, staklene površine koje su bile izložene normalnoj atmosferi čak i kratkih vremenskih razdoblja općenito imaju oslabljeni površinski sloj koji ometa vezu s matricom [1].

Neki nedostaci staklenih vlakana su da iako imaju visoku čvrstoću vlakna nisu kruta te se većina kompozita ojačanih staklenim vlaknima primjenjuje do $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, jer pri višim temperaturama većina polimera počinje teći ili dolazi do pogoršanja njihovih svojstva [4].

2.2.4. Borova vlakna

Bor je izuzetno krhak materijal. Komercijalno se proizvodi CVD (eng. *chemical vapour deposition*) postupkom taloženja na neku od podloga pa su samim time i vlakna bora na neki način kompozitni materijal. S obzirom na činjenicu da su za ovo taloženje potrebne prilično visoke temperature, izbor materijala za podlogu koji ide u jezgru gotovog borovog vlakana je ograničen. Općenito se u tu svrhu koristi fina volframova žica.

Kompoziti koji u sebi imaju borova vlakna se koriste prvenstveno u vojnoj i zrakoplovnoj industriji. Također se koriste kao sredstvo za ukrućivanje teniskih reketi, biciklističkih okvira, te palica za golf. U odnosu na ostala visokokvalitetna vlakna, borova vlakna imaju bolja svojstva u tlačnom području, što je posljedica njihovog većeg promjera. S druge strane, velika prepreka široko rasprostranjenoj uporabi borovih vlakana je visoka cijena u odnosu na druga vlakna [7].

2.2.5. Ugljična vlakna

Ugljična vlakna su visokoučinkovita, a najčešće se primjenjuju za ojačanje suvremenih kompozita s polimernom matricom. Razlozi su sljedeći :

1. Od svih vlaknastih materijala za ojačavanje ugljična vlakna imaju najveći specifični modul i najvišu specifičnu čvrstoću;
2. Pri visokim i povišenim temperaturama ugljična vlakna zadržavaju visok rastezni modul i visoku čvrstoću, ali može biti problema pri visokim temperaturama zbog oksidacije;
3. Ova vlakna karakterizira niz posebnih fizikalnih i mehaničkih svojstava čija kombinacija omogućuje postizanje svojstava koja se mogu primijeniti u raznim konstrukcijama. Pri sobnoj temperaturi ugljična vlakna su kemijski postojana na vlagu i niz otapala, kiselina i lužina;
4. Relativno jeftini postupci proizvodnje [4].

Izraz „ugljično vlakno“ može biti nelogičan jer je ugljik jedan od elemenata, a kristalni oblik ugljika okolišnim uvjetima nazivamo grafit. Ugljična vlakna nisu u potpunosti kristalna nego

se sastoje od kristalnih (grafitnih) i amorfni područja. Kristalna područja sadrže trodimenzionalni raspored heksagonske kristalne strukture koja je karakteristična za grafit [4]. Tako raspoređeni atomi koji daju formu grafita rezultiraju veoma izraženom anizotropnošću. Naime, veze među atomima definiraju modul elastičnosti materijala pa se tako veoma čvrstom vezom među atomima ugljika u ravnini heksagonskog sloja ostvaruje ekstremno visoki modul, dok slabe van der Waalsove veze između susjednih slojeva rezultiraju nižim modulom elastičnosti u tom smjeru. Prema tome, gotovo sve tehnike prerade ugljičnih vlakana imaju cilj dobivanja heksagonalnih kristalnih struktura duž osi vlakana [8].

Kompoziti ojačani ugljičnim vlaknima pokazuju izvrsnu specifičnu čvrstoću i krutost, otpornost na udarce, malu masu, trajnost i dobru otpornost na kemikalije i okoliš. Zbog ovih karakteristika spadaju u konstrukcijski najvažnije materijale za izradu raznih dijelova, uključujući zrakoplovne, automobilske, sportsku opremu, građevinarstvo itd. Iako imaju izvrsna mehanička svojstva po površini, ta ista mehanička svojstva su slabija s obzirom na debljinu, posebno otpornost na interlaminarnu delaminaciju, što je glavni izazov u oblikovanju složenih konstrukcija [9].

3. Kompoziti s polimernom matricom

Polimerni materijali često se ojačavaju vlaknima te nastaje polimerni kompozit. Matrica može biti napravljena od duromera, međutim sve češća je primjena plastomera. U slučaju duromera pojam „smola“ se koristi za obilježavanje tvari relativno niske molekulske mase koja se kad poraste umreživanjem oblikuje u duromer. Najraširenije i najjeftinije polimerne smole su poliesteri i vinil esteri. Epoksidne smole su boljih svojstava, ali su skuplje i zahtijevaju naknadno očvršćivanje pa je postupak izrade dulji i skuplji, stoga se manje koriste. Plastomerni materijali su već polimerizirani sustavi prije nastanka kompozita i prerađuju se taljenjem. Talina je viskozna pa se teže prerađuju, međutim jednom utvrđeni postupak prerade rezultira značajno kraćim ciklusima [4].

3.1. Plastomerna matrica

Plastomeri mogu imati uređenu kristalnu i amorfnu (neuređenu) fazu. Veze unutar lanaca su jake kovalentne, dok su veze između lanaca mnogo slabije sekundarne veze. Kada se materijal zagrijava na temperaturu njegove obrade, upravo se te slabe sekundarne veze raspadaju i omogućavaju lancima da se kreću i klizu jedan pored drugog. Kako se lanci produljuju, molekulska se masa povećava što rezultira višim viskozitetom, talištem i jače isprepletenom strukturom, što sve dovodi do poboljšanja mehaničkih svojstava. Međutim, ova poboljšanja uporabnih svojstava loše utječu na preradljivost i na impregnaciju vlakana kod izrade kompozita [10].

Tijekom osamdesetih godina bilo je dostupno desetak vrsta plastomernih matrica. Broj koji je danas dostupan na tržištu je puno skromniji. Četiri su najvažnija predstavnika: poli(eter-eter-keton) (PEEK), poli(fenilen-sulfid) (PPS), polipropilen (PP), te poli(eter-imid) (PEI). PEEK, PPS i PEI obično se koriste za plastomerne kompozite ojačane kontinuiranim vlaknima. Polipropilenska matrica niže je temperature primjene koja se većinom koristi u automobilskoj industriji. Plastomeri visokih performansi, kao što su PEEK, PPS i PEI, su aromatski spojevi, sadrže benzenski prsten (zapravo fenilni prsten) koji povećava temperaturu staklastog prijelaza T_g i pruža toplinsku stabilnost.

3.2. Duromerna matrica

Duromeri su polimeri koji nastaju iz nezasićenih spojeva umreživanjem u kalupu. Duromerne kompozitne matrice uključuju poliestere, vinil estere, epoksidne smole, bismaleimide, cijanat estere i fenolne kiseline. Poliesterske smole su dominantne, a epoksidne smole se koriste kod zahtjevnijih konstrukcija. Bismaleimidi se koriste prvenstveno u temperaturnom području od 135–180 °C. Poliesteri i vinilni esteri, koji podnose približno iste temperature kao i epoksi (do 135 °C), koriste se za prilično široke komercijalne primjene, ali se rijetko koriste za kompozitne matrice visokih performansi zbog svojih lošijih svojstava. Cijanat esteri su relativno nova klasa smola koji se koristi kao zamjena epoksidima i bismaleimidima, nude neke prednosti u manjoj apsorpciji vlage i atraktivnim električnim svojstvima, ali po znatno višoj cijeni. Fenolni se sustavi primjenjuju pri visokim temperaturama i imaju izuzetnu otpornost na dim i vatru i često se koriste za unutarnje dijelove zrakoplova.[11]

3.3. Usporedba plastomera i duromera

Uporaba plastomernih matrica kod kompozita ojačanih kontinuiranim vlaknima zaostaje za uporabom duromernih matrica. Otežana izrada kontinuirane matrice od plastomera kod kompozita ojačanih vlaknima je posljedica visoke viskoznosti rastaljenog plastomera. Kontinuirana vlakna su ugrađena u duromere u stanju njihove male viskoznosti prije nego što ih kemijska reakcija pretvori u čvrsti polimer. Viskoznost rastaljenog plastomera nekoliko je puta viša od viskoznosti neumrežene smole za izradu duromera, što otežava impregniranje snopova vlakana i vlaženje vlakana. Niska viskoznost neumrežene smole izrazita je prednost u odnosu na rastaljene plastomere u proizvodnji kompozita visoke učinkovitosti. Prednosti kompozita s plastomernom matricom proizlaze iz linearne strukture plastomernih molekula koje su za razliku od duromernih smola već polimerizirane. Pri tome sekundarne veze između makromolekula plastomera omogućuju taljenje. Iz tih razloga kraće je vrijeme izrade te postoji mogućnost zavarivanja i recikliranja, a plastomeri su otporniji na oštećenja.

Kako kod plastomera prisutnost vlakana slabo utječe na T_g i T_m , odabir matrice ima velik utjecaj na ponašanje kompozita pri različitim temperaturama. Učinak kemikalija (ili drugih sredina, poput ultraljubičastog svjetla) na svojstva kompozita s plastomernom matricom

također je određen kemijskom (ili okolišnom) otpornošću plastomera odabranog za matricu.[12]

Plastomerni kompoziti imaju neke posebne prednosti i nedostatke u odnosu na duromerne. Prednosti plastomernih kompozita uključuju povećanu otpornost na udar u odnosu na duromerne. Još jedna velika prednost plastomernih kompozita je mogućnost promjene stanja. Sirovi plastomeri su pri sobnoj temperaturi u čvrstom stanju. Prilikom impregniranja vlakana za ojačanje uslijed djelovanja topline i tlaka, dolazi do fizičke promjene, a ne do kemijske reakcije kao kod duromera. To omogućuje i preoblikovanje plastomernih kompozita. To nije moguće kod duromernih smola. Takvo ponašanje omogućuje i recikliranje plastomernog kompozita nakon upotrebe. Jedan nedostatak plastomera je taj što je mnogo teže impregnirati vlakna za ojačavanje jer je plastomer prirodno u čvrstom stanju. Prilikom prerade mora se zagrijati do tališta, a za impregniranje vlakana je potreban visok tlak, a kompozit se mora pod tim tlakom ohladiti. To je složeno i razlikuje se od tradicionalnog načina izrade duromernih kompozita. Proces zahtijeva uporabu posebnog alata, tehnike i opreme, od kojih su mnoge skupe.

Plastomeri i duromeri formiraju teško spojivu mješavinu zbog velikih razlika u polaritetu i visokih međufaznih napetosti. Međutim, ove smjese mogu smanjiti troškove i poboljšati obradivost plastomera. Toplinska i kemijska svojstva plastomera poboljšavaju se miješanjem s duromerom. Dok plastomeri poboljšavaju duromerima udarnu čvrstoću, prijanjanje i mogućnost obojenja [13].

3.4. Postupci izrade kompozita s plastomernom matricom

3.4.1. Pultrudiranje

U ovom postupku plastomerni preprezi se provlače kroz sapnicu te tako nastaje gotov proizvod. Postupak je otežan radi velike viskoznosti plastomera te su potrebne velike sile pri provlačenju. Plastomerni materijali koji se koriste pri proizvodnji kompozita su uglavnom PP, PUR, PEEK, PPS i PEI, dok su ugljična i staklena vlakna najčešća vrsta ojačavanja. Sapnica za plastomerno pultrudiranje ima suženje na ulazu radi sabijanja ulaznog materijala i ima velike temperaturne zahtjeve zbog visoke temperature obrade plastomera. Sabijanje materijala počinje kada dođe do suženog dijela sapnice i nastavlja se dok ne napusti sapnicu. Kompozit

se skrućuje prolaskom kroz ohlađeni dio sapnice. Nakon toga se pultrudirani dio siječe na potrebne dimenzije. Nedostaci ovog postupka su visoka početna ulaganja, nemogućnost proizvodnje kompleksnih proizvoda te su plastomerne sirovine skuplje od duromernih [14].

3.4.2. Namotavanje filamenata

U ovom postupku plastomerne trake preprega se namotavaju oko osovine. Najčešće korištene plastomerne trake su PEEK, PPS, PP i PMMA. Pri namotavanju plastomerne trake primijenjeni su toplina i tlak na mjestu kontakta između valjka i igle kako bi došlo do taljenja i konsolidacije plastomera. U ovom postupku se zagrijava jedino područje koje se oblikuje. Zagrijavati se može vrućim valjkom, otvorenim plamenikom, vrućim zrakom te laserom. Zagrijana traka oblikuje se hladnim valjkom i taj postupak može trajati kraće od 5 sekundi. Tri parametra koji utječu na kvalitetu dijela izrađenog namotavanjem su jačina topline, brzina namotavanja i sila kojom se traka oblikuje. Da bi se dobio dobro oblikovan proizvod, moraju biti određeni optimalni proizvodni parametri za svaki izvor topline i svaku vrstu materijala koja se koristi u postupku proizvodnje. Nedostaci ovog postupka su zahtjevan proces lokaliziranja topline i stlačivanja pomoću valjka te velika početna ulaganja [14].

3.4.3. Izravno prešanje

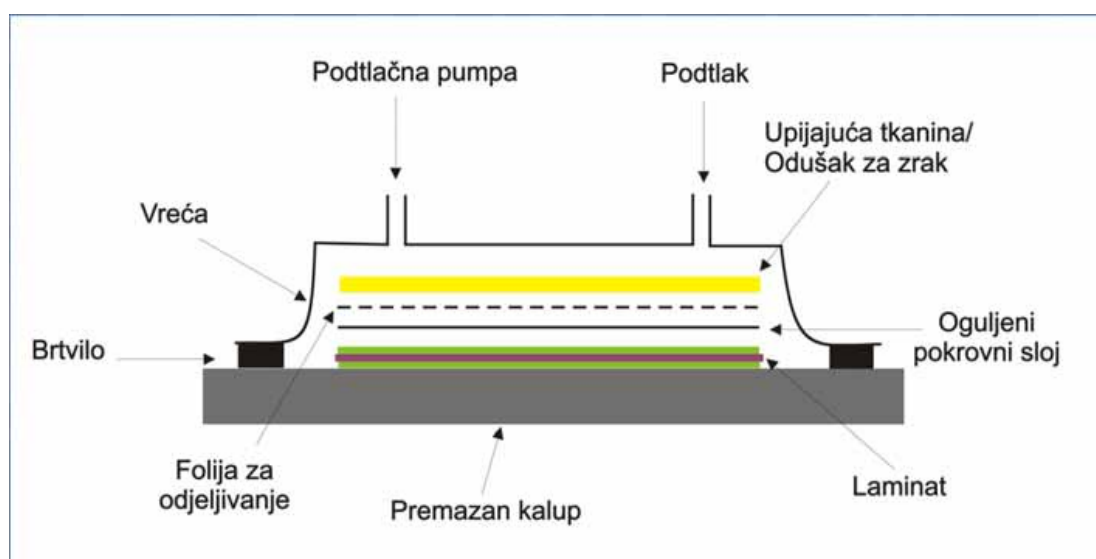
Postupak izravnog prešanja plastomernog preprega (GMT) vrlo je sličan postupku izravnog prešanja pločastog osmoljenog mata (SMC), glavna razlika između njih je vrsta materijala koji se koristi u pojedinom postupku. GTM je dva do tri puta brži od SMC i on je jedini postupak proizvodnje plastomernih kompozita koji ima raširenu primjenu. GTM je uglavnom izrađen od PP ojačanog kontinuiranim, ali nasumično usmjerenim staklenim vlaknima. Pri oblikovanju taline zagrijani materijal je stlačen između polovica kalupa kako bi smola i vlakna napunili kalupnu šupljinu. Ciklus obično traje od 30 do 60 sekundi. Kalup se brzo zatvara pod pritiskom kako bi se dobio GTM i drži se zatvoren dok se dijelovi ne ukrute. U ovom procesu kalup se ne zagrijava. Ovo je jedna od najbržih tehnika proizvodnje kompozita te je zbog visoke produktivnosti potrebno manje alata i radne snage. Nedostatak ovog postupka je to što su visoka početna ulaganja te osrednja kvaliteta površine gotovog proizvoda [14].

3.4.4. Podtlačno oblikovanje

Ručno se slože sve komponente kompozita nakon čega se na njega stavlja plastomerna folija. Pomoću podtlačne pumpe uklanja se zrak i podtlak kojim se poboljšava spajanje elemenata kompozita, što je vidljivo na slici 3.4.

Prednosti: proizvodnja kompozita s većim udjelom vlakana, manje pukotina u materijalu, bolje je vlaženje vlakana i protok taline kroz ojačanja zbog djelovanja povišenog tlaka, vakuumski pokrov smanjuje količinu ishlapljenih štetnih tvari tijekom skrućivanja.

Nedostaci: proces je nešto skuplji i zahtjeva prilično veliku vještinu operatera (vrlo bitno kod kontrole miješanja i udjela smole) [15].



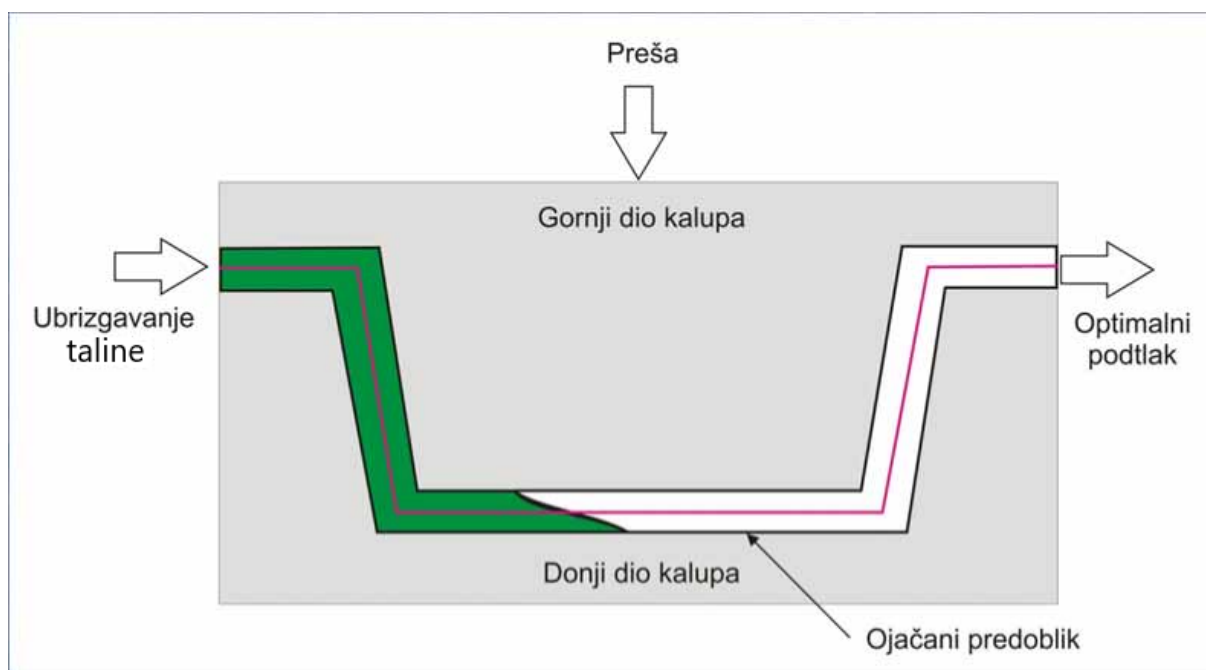
Slika 3.1. Podtlačno oblikovanje [15].

3.4.5. Injekcijsko-posredno prešanje taline s uloženim trodimenzionalnim ojačavajućim predoblikom

Predoblik od vlakana se postavlja u kalup (mogu se stvoriti različiti oblici koji se drže vezivom). Kalup se zatvara te se u njega ubrizgava talina (može se upotrijebiti i podtlak), što je prikazano na slici 3.4. Nakon što je kalup popunjen zatvaraju se mjesta na kojima je ubrizgana talina i dolazi do skrućivanja pri sobnoj temperaturi.

Prednosti: proizvodnja kompozita s visokim udjelom vlakana i s niskim udjelom pukotina u materijalu, budući da je smola zatvorena u kalup, ne predstavlja opasnost za okoliš, puno bolji izgled površine.

Nedostaci: vrlo skup i težak alat, proizvodnja je ograničena na manje komade, mogu se pojaviti mjesta na proizvodu koja nisu popunjena smolom, što može dovesti do velikog škarta [15].



Slika 3.2. Injekcijsko-posredno prešanje taline s uloženim trodimenzionalnim ojačavajućim predoblikom[15].

4. Samoobnavljanje

Najveći problem kod primjene materijala jest njihovo trošenje ili oštećenje. U posljednjih deset do dvadeset godina, razvijeni su materijali sa sposobnošću samoobnavljanja. Glavna prednost ovih pametnih materijala jest mogućnost obnavljanja materijala i njegovih svojstava pri raznim oštećenjima. Materijali s mogućnošću samoobnavljanja imaju perspektivu da budu pouzdaniji, sigurniji, dugotrajniji i jeftiniji za održavanje od klasičnih materijala [16].

Postoje autonomni i neautonomni procesi samoobnavljanja. Autonomni u sebi sadrže dodatke poput mikrokapsula, cjevčica i sl. s integriranim inicijatorom samoobnavljanja poput monomera, katalizatora, očvršćivala koji se aktiviraju po oštećenju. Za oporavak neautonomnih potrebno je u sustav unijeti dodatnu energiju, npr. toplinu. Kopolimer E/MAA je plastomer koji je pokazao odličnu sposobnost samoobnavljanja različitih vrsta oštećenja upravo zahvaljujući djelovanju topline. Balistička ispitivanja E/MAA pokazala su da je za samoobnavljanje dovoljna toplina nastala prolaskom metka kroz polimernu ploču. U tim eksperimentima su vidljive tri različite faze tijekom obnavljanja. U prvoj fazi odmah nakon oštećenja nastaje elastična talina. Nakon toga slijedi druga, kratkotrajna faza zavarivanja i skrućivanja, te na kraju treća faza u kojoj dolazi do dugotrajnog obnavljanja [17].

Iako projektil prolazi u potpunosti kroz film, primijećeno je da se samoobnavljanje odvija trenutno i automatski, te da projektil ostavlja samo mali trag oštećenja na mjestu prolaska kroz film [18].

4.1. Ionomeri

Ionomeri su sintetski polielektroliti koji se sastoje od električki neutralnih i ioniziranih skupina koje su nasumično ili pravilno raspoređene duž polimernog lanca. Pri niskim temperaturama ionomeri se ponašaju kao umreženi polimeri (elastomeri), a pri povišenim temperaturama poput plastomera.

Većina ionomera se proizvodi kopolimerizacijom slobodnih radikala. Kopolimerizacijom etielan s metakrilnom i/ili akrilnom kiselinom pri visokom tlaku nastaju E/MAA ili E/AA. Ovi ionski kopolimeri imaju nisko talište, te poboljšanu žilavost i čvrstoću. Druga važna vrsta ionomera su kopolimeri akrilata s akrilnom i/ili metakrilnom kiselinom, a dobiveju se kopolimerizacijom slobodnih radikala ili kopolimerizacijom u otopini [19].

5. Eksperimentalni dio

U radu su uspoređena svojstva pri savojnom opterećenju i prividna smična međuslojna čvrstoća kompozita s jednim i s dva sloja vlakana. Kompozit s jednim slojem vlakana izrađen je i ispitan u sklopu završnog rada Jagar (2019.) [22], dok su za potrebe ovog rada izrađene tri ploče s dva sloja vlakana, a rezultati ispitivanja su međusobno uspoređeni. Tri istovrsne ploče napravljene su s ciljem provjere ponovljivosti postupka izrade.

5.1. Materijal matrice E/MAA - Surlyn 8940®

Surlyn® je komercijalna plastomerna ionomerna smola proizvođača DuPont. Sadrži 5,4 mol% metakrilne kiseline i neutraliziran je alkalnim metalima ili cinkovim hidroksidom. Najpoznatiji je samoobnavljajući ionomer. [20]

U tablici 5.1. su prikazana neka svojstva Surlyn® 8940 prema specifikaciji proizvođača.

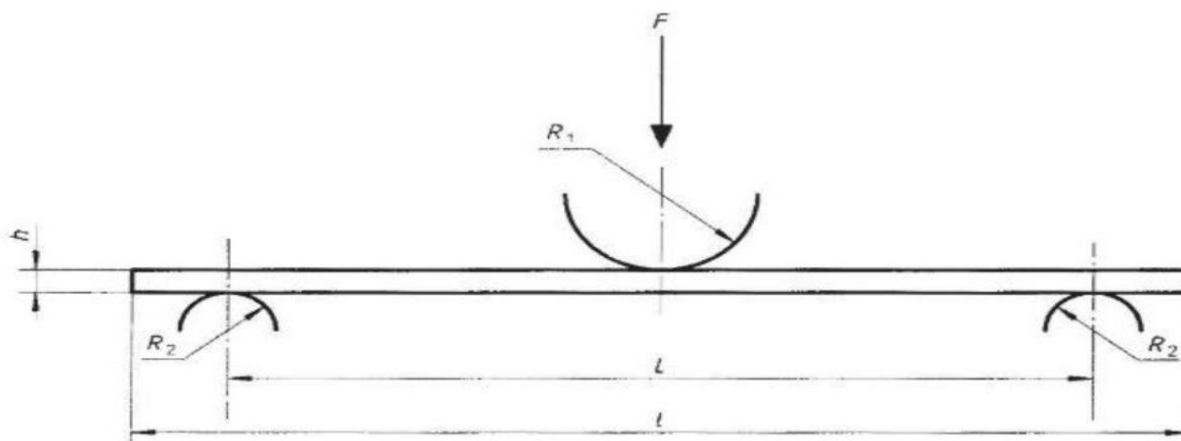
Tablica 5.1. Neka svojstva Surlyn® 8940 [20].

Svojstvo	Vrijednost
Gustoća	0,95 g/cm ³
Protok taljevine	2,8g/10min
Talište	94 °C
Ledište	59 °C
Točka mekšanja	63 °C
Toplinska vodljivost	0.246 W/mK
Tvrdoća (Shore D)	65
Granica tečenja	15 N/mm ²
Prekidna čvrstoća	33 N/mm ²
Savojni modul elastičnosti (23 °C)	350 N/mm ²
Savojni modul elastičnosti (-20 °C)	717 N/mm ²
Ukupno istezanje	470 %

5.2. Ispitivanje savojnog modula elastičnosti

Ispitivanja savojnog modula elastičnosti su provedena na kidalici, ZMG WEB Thueringer Industriewerk Rauenstien, u mjernom području 0-980 N, brzinom ispitivanja 7 mm/min. Ispitana su svojstva dviju kompozitnih ploča jednakog sastava i načina proizvodnje u jednakim uvjetima.

Ispitivanje je provedeno po normi HRN EN ISO 14125:2005 *Plastični kompoziti ojačani vlaknima – Određivanje savojnih svojstava*. Ispitna tijela su pravokutnog poprečnog presjeka. Izmjerena je širina b i debljina h svakog ispitnog tijela te je izračunata srednja debljina h_{sr} . Duljina ispitnog tijela iznosi $20h_{sr}$, a razmak između oslonaca iznosi $16h_{sr}$. Ispitno tijelo je simetrično postavljeno na dva nosača, te je opterećeno po sredini. Zabilježena je sila i odgovarajući progib uzorka tijekom ispitivanja, te je na osnovi tih podataka nacrtana krivulja naprezanje/istezanje. Ovakvo ispitivanje se naziva ispitivanje savijanja u tri točke i shematski je prikazano na slici 5.1.



Slika 5.1. Shematski prikaz ispitivanja savijanja u tri točke [21].

Savojni modul elastičnosti se računa pomoću sljedećih izraza:

$$\sigma = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2},$$

gdje su: σ – naprezanje, [N/mm²]

F – sila, narinuto opterećenje, [N]

l – razmak između oslonaca, [mm]

b – širina ispitnog tijela, [mm]

h – debljina ispitnog tijela [mm];

$$\varepsilon = \frac{6 \cdot f \cdot h}{l^2},$$

gdje su: ε – istežanje, [mm/mm]

f – progib, [mm]

Modul elastičnosti određuje se iz nagiba pravca približno linearnog područja dijagrama naprezanje-istezanje za pojedino ispitno tijelo.

Savojna čvrstoća se računa pomoću izraza:

$$R_m = \frac{3 \cdot F_{\max} \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

gdje su:

R_m – savojna čvrstoća, [N/mm²]

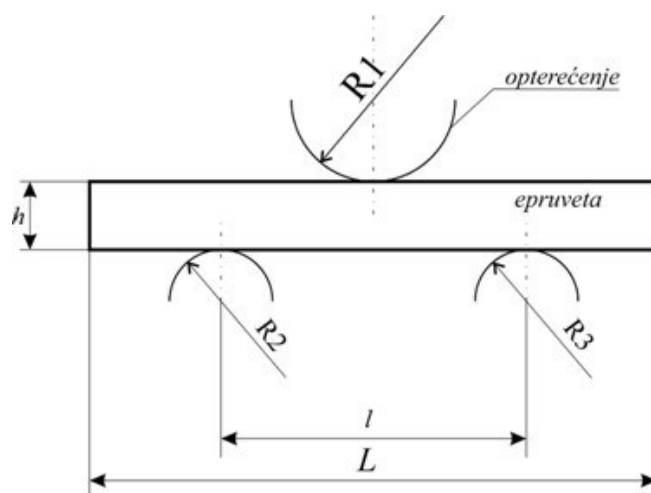
F_{\max} – maksimalna sila, [N]

5.3. Ispitivanje prividne smične međuslojne čvrstoće

Mjera za kvalitetu granične površine, odnosno međusloja, jest prividna smična međuslojna čvrstoća. Ona ovisi o čvrstoći prijanjanja između vlakna za ojačanje i matrice te o veličini dodirnih površina vlakana i adhezije na tim površinama. Ispitivanja se provode na univerzalnoj kidalici prilikom čega omjer debljine ispitnog tijela i razmaka među osloncima mora biti mali kako bi se povećao udio smičnih naprezanja i time potaknuo lom na dodirnoj površini između ojačala i matrice.[21]

Ispitivanje prividne smične međuslojne čvrstoće je provedeno na kidalici, ZMG WEB Thueringer Industrierwerk Rauenstien. Raspon sila opterećenja kidalice u ovom slučaju je 0-2400 N, a brzina ispitivanja 7 mm/min.

Ispitivanje je provedeno po normi EN ISO 14130 : 1997. *Plastični kompoziti ojačani vlaknima -- Određivanje prividne međuslojne smične čvrstoće metodom kratke grede*. Ispitna tijela su u obliku kvadra (kratka greda). Površina i rubovi ne smiju biti oštećeni. Debljina duž cijele duljine mora biti unutar $\pm 5\%$ srednje debljine ispitnog tijela. Širina pojedinog ispitnog tijela mora biti konstantna do unutar 0,2 mm odstupanja. Razmak između oslonaca l postavljen je na udaljenosti od $5h$, gdje je h debljina ispitnog tijela. Brzina ispitivanja je bila 7mm/mm $\pm 0,2$ mm. Ispitno tijelo smješteno je simetrično preko dva paralelna nosača s neobrađenom površinom u kontaktu s nosačima, sila je primijenjena ravnomjerno po širini ispitnog uzorka, pomoću podmetača za opterećivanje, te paralelno i na sredini između nosača. Shema ispitivanja je prikazana na slici 5.2.



Slika 5.2. Shematski prikaz ispitivanja prividne smične međuslojne čvrstoće metodom kratke grede [21].

Prividna smična međuslojna čvrstoća se računa pomoću sljedećeg izraza:

$$\tau = \frac{3 \cdot F_{\max}}{4 \cdot b \cdot h}$$

5.4. Postupak izrade kompozitnih ploča

Za izradu kompozitnih ploča korišteni su ionomer Surlyn® 8940 i jednosmjerna ugljična vlakna i one su ispitivane u eksperimentalnom dijelu rada. Zbog potreba pri ispitivanju izrađene su dvije kompozitne ploče. Prilikom izrade kompozitnih ploča nisu mijenjani parametri izrade. Parametri izrade su prikazani u tablici 5.2.

Tablica 5.2. Parametri izrade kompozitnih ploča.

Ploča	1	2
Trajanje vakuumiranja [min]	30	30
Temperatura u preši [°C]	170	170
Vrijeme prešanja [min]	30	30
Tlak prešanja [bar]	40	40

Za svaku kompozitnu ploču napravljene su po tri ploče od E/MAA i između njih su postavljena dva sloja jednoosno usmjerenih ugljičnih vlakana, na način polimer/vlakna/polimer/vlakna/polimer. Ovako posložen laminat stavi se u vreću te se

vakuumira pri sobnoj temperaturi kako bi se smanjio udio zarobljenog zraka u kompozitu. Zajedno s vrećom laminat se stavi u peć na povišenu temperaturu, bez prekida vakuumiranja dok se ne rastali, a potom se i preša pri povišenoj temperaturi prema parametrima navedenim u tablici 5.2. Iz ploče 1 izrezana su 4 ispitna tijela, dok je iz ploče 2 izrezano 5 ispitnih tijela koja su podvrgnuta ispitivanjima za određivanje savojnog modula elastičnosti i savojne čvrstoće, a za ispitivanje prividne smične međuslojne čvrstoće ispitivana je ploča 1 i iz nje je izrezano 5 ispitnih tijela. Sva ispitna tijela izrezana su paralelno s vlaknima. Rezultati su analizirani u poglavlju 6.

6. Rezultati mjerenja

6.1. Rezultati mjerenja prividne smične međuslojne čvrstoće ploče 1 s dva sloja vlakana

U tablici 6.1. su prikazane dimenzije ispitnih tijela (b , h), razmak između oslonaca (l), maksimalna sila (F_{max}), te prividna smična međuslojna čvrstoća (τ).

Tablica 6.1. Rezultati ispitivanja prividne smične međuslojne čvrstoće ploče 1 s dva sloja vlakana.

	Ispitno tijelo 1	Ispitno tijelo 2	Ispitno tijelo 3	Ispitno tijelo 4	Ispitno tijelo 5
b [mm]	12,26	11,4	12,38	12,14	12,54
h [mm]	2,4	2,62	2,48	2,34	2,48
l [mm]	12	12	12	12	12
F_{max} [N]	192	194	162	186	152
τ [N/mm ²]	4,89	4,87	3,96	4,91	3,83

6.2. Rezultati mjerenja savojnog modula elastičnosti ploče 1 sa dva sloja vlakana

U tablici 6.2. prikazane su dimenzije ispitnih tijela koje su korištene za ispitivanje mjerenja savojnog modula elastičnosti druge ploče.

Tablica 6.2. Dimenzije ispitnih tijela prve ploče i maksimalne sile.

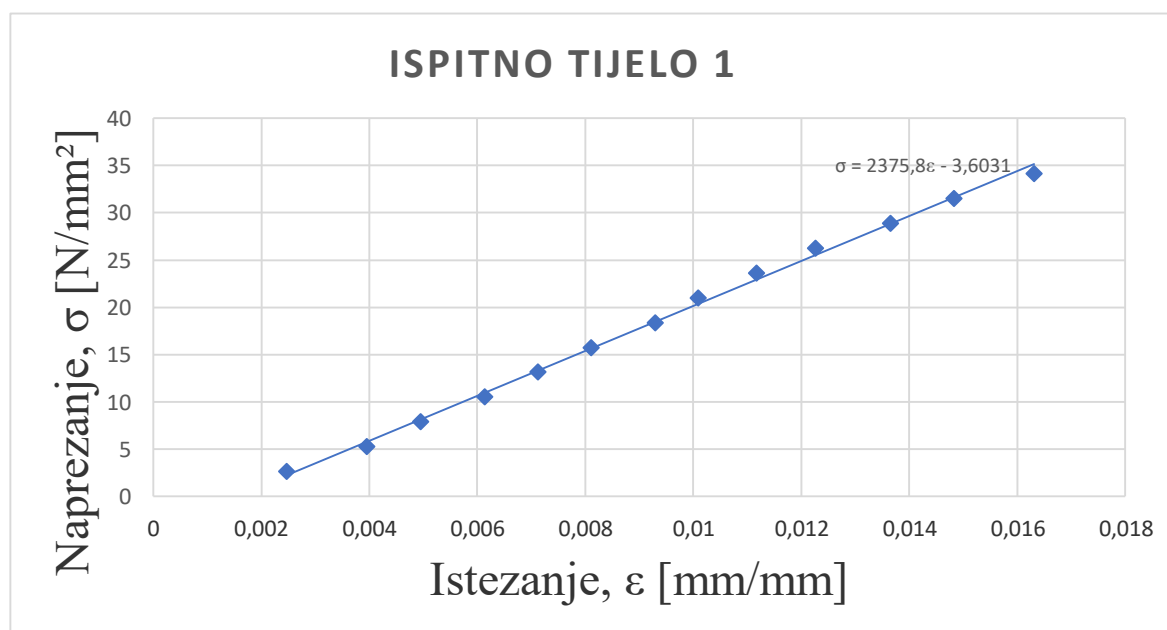
	Ispitno tijelo 1	Ispitno tijelo 2	Ispitno tijelo 3	Ispitno tijelo 4
b [mm]	15,32	15,50	15,42	15,38
h [mm]	2,38	2,42	2,44	2,36
l [mm]	38	38	38	38
F_{max} [N]	58	64	54	72

U tablici 6.3. prikazani su progibi, sile, naprezanje te istežanje ispitnog tijela 1.

Tablica 6.3. Rezultati savojnog ispitivanja ispitnog tijela 1

F [N]	f [mm]	σ [N/mm ²]	ε [mm/mm]
4	0,25	2,6	0,0025
8	0,40	5,3	0,0039
12	0,50	7,9	0,0049
16	0,62	10,5	0,0061
20	0,72	13,1	0,0071
24	0,82	15,8	0,0081
28	0,94	18,4	0,0093
32	1,02	21,0	0,0101
36	1,13	23,6	0,0112
40	1,24	26,3	0,0123
44	1,38	28,9	0,0136
48	1,50	31,5	0,0149
52	1,65	34,2	0,0163

S obzirom na rezultate ispitivanja dobije se dijagram prikazan na slici 6.1.:



Slika 6.1. Dijagram naprežanje-istežanje ispitnog tijela 1.

Iz dijagrama se može očitati savojni modul elastičnosti za ispitno tijelo 1 i njegova vrijednost iznosi: $E_I = 2375,8 \text{ N/mm}^2$.

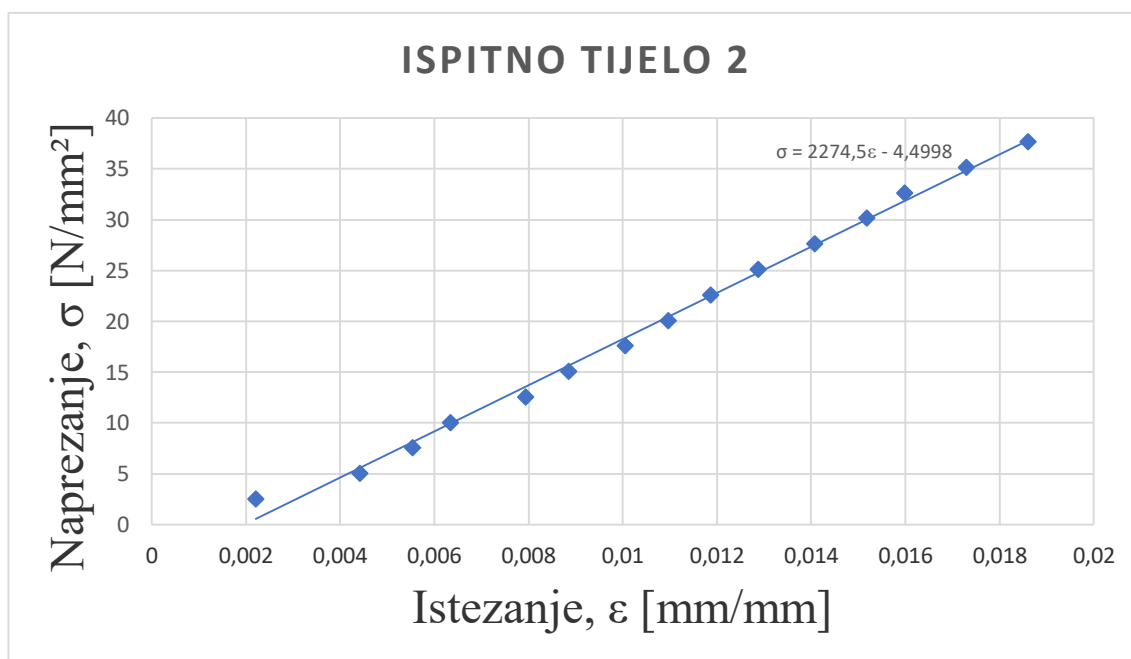
Savojna čvrstoća ispitnog tijela 1 iznosi $R_{mI} = 38,1 \text{ N/mm}^2$.

U tablici 6.4. prikazani su progibi, sile, naprezanje te istežanje ispitnog tijela 2.

Tablica 6.4. Rezultati savojnog ispitivanja ispitnog tijela 2

F [N]	f [mm]	σ [N/mm ²]	ε [mm/mm]
4	0,22	2,5	0,0022
8	0,44	5,0	0,0044
12	0,55	7,5	0,0055
16	0,63	10,0	0,0063
20	0,79	12,6	0,0079
24	0,88	15,1	0,0088
28	1,00	17,6	0,0100
32	1,09	20,1	0,0110
36	1,18	22,6	0,0119
40	1,28	25,1	0,0129
44	1,40	27,6	0,0141
48	1,51	30,1	0,0152
52	1,59	32,7	0,0160
56	1,72	35,2	0,0173
60	1,85	37,7	0,0186

S obzirom na rezultate ispitivanja dobije se dijagram prikazan na slici 6.2.:



Slika 6.2. Dijagram naprežanje-istežanje ispitnog tijela 2.

Iz dijagrama se može očitati savojni modul elastičnosti za ispitno tijelo 2 i njegova vrijednost iznosi: $E_2 = 2274,5 \text{ N/mm}^2$.

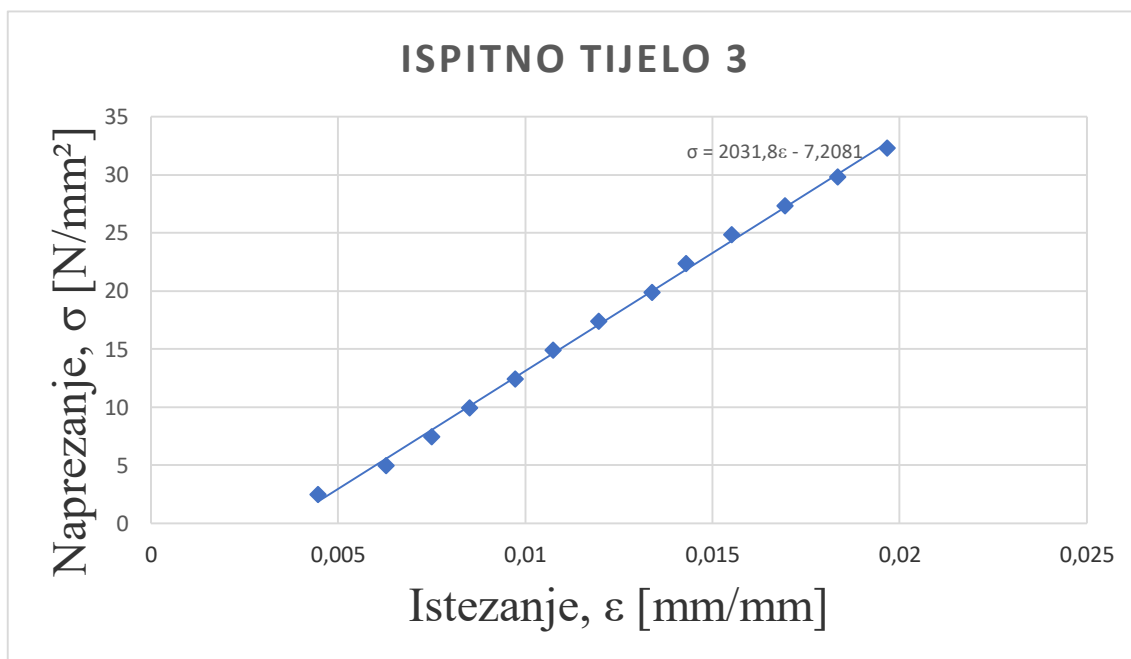
Savojna čvrstoća ispitnog tijela 2 iznosi $R_{m2} = 40,2 \text{ N/mm}^2$.

U tablici 6.5. prikazani su progibi, sile, naprezanje te istežanje ispitnog tijela 3.

Tablica 6.5. Rezultati savojnog ispitivanja ispitnog tijela 3.

F [N]	f [mm]	σ [N/mm ²]	ε [mm/mm]
4	0,44	2,5	0,0045
8	0,62	5,00	0,0063
12	0,74	7,5	0,0075
16	0,84	9,9	0,0085
20	0,96	12,4	0,0097
24	1,06	14,9	0,0107
28	1,18	17,4	0,0120
32	1,32	19,9	0,0134
36	1,41	22,4	0,0143
40	1,53	24,8	0,0155
44	1,67	27,3	0,0169
48	1,81	29,8	0,0184
52	1,94	32,23	0,0197

S obzirom na rezultate ispitivanja dobije se dijagram prikazan na slici 6.3.:



Slika 6.3. Dijagram naprežanje-istežanje ispitnog tijela 3.

Iz dijagrama se može očitati savojni modul elastičnosti za ispitno tijelo 3 i njegova vrijednost iznosi: $E_3 = 2031,8 \text{ N/mm}^2$.

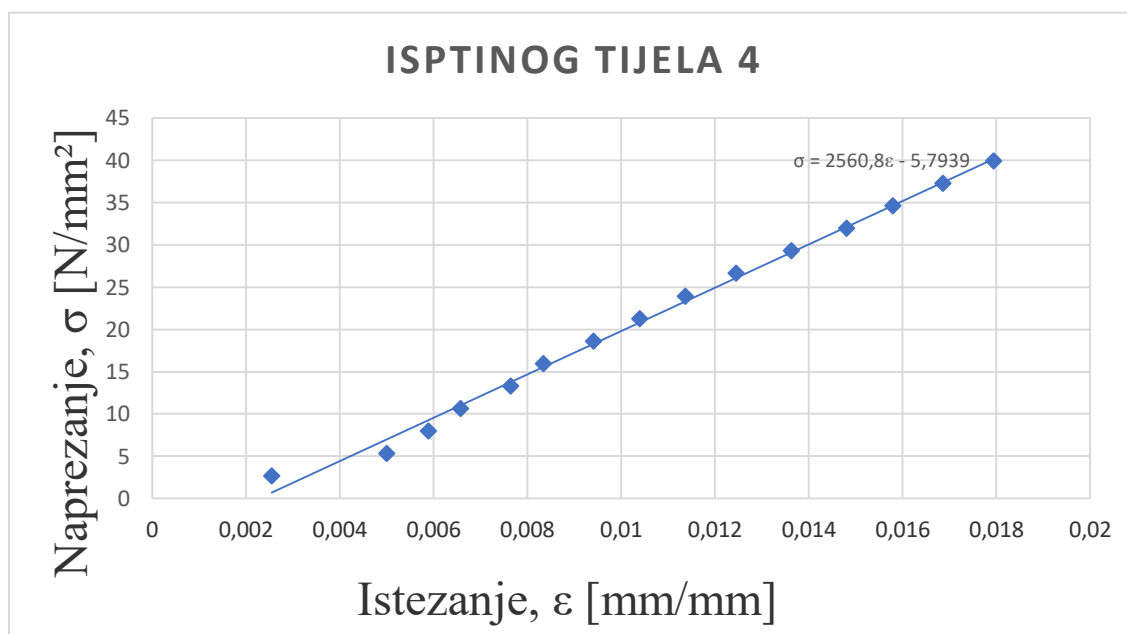
Savojna čvrstoća ispitnog tijela 3 iznosi $R_{m3} = 33,5 \text{ N/mm}^2$.

U tablici 6.6. prikazani su progibi, sile, naprezanje te istežanje ispitnog tijela 4.

Tablica 6.6. Rezultati savojnog ispitivanja ispitnog tijela 4.

F [N]	f [mm]	σ [N/mm ²]	ε [mm/mm]
4	0,26	2,7	0,00255
8	0,51	5,3	0,0050
12	0,6	8,0	0,0059
16	0,67	10,6	0,0066
20	0,78	13,3	0,0076
24	0,85	16,0	0,0083
28	0,96	18,6	0,0094
32	1,06	21,3	0,0104
36	1,16	24,0	0,0114
40	1,27	26,6	0,0125
44	1,39	29,3	0,0136
48	1,51	31,9	0,0148
52	1,61	34,6	0,0158
56	1,72	37,3	0,0169
60	1,83	39,9	0,0179

S obzirom na rezultate ispitivanja dobije se dijagram prikazan na slici 6.4.:



Slika 6.4. Dijagram naprežanje-istežanje ispitnog tijela 4.

Iz dijagrama se može očitati savojni modul elastičnosti za ispitno tijelo 4 i njegova vrijednost iznosi: $E_4 = 2560,8 \text{ N/mm}^2$.

Savojna čvrstoća ispitnog tijela 4 iznosi $R_{m4} = 47,9 \text{ N/mm}^2$.

6.3. Rezultati mjerenja savojnog modula elastičnosti ploče 2 s dva sloja vlakana

U tablici 6.7. prikazane su dimenzije ispitnih tijela koje smo koristili za ispitivanje mjerenja savojnog modula elastičnosti druge ploče.

Tablica 6.7. Dimenzije ispitnih tijela druge ploče i maksimalne sile.

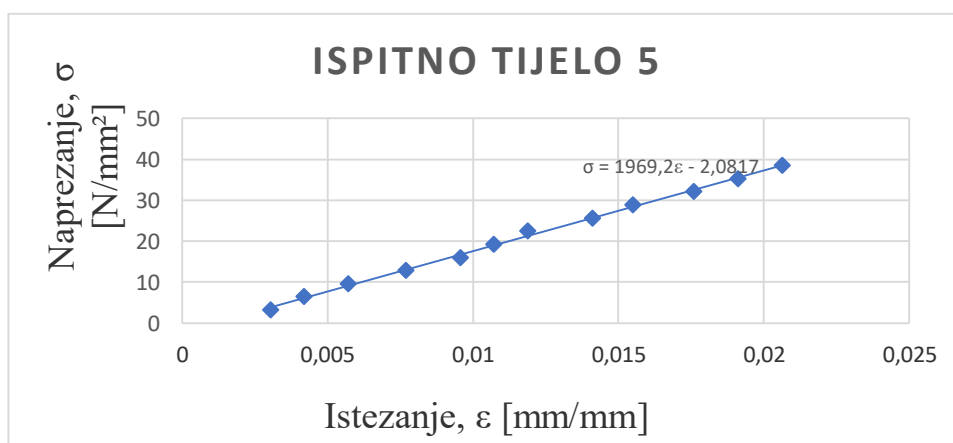
	Ispitno tijelo 5	Ispitno tijelo 6	Ispitno tijelo 7	Ispitno tijelo 8	Ispitno tijelo 9
b [mm]	15,34	14,80	15,24	15,30	15,21
h [mm]	1,97	2,21	1,99	1,90	1,88
l [mm]	31,84	31,84	31,84	31,84	31,84
F_{max} [N]	52	60	50	44	40

U tablici 6.8. prikazani su progibi, sile, naprezanje te istežanje ispitnog tijela 5.

Tablica 6.8. Rezultati savojnog ispitivanja ispitnog tijela 5.

F [N]	f [mm]	σ [N/mm ²]	ε [mm/mm]
4	0,26	3,2	0,0030
8	0,36	6,4	0,0042
12	0,49	9,6	0,0057
16	0,66	12,8	0,0078
20	0,82	16,0	0,0096
24	0,92	19,3	0,0107
28	1,02	22,5	0,0119
32	1,21	25,7	0,0141
36	1,33	28,9	0,0155
40	1,51	32,1	0,0176
44	1,64	35,3	0,0191
48	1,77	38,5	0,0206

S obzirom na rezultate ispitivanja dobije se dijagram prikazan na slici 6.5.:



Slika 6.5. Dijagram naprežanje-istežanje ispitnog tijela 5.

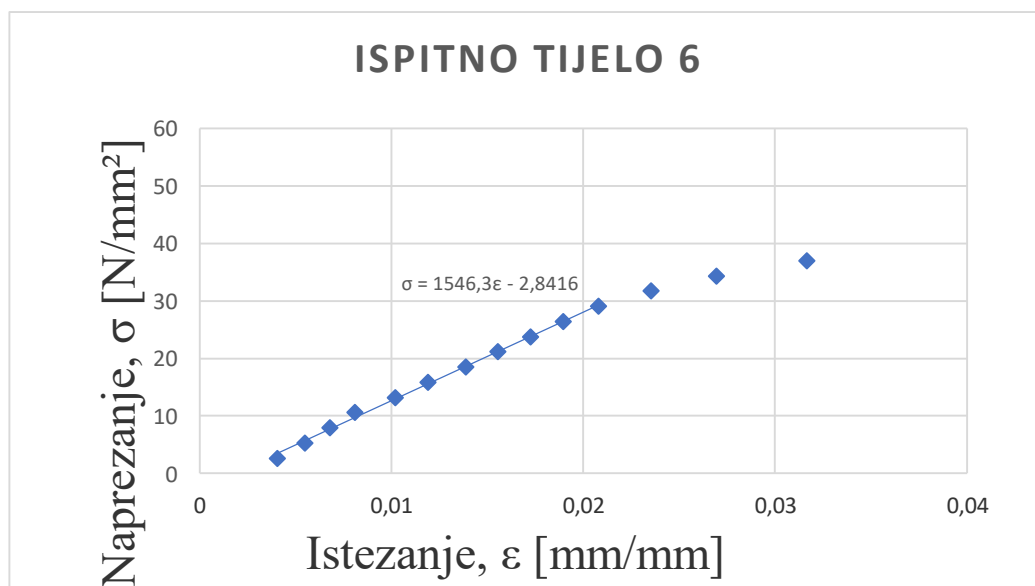
Iz dijagrama se može očitati savojni modul elastičnosti za ispitno tijelo 5 i njegova vrijednost iznosi: $E_5 = 1969,2$ N/mm². Savojna čvrstoća ispitnog tijela 5 iznosi $R_{m5} = 41,7$ N/mm².

U tablici 6.9. prikazani su progibi, sile, naprezanje te istežanje ispitnog tijela 6.

Tablica 6.9. Rezultati savojnog ispitivanja ispitnog tijela 6.

F [N]	f [mm]	σ [N/mm ²]	ε [mm/mm]
4	0,31	2,6	0,0040
8	0,42	5,3	0,0055
12	0,52	7,9	0,0068
16	0,62	10,6	0,0081
20	0,78	13,2	0,0102
24	0,91	15,9	0,0119
28	1,06	18,5	0,0139
32	1,19	21,1	0,0156
36	1,32	23,8	0,0173
40	1,45	26,4	0,0190
44	1,59	29,1	0,0208
48	1,80	31,7	0,0235
52	2,06	34,4	0,0269
56	2,42	37,0	0,0317
60	3,11	39,6	0,0407

S obzirom na rezultate ispitivanja dobije se dijagram prikazan na slici 6.6.:



Slika 6.6. Dijagram naprežanje-istežanje ispitnog tijela 6.

Iz dijagrama se može očitati savojni modul elastičnosti za ispitno tijelo 6 i njegova vrijednost iznosi: $E_6 = 1546,3 \text{ N/mm}^2$.

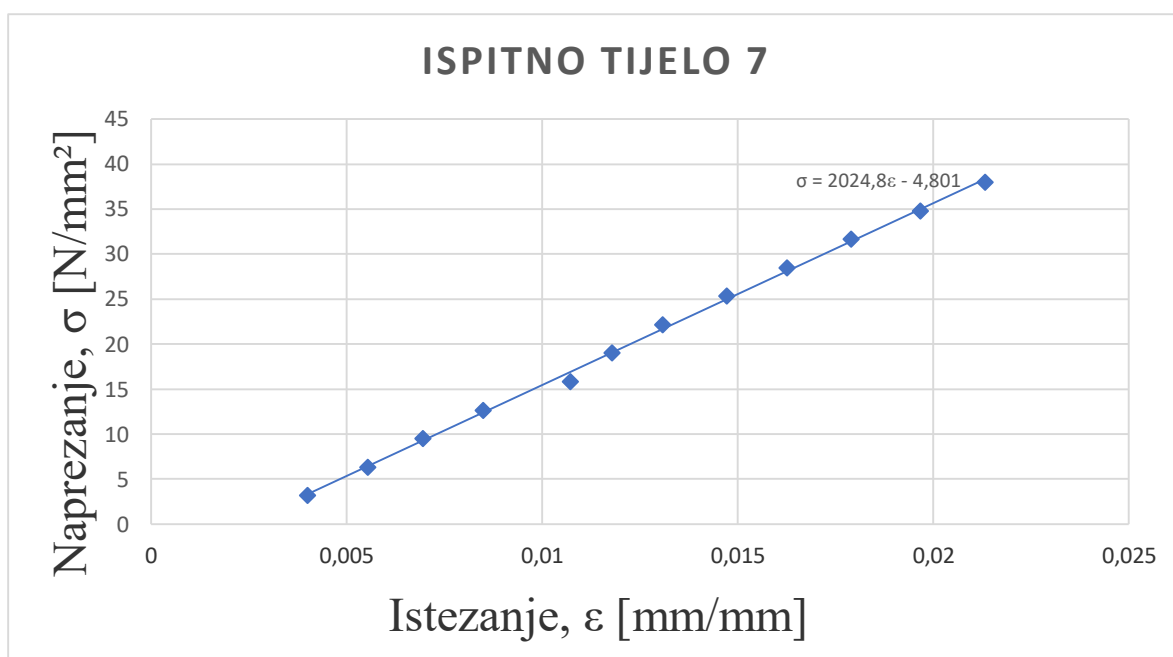
Savojna čvrstoća ispitnog tijela 6 iznosi $R_{m6} = 39,6 \text{ N/mm}^2$.

U tablici 6.10. prikazani su progibi, sile, naprezanje te istežanje ispitnog tijela 7.

Tablica 6.10. Rezultati savojnog ispitivanja ispitnog tijela 7.

F [N]	f [mm]	σ [N/mm ²]	ε [mm/mm]
4	0,34	3,2	0,0040
8	0,47	6,3	0,0055
12	0,59	9,5	0,0069
16	0,72	12,7	0,0085
20	0,91	15,8	0,0107
24	1,00	19,0	0,0118
28	1,11	22,2	0,0131
32	1,25	25,3	0,0147
36	1,38	28,5	0,0163
40	1,52	31,7	0,0179
44	1,67	34,8	0,0197
48	1,81	38,0	0,0213

S obzirom na rezultate ispitivanja dobije se dijagram prikazan na slici 6.7.:



Slika 6.7. Dijagram naprezanje-istežanje ispitnog tijela 7.

Iz dijagrama se može očitati savojni modul elastičnosti za ispitno tijelo 7 i njegova vrijednost iznosi: $E_7 = 2024,8 \text{ N/mm}^2$.

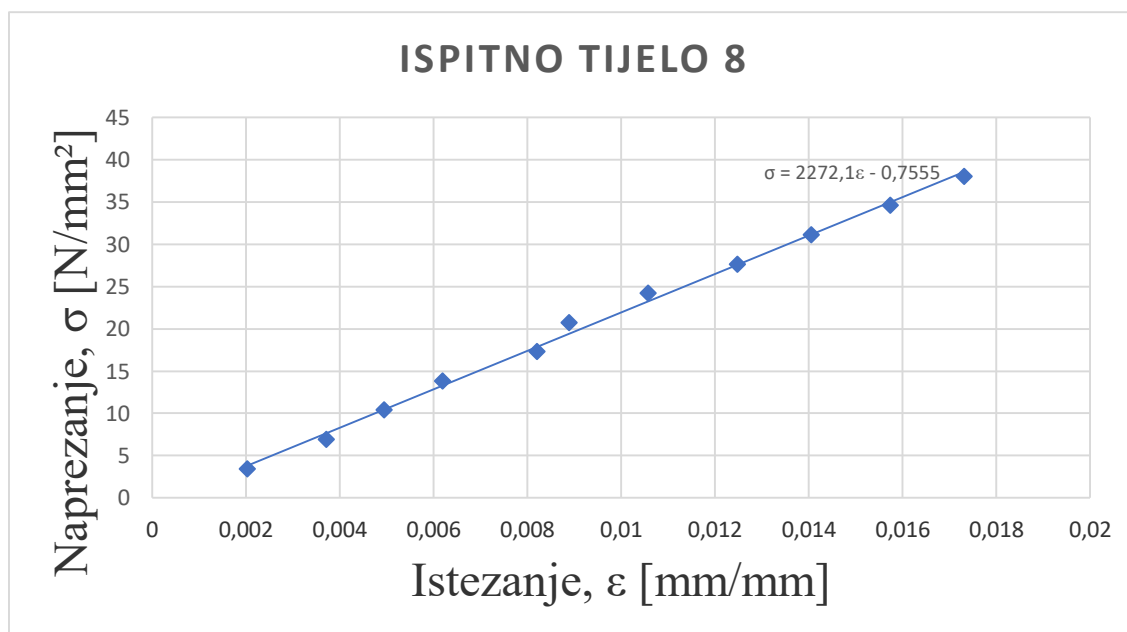
Savojna čvrstoća ispitnog tijela 7 iznosi $R_{m7} = 39,6 \text{ N/mm}^2$.

U tablici 6.11. prikazani su progibi, sile, naprezanje te istežanje ispitnog tijela 8.

Tablica 6.11. Rezultati savojnog ispitivanja ispitnog tijela 8.

F [N]	f [mm]	σ [N/mm ²]	ε [mm/mm]
4	0,18	3,5	0,0020
8	0,33	6,9	0,0037
12	0,44	10,4	0,0049
16	0,55	13,8	0,0062
20	0,73	17,3	0,0082
24	0,79	20,8	0,0089
28	0,94	24,2	0,0106
32	1,11	27,7	0,0125
36	1,25	31,1	0,0141
40	1,4	34,6	0,0157
44	1,54	38,0	0,0173

S obzirom na rezultate ispitivanja dobije se dijagram prikazan na slici 6.8.:



Slika 6.8. Dijagram naprezanje-istežanje ispitnog tijela 8.

Iz dijagrama se može očitati savojni modul elastičnosti za ispitno tijelo 8 i njegova vrijednost iznosi: $E_8 = 2272,1 \text{ N/mm}^2$.

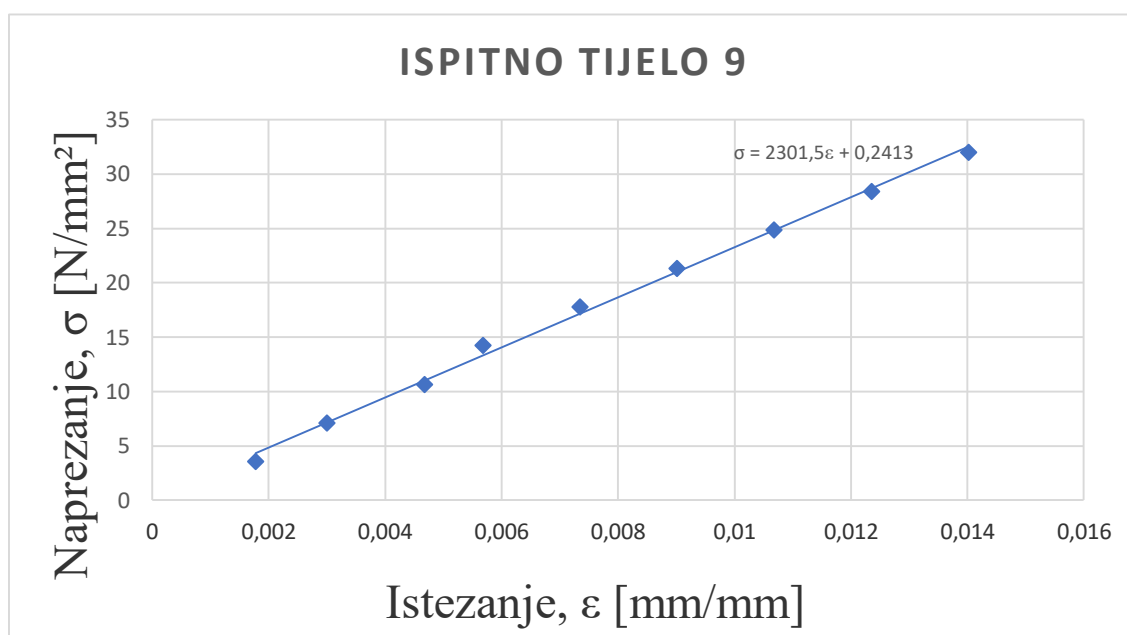
Savojna čvrstoća ispitnog tijela 8 iznosi $R_{m8} = 38,0 \text{ N/mm}^2$.

U tablici 6.12. prikazani su progibi, sile, naprezanje te istežanje ispitnog tijela 9.

Tablica 6.12. Rezultati savojnog ispitivanja ispitnog tijela 9.

F [N]	f [mm]	σ [N/mm ²]	ε [mm/mm]
4	0,16	3,6	0,0018
8	0,27	7,1	0,0030
12	0,42	10,7	0,0047
16	0,51	14,2	0,0057
20	0,66	17,8	0,0073
24	0,81	21,3	0,0090
28	0,96	24,9	0,0107
32	1,11	28,4	0,0124
36	1,26	32,0	0,0140

S obzirom na rezultate ispitivanja dobije se dijagram prikazan na slici 6.9.:



Slika 6.9. Dijagram naprežanje-istežanje ispitnog tijela 9.

Iz dijagrama se može očitati savojni modul elastičnosti za ispitno tijelo 9 i njegova vrijednost iznosi: $E_9 = 2301,5 \text{ N/mm}^2$.

Savojna čvrstoća ispitnog tijela 9 iznosi $R_{m9} = 35,5 \text{ N/mm}^2$.

Tablica 6.13. Pregled savojnih svojstava ploče 1 i ploče 2, obje s dva sloja vlakana.

	E_1 , [N/mm ²]	E_2 , [N/mm ²]	R_{m1} , [N/mm ²]	R_{m2} , [N/mm ²]
1	2375,8	1969,2	38,1	41,7
2	2275,4	1546,3	40,2	39,6
3	2031,8	2024,8	33,5	39,6
4	2560,8	2272,1	47,9	38
5		2301,5		35,5
Srednja vrijednost	2310,7	2022,8	39,9	38,9
Standardna devijacija	220,5	304,0	6,0	2,3

6.4. Maseni udio vlakana u kompozitu.

Izračunat je maseni udio vlakana kod kompozita ojačanog s dva sloja jednoosno orijentiranih ugljičnih vlakana. Iz tri kompozitna uzorka izrezane su pločice pomoću kojih je određen maseni udio ugljičnih vlakana u kompozitu. Svaki uzorak je stavljen u lončić te je s njim izvagan. Prije toga su izvagane mase praznih lončića, a razlika između posudice s uzorkom i prazne posudice predstavlja masu svakog kompozitnog uzorka. Lončići su tada stavljeni u peć zagrijanu na temperaturu od 600 °C kako bi se plastomerna matrica kompozitnih uzoraka razgradila. Nakon zagrijavanja lončići su izvađeni, a u njima su ostala ugljična vlakna iz uzorka zbog njihove otpornosti na visoke temperature. Lončići s ugljičnim vlaknima su tada izvagani, kako bi se mogla odrediti masa preostalih ugljičnih vlakana.

$$w_v = \frac{m_{uzorak}}{m_{ostatak}} \cdot 100\% ;$$

gdje su: w_v – maseni udio vlakana, [%]

m_{uzorak} – masa kompozitnog uzorka, [g]

$m_{ostatak}$ – masa anorganskog ostatka (vlakna), [g].

Rezultati mjerenja masenih udjela vlakana su prikazani u tablici 6.14.

Tablica 6.14. Rezultati mjerenja masenih udjela ugljičnih vlakana.

Uzorak	Masa lončića [g]	Masa lončića sa masom uzorka [g]	Masa lončića sa masom ostatka [g]	Masa uzorka [g]	Masa ostatka [g]	Maseni udio vlakana [%]
1	44,7826	45,1368	44,7883	0,3542	0,0057	1,6093
2	26,0673	26,4317	26,0756	0,3644	0,0083	2,2777
3	25,5887	25,9062	25,5959	0,3175	0,0072	2,2677

6.5. Usporedba rezultata

Dobiveni rezultati ispitivanja su uspoređeni s rezultatima dobivenim kod Matije Jagara koji je ispitivao istovrsni kompozit s jednim slojem vlakana [22].

Tablica 6.15. Rezultati ispitivanja Matije Jagara [22].

Ploča	Savojni modul elastičnosti [N/mm ²]	Prividna smična međuslojna čvrstoća, [N/mm ²]
1	172,8	-
2	241,13	3,83
3	215,27	3,57
4	239,82	5,43
5	176,2	3,50
Srednja vrijednost	209,8	4,1
Standardna devijacija	33,2	0,9

U tablici 6.16. uspoređene su srednje vrijednosti savojnog modula elastičnosti i međuslojne smične čvrstoće plastomernih kompozita s jednim i s dva sloja ugljičnih vlakana.

Tablica 6.16. Usporedba srednjih vrijednosti savojnog modula elastičnosti i međuslojne smične čvrstoće plastomernih kompozita s jednim i s dva sloja ugljičnih vlakana.

	Srednja vrijednost savojnog modula elastičnosti [N/mm ²]	Srednja vrijednost međuslojne smične čvrstoće [N/mm ²]
Plastomerni kompozit s jednim slojem ugljičnih vlakana	209,0	4,1
Plastomerni kompozit s dva sloja ugljičnih vlakana	2150,9	4,7

Savojna čvrstoća se nije mogla izmjeriti kod plastomernih kompozita s jednim slojem ugljičnih vlakana jer su se ispitna tijela previše savijala i nisu pukla, zbog toga nisu uspoređene vrijednosti savojnih čvrstoća.

7. Zaključak

U ovom radu su ispitani prividna međuslojna smična čvrstoća, savojna čvrstoća, te savojni modul elastičnosti kompozita s plastomernom matricom od samoobnavljajućeg kopolimera etilena i metakrilne kiseline (Surlyn® 8940) ojačanog s dva sloja jednoosno orijentiranih ugljičnih vlakana, te su rezultati uspoređeni s kompozitom izrađenim od istih konstituenata ali s jednim slojem ugljičnih vlakana. Dva sloja ugljičnih vlakana iznose približno 2,5% ukupne mase kompozita što je dosta malen udio. Povećanje udjela bi se moglo postići smanjenjem debljine ploča matrice u koje se uprešavaju vlakna. Debljina od približno 0,5 mm je odabrana kako bi se osiguralo impregniranje vlakana, ali takav kompozit ima mali udio vlakana.

Kako je materijal matrice prilično niske krutosti, kompozit s jednom slojem savijao se između oslonaca i nije pucao. Kompozitu s dva sloja vlakana modul pri savojnom opterećenju je porastao neočekivano mnogo, za red veličine, dok je prividna međuslojna smična čvrstoća porasla za 14,6 %. Svojstva dviju ploča s dva sloja vlakana su usporediva. Iz tablice 6.13. vidljivo je da je modul druge ploče nešto niži. Jedno ispitno tijelo druge ploče slabije je od ostalih i smanjuje prosječnu vrijednost, stoga je ova razlika posljedica ograničenog broja ispitnih tijela.

Daljnja istraživanja biti će usmjerena na utjecaj smjera opterećenja na svojstva kompozita, a pokušat će se i reducirati debljina ploča materijala matrice na debljinu koja bi još uvijek bila dovoljna da impregnira vlakna i osigura povezanost matrice i ojačala.

8. Literatura

- [1] Callister W.D. , Rethwisch D.G. Material science and engineering an introduction, Eight Edition, John Wiley & Sons, Inc., USA 2010.
- [2] Kaw A.K., Mechanics of composite materials, CRC Press, New York 2006
- [3] The Size Effect on Flexural Fracture of Polyolefin Fibre-Reinforced Concrete by Picazo A., Alberti M.G., Gálvez J.C. , Enfedaque A. and Vega A.C., The Size Effect on Flexural Fracture of Polyolefin Fibre-Reinforced, 2009
- [4] Filetin, T., Kovačićek, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala: čelici i željezni ljevovi, laki i obojeni metali, konstrukcijska keramika, polimerni materijali, kompozitni materijali i drvo.; 2. izdanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2013.
- [5] What are Unidirectional Carbon Fiber fabrics?, [https://www.fibreglast.com/product/What-are-Unidirectional-Carbon-Fiber-Fabrics/Learning_Center](https://www.fibreglast.com/product/What-are-Unidirectional-Carbon-Fiber-Fabrics/Learning_Center;),; pristupljeno 10.9.2019.
- [6] Wang M. , Zhang P. and Fei Q. Computational Evaluation of Effects of Fiber Shape on Transverse Properties of Polymer Composites Considering Voids under Dynamic Loading, 2019
- [7] FWallenberger F.T., Watson J.C. and Li H. , Glass Fibers, PPG Industries, Inc. ASM International 2001
- [8] Vázquez-Moreno J.M. , Sánchez-Hidalgo R. , Sanz-Horcajo E. , Viña J. , Verdejo R. and López-Manchado M.A., Preparation and Mechanical Properties of Graphene/Carbon Fiber-Reinforced Hierarchical Polymer Composites 2019
- [9] Chawla, K. K.: Composite Materials: Science and Engineering, Third edition, Springer, New York, 2012
- [10] F.C. Campbell ,Thermoplastic Composites: An Unfulfilled Promise, in Manufacturing Processes for Advanced Composites, 2004

- [11] F.C. Campbell, Thermoset Resins: The Glue That Holds the Strings Together, F.C. Campbell, in Manufacturing Processes for Advanced Composites, 2004
- [12] P.K. Mallick, Thermoplastics and thermoplastic–matrix composites for lightweight automotive structures in Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles, 2010
- [13] A. Adeniyi, W.K. Kupolati, Thermoplastic-Thermoset Nanostructured Polymer Blends in Design and Applications of Nanostructured Polymer Blends and Nanocomposite Systems, 2016
- [14] J. Ramkumar, Lecture 15: Thermoplastic Composites Manufacturing Processes, Department of Mechanical Engineering IIT, Kanpur
- [15] M. Šercer: Predavanja - Prerada kompozitnih tvorevina, FSB, Zagreb, 2008./2009.
- [16] N.K. Guimard, K.K. Oehlenschlaeger, J. Zhou, S. Hilf, F.G. Schmidt, C. Barner-Kowollik, Current Trends in the Field of Self-Healing Materials, Macromolecular Chemistry and Physics
- [17] K. A. Pestka, J. D. Buckley, S. J. Kalista, Jr., N. R. Bower, Elastic evolution of a self-healing ionomer observed via acoustic and ultrasonic resonant spectroscopy, 2017
- [18] S. J. Kalista, Jr1, T. C. Ward, Thermal characteristics of the self-healing response in poly(ethylene-co-methacrylic acid) copolymers, 2007
- [19] <http://polymerdatabase.com/polymer%20classes/Ionomers.html> , pristupljeno 14.9.2019.
- [20] P. J. Reynolds, A Surlyn® Ionomer as a Self-Healing and Self-Sensing Composite, Department of Metallurgy and Materials University of Birmingham, December 2011
- [21] Franz, M., Kovačiček, F., Novosel, M., Indof, J.: Inženjerski priručnik ip4, 1. svezak, Školska knjiga, Zagreb, 1998
- [22] Jagar M. Kompoziti s plastomernom matricom ojačanom vlaknima, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2019.

PRILOZI

I. CD-R disc