

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Marija Botica

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Tatjana Haramina, dipl. ing.

Student:

Marija Botica

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se mentorici prof. dr. sc. Tatjani Haramini na prihvaćanju uloge mentorstva te što mi je omogućila izradu završnog rada. Također se zahvaljujem tehničkim suradnicima Božidaru Bušetinčanu te Mireli Petranović na odvajanju vremena zbog pružanja pomoći oko izrade eksperimentalnog dijela. Na posljetku bih se zahvalila svojim prijateljicama i obitelji koji su mi uvijek velika podrška tokom studiranja.

Marija Botica



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 23 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Studentica: **Marija Botica** JMBAG: **0035229369**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Savojna svojstva hibridnih kompozita s polimernom matricom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Flexural properties of hybrid polymer based composites**

Opis zadatka:

Vlakna dobivena od biljaka često su dobra alternativa staklenim vlaknima za ojačavanje polimera. U slučaju da dobiveni kompoziti nemaju dovoljno dobra svojstva, moguća je izrada hibrida ojačanih kombinacijom biljnih i staklenih vlakana. Pritom je potrebno razmotriti plan laminiranja, s obzirom na tip opterećenja.

U radu je potrebno opisati različite tipove hibridnih polimernih kompozita i komentirati opravdanost miješanja više ojačala/punila. Detaljno proučiti norme za ispitivanje savojnih (HRN EN ISO 14125) i međuslojnih (HRN EN ISO 14130) svojstava. Usporediti mehanička svojstva hibridnih kompozita s različitim planom laminiranja pri savojnom opterećenju. Pri tome treba odrediti savojni modul, savojnu čvrstoću, deformaciju prilikom loma, prividnu međuslojnu smičnu čvrstoću i maseni udio vlakana. Usporediti dobivena svojstva s pravilima Hrvatskog registra brodova za kompozite sa staklenim vlaknima.

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

Zadatak zadan:	Datum predaje rada:	Predviđeni datumi obrane:
30. 11. 2022.	1. rok: 20. 2. 2023. 2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023. 3. rok: 18. 9. 2023.	1. rok: 27. 2. – 3. 3. 2023. 2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023. 3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Zadatak zadala:	Predsjednik Povjerenstva:
Prof. dr. sc. Tatjana Haramina	Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK	V
SUMMARY	VI
1. UVOD	1
2. KOMPOZITI	2
2.1. Općenito o kompozitima	2
2.2. Matrica kompozita	2
2.2.1. Kompoziti s polimernom matricom	3
2.3. Podjela kompozita prema vrsti ojačala	7
2.3.1. Kompoziti ojačani vlaknima [7], [8], [9], [10]	7
2.3.2. Hibridni kompoziti	13
2.3.3. Mehanička svojstva kompozita	14
3. EKSPERIMENTALNI DIO	21
3.1. Materijali matrice i ojačala	21
3.2. Ispitivanje prividne međuslojne smične čvrstoće	23
3.3. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće	25
3.4. Ispitivanje savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti	27
3.5. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti	29
3.6. Analiza rezultata dobivenih savojnim i međuslojnim ispitivanjem kompozita	31
3.7. Usporedba rezultata ispitivanja sa zahtjevima Hrvatskog registra brodova za kompozite ojačane staklenim vlaknima	33
4. ZAKLJUČAK	37
LITERATURA	39

POPIS SLIKA

Slika 1. Granična površina u kompozitnom materijalu	2
Slika 2. Prikaz poboljšanih svojstava polimernih kompozita	4
Slika 3. Umrežavanje nezasićene poliesterske smole.....	5
Slika 4. Svojstva kompozita s matricom od epoksidne smole	6
Slika 5. Formula vinil-esterske smole	6
Slika 6. Kompoziti prema orijentaciji vlakana.....	8
Slika 7. Tipovi tkanja : a) platneno (obično), b) atlas, c) keper, d) tkanje košarice, e) leno, f) inačica običnog tkanja	8
Slika 8. Strukovi staklenog vlakna	11
Slika 9. Najčešći načini slaganja vlakna kod hibridnih kompozita [18]	13
Slika 10. Savojno ispitivanje u 3 točke.....	14
Slika 11. Ispitivanje prividne međuslojne čvrstoće.....	18
Slika 12. Raspored naprezanja pri savojnom opterećenju	22
Slika 13. Univerzalna kidalica Shimadzu AGS – X.....	23
Slika 14. Ispitni uzorci nakon ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće	25
Slika 15. Dijagram sila – progib dobiven međuslojnim ispitivanjem za kompozit epoksid / staklo.....	26
Slika 16. Dijagram sila – progib dobiven međuslojnim ispitivanjem za kompozit epoksid / staklo i lan.....	27
Slika 17. Ispitni uzorci nakon ispitivanja savojne čvrstoće i modula elastičnosti	27
Slika 18. Dijagram naprezanje – istezanje dobiven savojnim ispitivanjem za kompozit epoksid / staklo	30
Slika 19. Dijagram naprezanje – istezanje dobiven savojnim ispitivanjem za kompozit epoksid / staklo i lan.....	31
Slika 20. Srednje vrijednosti prividne međuslojne smične čvrstoće svih kompozita i minimalna propisana granica	33
Slika 21. Srednje vrijednosti savojnog modula elastičnosti svih kompozita i minimalna propisana granica	34
Slika 22. Srednje vrijednosti savojne čvrstoće svih kompozita i minimalna propisana granica	34
Slika 23. Srednje vrijednosti deformacije prilikom loma svih kompozita	35

POPIS TABLICA

Tablica 1. Tipovi staklenih vlakana i nazivna svojstva [12].....	10
Tablica 2. Svojstva staklenih i lanenih vlakana	12
Tablica 3. Normirane dimenzije ispitnih tijela za savojno ispitivanje u tri točke [19]	15
Tablica 4. Duljina l i razmak između oslonaca L kao funkcije debljine h [19]	16
Tablica 5. Širina b kao funkcija debljine h [19].....	16
Tablica 6. Normirane dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje prividne međuslojne smične čvrstoće [20].....	19
Tablica 7. Karakteristike izrađenih kompozita	22
Tablica 8. Dimenzije ispitnih tijela za međuslojno ispitivanje za kompozit epoksid / stako ...	24
Tablica 9. Dimenzije ispitnih tijela za međuslojno ispitivanje za kompozit epoksid / staklo i lan	24
Tablica 10. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće za kompozit epoksid / staklo.....	25
Tablica 11. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće za kompozit epoksid / staklo i lan.....	26
Tablica 12. Dimenzije ispitnih tijela za savojno ispitivanje za kompozit epoksid / staklo	28
Tablica 13. Dimenzije ispitnih tijela za savojno ispitivanje za kompozit epoksid / staklo i lan	28
Tablica 14. Rezultati savojnog ispitivanja za kompozit epoksid / staklo	29
Tablica 15. Rezultati savojnog ispitivanja za kompozit epoksid / staklo i lan	30
Tablica 16. Srednje vrijednosti rezultata dobivenih savojnim i međuslojnim ispitivanjem	31
Tablica 17. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava kompozita uspoređeni sa zahtjevima Hrvatskog registra brodova [25]	35

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
T_g	°C	Temperatura staklišta
L_c	mm	Minimalna kritična duljina vlakna
d	mm	Promjer vlakna
σ_t	MPa	Rastezna čvrstoća vlakana
τ_c	MPa	Smična čvrstoća komponente
R_1	mm	Radijus pritisknog tijela
R_2	mm	Radijus oslonaca
L	mm	Razmak između oslonaca
l	mm	Duljina
h	mm	Debljina
b	mm	Širina
G	MPa	Smični modul elastičnosti
h_{sr}	mm	Srednja vrijednost debljine
σ_m	MPa	Rastezna čvrstoća
ε	mm/mm	Istezanje
ε_k	%	Deformacija prilikom loma
σ	MPa	Naprezanje
σ_f	MPa	Svojno naprezanje
σ_{fM}	MPa	Svojna čvrstoća
τ	MPa	Prividna međuslojna smična čvrstoća
E	MPa	Modul elastičnosti
E_f	MPa	Svojni modul elastičnosti
f	mm	Progib
f_{max}	mm	Maksimalni progib
F	N	Sila
F_{max}	N	Maksimalna sila

SAŽETAK

U ovom su radu izrađena dva različita polimerna kompozita na bazi epoksidne smole ojačanih staklenim i lanenim vlaknima. Analizirana savojna i međuslojna svojstva kompozita prema normama HRN EN ISO 14125 : 1998 i HRN EN ISO 14130 : 1997. Ispitivanjima su istražene vrijednosti prividne međuslojne smične čvrstoće, savojnog modula elastičnosti, savojne čvrstoće te deformacije prilikom loma. Dobiveni rezultati uspoređeni su sa zahtjevima Hrvatskog registra brodova (HRB) za kompozite ojačane staklenim vlaknima.

Istraživanje je pokazalo kako je kompozit epoksidna smola / staklena vlakna postigao najbolje rezultate i zadovoljio sva svojstva, kao i kompozit epoksidna smola / staklo i vlakna, sa malo lošijim rezultatima. Ova smo dva kompozita usporedili sa biokompozitom epoksidna smola / lan, iz prijašnjeg istraživanja, te pomoću te usporedbe uočili promjenu svojstava dodavanjem staklenih vlakana. Uočeno je da većinu svojstava biokompozit nije zadovoljio, za razliku od staklima ojačanih kompozita. Time je zaključeno je da, iako kompoziti ojačani biorazgradivim vlaknima pokazuju zadovoljavajuća svojstva u određenim primjenama, u nekim je primjenama zbog opterećenja neizbježna upotreba dodavanja staklenih vlakana.

Ključne riječi: hibrid, biokompozit, epoksidna smola, lanena vlakna, staklena vlakna, savojni modul elastičnosti, savojna čvrstoća, prividna međuslojna smična čvrstoća, deformacija prilikom loma

SUMMARY

In this paper, two different polymer composites based on epoxy resin and reinforced with glass and linen fibers were made. Flexural and interlaminar properties were analyzed according to HRN EN ISO 14125 : 1998 and HRN EN ISO 14130 : 1997. The tests investigated the values of apparent interlaminar shear strength, flexural modulus of elasticity, flexural strength and deformation at break. The obtained results were compared with the requirements of the Croatian Register of Shipping (CRS) for glass fibers reinforced composites.

Research has shown that composite epoxy resin / glass fiber achieved the best results and satisfied all properties, as well as composite epoxy resin / glass and fiber, with slightly worse results. . We compared these two composites with biocomposite epoxy resin / flax, from a previous research, and using this comparison we noticed a change in properties by adding glass fibers. It was observed that most of the properties of the biocomposite were not satisfied, unlike the glass reinforced composites. This concluded that, although composites reinforced with biodegradable fibers exhibit satisfactory properties in certain applications, in some applications, due to the load, the use of glass fiber addition is unavoidable.

Key words : hybrid, biocomposite, epoxy resin, linen fibers, glass fibers, flexural modulus of elasticity, flexural strength, apparent interlaminar shear strength,

1. UVOD

Polimerni kompoziti su materijali niske gustoće i dobrih mehaničkih svojstava, te se često primjenjuju za lake konstrukcije. Većina kompozita izrađuje se od duromerne matrice i staklenih vlakana. Razlog tome su dobra mehanička svojstva, jednostavnost izrade, dostupnost na tržištu te niska cijena materijala i izrade. Posljednjih desetljeća raste interes za razgradivost materijala te odlaganje i mogućnost zbrinjavanja onih nerazgradivih. Duromeri i staklena vlakna nisu razgradivi. Alternativa staklenim vlaknima biljna su vlakna koja imaju slična mehanička svojstva, razgradiva su i dobivaju se iz obnovljivih izvora. Međutim, biljna vlakna poput lanenih su hidrofilna, a polimeri su često hidrofobni i zato dolazi do međusobne nekompatibilnosti. Također, čisto biljnim vlaknima ojačani kompozit za neke je primjene preslab pri savojnom opterećenju. Veliki nedostatak biljnih vlakana je njihova slaba adhezija s većinom polimernih matrica koja je uzrokovana hidrofilnom prirodom vlakana. Kako bi se poboljšala savojna svojstva polimernih kompozita ojačanih lanenim vlaknima pripremljen je hibrid s kombinacijom lanenih i staklenih vlakana. Osim vrste ojačala bitan je i njihov raspored po slojevima kompozita, što najbolje uočavamo kombiniranjem slojeva kod hibrida gdje su staklena vlakna postavljena u vanjskom sloju gdje dolazi do najvećeg naprezanja, a lanena oko neutralne linije gdje je ono najmanje.

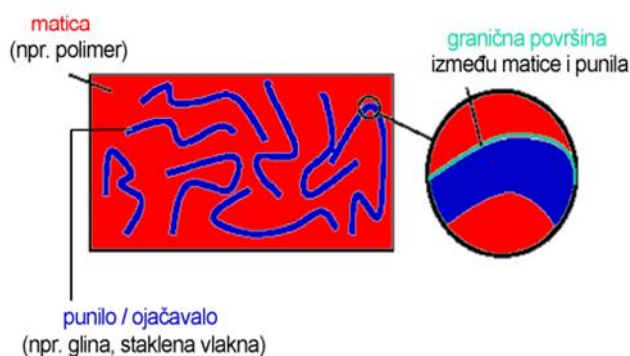
U ovom završnom radu izrađena su dva različita polimerna kompozita kod kojih se kao matrica koristila epoksidna smola, dok su za ojačanje korištena staklena i lanena vlakna. Ta su dva kompozita uspoređena s kompozitom iz prijašnjeg istraživanja, iste matrice i lanenih vlakana kao ojačala. Ispitana su savojna i međuslojnih svojstava s ciljem usporedbe dobivenih mehaničkih svojstava s minimalnim vrijednostima za kompozite ojačane staklenim vlaknima propisanim Pravilima Hrvatskog registra brodova. Na temelju rezultata ispitivanja nastojalo se doći do zaključka mogu li kompoziti ojačani biljnim biorazgradivim, u ovom slučaju lanenim vlaknima, biti prikladna alternativa uobičajeno korištenim kompozitima ojačanim staklenim vlaknima i koliki je utjecaj dodavanja staklenih vlakana u kompozit.

2.KOMPOZITI

2.1. Općenito o kompozitima

Kompozitni materijali, što se vidi u njihovom imenu (lat. *compositus* je sastavljen), su napravljeni od dva ili više materijala. Sastavni dijelovi kompozita su matrica koja čini kontinuiranu fazu te punila koji čini diskontinuiranu fazu. Uz dodatak punila moguće je povećati žilavost, čvrstoću ili otpornost na trošenje materijala matrice, ili smanjila permeabilnost plinova i kapljevina. Ako punila pomažu u poboljšanju mehaničkih svojstava kompozitnih materijala, istaknuto čvrstoće, mogu se nazvati ojačalima. Ojačala su u pravilu neke tkanine ili vlakna. Kompozitni se materijal postiže jasnom linijom između kontinuirane i diskontinuirane faze prikazano na slici 1. Neki su materijali sastavljeni od više materijala, međutim nemaju izraženu tu liniju pa se ne smatraju kompozitima (npr. slitine).

Kompoziti se mogu podijeliti u tri kategorije, na temelju vrste upotrijebljenog materijala matrice: metal, keramika i polimer, oblikom ojačala može biti izrađena od vlakana ili čestica, a strukturom može biti laminat ili sendvič konstrukcija. [1]



Slika 1. Granična površina kod kompozitnog materijala

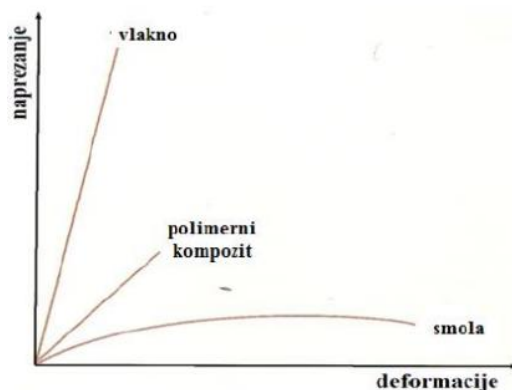
2.2. Matrica kompozita

Matrica je jedna od dvije glavne tvari u kompozitnom materijalu. Njezin glavni zadatak je pomoći u prenošenju opterećenja na vlakna u materijalu i dati vanjski oblik kompozitu. Također pomaže u sprječavanju širenja pukotina odvajanjem te može zaštititi materijal od utjecaja okoline i oštećenja.

Matrica mora biti kompatibilna s vlaknima kako bi se opterećenja ravnomjerno prenosila na vlakna. Svojstva matrice utječu na čvrstoću cjelokupnog kompozitnog materijala (poprečna rastezna čvrstoća, prividna međuslojna smična čvrstoća dr.) Kod kvalitetno pripremljenih kompozita izloženih kemijskim ili okolišnim utjecajima, matrica štiti vlakna, te će prvo njezina mehanička svojstva degradirati. Adhezija između matrice i vlakana mora spriječiti izvlačenje vlakna, zato je važno pravilno odabrati kombinaciju "matrica–vlakno". Vrlo je bitno fizikalno svojstvo temperatura staklišta (engl. glass transition temperature - T_g) koja definira točku prelaska iz gumastog u staklasto stanje, pri čemu dolazi do značajnih razlika u ponašanju materijala. Postupak izrade kompozita znatno utječe na njegova svojstva, jer mora osigurati dobru vezu vlakna i matrice, kao i minimalan udio šupljina ili pukotina u kompozitu. [1], [2], [5]

2.2.1. Kompoziti s polimernom matricom

Kod izrade tvorevina od polimernih kompozita, najčešće se koristi duromerna matrica. Njihovo ponašanje ovisi o svojstvima matrice i ojačala, obliku konstituenata, njihovoj veličini i rasporedu te o prirodi i jakosti veza među njima. Također, budući da su polimerni kompoziti načinjeni od smole ojačane vlaknima, svojstva polimernih kompozita ovise o svojstvima vlakna, svojstvima smole, udjelu vlakana te geometriji i orijentaciji vlakana u kompozitu. Polimerni kompoziti imaju široku primjenu, posebice u brodogradnji, zrakoplovstvu, građevinarstvu i automobilske industriji. Važna svojstva polimernih kompozita su čvrstoća, žilavost i krutost. Da bi se postigla odgovarajuća svojstva, nužno je reducirati udio šupljina na najmanju moguću mjeru. Na slici 2. je prikazan je dijagram naprezanje – deformacija duktilne polimerne matrice ojačane krutim vlaknima. Vidljivo je da se svojstva polimernog kompozita razlikuju od svojstava komponenata od kojih je načinjen. izrazio je korisna karakteristika kompozitnih materijala je da se njihova svojstva mogu oblikovati prema željama i potrebama proizvođača.



Slika 2. Prikaz poboljšanih svojstava polimernih kompozita

Primjena neojačanih polimera, u prvom redu duromera, kao strukturnih materijala karakterizirana je lošijim mehaničkim svojstvima, odnosno nižom čvrstoćom, modulom te slabom otpornošću na udarce. Zbog toga polimerni kompoziti obično se ojačavaju vlaknima poput staklenih, ugljičnih ili aramidnih. U novije vrijeme s ciljem smanjenja utjecaja na okoliš sve se više primjenjuju biljna vlakna.

Takvi su polimerni kompoziti su dobri iz mnogo razloga : imaju pristupačniju cijenu, otporni su na koroziju, otporni su na udarce, lom, otporni su na habanje, čvrsti su i kruti te otporni na zamor.

2.2.1.1. Polimerni kompoziti s duromernom matricom

Duromeri nastaju kemijskim reakcijama viskoznih smola, pri čemu dolazi do stvaranja trodimenzionalnih mreža uspostavom kemijskih veza između makromolekula. Umreživanje se provodi dovođenjem topline ili zračenjem pri povišenom tlaku, a najčešće se dodaje katalizator. Pri ponovnom zagrijavanju ostaju u čvrstom stanju, ne tale se, već prvo malo omekšaju, a potom se potpuno razgrađuju uslijed djelovanja visoke temperature. Ireverzibilnost kemijskih veza onemogućuje materijalno recikliranje duromera.

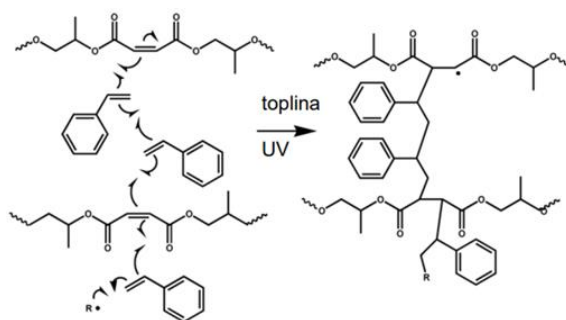
Duromeri su cjenovno prihvatljivi materijali, jednostavni su za izradu pri sobnoj temperaturi, niske su viskoznosti prije umreživanja i otporni su na puzanje. [5] Nedostaci su loša recikličnost i dugotrajni proces umreživanja koji može trajati i više dana.

Često primjenjivani materijali za izradu duromera su poliesterske, epoksidne, vinil esterske smole i sl. Smola je polazna viskozna kapljevina, smjesa monomera ili oligomera koja (najčešće) u reakciji s umreživalom (dvokomponentne smole) daje umreženi tj. očvrnuti polimer. [1]

2.2.1.1.1. Nezasićeni poliesteri

Poliesterske smole su uobičajen tip duromerne matrice jer su cijenom pristupačne i jednostavne za upotrebu te imaju prilično dobra uporabna svojstva.

Za ojačavanje ovih matrica se najčešće rabe staklena vlakna isto pristupačne cijene. Time se ovi kompozitni materijali koriste na mnogo različitih mjesta (npr. izrada bazena, cisterni, opreme za kupaoanu itd.). [1] Na slici 3. je prikazano umrežavanje poliestera.



Slika 3. Umrežavanje nezasićene poliesterske smole [3]

Poliesterka smola je vrsta duromerne matrice koja se odlikuje izvrsnom kemijskom stabilnošću, što ju čini korisnim kao zaštita od korozije. Međutim, zbog značajnih zaostalih napreznja koja se uvode tijekom egzotermne polimerizacije, dolazi do pojave krhkosti. Osim toga, poliestera ima relativno nisku čvrstoću. [5]

2.2.1.1.2. Epoksidne smole

Epoksidne smole su vrsta amorfnih polimera koji imaju gumastu (gel) fazu pri visokim temperaturama i staklastu fazu pri nižim temperaturama.

Kemijske reakcije koje se odvijaju tijekom polimerizacije su egzotermne, a to može uzrokovati zagrijavanje matrice kompozita i eventualnu degradaciju. Izrada kalupa je važna, pogotovo ako su u pitanju deblji dijelovi ili veći nego inače. Kako bi se promijenila mehanička svojstva epoksida mogu im se tijekom procesa proizvodnje dodati različite tvari. To može pomoći u smanjenju viskoznosti tijekom obrade, povećati lomno produljenje popraćeno smanjenjem modula elastičnosti, poboljšati otpornost na širenje pukotina i promijeniti gustoću.

Njihova je glavna mana krhkost uz veliku čvrstoću, ali se može ojačati dodavanjem plastomera. [5]

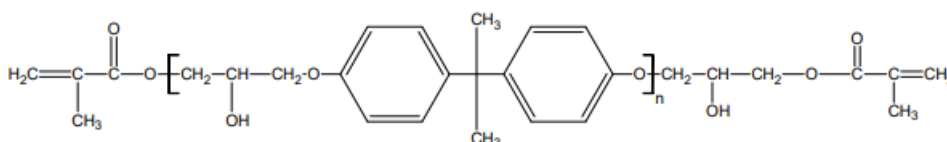
Na lici 4. je vidljivo da su znatno stabilnije pri visokim temperaturama s obzirom na poliestere te posjeduju bolja mehanička svojstva. No, također su skuplje i se kompoziti se proizvode dodavanjem ojačavala viših cijena (ugljičnih, aramidnih vlakana), niskih gustoća i visokih čvrstoća. [1]

	Gustoća a kg/m ³	Tlačna čvrstoća a MPa	Modul elast. GPa	Smična čvrstoća, MPa	Smični modul GPa	Vlačna čvrstoća a MPa	Vol. udio vlakana %
Ugljična vlakna/epoksidna smola	1 600	570	70	90	5	600	50
E-staklena vlakna/epoksidna smola	1 900	415	-	-	-	490	50-60

Slika 4. Svojstva kompozita s matricom od epoksidne smole [4]

2.2.1.1.3. Vinil esteri

Vinil esterske smole vrsta su smole koja kombinira neke od prednosti epoksidnih i poliesterskih smola. Umrežene smole jače su od poliestera, nižih cijena su i lakše se obrađuju od epoksidnih smola. Umreživanje je jednostavnije (nalik poliesterskim smolama), ali po svojstvima je više nalik epoksidnoj smoli zbog strukture. Smola sadrži nezasićene veze koje pomoću radikalne kopolimerizacije mogu spojiti lance polimera u jaku, umreženu strukturu. To je slično načinu na koji se nezasićene poliesterske smole mogu međusobno povezati. Umreživanje je prikazano na slici 5. Ove se smole primjenjuju prvenstveno u okruženjima koja su korozivna, a tamo su epoksidne smole većinom slabije postoje (zbog podložnosti hidrolizi), npr. kod oplata čamaca. [1]



Slika 5. Formula vinil-esterske smole

2.2.1.1.4. Fenolne smole

Fenol-formaldehidne smole su bile začetak prvoga pravog kvalitetnog umjetnog polimernog materijala koji se naziva bakelit, a bio je sastavljen od smole najčešće punjene drvenim brašnom. Razvoj umjetnih smola, poput duromera, išao je ruku pod ruku s razvojem kompozitnih materijala, jer su oba vrlo korisna za izradu stvari poput adheziva i premaza. Fenolne smole proizvode polimerizacijom fenola te se izrađuju u posebnim uvjetima. Zbog postojanosti pri visokim temperaturama i gorenju, uslijed ablativnih svojstava, imaju široku primjenu u upotrebi. Mane su visoki proizvodni tlakovi nužni za polimerizaciju, te velik broj praznina što značajno smanjuje mehanička svojstva. [1], [5]

2.3. Podjela kompozita prema vrsti ojačala

Što se tiče oblika ojačala, kompoziti se mogu grupirati u nekoliko različitih vrsta. To uključuje kompozite s česticama, kompozite ojačane vlaknima, slojevite kompozite i sendvič konstrukcije.

Kompoziti ojačani vlaknima su najučinkovitiji kada je u pitanju oblik, jer se opterećenje prenosi na vlakna unutar kompozitnog materijala. Zbog toga je vrlo važna dobra veza između ojačala i matrice.

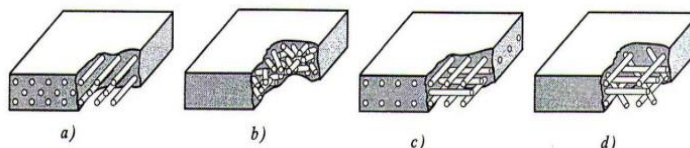
Bitna je i činjenica da unutar skupine vlakana od određenog materijala mogu postojati različite varijacije na temelju svojih mehaničkih, električnih ili toplinskih svojstava. [6]

2.3.1. Kompoziti ojačani vlaknima

Korištenje vlakana kao ojačala u kompozitima je vrlo česta pojava. Da bi vlakna imala ojačavajuću ulogu u kompozitu potrebna je jaka povezanost između njih samih i matrice. U ovakvim kompozitima matrica prenosi opterećenje na vlakna čime se postiže žilavost te duktilnost. Vlakna mogu poboljšati svojstva stvari, primjerice učiniti ih lakšim, krućim, žilavijim, temperaturno otpornijim, povećane specifične čvrstoće tj. omjera između čvrstoće i gustoće. [6] U zadnje vrijeme se ovi kompoziti sve češće koriste zbog razvoja visokoučinkovitih polimernih smola i inovativnih načina njihovog ojačavanja drugim materijalima.[7]

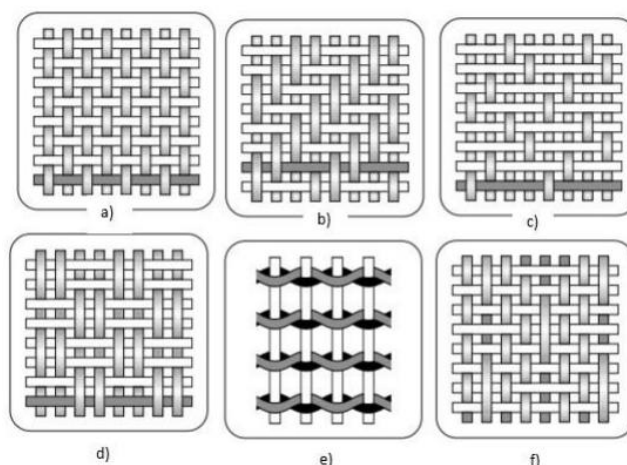
Prema obliku se vlakna dijele na kontinuirana i diskontinuirana, dok se prema orijentaciji prema orijentaciji, što je vidljivo na slici 6., dijele na :

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



Slika 6. Kompoziti s obzirom na orijentaciju vlakana. [8]

Način na koji su vlakna raspoređena u materijalu utječe na njegova svojstva. Postoje tri vrste rasporeda vlakana: jednoosni, dvoosni i troosni. Postoji mnogo različitih vrsta tkanina uslijed različitih metoda i orijentacija za postavljanje tkanine. Tkanine se proizvode tako da se vlakna prepliću pod kutom od 90° . Razni tipovi tkanja dani su na slici 7. [9]



Slika 7. Tipovi tkanja : a) platneno (obično), b) atlas, c) keper, d) tkanje košarice, e) leno, f) inačica običnog tkanja

Prethodno navedene vrste tkanja imaju vlakna koja putuju pod kutom od 90° , međutim postoji i proizvodnja tkanine pod drugačijim kutovima prolaženja vlakana, primjerice 45° , 60° . U slučaju kompozita s polimernom matricom postavljanje vlakana se označava oznakama 0° , $\pm 45^\circ$, 90° . [10]

Obzirom na promjer ojačala vlaknima ona se dijele u tri skupine: viskeri, vlakna (u užem smislu) i žice. Viskeri su načinjeni od tankih niti keramičkih monokristala visoke čistoće i ekstremno velikog omjera duljine i promjera. Prema tom omjeru vlakna se dalje mogu podijeliti na kontinuirana ($L > 15 L_c$) i diskontinuirana ($L < 15 L_c$). L_c je minimalna kritična duljina koja omogućava kvalitetan prijenos opterećenja na vlakno. L_c se može odrediti pomoću formule :

$$L_c = \frac{\sigma_t \cdot d}{2\tau_c} \quad (2.1)$$

Gdje je :

L_c [mm]- minimalna kritična duljina koja omogućava kvalitetan prijenos opterećenja

σ_t [MPa]-čvrstoća vlakana

d [mm]- promjer vlakna

τ_c [MPa]- smična čvrstoća komponente

2.3.1.1. Vrste vlakana

Za ojačanje se u kompozitu koriste vlakna izrađena od raznih materijala. Neki materijali su kompatibilni s matricom i mogu se koristiti, dok drugi nisu. Pri tome se u općenitom smislu koriste sljedeće grupe materijala za proizvodnju ojačanja [8] :

- prirodna vlakna
- staklena vlakna
- poliesterska vlakna
- aramidna vlakna
- ugljična vlakna
- metalna vlakna

2.3.1.1.1. Staklena vlakna

Staklena vlakna su tanke niti izrađene od vrste stakla, koje se često koriste za ojačanje kompozitnih materijala jer su pristupačne, imaju dobru čvrstoću i kemijsku stabilnost. Postoje dvije vrste ovih vlakana: jeftina koja su dobra za opću upotrebu i skuplja koja su bolja za specifične zadatke. Većina proizvedenih staklenih vlakana spada pod vrstu jeftinijih, za opću upotrebu. U tablici 1. su naznačeni tipovi stakla te nazivna svojstva [13].

Tablica 1. Tipovi staklenih vlakana i nazivna svojstva [11]

Oznaka	Nazivno svojstvo
E-staklo , electrical (električna)	Mala električna provodnost
S-staklo , strength (čvrstoća)	Visoka čvrstoća
C-staklo , chemical (kemijska)	Visoka kemijska otpornost
M-staklo , modulus (modul)	Visoka krutost
A-staklo , alkali (lužina)	Visoko lužnato staklo
D-staklo , dielectric (dielektrika)	Mala dielektrična konstanta

Ta su vlakna izrađena od rastaljene mješavine silicija i minerala koji sadrže okside potrebne za stvaranje određenog sastava smjese. Ova smjesa se tali u velikim pećima. Potom se staklo izvlači iz spremnika izrađenog od legure platine sa velikim brojem individualnih otvora, promjera 0,8-3,175 mm. Vlakna se do željenog promjera (3-20 μm) oblikuju u viskoznom stanju. [11], [12].

Staklena vlakna ne oodnose dobro vlagu koja smanjuje njihovu čvrstoću. Osim toga, vrlo su osjetljivi na statički umor, što znači da se mogu slomiti pod stalnim opterećenjem tijekom dugog vremenskog razdoblja. Staklena vlakna mogu biti izrađena kao kratka (nasjeckani roving) i dugačka vlakna (kontinuirani roving). Dugačka vlakna sa slike 8. se koriste kod postupaka sa štrcanjem vlakana, za tkanje. Kratka vlakna (nasječena) se koriste u duromerima i smjesama koje se obrađuju postupcima ubrizgavanja ili injekcijskog prešanja. [12]



Slika 8. Strukovi staklenog vlakna

Svojstva kompozita ojačanih staklenim vlaknima [12] :

- povišena rastezna čvrstoća te modul rastezljivosti
- dobar omjer čvrstoće / masa
- otporni povišenim temperaturama
- postojanost u korozivnom okruženju
- dimenzijski su stabilni
- povoljna električna svojstva
- otporni na starenje
- nekomplikirana i pristupačna cijena prerade

2.3.1.1.2. Vlakna biljnog podrijetla

Biljna vlakna su dobra zamjena staklenim vlaknima, jer su ekološki prihvatljiva i mogu se razgraditi te se koristi mala proizvodna energija. Neka od svojstva ovih vlakana su [15] :

- lakši su
- jednostavnija uporaba
- hidrofilnost
- niža temperatura obrade
- niska gustoća

Budući da imaju malu pritisnu čvrstoću nisu pogodna za nosive konstrukcije. Imaju dobra mehanička svojstva, manje su abrazivna od staklenih vlakana.[1] Nedostatak ovih vlakana je svojstvo hidrofilnosti zbog kojeg dolazi do slabe adhezije s polimernim matricama hoje su većinom hidrofobne i zato dolazi do nekompatibilnosti. Biljna vlakna nekad ne mogu zadovoljiti svojstva za primjenu te će se pri tome dodavati jača vlakna kao, primjerice, staklena.

2.3.1.1.3. Lanena vlakna

Lanena vlakna su jedna od najčešće korištenih prirodnih vlakana dobivena od biljaka. Dobivaju se od biljke lana, a za izradu je se koristi središnji dio stabljike. Iako se već dugo koriste, korištenje njih u svrhu izradu kompozita je novijeg razdoblja.

Općenito imaju manji utjecaj na okoliš nego staklena ili ugljična vlakna jer je potrebno manje energije da ih se proizvede, ali se zato bilježi utrošak vode, goriva i poljoprivrednog zemljišta potrebnog za njihovu proizvodnju. [1]

S obzirom na razvoj mehanizacije i brojnih tehnologija obrade, proces proizvodnje i prerade lana danas je uvelike automatiziran.

Lanena vlakna su povezana ugljikodratima pektina u svežnjeve koji se protežu duž cijele stabljike i time čine oko četvrtinu ukupnog udjela stabljike. [14]

Neka od glavnih obilježja laneni vlakana su :

- elastičnost za mala istezanja
- slaba istezljivost
- relativno visoke vrijednosti rastezne čvrstoće i krutosti
- biorazgradivost i netoksičnost
- mala gustoća
- postojana u slabo razrijeđenim kiselinama i lužinama
- na temperaturama iznad 200°C dolazi do njihovog raspadanja

Usporedba svojstava staklenih i lanenih vlakana prikazana je u tablici 2. [15]

Tablica 2. Svojstva staklenih i lanenih vlakana

Vlakno	Gustoća ρ , [g/cm ³]	Rastezna čvrstoća σ_m , [MPa]	Modul elastičnosti E , [GPa]	Istezljivost A , [%]	Apsorpcija vlage, [%]
E-staklo	2,5-2,55	1800-3500	70-73	2,5-3	0
Lan	1,4-1,5	345-1500	30-80	1,2-3,2	7

2.3.2. Hibridni kompoziti

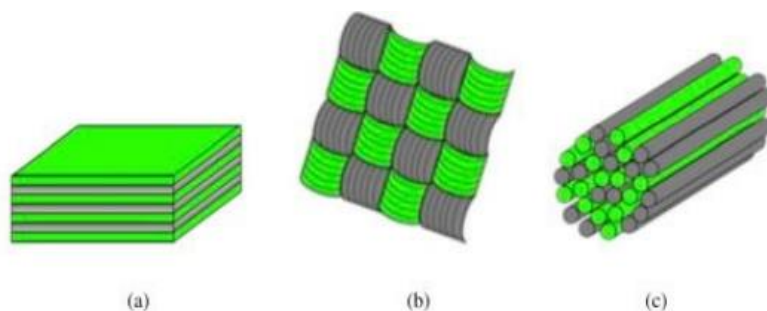
Prvi hibridni kompoziti pojavili su se krajem 80-ih godina prošlog stoljeća s ciljem spajanja mehaničkih svojstava makropunjenih i estetskih svojstava mikropunjenih kompozita.

Sadržavali su makročestice veličine 10-50 μm i mikročestice veličine 0,04 μm . Razvojem tehnologije i usitnjavanjem osnovnih čestica na prosječnu veličinu malo veću od 1 μm s udjelom mikročestica nastali su hibridni kompoziti s midi punilom, te daljnjim usitnjavanjem današnji mikrohibridni kompoziti s mini punjenjem i nanohibridni kompoziti. [16]

Hibridni kompoziti su vrsta kompozita koja sadrži dvije ili više različitih vrsta ojačala koja se nalaze u zajedničkoj jedinstvenoj matrici.

Ovi su kompoziti razvijeni s ciljem dobivanja materijala koji sadržava pozitivne karakteristike ojačala od kojih je građen, a one negativne karakteristike nastoji ublažiti. Također, način slaganja vlakana utječe na konačna svojstva kompozita. Tri najčešća načina slaganja vlakana prikazani redom na slici 9. su :

- a) sloj po sloj različitih vrsta tkanja
- b) tkanje sastavljeno od različitih vlakana
- c) međusobno izmiješana različita vlakna



Slika 9. Najčešći načini slaganja vlakna kod hibridnih kompozita [17]

Najjednostavniji i najjeftiniji postupak izrade hibridnog kompozita je slaganje različitih vrsta tkanja sloj po sloj. U većini slučajeva tkanja se slažu naizmjenično, ali moguće je i uzastopno polaganje više tkanja iste vrste i tako sve dok se ne postigne željena debljina. Zahvaljujući mogućnosti istovremenog postizanja različitih mehaničkih svojstava, hibridni kompoziti nailaze na primjenu u raznim granama gospodarstva poput zrakoplovstva, brodogradnje, građevinarstva, automobilske industrije. [17]

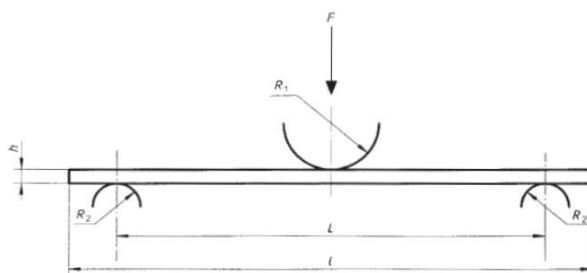
2.3.3. Mehanička svojstva kompozita

Mehanička svojstva materijala su svojstva koja definiraju mehaničko ponašanje materijala u određenim eksploatacijskim uvjetima. Mehanička svojstva proizlaze iz strukture materijala. Kako bi se postigla željena struktura, a samim time i željena mehanička svojstva, potrebno je odabrati odgovarajući materijal i primijeniti odgovarajuće tehnološke postupke obrade materijala. Zbog raznih strukturnih nepravilnosti koje nije moguće obuhvatiti proračunom, mehanička svojstva mogu se utvrditi isključivo eksperimentalnim putem. Mehanička svojstva imaju veliku važnost prilikom stvaranja konačnog proizvoda jer se na temelju njih dimenzioniraju dijelovi strojeva i elementi konstrukcija. U mehanička svojstva ubrajaju se rastezna svojstva kompozita, savojna svojstva te prividna međuslojna smična čvrstoća.

2.3.3.1. Savojna čvrstoća i savojni modul elastičnosti

Savojna čvrstoća je mehaničko svojstvo materijala koje karakterizira otpornost materijala na djelovanje sila savijanja koje se primjenjuju okomito na njegovu aksijalnu os.

Tokom savijanja ispitnog tijela na njegovoj unutarnjoj strani se javlja maksimalno tlačno naprezanje, a na suprotnoj strani se javlja maksimalno rastezno naprezanje. Ta maksimalna vrijednost rasteznog naprezanja koju materijal dosegne prije nego što dođe do loma ispitnog tijela se smatra njegovom savojnom čvrstoćom. Ispitivanje savojne čvrstoće vlaknima ojačanih polimernih kompozita provodi se prema normi EN ISO 14125. Ispitivanje se može provesti savijanjem ispitnog tijela u tri točke ili u četiri točke. Savijanje u tri točke je češći način ispitivanja (slika 10.), a u slučaju potrebe za detaljnijim ispitivanjem i točnosti, čak i kod krhkih materijala, koristi se savijanje u 4 točke. [18]



Slika 10. Savojno ispitivanje u 3 točke

Normom EN ISO 14125 : 1998 su zadani radijusi oslonaca i pritiskog tijela. Radijus R_1 pritiskog tijela iznosi $5 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$ dok je radijus R_2 oslonaca ovisan o debljini ispitnog tijela (h) te će za ispitna tijela debljine 3 ili manje mm iznositi $2 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$, a za ispitna tijela debljine veće od 3 mm iznositi će $5 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$. Normom je propisano da debljina ispitnog tijela na sredini 1/3 ispitnog tijela s obje strane ne smije odstupati više od 2 % srednje vrijednosti debljine u centralnom području. Širina ispitnog tijela b ne smije odstupati više od 3 % duž cijelog presjeka, a presjek tijela mora biti pravokutnog oblika i bez zaobljenih rubova. Također je određena maksimalna dopuštena pogreška izmjerenih sila i progiba koja ne smije premašiti $\pm 1 \%$ mjernog područja. U tablici 3. navedene su normirane dimenzije ispitnih tijela za savojno ispitivanje u tri točke, a podijeljene su u četiri klase. [18]

Tablica 3. Normirane dimenzije ispitnih tijela za savojno ispitivanje u tri točke [18]

Materijal	Duljina l [mm]	Razmak između oslonaca L [mm]	Širina b [mm]	Debljina h [mm]
Klasa I: diskontinuirani vlaknima ojačani plastomeri	80	64	10	4
Klasa II: polimeri ojačani tkanjima, tkaninom i njihova kombinacija (DMC, BMC, SMC, GMT)	80	64	15	4
Klasa III: poprečni (90°) jednosmjerni kompoziti; neusmjereni (0°) i višesmjerni kompoziti s $5 < E_{fl}/G_{13} \leq 15$ (npr. kompoziti sa staklenim vlaknima)	60	40	15	2
Klasa IV: neusmjereni (0°) i višesmjerni kompoziti s $15 < E_{fl}/G_{13} \leq 50$ (npr. kompoziti s ugljičnim vlaknima)	100	80	15	2
Tolerancije	- 0 +10	± 1	$\pm 0,5$	$\pm 0,2$

Ako nije moguće ili nije poželjno koristiti standardne dimenzije, primjenjuju se vrijednosti duljine l i razmaka između oslonaca L (pripisane normom) kao funkcije debljine ispitnog tijela h . Navedene veličine moraju biti u istom omjeru kao i standardne dimenzije, prema $L = 16 h_{sr}$ [18]. Propisani omjeri veličina za savijanje u tri točke prikazani su u tablici 4.

Tablica 4. Duljina l i razmak između oslonaca L kao funkcije debljine h [18]

Materijal	L/h	l/h
Klasa I	16	20
Klasa II	16	20
Klasa III	20	30
Klasa IV	40	50

U tablici 5. se nalaze vrijednosti širine b kao funkcije debljine h , određene normom.

Tablica 5. Širina b kao funkcija debljine h [18]

Debljina h [mm]	Širina b [mm] Klasa I	Širina b [mm] Klasa II, III, IV
$1 < h \leq 3$	25	15
$3 < h \leq 5$	10	15
$5 < h \leq 10$	15	15
$10 < h \leq 20$	20	30
$20 < h \leq 35$	35	50
$35 < h \leq 50$	50	80

Prije provođenja ispitivanja izmjere se sve potrebne dimenzije ispitnih tijela pomoću pomičnog mjerila te se zabilježeni podaci unose u računalni program. Ispitno tijelo se postavlja simetrično na dva paralelna oslonca i opterećuje se na način da pritisno tijelo djeluje na sredini. Zbog mogućeg pomicanja pritisnog tijela na početku ispitivanja primjenjuje se početna sila kojom se korigiraju mogući pomaci. Sila savijanja kojom djeluje pritisno tijelo povećava se tokom ispitivanja i tako sve do pojave loma ispitnog tijela.

Za svaki određeni korak povećanja sile očitava se i odgovarajući progib. Pomoću dobivenih vrijednosti sile i progiba moguće je izračunati pripadajuća naprezanja i istežanja na temelju kojih se onda konstruira dijagram naprezanje – istežanje. [18]

Vrijednosti pripadajućeg savojnog naprezanja računaju se pomoću sljedećeg izraza [18]:

$$\sigma_f = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (2.2)$$

Gdje je :

σ_f [MPa] – savojno naprezanje

F [N] – zadana sila

L [mm] – razmak između oslonaca

b [mm] – širina ispitnog tijela

h [mm] – debljina ispitnog tijela

Za izračun vrijednosti pripadajućeg istežanja koristi se izraz [18]:

$$\varepsilon = \frac{6 \cdot f \cdot h}{L^2} \quad (2.3)$$

Gdje je :

ε [mm/mm] – istežanje uslijed savojnog opterećenja

f [mm] – progib ispitnog tijela

Za izračun vrijednosti savojne čvrstoće koristi se izraz [18]:

$$\sigma_{fM} = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (2.4)$$

Gdje je :

σ_{fM} [MPa] – savojna čvrstoća

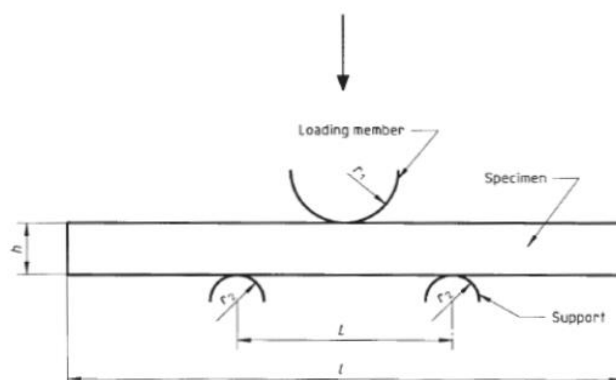
F_{max} [N] – maksimalna sila

Savojni modul elastičnosti E_f je omjer savojnog naprezanja i pripadajućeg istežanja. Određuje se tako što se dobivena krivulja u dijagramu naprezanje – istežanje aproksimira linearnim pravcem, a nagib tog pravca je zapravo savojni modul elastičnosti [18].

2.3.3.2. *Prividna međuslojna smična čvrstoća*

Prividna međuslojna smična čvrstoća je mehaničko svojstvo materijala koje karakterizira kvalitetu graničnih površina, tj. međuslojeva. Ovisi o čvrstoći veza ostvarenih između matrice i ojačala te o ukupnoj veličini dodirnih površina tih dviju komponenti. Dobra adhezija između matrice i ojačala nužna je kako bi se ostvario kvalitetan i ravnomjieran prijenos opterećenja s matrice na ojačala te kako ne bi došlo do raslojavanja kompozita. Ispitivanje prividne međuslojne smične čvrstoće polimernih kompozita ojačanih vlaknima provodi se prema normi EN ISO 14130.

Ispitivanje je slično ispitivanju savojne čvrstoće te se također provodi savijanjem u tri točke uz jednu bitnu razliku, a to je da je razmak između oslonaca smanjen kako bi došlo do smičnog naprezanja među slojevima kompozita. Prikaz ispitivanja prikazan je na slici 13. [19]



Slika 11. Ispitivanje prividne međuslojne čvrstoće

Normom EN ISO 14130 : 1997 zadani su radijusi oslonaca i pritisnog tijela. Radijus r_1 pritisnog tijela iznosi $5 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$, a radijus r_2 oslonaca iznosi $2 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$. Širina pritisnog tijela i oslonaca mora biti veća od širine ispitnog tijela. Ispitno tijelo mora imati ravnu površinu koja, kao i rubovi, ne smije biti oštećena. Debljina ispitnog tijela mora biti unutar $\pm 5 \%$ srednje vrijednosti debljine duž cijelog presjeka koji mora biti pravokutnog oblika. Širina pojedinog ispitnog tijela mora biti konstantna do unutar $0,2 \text{ mm}$ odstupanja [20]. U tablici 6. navedene su normirane dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje prividne međuslojne smične čvrstoće.

Tablica 6. Normirane dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje prividne međuslojne smične čvrstoće [19]

Debljina h [mm]	Duljina l [mm]	Širina b [mm]
$2 \pm 0,2$	20 ± 1	$10 \pm 0,2$

Ako nije moguće ili poželjno koristiti standardne dimenzije, primjenjuju se normom propisane vrijednosti duljine l i širine b kao funkcije debljine ispitnog tijela h . Navedene veličine moraju biti u istom omjeru kao i standardne dimenzije [20]:

$$l = 10 \cdot b \quad (2.5)$$

$$b = 5 \cdot h \quad (2.6)$$

Razmak između oslonaca L određuje se pomoću srednje vrijednosti debljine ispitnih tijela uz dopušteno odstupanje od $\pm 0,3 \text{ mm}$ [20]:

$$L = 5 \cdot h_{sr} \quad (2.7)$$

Prije provođenja ispitivanja izmjere se sve potrebne dimenzije pomoćnim mjerilom te se ispitno tijelo postavlja simetrično na dva paralelna oslonca i opterećuje na način da pritisno tijelo djeluje na sredini. Ispitno tijelo opterećuje se silom koja se postepeno povećava, a ispitivanje završava dosezanjem maksimalne sile, odnosno sile kod koje dolazi do loma ispitnog tijela. Pomoću maksimalne sile izračunava se prividna međuslojna smična čvrstoća prema izrazu [19]:

$$\tau = \frac{3 \cdot F_{max}}{4 \cdot b \cdot h} \quad (2.8)$$

Gdje je:

τ [MPa] – prividna međuslojna smična čvrstoća

F_{max} [N] – maksimalna sila

b [mm] – širina ispitnog tijela

h [mm] – debljina ispitnog tijela

3. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom su dijelu provedena ispitivanja triju različitih polimernih kompozita ojačanih vlaknima kako bi se utvrdila njihova mehanička svojstva pri savojnom opterećenju. Kompoziti od epoksidne smole su bili ojačani staklenim ili lanenim vlaknima te kombinacijom oba (hibrid) sastavljenog od četiri sloja gdje se u vanjskim slojevima nalaze staklena vlakna, a uz neutralnu liniju lanena. Ispitna tijela izrezana su kružnom pilom uz hlađenje vodom na dimenzije i oblik u skladu s odgovarajućim normama. Ispitani su savojna čvrstoća i modul te prividna međuslojna smična čvrstoća. Ova dva ispitivanja provode se na vrlo sličan način. Ispitna su tijela u obliku kvadra, a najveća je razlika u razmaku između oslonaca, pri čemu se raslojavanje kod ispitivanja međuslojne čvrstoće postiže smanjivanjem razmaka uslijed čega dolazi do velikih smičnih naprezanja. Dobivena su svojstva uspoređena s Pravilima Hrvatskog registra brodova za kompozite sa staklenim vlaknima kako bi se provjerilo mogu li kompoziti ojačani biorazgradivim vlaknima biti kvalitetna zamjena kompozitima ojačanim staklenim vlaknima koji se uobičajeno koriste u brodogradnji te koliko staklena vlakna, u kombinaciji s lanenim ili sama, utječu na svojstva kompozita.

3.1. Materijali matrice i ojačala

Za izradu kompozita korištena je epoksidna smola kao matrica, a kao ojačala su korištena lanena vlakna ampliTEX 500 (Bcomp, Švicarska) i staklena vlakna Triaxial 1200 (SAERTEX, Njemačka). Kombinacijama navedenih konstituenata izrađena su 2 različita kompozita sljedećeg sastava:

- 1) epoksidna smola / staklena vlakna Triaxial 1200
- 2) epoksidna smola / staklena vlakna Triaxial 1200 /lanena vlakna ampliTEX 500

Osim navedenih kompozita izrađenih u cilju ovoga završnog rada, u razmatranoj usporedbi kasnije ćemo promatrati kompozit napravljen za prijašnja istraživanja sastava epoksidna smola InfuGreen 810 / lanena vlakna ampliTEX 500 [22] .

Kompoziti su izrađeni postupkom podtlačnog ulijevanja. U ovom postupku se slojevi ojačala bez natapanja smolom stavljaju u kalup te se zatim na predoblik od ojačala postavlja posebna polimerna folija za brtvljenje.

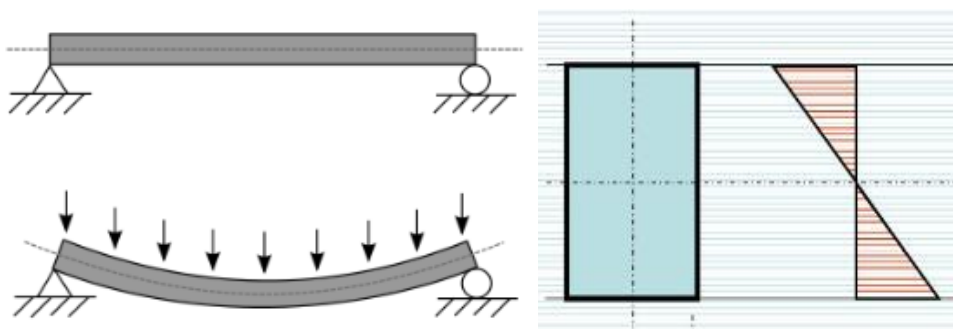
Nakon toga se izvuče zrak iz materijala u kalupu pomoću podtlačne pumpe. Nakon što je sav zrak uklonjen iz kalupa i ojačala su potpuno komprimirana, smola pomiješana s umreživalom uvodi se u kalup kako bi impregnirala predoblik.

Nakon što je smola potpuno prodrla kroz ojačavala, opskrba smolom se prekida, a kompozit u kalupu ostavlja se da umreži. U tablici 7. prikazane su određene karakteristike dva izrađena kompozita.

Tablica 7. Karakteristike izrađenih kompozita

Kompozit	Smola	Tkanina	Broj slojeva tkanine
1	epoksid	staklena vlakna Triaxial 1200	4
2	epoksid	staklena vlakna Triaxial 1200 lanena vlakna ampliTEX 500	1+2+1

Kao što je vidljivo iz same tablice, vanjske su plohe hibridnog kompozita izrađene od staklenih vlakana budući da tamo dolazi do najvećeg naprezanja pri savojnom opterećenju, a staklena vlakna su otpornija opterećenju od lanenih. Zato su lanena vlakna postavljena u područja središnje ravnine gdje je naprezanje najmanje, što možemo vidjeti na slici 14. [23]



Slika 12. Raspored naprezanja pri savojnom opterećenju

3.2. Ispitivanje prividne međuslojne smične čvrstoće

Ispitivanje prividne međuslojne smične čvrstoće je provedeno prema normi HRN EN ISO 14130 : 1997 metodom kratke grede na univerzalnoj kidalici Shimadzu AGS – X prikazanoj na slici 15. Kidalica je povezana s računalom i upravljana je pomoću programa naziva Trapezium X. Ovaj program omogućuje zapisivanje rezultata ispitivanja u elektronskom obliku te su prije samog provođenja ispitivanja u njega unesene potrebne izmjerene dimenzije ispitnih tijela. Mjerno područje kidalice je od 0 do 50000 N, a brzina ispitivanja bila je 2 mm/min za oba kompozita.



Slika 13. Univerzalna kidalica Shimadzu AGS – X

Dimenzije ispitnih tijela navedenih kompozita i razmak između oslonaca koji je izračunat prema izrazu (2.7) prikazani su u sljedećim tablicama. U oznakama za ispitno tijelo prvi broj referira se na tablicu 7. i označava kompozit iz kojeg su izrezana ispitna tijela, a drugi broj u oznaci predstavlja redni broj ispitnog tijela. Tako primjerice oznaka 2-3 znači da se radi o drugom kompozitu (hibrid epoksid / staklo / lan) i ispitnom tijelu broj 3.

Tablica 8. Dimenzije ispitnih tijela za međuslojno ispitivanje za kompozit epoksid / stako

Ispitno tijelo	Debljina h [mm]	Širina b [mm]	Razmak između oslonaca L [mm]
1-1	2,68	14,60	13,5
1-2	2,72	14,90	13,5
1-3	2,58	14,86	13,5
1-4	2,86	14,80	13,5
1-5	2,72	14,66	13,5
1-6	2,62	14,66	13,5

Tablica 9. Dimenzije ispitnih tijela za međuslojno ispitivanje za kompozit epoksid / staklo i lan

Ispitno tijelo	Debljina h	Širina b [mm]	Razmak između oslonaca L [mm]
2-1	3,32	16,22	16,00
2-2	3,28	16,18	16,00
2-3	3,36	16,54	16,00
2-4	3,34	15,94	16,00
2-5	3,20	16,22	16,00
2-6	3,30	16,22	16,00

3.3. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće

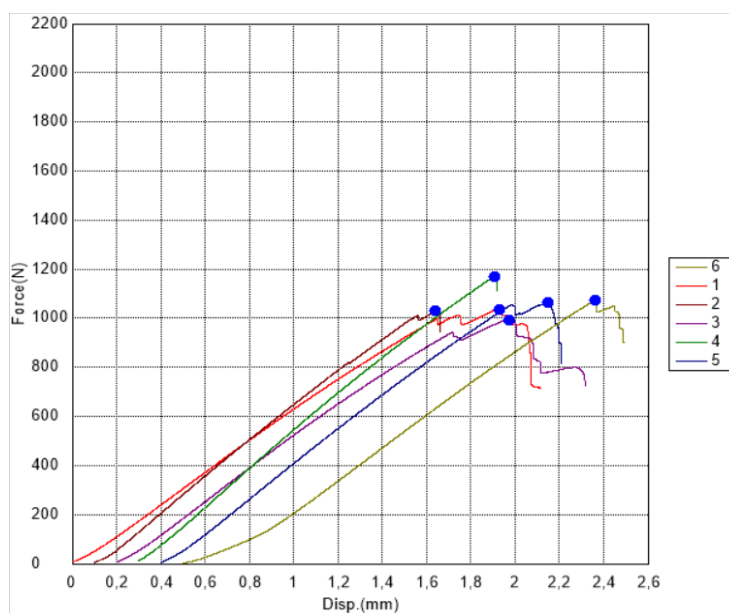
U nastavku su prikazane tablice s dobivenim rezultatima maksimalne sile i vrijednostima prividne međuslojne smične čvrstoće koje su izračunate pomoću izraza (2.8). Također, za svaki kompozit priložen je i dijagram sila – progib dobiven u programu Trapezium X. Na slici 16. su prikazani uzorci nakon ispitivanja.



Slika 15. Ispitni uzorci nakon ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće

Tablica 10. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće za kompozit epoksid / staklo

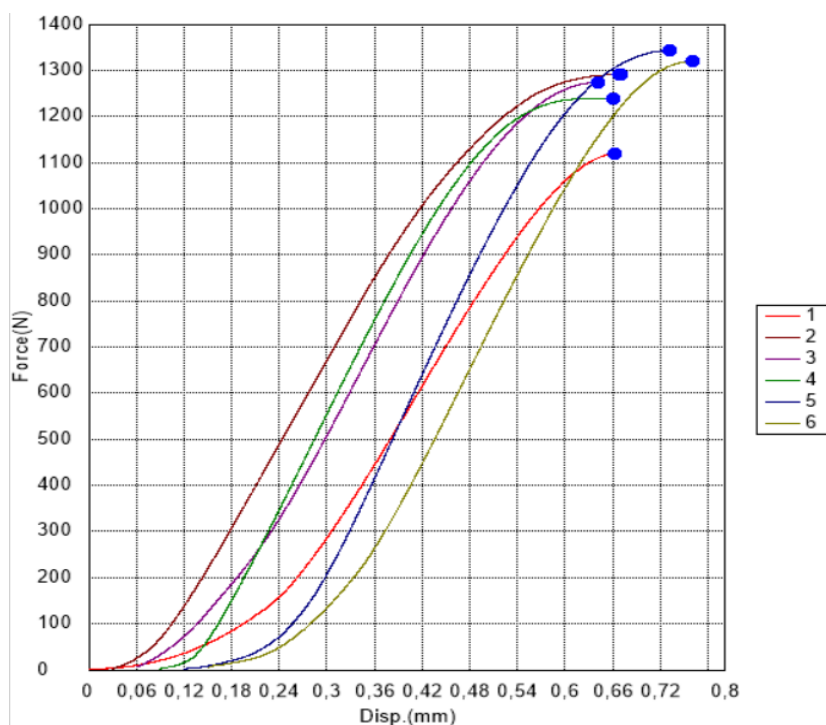
Ispitno tijelo	Maksimalna sila F_{max} [N]	Međuslojna smična čvrstoća τ [MPa]
1-1	1037,74	19,89
1-2	1030,92	19,08
1-3	994,43	19,45
1-4	1171,06	20,75
1-5	1064,28	20,02
1-6	1073,58	20,96
Srednja vrijednost		20,025
Standardna devijacija		0,66



Slika 15. Dijagram sila – progib dobiven međuslojnim ispitivanjem za kompozit epoksid / staklo

Tablica 11. Rezultati ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće za kompozit epoksid / staklo i lan

Ispitno tijelo	Maksimalna sila F_{max} [N]	Međuslojna smična čvrstoća τ [MPa]
2-1	1119,96	15,60
2-2	1290,83	18,24
2-3	1273,81	17,19
2-4	1238,51	17,45
2-5	1342,54	19,40
2-6	1319,61	18,49
Srednja vrijednost		17,72
Standardna devijacija		1,19



Slika 16. Dijagram sila – progib dobiven međuslojnim ispitivanjem za kompozit epoksid / staklo i lan

3.4. Ispitivanje savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti

Ispitivanje savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti provedeno je prema normi HRN EN ISO 14125 : 1998 na univerzalnoj kidalici Shimadzu AGS – X. Kidalica je, kao i tijekom ispitivanja prividne međuslojne smične čvrstoće, povezana s računalom te upravljana programom Trapezium X. U program su prije ispitivanja upisane potrebne izmjerene dimenzije ispitnih tijela. Mjerno područje kidalice je od 0 do 50000 N, a brzina ispitivanja bila je 25 mm/min za oba kompozita. U sljedećim tablicama prikazane su dimenzije ispitnih tijela svih kompozita i razmak između oslonaca koji je određen prema tablici 4. Također, na slici 19. prikazan su uzorci nakon ispitivanja savojne čvrstoće i modula elastičnosti.



Slika 17. Ispitni uzorci nakon ispitivanja savojne čvrstoće i modula elastičnosti

Tablica 12. Dimenzije ispitnih tijela za savojno ispitivanje za kompozit epoksid / staklo

Ispitno tijelo	Debljina h [mm]	Širina b [mm]	Razmak između oslonaca L [mm]
1-1	2,74	15,16	43,00
1-2	2,72	15,66	43,00
1-3	2,68	14,66	43,00
1-4	2,66	15,48	43,00
1-5	2,68	15,16	43,00
1-6	2,72	14,40	43,00

Tablica 13. Dimenzije ispitnih tijela za savojno ispitivanje za kompozit epoksid / staklo i lan

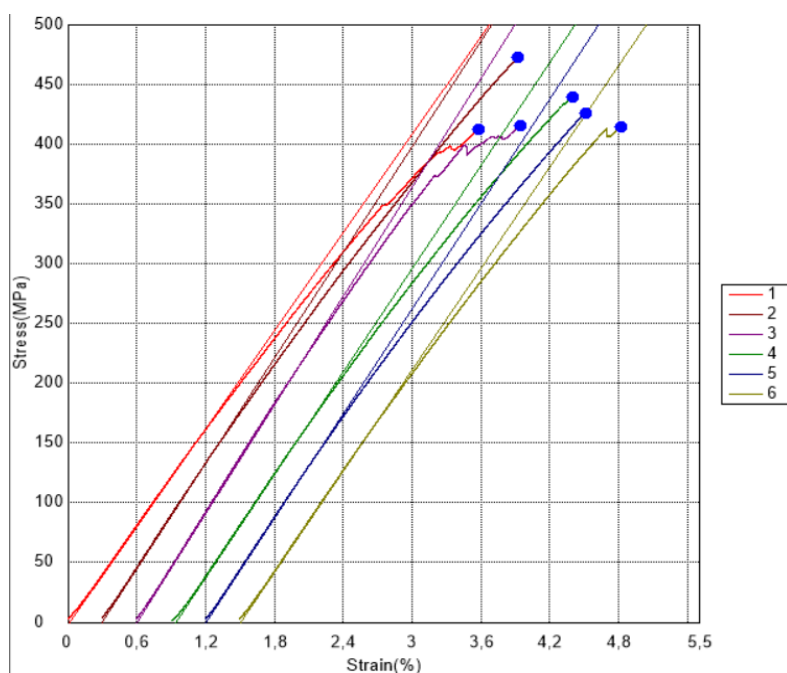
Ispitno tijelo	Debljina h [mm]	Širina b [mm]	Razmak između oslonaca L [mm]
2-1	3,28	15,78	52,00
2-2	3,22	15,68	52,00
2-3	3,22	15,48	52,00
2-4	3,61	15,50	52,00
2-5	3,24	15,32	52,00
2-6	3,02	15,30	52,00

3.5. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće i savojnog modula elastičnosti

U sljedećim tablicama su prikazani dobiveni rezultati maksimalne sile, maksimalnog progiba i savojnog modula elastičnosti te su izračunate vrijednosti deformacije prilikom loma i savojne čvrstoće prema izrazima (2.3) i (2.4). Također, za svaki kompozit priložen je i dijagram naprezanje – istežanje dobiven u programu Trapezium X.

Tablica 14. Rezultati savojnog ispitivanja za kompozit epoksid / staklo

Ispitno tijelo	Maksimalna sila F_{max} [N]	Maksimalni progib f_{max} [mm]	Savojni modul elastičnosti E_f [MPa]	Savojna čvrstoća σ_{fM} [MPa]	Deformacija prilikom loma ε_k [%]
1-1	726,48	4,02	13674,57	411,70	3,58
1-2	848,26	4,10	14718,69	472,24	3,62
1-3	678,06	3,85	15184,70	415,36	3,35
1-4	745,26	4,05	14371,59	438,87	3,50
1-5	719,40	3,81	14613,72	426,15	3,31
1-6	684,15	3,76	14136,02	414,2	3,32
Srednja vrijednost			14449,88	429,75	3,45
Standardna devijacija			518,615	21,12	0,13765

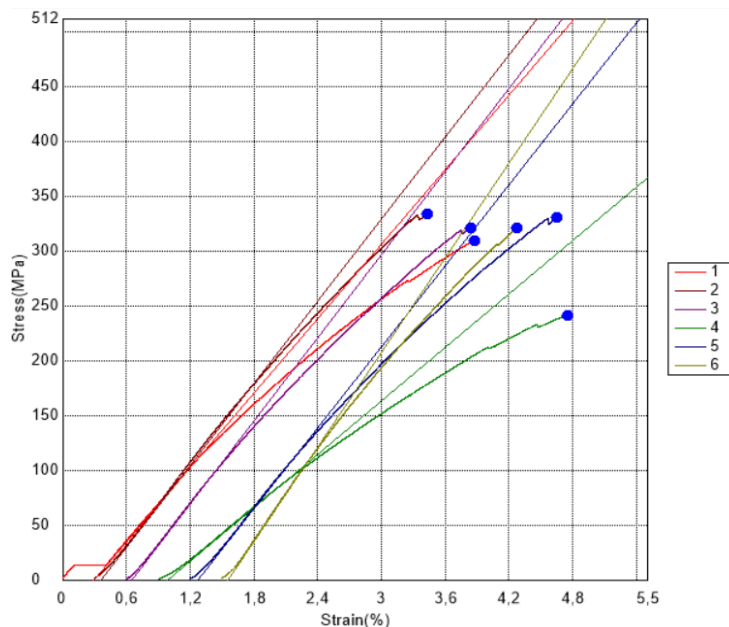


Slika 18. Dijagram naprezanje – istežanje dobiven savojnim ispitivanjem za kompozit epoksid / staklo

Tablica 15. Rezultati savojnog ispitivanja za kompozit epoksid / staklo i lan

Ispitno tijelo	Maksimalna sila F_{max} [N]	Maksimalni progib f_{max} [mm]	Savojni modul elastičnosti E_f [MPa]	Savojna čvrstoća σ_{fM} [MPa]	Deformacija prilikom loma ε_k [%]
2-1	673,87	5,32	11325,07	309,61	3,87
2-2	695,24	4,39	12468,25	333,56	3,13
2-3	660,44	4,53	12638,10	320,96	3,24
2-4	625,34	4,81	8127,01	241,47	3,85
2-5	681,14	4,81	12312,85	330,36	3,46
2-6	574,63	4,15	14389,08	321,2	2,78
Srednja vrijednost			12626,67	323,14	3,39
Standardna devijacija			992,37	8,39	0,42640

Ispitno tijelo 2-4 nije uzeto u proračun srednje vrijednosti i standardne devijacije zbog značajnih odstupanja.



Slika 19. Dijagram naprezanje – istežanje dobiven savojnim ispitivanjem za kompozit epoksid / staklo i lan

3.6. Analiza rezultata dobivenih savojnim i međuslojnim ispitivanjem kompozita

U tablici 16. prikazane su srednje vrijednosti prividne međuslojne smične čvrstoće, savojnog modula elastičnosti, savojne čvrstoće i deformacije prilikom loma. Također, radi usporedbe je prikazan i kompozit epoksid / lan iz prijašnjih ispitivanja. [22]

Tablica 16. Srednje vrijednosti rezultata dobivenih savojnim i međuslojnim ispitivanjem

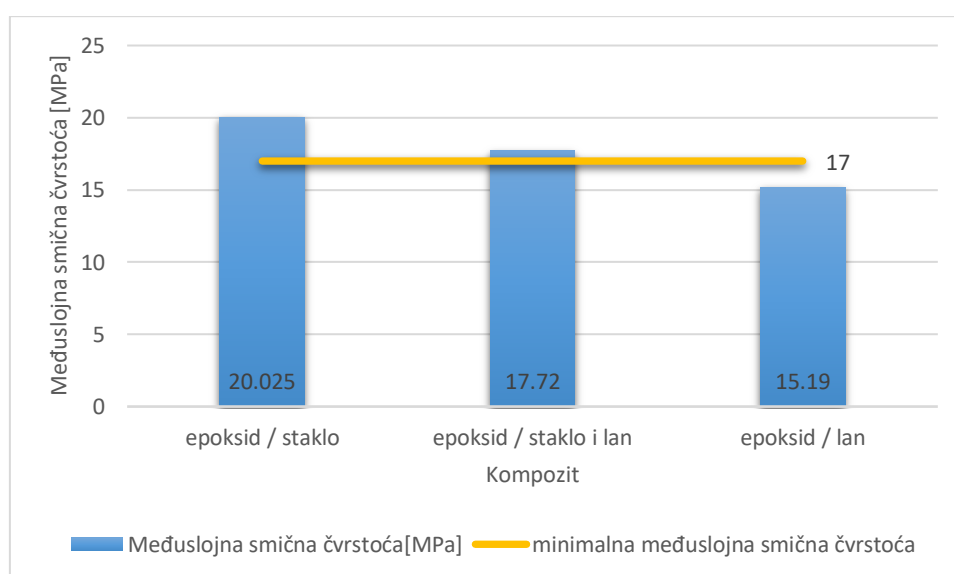
Kompozit	τ_{sr} [MPa]	$E_{f, sr}$ [MPa]	$\sigma_{fM, sr}$ [MPa]	$\varepsilon_{k, sr}$ [%]
epoksid / staklo	20,025	14449,88	429,75	3,45
epoksid / staklo i lan	17,72	12626,67	323,14	3,39
epoksid / lan	15,19	9168,99	138,19	2,62

Iz tablice 16. vidljivo je kako je znatno najveće vrijednosti prividne međuslojne smične čvrstoće, savojnog modula elastičnosti i savojne čvrstoće postigao kompozit sastavljen od epoksidne smole i staklenih vlakana. Postignuti rezultati su očekivani s obzirom na broj slojeva tkanine i svojstva staklenih vlakana, te same kombinacije epoksid / staklo. Drugu najveću vrijednost prividne međuslojne smične čvrstoće ima hibrid epoksid / staklo i lan.

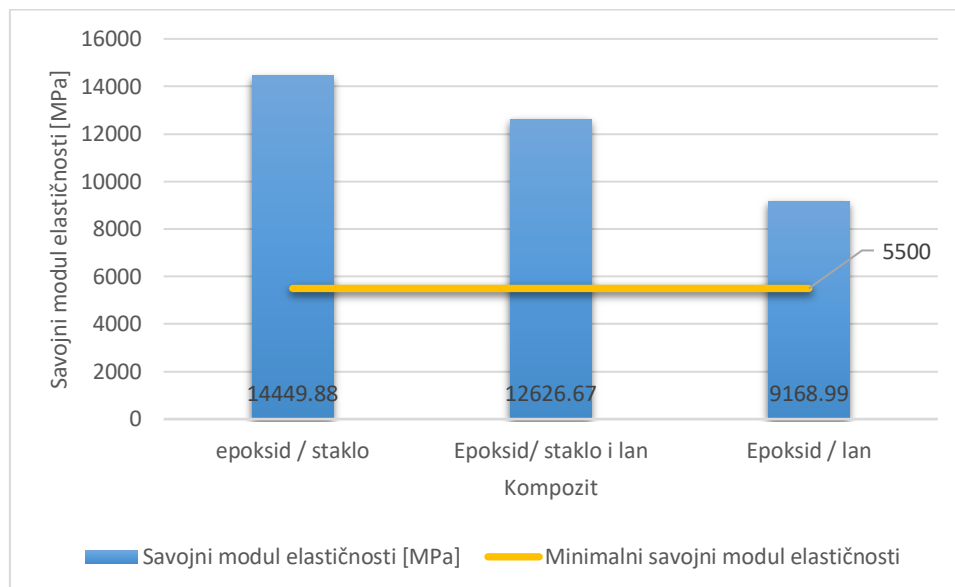
Hibrid epoksid / staklo i lan ima malo nižu vrijednost prividne međuslojne smične čvrstoće u odnosu na kompozit epoksid / staklo, dok kompozit epoksid / lan ima znatno nižu vrijednost istoga svojstva. To je jedan od razloga dobre adhezije epoksidne smole što posebno važno kod kompozita sa lanenim vlaknima, zbog hidrofilne prirode biorazgradivih vlakana. Znatno manju vrijednost savojnog modula elastičnosti ima kompozit ojačan lanenim vlaknima, a time i najmanju krutost uslijed male krutosti lanenih vlakna. Isto se svojstvo ne razlikuje previše između hibrida ojačanim kombinacijom staklenih i lanenih vlakana te kompozita epoksid / staklo, međutim ipak je ono veće kod kompozita ojačanog samo staklenim vlaknima, što ukazuje na najveću krutost. Savojna čvrstoća je za 33 % veća kod kompozita epoksid / staklo naspram kompozita ojačanog samo lanenim vlaknima. Tome je razlog sama dobra svojstva staklenih vlakna te njihova količina. Također, hibrid ojačan kombinacijom vlakana ima za 134 % veću savojnu čvrstoću od kompozita ojačanog samo lanenim vlaknima, čemu je razlog također svojstva staklenih vlakna te njihov raspored u hibridu. Naime, jaka staklena vlakna su postavljena u vanjske plohe iz razloga što tamo dolazi do najvećeg naprezanja, dok su lanena postavljena u području neutralne linije gdje je ono najmanje. Najmanju deformaciju prilikom loma zabilježio je kompozit epoksid / lan, a veće deformacije hibrid i kompozit epoksid / staklo, iako hibrid ima nešto manju deformaciju.

3.7. Usporedba rezultata ispitivanja sa zahtjevima Hrvatskog registra brodova za kompozite ojačane staklenim vlaknima

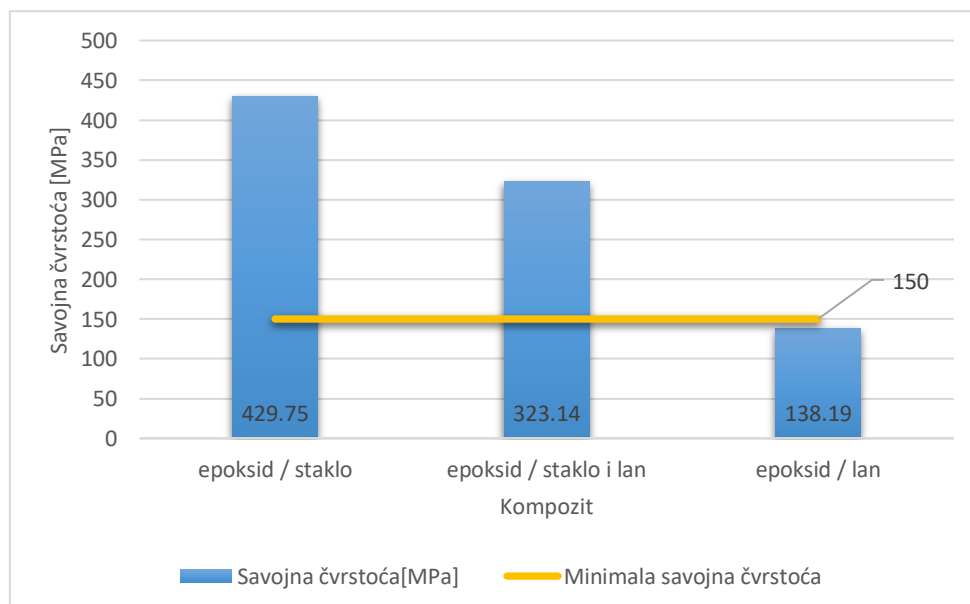
Na sljedećim slikama grafički su prikazane srednje vrijednosti rezultata dobivenih savojnim i međuslojnim ispitivanjem kompozita te je istaknuta minimalna vrijednost svakog mehaničkog svojstva koja se odnosi na kompozite sa staklenim vlaknima i koja je propisana od strane Hrvatskog registra brodova.



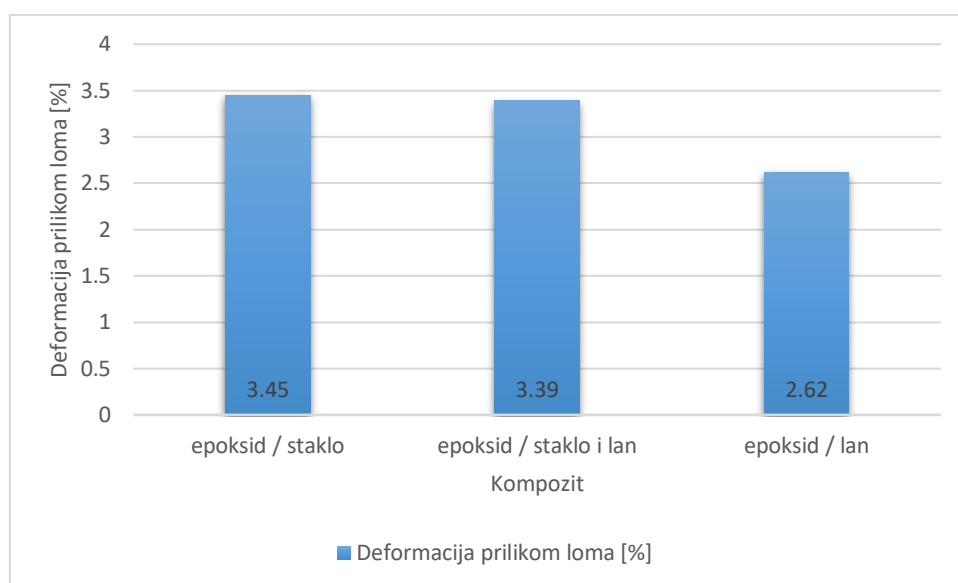
Slika 20. Srednje vrijednosti prividne međuslojne smične čvrstoće svih kompozita i minimalna propisana granica



Slika 21. Srednje vrijednosti savojnog modula elastičnosti svih kompozita i minimalna propisana granica



Slika 22. Srednje vrijednosti savojne čvrstoće svih kompozita i minimalna propisana granica



Slika 23. Srednje vrijednosti deformacije prilikom loma svih kompozita

U tablici 17. su prikazani rezultati ispitivanja savojnih i međuslojnih svojstava i njihova usporedba s pravilima Hrvatskog registra brodova. U tablici su navedene srednje vrijednosti prividne međuslojne smične čvrstoće, savojnog modula elastičnosti, savojne čvrstoće i deformacije prilikom loma ispitivanih kompozita. Navedeni podaci uspoređeni su s minimalnim vrijednostima mehaničkih svojstava koje moraju posjedovati kompoziti ojačani staklenim vlaknima, a propisana su od strane Hrvatskog registra brodova.

Tablica 17. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava kompozita uspoređeni sa zahtjevima Hrvatskog registra brodova [24]

Kompozit	Maseni udio vlakana [%]	τ_{sr} [MPa]	$E_{f, sr}$ [MPa]	$\sigma_{fM, sr}$ [MPa]	$\varepsilon_{k, sr}$ [%]
Epoksid / staklo	~55	20,025	14449,88	429,75	3,45
Epoksid / staklo i lan	~ 55	17,72	12626,67	323,14	3,39
Epoksid / lan	41,57	15,19	9168,99	138,19	2,62
HRB pravilnik		17	5500	150	

Iz tablice je uočljivo da oba kompozita ojačana staklenim vlaknima ostvaraju rezultate iznad minimalnih propisanih vrijednosti, dok kompozit ojačan lanenim vlaknima zadovoljava samo vrijednosti savojnog modula elastičnosti, iako i dalje znatno niži od prva dva kompozita. To se podrazumijeva s obzirom na manju krutost uslijed lanenih vlakana, budući da staklena vlakna znatno više ojačavaju kompozit. Najveće vrijednosti svih svojstava ima kompozit epoksid / staklo, a posebno se ističe u savojnoj čvrstoći uslijed svojstava staklenih vlakana i broju slojeva. Hibrid epoksid / staklo i lan ima nešto manje vrijednosti svih svojstava naspram prvog kompozita, ali i dalje zadovoljava sve propisane vrijednosti uslijed dobre kombinacije epoksidne smole i navedenih vrsta ojačala te njihovog rasporeda (vanjski slojevi od stakla, lan oko neutralne linije) gdje staklena vlakna preuzimaju najveća opterećenja budući da kod vanjskih ploha dolazi to pritiskanja i rastezanja. U pravilniku Hrvatskog registra brodova propisano je i pravilo da maseni udio staklenih vlakana ne smije biti veći od 50 %. Među ovdje ispitanim kompozitima, jedino kompozit epoksid / lan ima maseni udio vlakana niži od propisane granice. Visok udio staklenih vlakana je posljedica pripreme potlačnim lijevanjem, gdje se postiže dobra impregnacija kompozita usprkos visokom udjelu vlakana, što se pokazalo i visokim vrijednostima prividne međuslojne smične čvrstoće. Kompozit s lanenim vlaknima pripremljen je istim parametrima prerade, a manji maseni udio vlakana posljedica je niske gustoće lanenih vlakana, u odnosu na staklena (približno 50%).

4. ZAKLJUČAK

U ovom završnom radu ispitana su mehanička svojstva dva različita polimerna kompozita ojačana vlaknima pri savojnom opterećenju. Cilj ispitivanja bio je utvrditi koliko staklena vlakna utječu na promjenu svojstava te mogu li biorazgradiva, tj. u ovom konkretnom slučaju lanena vlakna, biti kvalitetna zamjena staklenim vlaknima koja se uobičajeno koriste pri izradi polimernih kompozita u brodogradnji. Svi kompoziti bili su izrađeni postupkom vakuumske infuzije, a međusobno su se razlikovali s obzirom na to jesu li kompoziti bili ojačani staklenim ili lanenim vlaknima. Kombinirajući navedene komponente nastala su dva različita kompozita sljedećeg sastava:

- 1) kompozit epoksidna smola / staklena vlakna
- 2) kompozit epoksidna smola / staklena i lanena vlakna (hibrid)

Nakon izrade kompoziti su bili podvrgnuti ispitivanju savojnih i međuslojnih svojstava prema normama HRN EN ISO 14125 : 1998 i HRN EN ISO 14130 : 1997. U oba slučaja je ispitno tijelo položeno na dva oslonca te je opterećeno silom koja djeluje na sredini, a jedina je razlika u razmaku između oslonaca koji se računa prema već prije spomenutim izrazima. Ispitivanjima su dobiveni podaci o prividnoj međuslojnoj smičnoj čvrstoći, savojnom modulu elastičnosti, savojnoj čvrstoći te deformaciji prilikom loma za ispitane kompozite.

U svrhu utvrđivanja utjecaja staklenih vlakna na mehanička svojstva izrađene smo kompozite usporedili s kompozitom epoksidna smola / lan iz prijašnjeg istraživanja.

U tablici 17. istaknute su srednje vrijednosti rezultata dobivenih ispitivanjima te su one uspoređene s minimalnim propisanim vrijednostima za kompozite sa staklenim vlaknima koje se nalaze u Pravilima za klasifikaciju brodova (članak 24.), izdanim 2017. godine od strane Hrvatskog registra brodova. Pravilima je propisano kako je minimalan iznos prividne međuslojne smične čvrstoće 17 MPa, savojnog modula elastičnosti 5500 MPa, a savojne čvrstoće 150 MPa. Vidljivo je da je kompozit epoksidna smola / staklena vlakna postigao najbolje rezultate i premašio propisane granice uslijed količine ojačala i njegovih svojstava. Također je vidljivo kako hibrid epoksidna smola / staklena i lanena vlakna zadovoljava granične vrijednosti, iako u manjim iznosima od prvoga kompozita. Zadovoljavajući rezultati hibrida posljedica su dvije vrste ojačala i njihovog rasporeda u kojem staklena vlakna nose vanjske površine gdje je naprezanje najveće dok su lanena vlakna, malo slabija, postavljena u području neutralne linije gdje je naprezanje najmanjeg iznosa.

Podaci pokazuju kako svi navedeni kompoziti zadovoljavaju svojstvo savojnog modula elastičnosti, međutim, kompozit epoksid / lanena vlakna, iako ne u velikim odstupanjima, ne zadovoljava ostala svojstva što ukazuje na utjecaj jakih staklenih vlakna na mehanička svojstva kompozita i njihovo poboljšanje. Ukoliko je kompozit ojačan samo lanenim vlaknima preslab za primjenu pri savojnom opterećenju izrađuje se hibrid dodavanjem staklenih vlakana.

LITERATURA

- [1] Macan J., *Kompozitni materijali*- interna skripta, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 2020.
- [2] Filetin, T., Kovačićek, F., Indof J. : *Svojstva i primjena materijala*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2007
- [3] Kaur, K.B., Russell, E.J., Parveen, K.C. : MDPI Journals, „*Polymers*“, 2015, Volume 7, Issue 2, *Flame Retardance and Physical Properties of Novel Cured Blends of Unsaturated Polyester and Furan Resins*
- [4] Filetin, T., Marić, G. : *Napredne tehnologije materijala*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [5] Smojver, I. : *Mehanika kompozitnih materijala* – interna skripta, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 2007
- [6] T. Filetin, T., Kovačićek, F., Indof, J.: *Svojstva i primjena materijala: čelici i željezni ljevovi, laki i obojeni metali, konstrukcijska keramika, polimerni materijali, kompozitni materijali i drvo* ; 2. izdanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2013.
- [7] Masuelli M. A.: *Fiber Reinforced Polymers: The technology Applied for Concrete Repair*, InTech, Rijeka, 2013
- [8] Schauerperl, Z. : *Kompozitni materijali – nastavni materijali*, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb 2020.
- [9] SP System guide to composites (Composite Engineering Materials)
- [10] Garafulić E., *Detekcija i procjena oštećenja kompozitnih struktura primjenom aktivne metode infracrvene termografije*, Doktorska disertacija, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split 2013.
- [11] P. K. Malick: „*Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*“ Taylor & Francis Group LLC, 2007.
- [12] Kunej, W. : *Poliesterski kompoziti 2*, Prošireno izdanje, DIA-MAR, Rijeka, 2006.
- [13] Harper, C.A. : *Handbook of Plastics, Elastomers, and Composites*, McGraw-Hill, 2002.
- [14] Brizić M., Janović Z., Šmit I., Štefanović D.: *Polimerni materijali*, Tehnička enciklopedija 10, 1986.
- [15] Milardović G.: *Kompoziti u automobilskoj industriji*, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2011.
- [16] Ferracane JL. *Resin composite-state of the art. Dent Mater.*, 2011. ;27(1):29-38
- [17] Swolfs Y., Gorbatikh L., Verpoest I.: *Fibre hybridisation in polymer composites: A review; Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2014.
- [18] EN ISO 14125 : 1998: *Fibre-reinforced plastic composites – Determination of flexural properties*

-
- [19] EN ISO 14130 : 1997: Fibre-reinforced plastic composites – Determination of apparent interlaminar shear strength by short-beam method
- [20] Repar, K., Žmak, I. : Mehanička svojstva lanom ojačanog zelenog kompozita, *Abstracts Book and Proceedings on USB of International Conference on Materials, Tribology, Recycling, MATRIB 2016*
- [21] Deng Y., Doctoral Thesis : *Life cycle assessment of biobased fibre – reinforced polymer composites*, KU Leuven, Nizozemska, 2014.
- [22] Podgorski Dominik, Završni rad : Kompoziti ojačani staklenim i lanenim vlaknima pri savojnom opterećenju, Zagreb 2022., <https://repozitorij.fsb.unizg.hr/>
- [23] "Tehnička enciklopedija" (Nauka o čvrstoći), glavni urednik Hrvoje Požar, Grafički zavod Hrvatske, 1987.
- [24] Hrvatski registar brodova : *Rules for the classification of ships: Part 24 – Non – metallic materials*, Split, 2017. Dostupno na: [Rules for the classification ships, Part 24 - Non-metallic materials, edition 2017 \(crs.hr\)](https://www.crs.hr/)