Kompoziti s plastomernom matricom ojačanom vlaknima

Jagar, Matija

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:235:982184

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-20**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Matija Jagar

Zagreb, 2019. godine

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor: Student:

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

Zagreb, 2019. godine

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.
Zahvaljujem se mentorici izv. prof. dr. sc. Tatjani Haramini na susretljivosti, nesebičnoj pomoći i savjetima pri izradi ovog rada.
Također se želim zahvaliti asistentu Danielu Pugaru, mag. ing. mech,. na pomoći i susretljivosti, kao i tehničkim suradnicima Mireli Petranović i Božidaru Bušetinčanu na pomoći prilikom izrade eksperimentalnog dijela rada.

Matija Jagar

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: **Matija Jagar** Mat. br.: **0035204756**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Kompoziti s plastomernom matricom ojačanom vlaknima**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Fiber reinforced composites with thermoplastic matrix**

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 vlaknima i različite načine ojačavanja vlaknima, s posebnim naglaskom na jednoosno orijentirana vlakna,
- opisati najčešće vrste vlakana s naglaskom na ugljična vlakna i objasniti razlike u svojstvima pojedinih ugljičnih vlakana,
- istražiti postupke izrade kompozita s plastomernom matricom i njihovih poluproizvoda,
- istražiti prednosti i nedostatke plastomerene u odnosu na duromernu matricu, vezano uz skladištenje, preradu, svojstva tečenja i impregnacije, opisati svojstva gotovih proizvoda i primjenu,
- izraditi kompozit s matricom od samoobnavljajućeg kopolimera etilena i metakrilne kiseline (E/MAA) (Surlyn 8940) jednoosno ojačanog ugljičnim vlaknima,
- opisati materijal matrice i ojačala i objasniti mehanizam samoobnavljanja matrice,
- opisati izradu kompozita,
- analizirati gotovi kompozit.

Zadatak zadan:

29. studenog 2018.

Rok predaje rada:
1. rok: 22. veljače 2019.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2019.
3. rok: 20. rujna 2019.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 25.2. - 1.3. 2019.
2. rok (izvanredni): 2.7. 2019.
3. rok: 23.9. - 27.9. 2019.

Zadatak zadao:

T. Haramina

Izv. prof. dr. sc. Tatjana Haramina

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

1. UVOD ... 1
2. KOMPOZITI OJAČANI VLAKNIMA ... 3
2.1. Oblici i veličine vlakana ... 3
2.1.1. Raspored vlakana i tkanine ... 4
2.1.2. Svojstva vlaknima ojačanih kompozita ... 5
2.1.3. Kompoziti s jednoosno orijentiranim vlaknima ... 6
2.1.3.1. Jednosmjerno orijentirana ugljična vlakna ... 7
2.2. Materijali vlakana ... 7
2.2.1. Staklena vlakna ... 8
2.2.2. Aramidna vlakna ... 9
2.2.3. Borova vlakna ... 10
2.2.4. Keramička vlakna ... 11
2.2.5. Ugljična vlakna ... 11
2.2.5.1. Prekursori i proizvodnja ugljičnih vlakana ... 12
2.2.5.2. Podjela ugljičnih vlakana prema mehaničkim svojstvima ... 14
3. KOMPOZITI S POLIMERNOM MATRICOM ... 16
3.1. Plastomeri i duromeri ... 16
3.2. Kopolimeri [1] ... 17
3.3. Kompoziti s plastomernim matricama [1] ... 18
3.4. Svojstva kompozita s plastomernom matricom ... 18
3.4.1. Prednosti plastomerne u odnosu na duromernu matricu ... 18
3.4.2. Nedostaci plastomerne u odnosu na duromernu matricu ... 20
3.5. Postupci izrade kompozita s plastomernom matricom [16] ... 21
3.5.1. Namotavanje plastomerne trake/niti (eng. Thermoplastic Tape/Filament winding) 21
3.5.2. Pultruzija plastomernih kompozita (eng. Thermoplastic pultrusion method) ... 21
3.5.3. Izravno prešanje (eng. Compression molding) ... 22
3.5.4. Vruće prešanje (eng. Hot press technique) ... 22
3.5.5. Oblikovanje u autoklavu (eng. Autoclave processing) ... 23
3.5.6. Dijafragmatsko preoblikovanje (eng. Diaphragm forming) ... 23
3.5.7. Injekcijsko prešanje (eng. Injection molding) ... 24
4. SAMOOBNAVLJANJE ... 25
4.1. Samoobnavljanje polimernih materijala ... 25
4.1.1. Ionomeri ... 26
5. EKSPERIMENTALNI DIO ... 27
5.1. Materijali matrice i ojačala ... 27
5.1.1. Surlyn® 8940 ... 27
5.1.2. Ugljična vlakna u formi ojačala Surlyna® 8940 ... 28
5.2. Izrada kompozitnih ploča ... 29
5.3. Određivanje masenog udjela vlakana ... 31
5.4. Analiza kompozita svjetlosnim mikroskopom ... 32
5.5. Određivanje savojnog modula elastičnosti ... 34
5.6. Određivanje prividne smične međuslojne čvrstoće ... 35

6. REZULTATI MJERENJA 37
6.1. Rezultati određivanja masenog udjela vlakana u kompozitu 37
6.2. Analiza pripremaka za mikroskopiranje 37
6.3. Rezultati mjerenja savojnog modula elastičnosti 42
6.4. Rezultati mjerenja prividne smične međuslojne čvrstoće 48
7. ZAKLJUČAK 50

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Razni načini rasporeda vlaknastih ojačala [2]. 3
Slika 2.2. Stilovi tkanja (roving): a) kvadratno; b) keper; c) atlas [5]. 4
Slika 2.3. Utjecaj usmjerenja vlakana s obzirom na naprezanje za Ti-leguru ojačanu vlaknima bora [2]. 6
Slika 2.4. Odnos specifične čvrstoće i modula elastičnosti vlaknima ojačanih kompozita [2]. 7
Slika 2.5. Različiti oblici staklenih vlakana [1]. 9
Slika 2.6. Shematski prikaz mera i lančaste strukture aramida [2]. 9
Slika 2.7. Mikrostruktura PAN ugljičnih vlakana [10]. 13
Slika 2.8. Ovisnost čvrstoće i modula elastičnosti o završnoj temperaturi toplinske obrade [1]. 15
Slika 3.1. Različiti tipovi kopolimera [1]. 17
Slika 3.2. Tipični temperaturni procesi proizvodnje kompozita [13]. 20
Slika 5.1. Struktura djelomično neutraliziranog ionomera Surlyna® [17]. 27
Slika 5.2. Pripremci zaliveni u kalupu u polimernoj masi. 32
Slika 5.3. Poliranje kompozitnih pripremaka. 33
Slika 5.4. Pripremci za mikroskopiranje ploča 2, 3, 4 i 5. 33
Slika 5.5. Ispitni pripremci kompozitnih ploča za ispitivanje savojnog modula. 34
Slika 5.6. Ispitna tijela kompozitnih ploča za određivanje prividne međuslojne čvrstoće. 35
Slika 5.7. Ispitivanje prividne smične međuslojne čvrstoće na kidalici. 36
Slika 6.1. Ploča 2 pod svjetlosnim mikroskopom, presjek okomito na vlakna. 37
Slika 6.2. Ploča 2 pod svjetlosnim mikroskopom, greške u materijalu. 38
Slika 6.3. Ploča 3 pod svjetlosnim mikroskopom, presjek okomito na smjer vlakana. 39
Slika 6.4. Ploča 3 pod svjetlosnim mikroskopom, presjek okomito na smjer vlakana. 39
Slika 6.5. Ploča 4 pod svjetlosnim mikroskopom, razdvajanje snopova. 40
Slika 6.6. Ploča 4 pod svjetlosnim mikroskopom, presjek okomito na smjer vlakana. 40
Slika 6.7. Ploča 5 pod svjetlosnim mikroskopom, presjek okomit na smjer vlakana. 41
Slika 6.8. Ploča 5 pod svjetlosnim mikroskopom, neujednačen presjek ojačala. 41
Slika 6.9. Dijagram naprezanje – istezanje neojačanog Surlyna (ploča 1). 43
Slika 6.10. Dijagram naprezanje - istezanje ispitnih tijela ploče 2. 44
Slika 6.11. Dijagram naprezanje – istezanje ispitnih tijela ploče 3. 45
Slika 6.12. Dijagram naprezanje – istezanje ispitnih tijela ploče 4. 46
Slika 6.13. Dijagram naprezanje - istezanje ispitnog tijela ploče 5. 47

POPIS TABLICA

Tablica 5.1.	Karakteristike i prednosti Surlyna® 8940 [21].	28
Tablica 5.2.	Tipična fizička i toplinska svojstva Surlyna® 8940 [21].	28
Tablica 5.3.	Karakteristike jednosmjernih ugljičnih vlakana [22].	29
Tablica 5.4.	Nominalna izvedba jednosmjernog tkanja [21].	29
Tablica 5.5.	Parametri izrade kompozitnih ploča.	30
Tablica 6.1.	Maseni udjeli ugljičnih vlakana.	37
Tablica 6.2.	Dimenzije ispitnih tijela za određivanje savojnog modula.	42
Tablica 6.3.	Očitani progibi ispitnih tijela polimerne ploče 1.	42
Tablica 6.4.	Očitani progibi ispitnih tijela kompozitne ploče 2.	44
Tablica 6.5.	Očitani progibi ispitnih tijela kompozitne ploče 3.	45
Tablica 6.6.	Očitani progibi ispitnih tijela kompozitne ploče 4	46
Tablica 6.7.	Progibi očitani za ispitno tijelo kompozitne ploče 5.	47
Tablica 6.8.	Pregled mehaničkih svojstava svih materijala.	48

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis oznake
Rm	N/mm^2	Rastezna čvrstoća
Re	N/mm^2	Granica tečenja
E	N/mm^2	Youngov modul elastičnosti
E_i	N/mm^2	Savojni modul elastičnosti kompozitne ploče
ρ	kg/m^3	Gustoća
ρ_c	kg/m^3	Gustoća kompozita
ρ_m	kg/m^3	Gustoća matrice
ρ_f	kg/m^3	Gustoća vlakana
V_m	m^3	Volumen matrice
V_f	m^3	Volumen vlakana
T_g	°C	Temperatura staklastog prijelaza
w_v	-	Maseni udio vlakana
$m_{pločica}$	g	Masa kompozitne pločice
σ	N/mm^2	Naprezanje
ε	mm/mm	Istezanje
τ	N/mm^2	Prividna smična čvrstoća
F	N	Sila
F_{max}	N	Maksimalna sila
L	mm	Razlika između oslonaca
b	mm	Širina ispitnog tijela
h	mm	Debljina ispitnog tijela
$m_{ostatak}$	g	Masa vlakana (razlika mase posudice s pločicom i prazne posudice)
T_m	°C	Talište

SAŽETAK

Polimerni kompoziti s plastomernom matricom sve su zastupljeniji na tržištu. Problem impregnacije vlakana uslijed visoke viskoznosti materijala matrice i prerada pri povišenoj temperaturi sprečavaju brži rast. U radu je napravljen pregled polimernih kompozita s naglaskom na kompozite s plastomernom matricom. Izrađene su četiri ploče kopolimera etilena i metakrilne kiseline ojačane ugljičnim vlaknima s različitim parametrima prerade. Poprečni presjek ploča je analiziran optičkim mikroskopom, a potom su ispitani savojni modul elastičnosti i prividna smična međuslojna čvrstoća. Rezultati ispitivanja pokazuju velik utjecaj parametara prerade na uspješnu impregnaciju. Sa samo jednim slojem jednoosno orijentiranih vlakana i masenim udjelom vlakana od približno 2,5 % postignuto je povećanje savojnog modula od 39 %, s potencijalom poboljšanja od preko 80 % u odnosu na neojačan plastomer.

Ključne riječi: kompoziti s plastomernom matricom, ugljična vlakna, E/MAA, mehanička svojstva

SUMMARY

Polymer based composites with thermoplastic matrix is a growing market, still there are some limits due to the problem of high viscosity and fibres impregnation. In this work, an overview of polymer based composites is given with an emphasis on composites with thermoplastic matrix. Four sheets of composites of carbon fibres reinforced ethylene and methacrylic acid copolymer were prepared with different processing parameters. The sheets are analysed by means of optical microscopy. Flexural elastic modulus and apparent interlaminar shear strength were tested. The results show a great influence of processing parameters on successful impregnation. With only one layer of unidirectionally oriented fibres and a mass fraction of approximately 2.5 %, flexural modulus increased for 39 %, with a potential of over 80 % compared to the unreinforced thermoplastic polymer.

Keywords: thermoplastic matrix composites, carbon fibres, E/MAA, mechanical properties

1. UVOD

Kompozitni materijali predstavljaju veliki korak pri neprestanom nastojanju optimiranja svojstava materijala. Zapravo, kompozitni materijali nisu nova pojava jer su u prirodi već odavno prisutni brojni primjeri [1].

U tehnološkom pogledu kompozitni materijali, odnosno kompoziti, proizvedeni su umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava s ciljem dobivanja materijala s onakvima svojstvima kakva ne posjeduje niti jedna komponenta zasebno. Razvijanjem kompozitnih materijala postižu se posebne i specifične kombinacije svojstava, neuobičajene za konvencionalne materijale, poput krutosti, mase, čvrstoće, ponašanja pri povišenim ili visokim temperaturama, kemijske postojanosti, tvrdoće ili toplinske i električne vodljivosti. Također, kompoziti se smatraju umjetno dobivenim višefaznim materijalima koji posjeduju najbolja svojstva konstituenata.

Faze od kojih se sastoje kompoziti su matrica (to jest osnova) te ojačala i punila koja se javljaju u mnogo različitih vrsta i oblika. Svojstva kompozitnih materijala uvelike ovise o raznim čimbenicima: svojstvima matrice i ojačala, veličini i raspodjeli konstituenata, volumnom udjelu konstituenata, obliku konstituenata te prirodi i jakosti veze među konstituentima.

Osnovna podjela kompozita se temelji na materijalu matrice, odnosno osnove, prema kojoj postoje metalni, keramički i polimerni kompoziti. Matrici, koja je obično kontinuirana faza, se s ciljem stjecanja superiornih svojstva kompozita dodaju različiti dodaci u obliku ojačala koja sama matrica okružuje. Prema obliku ojačala kompoziti mogu biti razvrstani na kompozite s česticama, vlaknima ojačane kompozite, slojevite kompozite i sendvič konstrukcije pri čemu se posljednje dvije skupine još nazivaju i strukturnim kompozitima.

Efikasnost ojačanja najveća je kod kompozita ojačanih vlaknima. Opterećenje se prenosi na vlakna putem matrice, iz tog je razloga vrlo bitna dobra povezanost matrice i ojačala [2].

Valja napomenuti kako unutar same skupine vlakana od nekog materijala postoje razne varijacije istih na temelju njihovih mehaničkih, električnih ili pak toplinskih svojstava te metode proizvodnje istih.

Zbog povoljnih fizičko-kemijskih svojstava, relativno jednostavne izrade i pristupačnih cijena na tržištu su najzastupljeniji kompoziti s polimernim matricom. Polimerne matrice izrađuju se od različitih duromera i plastomera, a pri tome je na globalnom tržištu u 2015. godini udio kompozita s duromernom matricom bio 83,3 % [3]. U usporedbi s duromernim kompozitima,

plastomerni kompoziti imaju prednost zbog bolje žilavosti, preoblikovljivosti, zavarljivosti, recikličnosti, netoksičnosti i niže cijene. Međutim izrada kompozita je zahtjevnija jer se mora odvijati pri povišenim temperaturama. U blizini tališta viskoznost plastomera je visoka i smola ne prolazi između vlakana. Povišenjem temperature smanjuje se viskoznost, ali može doći do degradacije svojstava. Svojstva matrice su nekad teško predvidljiva jer ovise i o toplinskoj povijesti materijala. Usprkos otežanoj izradi, tržište plastomernih kompozita je rastuće, dok je tržište duromernih kompozita zasićeno.

Posljednjih godina sve više u brojnim istraživanjima, ali i u proizvodnji do izražaja dolaze kompoziti s plastomernom matricom zbog značajnog broja superiornih svojstava i prednosti, a posebice zbog njihove mogućnosti ponovnog formiranja u kalupima te prerade čak i nakon početne proizvodnje [4].

2. KOMPOZITI OJAČANI VLAKNIMA

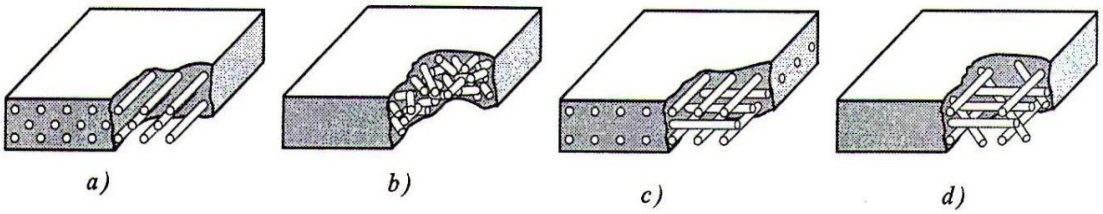
Velik udio kompozita ojačan je vlaknima. Njihovo znatno ojačavanje ostvarivo je jedino onda kada je veza vlakno-matrica jaka. Vlaknima se mogu poboljšati različita svojstva, a često je cilj smanjenje mase, poboljšanje krutosti, čvrstoće, žilavosti, temperaturne postojanosti te povećanja specifične čvrstoće, odnosno omjera čvrstoća/gustoća [2]. Polimeri se često ojačavaju vlaknima s ciljem poboljšavanja mehaničkih svojstava. Primjena ovakve vrste kompozita je sve više značajna zadnjih godina posebice zbog razvoja polimernih smola visokih performansi i novih načina ojačavanja s materijalima poput ugljičnih nanočestica te nanocjevčica [4].

2.1. Oblici i veličine vlakana

Prema promjeru vlaknastih ojačala ona se dijele na viskere, vlakna (u užem smislu) i žice. Viskeri su vrlo tanke niti keramičkih monokristala koje su visoke čistoće i imaju ekstremno velik omjer duljina/promjer.

Vlakna se prema njihovu obliku mogu podijeliti na kontinuirana i diskontinuirana, a podjela prema orijentaciji, prikazana slikom 2.1., je sljedeća:

a) kontinuirana jednosmjerno (jednoosno) usmjerena,
b) diskontinuirana slučajno usmjerena,
c) kontinuirana ortogonalno raspoređena,
d) kontinuirana višesmjerno raspoređena.



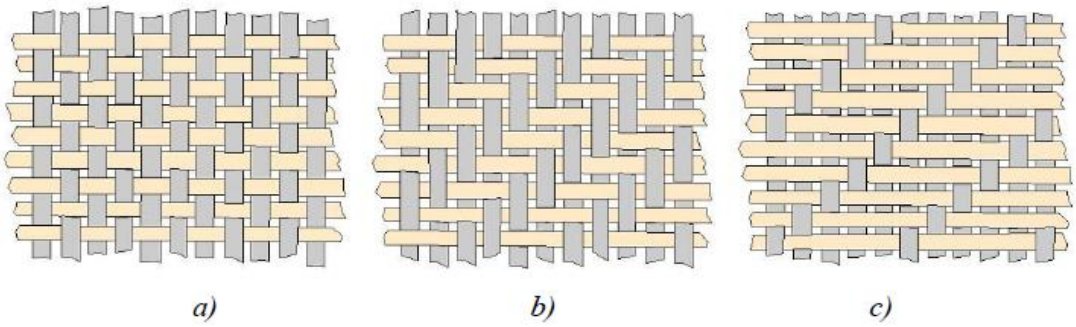
Slika 2.1. Razni načini rasporeda vlaknastih ojačala [2].

Sva vlakna proizvode se kao snop finih niti od kojih se dalje dobivaju različiti oblici vlakana, to jest uvijene ili neuvijene pređe. Također, vlakna se dalje mogu prerađivati u poluproizvode kao što su preprezi, jednosmjerne trake, tkane ili pletene tkanine (roving), cjevasto oblikovane pletenice, matove i razne druge oblike. Kod proizvodnje vlakana se teži da niti budu što manjeg promjera jer se s manjim promjerom niti smanjuje mogućnost pojave grešaka u samim nitima te što se niti s manjim promjerom posjeduju sposobnost lakšeg savijanja.

Dok se duga kontinuirana vlakna lako orijentiraju i procesiraju, orijentacija kratkih vlakana se ne može u potpunosti kontrolirati. Duga vlakna posjeduju brojne prednosti kao što su veća otpornost na udarna opterećenja, bolji površinski sloj i bolja dimenzijska stabilnost. S druge strane, kratka vlakna imaju manju cijenu, brže i lakše se procesuiraju i imaju manje grešaka, a time i veću čvrstoću. Oblik poprečnog presjeka je najčešće kružni jer je kao takav najlakši za proizvodnju i rukovanje. Postoje i vlakna kvadratnog i heksagonskog oblika, ali njihova otežana proizvodnja i rukovanje ne opravdavaju povećanu čvrstoću i veću gustoću poretka niti [5].

2.1.1. Raspored vlakana i tkanine

Raspored vlakana uvelike utječe na svojstva kompozitnog materijala. Rasporedi vlakana mogu se podijeliti na jednoosno, dvoosno ili pak troosno orijentirane rasporede, s obzirom na koordinatne osi. U jednoosno orijentiranom obliku raspodjele vlakana, mogu se koristiti i kontinuirana i diskontinuirana vlakna. Kontinuirana vlakna se koriste u filamentno namotanim, pultrudiranim te laminatnim kompozitima, kod kojih njihova orijentacija može biti lako kontrolirana. S druge strane, dvoosno i troosno orijentirani raspored vlakana se proizvodi tekstilnim procesima [6]. Do sada su razvijene brojne vrste tkanja, ali postoje tri vrste tkanja (roving) najzastupljenijih kod kompozitnih materijala radi poboljšavanja njihovih svojstava. Te vrste tkanja su: obično ili kvadratno tkanje gdje jedna traka naizmjence prolazi ispod i iznad mimoilaženih traka, keper tkanje i atlas tip tkanja. Različite varijante tkanja vide se na slici 2.2.:



Slika 2.2. Stilovi tkanja (roving): a) kvadratno; b) keper; c) atlas [5].

Sve navedene vrste tkanja imaju vlakna koja prolaze pod kutom 90°, ali je moguća i proizvodnja tkanin s drugačijim kutom prolaza (45°, 60°). Kod kompozitnih materijala s polimernom matricom postavljanje vlakana označava se oznakama 0°, ± 45°, 90°. Nadalje, kompoziti se mogu ojačavati jednosmjerno za što postoje takozvane jednosmjerne trake, koje se sastoje od

vlakna ili neuvijene pređe. Ta vlakna su posebno oblikovana alatom i paralelno složena. Pređe koje tvore jednosmjerne trake mogu pak biti uvijene ili neuvijene [5].

U slučaju kada su vlakna diskontinuirana, efikasnost ojačanja ovisi o duljini samih vlakana. Za svaku kombinaciju vlakna i matrice postoji kritična duljina kada dalje produljenje više ne pridonosi poboljšanju svojstava. U slučaju kontinuiranih vlakana, njihova duljina uvelike nadilazi tu kritičnu vrijednost. Kod kompozita ojačanih kratkim vlaknima, vlakna mogu biti usmjerena ili slučajno distribuirana. Kod njih se postižu značajne vrijednosti čvrstoće i krutosti u uzdužnom smjeru. Nadalje, usprkos nekim ograničenjima na efikasnost ojačavanja, svojstva kompozita ojačanih usmjerenim kratkim vlaknima su izotropna. Diskontinuirana vlakna s velikim omjerom duljina/promjer znatno se lakše ugrađuju u matricu i to dovodi materijala visoke krutosti i čvrstoće. S druge strane, kontinuirana vlakna, koja vode do najboljih svojstava, je dosta zahtjevno ugrađivati u matricu [2].

2.1.2. Svojstva vlaknima ojačanih kompozita

Vlakna trebaju biti čvrsta, kruta, lagana, a također moraju imati visoko talište pa se tako pri odabiru materijala vlakana odabiru oni materijali koji su visokog specifičnog modula elastičnosti ili čvrstoće definiranih izrazima:

$$\text{Specifična čvrstoća} = \frac{R_m}{\rho}, \tag{1.1}$$

$$\text{Specifični modul elastičnosti} = \frac{E}{\rho}, \tag{1.2}$$

gdje su: E – modul elastičnosti, R_m – rastezna čvrstoća, R_e – granica tečenja, a ρ – gustoća.

U slučaju vlaknima ojačanih kompozita, moguće je predvidjeti gustoću kompozita pomoću izraza:

$$\rho_c = V_m \cdot \rho_m + V_f \cdot \rho_f, \tag{1.3}$$

gdje se indeks "m" odnosi na matricu, a "f" na vlakno.

Osim toga pomoću zakona miješanja mogu se točno predvidjeti električna i toplinska vodljivost vlaknima ojačanog materijala u smjeru vlakana, u slučaju kada su vlakna kontinuirana i jednosmjerna. Nadalje, ako opterećenje djeluje paralelno s kontinuiranim usmjerenim vlaknima, zakonom miješanja moguće je točno predvidjeti modul elastičnosti:

$$E_c = V_m \cdot E_m + V_f \cdot E_f, \tag{1.4}$$

gdje je : E_c – modul elastičnosti kompozita,

E_m – modul elastičnosti matrice

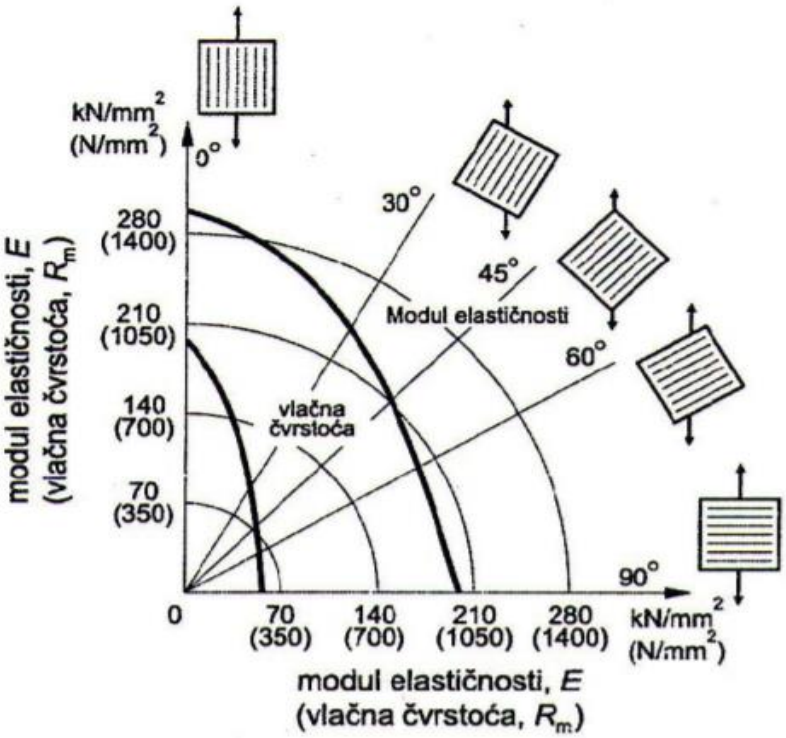
E_f – modul elastičnosti vlakna.

Kod visokih naprezanja započinje deformiranje matrice pa veza između naprezanja i istezanja više nije linearna, a u slučaju djelovanja naprezanja u smjeru okomitom na smjer vlakana, komponente kompozita djeluju neovisno jedna o drugoj.

Čvrstoća kompozita pak ovisi o vezama između vlakana i matrice te je ograničena deformiranjem matrice. Posljedica tih okolnosti je da je utvrđena čvrstoća gotovo uvijek manja od one predviđene pomoću zakona miješanja. Ostala svojstva, kao npr. duktilnost (plastičnost), ponašanje pri udaru (udarna žilavost), ponašanje pri dinamičkom opterećenju (umor materijala) te dugotrajnom statičkom opterećenju (puzanje materijala) predviđaju se teže nego rastezna čvrstoća.

2.1.3. Kompoziti s jednoosno orijentiranim vlaknima

Jednosmjerna vlakna posjeduju optimalnu krutost i čvrstoću kada je opterećenje paralelno s vlaknima. Drugim riječima, raspodjela i usmjerenost vlakana imaju veliki utjecaj na svojstva jednoosno ojačanih vlaknastih kompozita. Naime, mehanička svojstva su u takvim slučajevima vrlo anizotropna. Vlakna se mogu polagati u različitim položajima - pod nekim kutom ili pak ortogonalno pri čemu se žrtvuje maksimalna čvrstoća, ali postižu ujednačena svojstva kompozitnog materijala. Primjer povezanosti usmjerenosti vlakna i mehaničkih svojstava vidi se na slici 2.3.:



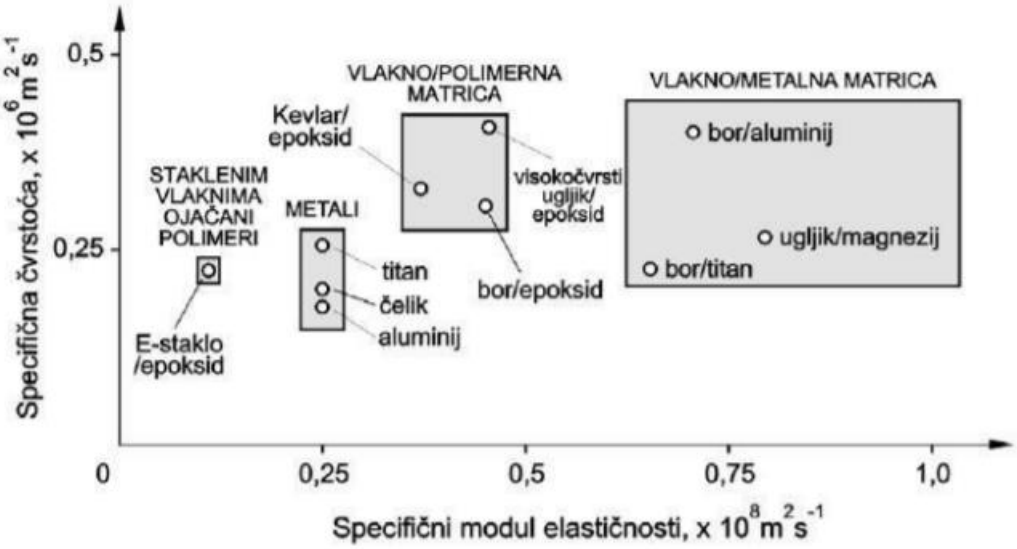
Slika 2.3. Utjecaj usmjerenja vlakana s obzirom na naprezanje za Ti-leguru ojačanu vlaknima bora [2].

2.1.3.1. *Jednosmjerno orijentirana ugljična vlakna*

U postupku izrade se koristi jednoosno orijentirana tkanina od ugljičnih vlakana (*eng. Unidirectional carbon fiber fabric*). To je vrsta ugljičnog ojačanja koja nije isprepletena i sadrži vlakna koja se izvode u jednom smjeru. Razmaka između vlakana nema, a unutar materijala matrice vlakna su posložena u ravnini. Kompozit je izrazito anizotropan s dobrim svojstvima u smjeru vlakana, a pošto nema poprečnog tkanja, čvrstoća vlakana u drugim smjerovima je slaba. Ovim načinom ostvaruje se koncentrirana gustoća vlakana koja osigurava maksimalni potencijal rastezne čvrstoće, veći od bilo kojeg drugog načina tkanja tkanine. Kao primjer usporedbe može se uzeti ostvarenje trostruko veće uzdužne rastezne čvrstoće od konstrukcijskog čelika. Jednoosno orijentirana ojačanja imaju manju masu po površini u usporedbi s drugim oblicima tkanja. Isto tako, u usporedbi s tkanjima ugljičnih vlakana, jednosmjerna ugljična vlakna su ekonomičnija, a što je posljedica nižeg ukupnog sadržaja vlakana i manje kompleksnog procesa proizvodnje [7].

2.2. Materijali vlakana

Najčešće vrste materijala vlakana, to jest ojačala, kod svih kompozitnih materijala pa tako i kod onih s polimernom matricom su sintetska vlakna i to najviše staklena, ugljična i aramidna. Od ostalih anorganskih vlakana u manjoj mjeri koriste se borova, a od organskih poliakrilna, poliesterska, polipropilenska i polietilenska vlakna [8]. Na slici 2.4. se može vidjeti odnos specifičnih čvrstoća i modula za različite kombinacije matrice i ojačala.



Slika 2.4. Odnos specifične čvrstoće i modula elastičnosti vlaknima ojačanih kompozita [2].

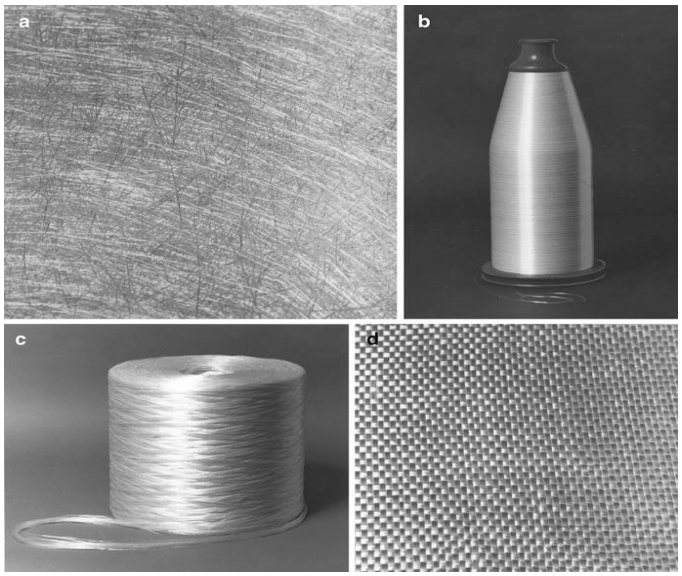
2.2.1. Staklena vlakna

Naziv staklena vlakna je generički, to jest opći naziv baš kao i ugljična vlakna, aluminij ili pak čelik. Kako postoje razne varijante čeličnih ili aluminijskih legura, tako su dostupne i mnoge varijante kemijskih sastava staklenih vlakana. Uobičajena, osnovna staklena vlakna baziraju se na silicijevom dioksidu (~ 50-60% SiO_2) i sadrže niz drugih poput kalcijevih, borovih, natrijevih, aluminijevih ili željeznih oksida. Neke od vrsta ugljičnih vlakana su: E – staklena vlakna, S – staklena vlakna, C – staklena vlakna.

Kod E – stakla, oznaka E u imenu predstavlja svojstvo električnost, zato što su takva staklena vlakna dobar električni izolator uz ostala svojstva poput dobre čvrstoće i optimalni Youngov modul elastičnosti. Oznaka C, kod C – staklenih vlakna odnosi se na koroziju, pošto su C-staklena vlakna najbolje otporna kemijskoj koroziji. Nadalje, S oznaka predstavlja visoki udio silicijevog dioksida što pruža S – staklenim vlaknima najbolju otpornost prema visokim temperaturama od svih staklenih vlakana. Treba naglasiti da je većina proizvedenih kontinuiranih staklenih vlakana spada pod tip E – stakla, ali bez obzira na oznaku E, električna uporaba E – stakla je samo mali dio njihovog ukupnog tržišta.

Staklena vlakana karakterizira svojstvo izotropnosti. Gustoća vlakana je prilično niska, čvrstoća visoka, a modul elastičnosti nije posebno visok. Dakle, dok je omjer čvrstoća i mase staklenih vlakana dosta visoka, omjer modula elastičnosti i mase je umjeren. Ova zadnja karakteristika je vodila zrakoplovnu industriju do razvoja takozvanih naprednih vlakana od materijala poput bora, ugljika, Al_2O_3, SiC. Staklena vlakna se najčešće koriste kao ojačala za poliesterske, epoksidne i fenolne smole, prilično su ekonomski isplativa i dostupna u raznovrsnim oblicima i tkanjima.

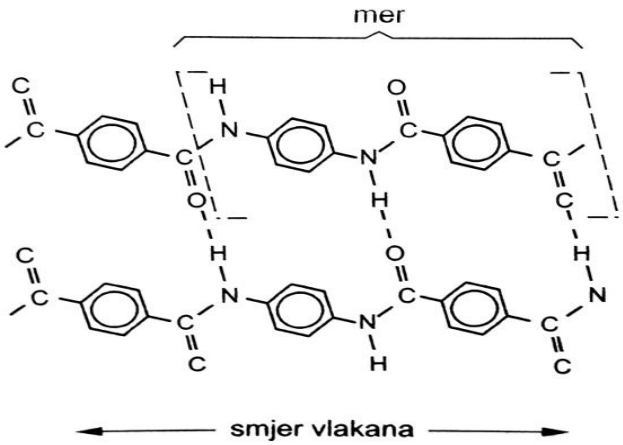
Staklena vlakna su dostupna u raznim oblicima, a slika 2.5. pokazuje neke od njih poput: (a) sjeckanih staklenih vlakana, (b) kontinuirane pređe, (c) rovinga i (d) tekstila.



Slika 2.5. Različiti oblici staklenih vlakana [1].

2.2.2. Aramidna vlakna

Aramidi su aromatski poliamidi. Aramidna vlakna su organski, visokočvrsti i visokomodulni materijali s visokim udjelom kristalne strukture. Posebno su poželjna radi izuzetnog omjera čvrstoća-gustoća koja je iznad one kod metalnih materijala. Kemijski, ova skupina vlakana je poznata i kao "poli-parafenilen-tereftalamid". Radi se o nizu aramida. Tijekom procesa sinteze, rigidni dio molekule organizira se u smjeru osi vlakana kao područja "tekućih kristala", na način kako to prikazuje slika 2.6.



Slika 2.6. Shematski prikaz mera i lančaste strukture aramida [2].

Nadalje, mehanički gledano ova vlakna imaju uzdužnu rasteznu čvrstoću i rastezni modul elastičnosti veći od ostalih polimernih vlaknastih materijala, ali s druge strane relativno su slaba pri tlačnom opterećenju, neotporna na UV zračenje te ih karakterizira nemogućnost bojenja.

Ovu su materijali, uz prethodno navedena svojstva, poznati po svojoj krutosti i žilavosti, otpornosti na udarna opterećenja, otpornosti na puzanje te umoru materijala. Iako aramidi spadaju pod plastomere, oni su stabilni pri relativno visokim temperaturama i nisu zapaljivi. Raspon temperatura kod kojih vlakna zadržavaju visoka mehanička svojstva kreće se od -200 do 200 °C. Također ih karakterizira dobra obradljivost i podnošenje vibracija te dobra dielektrična svojstva. Gledano kemijski, aramidi su podložni degradaciji u dodiru s jakim kiselinama i lužinama, ali relativno inertni prema drugim otapalima i kemikalijama. Budući da su vlakna relativno fleksibilna i ponešto duktilna, daju se prerađivati većinom uobičajenih postupaka za preradu tekstila. Aramidna vlakna se najčešće primjenjuju kod kompozita s polimernom matricom i to poliesterskom ili epoksidnom. Aramidna vlakna se ugrađuju u kompozite slično ili jednako kao i staklena vlakna jer se na tržištu pojavljuje kao roving ili u obliku raznih tkanina i preprega. Najpoznatije aramidno vlakno trgovačkog naziva Kevlar proizvodi tvrtka DuPont. Dva najčešće spominjana tipa ovih vlakana su Kevlar 29 i Kevlar 49, a primjenjuju se pri izradi kablova, užadi, materijala otpornih na trenje, tkanina za zaštitne (pancir) košulje, odnosno služe kao ojačalo za izradu čamaca, automobila te u zrakoplovnoj industriji [2][8].

2.2.3. Borova vlakna

Bor je inherentno krhak materijal. Komercijalno se proizvodi CVD (*eng. chemical vapour deposition*) postupkom taloženjem na neku od podloga pa su samim time i vlakna bora na neki način kompozitni materijal. Vlakna bora proizvode se naparivanjem. Na vrlo fini filament volframa (promjera 12,7 μm) naparuje se spoj bora (npr. BCl_3) koji se raspada, te dolazi do taloženja bora na volframovu žicu. Promjer tako dobivenih vlakana može iznositi od 25 μm do 200 μm [2].

Interes za primjenu čvrstih, ali laganih borovih vlakana kao mogućih strukturnih komponenata zrakoplovnih i ostalih konstrukcija je kontinuiran, iako je taj interes periodično oslabio pri susretu s konkurencijom drugih takozvanih naprednih vlakana, a posebice ugljičnih. Prednost borovih vlakana u odnosu na ostala vlakna visoke učinkovitosti su bolja svojstva u pogledu tlačnih opterećenja, to jest kompresije. To svojstvo proizlazi iz njihovog većeg promjera. S druge strane, velika prepreka široko rasprostranjenoj uporabi borovih vlakana je visoka cijena u odnosu na druga vlakna [1].

2.2.4. Keramička vlakna

Kontinuirana keramička vlakna predstavljaju poželjni skup svojstava. Kod njih su kombinirana svojstva visoke čvrstoće i modula elastičnosti i kod visokih temperatura te općenito otpornost na utjecaj okoliša. Navedene karakteristike čine ih prikladnim ojačanjima konstrukcijskih materijala za primjenu pri povišenim i visokim temperaturama. Osnovnom podjelom keramička vlakna mogu se podijeliti na oksidna te neoksidna vlakna. Neki od predstavnika ovih skupina su keramička vlakna bazirana na silicijevom karbidu (SiC), silicijevom nitridu (Si_3N_4), aluminijevom oksidu (Al_2O_3), borovom karbidu i borovom nitridu [1].

2.2.5. Ugljična vlakna

Kao i kod staklenih vlakana, termin ugljičnih vlakana predstavlja generički naziv za opsežnu skupinu vlakana. Ugljik je visokoučinkovit (eng. *high-performance*) vlaknasti materijal koji pronalazi svoju primjenu najčešće kao ojačalo suvremenih kompozita s polimernom matricom. Razlozi tomu su sljedeći:

1. ugljična vlakna imaju od svih vlaknastih materijala za ojačanje, najviši specifični modul i najvišu specifičnu čvrstoću,
2. visok rastezni modul i čvrstoću zadržavaju i pri povišenim temperaturama, osim što pri tim temperaturama može biti problema zbog oksidacije,
3. pri sobnoj temperaturi vlaga i niz otapala, kiselina i lužina ne razaraju ugljična vlakna. Ova vlakna karakterizira niz fizičkih i mehaničkih svojstava koja omogućuju da kompoziti s tim vlaknima ostvaruju specifična inženjerska posla,
4. razvijeni su relativno jeftini postupci proizvodnje vlakana i kompozita [2].

Ugljik je vrlo lagani element uzevši u obzir vrijednost gustoće od 2,268 g/cm^3 u slučaju kada tvori grafit. Također, može se formirati u više kristalnih oblika, a u slučaju ugljičnih vlakana, poslaguje se u spomenutu formu grafita, pri čemu su njegovi atomi raspoređeni u obliku heksagonalnih slojeva. Međutim, ugljična vlakna nisu u cijelosti kristalna, već se sastoje od grafitnih i nekristalnih područja koja ne sadrže trodimenzionalni raspored heksagonalne kristalne strukture ugljika karakteristične za grafit. 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 visokog stupnja poželjne orijentacije heksagonalnih ravnina duž osi vlakna [1].

2.2.5.1. Prekursori i proizvodnja ugljičnih vlakana

Kako su ugljična vlakna zapravo vlaknasti ugljični materijali sa sadržajem ugljika većim od 90 %, kod njihove se proizvodnje zapravo može upotrijebiti bilo koji prekursor (sirovina) čija ugljična osnova nakon toplinske obrade daje ugljične ostatke. Vlakna se najčešće proizvode, tj. dobivaju iz tri skupine prekursora (sirovina), a koji se dijele na:

1. vlakna na osnovi poliakrilonitrila (PAN),
2. vlakna na osnovi različitih prirodnih smola (eng. *pitch)*
3. vlakna na bazi umjetne svile; celuloze (eng. *rayon*).

PAN prekursori sadrže više od 85 % monomera akrilonitrila (AN), a obogaćenje ugljikom iznosi od 50 – 60 % te se svrstavaju među najkorištenije. Prekursori bazirani na prirodnim smolama imaju doprinos od 85 % pa od njih razvijena ugljična vlakna ostvaruju visok modul elastičnosti, zahvaljujući više grafitnoj prirodi. S druge strane, ova ugljična vlakna imaju slabija tlačna i savojna svojstva u usporedbi s ugljičnim vlaknima na bazi PAN-a. Prekursori na bazi celuloze sadrže 44,4 % ugljika, ali taj sadržaj u primjeni opada na samo prosječno 25-30 % zbog procesa složenijih od samog dehidratiziranja.

Idealne značajke zahtijevanih prekursora za proizvodnju ugljičnih vlakana su olakšana pretvorba prekursora u ugljična vlakna, visok prinos ugljika te troškovno učinkovita obrada. Iz tog razloga se i koriste prije navedeni prekursori. Na trenutnom tržištu dominiraju PAN ugljična vlakna koja su najčešće u primjeni dok ostatak primjene uključuje vlakna na osnovi prirodnih smola i veoma mali udio vlakna na osnovi celuloze [9]. Na slici 2.7. se može vidjeti mikrostruktura PAN ugljičnih vlakana:

Slika 2.7. Mikrostruktura PAN ugljičnih vlakana [10].

Različiti prekursori rezultiraju ugljičnim vlaknima različitih svojstava. Konačna svojstva vlakna ovise o nizu faktora poput: kristalizacija i kristalna struktura, orijentacija molekula, udio ugljika i količina kristalnih nesavršenosti.

Iako procesi dobivanja ugljičnih vlakana od različitih prekursora zahtijevaju različite uvjete i parametre proizvodnje, osnovne značajke tih procesa su veoma slične. Općenito, sva ugljična vlakna su proizvedena kontroliranom pirolizom stabiliziranih prekursorskih vlakana, a proces se dalje dijeli na sljedeće korake:

1. prekursorska vlakna su najprije stabilizirana pomoću zraka u procesu oksidiranja pri temperaturama od 200 do 400 °C;
2. karboniziranje - netaljiva, stabilizirana vlakna su podvrgnuta visokim temperaturama od oko 1500 °C u inertnoj atmosferi za uklanjanje vodika, kisika dušika i ostalih ne ugljičnih elemenata;
3. grafitiziranje – podvrgavanje vlakana temperaturama od oko 3000 °C za postizanje većeg udjela ugljika i modula elastičnosti u smjeru vlakana.

Dodatno, kod proizvodnje PAN vlakna se osim navedenih osnovnih koraka proizvodnje prethodno provodi i proces polimerizacije te predenja (suho ili taljevinsko). Procesi namotavanja su kod ostalih tipova prekursora slični onomu kod proizvodnje PAN prekursora, a isto vrijedi i za postupke naknadnog tretmana površine vlakana kao i za dimenzioniranje i zaštitu istih [9].

Prije skladištenja, relativno inertna površina ugljičnih/grafitnih vlakana se naknadno tretira radi poboljšavanja adhezivnih svojstava vlakana i matrice prilikom daljnje izrade kompozitnog materijala [10].

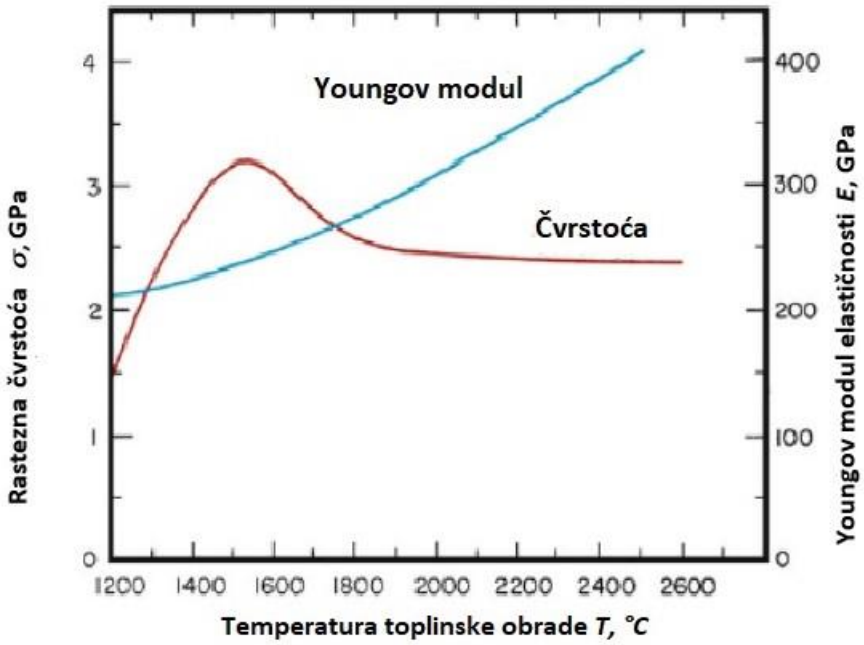
2.2.5.2. Podjela ugljičnih vlakana prema mehaničkim svojstvima

Promatrajući mehanička svojstva ugljičnih vlakana, to jest njihove čvrstoće i veličine modula elastičnosti, ona se mogu podijeliti na vlakna: vrlo visokog modula elastičnosti (UHM), visokog modula elastičnosti (HM), srednjeg modula elastičnosti (IM), niskog modula i visoke čvrstoće (HT) te vlakna vrlo visoke čvrstoće (SHT). Opisane podjele se temelje na sljedećim iznosima:

1. vrlo visoki modul elastičnosti, UHM (E > 450 GPa),
2. visoki modul elastičnosti, HM (E = 350 – 450 GPa),
3. srednji modul elastičnosti, IM (E = 250 – 350 GPa),
4. niski modul, visoka čvrstoća, HS (E < 100 GPa, Rm > 3 GPa),
5. vrlo visoka čvrstoća, SHS (Rm > 4.5 GPa) [11].

Također, vlakna mogu biti klasificirana na osnovi temperature konačne toplinske obrade na vlakna tipa 1 (toplinska obrada na 2000 °C), vlakna tipa 2 (toplinska obrada na 1500 °C) i tip 3 (toplinska obrada na 1000 °C). PAN vlakna tipa 2 su obično vlakna visoke čvrstoće, dok većina ugljičnih vlakana visoke krutosti, to jest modula elastičnosti pripadaju tipu 1. Dakle, ovisno o potrebama u primjeni, vlakna mogu težiti što većem modulu elastičnosti i nižoj čvrstoći što se ostvaruje kada su vlakna napregnuta na višim temperaturama tijekom grafitiziranja ili pak višoj čvrstoći s nižim modulom elastičnosti kao rezultatom niže temperature završne toplinske obrade u procesu proizvodnje [10].

Odnos temperature konačne toplinske obrade i pripadajućih svojstava vlakana, čvrstoće i modula elastičnosti, može se vidjeti na slici 2.8.:



Slika 2.8. Ovisnost čvrstoće i modula elastičnosti o završnoj temperaturi toplinske obrade [1].

3. KOMPOZITI S POLIMERNOM MATRICOM

Za izradu matrice kompozita u eksperimentalnom dijelu rada korišten je polimerni materijal, to jest plastomer koji ubrajamo u kopolimere te ionomere. Materijali polimerne matrice kompozitnih materijala uobičajeno su duromeri i plastomeri. Najviše kompozita se izrađuje od duromernih matrica ojačanih nekim od vlakana te se njihovo tržište kroz godine razvijalo i već je desetljećima stabilno. S druge strane posljednjih tridesetak godina sve je više izraženo i tržište kompozita s plastomernom matricom.

Kompoziti s polimernom matricom (PMC) dokazali su se opravdano kao inženjerski, konstrukcijski materijali, a ne samo u ulozi laboratorijskih ispitivanja. To je posljedica razvijanja vlakana visokih performansi poput ugljičnih, aramidnih i borovih, ali i novih, poboljšanih materijala matrice. Pored toga, staklenim vlaknima ojačani polimeri predstavljaju najupotrebljavaniju skupinu kompozita s polimernom matricom. S druge strane, ugljičnim vlaknima ojačani polimeri predstavljaju najvažnije strukturne kompozite, posebice u domeni zrakoplovstva.

3.1. Plastomeri i duromeri

Na osnovi ponašanja polimera mogu se odrediti dvije glavne skupine polimera, nastale procesom kondenzacijske ili pak adicijske polimerizacije, a to su duromeri i plastomeri. Duromeri su podvrgnuti reakciji očvršćivanja pri čemu dolazi do umrežavanja njihovih polimernih lanaca. Inicijacija takve reakcije ostvaruje se pomoću odgovarajućih kemijskih očvršćivala (eng. *hardening agents*), primjenom topline i pritiska ili pak izlaganjem monomera mlazu elektrona (eng. *electron beam curing*). Različito ponašanje duromera i plastomera proizlazi iz njihove molekularne strukture i oblika, molekularne mase te udjela i vrste veza (kovalentne ili van der Waalsove).

Plastomeri su polimeri koji teku pod djelovanjem opterećenja i topline, tj. mekšaju i tale se zagrijavanjem pa su prikladni za oblikovanje protokom taljevine. Hlađenjem na sobnu temperaturu dolazi do njihovog očvršćivanja. Primjeri takvih polimera su polietilen niske gustoće (LDPE) i visoke gustoće (HDPE), polistiren (PS), poli(metil-metakrilat) (PMMA). Ako je struktura amorfna, ne postoji prividni red između molekula te su lanci poslagani nasumice. Precipitacijom, to jest taloženjem polimera iz razrijeđene otopine dobivaju se mala uređena područja koja se nazivaju kristaliti ili lamele. U lamelama su dugi molekularni lanci posloženi u pravilnom redoslijedu, a više lamela grupirano zajedno tvore sferulite. Plastomere karakteriziraju linearne lančane molekule. Povezano tom činjenicom, bitan je utjecaj vremena

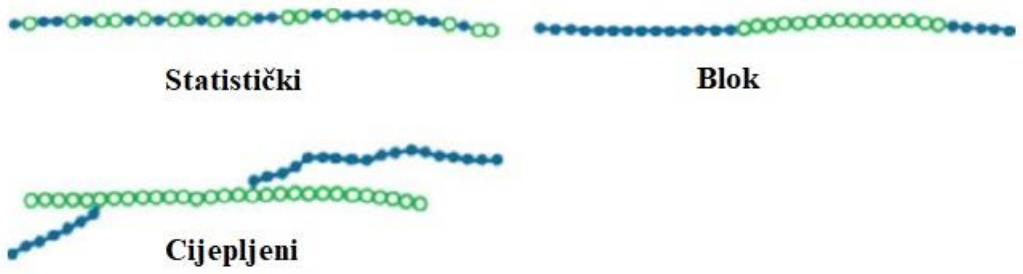
hlađenja plastomera koje utječe na njihov stupanj kristalnosti jer polimerni lanci trebaju vremena kako bi se organizirali. Prevelika brzina hlađenja neće dopustiti da dođe do kristalizacije. S druge strane, kada su molekularni lanci umreženi, otežana su klizanja molekula jedne uz drugu, što čini polimere čvrstima i krutima. Kao što je prije navedeno, takvo umrežavanje i očvršćivanje se pojavljuje kod duromera. Valja napomenuti kako uz prije navedene skupine polimera, duromere i plastomere, postoji i skupina elastomera te posebna skupina dobivena kombinacijom svojstava plastomera i elastomera – elastoplastomeri [1].

3.2. Kopolimeri [1]

Polimeri se također mogu dijeliti na osnovi vrste ponavljajuće jedinice. U slučaju kada polimerni lanac tvori jedna vrsta ponavljajuće jedinice, odnosno monomer, riječ je o homopolimeru. S druge strane, ako se polimerni lanci sastoje od dvije ili više vrsta različitih monomera, takve vrste polimera se nazivaju kopolimeri. Na temelju raznovrsnih rasporeda ponavljajućih jedinica monomera u polimernom lancu nastaju različite vrste kopolimera:

1. statistički – nasumični raspored dviju različitih vrsta monomera,
2. alternirajući – naizmjence ponavljanje dviju vrsta monomera,
3. blok – dulji niz jedne od vrsta monomera slijedi dulji niz druge vrste monomera,
4. cijepljeni – sporedne grane polimera jedne vrste monomera vezani su na glavni lanac druge vrste monomera.

Neki od načina rasporeda monomera u kopolimerima vide se na slici 3.1.:



Slika 3.1. Različiti tipovi kopolimera [1].

3.3. Kompoziti s plastomernim matricama [1]

Značajke ponašanja plastomera pri zagrijavanju imaju značajan utjecaj na proizvodnju kompozita s plastomernom matricom i njihova svojstva. Iako plastomeri mogu biti izloženi ponavljanju toplinskih procesa i taljenja, toplinski utjecaj na plastomere, poput previsoke temperature obrade ili predugog zadržavanja pri određenoj temperaturi, može dovesti do degradiranja njihovih svojstava i svojstava kompozita, a pritom posebice žilavosti. Valja napomenuti da kinetika kristalizacije plastomerne matrice može značajno varirati zbog utjecaja prisutnosti vlakana. Zagrijavanje plastomerne matrice mora se provoditi pri temperaturi iznad tališta da bi se osiguralo njezino tečenje.

Obično se u proizvodnji kompozita s plastomernom matricom koriste diskontinuirana vlakna, ali od kraja 1970-ih godina sve se više razvija proizvodnja kompozita s plastomernom matricom ojačanih kontinuiranim vlaknima. Uobičajene plastomerne smole korištene za materijale matrica kompozita uključuju neke konvencionalne plastomere: polipropilen (PP), poliamid 6 (PA 6), poli(etilen-tereftalat) (PET), poli(butilen-tereftalat) (PBT) i polikarbonat (PC). Neki od novijih materijala plastomerne matrice su poli(amid-imid) (PAI), poli(fenilen-sulfid) (PPS), poli(arilsulfon) (PASU) te poli(etereterketon) (PEEK).

3.4. Svojstva kompozita s plastomernom matricom

Napredak u plastomernoj tehnologiji odvija se kontinuirano. Plastomeri ojačani kontinuiranim vlaknima imaju veću čvrstoću od onih ojačanih diskontinuiranim vlaknima te se sve više proizvode takvi proizvodi. Također, povećanje proizvodnje plastomernih kompozita rezultat je njihovih dobrih svojstava i brojnih prednosti u odnosu na kompozite s duromernim smolama.

3.4.1. Prednosti plastomerne u odnosu na duromernu matricu

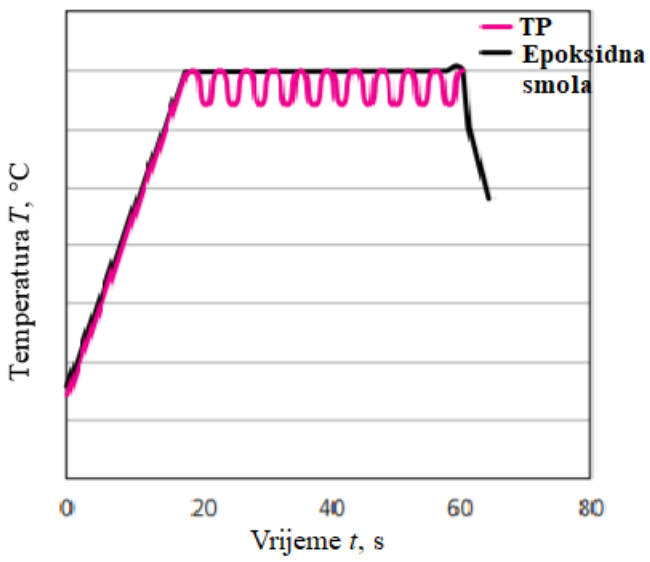
U daljnjem tekstu navedene su karakteristike i prednosti kompozita s plastomernom matricom u odnosu na duromernu matricu. Karakteristike i prednosti navedenih kompozitnih materijala vezane uz njihova svojstva, preradu, troškove i skladištenje su:

- proizvodi se mogu ponovno preraditi, a škart se može reciklirati – troškovno isplativije
- žilavost - plastomeri imaju veći udarni rad loma, tj. udarnu žilavost od jer linearne molekule plastomera rezultiraju većom ukupnom deformacijom prije loma od vrijednosti duromernih materijala, tj. plastomeri su žilaviji od umreženih duromera. Ukupna deformacije plastomernih materijala matrice ima vrijednost od 30 do 100 %, dok je kod duromernih matrica obično od 1 do 3 %. Tako se značajnije vrijednosti žilavosti ostvaruju kod plastomera ojačanih kontinuiranim vlaknima zahvaljujući

superiornoj žilavosti matrice. Velik raspon vrijednosti deformacija kod plastomernih materijala posljedica je raznolikosti u stupnju kristalnosti,

- plastomerni kompoziti imaju bolju dinamičku izdržljivost i bolje podnose oštećenja, a posebice samoobnavljajući
- zaostala naprezanja - budući da plastomerne smole očvršćuju ohlađivanjem, a duromerne smole prilikom zagrijavanja očvršćuju i umrežuju, plastomerni kompoziti općenito pokazuju manje zaostalih naprezanja u oblikovanim proizvodima,
- proizvodi se mogu izraditi ili spojiti grijanjem, moguće je zavarivanje,
- pogodni su za proces automatiziranja proizvodnje – velike serije proizvoda,
- trajanje procesa izrade - iz primjera u zrakoplovnoj industriji uočava se razlika u vremenu trajanja procesa i pripadajućim troškovima. Uobičajeni ciklus pripremanja i prerade neke epoksidne smole primijenjene u zrakoplovnoj industriji traje od 1 do 4 sata. Uzevši u obzir činjenicu da su plastomeri taljivi, oni nakon ugrijavanja na temperaturu iznad tališta oblikuju željeni oblik te su naknadno hlađeni kako bi poprimili konačan oblik ponovnim očvršćivanjem. Obradak se drži pri temperaturi oblikovanja u vremenskom periodu reda veličine nekoliko sekundi ili pak nekoliko minuta, ovisno o debljini stjenke materijala, što rezultira puno kraćim potrebnim vremenom proizvodnje nego kod duromernih smola,
- skladištenje - duromeri imaju ograničeni rok trajanja jer nakon nekog vremena počinju gelirati (potrebno dodavanje malih količina usporavala u procesu proizvodnje). Preprezi duromernih smola imaju ograničeni vijek trajanja i obično se mogu skladištiti šest mjeseci. Isto tako potrebno ih je i hladiti u zamrzivaču. Zahtjevi kontrole proizvodnje diktiraju kolika količina materijala se može koristiti u određenom vremenskom periodu te u kombinaciji s minimalnom kupnjom materijala može doći do rashodovanja materijala i dodatnih troškova proizvoda. S druge strane, plastomerni preprezi ne zahtijevaju hlađenje što osigurava manje troškove opreme, manje površine prostora pogona, smanjenu kontrolu proizvodnje kao i manje utroške energije. Ako je potrebna minimalna kupnja materijala, materijal koji se ne koristi može se skladištiti gotovo neograničeno bez gubitka svojstva uporabe,
- nizak unos vlage, moguće usporavanje širenja plamena,
- alternativa za izradu dijelova bez upotrebe autoklava.

Na slici 3.2. se može vidjeti usporedba trajanja ciklusa te pripadajućih temperatura između plastomera i duromera tijekom proizvodnje:



Slika 3.2. Tipični temperaturni procesi proizvodnje kompozita [13].

3.4.2. Nedostaci plastomerne u odnosu na duromernu matricu

Osim prednosti plastomernih matrica, javljaju se i sljedeći nedostaci njihovih svojstava, proizvodnje i primjerne**:**

- temperatura obrade je obično viša od one kod obrade duromera,
- potrebno je zagrijati i ohladiti smolu pod tlakom što je složenije i drugačije od ustaljenih postupaka proizvodnje duromera pa se zahtijevaju specijalni alati, tehnike i oprema koji mogu biti relativno skupi,
- raspoložive rastaljene plastomerne smole imaju veću viskoznost od duromernih. Zbog visoke viskoznosti, proces infuzije s konvencionalnim plastomernim smolama može dovesti do neodgovarajuće impregnacije snopova vlakana,
- plastomeri u formi preprega su kruti te se mogu javiti problemi kod oblikovanja,
- budući da su plastomerne smole prirodno u čvrstom stanju, zahtjevnije ih je uskladiti s vlaknima, to jest ojačanjem,
- duromerne smole su češće u primjeni primjerice zato što su pri sobnoj temperaturi prije umrežavanja u ukapljenom stanju, a što omogućuje prikladnost impregnacije i staklenih, ugljičnih ili aramidnih vlakana. Također u procesu prerade olakšano je uklanjanje zraka iz obradaka,
- osim jednostavnosti proizvodnje, duromerne smole mogu pokazati izvrsna svojstva s obzirom na niske troškove sirovine,
- proizvođači još uvijek nisu potpuno upoznati s mogućnostima proizvodnje plastomernih kompozita,

- niža temperatura staklastog prijelaza (T_g), ali moguće optimiranje odabirom materijala matrice,
- moguće puzanje materijala, pogotovo pri višim temperaturama [1][12][13][14][15].

3.5. Postupci izrade kompozita s plastomernom matricom [16]

Uporaba kompozita s plastomernom matricom postaje sve popularnija u zrakoplovnoj i automobilskoj industriji posebice zbog njihove povišene žilavosti i stupnja proizvodnosti te minimalnih ekoloških problema. Većina proizvodnih postupaka koji se koriste kod kompozita ojačanih duromernim smolama, prilagodbom procesa, koriste se i za proizvodnju dijelova od kompozita s plastomernom matricom. U slučaju plastomernih matrica obrada je potpuno fizička i nema kemijskih reakcija kao kod duromernih smola.

3.5.1. Namotavanje plastomerne trake/niti (eng. Thermoplastic Tape/Filament winding)

Prednost ovog postupka je veća čistoća u usporedbi s varijantom proizvodnje duromernih kompozita. Najčešći preprezi koji se koriste su PEEK, PA 6 i PPS ojačan ugljičnim vlaknima. Postupak se odvija namotavanjem plastomerne trake preprega ili pak miješanih vrsta vlakana na jezgru, to jest trn. Prilikom namotavanja primjenjuje se toplina i tlak na mjesto dodira valjka i trna kako bi se plastomer rastalio i oblikovao. Toplina se generira raznim načinima, primjerice preko otpora ili indukcije valjaka, visokofrekventnih valova, vrućih plinova. Nadalje, postupkom je omogućeno naknadno oblikovanje proizvoda. Nedostaci postupka su zahtjevniji proces lokaliziranje topline i stlačivanje pomoću valjka te velika početna ulaganja. Isto tako tijekom obrade moguća je pojava mjehurića u strukturi. Postupak nije uvelike konvencionalan, ali su česte izrade prototipova, okvira za bicikle te cjevastih struktura. Također je moguća izrada proizvoda debelih stjenki bez suviše velikih zaostalih naprezanja. Slika 3.3. prikazuje proces namotavanja.

3.5.2. Pultruzija plastomernih kompozita (eng. Thermoplastic pultrusion method)

Pultruzija je postupak istiskivanja kompozitnih štapova i profila. Ovaj proces je sličan procesu pultruzije duromernih kompozita. Pultruzija kompozita s plastomernim matricama se koristi kada se zahtijevaju uvjeti preoblikovanja i popravljanja proizvoda. U ovom postupku koristi se širok raspon materijala smola, uključujući PP, PPS, PEEK ili PEI, dok se kao ojačala većinom koriste ugljična ili staklena vlakna. Nedostaci ove metode su slaba impregnacija, lošija kvaliteta površine, visoka početna ulaganja (veći troškovi sirovina od troškova duromernih

materijala) ili pak otežano tečenje materijala zbog velike viskoznosti zbog kojeg je teško proizvoditi složenije profile. Zbog ovih nedostataka primjena postupka nije komercijalno zastupljena te se proizvode dijelovi jednostavnih oblika poput šipki, kvadratnih i kružnih profila i traka.

3.5.3. Izravno prešanje (eng. Compression molding)

Izravno prešanje jedina varijanta proizvodnje kompozita s plastomernom matricom koja se koristi u široko rasprostranjenim komercijalnim primjenama za izradu plastomernih konstrukcijskih dijelova. Nadalje, postupak izravnog prešanja plastomernog preprega (GMT) vrlo je sličan postupku izravnog prešanja pločastog osmoljenog mata (SMC), uz napomenu da je prešanje plastomernog preprega dva do tri puta brži postupak. Postupak se prvenstveno koristi u automobilskoj industriji.

Ovaj postupak karakterizira oblikovanje taljevine pri čemu je zagrijani materijal stlačen između polovica kalupa kako bi smola i vlakna zapunili kalupnu šupljinu. Ciklus obično traje od 30 do 60 sekundi. Za razliku od prešanja SMC – a, GMT se zagrijava u pećnici opremljenoj transportnom trakom na temperaturu iznad temperature tališta plastomera prije nego što je postavljen u unutrašnjost kalupa.

Izravno prešanje je jedan od najbržih i najproduktivnijih postupaka izrade kompozitnih konstrukcijskih dijelova te je potreban manji broj alata i ljudskog rada kod proizvodnje. Nedostatci ovoga postupka su: visoka početna ulaganja, tipični volumni udio vlakana je oko 20 do 30 % zbog visoke viskoznosti matrice te osrednja kvaliteta površine proizvoda. Ovaj se postupak jedini koristi u industriji za izradu konstrukcijskih dijelova, a posebice za izradu odbojnika i nadzornih ploča te ostalih raznih dijelova u automobilskoj industriji.

3.5.4. Vruće prešanje (eng. Hot press technique)

Ovaj postupak je sličan postupku oblikovanja lima. U postupku su plastomerni preprezi složeni zajedno i postavljeni između zagrijanih kalupa. Za razliku od GMT – a, preprezi su u ovom slučaju izrađeni od jednosmjernih kontinuiranih vlakana, a volumni udio vlakana je veći od 60 %. Kod ove metode najčešće se primjenjuju ugljičnim vlaknima ojačani PEEK ili PPS. Prednosti ovog procesa upravo su moguće ostvarenje većeg volumnog udjela vlakana u kompozitu, mogućnost proizvodnje dijelova raznih dimenzija te mogućnost recikliranja istih. S druge strane, moguća je izrada samo jednostavnih dijelova poput ravnih ploča., a postupak nije stekao raširenost upotrebe, otežana je proizvodnja debljih konstrukcija te dijelova bez ikakvih izobličenja ili iskrivljenja.

3.5.5. Oblikovanje u autoklavu (eng. Autoclave processing)

Postupak oblikovanja kompozita s plastomernom matricom sličan je varijanti oblikovanja kompozita s duromernom matricom. Tijekom postupka plastomerni preprezi se polažu u alat u željenom redoslijedu te se točkasto zavaruju kako se složeni slojevi ne bi pomicali tijekom daljnje obrade. Pripravak se tada vakuumira pomoću podtlačne gumene vreće (eng. *vacuum bag*) i stavlja u autoklav. Na kraju postupka proizvod se vadi iz alata. Nadalje, glavne primjene ovog postupka su izrada kompozitnih dijelova za zrakoplovnu industriju, a koje karakteriziraju poboljšana svojstva žilavosti. Sirovine korištene kod ovog postupka obično su plastomeri ojačani jednosmjernim vlaknima. Najčešće su u primjeni ugljičnim vlaknima ojačani PEEK ili PPS. Također se mogu koristi PP, PA 6 i druge vrste ojačane staklenim ili pak aramidnim vlaknima.

Prednosti postupka su mogućnost proizvodnje kompozitnih konstrukcijskih dijelova s visokim volumnim udjelom vlakana, moguća je proizvodnja uz bilo koju orijentaciju vlakana, proizvodnja je jednostavna i prikladna za proizvodnju prototipova, a isto tako je jednostavna i konstrukcija proizvodnih alata ove metode. Ograničenja postupaka su relativno visoka početna ulaganja, otežano spajanje, a u usporedbi s oblikovanjem kompozita s duromernom smolom, obrada je teža te se zahtijevaju više temperature i tlakovi.

3.5.6. Dijafragmatsko preoblikovanje (eng. Diaphragm forming)

Za razliku od prije navedenih postupaka proizvodnje, ovaj postupak nije nastao prilagodbom postupaka proizvodnje duromernih kompozita, već je posebno razvijen za rad s plastomernim preprezima. Postupak se provodi postavljanjem slojeva preprega u obliku kompozitnih ploča između dvije fleksibilne dijafragme i nakon toga su oblikovani pomoću topline i tlaka u donjem dijelu kalupa, pri čemu se slojevi preprega mogu slobodno micati između dvije ograničene dijafragme. Kompozitne ploče formiraju se slaganjem jednosmjernih materijala preprega u željenom rasporedu i orijentaciji. Slično kao i kod metode vrućeg prešanja, materijali korišteni kao sirovine su ugljičnim vlaknima ojačan PEEK, PPS, PA ili pak PA ojačan staklenim vlaknima.

Prednosti postupka su ostvarivanje izvrsnih strukturnih svojstava zbog moguće primjene kontinuiranih vlakana te moguća proizvodnja relativno složenih oblika ujednačene debljine stjenke, s razumno visokom učinkovitošću proizvodnje. S druge strane, postupak je ograničen na izradu samo dijelova konstantne debljine. Također, otežano je zadržavanje jednoličnog rasporeda vlakana tijekom proizvodnje jer se ovim postupkom omogućuje gibanje kompozita između dijafragmi te je vrlo lako moguća njihova deformacija.

Ova metoda još nije komercijalno raširena, ali se u nekim slučajevima, posebice u istraživačke svrhe, koristi za izradu složenih dijelova, kaciga, valovitih oblika, itd.

3.5.7. Injekcijsko prešanje (eng. Injection molding)

Postupak se temelji na postupku neojačanih plastomernih materijala. Kod injekcijskog prešanja kompozita s plastomernom matricom upotreba vlakana u matrici povećava mehaničku čvrstoću proizvoda i osigurava bolju dimenzijsku stabilnost. Postupak se koristi kod izrade veoma kompleksnih dijelova te je automatiziran, a proizvodni ciklus obično traje od 20 do 60 sekundi. Prednosti postupka su mogućnost izrade kompleksnih dijelova u jednom ciklusu prešanja, ostvaruje se odlična ponovljivost i dimenzijska točnost dijelova, proces omogućuje izradu jeftinih dijelova zbog svojstva velike proizvodnosti, mogu se proizvesti proizvodi velikog raspona masa i dimenzija, ostvaruje se izvrsna površinska kvaliteta i nije potrebna naknadna obrada, a količina otpadnog materijala je mala. Nedostaci postupka su velika početna ulaganja za opremu zbog čega nisu isplative male serije proizvoda, neprikladnost za izradu prototipova, dodatno vrijeme procesa zbog potrebe za konstruiranjem kalupa, njegove izrade, potrebe izrade računalne simulacije, otklanjanja grešaka te potrebne probe postupka prije pokretanja proizvodnje. Također, postupak je određenom nizom varijabli na koje treba obratiti pažnju pa je teško odmah odrediti kvalitetu proizvoda.

Početni materijali plastomernih kompozita su u granuliranom obliku. Granulat se dobiva pultrudiranjem i sjeckanjem kompozitnih šipka na komadiće duljine oko 10 mm. Obično su u primjeni staklenim vlaknima ojačani PP, PET, PA, a koriste se i ugljičnim te aramidnim vlaknima ojačan granulat. Primjena ovakvih kompozitnih materijala je kod izrade kućišta, lančanika, automobilskih dijelova i mnogih drugih.

4. SAMOOBNAVLJANJE

Za potrebu izrade matrice kompozitnog materijala u eksperimentalnom radu korišten je samoobnavljajući materijal Surlyn® 8940. U ovom poglavlju opisani su proces samoobnavljanja kao posebno svojstvo materijala, ali i skupina ionomera u koju spada sam materijal matrice.

4.1. Samoobnavljanje polimernih materijala

Razvoj i karakterizacija samoobnavljajućih (samozacjeljujućih) sintetskih polimernih materijala inspirirani su biološkim sustavima kod kojih je oštećenje okidač za reakciju autonomnog zacjeljivanja. Samoobnavljajući materijali su novo i interesantno područje istraživanja koje bi moglo značajno produžiti radni vijek te sigurnost polimernih komponenti za širok raspon primjena [17].

Budući da se polimeri i kompoziti sve više koriste u konstrukcijske svrhe u zrakoplovstvu, automobilskoj industriji, brodogradnji ili pak obrambenoj industriji, nekoliko tehnologija je razvijeno i prihvaćeno od strane industrije za popravljanje vidljivih te prepoznatljivih oštećenja polimernih struktura. Međutim, konvencionalne metode popravka nisu djelotvorne kod zacjeljivanja nevidljivih mikropukotina unutar konstrukcija za vrijeme radnog vijeka. Upravo zbog toga razvijen je koncept samoobnavljanja materijala kao sredstvo zacjeljivanja mikropukotina sa svrhom produljenja radnog vijeka i sigurnosti komponenata [18].

Kod nekih samoobnavljajućih materijala zacjeljivanje je autonomno, tj. proces se odvija samostalno nakon pojave oštećenja te je samo oštećenje okidač za proces zacjeljivanja. Neautonomne skupine samoobnavljajućih materijala zahtijevaju neku od vanjskih metoda otkrivanja oštećenja, a za početak procesa liječenja je potreban određeni dodatni poticaj, tj. okidač poput topline. Mnogi do sada razvijeni samoobnavljajući materijali ograničeni su na samo jedan proces zacjeljivanja na određenom mjestu, međutim neki od njih sposobni su zacijeliti više puta (uzastopno) na istom mjestu [19].

Samoobnavljanje polimernog materijala može se povezati s obnavljanjem svojstava poput lomne žilavosti, rastezne čvrstoće, hrapavosti površine pa čak i molekularne mase. Mehanizmi samoobnavljanja plastomernih materijala može se postići pomoću više mehanizama, a ti mehanizmi su: molekulska interdifuzija, foto-inducirano zacjeljivanje, rekombinacija krajeva lanaca i samoobnavljanje formiranjem reverzibilnih veza (organo – siloksan te ionomeri).

Mehanizam samoobnavljanja formiranjem reverzibilnih veza podrazumijeva pokretljivost lanaca plastomera pri čemu se ostvaruje zacjeljivanje oštećenja ili puknuća pri sobnoj

temperaturi, a što se ostvaruje reverzibilnim vezama u matrici polimera. Tako je omogućen alternativni pristup samoobnavljanju kovalentnih veza katalizatorom iniciranog obnavljanja ili UV svjetlom, a pritom se koriste vodikove ili ionske veze kako bi se oštećena polimerna mreža zacijelila [17]. Pod ovaj mehanizam svrstava se i skupina ionomera kojoj pak pripada i samoobnavljajući Surlyn.

4.1.1. Ionomeri

Polimeri koji sadrže do 15 % ionskog sadržaja nazivaju se ionomeri. Ionska interakcija, karakteristična za ionomere, predstavlja povratnu interakciju pri kojoj dolazi do reverzibilnog umrežavanja Ionomeri se zbog mogućnosti umrežavanja nakon oštećenja materijala te obnavljanja mehaničke čvrstoće sve više ispituju. Pokazalo se da povećanje ionskog sadržaja u polimeru dovodi do povećanja krajnje čvrstoće i otpornosti materijala na lom. Tijekom djelovanja na materijal, energija se prenosi ionomeru i zagrijavajući ga pritom na približno 98 °C provodi u rastaljeno stanje. Materijal tada pokazuje viskoelastični oporavak i zatvara rupu, a ionske interakcije se ponovno oblikuju kako bi vratile prvobitna svojstva materijala [20].

U slučaju Surlyna® podrazumijeva se dvofazni sustav raspoređenih ionskih grozdova (eng. *clusters*) raspršenih unutar kontinuirane kristalaste polimerne matrice. Povećavanjem temperature polimer prelazi iz uređenog u neuređeno stanje zbog čega ionski grozdovi, iako postojani, gube svoj poredak i svojstva. Ako se temperatura još poveća, kristalasta polimerna matrica se tali (iznad T_m), a neuređeni grozdovi ostaju i nastavljaju osiguravati čvrstoću taljevine. Ove su transformacije bitne u situacijama samoobnavljanja odmah nakon djelovanja udara u materijal pri čemu se toplina nakon udara raspršuje te tada djeluje reverzibilnost koja osigurava brzo očvršćivanje, dok reorganizacija ionskih grozdova i fizičkog umrežavanja slijede sporije. Prema tome, da bi se proces samoobnavljanja Surlyna® odvijao potreban je unos energije u materijal, a što se obično ostvaruje pomoću određene vrste udara pri čemu se razvija toplinska energija [18].

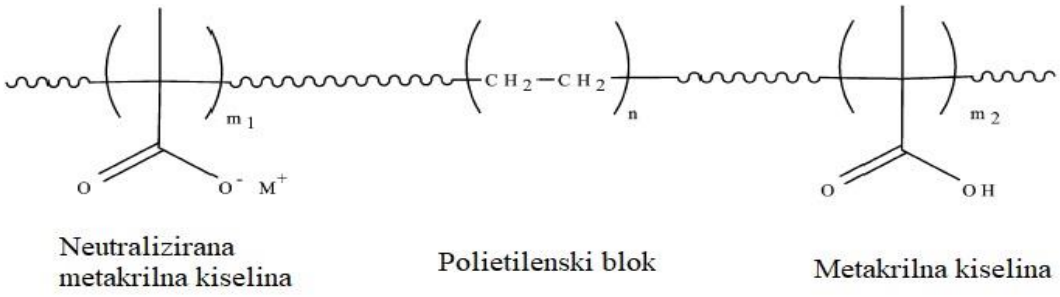
5. EKSPERIMENTALNI DIO

5.1. Materijali matrice i ojačala

U daljnjem tekstu najprije su opisani materijali korišteni za izradu matrice i ojačala kompozitnog materijala, tj. plastomerni samoobnavljajući Surlyn® 8940 te jednosmjerna ugljična vlakna.

5.1.1. Surlyn® 8940

Komercijalno dostupan polimer Surlyn® 8940 je djelomično neutraliziran ionomer, tj. samoobnavljajući statistički kopolimer etilena i metakrilne kiseline (E/MAA). Surlyn® 8940 sadrži 5,4 mol.% skupine metakrilne kiseline od kojih je 30% neutralizirano natrijem[18]. Struktura ionomera Surlyna® može se vidjeti na slici 5.1.:



Slika 5.1. Struktura djelomično neutraliziranog ionomera Surlyna® [17].

Udio metakrilne kiseline i razina neutralizacije se optimiraju i prilagođavaju kako bi se ostvarila odlična prozirnost i visoka krutost posebice u usporedbi s drugim vrstama Surlyna®.

Ovaj polimerni materijal može se proizvoditi konvencionalnim metodama ekstruzije i injekcijskog prešanja pomoću opreme konstruirane za preradu smola od polietilena ili pak kopolimera etilena, pri čemu se dobivaju različiti oblici ili folije [21].

Proizvođač DuPont™ navodi vrijednosti tipičnih karakteristika prikazanih u tablici 5.1. te fizičkih i toplinskih svojstava Surlyna® 8940, dobivena uz odgovarajuće norme ispitivanja, kako je prikazano tablici 5.2.:

Tablica 5.1. Karakteristike i prednosti Surlyna® 8940 [21].

Karakteristika	Vrijednost	Norma
Temperatura krhkosti	-106 °C	ASTM D746
Otpornost na abraziju	370 NBS Index	ASTM D1630
Savojni modul elastičnosti (23 °C)	350 N/mm^2	ASTM D790
Savojni modul elastičnosti (-20 °C)	717 N/mm^2	ASTM D790
Ukupno istezanje (23 °C)	470%	ASTM D638 / ISO 572-2
Prekidna čvrstoća (23 °C)	33 N/mm^2	ASTM D638 / ISO 572-2
Granica tečenja (23 °C)	15 N/mm^2	ASTM D638
Tvrdoća (Shore D)	65	ASTM D2240 / ISO 868
Zamućenje	5 %	ASTM D1003
Zaderna čvrstoća (23 °C)	1,48 kN/m	ASTM D624

Tablica 5.2. Tipična fizička i toplinska svojstva Surlyna® 8940 [21].

Fizičko svojstvo	Nominalna vrijednost	Norma
Gustoća	0,95 g/cm^3	ASTM D792 / ISO 1183
Maseni protok taljevine (190˚C/2,16 kg)	2,8 g/10 min	ASTM D1238 / ISO 1133
Toplinsko svojstvo		
Talište	94 °C	ASTM D3418 / ISO 3146
Ledište	59 °C	ASTM D3418 / ISO 3146
Točka mekšanja	63 °C	ASTM D1525 / ISO 306

5.1.2. Ugljična vlakna u formi ojačala Surlyna® 8940

Svojstva polimernih materijala, time i samog Surlyna, mogu biti poboljšana dodavanjem raznih ojačala. U sklopu eksperimentalnog dijela rada, Surlynu su kao ojačalo dodana jednoosno usmjerena ugljična vlakna. Dominantna karakteristika takvog načina ojačavanja je anizotropnost. Kako je spomenuto u poglavlju 2.1, svojstva kompozitnog materijala u smjeru jednoosno orijentiranih vlakana su superiorna. Pri izradi kompozita u okviru eksperimentalnog dijela ovog rada korištena su ugljična vlakna jednosmjernog tkanja proizvođača „G.Angeloni srl“. Neke od karakteristika ovih ugljičnih vlakana dane su u sljedećoj tablici 5.3.:

Tablica 5.3. Karakteristike jednosmjernih ugljičnih vlakana [22].

Karakteristike		**Nominalno**	**Tolerancija**	**Norma**
Masa po jedinici površine	[g/mm^2]	100	± 5 %	ISO 4605
Tkanje		JEDNOSMJERNO		ISO 2113
Standardna širina	[mm]	1000	± 3,5 %	-
Debljina laminata	[mm]	0,095	± 3,5 %	-

Jednosmjerno tkanje sačinjeno je od dva sloja povezanih ljepilom, pri čemu je udio ugljičnih vlakana 94 %. Nominalna izvedba ugljičnih vlakana prikazana je u tablici 5.4.:

Tablica 5.4. Nominalna izvedba jednosmjernog tkanja [21].

NOMINALNA IZVEDBA		Opis			Nominalna masa	Tolerancija
Vlakno	Sloj 1	Grafil 15K 1000 dtex	g/m^2	47	94 %	± 4 %
			%	50		
	Sloj 2	Grafil 15K 1000 dtex	g/m^2	47		
			%	50		
Ljepilo		Kompatibilno sa smolama			6 %	± 4 %

5.2. Izrada kompozitnih ploča

Konstituenti ionomer Surlyn® 8940 i jednosmjerno ugljično tkanje korišteni su u eksperimentalnom dijelu rada za izradu kompozitnih ploča. Za potrebe ispitivanja i uspoređivanja dobivenih svojstava izrađene su četiri kompozitne ploče i ploča izrađena samo od polimernog materijala Surlyna® 8940. Prilikom izrade svake od kompozitnih ploča mijenjani su parametri izrade: vrijeme, temperatura i tlak kako bi se proučio utjecaj parametara na svojstva dobivenih izratka. Za izradu polimernih i kompozitnih ploča korištena su dva kalupa – čelični i aluminijski.

Prvi dio izrade bio je identičan za svaku od četiri kompozitne ploče. U tom dijelu postupka izrađene su polimerne ploče koje nose funkciju matrice u budućem kompozitnom materijalu. Prvi korak izrade polimerne ploče bio je umetanje otprilike 50 grama granulata Surlyna® 8940 u kalup. Raspoređeni granulat je tada vakuumiran na vrijednosti tlaka između 0,08 - 0,1 bara, pomoću vakuumske pumpe, pri sobnoj temperaturi u trajanju 15 minuta. Nakon toga je kalup zagrijan u pećnici pomoću grijača na temperaturu od 160 °C i u tim uvjetima je držan isto 15

minuta. Nakon što se granulat rastalio, kalup je podvrgnut postupku prešanja. Prešanje se izvelo pomoću preše, pritiskom od 40 bara, u trajanju od 15 minuta. Na kraju postupka polimerne ploče su izvađene iz kalupa. Debljine ploča iznosile su oko 1,6 mm, pri čemu je dobivena debljina određena pomoću graničnika koji se nalazio između gornjeg i donjeg dijela kalupa. Kako je za svaku kompozitnu ploču bilo potrebno izraditi dvije ploče od Surlyna® 8940, postupak izrade polimernih ploča se ponavljao dva puta.

Za potrebe ispitivanja svojstava i usporedbu kompozitnog materijala u odnosu na neojačani materijal izrađena je i ploča samo od Surlyna. Navedena ploča nazvana je ploča 1, a ostale četiri kompozitne ploče numerirane su brojevima 2 – 5.

U drugom dijelu izrade dvije polimerne ploče i između njih postavljeno jednosmjerno tkanje od ugljičnih vlakana stavljeni su u kalup s graničnikom debljine otprilike 3 mm. Koraci izrade su u općem smislu jednaki, ali se međusobno razlikuju primijenjene vrijednosti parametara. Koraci izrade podrazumijevaju:

1) vakuumiranje pomoću vakuumske folije na sobnoj temperaturi,

2) zagrijavanje u pećnici na povišenoj temperaturi pod daljnjim djelovanjem vakuuma,

3) vakuumiranje i prešanje pri povišenoj temperaturi.

U tablici 5.5. prikazane su vrijednosti parametara drugog dijela prerade za svaku ispitnu kompozitnu ploču:

Tablica 5.5. Parametri izrade kompozitnih ploča.

Ploča	**2**	**3**	**4**	**5**
Trajanje vakuumiranja pri sobnoj temperaturi [min]	15	15	30	15
Temperatura zagrijavanja [°C]	130	160	160	160
Vrijeme grijanja* [min]	15	15	20	15
Tlak prešanja [bar]	40	40	10	-
Vrijeme prešanja* [min]	15	15	2	-

*Grijanje i prešanje su provedeni uz istovremeno vakuumiranje.

Kompozitna ploča 2 izrađena je u aluminijskom kalupu, za razliku od ostalih ploča koje su izrađene u drugom, čeličnom kalupu. Izrada kompozitne ploče u aluminijskom kalupu se pokazala lošom zbog pomicanja tkanja unutar obratka te otežanog vađenja samog obratka iz

kalupa. Također se unutar kompozita pojavio veliki broj mjehurića zarobljenoga zraka i vlage. Ploča 3 izrađena je u čeličnom kalupu. Proces prerade u čeličnom kalupu pokazao se boljom varijantom u usporedbi s aluminijskim kalupom, stoga su i ploče 4 i 5 izrađene u čeličnom kalupu.

Kako bi se smanjilo kretanje tkanja unutar materijala matrice prilikom prešanja, na ovu ploču nije primijenjeno prešanje, već je nakon vakuumiranja pri povišenoj temperaturi ploča odmah pritisnuta rukama.

Izrađene ploče korištene su za rezanje ispitnih tijela potrebnih za proučavanje i usporedbu dobivenih svojstava kompozitnih materijala u odnosu na pripadajuće parametre obrade.

5.3. Određivanje masenog udjela vlakana

Iz svake od prethodno izrađenih četiri kompozitnih ploča izrezane su odgovarajuće pločice od nekoliko grama pomoću kojih je određen maseni udio ugljičnih vlakana u kompozitu. Svaka pločica je stavljena zasebno u pojedinu keramičku posudicu te je s njom izvagana. Prije toga su, radi određivanja mase samih kompozitnih pločica, izvagane mase keramičkih posudica, a razlika između posudice s pločicom i prazne posudice je predstavljala masu svakog od kompozitnog priprema. Posudice su tada stavljene u peć zagrijanu na 600 °C i grijane su četiri sata kako bi se plastomerna matrica kompozitnih pločica rastalila i isparila. Upravo zbog tako visoke temperature se pločice nalaze u vatrostalnim keramičkim posudicama.

Nakon procesa grijanja posudice su izvađene, a u njima su ostala ugljična vlakna iz pločica zbog njihove otpornosti na visoke temperature. Posudice s ugljičnim vlaknima su tada izvagane, kako bi se mogla odrediti masa preostalih ugljičnih vlakana.

Maseni udio vlakana svake kompozitne pločice određen je pomoću izraza:

$$w_v = (m_{ostatak} / m_{pločica}) \cdot 100\%, \tag{1.5}$$

gdje je:

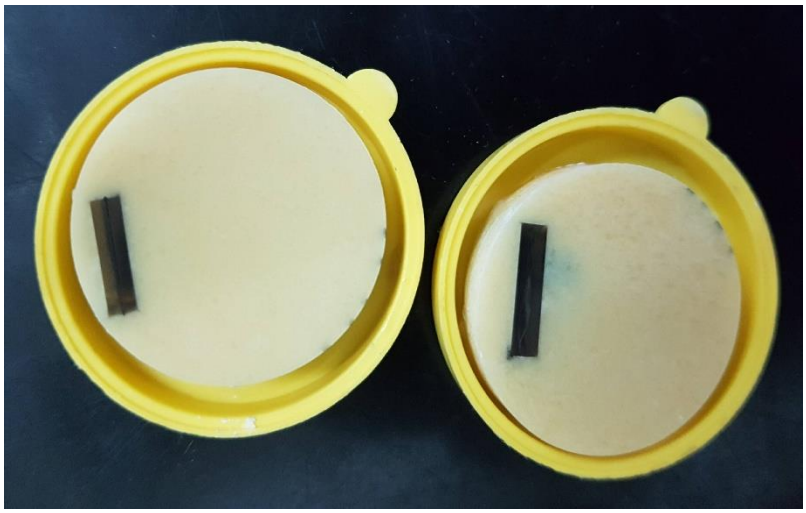
$m_{ostatak}$ - razlika mase posudice s ugljičnim vlaknima i prazne posudice,

$m_{pločica}$ – razlika mase posudice s kompozitnom pločicom i prazne posudice.

5.4. Analiza kompozita svjetlosnim mikroskopom

Mikroskopiranje pripremaka dobivenih iz kompozitnih ploča provedeno je na svjetlosnom mikroskopu. Najprije je bilo potrebno pripremke iz kompozitnih ploča kako bi bili adekvatni za promatranje pod svjetlosnim mikroskopom, a pripremom se podrazumijeva brušenje i poliranje.

Priprema je izvedena na uređaju za brušenje i poliranje LaboPol-5 proizvođača Struers. Kompozitni pripremci za mikroskopiranje, smješteni su u kalupe okruglih oblika te su zaliveni pripremljenom dvokomponentnom polimernom smjesom. Tako zaliveni odstajali su četiri sata kako bi polimerna smjesa očvrsnula, a pripremci se fiksirali. Na slici 5.2. vide se pripremci skrućeni u polimernoj masi u odgovarajućim kalupima.

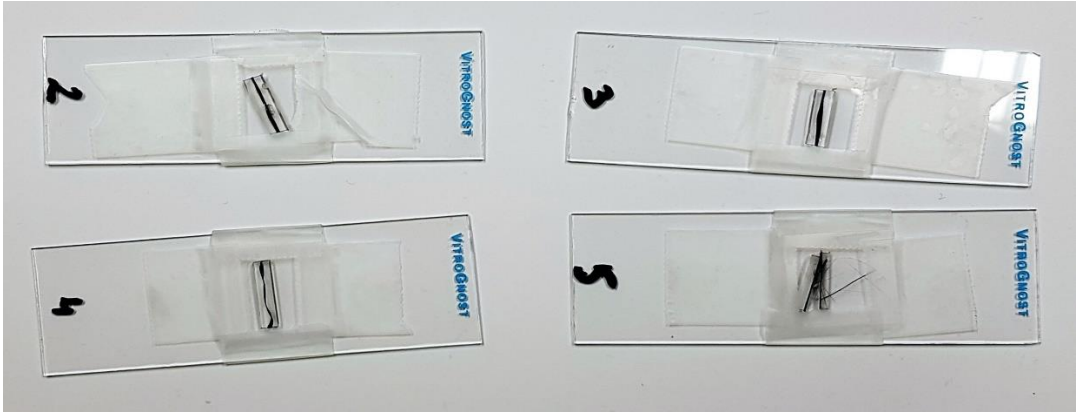


Slika 5.2. Pripremci zaliveni u kalupu u polimernoj masi.

Nakon što je smjesa očvrsnula, zaliveni pripremci su stavljeni u odgovarajuće držače na polirnom uređaju LaboPol-5 proizvođača Struers. Poliranje se odvijalo brzinom od 300 okr/min, a pritom su pripremci i polirni disk podlijevani vodom. Proces se povremeno zaustavljao kako bi se namjestio položaj kompozitnih pripremaka jer se zbog gubitka debljine istih pri poliranju smanjila i sila pritiska. Uređaj za poliranje te opisani proces poliranja vide se na slici 5.3.:

Slika 5.3. Poliranje kompozitnih pripremaka.

Nakon poliranja kompozitni pripremci su stavljeni u otopinu alkohola kako bi se odvojila ljepljiva traka čija je uloga bila fiksirati ispitne pripremke u kalupu. Na kraju su pripremci odvojeni od polimerne mase i prilijepljeni na mikroskopska stakalca, a što se vidi na slici 5.4.:



Slika 5.4. Pripremci za mikroskopiranje ploča 2, 3, 4 i 5.

Na preparatima pripremljenima poliranjem mogla se zamijetiti razlika onog ploče 5 jer je već prilikom poliranja došlo do raslojavanja. Tako pripremljeni kompoziti stavljeni su pod svjetlosni mikroskop i promatrani pod različitim povećanjima.

5.5. Određivanje savojnog modula elastičnosti

Ispitivanja savojnog modula elastičnosti su provedena na univerzalnoj kidalici, ZMG WEB Thueringer Industriewerk Rauenstien u Laboratoriju za polimere i kompozite. Raspon sila opterećenja kidalice u ovom slučaju je 0-950 N, a brzina ispitivanja 7 mm/min. Kako je bilo potrebno odrediti povezanost vrijednosti svojstava, u ovom slučaju savojnog modula, s parametrima obrade (temperatura, tlak, vrijeme), iz svake od pet ispitnih ploča izrezana su po tri ispitna tijela. Ispitna tijela izrezana iz pojedinih kompozitnih ploča prikazuje slika 5.5.

Slika 5.5. Ispitni pripremci kompozitnih ploča za ispitivanje savojnog modula.

Primijenjeno je ispitivanje savijanjem u tri točke ili trotočkasto ispitivanje, pri čemu je ispitno tijelo oslonjeno na dva oslonca i opterećeno na sredini silom F. Primijenjena sila uzrokuje progib, odnosno posmak epruvete. Tijekom postupka se bilježe trenutne sile i odgovarajući progib, a raspon primijenjene sile se nalazi između 0 do 20 N, ovisno o pojedinoj epruveti. Iz dobivenih vrijednosti sile i progiba određene su vrijednosti pripadajućih naprezanja i istezanja te su na temelju tih vrijednosti izrađeni dijagrami naprezanje – istezanje ($\sigma - \varepsilon$). Savojni modul elastičnosti određuje se iz nagiba pravca dobivenog u dijagramu.

Za izračun vrijednosti pripadajućeg naprezanja koristi se izraz:

$$\sigma = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}, \tag{1.6}$$

dok se za izračun vrijednosti istezanja koristi izraz

$$\varepsilon = \frac{6 \cdot f \cdot h}{L^2}, \tag{1.7}$$

gdje je:

L – razmak između oslonaca, mm

b – širina ispitnog tijela, mm

h – debljina ispitnog tijela, mm.

Prije samog postupka ispitivanja, izmjerene su dimenzije izrezanih ispitnih tijela te je određen potreban razmak između oslonaca, a koji se računa pomoću izraza:

$$L = 16 \cdot h_{sr}. \tag{1.8}$$

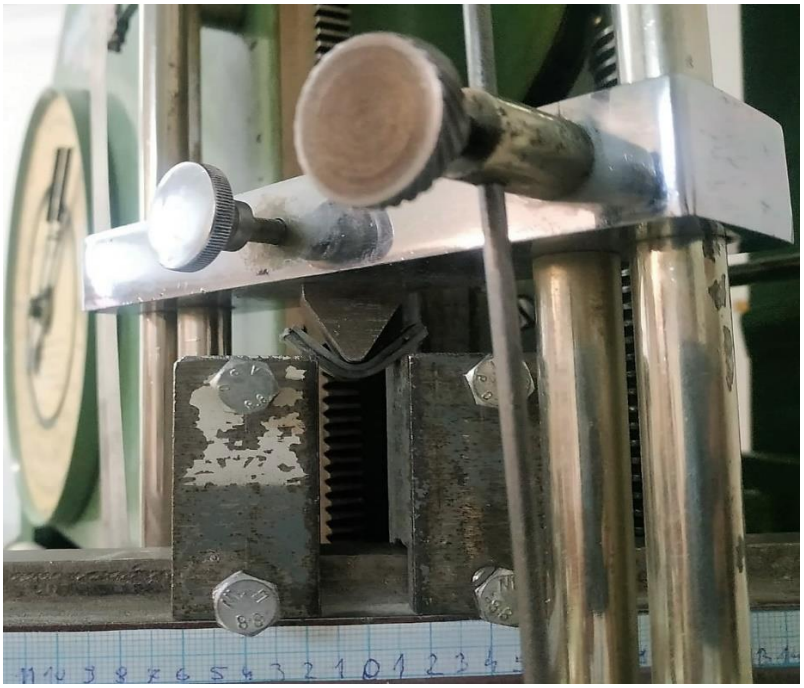
5.6. Određivanje prividne smične međuslojne čvrstoće

Prividna smična međuslojna čvrstoća je mjera za kvalitetu granične površine (međusloja) te ovisi o čvrstoći prianjanja matrice i vlakna za ojačanje. Ispitivanje prividne smične međuslojne čvrstoće provedeno je na univerzalnoj kidalici ZMG VEB Thueringer Industriewerk Rauenstein u Laboratoriju za polimere i kompozite, a ispitana su 4 ispitna tijela, po jedno od svake kompozitne ploče. Ispitivanje međuslojne čvrstoće provedeno je sukladno normi EN ISO 14130: 1997. Ispitna tijela korištena kod ovog ispitivanja su pravokutnog poprečnog presjeka kao i one kod određivanja savojnog modula elastičnosti. Ispitna tijela kompozitnih ploča za ispitivanje prividne smične međuslojne čvrstoće prikazani su na slici 5.6.:

Slika 5.6. Ispitna tijela kompozitnih ploča za određivanje prividne međuslojne čvrstoće.

Opterećenje ispitnih tijela je opet trotočkasto savijanje, ali su razmaci između oslonaca mali. Brzina opterećivanja je iznosila 7 mm/min, a raspon sile opterećivanja 0 – 950 N.

Postupak određivanja prividne međuslojne smične čvrstoće kompozita pomoću trotočkastog savijanja ispitnog tijela na kidalici vidi se na slici 5.7:



Slika 5.7. Ispitivanje prividne smične međuslojne čvrstoće na kidalici.

Prividna smična međuslojna čvrstoća se računa prema izrazu:

$$\tau = \frac{3 \cdot F_{\max}}{b \cdot h}, \tag{1.10}$$

gdje je:

Fmax – maksimalna sila, N

h – debljina ispitnog tijela, mm

b – širina ispitnog tijela, mm.

Kao i kod određivanja savojnog modula elastičnosti i ovdje su prije samog postupka ispitivanja izmjerene dimenzije izrezanih ispitnih tijela te je određen potreban razmak između oslonaca, a koji se računa pomoću izraza:

$$L = 5h. \tag{1.11}$$

Svako ispitno tijelo je izrezano iz kompozita i opterećivano na kidalici do određenog iznosa sile. Dosezanjem tih određenih vrijednosti sila, opterećivanja ispitnih tijela su prekidana zbog pojave klizanja između oslonaca. Dakle, ni kod jednog ispitnog tijela nije došlo do pojave raslojavanja.

6. REZULTATI MJERENJA

6.1. Rezultati određivanja masenog udjela vlakana u kompozitu

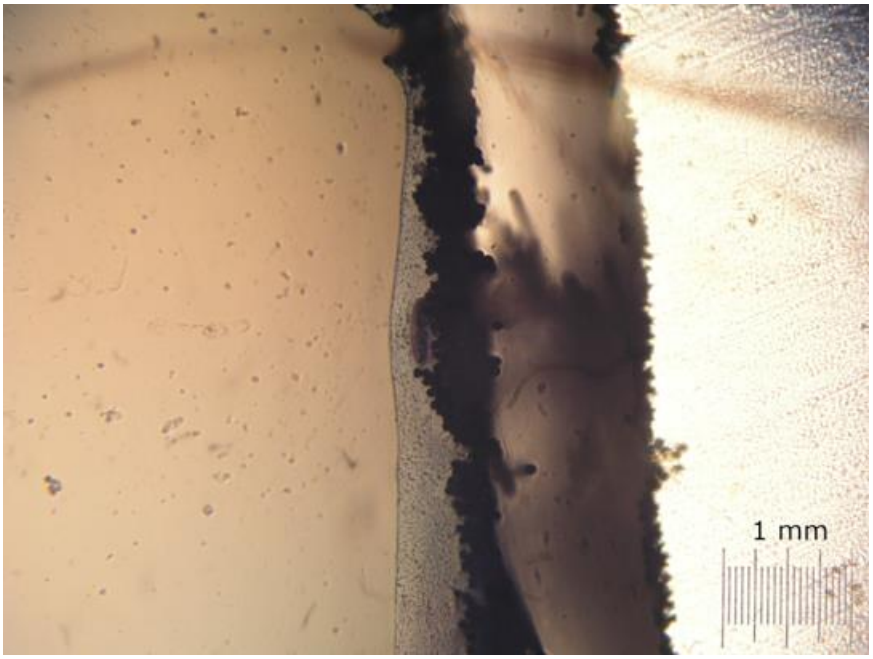
Izmjerene mase pripadajućih kompozitnih pločica dobivenih iz ploča 2,3,4 i 5, kao i maseni udjeli vlakana vide se u tablici 6.1.:

Tablica 6.1. Maseni udjeli ugljičnih vlakana.

Kompozitna ploča br.	Masa posudice [g]	Masa posudice s kompozitnom pločicom [g]	Masa posudice s vlaknima [g]	Maseni udio vlakna w_v, %
2	44,7758	45,2476	44,7871	2,3951
3	21,3543	21,9136	21,3674	2,3422
4	26,0613	26,5362	26,0734	2,5479
5	25,5844	26,0984	25,5957	2,1984

6.2. Analiza pripremaka za mikroskopiranje

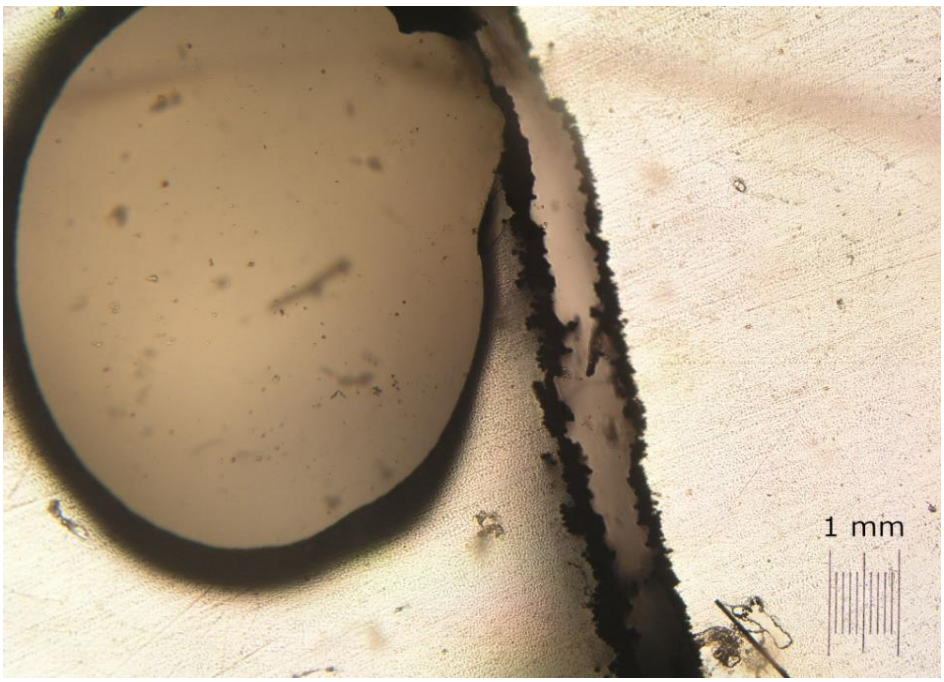
Pripremak za mikroskopiranje ploče 2 vidi se na slici 6.1., pri čemu je povećanje slike mikroskopa iznosilo 200 puta.



Slika 6.1. Ploča 2 pod svjetlosnim mikroskopom, presjek okomito na vlakna.

Na slici se vidi da je rastaljeni Surlyn penetrirao među ugljična vlakna. Također, pri prodiranju taljevine došlo je do razmicanja između dva sloja vlakana.

Slika 6.2. prikazuje također pripremak za mikroskopiranje ploče 2, ali s povećanjem mikroskopa 100 puta.



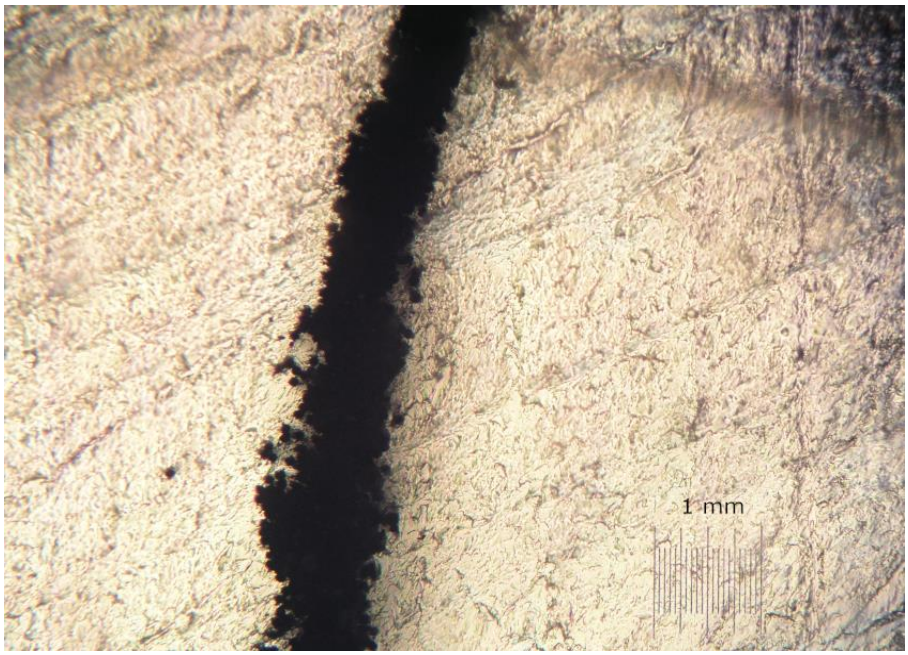
Slika 6.2. Ploča 2 pod svjetlosnim mikroskopom, greške u materijalu.

Na slici je bolje vidljiva podosta velika uključina. U poglavlju 5.2. napomenuto je kako se kod izrade ove ploče u izratku pojavio veliki broj zračnih mjehurića zbog neuspješnog procesa vakuumiranja. Ovakve greške onemogućuju povezivanje vlakna i matrice i prijenos opterećenja s matrice na vlakna.

Pripremak za mikroskopiranje dobiven iz ploče 3 prikazan je na slici 6.3. uz povećanje mikroskopa 200 puta:

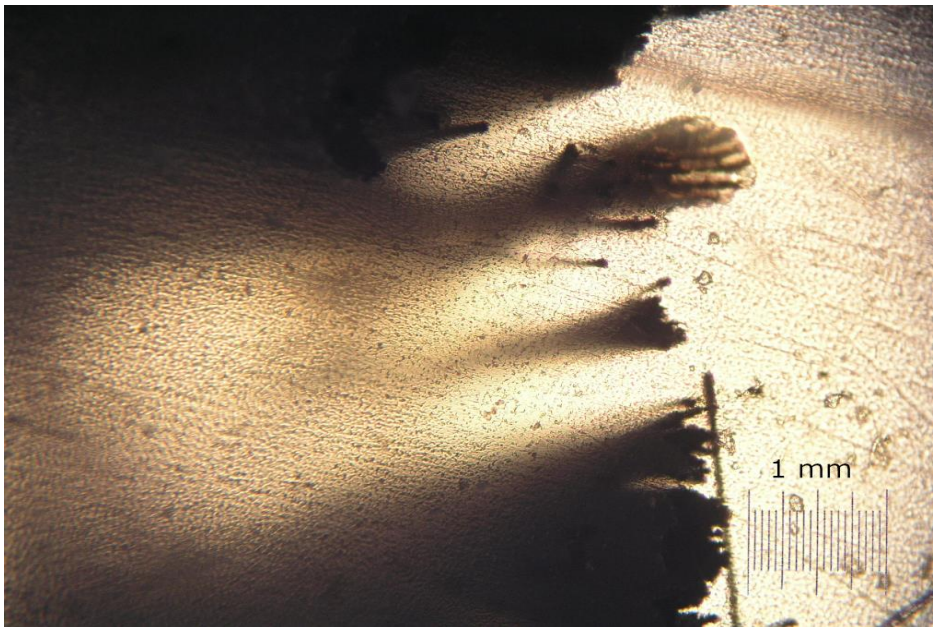
Slika 6.3. Ploča 3 pod svjetlosnim mikroskopom, presjek okomito na smjer vlakana.

Na slici se vidi kako je djelomično na pojedinim mjestima došlo do penetracije rastaljene matrice među vlakna ojačala. Također se može vidjeti kako je došlo do iskrivljenja smjera jednosmjernog tkanja. Slika 6.4. bolje prikazuje poremećaj u usmjerenju vlakana, međutim prikazuje i slabiju penetraciju Surlyna među vlakna ojačala od prijašnje slike.



Slika 6.4. Ploča 3 pod svjetlosnim mikroskopom, presjek okomito na smjer vlakana.

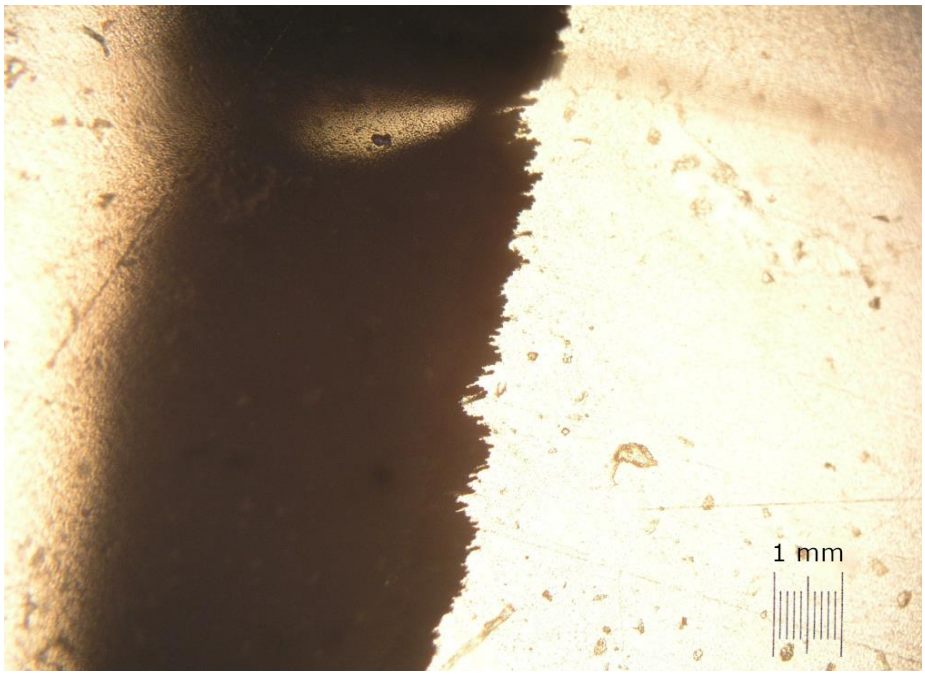
Na slici 6.5. može se vidjeti ispitni pripremak za mikroskopiranje ploče broj 4, promatran pod povećanjem mikroskopa 200 puta.



Slika 6.5. Ploča 4 pod svjetlosnim mikroskopom, razdvajanje snopova.

Moguće je vidjeti kako je došlo do prodiranja smola između ugljičnih vlakana i pritom do razdvajanja njihovih snopova i lošeg razmještaja istih.

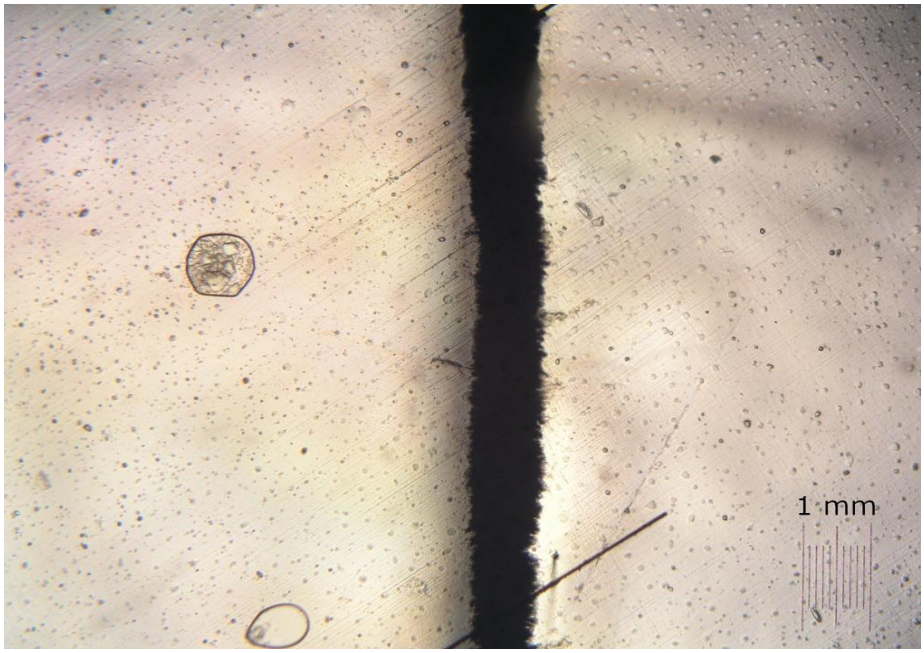
Slika 6.6. također prikazuje ploču 4, promatranu pri povećanju svjetlosnog mikroskopa 100 puta.



Slika 6.6. Ploča 4 pod svjetlosnim mikroskopom, presjek okomito na smjer vlakana.

Na slici se vidi kako je ostvareno prodiranje Surlyna među ugljična vlakna, ali za razliku od prethodne slike nije izraženo razdvajanje snopova vlakana.

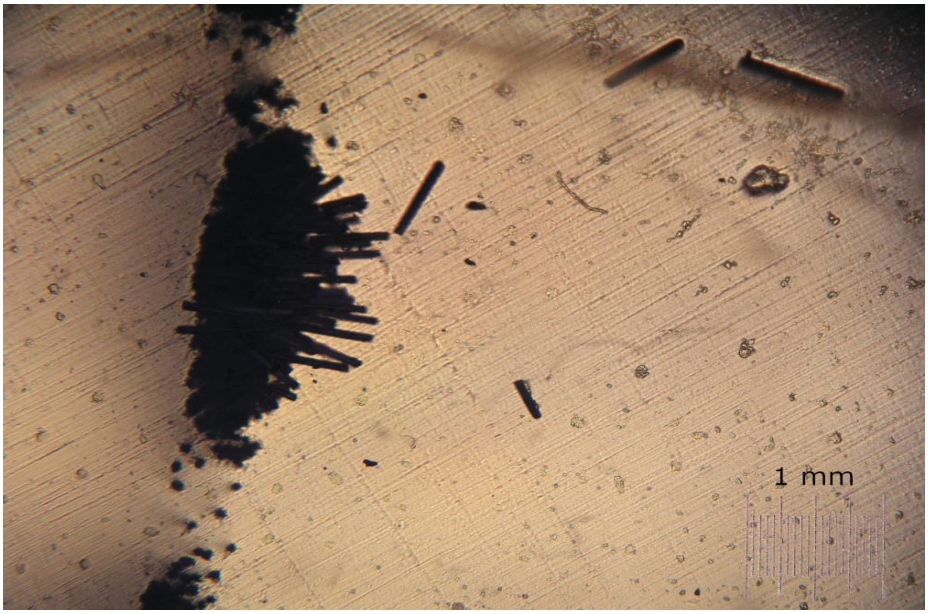
Pripremak za mikroskopiranje ploče 5 vidi se na slici 6.7. pri čemu je povećanje mikroskopa u ovom slučaju 100 puta.



Slika 6.7. Ploča 5 pod svjetlosnim mikroskopom, presjek okomit na smjer vlakana.

Na slici je vidljiva pojava mjehurića vlage i zraka zarobljenih u Surlynu, a što je posljedica nedovoljnog sušenja granulata prije same prerade. Također se može vidjeti kako u ovom dijelu kompozita nije došlo do dobrog prodiranja rastaljenog Surlyna među vlakna ojačala.

S druge strane, slika 6.8. uz povećanje mikroskopa 200 puta prikazuje osim mjehurića vlage i zraka mjesta na kojima je došlo do prodiranja taljevine među lošije raspoređena ugljična vlakna.



Slika 6.8. Ploča 5 pod svjetlosnim mikroskopom, neujednačen presjek ojačala.

6.3. Rezultati mjerenja savojnog modula elastičnosti

Tablica 6.2. prikazuje izmjerene dimenzije ispitnih tijela te određene razmake između oslonaca ispitnih tijela za svaku ispitnu ploču:

Tablica 6.2. Dimenzije ispitnih tijela za određivanje savojnog modula.

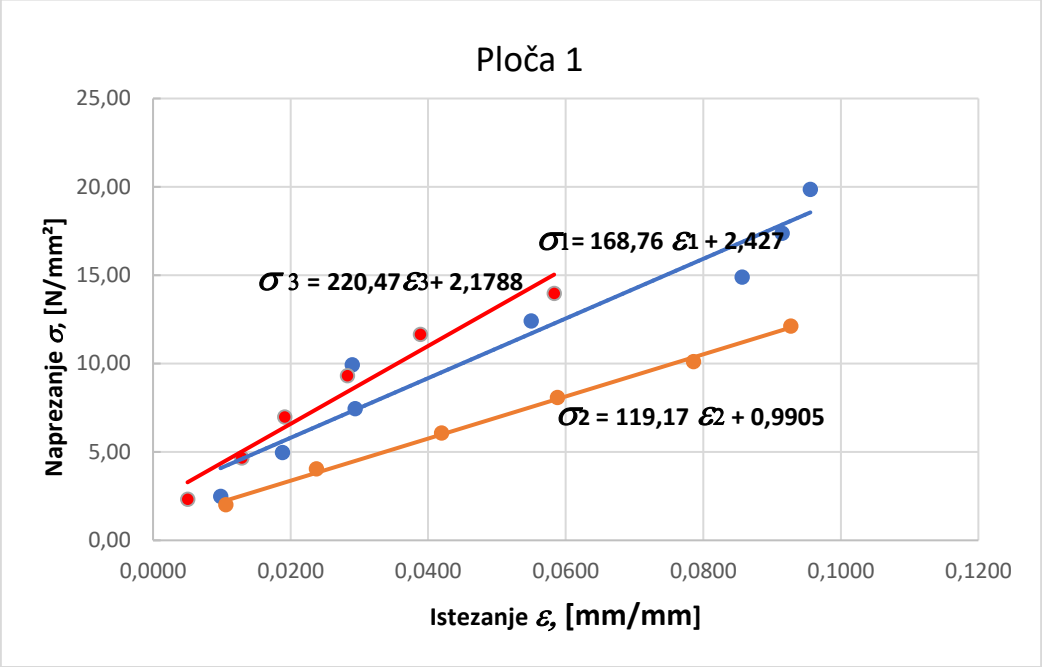
Ploča – ispitno tijelo	*b* [mm]	*h* [mm]	*L* [mm]
1-1	10,38	1,96	33
1-2	10,12	2,20	
1-3	10,42	2,02	
2-1	9,60	3,16	50
2-2	10,22	3,18	
2-3	10,32	3,10	
3-1	9,92	3,04	48
3-2	10,28	3,00	
3-3	10,48	3,34	
4-1	10,08	2,52	40
4-2	10,42	2,44	
4-3	10,24	2,72	
5-1	9,74	2,46	40
5-2	-	-	
5-3	-	-	

U tablici 6.3. prikazani su progibi u ovisnosti o opterećenju za sva 3 ispitna tijela izrezana iz ploče 1, izrađene samo od Surlyna® 8940:

Tablica 6.3. Očitani progibi ispitnih tijela polimerne ploče 1.

F [N]	f_1 [mm]	f_2 [mm]	f_3 [mm]
2	0,91	0,87	0,45
4	1,74	1,96	1,16
6	2,72	3,46	1,72
8	2,68	4,85	2,54
10	5,09	6,48	3,49
12	7,93	7,65	5,24
14	8,47	-	-
16	8,85	-	-

Prema vrijednostima progiba očitanih tijekom ispitivanja savojnog modula elastičnosti te izračunom vrijednosti naprezanja i istezanja pomoću izraza (1.6) i (1.7) za pojedine epruvete izrađuje se pripadajući dijagram naprezanje – istezanje ploče broj 1, iz kojeg se na temelju nagiba pravaca očitavaju savojni moduli elastičnosti svake od tri epruvete. Dijagram se vidi na slici 6.9.



Slika 6.9. Dijagram naprezanje – istezanje neojačanog Surlyna (ploča 1).

Očitavanjem vrijednosti nagiba pravaca određeni se sljedeći savojni moduli elastičnosti: E_1 = 168,76 N/mm^2, E_2 = 119,17 N/mm^2, E_3 = 220,47 N/mm^2. Srednja vrijednost savojnog modula elastičnosti računa se pomoću izraza:

$$E = \frac{E_1+E_2+E_3}{3}. \tag{1.9}$$

Uvrštavanjem očitanih vrijednosti savojnih modula elastičnosti u izraz (1.9), dobiva se odgovarajuća srednja vrijednost za polimernu ploču 1, a čiji iznos je E = 172,8 N/mm^2.

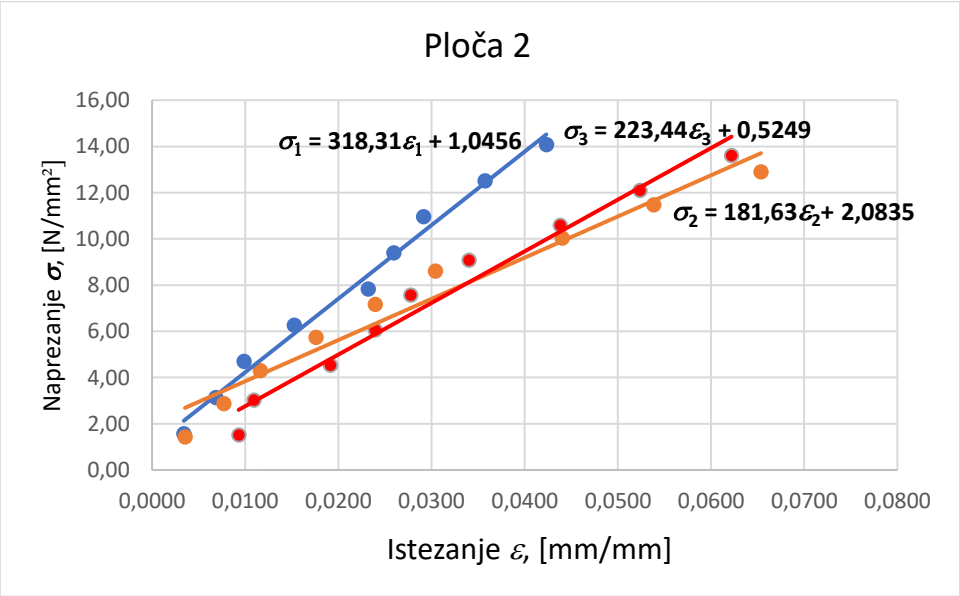
Tablica 6.4. prikazuje progibe u ovisnosti o opterećenju na ispitna tijela izrezane iz ploče 2:

Tablica 6.4. Očitani progibi ispitnih tijela kompozitne ploče 2.

F [N]	f_1 [mm]	f_2 [mm]	f_3 [mm]
2	0,45	0,46	1,25
4	0,90	1	1,47
6	1,30	1,51	2,57
8	2,01	2,29	3,22
10	3,06	3,12	3,73
12	3,42	3,96	4,57
14	3,84	5,73	5,89
16	4,71	7,01	7,04
18	5,58	8,51	8,36

Progib je očitavan do iznosa sile F=18 N i nakon toga su ispitna tijela rasterećena jer nije došlo do loma, a daljnjim opterećivanjem bi došlo do proklizavanja ispitnih tijela između oslonaca kidalice.

Pomoću dobivenih vrijednosti naprezanja i istezanja izrađuje se pripadajući dijagram, prikazan na slici 6.10. Iz nagiba pravaca očitavaju se savojni moduli elastičnosti ispitnih tijela ploče 2:



Slika 6.10. Dijagram naprezanje - istezanje ispitnih tijela ploče 2.

Očitani savojni moduli ispitnih tijela ploče 2 iznose E_1= 318,31 N/mm^2, E_2= 181,63 N/mm^2 i E_3= 223,44 N/mm^2. Uvrštavanjem dobivenih vrijednosti savojnih modula u izraz (1.9), dobiva se srednja vrijednost savojnog modula elastičnosti kompozitne ploče 2: E = 241,13 N/mm^2.

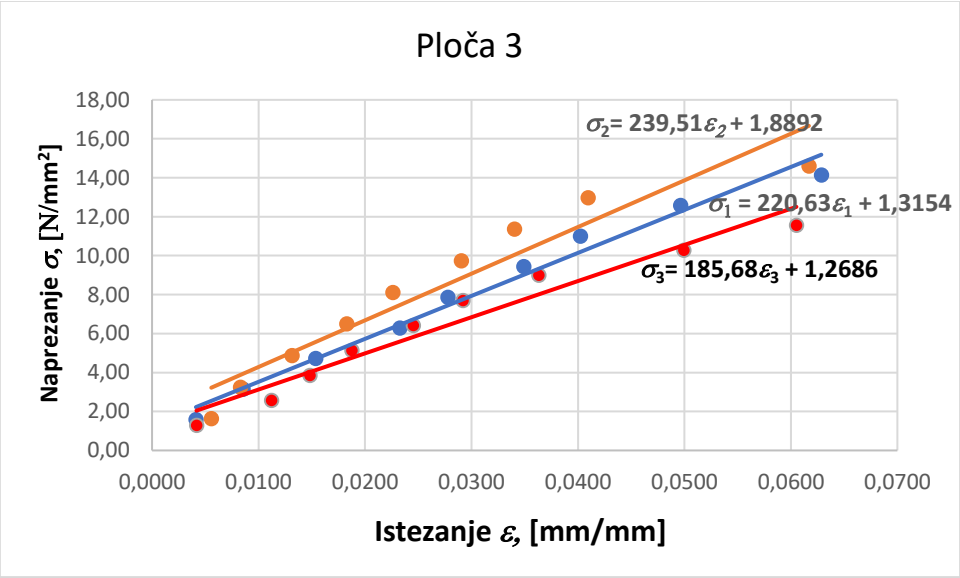
Tablica 6.5. prikazuje očitane progibe ispitnih tijela izrezanih iz ploče 3:

Tablica 6.5. Očitani progibi ispitnih tijela kompozitne ploče 3.

F [N]	f_1 [mm]	f_2 [mm]	f_3 [mm]
2	0,52	0,77	0,52
4	1,08	1,15	1,4
6	1,94	1,82	1,85
8	2,94	2,53	2,34
10	3,51	3,13	3,06
12	4,41	4,02	3,64
14	5,08	4,71	4,53
16	6,27	5,67	6,23
18	7,94	8,54	7,55

Progibi su očitavani do iznosa sile F= 18 N i nakon toga su ispitna tijela rasterećen jer nije došlo do loma istih. Daljnjim opterećivanjem bi došlo do proklizavanja između oslonaca kidalice.

Pripadajući dijagram naprezanje – istezanje prikazan je na slici 6.11. Iz nagiba pravaca očitavaju se savojni moduli elastičnosti ploče 3:



Slika 6.11. Dijagram naprezanje – istezanje ispitnih tijela ploče 3.

Očitani savojni moduli ispitnih tijela ploče 3 iznose E_1 = 220,63 N/mm^2, E_2 = 239,51 N/mm^2 i E_3 = 185,68 N/mm^2. Uvrštavanjem tih vrijednosti u izraz (1.9), dobiva se srednja vrijednost savojnog modula elastičnosti kompozitne ploče 3, E = 215,27 N/mm^2.

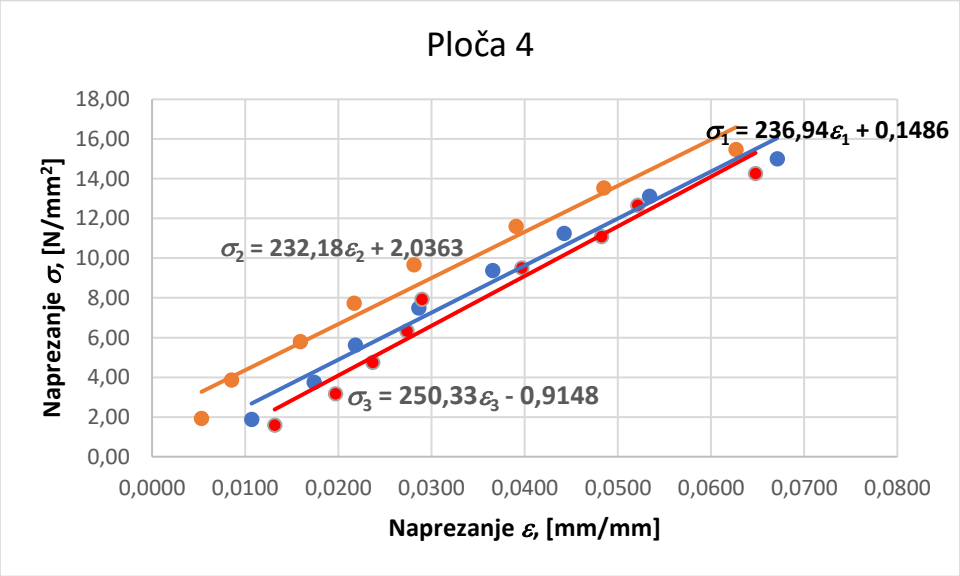
Tablica 6.6. prikazuje progibe u ovisnosti o opterećenju na ispitna tijela izrezane iz ploče 4:

Tablica 6.6. Očitani progibi ispitnih tijela kompozitne ploče 4

F [N]	f_1[mm]	f_2[mm]	f_3 [mm]
2	1,13	0,58	1,29
4	1,84	0,93	1,93
6	2,31	1,74	2,32
8	3,03	2,37	2,68
10	3,87	3,07	2,84
12	4,68	4,27	3,89
14	5,65	5,3	4,73
16	7,1	6,85	5,11
18	-	-	6,35

Progibi su očitavani do iznosa sila F = 16 N i F= 18 N te su nakon toga ispitna tijela rasterećena jer nisu pukla Daljnjim opterećivanjem bi došlo do proklizavanja ispitnih tijela između oslonaca kidalice.

Pripadajući dijagram naprezanje – istezanje ploče 4, dobiven nakon izračunavanja vrijednosti odgovarajućih naprezanja i istezanja uvrštavanjem iznosa sila, progiba i dimenzija ispitnih tijela u izraze (1.6) i (1.7), prikazan je na slici 6.12. Iz nagiba pravaca očitavaju se savojni moduli elastičnosti:



Slika 6.12. Dijagram naprezanje – istezanje ispitnih tijela ploče 4.

Dobiveni savojni moduli elastičnosti ispitnih tijela kompozitne ploče 4 su E_1 =236,94 N/mm^2, E_2 = 232,18 N/mm^2 i E_3 = 250,33 N/mm^2. Pripadajuća srednja vrijednost savojnog modula kompozitne ploče 4 dobivena uvrštavanjem u izraz (1.9) iznosi E = 239,82 N/mm^2.

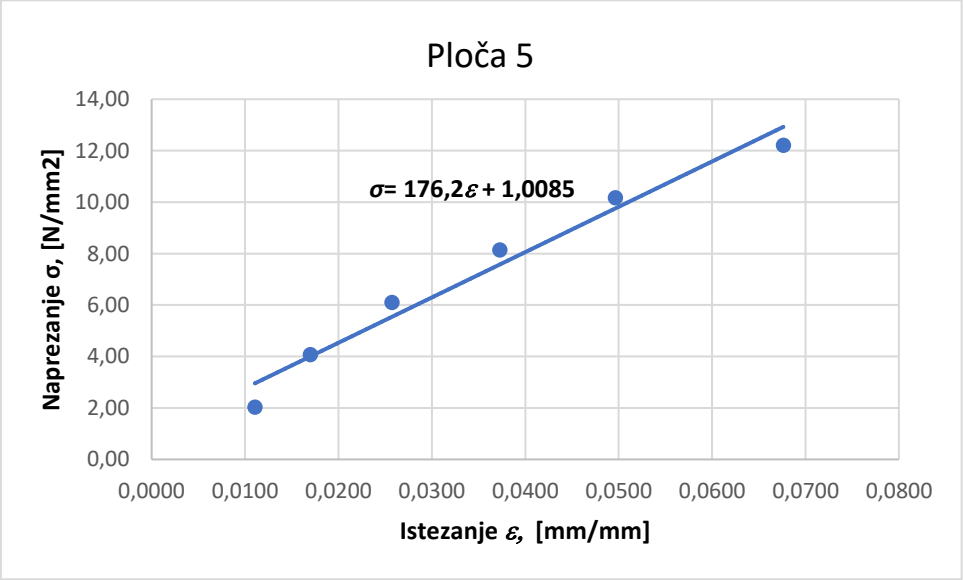
Tablica 6.7. prikazuje očitane progibe u ovisnosti o trenutnoj sili za ispitno tijelo izrezano iz ploče 5.

Tablica 6.7. Progibi očitani za ispitno tijelo kompozitne ploče 5.

***F* [N]**	***f* [mm]**
2	1,20
4	1,84
6	2,79
8	4,04
10	5,38
12	7,33

Progib je očitavan do iznosa sile F=12 N i nakon toga je ispitno tijelo rasterećen jer je dolazilo do pojave velikih iznosa progiba i epruveta nije pukla. Daljnjim opterećivanjem bi došlo do proklizavanja ispitnog tijela između oslonaca kidalice.

Pripadajući dijagram naprezanje – istezanje ploče 5 prikazuje slika 6.13. Iz nagiba pravca očitan je savojni modul elastičnosti ploče 5:



Slika 6.13. Dijagram naprezanje - istezanje ispitnog tijela ploče 5.

Uvrštavanjem vrijednosti očitanih progiba za pripadajuće trenutne sile te odgovarajućih dimenzija ispitnog tijela izrezanog iz ploče 5 u izraze (1.6) i (1.7) te izradom pripadajućeg

dijagrama, dobiven je iznimno lošiji iznos savojnog modula elastičnosti u odnosu na ostale kompozitne ploče.

Očitana vrijednost ispitnog tijela izrezanog iz ploče 5 je E_5 =176,2 N/mm^2. Iz tog razloga ispitivanje savojnog modula elastičnosti je prekinuto nakon prve epruvete.

Dakle dobivene srednje vrijednosti savojnih modula elastičnosti ispitnih ploča su: E_1 = 172,8 N/mm^2, E_2= 241,1 N/mm^2, E_3 =215,3 N/mm^2 i E_4 = 239,8 N/mm^2. Ploča 2 ima najveći modul, ali i veliko rasipanje, dok ploča 4 ima ujednačena svojstva. Postignuto je povećanje modula u odnosu na neojačani polimer od 39 %, međutim iz rezultata ispitivanja epruvete 1 ploče 2 vidljivo je da postoji još prostora za ukupno poboljšanje od barem 85 %. Parametri prerade ploče 2 i 4 koje imaju prosječno ista svojstva razlikuju se, pri čemu je kod ploče 2 upola kraće vrijeme vakuumiranja, niža temperatura prerade (T_2=130 °C, T_4=160 °C, T_m=94 °C), a viši tlak (p_2=40 bar, p_4=10 bar). Pokazalo se da je dulje vrijeme vakuumiranja, pri čemu se između vlakana, a i iz polimerne matrice uklanja vlaga i zrak, vrlo bitno za kvalitetu kompozita. Modul ploče 5 nije veći od modula neojačanog Surlyna (ploča 1), što je posljedica neprenošenja opterećenja s matrice na ojačalo, što je potvrđeno i mikroskopskom analizom.

6.4. Rezultati mjerenja prividne smične međuslojne čvrstoće

U tablici 6.8. prikazane su, osim izmjerenih vrijednosti dimenzija ispitnih tijela i razmaka između oslonaca, vrijednosti pripadajuih sila do kojih su ispitna tijela opterećivana kao i iznosi prividnih smičnih međuslojnih čvrstoća ispitnih tijela kompozitnih ploča.

Tablica 6.8. Pregled mehaničkih svojstava svih materijala.

Ploča	Savojni modul elastičnosti E [N/mm^2]	Prividna smična međuslojna čvrstoća, τ [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

Iz dobivenih izračuna vidi se da je najmanja vrijednost prividne međuslojne čvrstoće ona ploče 5, što ukazuje da prilikom izrade ploče nije došlo do adhezivnosti između ugljičnih vlakana i Surlyna. To je rezultat premalog pritiska na ploču prilikom njene izrade, tj. prilikom izrade

rubovi ploče su pritisnuti samo ručno, bez preše, što nije dovelo do kvalitetne impregnacije vlakana polimernom matricom. Kao i kod modula, najbolje ponašanje je kod ploče 4.

7. ZAKLJUČAK

Zbog zaštite okoliša i ekonomskih ušteda proizvodnja polimernih kompozita s plastomernom matricom rastuća je grana. Širu primjenu još uvijek ograničava problem prerade pri povišenoj temperaturi i visoka viskoznost materijala matrice prilikom prerade. Viskozna matrica ne prodire između svih vlakana, stoga je prijenos opterećenja s matrice na ojačalo reduciran. Ovaj se problem često može izbjeći optimiranjem kalupa i parametara prerade.

U radu su izrađeni istovrsni pločasti kompoziti s različitim parametrima prerade, Parametri prerade imaju velik utjecaj na impregnaciju vlakana, a najbolja svojstva je pokazala ploča 4. Udio vlakana od 2 % mase je izrazito mali, a postignuto je poboljšanje modula za 39 %. Najveće poboljšanje od 84 % pokazalo se na jednom ispitnom tijelu ploče 2, što ukazuje na potrebu daljnjeg optimiranja parametara prerade. Ispitivanje prividne smične međuslojne čvrstoće također je pokazalo da je ploča 4 najbolje načinjena. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava u skladu su s mikroskopskom analizom kompozita.

LITERATURA

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

[2] Filetin, T., Kovačiček, 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.

[3] Composites Market Size & Share, Industry Analysis Report, 2018-2024, https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/composites-market, pristupljeno 19.2.2019.

[4] Masuelli M. A.: Fiber Reinforced Polymers: The technology Applied for Concrete Repair, InTech, Rijeka, 2013.

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

[6] Mallick P.K., Fiber – Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design, Third Edition, CRC Press, Boca Raton, 2007.

[7] What are Unidirectional Carbon Fiber fabrics?, https://www.fibreglast.com/product/What-are-Unidirectional-Carbon-Fiber-Fabrics/Learning_Center, pristupljeno 12.2.2019.

[8] Polimerni kompoziti, https://www.fsb.unizg.hr/kziha/shipconstruction/kbuu458hrnv/poglavlje6/p62.htm, pristupljeno 6.2.2019.

[9] Park, S. J.: Carbon Fibers, Second Edition, Springer Nature, Singapore, 2018.

[10] Huang, X.: Fabrication and Properties of Carbon Fibers, Materials, 2009.

[11] Park, S. J., Seo, M. K.: Interface Science and Composites, First Edition, Elsevier Academic Press, Amsterdam, 2011.

[12] Nishida, H. et al: Thermoplastic vs. thermoset epoxy carbon textile composites, IOP Conference Series: Materials Science and Engineerig, 2018.

[13] A Comparison of the Environmental Attributes of Thermoplastic vs. Thermoset Composites, https://www.thomasnet.com/pdf.php?prid=101809, pristupljeno 8.2.2019.

[14] Johnson, T.: Thermoplastic vs. Thermoset Resins, ThoughtCo, 2019.

[15] Technology and Applications of Advanced Thermoplastic Composites, AZO Materials, https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=7983, pristupljeno 8.2.2019.

[16] Composite Materials: Manufacturing methods, https://aves.ktu.edu.tr/ImageOfByte.aspx?Resim=8&SSNO=6&USER=3906, pristupljeno 11.2. 2019.

[17] Wu, D. Y., Meure, S., Solomon, D.: Self-Healing polymeric materials: A review of recent developments, Elsevier Ltd, 2008.

[18] Varley, R. J., van der Zwaag, S.: Towards an understanding of thermally activated self-healing of an ionomer system during ballistic penetration, Elsevier Ltd, 2008.

[19] Castelluci, M.: Resistive Heating for Self-healing Materials Based on Ionomeric Polymers, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2009.

[20] Murphy, E. B., Wudl, F.: The world of smart healable materials, Elsevier Ltd., 2009.

[21] DuPont™ Surlyn® 8940 Ionomer Resin, Sodium, http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=982683b85300430286ef993d1a0ca29e&ckck=1, pristupljeno 12.2.2019.

[22] G.Angeloni srl, http://www.g-angeloni.com/, pristupljeno 20.2.2019.

PRILOZI

I. CD-R disc