

ANALIZA UTJECAJA TEHNOLOGIJE IZRADE NA MEHANIČKE OSOBINE KOMPOZITNOG MATERIJALA ZA PRIMJENU NA BRODSKE KONSTRUKCIJE

Pejčinović, Filip

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:247611>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#) / [Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-04**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij brodogradnje

Diplomski rad

**ANALIZA UTJECAJA TEHNOLOGIJE IZRADE NA
MEHANIČKE OSOBINE KOMPOZITNOG MATERIJALA ZA
PRIMJENU NA BRODSKE KONSTRUKCIJE**

Rijeka, rujan 2023.

Filip Pejčinović

0069079570

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij brodogradnje

Diplomski rad

**ANALIZA UTJECAJA TEHNOLOGIJE IZRADE NA
MEHANIČKE OSOBINE KOMPOZITNOG MATERIJALA ZA
PRIMJENU NA BRODSKE KONSTRUKCIJE**

**ANALYSIS OF PRODUCTION TECHNOLOGY ON THE
MECHANICAL PROPERTIES OF COMPOSITES FOR
APPLICATION TO SHIP STRUCTURES**

Mentor: Prof. dr. sc. Albert Zamarin

Rijeka, rujan 2023.

Filip Pejčinović

0069079570

Rijeka, 16. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za brodogradnju i inženjerstvo morske tehnologije**
Predmet: **Konstrukcija malih plovnih objekata**
Grana: **2.02.01 konstrukcija plovnih i pučinskih objekata**

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Filip Pejčinović (0069079570)**
Studij: Sveučilišni diplomski studij brodogradnje
Modul: Projektiranje i konstrukcija plovnih objekata

Zadatak: **ANALIZA UTJECAJA TEHNOLOGIJE IZRADE NA MEHANIČKE OSOBINE
KOMPOZITNOG MATERIJALA ZA PRIMJENU NA BRODSKE
KONSTRUKCIJE / SENSITIVITY ANALYSIS OF PRODUCTION TECHNOLOGY
ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF COMPOSITES FOR APPLICATION
TO SHIP STRUCTURES**

Opis zadatka:

- Uvodno dati pregled mogućih/potrebnih eksperimentalnih standardnih i nestandardnih testova za procjenu mehaničkih osobina kompozita za upotrebu na pomorskim konstrukcijama.
- Prikazati i napraviti analitički proračun mehaničkih osobina kompozitnih konstrukcijskih elemenata obzirom na tehnologiju izrade prema pravilima/standardima.
- Izraditi plan eksperimenata i samih uzoraka primjenom različitih tehnologija izrade.
- Eksperimentalno ispitati pripremljene uzorake na rastezanje upotrebom kidalice.
- Opisati i provesti eksperimentalno ispitivanje postotka staklenog ojačanja u laminatu.
- Napraviti završnu analizu utjecaja tehnologije izrade na mehaničke osobine laminata.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.



Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:


Prof. dr. sc. Albert Zamarin

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:



Prof. dr. sc. Roko Dejhalla

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij brodogradnje

IZJAVA

U skladu s Pravilnikom o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskog sveučilišnog studija Tehničkog fakulteta u Rijeci, izjavljujem da sam samostalno izradio ovaj Diplomski rad prema zadatku zadanog 20. ožujka 2023. godine.

U Rijeci, rujan 2023.

Filip Pejčinović

0069079570

ZAHVALA

Zahvaljujem metnoro prof. dr. sc. Albertu Zamarinu, komentoru asist. Davoru Bolfu i UPTZ-u (Udruga Primijenjenih Tehničkih Znanosti) na pruženom povjerenju, materijalima i asistenciji kroz protekli period pisanja i izrade ovog diplomskog rada. Zahvaljujem svim ostalim profesorima i asistentima Tehničkog fakulteta u Rijeci na prenesenom znanju za vrijeme pohađanja prijediplomskog i diplomskog studija. Prenesno znanje nastojati ću iskoristiti za rješavanje budućih problema u praksi i životu. Hvala Vam!

Zahvaljujem se svojoj obitelji i roditeljima, kao i svojoj djevojci na bezuvjetnoj potpori kroz obrazovanje. Hvala im na svemu!

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. KOMPOZITNI MATERIJALI	3
2.1. Što je kompozitni materijal	3
2.2. Osnovni tipovi kompozitnih materijala.....	4
2.3. Polimerni kompoziti	5
2.4. Vrste smola.....	5
2.4.1. Poliesterska smola	6
2.4.2. Vinilesterska smola	6
2.4.3. Epoksidne smole.....	6
2.5. Vrste vlakana	7
2.5.1. Staklena vlakna.....	10
2.5.2. Aramidna vlakna	10
2.5.3. Ugljična (karbonska) vlakna.....	10
3. TEHNOLOGIJE IZRADE KOMPOZITA	12
3.1. Vrste postupaka izrade laminata u brodogradnji	12
3.2. Ručni dodirni postupak	12
3.3. Postupak vakuumiranja mokrog laminata	14
3.4. Vakuumski infuzijski postupak	16
3.5. Autoklav postupak	19
3.6. RTM postupak.....	19
4. MIKROMEHANIKA KOMPOTIZA	20
4.1. Volumni i maseni udjeli	20
4.2. Reprezentativni volumni element - RVE.....	22
4.3. Modul elastičnosti.....	23
4.4. Proračun modula elastičnosti prema mikromehanici	25
5. PRORAČUN MODULA ELASTIČNOSTI PREMA ISO NORMAMA	28
5.1. Proračun modula elastičnosti prema ISO 12215-5:2008.....	28
5.2. Proračun modula elastičnosti prema ISO 12215-5:2019.....	30
6. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA	33
6.1 Materijali korišteni kod eksperimentalnih ispitivanja.....	33
6.2 Izrada uzoraka.....	35
6.2.1. Izrada uzoraka ručnim dodirnim postupkom.....	35
6.2.2. Izrada uzoraka vakuumiranjem mokrog laminata	37
6.2.3. Izrada uzoraka vakuumskim infuzijskim postupkom	40

6.2.4. Priprema prihvata za kidalicu	43
6.2.5. Rezanje uzoraka.....	44
6.3. Ispitivanje udjela vlakana prema ASTM D 2584 standardu.....	47
6.3.1. Izvođenje eksperimenta	47
6.3.2. Rezultati i diskusija	50
6.4. Ispitivanje vlačne čvrstoće laminata prema ASTM D 3039/D 3039M standardu	55
6.4.1. Izvođenje eksperimenta	55
6.4.2. Rezultati i diskusija	63
7. DISKUSIJA.....	82
8. ZAKLJUČAK.....	89
LITERATURA	90
POPIS SLIKA I TABLICA	91
TABLICA SIMBOLA I INDEKSA	94
SAŽETAK.....	96
SUMMARY.....	97
PRILOZI.....	98

1. UVOD

Poznato je da su se kroz povijest čovječanstva koristili i miješali različiti materijali kako bi se dobio potrební novi materijal s boljim svojstvima. Iako se primjena sendvič konstrukcije spominje već početkom 20. stoljeća, razvoju kompozitnih materijala je najviše pomogao izum i široko prihvaćanje strukturnih ljepila, 1930-ih godina [1]. Kompoziti kakve ih danas poznajemo i koji se koriste u suvremenoj industriji dosežu širu primjenu tek oko Drugog svjetskog rata. U to vrijeme u SAD-u kao projekt američke ratne mornarice, nastaju prva stakloplastična plovila. Tek početkom 1940-ih godina po prvi puta se pojavljuju teoretski radovi na temu kompozitnih materijala [2]. Zbog mehaničkih svojstava koje pružaju, kompozitni materijali uvelike su zamjenili tradicionalne materijale kao što su drvo i metal gdje god je to moguće. Kompozitni materijali se danas svakodnevno koriste u mnogim industrijama pa tako i u velikoj i maloj brodogradnji. Ovi materijali su u brodogradnji doprinijeli mnogim poboljšanjima u odnosu na tradicionalne materijale. Kompozitni materijali su otvorili nova vrata za sve vrste plovila, tako da s različitim vrstama vlakana, orijentacijama vlakana, debljinama slojeva, vrstama smola i omjerima miješanja možemo dobiti najpovoljniji materijal za potrebnu primjenu. Takav kompozit se može izraditi na više tehnoloških metoda, no svaka tehnološka metoda ima svoje prednosti i nedostatke. Kako bi se prikazao utjecaj tehnološke metode izrade na mehaničke osobine kompozitnih materijala, u ovom radu su se odradila dva eksperimentalna ispitivanja. Ta eksperimentalna ispitivanja provela su se na više skupina izrađenih uzoraka kompozitnog materijala iste strukture, ali različite tehnološke metode izrade. Time se želi pokazati koja je tehnološka metoda izradila kompozit s boljima mehaničkim svojstvima materijala. Eksperimenti koje obuhvaća ovaj rad su ispitivanje masenog udjela vlakana i smole u kompozitu i ispitivanje vlačne čvrstoće kompozitnog materijala. U eksperimentu ispitivanja masenog udjela vlakana i smole u kompozitu se metodom uklanjanja smole iz uzoraka utvrdio njen maseni udio u izrađenom kompozitu. Kod eksperimentalnog ispitivanja vlačne čvrstoće kompozitnog materijala druga vrsta uzoraka se na kidalici rastegnula skorz do loma uzoraka u cilju dobivanja raznih mjerenih parametara, odnosno: modula elastičnosti, maksimalnog naprezanja i deformacija uzoraka. Ovaj rad se fokusira na laminatnu konstrukciju tri sloja vlakana povezanih smolom. Materijali koji su se koristili u eksperimentima su ugljična vlakna i epoksidna smola. Svi postupci u ovim eksperimentima su odrađeni prema propisima i pravilima ASTM D 3039/D 3039M (*Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*) [3] i ASTM D 2584 (*Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins*) [4], u kojima su opisani uvjeti provođenja eksperimentalnih ispitivanja. Rezultati dobiveni iz eksperimenata su se usporedili s rezultatima dobivenim iz raznih

proračuna u diskusiji. Proračuni koji su se koristili su proračun putem mikromehanike iz literature [5], proračun prema ISO 12215-5:2008 [6] normi i proračun prema ISO 12215-5:2019 [7] normi. U tim ISO normama se mogu pronaći detaljni opisi raznih proračuna, kao i vrijednosti mehaničkih svojstava od najkorištenijih vlakana i matrica kod kompozitnih materijala.

2. KOMPOZITNI MATERIJALI

2.1. Što je kompozitni materijal

Kompozitni materijal je spoj dvaju ili više materijala kako bi se dobio materijal potrebnih fizikalnih ili kemijskih svojstava. Kompozit se sastoji od matrice i vlakana, (Slika 2.1.).

MATRICA + OJAČANJE (vlakna, čestice) = **KOMPOZIT**



Slika 2.1. Skica kompozitnog materijala [8]

Matrica predstavlja materijal koji povezuje vlakna. Matrica štiti vlakna od vanjskih utjecaja, prenosi opterećenje na vlakna i formira oblik kompozitne konstrukcije. Materijali od kojih se najčešće izrađuje matrica kompozita su metali, keramika ili polimeri. Metali (eng. *Metal Matrix Composite – MMC*) koji se najčešće koriste su legure Aluminijska (Al), Bakra (Cu), Titanij (Ti) i Magnezij (Mg). Keramika (eng. *Ceramic Matrix Composite – CMC*) koja se najčešće koristi je Aluminijski Oksid (Al_2O_3) i Silicijev karbid (SiC). Polimeri (eng. *Polymer Matrix Composite – PMC*) koji se koriste su Poliester, Epoksidi, Vinilester, Poliamid, Polipropilen i Polikarbonat [8].

Vlakna predstavljaju osnovni nosivi element kompozita. Vlakna kompozitu daju čvrstoću ovisnu o orijentaciji samih vlakana. Vlakna se razlikuju prema duljini te se dijele na duga, kratka i visker vlakna. Visker vlakna su slični monokristali vrlo velike čvrstoće promjera do $10\ \mu m$ i duljine do 0.1 m. Materijali koji se koriste za vlakna u kompozitu su najčešće staklo, bor, ugljik, aluminij, silicij, volfram, berilij, polietilen i aramid [8].

2.2. Osnovni tipovi kompozitnih materijala

Postoje razne vrste kompozitnih materijala. Razlikuju se kompoziti s česticama, kompoziti ojačani vlaknima i strukturni kompoziti. Kompoziti ojačani česticama se dijele na kompozite s velikim česticama i disperzijski ojačane kompozite. Vlaknima ojačani kompoziti se dijele na kompozite s kontinuiranim vlaknima i kompozite s diskontinuiranim vlaknima. Kompozit s kontinuiranim vlaknima ima duga vlakna orijentirana u točno određenom smjeru koji ovisi o tkanju. Kompozit s diskontinuiranim vlaknima ima kratka vlakna koja su u praksi najčešće slučajno orijentirana, ali postoje i usmjerena orijentacija. Strukturni kompoziti se dijele na laminate i sendvič konstrukciju. Laminati su slojeviti kompoziti sastavljeni od više slojeva vlakana povezanih odabranom matricom. Sendvič konstrukcija kompozitnog materijala se sastoji od jezgre i sloja vanjskog ojačanja sa svake strane jezgre. Klasifikacija osnovnih tipova kompozitnih materijala prikazana je u *Tablici 2.1.*

Tablica 2.1. Klasifikacija kompozita [9]

Kompoziti						
Česticama ojačani		Vlaknima ojačani			Strukturni	
Velike čestice	Disperzijski ojačani	Kontinuirani (usmjereni)	Diskontinuirani (kratka vlakna)		Laminati	Sendvič
			Usmjereni	Slučajno orijentirani		

U brodogradnji se koriste kompoziti ojačani vlaknima (kontinuirani usmjereni i diskontinuirani slučajno orijentirani) u kombinaciji više slojeva laminata ili „sendvič“ panela. Takve kombinacije kompozitnih materijala su se pokazale najbolje za izradu trupova malih plovniha objekata jer se može izgraditi trup manje mase koji će zadovoljavati sva očekivana opterećenja takvog objekta. Također se od kompozitnih materijala izrađuju i razni poklopci, konzole, klupice i druge stvari koje se nalaze na plovilu, ali ti kompoziti ne moraju imati mehanička svojstva kao kompoziti od kojih se izrađuje trup plovila.

2.3. Polimerni kompoziti

Polimerni kompoziti su materijali koji se sastoje od vlakana kao ojačanja i polimera kao matrice. Promatrana svojstva takvih materijala su temeljna svojstva materijala, čvrstoća, krutost i žilavost, kao i neka specifična svojstva kao npr. međuslojna čvrstoća i sadržaj šupljina. U cilju objektivnog opisivanja svojstava kompozitnih materijala, dobro je i korisno istaknuti neke prednosti i nedostatke tih materijala u usporedbi s drugim konstrukcijskim materijalima. Pod prednosti se mogu smjestiti povoljne vrijednosti specifične čvrstoće i specifične krutosti, mala gustoća, dobra kemijska postojanost polimernih kompozita, dobro prigušivanje vibracija i relativno laka i ne suviše skupa proizvodnja konstrukcijskih dijelova [9]. Nedostatci su nedeformabilnost, moguća raslojavanja i mrvljenja materijala, anizotropnost svojstava, skupe komponente i sl. [9]. Polimerni kompozitni materijali su složeni materijali od barem dvije komponente, a po svojstvima se bitno razlikuju od svojstava osnovnih komponenti. Svakako da će svojstva takvih kompozita ovisiti o njegovom sastavu i građi, dakle prvenstveno o odabranoj polimernoj matrici i ojačanju ali i o tehnološkoj metodi izrade. U današnjoj primjeni konvencionalnih polimernih kompozita prevladavaju duromerne matrice, prvenstveno one poliesterskog, epoksidnog i vinilesterskog tipa. Upravo kod tih duromernih smola moguće su dosta velike razlike u mehaničkim svojstvima s obzirom na kemijski sastav, što svakako utječe na konačna mehanička svojstva kompozita. Tako na primjer različiti tipovi poliesterske matrice uz isto ojačanje mogu prikazati različita svojstva.

2.4. Vrste smola

Smole koje se upotrebljavaju za izradu kompozita u brodogradnji su najčešće poliesterske, epoksidne i vinilesterske smole [9]. Opća je karakteristika ovih smola da se pod utjecajem topline suše u krutu masu. Nakon što se smole osuše, ne mogu se više obnoviti i ponovno upotrijebiti.

Smole koje se koriste za kompozitne materijale moraju posjedovati sljedeća svojstva:

- dobra mehanička svojstva,
- dobra adhezijska svojstva,
- dobru žilavost,
- dobru otpornost na degradaciju.

Dva najvažnija mehanička svojstva smola su vlačna čvrstoća i krutost [9]. Nakon sazrijevanja na sobnoj temperaturi može se uočiti da epoksidna smola ima bolja svojstva, tj. veću vlačnu čvrstoću i veću krutost. Isto tako bolja svojstva epoksidne smole mogu se uočiti i prilikom sazrijevanja na većim temperaturama. Za projektante i graditelje bitno je da znaju koliko će se smola skupiti prilikom sazrijevanja. Kod poliesterske i vinilesterske smole tijekom sazrijevanja dolazi do značajnog skupljanja od 8%, dok je kod epoksidne smole to skupljanje manje izraženo i iznosi oko 2% [9]. Ove vrste smola se koriste već dugi niz godina te su se usavršili omjeri miješanja i potrebni vremenski uvjeti za dobivanje najkvalitetnijeg laminata.

2.4.1. Poliesterska smola

Poliesterske smole su najkorištenije smole u brodogradnji a koriste se za izgradnju brodica, jahti i radnih plovila. Poliesterske smole su nezasićenog tipa što znači da je poliesterska smola duroplast sposoban da iz tekućeg stanja pod pravim uvjetima prijeđe u kruto stanje. Većina poliesterskih smola su viskozne i prozirne tekućine. Ove smole imaju ograničeno vrijeme skladištenja zato što se kroz duži period počinju polimerizirati i pretvarati u krutu masu. Smolama se često dodaju inhibitori da bi se spriječila uranjena polimerizacija, kao i neke dodatne tvari kao što su ubrzivači, katalizatori i aditivi kako bi poboljšali svojstva smole. [9]

2.4.2. Vinilesterska smola

Vinilesterska smola je prema svojoj molekularnoj strukturi vrlo slična poliesterskoj smoli ali se primarno razlikuje u smještaju reaktivnih djelova koji su smješteni na krajevima lanca. Budući da cijela dužina lanca može na sebe primiti naprezanje, to svojstvo čini je otpornijom na naprezanje od poliesterske smole. Vinilesterske molekule isto tako povezuju dvije esterske grupe koje su podložnije degradaciji vode kod hidrolize, što znači da vinilester ima slabu moć upijanja vode za razliku od poliestera. [9]

2.4.3. Epoksidne smole

Epoksidne smole pružaju najbolje mehaničke osobine koje su dostupne kod odabira smola. Ove smole pružaju izuzetnu otpornost na utjecaje okoliša. Laminati kod kojih se koristi epoksidna smola imaju izuzetna adhezijska svojstva i otpornost na degradaciju uslijed utjecaja vode na njih zbog čega se i koriste u brodogradnji. Epoksidne smole formiraju se iz dugačkih lanaca molekula strukture slične vinilesterima s reakcijom na mjestima na krajevima lanca, samo što se kod epoksidnih smola ovi reakcijski dijelovi formirani iz epoksidnih, a ne iz esterskih grupa. To znači da nedostatak esterskih

grupa čini epoksidne smole izuzetno otporne na vodu. Epoksidne molekule u sebi sadržavaju dvije prstenaste strukture u središtu molekule i zbog toga su sposobne na sebe primiti velika mehanička i toplinska naprezanja. [9]

2.5. Vrste vlakana

Već je poznato da je uloga ojačanja u kompozitnim materijalima povećanje mehaničkih svojstava same smole, što uzrokuje dobivanje kompozita boljih mehaničkih svojstava. Različita vlakna imaju različita svojstva, pa slično i kompoziti imaju različita svojstva ovisno o vlaknima koja se u njima nalaze. Mehanička svojstva vlakana su znatno viša nego kod smola, zato kompozitni materijali sačinjeni od vlakana i smole posjeduju dobra mehanička svojstva zbog vlakana koja se nalaze u njima.

Četiri osnovna mehanička svojstva vlakana u kompozitu su:

- **količina vlakana u kompozitu,**
- **orijentacija vlakana u kompozitu,**
- površinska interakcija vlakana i smole,
- mehanička svojstva zasebnih vlakana.

U ovom radu je fokus na masenom i volumnom udjelu vlakana u kompozitu i orijentaciji vlakana. Udio vlakana u kompozitu ovisi o postupku izrade kompozita. Pošto vlakna prenose naprezanja po dužini, orijentacijom vlakana utječe se na smjer opterećenja kompozita. Površinska interakcija vlakana i smole ovisi o stupnju povezivanja koji postoji između njih. Promjer vlakana je važan čimbenik jer skuplja vlakna manjeg promjera imaju veću površinu za prenošenje naprezanja. Općenito se tvrdoća i čvrstoća laminata povećava s količinom vlakana u laminatu. Što se tiče vrsta vlakana razlikuju se staklena, ugljična (karbonska) i aramidna vlakna. Također postoje i razne vrste tkanja tih vlakana. Vrste tkanja se dijele na pust, pređu, hasuru i sukno [10]. Svaka od ovih vrsta tkanja ima svoje mjesto primjene. Neke vrste tkanja se ne izrađuju od aramidnih ili ugljičnih vlakana, pošto bi vlakna u takvoj vrsti tkanja izgubila svoja prvobitna svojstva.

Pust (eng. *mat*) čine niti dužine oko 5 cm koje su nasumice raspoređene po površini u svim smjerovima, (Slika 2.2.). Te niti su povezane ljepilom na osnovi sintetskih smola. Zbog raspršenosti vlakana pust se odlikuje jednakom čvrstoćom u svim smjerovima. Prednosti pusta su također i dobra međulaminatna povezanost zbog dobre međusobne povezanosti niti susjednih slojeva, te niska cijena. Neki od nedostataka su debljina laminata jer se ne može kontrolirati količina vlakana točno na svim mjestima, kao i količina niti zbog pomicanja tijekom nanošenja smole. Slojevi pusta najčešće variraju u debljini radi neravnomjerno raspoređenih vlakana. [10]



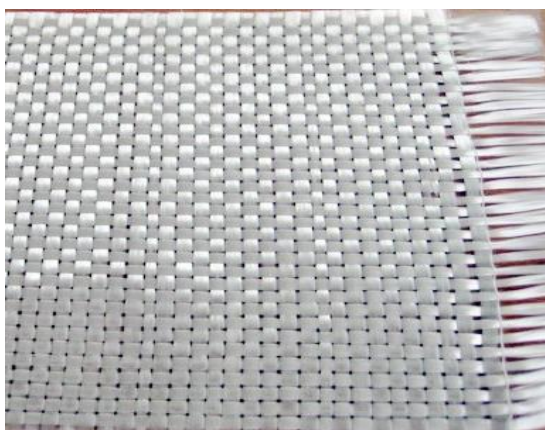
Slika 2.2. Primjer tkanja pust [10]

Preda (eng. *roving*) se izrađuje iz neprekinutih tankih niti formiranih u pletenice s izgledom slabo odsukanog konopa, (Slika 2.3.). Ova vrsta tkanja se koristi za izradu vrlo grubih proizvoda. Također pređa predstavlja najjaču armaturu, ali njena čvrstoća ide samo u smjeru kojim prolaze niti u pletivu. Niti u pletivu su najčešće okomite orijentacije $0^{\circ}/90^{\circ}$ ili $\pm 45^{\circ}$. [10]



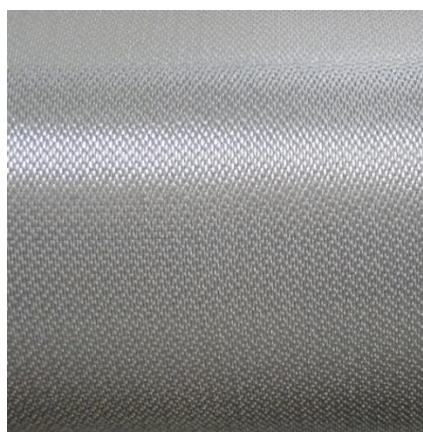
Slika 2.3. Primjer tkanja pređa [10]

Hasura (eng. *woven roving*) je tkanina koja se dobiva tkanjem niti pređe, i s obzirom na to dijeli se na jednosmjerno tkanu hasuru i običnu hasuru. Osnovu tkanja čine debeli paralelni snopovi pređe koji su isprepleteni i povezani tanjim snopovima, dok obična hasura predstavlja četvrtasto tkani materijal od gustih snopova pređe širine 3 mm do 6 mm u uzdužnom i poprečnom smjeru, (*Slika 2.4.*). Prednosti ove tkanine su lako oblaganje kalupa, lako rukovanje kod ručnog dodirnog postupka, veći sadržaj vlakana u laminatu te njegovala bolja otpornost na udar. Kao nedostatak se smatra teže impregniranje smolom jer zaostaju mjehurići zraka čime se dobiva porozan laminat, kao i usmjerenje čvrstoće u samo dva međusobno okomita smjera zbog načina pletenja. [10]



Slika 2.4. Primjer tkanja hasura [10]

Sukna (eng. *cloth*) se dobiva tkanjem isprepletenih niti vlakana. S obzirom na vrstu tkanja dijele se na tkanje u obliku kvadratića, tkanja s jednosmjernim nitima i keper tkanje. Zbog svog finog tkanja najčešće se koristi kod izrade završnih slojeva, kako bi se dobio ljepši i čvršći završni sloj. Laminati od sukna odlikuju se većim udjelom vlakana, ravnomjernom debljinom sloja, te dobrim mehaničkim svojstvima, (*Slika 2.5.*). Ova vrsta tkanja je jedna od najskupljih armatura. [10]



Slika 2.5. Primjer tkanja sukno [10]

2.5.1. Staklena vlakna

Prilikom miješanja smrvljenih komada pjeska, kaolina, vapnenca i kolemanita na temperaturi od 1600°C formira se tekuće staklo. Tekućina prolazi kroz mikro tuljčice i istovremeno ohlađena prelazi u tanke staklene niti promjera od 5 do 24 µm. Niti se povezuju zajedno u kompaktnu ili labaviju strukturu nakon čega se zaštite od abrazije. Variranjem sastava sirovina mogu se dobiti različiti tipovi staklenih ojačanja. Prva spomenuta vrsta staklenog ojačanja je E-staklo (eng. *electrical*) koje ima dobru vlačnu i tlačnu čvrstoću, krutost, dobra električna svojstva i relativno nisku cijenu. Nedostatak je to što ovo stakleno ojačanje ima lošija svojstva na udarna opterećenja. Zatim C-staklo (eng. *chemical*) ima bolju otpornost na kemikalije, pa se koristi kod laminata koji dolaze u doticaj s kemikalijama. R, S ili T-staklo je staklo različitih tvorničkih oznaka i naziva, ali popularno je zbog veće vlačne čvrstoće i modula elastičnosti od E-stakla. Također ima veću interlaminarnu čvrstoću koja se postiže manjim promjerima niti vlakana. U brodogradnji se isključivo koristi E-staklo zbog pristupačnosti i omjera cijene i kvalitete. Postoji više vrsta tkanja staklenih vlakana što ovisi o mjestu primjene i željenim mehaničkim svojstvima. Staklena vlakna se mogu tkati u pust, pređu, hasuru i sukno. Ova tkanja se razlikuju po gramaturi vlakana na kvadratni metar (100, 225, 300, 450, 600 g/m², i drugi), i prema vrsti veziva niti. [9]

2.5.2. Aramidna vlakna

Ova vlakna su dobivena iz organskog polimera (aromatski poliamid) postupkom izvlačenja vlakana iz tekuće mješavine. Vlakna imaju veliku čvrstoću i malu gustoću. Sve vrste aramida posjeduju veliku otpornost na udarna opterećenja, što znači da se često koristi u vojnoj industriji kod izrade opreme otporne na udare. Tlačna čvrstoća mu je približno ista kao i E-staklu. Ostala mehanička svojstva aramida su jako dobra i pruža dobru otpornost na trošenje, toplinsku i kemijsku degradaciju. Trgovački naziv aramida je najčešće Kevlar tvrtke Dupont koja ga je prva proizvela. Najčešći oblik tkanja aramidnih vlakana je hasura. Aramid je također poznat po svojoj svijetlo žutoj boji vlakana. [9]

2.5.3. Ugljična (karbonska) vlakna

Ugljična vlakna se dobivaju kontroliranom oksidacijom, karbonizacijom i grafitizacijom organskih tvari koje već imaju oblik vlakana. Najčešći materijal koji se koristi za dobivanje

karbonskih vlakana je poliakrilonitril (PAN) zbog kvalitete vlakana, a vlakna se mogu proizvesti i od celuloze. Variranjem temperature grafitizacije dobivaju se vlakna velike čvrstoće ili velikog modula elastičnosti uz različite podvrste. Površinu formiranog vlakna potrebno je tretirati različitim spojevima kako bi se poboljšalo vezivanje sa smolom i zaštitilo ga tijekom rukovanja kod izrade laminata. Ugljična vlakna su se počela proizvoditi početkom šezdesetih godina prošlog stoljeća. Tokom godina se povećala proizvodnja što je uzrokovalo pad cijene. Ugljična vlakna se grupiraju prema svojstvima *high strenght* (HS), *intermediate modulus* (IM), *high modulus* (HM) i *ultra high modulus* (UHM). Promjer vlakana iznosi oko 6 μm , te imaju najveću specifičnu tvrdoću od bilo kojih drugih vlakana dostupnih na tržištu. Također imaju i otpornost na koroziju, puzanje i zamor materijala. Nedostatak je što ova vlakna imaju malu otpornost na udarce i izrazito su krhka. Mogu biti tkana u mnogo oblika, a najčešće su tkana u hasuru radi lijepog izgleda završnog sloja. [9]

3. TEHNOLOGIJE IZRADE KOMPOZITA

3.1. Vrste postupaka izrade laminata u brodogradnji

Kroz godine iskustva s kompozitnim materijalima, usavršile su se tehnike laminiranja i proizvodnje laminata. Raznim kombinacijama od odabira vrste vlakana, orijentacije vlakana, broja slojeva i sl., sve do omjera mješanja komponenata raznih vrsta smola, pa do vrste postupka izrade, došlo se do optimalnih rezultata za svaki željeni oblik izrađen od kompozitnog materijala.

Najčešće se koriste sljedeći postupci izrade lamianta:

- **Ručni dodirni postupak** (eng. *Hand Lay-up, Hand Lamination*)
- **Vakuumiranje mokrog laminata** (eng. *Vacuum Bagging Process*)
- **Vakuumski infuzijski postupak** (eng. *Vacuum Infusion Process*)
- Autoklav postupak (eng. *Autoclave Moulding*)
- RTM postupak (eng. *Resin Transfer Moulding*)

Svaki od ovih pet spomenutih postupaka ima svoje prednosti i nedostatke, a odabir postupka izrade ovisi o nekoliko faktora. Ti faktori mogu biti veličina dijela kojeg se treba izraditi, zahtjevana masa, zahtjevana debljina, zahtjevano mehaničke osobine, broj radnika, vremenski uvjeti (temperatura u prostoru, vlažnost zraka), mjesto izrade i dr. Radi ovih faktora se u brodogradnji većinom koriste prva tri navedena postupka. Jedna od najbitnijih razlika između ručnog dodirnog postupka, vakuumiranja mokrog laminata i vakuumske infuzije je razlika u krajnjem omjeru vlakana i smole u laminatu. Svaki od navedenih postupaka ima svoju proceduru, alate i materijale kojima se treba koristiti za uspješnu izradu.

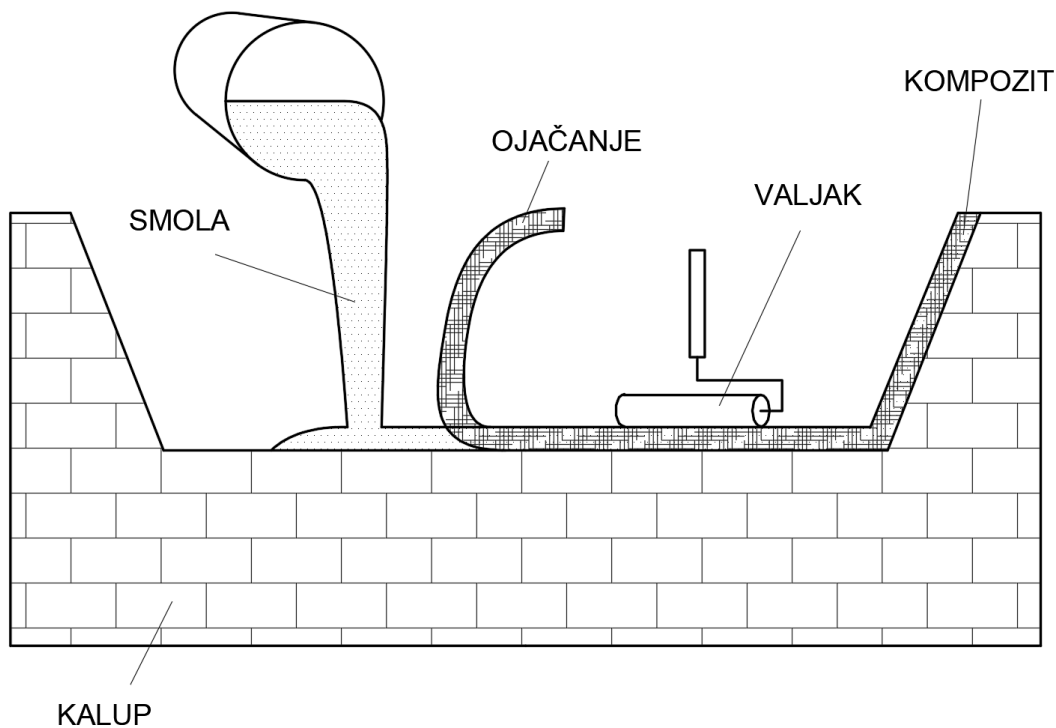
3.2. Ručni dodirni postupak

Ručni dodirni postupak (eng. *Hand Lay-up, Hand Lamination*) je najstarija tehnološka metoda izrade stakloplastičnih laminata, (*Slika 3.1.*). Također je ovaj postupak najjednostavniji i najjeftiniji od ranije navedenih postupaka, te je zbog dobrog odnosa cijene proizvodnje i kvalitete finalnog proizvoda i dalje u širokoj primjeni u brodogradnji. Ručni dodirni postupak se izvodi pomoću jednostavnih alata tipa: razni valjci, kistovi, kante i posude, špatule i lopatice, škare, noževi i dr. Za

nanošenje smole koriste se često valjci, kistovi i četke. Da se alat ne bi uništio trebalo bi ga se očistiti svaki put nakon korištenja raznim razrjeđivačima ili acetonom.

Redosljed klasičnog ručnog dodirnog postupka je sljedeći:

1. postavljanje ojačanja u kalup
2. nanošenje smole kistom ili valjkom
3. utiskivanje ojačanja u smolu i istiskivanje viška smole valjcima
4. postavljanje slijedećeg sloja ojačanja
5. ponovno nanošenje smole i utiskivanje (ovisno o broju željenih slojeva)



Slika 3.1. Skica ručnog dodirnog postupka

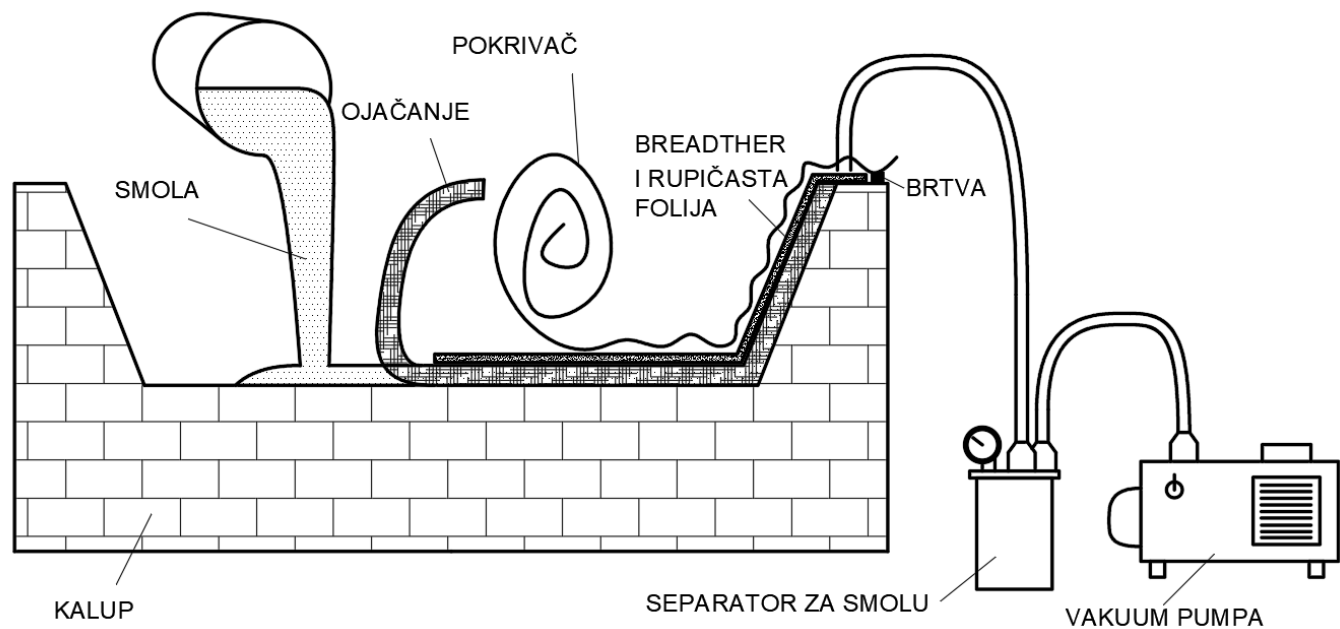
Ovaj postupak izrade kompozitnih materijala je najjednostavniji, ali ljudski faktor igra veliku ulogu pošto se smola nanosi ručno. Točna količina smole se može nanjeti ako se ima iskustva u izradi i ukoliko se zna količina vlakana od kojih će se izrađivati laminat. U izradi laminata ovim postupkom se često dešava da se omjer točno ne odredi, te da laminat bude ili presuh ili previše namočen smolom. Takav slučaj rezultira slabijim mehaničkim svojstvima kompozita zbog slabog prijanjanja vlakana i smole kao i spojevima između slojeva. Također rezultat ovog finalnog proizvoda će imati nešto veću

masu radi većeg udjela smole u laminatu, za razliku od drugih postupaka izrade. Treba paziti i kod razvijene topline koja se javlja kemijskom reakcijom smole u periodu otvrdnjivanja.

Brzina otvrdnjivanja smole je od velikog značaja zato što količina smole koja je višak na nekim mjestima može uzrokovati područja veće debljine laminata. Kod ručnog nanošenja treba osigurati opremu za sigurnost od para, te pokušati maksimalno zaštititi radnu okolinu. Kvaliteta završnog proizvoda ovisi o ljudskom faktoru, dok su troškovi izrade i potrebnog materijala minimalni. Ovisno o veličini željenog komada, ovaj postupak je dosta brz ukoliko se ima dovoljan broj radnika. Općenito je ručni dodirni postupak i dalje u korištenju kao tehnološka metoda izrade kompozitnih laminata radi toga jer nije potrebno puno materijala i alata za izradu. Relativno brzo, s ne puno znanja i vještine, može se dobiti dobar finalni proizvod, odnosno željeni laminat od kompozitnog materijala dobre kvalitete.

3.3. Postupak vakuumiranja mokrog laminata

Vakuumiranje mokrog laminata (eng. *Vacuum Bagging Process*) je tehnološka metoda izrade stakloplastičnih laminata koja se pokazala bolja od ručnog dodirnog postupka laminiranja. Ova metoda je uspjela riješiti problem prevelikog udjela smole u laminatu tako da se dodala pumpa i pokrivač, pri čemu se višak smole odvlači od laminata, (*Slika 3.2.*). Ovom metodom se uvelike doprinosi boljem i točnijem omjeru smole i ojačanja što rezultira čvršćim i lakšim završnim proizvodom. Isto tako se smanjuje vjerojatnost stvaranja nepoželjnih mjehurića zraka koji inače nastaju pri ručnoj laminaciji u otvorenom kalupu [9]. Vakuumiranje mokrog laminata neosporno donosi prednosti nad ručnim dodirnim postupkom, ali ipak uključuje ručno nanošenje smole prije vakuumiranja laminata. Zbog ručnog nanošenja smole prije vakuumiranja, udio smole je često prevelik i teško je točno odrediti količinu smole koja se izvlači iz laminata. Količina smole ovisi o brojnim faktorima kao što je vrsta ojačanja, vrsta smole, vremenski uvjeti itd. U finalnom proizvodu najčešće ipak ostane preveliki udio smole, ali znatno manje nego kod proizvoda koji je izrađen ručnim dodirnim postupkom. Za ovaj postupak izrade potrebno je više alata i materijala kao što su pokrivač, brtvena traka, cijevi odvoda smole, separator i pumpa, što povećava cijenu izrade za razliku od ručnog dodirnog postupka. Redoslijed izrade je vrlo bitan faktor kako bi se uspio dobiti proizvod dobre kvalitete.



Slika 3.2. Skica postupka vakuumiranja mokrog laminata

Redoslijed postupka vakuumiranja mokrog laminata je sljedeći:

1. postavljanje ojačanja u kalup
2. nanošenje smole na ojačanje
3. ponoviti postupak u slučaju više slojeva laminata
4. postavljanje rupičaste folije na mokri laminat
5. postavljanje tkanine za upijanje viška smole (eng. *breadther*)
6. postavljanje cijevi za odvod viška smole u separator
7. postavljanje brtvenog materijala na rubove kalupa
8. postavljanje pokrivača i brtvljenje pokrivača
9. paljenje pumpe i provjeravanje vakuuma
10. nadgledanje odvijanja procesa

Iz redoslijeda izrade vidi se da je ovaj postupak puno složeniji od ručnog dodirnog postupka. Rupičasta folija služi kako bi se preko nje upio višak smole u tkaninu za upijanje viška smole. Ukoliko se ta rupičasta folija ne bi postavila, tkanina za upijanje viška smole koja se nalazi na zadnjem sloju laminata bi se zalijepila za laminat. Tkanina za upijanje viška smole (eng. *breadther*) je materijal od filca koji služi za upijanje viška smole kod ovog postupka. Pokrivač koji se postavlja na mokri laminat je ustvari plastična vreća koja spriječava ulazak zraka u sami laminat tokom vakuumiranja. Brtva je

dvostrana rastezljiva guma koja se lijepi za pokrivač i kalup te brtvi pokrivač tokom procesa vakuumiranja. Separator služi kako bi višak smole koji kroz odvodnu cijev izađe iz laminata ne bi ušao u sustav vakuuma pumpe. Često se postavljaju razni ventili na cijevi između laminata i separatora, i separatora i pumpe, kako bi se u slučaju postignutog apsolutnog vakuuma zatvorili i držali vakuum u sustavu. Razvijene topline nema pošto je sve u zatvorenom sustavu, a višak smole upija tkanina za upijanje. Isto kao i kod ručnog dodirnog postupka ljudski faktor ima značajnu ulogu u količini primijenjene smole. Kod postavljanja pokrivača mogu se dogoditi manja mjesta propuštanja, ali ukoliko dođe do njih lako ih se sanira. Također brzina otvrdnjavanja smole je od velikog značaja, a ovisi o tome kad je primijenjen vakuum i kolika je količina istisnute smole koja je višak.

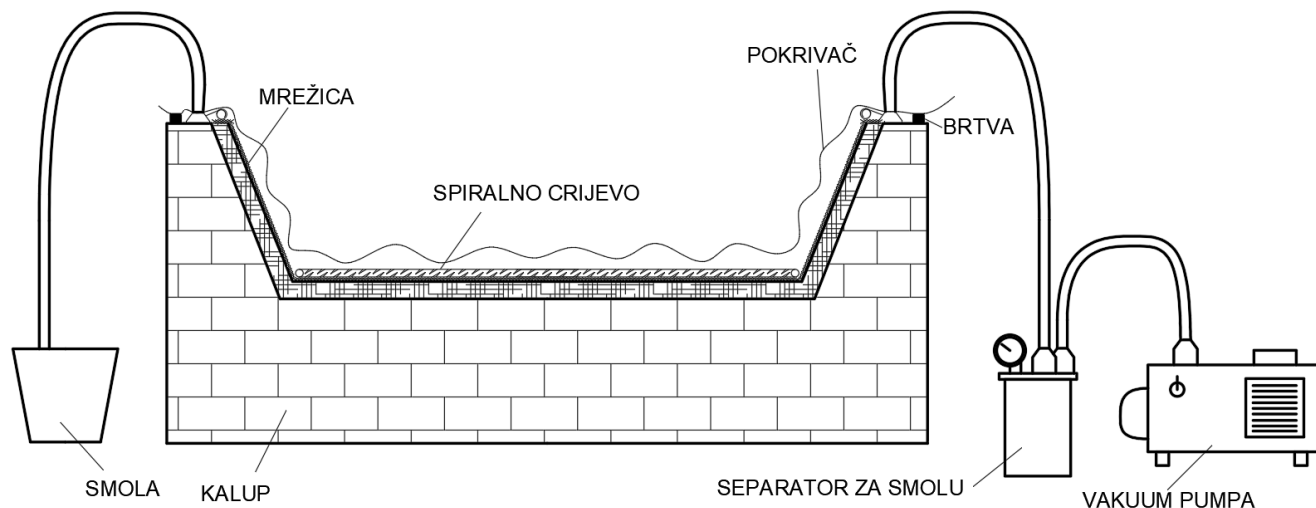
Potrebno je dobro rukovati s materijalima i poznavati redoslijed i postupak izrade ovom metodom. Proizvode većih dimenzija moguće je izraditi jedino uz pomoć većeg broja radnika. Potrebno je više vremena za primjenu vakuuma nakon ručnog nanošenja smole, te nakon započetog laminiranja nema mogućnosti zaustavljanja procesa. Manji je udio smole u laminatu nego li kod ručnog dodirnog postupka, te su slojevi u laminatu bolje povezani što daje bolja mehanička svojstva za isto ojačanje napravljeno ručnom laminacijom. [10]

3.4. Vakuumski infuzijski postupak

Vakuumski infuzijski postupak (eng. *Vacuum Infusion Process*) je tehnološka metoda izrade stakloplastičnih laminata u kojoj se koristi vakuum kako bi se dovela smola do laminata. Laminat je suho posložen u kalup i nakon što se uključi vakuumska pumpa, stvori se podtlak pomoću kojeg se smola dovodi do laminata, (*Slika 3.3.*). Vakuumska infuzija je naprednija metoda izrade lamianta zato što koristi sve prednosti vakuumiranja mokrog laminata uz dodatak da se vakuum koristi i za dovođenje smole što omogućuje jednoliko nanošenje smole u laminat [10].

Ova metoda donosi neke prednosti nad ostalim metodama, a to su:

- bolji omjer smole i ojačanja,
- jednoliko nanošenje smole po laminatu,
- neograničeno vrijeme slaganja ojačanja
- ekološki prihvatljiva metoda zbog zatvorenog sistema



Slika 3.3. Skica postupaka vakuumske infuzije

Pošto se pomoću vakuuma u ovoj metodi dovodi smola do laminata, na taj način u laminat dođe točno onoliko smole koliko je potrebno slojevima vlakana da se međusobno povežu. Time se u laminat nanese točna potrebna količina smole što kasnije rezultira smanjenjem mase i povećanjem čvrstoće konstrukcije kao i boljom međuslojnom povezanosti laminata. Zahvaljujući vakuumskoj infuziji lako se može regulirati količina dovedene smole što poboljšava finalni proizvod za razliku od ostalih metoda u kojima je uključen ljudski faktor. Infuzija pruža mogućnost neograničenog vremena slaganja slojeva ojačanja, a sve eventualne greške mogu se lako ukloniti sve dok se laminat ne pokrije, zabrtvi i otvori ventil za dovod smole. Ujedno je ova metoda i ekološki prihvatljiva pošto se smola ne nanosi kistovima i valjcima nego je sve u zatvorenom sustavu. Jedan od nedostataka ove metode je potreba za složenom pripremom svog potrebnog materijala za uspješno laminiranje. Iako nema vremenskog ograničenja slaganja laminata, bitno je imati iskustva i odraditi sve dijelove ranije navedene pripreme. Vakuumiranje mokrog laminata zahtijeva postavljanje samo odvoda smole, dok je kod infuzije potrebno postavljanje i odvoda i dovoda smole, te spiralne cijevi za distribuciju smole unutar pokrivača. Najbitniji dio postupka je raspored spiralnih cijevi jer je potrebno omogućiti dolazak smole po čitavoj površini laminata. Nakon što se infuzija započne mogućnosti ispravljanja su minimalne [10].

Redosljed postupka vakuumske infuzije je sljedeći:

1. postavljanje laminata prema planu u kalup ili model,
2. postavljanje mrežice za poboljšanje protoka smole na laminat,
3. postavljanje spiralnih cijevi za distribuciju smole unutar pokrivača,
4. postavljanje cijevi za odvod i dovod smole,
5. postavljanje pokrivača i brtvljenje sustava,
6. postavljanje ventila na cijevima dovoda za regulaciju dovoda smole,
7. paljenje pumpe i provjera podtlaka,
8. otvaranje ventila i doziranje dovoda smole,
9. nadgledanje sustava.

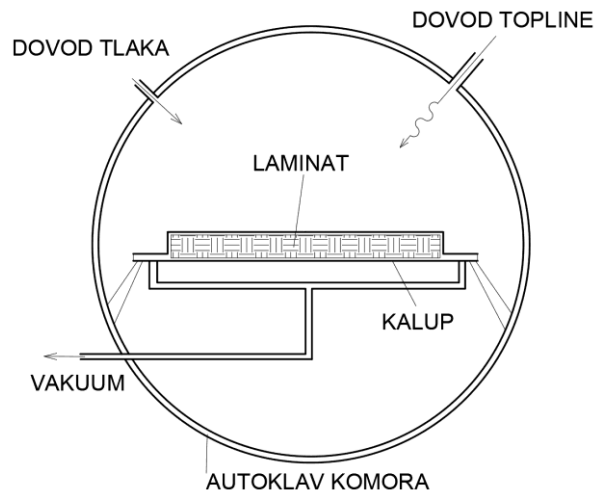
U ovoj metodi je lako baratati materijalima te je kvaliteta završnog proizvoda jako visoka. Nema zadebljanja na nekim mjestima radi viška smole. Veće konstrukcije se mogu izraditi bez ikakvih ograničenja, jedino se treba paziti na više dovoda smole i dobavnu visinu pumpe. Troškovi ove metode su veći nego li kod ostalih metoda zbog dodatnog sustava dovoda smole i složenijeg razvoda cijevi i dodatne opreme. Ova metoda je najkompleksnija od ranije navedenih te se uz dobru pripremu dobiva daleko kvalitetniji završni proizvod. Vakuumski infuzijski postupak se često koristi kod izrade malih sportskih plovila gdje debljina i masa trupa izrađenog od laminata imaju direktan utjecaj na preformanse plovila, (Slika 3.4).



Slika 3.4. Trup sportskog plovila od ugljičnih vlakana napravljen postupkom vakuumske infuzije

3.5. Autoklav postupak

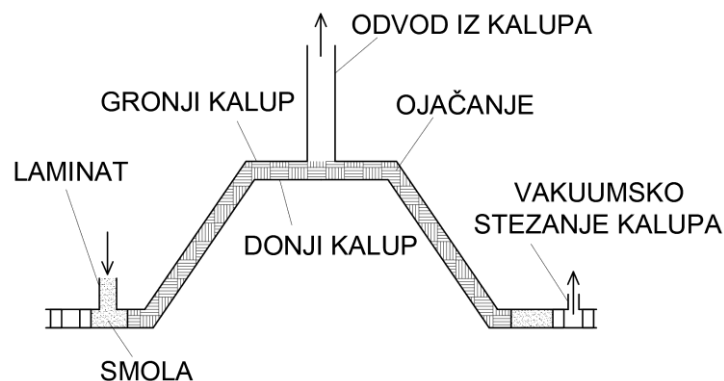
Autoklav postupak je postupak izrade laminata u zatvorenoj komori koja se kontroliranim tlakom i temperaturom zagrijava suši laminat u pripremljenom kalupu, (Slika 3.5.). Laminat koji se izradi autoklav postupkom je kvalitetan, ali je problem kod laminata većih dimenzija jer veličinu laminata diktira veličina komore. [1]



Slika 3.5. Shema autoklav postupka

3.6. RTM postupak

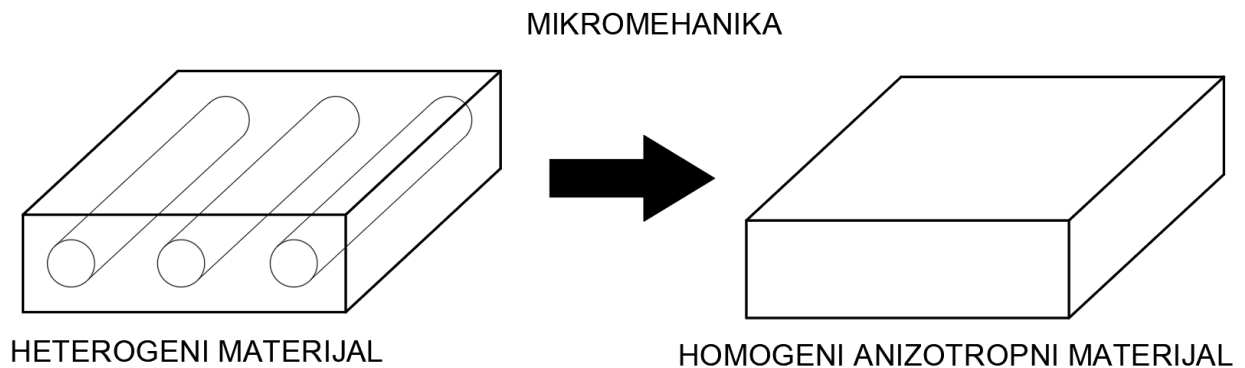
RTM (eng. *Resin Transfer Moulding*) postupak je postupak u kojem se suha vlakna postavljaju u kalup u otvorenom položaju, (Slika 3.6.). Nakon zatvaranja kalupa smola se ubrizgava u šupljinu kalupa. Smola teče iz kanala za ubrizgavanje kroz suha postavljena vlakna do izlaznog kanala pomoću podtlaka i/ili ubrizgavanjem. S ovim postupkom se mogu izraditi lamianti koji zahtjevaju nisku toleranciju i glatki završni sloj s obje strane laminata. Radi visokog tlaka ubrizgavanja kalupi moraju biti kruti što rezultira većim troškovima ulaganja. Zato se ova metoda koristi samo za masovnu proizvodnju istih dijelova. [1]



Slika 3.6. Shema RTM postupka [1]

4. MIKROMEHANIKA KOMPOTIZA

Mikromehanika kompozita je proučavanje kompozitnih materijala uzimajući u obzir međudjelovanje sastavnih materijala. Heterogeni materijal ima različita mehanička svojstva od točke do točke. Suprotno, homogeni materijal je onaj čija su mehanička svojstva ista u svim točkama. Izotropni materijal ima ista mehanička svojstva u bilo kojem smjeru. Anizotropni materijal ima različita mehanička svojstva ovisno o smjeru. Ortotropni materijal ima različita mehanička svojstva u svakom smjeru i imaju tri osi simetrije. Mikromehanika predstavlja heterogeni materijal kao ekvivalentan homogeni anizotropni materijal, (Slika 4.1.). Anizotropni materijali mogu biti homogeni, ali im mehanička svojstva variraju u odnosu na orijentaciju mjerenja svojstva. Mikromehanika se može koristiti za predviđanje krutosti i čvrstoće kompozitnog materijala. [5]



Slika 4.1. Mikromehanika shema [5]

Kod kompozitnih materijala su jako bitni udjeli vlakana i matrice u samom materijalu. Ti udjeli, uz svojstva vlakana i matrice, direktno utječu na mehanička svojstva kompozitnog materijala. Tehnološka metoda izrade kompozita direktno utječe na ove udjele što može dovesti do boljih ili lošijih mehaničkih svojstava krajnjeg materijala.

4.1. Volumni i maseni udjeli

Svojstva kompozitnog materijala se kontroliraju volumenom vlakana i matrice. Volumni udio vlakana V_f , u kompozitu se prikazuje sljedećom formulom:

$$V_f = \frac{\text{volumen vlakana}}{\text{ukupni volumen}} \quad (4.1)$$

Isto tako se može prikazati i volumni udio matrice V_m u kompozitu formulom:

$$V_m = \frac{\text{volumen matrice}}{\text{ukupni volumen}} \quad (4.2)$$

Zbroj volumnog udjela vlakana i volumnog udjela matrice je:

$$V_f + V_m = 1 \quad (4.3)$$

Također se udjeli vlakana i matrice u kompozitu mogu prikazati pomoću masenih udjela. Maseni udio vlakana W_f , se prikazuje formulom:

$$W_f = \frac{\text{masa vlakana}}{\text{ukupna masa}} \quad (4.4)$$

Maseni udio matrice W_m , se prikazuje formulom:

$$W_m = \frac{\text{masa matrice}}{\text{ukupna masa}} \quad (4.5)$$

Kao i kod volumnih udjela, isto tako je i zbroj masenih udjela vlakana i matrice u kompozitu jednak:

$$W_f + W_m = 1 \quad (4.6)$$

Masa bilo kojeg materijala je jedanaka umnošku gustoće i volumena, što znači da se gustoća kompozitnog materijala ρ_c , može prikazati sljedećom formulom:

$$\rho_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m \quad (4.7)$$

Volumen bilo kojeg materijala se može izraziti dijeljenjem mase i gustoće materijala. Prema tome se gustoća kompozita može prikazati kao sljedeća formula:

$$\frac{1}{\rho_c} = \frac{W_f}{\rho_f} + \frac{W_m}{\rho_m} \quad (4.8)$$

Kod proračuna čvrstoće se koriste volumni udjeli prikazani u formulama, dok se kod izrade kompozitnih materijala koriste maseni udjeli zato što je mnogo lakše izvagati masu komponenata nego volumene komponenata.

Ukoliko je poznata gustoća kompozita, maseni udio i volumni udio vlakana i matrice se mogu povezati sljedećim formulama:

$$W_f = \frac{\rho_f}{\rho_c} V_f \quad (4.9)$$

$$W_m = \frac{\rho_m}{\rho_c} V_m$$

Masa vlakana se može izmjeriti vaganjem uzoraka, nakon čega bi se trebala ukloniti matrica iz kompozita i ponoviti postupak vaganja samih vlakana bez matrice. Matrica, odnosno smola, iz kompozita se može ukloniti izgaranjem uzoraka u pećici. Time će se dobiti čista vlakna i njihova masa sadržana u uzorku. Razlika u masi uzorka prije i poslije izgaranja smole prikazuje masu smole sadržanu u laminatu. Ukoliko su poznati podaci o vlaknima, moguće je odrediti volumni udio V_f preko sljedeće formule:

$$V_f = \frac{\eta \text{ TEX}}{10000 \rho_f t_c} \quad , \quad (4.10)$$

gdje je:

η – broj snopova po cm

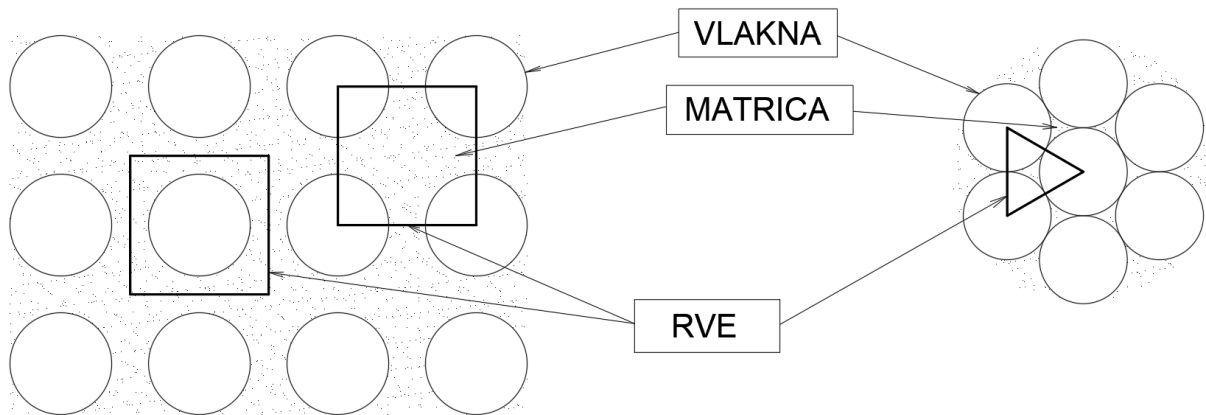
TEX – masa snopa po km [g/km]

t_c – debljina kompozita [mm]

4.2. Reprezentativni volumni element - RVE

Vrijednost volumnog udjela vlakana V_f može varirati ovisno o tehnološkoj metodi izrade kompozita. Testiranje mehaničkih svojstava svih mogućih kombinacija kompozitnih materijala gotovo je nemoguća, stoga važnost mikromehanike postaje očigledna. Mikromehanika se koristi za predviđanje svojstava kompozitnog materijala na temelju testiranih i poznatih svojstava sastavnih dijelova kompozita, vlakana i matrice. Mikromehanika također analizira materijal uzimajući u obzir sva poznata svojstva matrice, vlakana i geometriju mikrostrukture. Kako bi se izbjeglo razmatranje svih vlakana uključenih u kompozit tijekom proračuna, mikromehanika koristi koncept

reprezentativnog volumnog elementa (eng. *RVE – Representative Volume Element*). RVE je najmanji dio materijala koji sadrži sva svojstva cjelokupnog promatranog materijala, (Slika 4.2.). [5]



Slika 4.2. Prikaz RVE u kompozitu [5]

Naprezanja i deformacije koje se javljaju u kompozitu nisu ujednačena sa stvarnim ukoliko se koristi RVE zato što je kompozit heterogeni materijal. To znači da su mu mehanička svojstva različita od točke do točke. Međutim, volumen koji zauzima RVE može se zamijeniti ekvivalentnim homogenim materijalom bez utjecaja na stanje naprezanja oko RVE. To znači da se stanje naprezanja u ostatku strukture neće promijeniti sve dok se promatra mjerilo veće od dimenzija RVE. Tipične RVE dimenzije su razmak između vlakana i debljina laminata. [5]

4.3. Modul elastičnosti

Youngov modul ili modul elastičnosti E je mjera krutosti materijala i jednak je omjeru vlačnog naprezanja i linijske vlačne deformacije. Ovaj modul služi da se izračuna produljenje ili suženje odabranog materijala koji je pod utjecajem neke vanjske sile [5]. Modul elastičnosti je opisan u Hookeovom zakonu gdje prikazuje linearnu ovisnost između naprezanja i deformacije [11]. Ovisnost $\sigma - \varepsilon$ može se izraziti oblikom:

$$\sigma = E \varepsilon. \quad (4.11)$$

σ – normalno naprezanje, Pa ili N/mm²

E – modul elastičnosti, Pa ili N/mm²

ε – duljinska deformacija

To je temeljni zakon u nauci o čvrstoći. Budući da je prema Hookeovu zakonu naprezanje razmjerno deformaciji, modul elastičnosti E , glasi:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \text{const.} = \tan \alpha \quad (4.12)$$

α – kut nagiba pravca, °

Modul elastičnosti E označuje koeficijent nagiba pravca u linearnom dijelu dijagrama $\sigma - \varepsilon$. Modul elastičnosti također predstavlja normalno naprezanje koje bi izazvalo produljenje štapa jednako njegovoj početnoj duljini. Isto tako modul elastičnosti u smjeru vlakana se može vrlo dobro predvidjeti pravilom miješanja, formula (4.21). Glavna pretpostavka u tom pravilu je ta da su deformacije u smjeru vlakana iste u matrici i vlaknima. To znači da je veza između vlakana i matrice savršena. Kada se materijal rasteže duž smjera vlakana, i matrica i vlakna će se jednako produljiti. Ova pretpostavka je bitna kako bi se heterogeni materijal u RVE mogao zamijeniti homogenim uz zadovoljavanje svih nastalih pomaka u materijalu. [5,11]

Prema definiciji produljenja:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta L}{L} \quad (4.13)$$

ΔL – produljenje materijala, mm

L – duljina uzorka, mm

Pošto su i matrica i vlakna izotropna i elastična, njihova ovisnost naprezanja i deformacije $\sigma - \varepsilon$ je:

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_f \quad (4.14)$$

$$\sigma_m = E_m \varepsilon_m$$

Srednja vrijednost naprezanja σ_l djeluje na cijeloj površini presjeka RVE-a, sa sljedećom površinom A :

$$A = A_f + A_m \quad (4.15)$$

Ukupna primjenjena sila se izražava preko:

$$F = \sigma_1 A = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \quad (4.16)$$

Iz ove formule se može izvući naprezanje σ_l , pa formula glasi:

$$\sigma_1 = \varepsilon_1 (E_f V_f + E_m V_m) \quad (4.17)$$

Gdje se volumni udjeli izraze preko površina:

$$V_f = \frac{A_f}{A} \quad (4.18)$$
$$V_m = \frac{A_m}{A}$$

Gdje A predstavlja površinu cijelog kompozita, a A_f i A_m površine vlakana i matrice u kompozitu.

Za ekvivalentan homogeni materijal, naprezanje σ_l iznosi:

$$\sigma_1 = E_1 \varepsilon_1 \quad (4.19)$$

Nakon čije kombinacije formula (4.17) i (4.19), modul elastičnosti E_l iznosi:

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \quad (4.20)$$

Na kraju, korištenjem formule (4.3) i (4.20), dolazi se do **pravila miješanja** spomenutog ranije u tekstu, a on glasi:

$$E_1 = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (4.21)$$
$$E_1 = E_m + V_f (E_f - E_m)$$

Ovim proračunom se može dobiti vrijednost modula elastičnosti E_l kompozitnog materijala.

4.4. Proračun modula elastičnosti prema mikromehanici

U ovom proračunu su prikazane vrijednosti modula elastičnosti prema formulama iz prethodnog poglavlja i podataka iz ISO 12215-5:2008 [6]. Iz tablica „2.1“ i „2.9“ literature [5], izvučene su vrijednosti gustoće vlakana ρ_f i gustoće matrice ρ_m .

Gustoća ugljičnih vlakana ρ_f , prema tablici „2.1“ [5], iznosi:

$$\rho_f = 1,75 \text{ g/cm}^2$$

Gustoća epoksidne smole ρ_m , prema tablici „2.9“ [5], iznosi:

$$\rho_m = 1,2 \text{ g/cm}^2$$

Vrijednosti masenih udjela vlakana $W_f = \psi$ se preuzela iz ISO 12215-5:2008 [3]. Prema ISO normi, maseni udio vlakana W_{fRL} za ručni dodirni postupak iznosi:

$$W_{fRL} = 0,5445$$

Ako vrijedi jednakost prikazana formulom (4.6), onda je vrijednost W_{mRL} , sljedeća:

$$W_{mRL} = 0,4555$$

Prema formuli (4.8), dobiva se vrijednosti gustoće kompozita ρ_{cRL} za ručni dodirni postupak:

$$\rho_{cRL} = 1,4478 \text{ g/cm}^2$$

Kako bi se dobili volumni udio vlakana V_{fRL} i volumni udio smole V_{mRL} , iz formula (4.9) se izvode sljedeće vrijednosti:

$$V_{fRL} = 0,4505$$

$$V_{mRL} = 0,5495$$

Iz tablice „2.1“ literature [5], preuzima se vrijednost modula elastičnosti ugljičnih vlakana E_f , koji iznosi:

$$E_f = 230 \text{ GPa}$$

Iz tablice „2.9“ literature [5], preuzima se vrijednost modula elastičnosti epoksidne smole E_m , koji iznosi:

$$E_m = 3,12 \text{ GPa}$$

Uvrštavanjem svih prethodno dobivenih vrijednosti u formulu (4.21), dobiva se vrijednost modula elastičnosti E_{1RL} za kompozit izrađen ručnim dodirnim postupkom, a on iznosi:

$$E_{1RL} = 105,3 \text{ GPa}$$

Istim postupkom se može odrediti vrijednost modula elastičnosti E_{1VB} za kompozit izrađen postupkom vakuumiranja mokrog laminata.

Prema ISO normi [6], maseni udio vlakana W_{fVB} za postupak vakuumiranja mokrog laminata iznosi:

$$W_{fVB} = 0,6534$$

Ako vrijedi jednakost prikazana formulom (4.6), onda je vrijednost W_{mVB} , sljedeća:

$$W_{mVB} = 0,3466$$

Prema formuli (4.8), dobiva se vrijednosti gustoće kompozita ρ_{cVB} za postupak vakuumiranja mokrog laminata:

$$\rho_{cVB} = 1,51 \text{ g/cm}^2$$

Kako bi se dobili volumni udio vlakana V_{fVB} i volumni udio smole V_{mVB} , iz formula (4.9) se izvode sljedeće vrijednosti:

$$V_{fVB} = 0,5638$$

$$V_{mVB} = 0,4362$$

Uvrštavanjem svih poznatih vrijednosti u formulu (4.21), dobiva se vrijednost modula elastičnosti E_{1VB} za kompozit izrađen postupkom vakuumiranja mokrog laminata, a on iznosi:

$$E_{1VB} = 131,1 \text{ GPa}$$

Vakuumski infuzijski postupak u ISO normi se ne spominje posebno, već je sveden pod zajednički naziv postupaka ispod pokrivača. Budući da se propisuje isti udio vlakana u laminatu kao i kod postupka vakuumiranja mokrog laminata, vrijede sljedeće jednakosti:

$$V_{fVB} = V_{fVI} = 0,5638$$

$$V_{mVB} = V_{mVI} = 0,4362$$

$$E_{1VB} = E_{1VI} = 131,1 \text{ GPa}$$

5. PRORAČUN MODULA ELASTIČNOSTI PREMA ISO NORMAMA

5.1. Proračun modula elastičnosti prema ISO 12215-5:2008

Uz proračun putem mikromehanike kompozita navedenom u prošlom poglavlju 4.4., opisati ću i proračun masenog udjela vlakana, normalnog napreznja, deformacije i modula elastičnosti prema ISO 12215-5:2008 [6]. Prema „Annex C“ iz navedene ISO norme [6], prikazan je i opisan detaljan proračun pod poglavljem „C.1 Methods for determination of mechanical properties“. Postupak dobivanja masenog udjela vlakana u kompozitu ψ , za ugljična vlakna, prema navedenoj ISO normi [6] je sljedeći:

$$\frac{t}{w} = \frac{1}{2,16} \left(\frac{1,8}{\psi} - 0,6 \right) \quad (5.1)$$

t – debljina kompozita, mm

w – masa vlakana, kg/m²

ψ – maseni udio vlakana (suha vlakna)

Iz formule (5.1) se izvodi sljedeća formula:

$$\psi = \frac{1,8}{2,16 \frac{t}{w} + 0,6} \quad (5.2)$$

Iz tablice „C.5“ [6] se izvlače sljedeće formule za izračun vlačnog napreznja $\sigma_{ut} = \sigma_1$ (eng. *Ultimate tensile strenght*):

$$\sigma_{ut} = 2000 \psi - 200 \quad (5.3)$$

i formula za izračun modula elastičnosti E :

$$E_1 = 202000 \psi - 21000 \quad (5.4)$$

Prema ispisanim formulama se napravio proračun za zadani kompozitni materijal koji će se koristiti u eksperimentima. Vrijednosti masenog udjela vlakana su preuzete iz tablice „C.2“ ISO norme [6]. Za jednostavnu izvedbu laminata izrađenog ručnim dodirnim postupkom se navodi da je vrijednost

masenog udjela ugljičnih vlakana u laminatu $\psi_{carbon\ RL} = 0,5445$, a kod laminata izrađenog postupkom vakuumiranja mokrog laminata $\psi_{carbon\ VB} = 0,6534$.

Prema formuli (5.3), vlačno naprezanje σ_{utRL} za ručni dodirni postupak iznosi:

$$\sigma_{utRL} = 889\ N/mm^2$$

Modul elastičnosti E_{1RL} za ručni dodirni postupak prema formuli (5.4) iznosi:

$$E_{1RL} = 89\ GPa$$

Za izračun vlačnog naprezanja σ_{utVB} kod postupka vakuumiranja mokrog laminata, prema formuli (5.3):

$$\sigma_{utVB} = 1106,8\ N/mm^2$$

Vrijednost modula elastičnosti E_{1VB} kod postupka vakuumiranja mokrog laminata prema formuli (5.4), iznosi:

$$E_{1VB} = 111\ GPa$$

Kao što je već spomenuto u poglavlju 4.4., u ovoj ISO normi [6] su vrijednosti masenih udjela vlakana u laminatu ψ , jednaki kod postupka vakuumske infuzije i vakuumiranja mokrog laminata. Radi toga vrijedi da je $\psi_{carbon\ VB} = \psi_{carbon\ VI} = 0,6534$, iz čega sljede sljedeće jednakosti:

$$\sigma_{utVB} = \sigma_{utVI} = 1106,8\ N/mm^2$$

$$E_{1VB} = E_{1VI} = 111\ GPa$$

5.2. Proračun modula elastičnosti prema ISO 12215-5:2019

Uz prethodna dva proračuna putem mikromehanike i ISO 12215-5:2008 [6], dodatno se izradio proračun modula elastičnosti E_l prema ISO 12215-5:2019 normi [7]. Prije proračuna modula elastičnosti E_l , prikazati će se formule prema kojima se dobivaju volumni udjeli vlakana φ i maseni udjeli vlakana ψ u laminatu, kao i gustoća kompozita ρ_c i omjer debljine i mase suhih vlakana t/w .

Volumni udio vlakana φ u laminatu se dobiva prema formuli (5.5):

$$\varphi = \frac{\text{volumen suhih vlakana}}{\text{ukupni volumen kompozita}} \quad (5.5)$$

Maseni udio vlakana ψ u laminatu se dobiva prema formuli (5.6):

$$\psi = \frac{\text{masa suhih vlakana}}{\text{ukupna masa kompozita}} \quad (5.6)$$

Formula (5.8) i formula (5.7), iste su kao i kod proračuna pomoći mikromehanike samo s drugim simbolima. Također se ove vrijednosti mogu dobiti i preko sljedećih formula:

$$\varphi = \frac{\psi}{\psi + (1 - \psi) \frac{\rho_f}{\rho_m}} \quad (5.7)$$

$$\psi = \frac{\varphi \rho_f}{\varphi \rho_f + (1 - \varphi) \rho_m} \quad (5.8)$$

Omjer debljine i mase suhih vlakana t/w se dobiva preko formule (5.9):

$$\frac{t}{w} = \frac{1}{\varphi \rho_f} \quad (5.9)$$

Debljina laminata t se može izračunati putem formule (5.10):

$$t = \frac{w}{\rho_f \rho_m} \left(\frac{\rho_f}{\psi} + \rho_m - \rho_f \right) \quad (5.10)$$

Gustoća kompozita ρ_c se dobiva formulom (5.11):

$$\rho_c = \frac{\rho_f \rho_m}{\rho_f + \psi (\rho_m \rho_f)} \quad , \quad (5.11)$$

ili formulom (5.12):

$$\rho_c = \rho_f \varphi + \rho_m (1 - \varphi) \quad (5.12)$$

Nakon što su poznate sve prethodne vrijednosti, može se izračunati traženi modul elastičnosti E_l u smjeru vlakana putem formule (5.13):

$$E_1 = 0,975 [E_f \varphi + E_m (1 - \varphi)] \quad (5.13)$$

Ove formule su izvučene iz tablica „C.2“ i „C.5“ navedene ISO norme [7].

U tablici „C.4“ [7] nalaze se mehanička svojstva ugljičnih vlakana i epoksidne smole koja će se koristiti za proračun modula elastičnosti. Potrebne vrijednosti su modul elastičnosti vlakana E_f i modul elastičnosti matrice E_m , a oni iznose:

$$E_f = 235000 \frac{N}{mm^2}$$

$$E_m = 3300 \frac{N}{mm^2}$$

Prema prikazanim vrijednostima iz ove ISO norme, može se uočiti mala razlika u modulima elastičnosti dobivenim kod proračuna mikromehanike. U tablici „C.7“ [7], prikazane su vrijednosti masenih i volumnih udjela vlakana u laminatu ovisne o vrsti izrade. U ovoj ISO normi [7] nije navedena metoda izrade vakuumiranjem mokrog laminata, pa se u ovom proračun neće prikazati vrijednost za tu metodu.

Kod ručnog dodirnog postupka uvrštava se vrijednost volumnog udjela vlakana za unidirekionalna ugljična vlakna u iznosu od $\varphi_{RL} = 0,364$. Uvrštavanjem tog volumnog udjela vlakana φ_{RL} , te vrijednosti modula elastičnosti vlakana E_f i modula elastičnosti matrice E_m , preko formule (5.13) dobiva se modul elastičnosti E_{1RL} za ručni dodirni postupak koji iznosi:

$$E_{1RL} = 85,5 \text{ GPa}$$

Kod postupka vakuumske infuzije vrijednost volumnog udjela vlakana za unidirekionalna ugljična vlakna iznosi između 0,45 i 0,53, te se uzima srednja vrijednost od $\varphi_{VI} = 0,49$. Uvrštavanjem tog volumnog udjela vlakana φ_{VI} , te vrijednosti modula elastičnosti vlakana E_f i modula elastičnosti matrice E_m , preko formule (5.13) dobiva se modul elastičnosti E_{1VI} za vakuumski infuzijski postupak, koji iznosi:

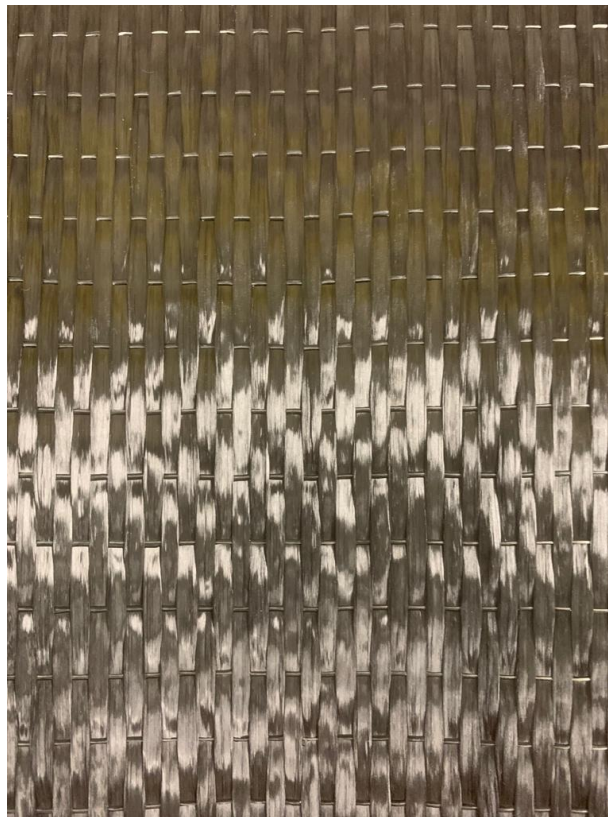
$$E_{1VI} = 113,9 \text{ GPa}$$

Može se uočiti da su vrijednosti dobivene ovom ISO normom [7], jako slične vrijednostima dobivenim s ISO 12215-5:2008 normom [6].

6. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA

6.1 Materijali korišteni kod eksperimentalnih ispitivanja

Za eksperimente je korišten laminat izrađen od kompozitnog materijala koji se sastoji od tri sloja ugljičnih vlakana povezanih epoksidnom smolom. Točno ova izvedba laminata koja se odabrala u praksi nema značajniju primjenu u ovom obliku, ali se želi prikazati stvarni modul elastičnosti vlakana u usporedbi s tehničkim listom materijala i utjecaj tehnologije izrade na mehaničke osobine kompozita. Odabrana su ugljična vlakna orijentirana u samo jednom smjeru (eng. *UD - Unidirectional Orientation*), koja se označavaju markom Toray T700 12K proizvođača Kordcarbon [12]. Odabrana je orijentacija u samo uzdužnom smjeru (0°) kako bi se prikazali limiti ovih vlakana. Ukupna nominalna površinska masa vlakana iznosi 300 g/m² (± 3%) [12]. Tehnički list se nalazi u prilogu (*Prilog 1. Tehnički list vlakana [12]*), a izgled ovih vlakana prikazan je na *Slici 6.1*.

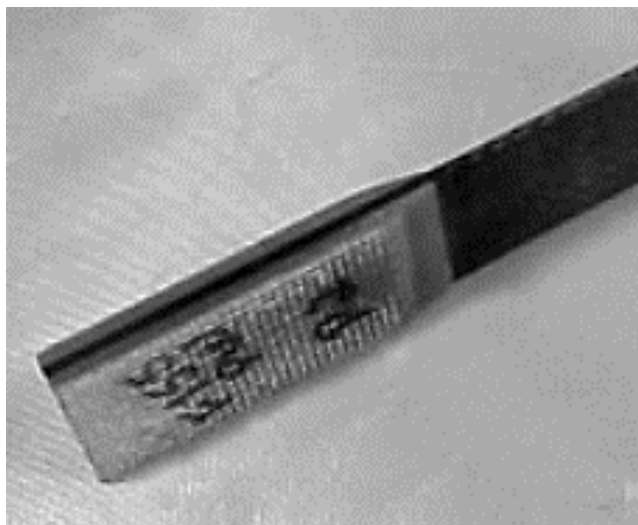


Slika 6.1. Izgled ugljičnih vlakana T700

Epoksidna smola se koristila kao matrica kompozita kojom su se povezala ugljična vlakna gore navedena. Postoje dvije vrste epoksidne smole koje su se koristile u eksperimentima. Obje vrste smole

imaju slična mehanička svojstva, ali s obzirom na tri metode izrade samog kompozita bilo je potrebno koristiti različite. EL2 Epoxy Laminating Resin [13] je smola korištena za ručni dodirni postupak i vakuumiranje mokrog laminata, a IN2 Epoxy Infusion Resin [13] je smola korištena za vakuumsku infuziju. Obje smole su korištene u kombinaciji sa AT30 SLOW otvrdnjivačem [13]. Omjer miješanja smole (eng. *Resin*) i otvrdnjivača (eng. *Hardener*), je bio 100g u 30g prema preporuci proizvođača. Specifikacije smola prikazane su u prilogu (*Prilog 2. Tehnički list smola* [13]). Obje smole su proizvedene od proizvođača Easy Composties.

Pošto je pretpostavka da će grupa uzoraka ručne laminacije biti najdeblja, a uzorci izrađeni vakuumiranjem mokrog laminata i vakuumskom infuzijom tanji, prema standardu ASTM D 3039/D 3039M [3] opisano je kako bi trebalo postaviti zadebljanja na krajevima uzoraka (eng. *tabs*). Zadebljanja na krajevima uzoraka služe kako bi čeljusti kidalice, na kojoj će se izvoditi eksperiment ispitivanja vlačne čvrstoće do loma, uhvatile uzorak bez da ga oštete. Moguće je da dođe do oštećenja uzoraka na krajevima zbog velikih sila koje se primjenjuju na čeljustima. Materijal zadebljanja se sastojao od staklenog ojačanja 300 g/m^2 i epoksidne smole EL2 [13]. Stakleno ojačanje (E-glass) je orijentacije $-45^\circ / +45^\circ$, isto poznato kao BIAX (eng. *Biaxial*) vlakna pošto su vlakna orijentirana u dva različita smjera. Zadebljanja su se postavila nakon laminiranja testnog materijala i sastoje se od 10 slojeva staklenog ojačanja sa svake strane uzorka na krajevima. Napravljeni su i testovi tehnologije izrade samih zadebljanja kako bi se vidjelo koja metoda najviše odgovara za spoj zadebljanja i testnog uzorka. Primjer zadebljanja prikazan je na sljedećoj slici, (*Slika 6.2.*).



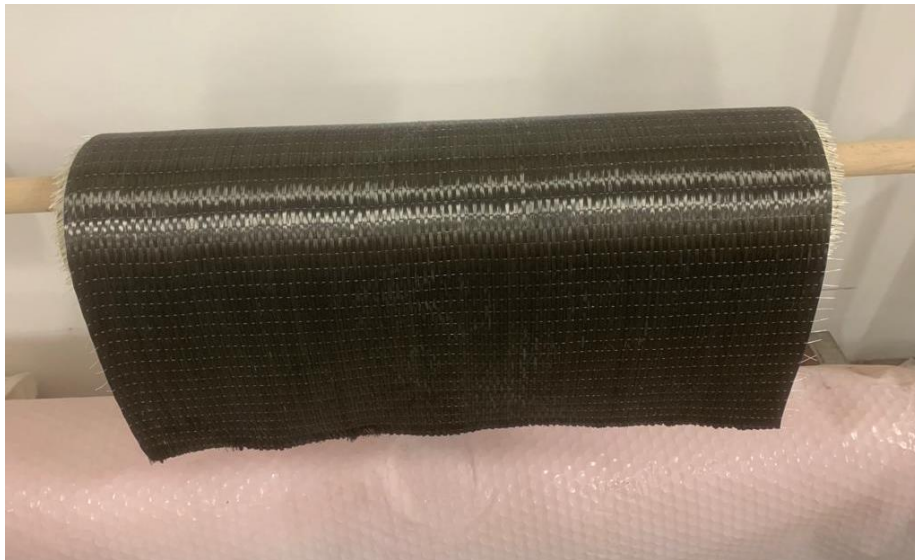
Slika 6.2. Primjer zadebljanja na krajevima uzorka [14]

6.2 Izrada uzoraka

Kao što je već ranije spomenuto izradila su se tri laminata istog materijala, ali s različitom tehnološkom metodom izrade. U sljedećim poglavljima biti će prikazani načini izrade uzoraka, materijali koji su navedeni u prošlom poglavlju i slike izrade svakog laminata.

6.2.1. Izrada uzoraka ručnim dodirnim postupkom

Kako je prikazano u poglavlju 3.2. *Ručni dodirni postupak*, prema istom principu je izrađen laminat za potrebe eksperimenata. Prvo su se izrezala tri komada ugljičnih vlakana iz role, na dimenzije 300 x 500 mm, (*Slika 6.3.*). Ta tri sloja predstavljaju svu količinu vlakana koja će se nalaziti u izrađenom uzorku.



Slika 6.3. Rola UD karbonskih vlakana širine 500 mm

Kao podloga za izradu lamianta se koristilo ravno staklo. Staklo se pripremlilo tako da se očistilo s razrjeđivačem i metalnim špatulama. Nakon što se očistilo staklo postavio se odvajivač u spreju koji služi za lakše odvajanje samog laminata nakon sušenja. Zatim se pripremlilo mjesto za vaganje i mješanje smole. Omjer smole i otvrdnjivača je bio 100 g smole i 30 g otvrdnjivača nakon čega se smjesa promiješala drvenim štapićem 2 minute prema uputama. Kistom se počela nanositi smola na mjesto laminiranja kako bi se uhvatio sloj ugljičnih vlakana na kalup (staklo). Slijedilo je premazivanje smole kistom po cijeloj površini vlakna, te nakon što se namočio cijeli sloj vlakana,

krenulo se postavljati drugi sloj vlakana i ponovljen je proces premazivanja sloja smolom. Postupak i mjesto miješanja prikazani su na sljedećim slikama, (Slika 6.4.) i (Slika 6.5.).

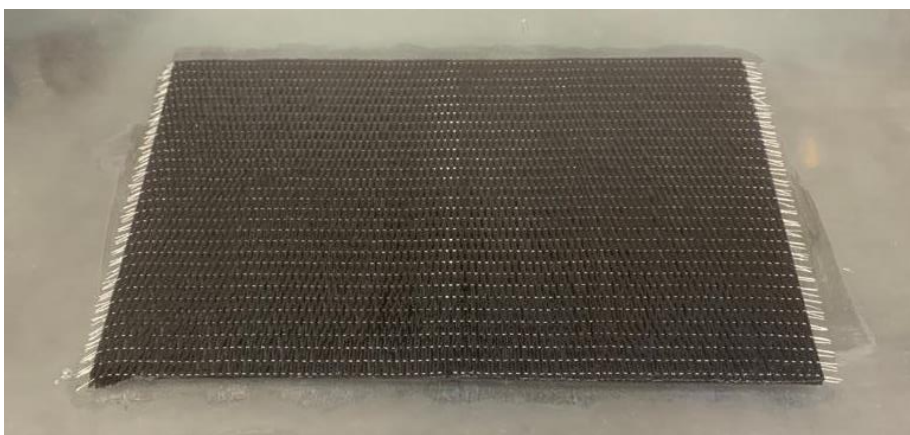


Slika 6.4. Pribor za mješanje i vaganje omjera smole



Slika 6.5. Mjesto i pribor za miješanja smole

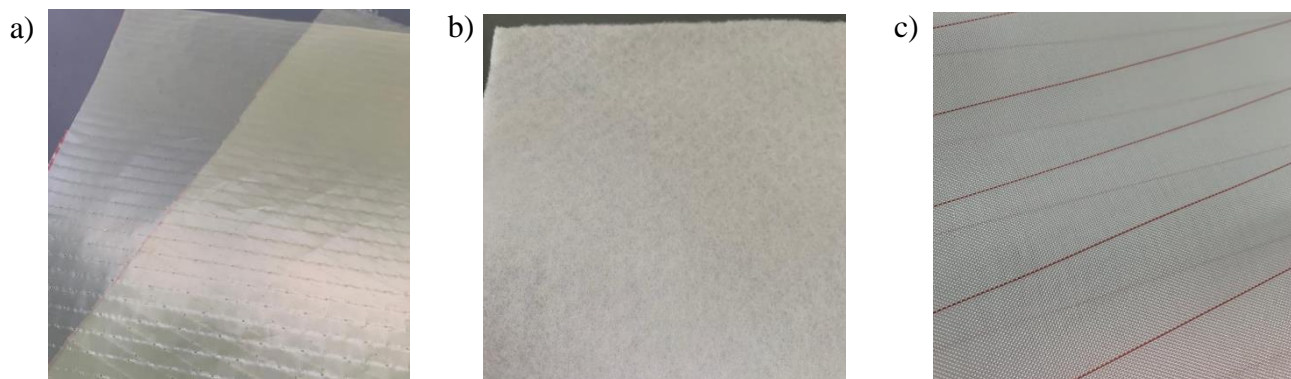
Uvjeti potrebni za želiranje smole su bili skoro idealni, pošto je temperatura zraka iznosila oko 26°C i vlažnost zraka oko 55%, prema podacima DHMZ-a (Državni hidrometeorološki zavod) za taj dan. Laminat je pušten 24 sata kako bi otvrdnuo, te se nakon otvrdnjivanja lako odvojio od kalupa i spremio u skladište za daljnju obradu. Izgled završnog laminata prikazan je na *Slici 6.6.*



Slika 6.6. Izgled završnog laminata izrađenog ručnim dodirnim postupkom nakon sušenja smole

6.2.2. Izrada uzoraka vakuumiranjem mokrog laminata

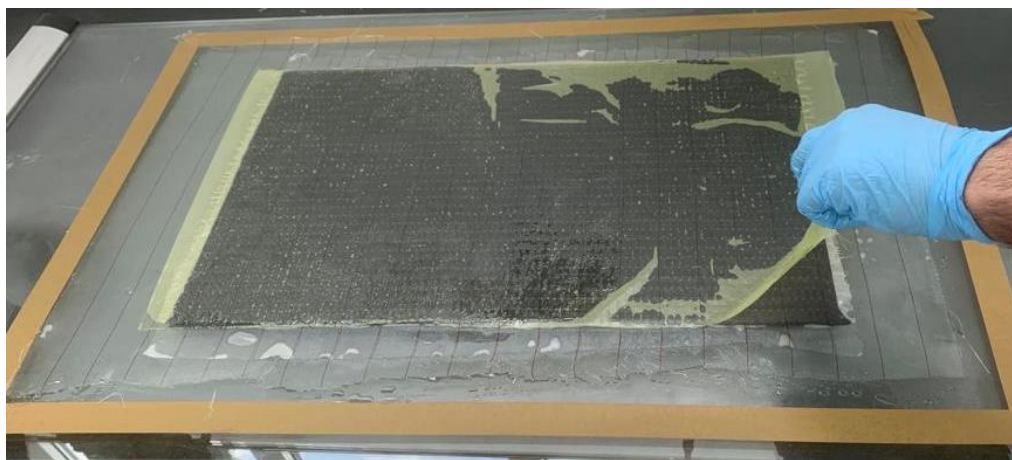
Također prema poglavlju 3.3. *Postupak vakumiranja mokrog laminata*, istom procedurom se izradio i lamiant potreban za ove eksperimente. Počevši rezanjem svog potrebnog materijala, krenulo se prvo od pripreme ugljičnih vlakana gdje su se izrezala tri sloja iz iste role prikazane na *Slici 6.3.*, na dimenzije 300 x 500 mm. Uz slojeve ugljičnih vlakana izrezali su se rupičasta folija za propuštanje viška smole, tkanina za upijanje viška smole (eng. *breadther*) koja se postavlja na rupičastu foliju kao i *peel ply*. *Peel ply* je taknina koja se postavi na vanjski sloj laminata kako bi površina laminata bila hrapava i kako bi se laminat lakše odvojio od svih dodatnih materijala, tipa rupičaste folije i tkanine za upijanje viška smole. Rupičasta folija, tkanina za upijanje smole i *peel ply* su prikazani na *Slici 6.7.*



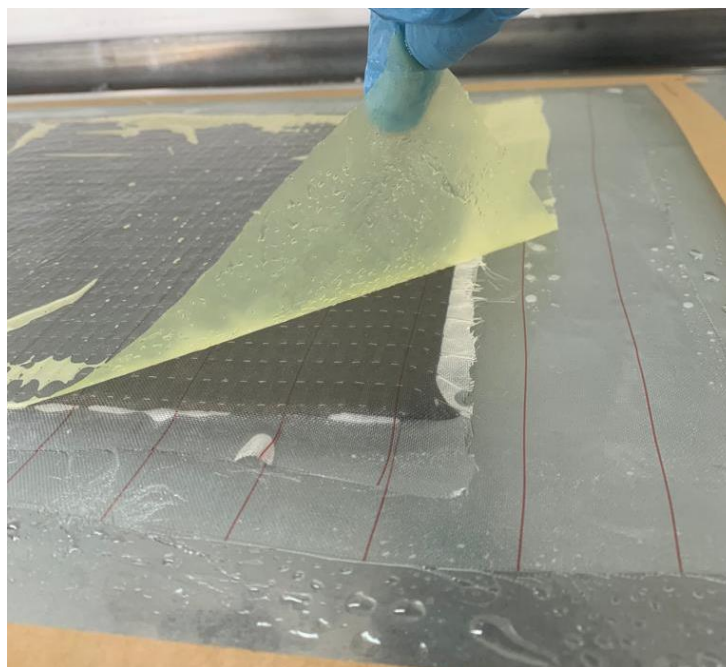
Slika 6.7. a)rupičasta folija, b)tkanina za upijanje viška smole, c)peel ply

Zatim se pripremio pokrivač koji sprječava ulazak zraka u laminat kao i brtvena traka. Nakon cijele pripreme potrebnog materijala testirala se vakuumska pumpa i pripremile su se cijevi i separator koji

vode do pumpe. Bilo je potrebno da sva aparatura i materijal budu pri ruci pošto je nakon miješanja smole, u procesu vakuumiranja mokrog laminata, bitno što prije namazati slojeve smolom i vakuumirati cijeli sustav. Na kalupu se označilo mjesto vakuumiranja i nanio se sloj odvajivača isto kao i kod ručnog dodirnog postupka. Postavili su se slojevi lamianta te se isto kao i kod ručnog dodirnog postupka između svakog sloja nanijela prethodno zamješana smola, (*Slika 6.8.*) i (*Slika 6.9.*).

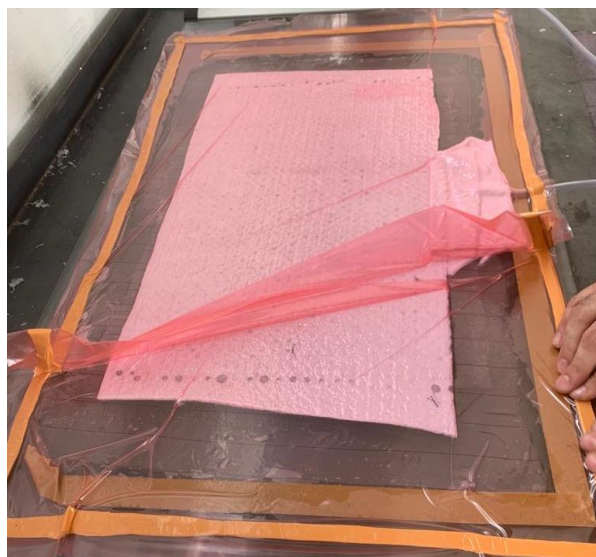


Slika 6.8. Postavljanje rupičaste folije nakon nanosa smole i slojeva laminata kistom



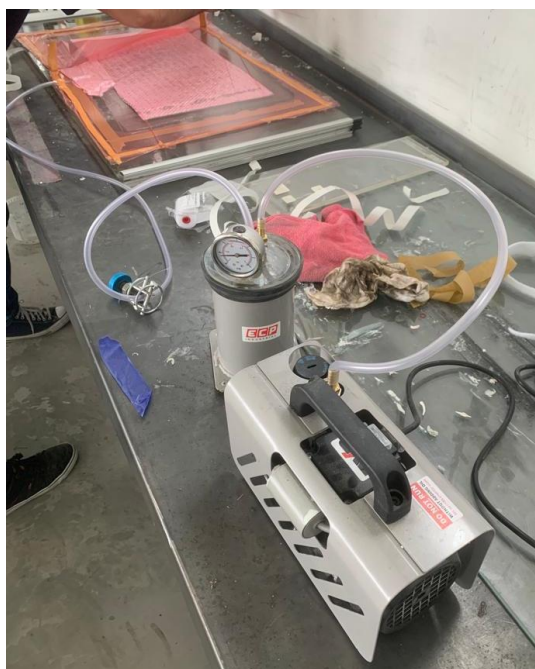
Slika 6.9. Prikaz namočenih slojeva iz bliza

Nakon toga se postavila brtvena traka i cijev koja vodi do separatora i pumpe, nakon čega se cijeli sustav zatvorio pokrivačem i zabrtvio, (Slika 6.10.).



Slika 6.10. Prikaz sustava nakon pokrivanja i brtvljenja (na desnoj strani slike se vidi cijev koja je zabrtvljena u sustavu)

Upaljena je vakuumska pumpa koja je pritisnula pokrivač i laminat. Nakon kratkog vremena tkanina je počela upijati višak smole, te nakon što je sustav postigao vakuum zatvorio se ventil prema pumpi kako bi se ustanovilo da li sustav propušta zrak, (Slika 6.11.). Sustav je bio savršeno vakuumiran te nije bilo potrebe za dodatnom procedurom.



Slika 6.11. Sustav cijevi separatora i pumpe prema vakuumiranom laminatu

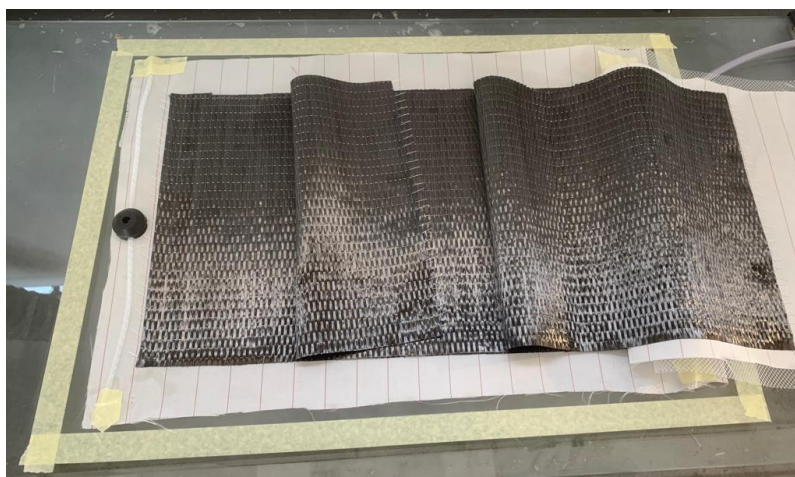
Uvjeti u hali gdje se laminat izrađivao su bili isti kao i kod ručnog dodirnog postupka. Laminat se nakon 24 sata izvadio iz vakuuma i izgled se može vidjeti na *Slici 6.12*.



Slika 6.12. Izgled završnog laminata izrađenog vakuumiranjem mokrog laminata nakon sušenja smole

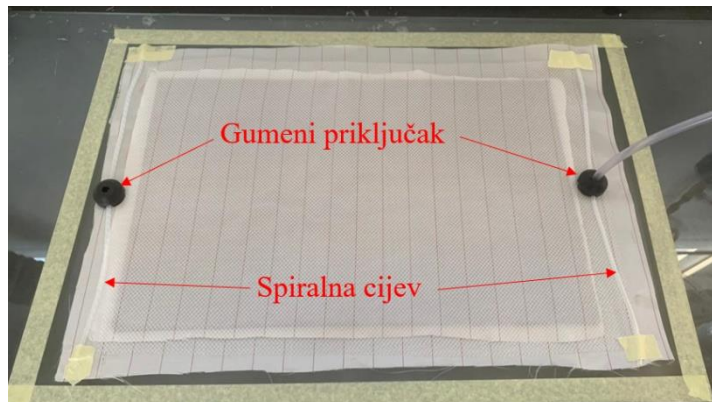
6.2.3. Izrada uzoraka vakuumskim infuzijskim postupkom

Kao što je opisano u poglavlju 3.4. *Vakuumski infuzijski postupak*, prema istim načelima se izvodio postupak izrade trećeg laminata. Kao i kod postupka vakuumiranja mokrog laminata, bitna je priprema svog materijala prije početka vakuumske infuzije. Istim postupkom se krenulo, iz role prikazane na *Slici 6.3.*, rezati tri sloja ugljičnih vlakana na dimenzije 300 x 500 mm. Uz pripremu vlakana trebala se pripremiti i mrežica za poboljšanje protoka smole, *peel ply* i pokrivač. Također su se izrezale spiralne cijevi za ravnomjernu distribuciju smole i cijevi za dovod i odvod smole. Nakon pripreme materijala se očistio kalup i nanio odvajivač radi lakšeg odvajanja laminata nakon sušenja. Krenulo se u postavljanje slojeva ugljičnih vlakana, ali za razliku od prethodnih metoda izrade u ovoj metodi se nije nanosila smola tijekom postavljanja slojeva nego naknadno, (*Slika 6.13.*).



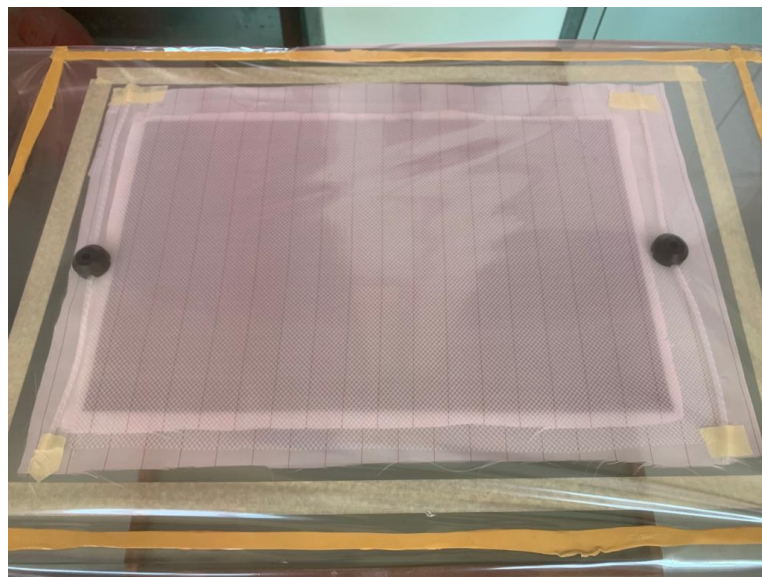
Slika 6.13. Slaganje slojeva laminata na suho bez nanosa smole

Nakon postavljanja slojeva ugljičnih vlakana postavlja se *peel ply* i mrežica za poboljšanje protoka. Pored laminata su se na dvije strane postavili gumeni priključci na čijim će se mjestima spojiti dovod i odvod smole, (Slika 6.14.). Iz tih priključaka po širini izlaze spiralne cijevi za ravnomjernu distribuciju smole s obje strane.



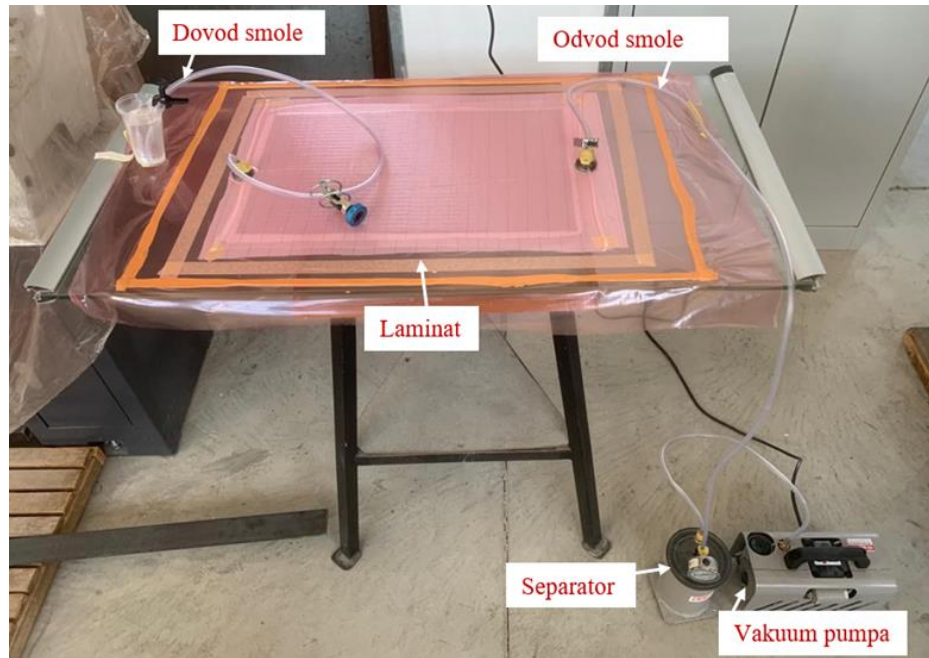
Slika 6.14. Prikaz postavljenih priključaka i spiralnih cijevi prije postavljanja pokrivača i vakuumiranja

Sustav se zatim zabrtvio postavljanjem brtvene trake i pokrivača, (Slika 6.15.).



Slika 6.15. Zabrtvljeni sustav s pokrivačem prije spajanja cijevi dovoda i odvoda

Zatim su se spojile cijevi dovoda i odvoda smole u sustav na gumene priključke. Zatvoren je ventil dovoda smole i upaljena je vakuumska pumpa kako bi se testirao vakuum u sustavu, (Slika 6.16.).



Slika 6.16. Sustav spreman za vakuumski infuzijski postupak nakon testiranja vakuuma

Nakon testiranja vakuuma u sustavu zamješana se smola za infuziju prema zadanim omjerima i pripremila u više posuda koje su se spojile na dovod smole. Laganim otvaranjem ventila koji se nalazi na cijevi dovoda smole, vakuum je krenulo povlačiti smolu kroz cijevi dovoda prema laminatu. Svake dvije minute se markerom označilo mjesto do kojeg je smola došla u laminatu, (Slika 6.17.).



Slika 6.17. Prikaz oznaka pomaka smole po vremenu od početka do kraja vakuumskog infuzijskog postupka

Nakon što je smola došla do kraja lamianta, dovod smole se zatvorio i laminat se pustio da se stvrdne.

Uvjeti u hali su bili isti kao i kod ručnog dodirnog postupka i vakuumiranja mokrog laminata. Laminat se nakon 24 sata izvadio iz vakuuma i spremljen je za daljnju obradu. Finalni izgled laminata je prikazan na *Slici 6.18*.



Slika 6.18. Prikaz finalnog laminata izrađenog vakuumskom infuzijom

6.2.4. Priprema prihвата za kidalicu

Kao što je ranije objašnjeno u poglavlju 7., bilo je potrebno izraditi zadebljanja na krajevima uzoraka kako ne bi došlo do pucanja laminata pri stezanju čeljusti kidalice na eksperimentu testiranja vlačne čvrstoće. Iz laminata koji su izrađeni u prethodnim poglavljima izrezani su uzorci koji su se testirali na dvije različite metode izrade zadebljanja. Zadebljanja se sastoje od 10 slojeva staklenog ojačanja sa svake strane, orijentacije $-45^\circ / +45^\circ$. Od četiri testna uzorka laminata, dva su bila od laminata izrađenog ručnim dodirnim postupkom, jedan od vakuumiranja mokrog laminata i jedan od vakuumske infuzije. Plan postavljanja tih zadebljanja na uzorke je bio takav da su se na dva uzorka zadebljanja postavila ručnim dodirnim postupkom, a na druga dva uzorka vakuumiranjem mokrog laminata.

Nakon izrade tih testnih uzoraka, isti su se testirali na kidalici i ustanovilo se da su obje vrste izrade zadovoljile primjenu, ali da se radi konstantne debljine kod metode vakuumiranja mokrog laminata, odlučilo za tu metodu izrade zadebljanja na drugim uzorcima. Ovi testni uzorci su prikazani sljedećim oznakama: RL1*, RL2*, VB1* i VII*.

Nakon odabira metode izrade, krenulo se u izradu zadebljanja na ostalim laminatima koji će se koristiti u eksperimentu testiranja vlačne čvrstoće. Metodom vakuumiranja mokrog laminata izradila su se zadebljanja s obje strane svih ostalih laminata. Na *Slici 6.19.* je prikazan sustav laminata u kojem se izrađuju zadebljanja. Može se uočiti kako je filc upio višak smole samo na rubovima gdje se nalaze zadebljanja na laminatima, dok je sredina laminata ostala suha.



Slika 6.19. Prikaz izrade zadebljanja na laminatima (svaka ploča predstavlja laminat izrađen jednom metodom laminiranja)

Nakon što su se izradila zadebljanja s obje strane lamianta, krenulo se na rezanje lamianta.

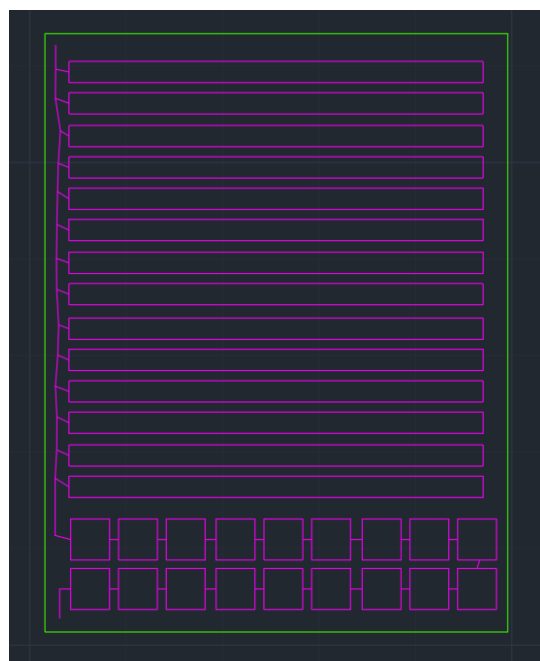
6.2.5. Rezanje uzoraka

Kako bi odstupanje dimenzija uzoraka bilo što manje, odlučilo se rezati uzorke pomoću rezanja vodenim mlazom. Ova metoda rezanja kompozita je pogodna zbog toga što su dimenzijska odstupanja minimalna i zato što vodeni mlaz ravnomjerno reže laminat. Ovim postupkom rezanja ne dolazi do zagrijavanja i delaminiranja slojeva u kompozitnom materijalu. Uzorci su poslani na rezanje u A.T.L. d.o.o. gdje su se izrezali prema zadanim dimenzijama. Stroj koji se koristio za rezanje je OMAX MAXIEM 1530 Waterjet, koji radi na principu CNC stroja, (*Slika 6.20.*). Ovaj stroj na vodeno rezanje ima sposobnost rezanja metala ili bilo kojeg drugog materijala koristeći vodu pod visokim pritiskom (2000 – 4100 bar), te fini granitni pijesak (abraziv). Dimenzije područja rezanja su 3,04 x 1,57 m.



Slika 6.20. Stroj za rezanje vodenim mlazom

Preko AutoCad softvera se izradio nesting nacrt zadanih dimenzija uzoraka prema kojem su se dale komande stroju za rezanje, (*Slika 6.21.*).



Slika 6.21. AutoCad nacrt reazanja uzoraka

Prikaz postupka rezanja uzoraka prikazan je na *Slici 6.22*.



Slika 6.22. Prikaz rezanja vodenim mlazom iz bliza

Nakon rezanja uzoraka, uzorci su se grupirali u grupe prema vrstama izrade kompozita, (*Slika 6.23*). Oznaka RL predstavlja uzorke izrađene ručnim dodirnim postupkom. Oznaka VB predstavlja uzorke izrađene postupkom vakuumiranja mokrog laminata. Oznaka VI predstavlja uzorke izrađene vakuumskom infuzijom.



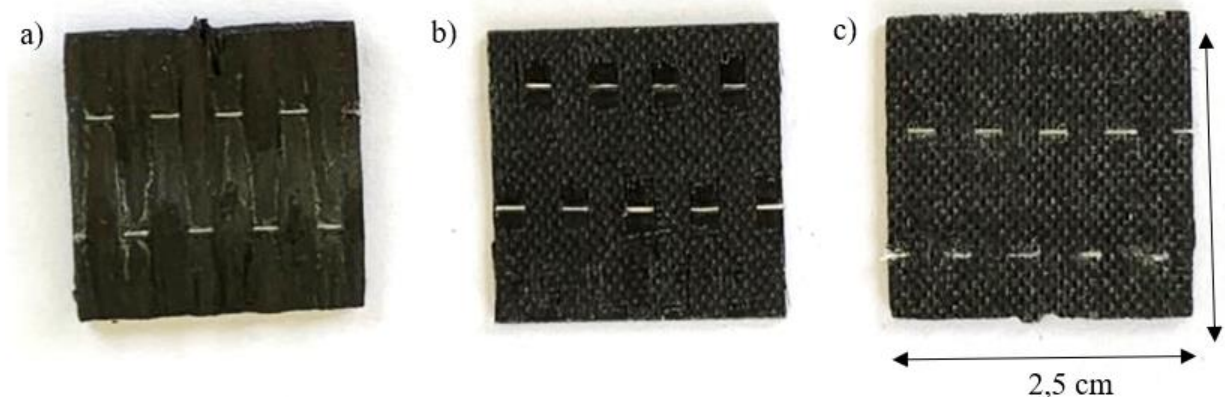
Slika 6.23. Grupirani uzorci nakon rezanja

6.3. Ispitivanje udjela vlakana prema ASTM D 2584 standardu

Prvi eksperiment koji se odradio odnosi na određivanje postotka smole i vlakana u laminatima izrađenih različitim tehnološkim metodama izrade laminata. To znači da su se od ranije izrađenih laminata uzeli nasumice 5 uzoraka manjih dimenzija, te su se izvagali prije i poslije paljenja u pećici. Time se epoksidna smola sadržana u laminatu zapalila i izgorjela u potpunosti, što je rezultiralo ostatkom čistih vlakana u posudici. Razlika u masi prije i poslije paljenja uzorka predstavlja masu smole koja je bila sadržana u laminatu. Ovisno o udjelu smole u laminatu, uzorci izrađeni različitim tehnološkim metodama imaju i različita mehanička svojstva, što se nastoji dokazati ovim eksperimentom.

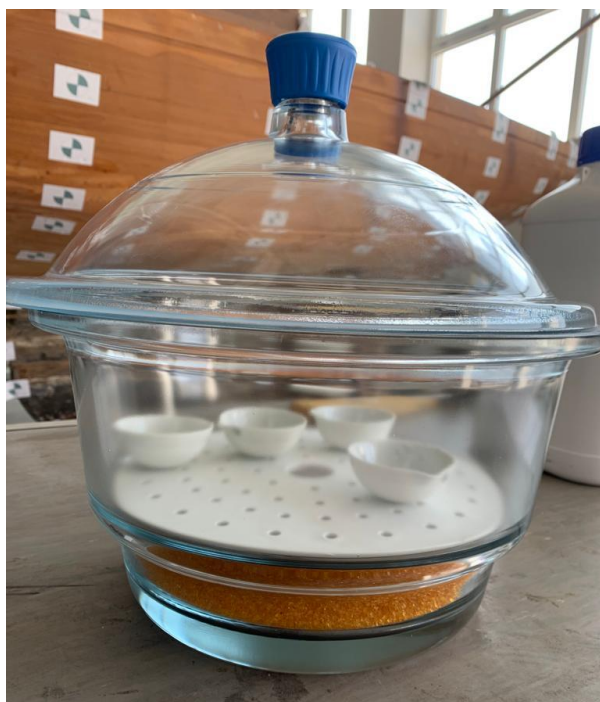
6.3.1. Izvođenje eksperimenta

Kao što je već spomenuto, ovaj eksperiment se odrađuje prema standardu ASTM D 2584 (*Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins*) [4] u kojem su sve upute za uspješno testiranje uzoraka. Prvi zahtjev prema standardu je taj da se pećica mora postepeno ugrijati na 565°C, pri čemu će smola sadržana u laminatu potpuno izgorjeti. Također je navedeno da se moraju testirati minimalno tri uzorka, ali pošto je bilo dostupno više uzoraka i posudica za testiranje, odlučeno je od svakog laminata testirati pet uzoraka radi primjene Gaussove distribucije i dobivanja točnije srednje vrijednosti. Tokom rezanja uzoraka spomenutog u poglavlju 8.5., izrezali su se usput i uzorci za ovaj eksperiment. Dimenzije testiranih uzoraka su bile 2,5 x 2,5 cm, (Slika 6.24.).



Slika 6.24. Izgled uzoraka za eksperiment 1, a) ručni dodirni postupak, b) vakuumiranje mokrog laminata, c) vakuumska infuzija

Kako uzorci ne bi zadržavali vlagu i varirali u svojoj masi radi karakteristika zraka i promjene temperature tokom hlađenja, svaki od uzoraka se prije i poslije paljenja u pećici stavio u eksikator, (Slika 6.25.).



Slika 6.25. Eksikator koji je korišten u eksperimentu

U eksikatoru se nalazio Silica gel C, 1-3 mm granulacije, koji je služio u odvođenju vlage s uzoraka i posudica tokom hlađenja.

Za izgaranja uzoraka koristila se pećica Nabertherm Ashing Furnaces LV 3/11, koja je namjenjena labartorijskim ispitivanjima, (Slika 6.26.). Pećica može postići maksimalnu temperaturu od 1100°C. Prema standardu se išlo samo do 565°C, pošto je to bilo dovoljno za izgaranje kompletne smole.



Slika 6.26. Pećica za izgaranje Nabertherm LV 3/11

Također je trebalo pripremiti digitalnu preciznu vagu za vaganje posudica i uzoraka, (Slika 6.27.). Precizna vaga koja se koristila za potrebe ovog eksperimenta je modela Kern EWJ 300-3, koja može mjeriti težinu uzoraka do 300 g, a preciznost vage je 0,001 g. To je omogućilo precizno mjerenje mase svakog uzorka i posudice.



Slika 6.27. Digitalna precizna vaga

Za provjeru površinskih temperatura posudica, uzoraka i pećice, koristio se infracrveni termometar. Model tog termometra je Testo 830-T2, preciznosti 0,1°C, prikazan na Slici 6.28.



Slika 6.28. Infracrveni termometar

Procedura testiranja je bila sljedeća:

1. grijanje posudica u pećici na temperaturi između 500°C i 600°C u trajanju minimalno 10 min,
2. hlađenje posudica na sobnu temperaturu u eksikatoru i poslije toga vaganje posudica,
3. postavljanje uzoraka u posudice i vaganje skupa s posudicama,
4. postavljanje posudica s uzorcima u pećicu na temperaturu $565^{\circ}\text{C} \pm 28^{\circ}\text{C}$, dok sva smola ne izgori (15 min),
5. hlađenje posudica s ostacima uzoraka na sobnu temperaturu u eksikatoru i vaganje ostataka uzoraka nakon hlađenja.

Uvjeti u laboratoriju u kojem se eksperiment provodi bi trebali biti unutar sljedećih vrijednosti. Temperatura zraka bi trebala iznositi $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$, relativne vlažnosti $50 \pm 5\%$. Za vrijeme izvođenja ovog eksperimenta zabilježili su se podaci temperature zraka i relativne vlažnosti putem DHMZ-a, koje su za taj dan iznosile u prosjeku 27°C temperature zraka i 57% relativne vlažnosti.

Nakon izgaranja uzoraka u posudicama su ostala samo suha vlakna bez tragova smole, što znači da je smola koja je bila sadržana u uzorcima potpuno izgorila, (*Slika 6.29.*).



Slika 6.29. Uzorci u posudicama nakon izgaranja smole

6.3.2. Rezultati i diskusija

U sljedećim tablicama su prikazani rezultati svih testiranih uzoraka, *Tablica 6.1.*, *Tablica 6.2.* i *Tablica 6.3.*

Tablica 6.1. Rezultati eksperimenta prema ASTM D 2584 STANDARDU – uzorci ručnog dodirnog postupka

UZORCI - EKSPERIMENT 1 RUČNI DODIRNI POSTUPAK		RL 1	RL 2	RL 3	RL 4	RL 5	SREDNJA VRJEDNOST
Oznaka	Naziv mjere	mj. je.d.					
D x Š	Dimenzije uzorka (duljina x širina)	24,4 x 24,6	24,4 x 24,6	24,4 x 24,6	24,4 x 24,6	24,6 x 24,5	-
t	Debljina uzorka	1,9	1,6	1,9	1,7	2,1	1,84
m _{uzorak}	Masa uzorka (na digitalnoj vagi)	1,237	1,148	1,205	1,130	1,306	1,2052
m _{uzorak,rač}	Izračunata masa uzorka (m _{prije} - m _{pos})	1,233	1,147	1,202	1,131	1,304	1,2034
m _{pos}	Masa posudice (na digitalnoj vagi)	23,075	24,308	22,396	24,15	24,308	-
m _{prije}	Masa posudice i uzorka prije izgaranja (na digitalnoj vagi)	24,308	25,455	23,598	25,281	25,612	-
m _{poslije}	Masa posudice i uzorka nakon izgaranja (na digitalnoj vagi)	23,572	24,805	22,888	24,656	24,811	-
m _{smola}	Masa smole u uzorku (m _{prije} - m _{poslije})	0,736	0,650	0,710	0,625	0,801	0,7044
ψ _{smola}	Maseni udio smole u laminatu (m _{smola} / m _{uzorak,rač})	0,5969	0,5667	0,5907	0,5526	0,6143	58,42%
ψ _{vlakna}	Maseni udio vlakana u laminatu (1 - ψ _{smola})	0,4031	0,4333	0,4093	0,4474	0,3857	41,58%

Tablica 6.2. Rezultati eksperimenta ASTM D 2584 STANDARDU – uzorci
vakuuiranja mokrog lamianta

UZORCI - EKSPERIMENT 1		VB 1	VB 2	VB 3	VB 4	VB 5	SREDNJA VRJEDNOST	
VAKUUMIRANJE MOKROG LAMIANTA								
Oznaka	Naziv mjere	mj. jed.						
D x Š	Dimenzije uzorka (duljina x širina)	mm	24,6 x 24,7	24,0 x 24,6	24,6 x 24,5	24,6 x 24,6	24,3 x 24,7	-
t	Debljina uzorka	mm	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,14
m _{uzorak}	Masa uzorka (na digitalnoj vagi)	g	0,743	0,694	0,703	0,715	0,709	0,7128
m _{uzorak,rač}	Izračunata masa uzorka (m _{prije} - m _{pos})	g	0,741	0,694	0,703	0,716	0,707	0,7122
m _{pos}	Masa posudice (na digitalnoj vagi)	g	23,074	22,396	24,309	24,149	22,396	-
m _{prije}	Masa posudice i uzorka prije izgaranja (na digitalnoj vagi)	g	23,815	23,09	25,012	24,865	23,103	-
m _{poslije}	Masa posudice i uzorka nakon izgaranja (na digitalnoj vagi)	g	23,591	22,881	24,8	24,649	22,887	-
m _{smola}	Masa smole u uzorku (m _{prije} - m _{poslije})	g	0,224	0,209	0,212	0,216	0,216	0,2154
ψ _{smola}	Maseni udio smole u laminatu (m _{smola} / m _{uzorak,rač})	-	0,3023	0,3012	0,3016	0,3017	0,3055	30,24%
ψ _{vlakna}	Maseni udio vlakana u laminatu (1-ψ _{smola})	-	0,6977	0,6988	0,6984	0,6983	0,6945	69,76%

Tablica 6.3. Rezultati eksperimenta ASTM D 2584 STANDARDU – uzorci
vakuumske infuzije

UZORCI - EKSPERIMENT 1		VI 1	VI 2	VI 3	VI 4	VI 5	SREDNJA VRIJEDNOST
VAKUUMSKI INFUZIJSKI POSTUPAK		VI 1	VI 2	VI 3	VI 4	VI 5	
Oznaka	Naziv mjere	mj. jed.					
D x Š	Dimenzije uzorka (duljina x širina)	mm	25,0 x 24,9	25,0 x 24,9	25,0 x 25,0	24,6 x 24,4	
t	Debljina uzorka	mm	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
m_{uzorak}	Masa uzorka (na digitalnoj vagi)	g	0,814	0,828	0,860	0,811	0,8242
m_{uzorak,rač}	Izračunata masa uzorka (m _{prije} - m _{pos})	g	0,813	0,826	0,854	0,809	0,8216
m_{pos}	Masa posudice (na digitalnoj vagi)	g	22,399	24,309	24,152	23,074	-
m_{prije}	Masa posudice i uzorka prije izgaranja (na digitalnoj vagi)	g	23,212	25,135	25,006	23,883	-
m_{poslije}	Masa posudice i uzorka nakon izgaranja (na digitalnoj vagi)	g	22,905	24,819	23,676	23,563	-
m_{smola}	Masa smole u uzorku (m _{prije} - m _{poslije})	g	0,307	0,316	0,330	0,320	0,3172
ψ_{smola}	Maseni udio smole u laminatu (m _{smola} / m _{uzorak,rač})	-	0,3776	0,3826	0,3864	0,3956	38,61%
ψ_{vlakna}	Maseni udio vlakana u laminatu (1-ψ _{smola})	-	0,6224	0,6174	0,6136	0,6044	61,39%

U priloženim tablicama rezultata se može uočiti kako postoji razlika u debljinama uzoraka između ručnog dodirnog postupka i ostale dvije vakuumske metode izrade.

Prosječna debljina laminata izrađenog ručnim dodirnim postupkom iznosi 1,84 mm, ali se vidi razlika od uzorka do uzorka. Uzorak RL2 ima debljinu od 1,6 mm, dok uzorak RL5 ima debljinu od 2,1 mm. Prema tome se može zaključiti da debljina laminata ovisi o mjestu od kuda se uzeo uzorak, a debljina varira zbog ranije spomenutog ljudskog faktora koji ovisi o tome koliko je smole naneseo na laminat tokom izrade. U prosjeku udio smole u laminatu izrađenog ručnim dodirnim postupkom iznosi oko 58,42%, što prikazuje veliki maseni udio smole u uzorcima. Suprotno tome, maseni udio vlakana iznosi 41,58%.

Prosječna debljina uzoraka izrađenih postupkom vakuumiranja mokrog laminata iznosi 1,14 mm, te se vidi znatna razlika u debljini u odnosu na uzorke izrađene ručnim dodirnim postupkom. Može se vidjeti puno manje variranje debljine kod ovih uzoraka (debljina varira između 1,2 i 1,1 mm). Udio smole u ovom laminatu u prosjeku iznosi 30,24%, što pokazuje da je u ovom laminatu udio smole skoro duplo manji od laminata izrađenog ručnim dodirnim postupkom. Maseni udio vlakana u ovim uzorcima u prosjeku iznosi 69,76%.

Kod uzoraka izrađenih postupkom vakuumske infuzije, udio smole u laminatu je u prosjeku 38,61%. To pokazuje da laminat izrađen ovom metodom sadrži više smole u sebi za razliku od laminata izrađenog postupkom vakuumiranja mokrog laminata. Mjerenjem uzoraka u *Tablici 9.3.*, se može zamjetiti konstantna debljina uzoraka neovisno o mjestu uzimanja uzorka na laminatu. Debljina iznosi konstantnih 1,2 mm kod svih uzoraka. Maseni udio vlakana u uzorku iznosi u prosjeku 61,39%.

U tablicama se može uočiti mala razlika između mase uzorka m_{uzorak} i izračunate mase uzorka $m_{uzorak.rač}$ kod svih vrsta izrade. Razlog tim odstupanjima je mali ostatak vlage na posudici i uzorku nakon hlađenja u eksikatoru.

Najmanji udio smole u uzorku ima postupak vakuumiranja mokrog laminata. Razlog tome može biti ljudski faktor, što bi značilo da se kod izrade tih uzoraka nanijela premala količina smole ili da je vakuum na odvodu povukao previše smole iz sustava. To je uzrokovalo smanjenje udjela smole u uzorcima.

6.4. Ispitivanje vlačne čvrstoće laminata prema ASTM D 3039/D 3039M standardu

Eksperiment ispitivanja vlačne čvrstoće u ovom radu se odnosi na određivanje mehaničkih svojstava laminata izrađenih različitim tehnološkim metodama. Testirala se vlačna čvrstoća kompozita pomoću kidalice. Dobile su se vrijednosti primjenjene sile i pomaka uzorka, nakon čega su se odredili naprezanje i deformacija u uzorku prema formulama. Zatim su se za svaki uzorak izradio graf naprezanja i deformacije σ - ε , te su se usporedili rezultati ispitivanja.

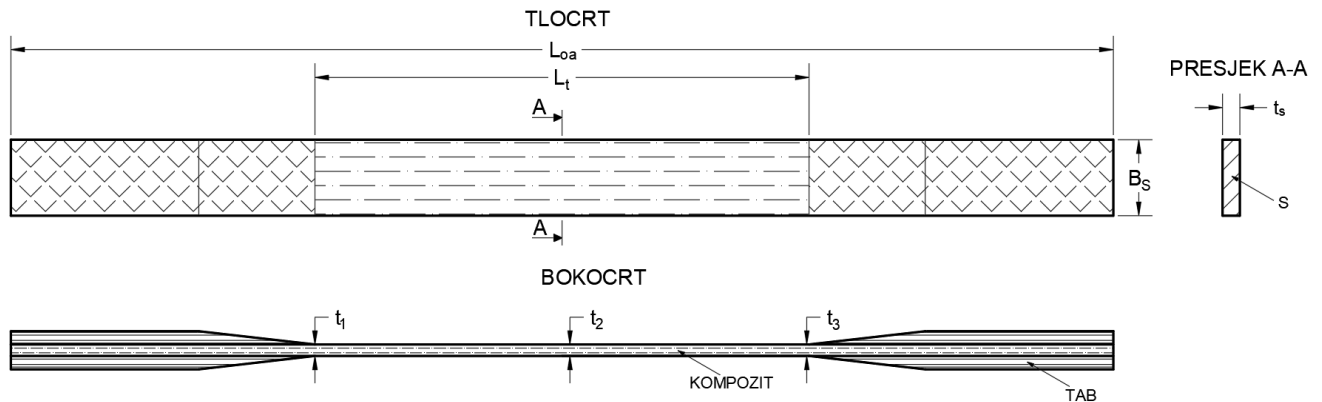
6.4.1. Izvođenje eksperimenta

Ovaj eksperiment se odradio prema standardu ASTM D 3039/D 3039M (*Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*) [3], iz kojeg su se izdvojile sve potrebne informacije i upute. Prema standardu je navedeno da se tanki ravni uzorak kompozitnog materijala konstantnog pravokutnog poprečnog presjeka postavlja u čeljusti kidalice, te se linearno vlačno opterećuje do trenutka loma materijala. Potrebno je nadgledati cijeli proces i pratiti sile i pomake na uzorku. Testirano je 5 uzoraka od svake vrste izrade laminata, prema preoprukama iz ASTM D 3039/D 3039M standarda [3]. Prethodno tome su se posebno testirali testni uzorci različitih metoda izrade tab-ova čime se utvrdila najbolja tehnologija izrade tab-ova. Preporučeni materijal izrade tab-ova su stakloplastična vlakna E-glass, kao što je i izrađeno kod ovih uzoraka, (*Slika 6.30.*).



Slika 6.30. Prikaz izrađenih zadebljanja

Prema standardu dimenzije uzoraka ovise o orijentaciji vlakana, što znači da su se odabrale preporučene dimenzije za orijentaciju vlakana 0° , (Slika 6.31.).



Slika 6.31. Skica uzoraka s označenim dimenzijama

Zahvaljujući preciznom rezanju opisanom u poglavlju 6.2.5., svi uzorci koji su se koristili za ovaj eksperiment su imali skoro iste dimenzije. Dimenzije svih uzoraka su prikazane u Tablici 6.4.

Tablica 6.4. Dimenzije testiranih uzoraka

	L_{0a} , mm	L_t , mm	B_s , mm	t_1 , mm	t_2 , mm	t_3 , mm	t_s , mm	S , mm ²
RL1	288	120	14,65	2,03	2,01	2,09	2,04	29,935
RL2	288	120	14,61	2,10	2,07	2,10	2,09	30,535
RL3	288	120	14,30	2,16	2,23	2,16	2,18	31,222
RL4	288	120	14,41	2,10	2,12	2,13	2,12	30,501
RL5	289	120	14,53	2,22	2,29	2,20	2,24	32,499
VB1	288	140	14,05	1,45	1,32	1,38	1,38	19,436
VB2	289	125	14,08	1,39	1,26	1,42	1,36	19,102
VB3	288	125	14,05	1,28	1,31	1,31	1,30	18,265
VB4	288	130	14,01	1,47	1,28	1,32	1,36	19,007
VB5	289	125	14,02	1,44	1,34	1,50	1,43	20,002
VI1	289	135	14,22	1,34	1,22	1,15	1,24	17,585
VI2	288	135	14,11	1,21	1,18	1,16	1,18	16,697
VI3	289	135	14,04	1,35	1,30	1,10	1,25	17,550
VI4	289	140	14,21	1,29	1,25	1,27	1,27	18,047
VI5	288	135	14,07	1,25	1,18	1,27	1,23	17,353
RL1*	317	x	19,20	2,00	2,10	2,55	2,22	42,560
RL2*	327	x	26,60	2,00	2,10	2,15	2,08	55,417
VB1*	330	x	22,25	1,70	1,35	1,00	1,35	30,038
VI1*	323	x	19,70	1,50	1,35	1,50	1,45	28,565

Bitno je spomenuti laboratorijske uvijete koji su bili aktualni za vrijeme testiranja. Prema standardu bi temperatura zraka u laboratoriju trebala iznositi $23 \pm 3^\circ\text{C}$, a relativna vlažnost zraka $50 \pm 10\%$. Uvjeti u kojima se izvodio ovaj eksperiment su bili sljedeći: temperatura zraka $24,9^\circ\text{C}$, relativna vlažnost zraka $65,5\%$. Ove vrijednosti su se izmjerile putem Testo 480 uređaja za mjerenje vrijednosti zraka, (Slika 6.32.).



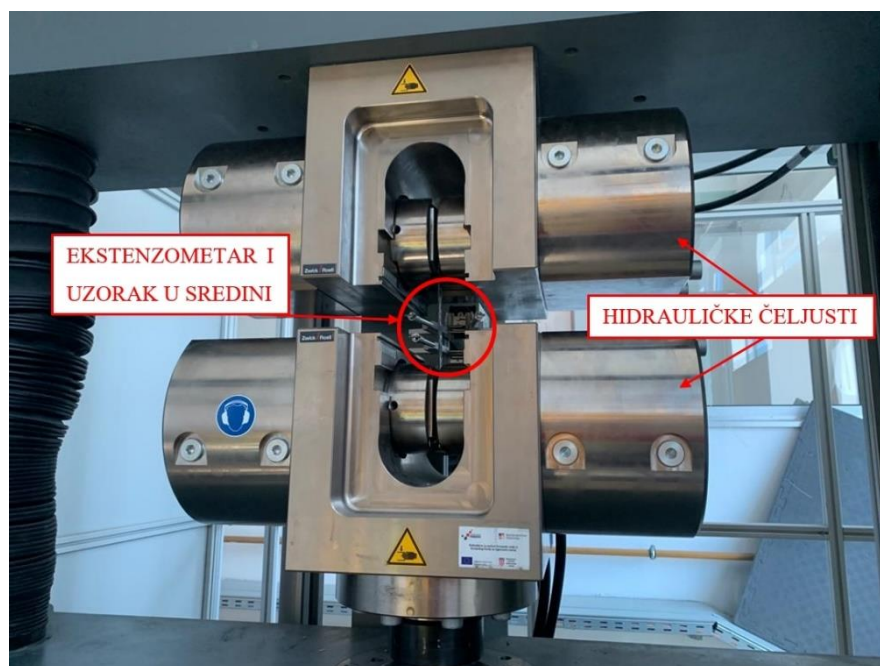
Slika 6.32. Testo 480 mjerni uređaj

Test se radio u laboratoriju Građevinskog fakulteta u Rijeci, na kidalici Zwick/Roell Z600, (Slika 6.33.). Kapacitet kidalice je do 600 kN i pokretan je elektromotorom. Namjena stroja je ispitivanje svojstava različitih vrsta materijala, monotona statička ispitivanja i niskociklična ispitivanja do 0,5 Hz. Ispitivanja je moguće provoditi u dva radna prostora. Gornji radni prostor je uglavnom namijenjen za vlačna i tlačna ispitivanja, a donji radni prostor za savijanje. Ispitivanja je moguće provoditi kontrolom sile i pomaka pomoću pomične grede, i kontrolom deformacija pomoću ekstenzometra. Za prihvatanje uzoraka se koriste hidrauličke čeljusti (600 kN). Strojem upravlja program testXpert II te je moguće provoditi ispitivanja prema raznim normama. Ispitivanja se promatraju i softver bilježi sve potrebne podatke. Brzina rastezanja uzoraka je iznosila 2 mm/min, preporučeno prema standardu [3].



Slika 6.33. Kidalica Zwick/Roell Z600, radni prostor

U gornjem radnom prostoru se postavi uzorak. Bilo je potrebno podesiti hidrauličke čeljusti na duljinu uzorka kako bi se uzorak pravilno prihvatilo, (Slika 6.34.).



Slika 6.34. Gornji radni prostor kidalice s hidrauličkim čeljustima

Nakon podešavanja čeljusti na duljinu uzorka, bilo je potrebno provjeriti prihvat uzorka. Također se uzorak prije samog testiranja prednapregnuo u čeljustima, kako bi se opterećenje ravnomjerno rasporedilo po uzorku i kako bi uzorak bio okomit. Prihvat izbliza se može vidjeti na *Slici 6.35*.



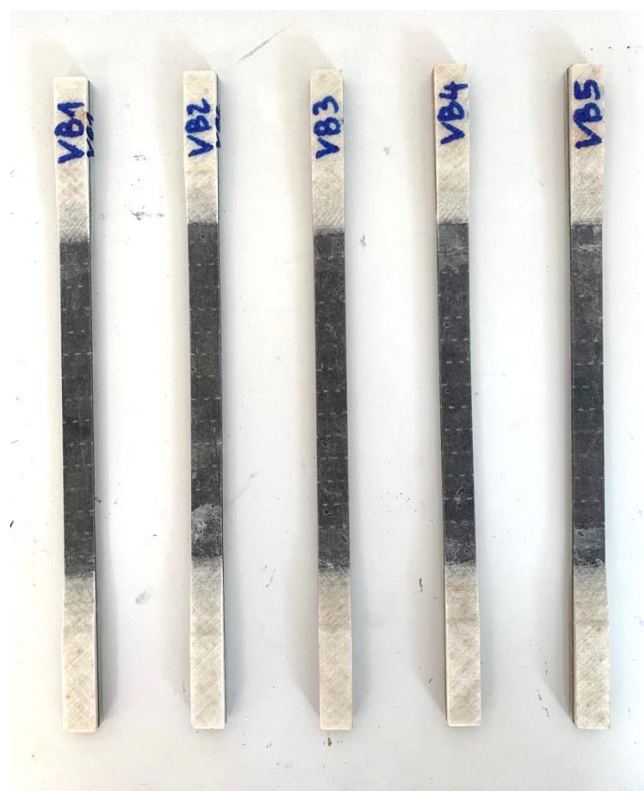
Slika 6.35. Uzorak u čeljustima s prihvatom ekstenzometra u sredini

Nakon cijele pripreme, uzorak se krenuo testirati. Cijelu proceduru namještanja i prednaprezanja je bilo potrebno obaviti za sve uzorke.

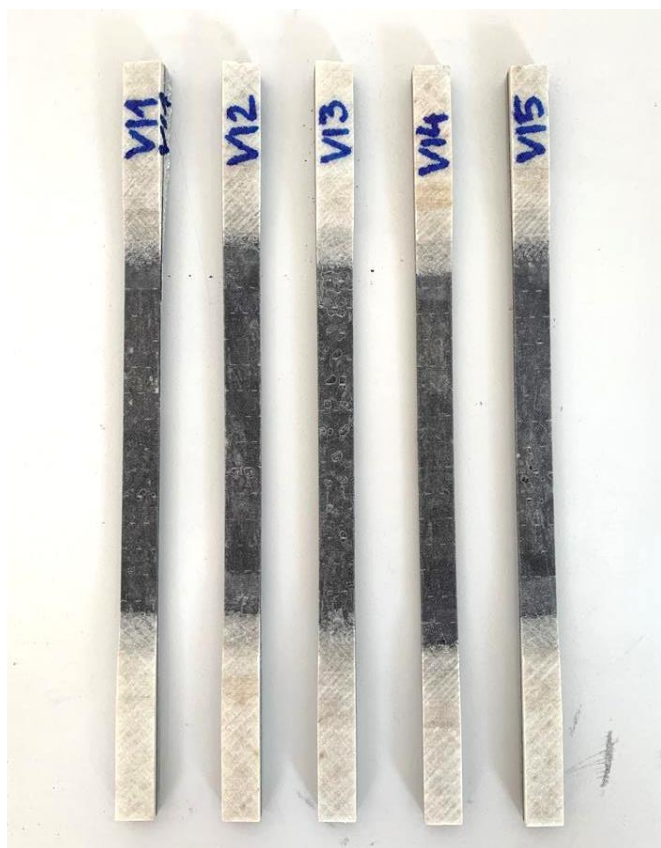
Kao što je već bilo opisano u poglavlju 8.5, uzorci su bili podjeljeni u tri grupe, RL (*Slika 6.36.*), VB (*Slika 6.37.*) i VI (*Slika 6.38.*). Uzorci su se numerirali od 1 do 5, i prema tehnološkoj metodi izrade. Nakon numeriranja započelo se testiranje.



Slika 6.36. Uzorci izrađeni ručnim dodirnim postupkom prije testiranja



Slika 6.37. Uzorci izrađeni postupkom vakuumiranja prije testiranja



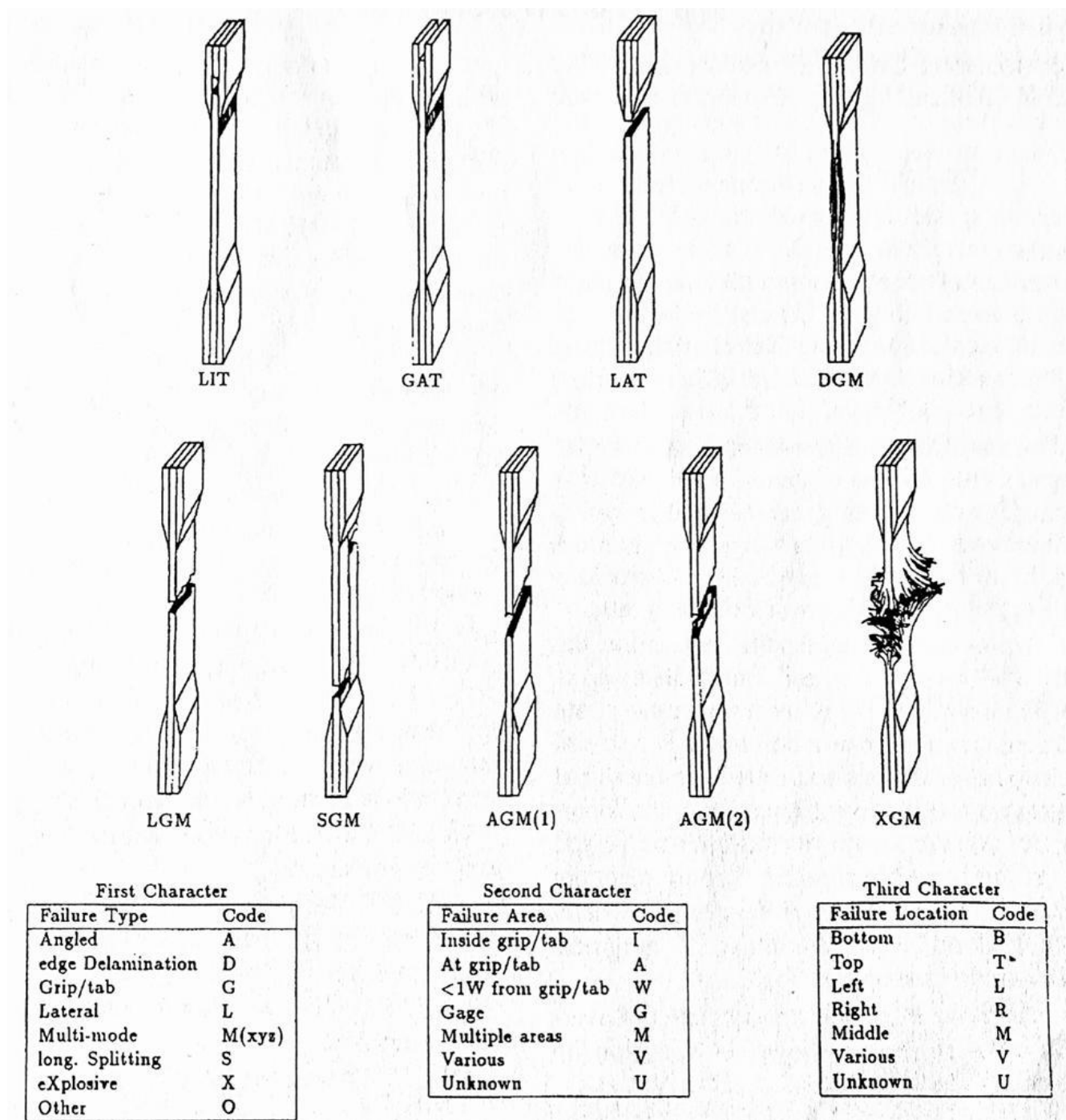
Slika 6.38. Uzorci izrađeni postupkom vakuumske infuzije prije testiranja

Testni uzorci kod ispitivanja metode izrade zadebljanja su prikazani na Slici 6.39.



Slika 6.39. Testni uzorci tab-ova prije testiranja

Za potrebe testiranja metode izrade zadebljanja nije bila potrebna detaljna obrada uzoraka. Također dimenzije ovih uzoraka su bile veće od zahtjevanih kako bi se testirali zadebljanja na opterećenja veća od očekivanih kod ostalih uzoraka. Uzorci su se krenuli rastezati do trenutka loma. Lom svakog uzorka je opisan u rezultatima prema standardu ASTM D 3039/D 3039M [3]. Na *Slici 6.40.* su prikazani lomovi uzoraka za kategorizaciju loma prema standardu [3].



Slika 6.40. Kategorizacija lomova uzoraka [3]

Cilj ovog ispitivanja je dobivanje modula elastičnosti E_I , vrijednosti naprezanja σ_I i deformacije ε_I . Iz grafova se izvlače vrijednosti vlačne sile F i pomak na ekstenzometru, odnosno pomak čeljusti kidalice ΔL .

Prema sljedećoj formuli se dobiva naprezanje σ_I :

$$\sigma_1 = \frac{F_{max}}{A} \quad (6.1)$$

F_{max} – maksimalna vlačna sila primijenjena na uzorak prije loma, N

A – površina poprečnog presjeka uzorka, mm²

Formulom (4.13) se dobiva deformacija ε_I .

Modul elastičnosti E_I dobiva se preko ranije navedene formule (4.12). Uspoređeni su rezultati dobiveni preko tangensa kuta nagiba krivulje u σ - ε dijagramu i putem razlomka vrijednosti naprezanja linearnog dijela krivulje i vrijednosti deformacije linearnog dijela krivulje. Treba biti oprezan kako bi se uzeo dio krivulje koji je linearan, kako bi vrijednost modula elastičnosti E_I bila točna.

6.4.2. Rezultati i diskusija

Prvo su prikazani rezultati uzoraka izrađeni ručnim dodirnim postupkom. Zatim su prikazani rezultati uzoraka izrađeni postupkom vakuumiranja mokrog laminata, nakon kojih su prikazani rezultatu izrađeni postupkom vakuumske infuzije. Svi testirani uzorci su prikazani na *Slici 6.41*.



Slika 6.41. Svi uzorci nakon testiranja

Na *Slici 6.42.* je prikazano pet uzorka izrađenih ručnim dodirnim postupkom nakon vlačnog testiranja.



Slika 6.42. Uzorci izrađeni ručnim dodirnim postupkom nakon testiranja

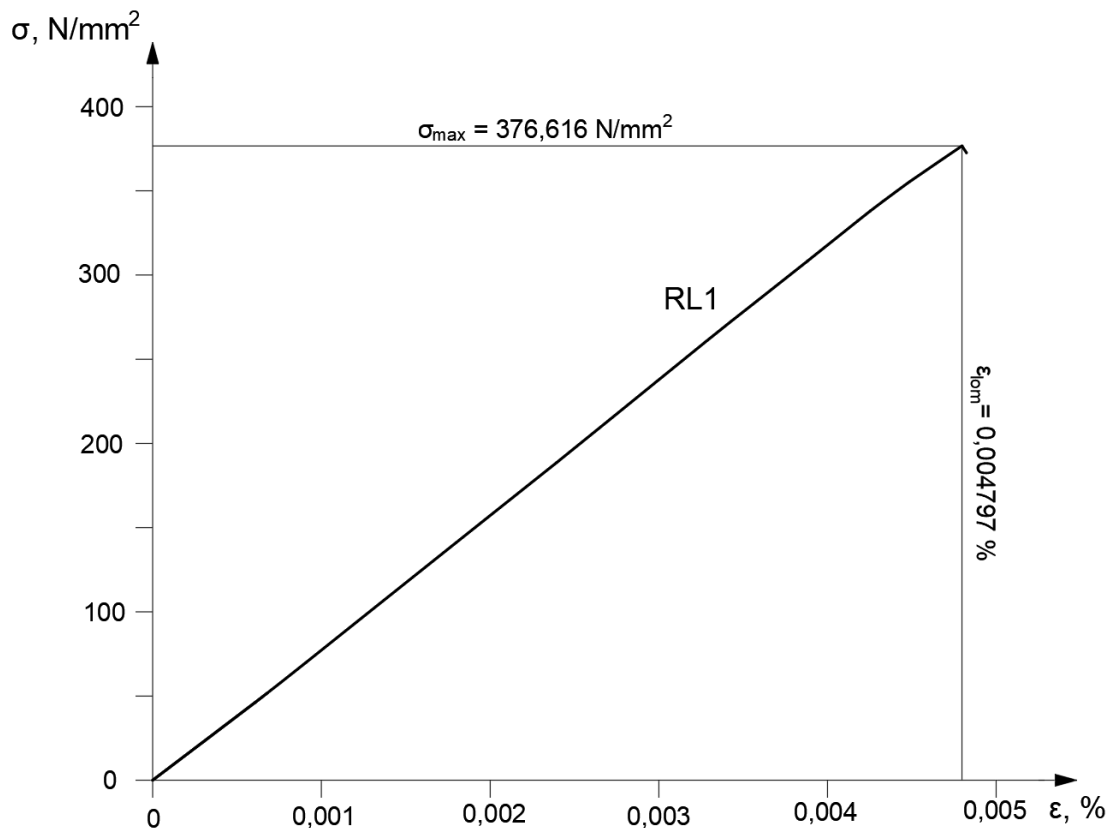
Može se uočiti više različitih vrsta lomova uzoraka. Kako bi se detaljno opisali lomovi uzoraka, prema *Slici 6.40.* preuzetoj iz standarda ASTM D 3039/D 3039M [3], napravila se kategorizacija lomova uzoraka. Uzorci izrađeni ovim postupkom većinom imaju oblik loma LAB (2 uzorka) i LIB (2 uzorka). LAB je ravni lom u području početka zadebljanja na dnu uzorka. Uzorci s LAB vrstom loma su RL1 i RL5. LIB je ravni lom u području unutar zadebljanja na dnu uzorka. Uzorci s LIB vrstom loma su RL2 i RL4. Uzorak RL3 je imao lom vrste LGM, što je vrsta ravnog loma u području mjerenja na sredini uzorka. U *Tablici 6.5.* su prikazani svi uzorci ručnog dodirnog postupka s kategorizacijom lomova.

Tablica 6.5. Kategorizacija lomova RL

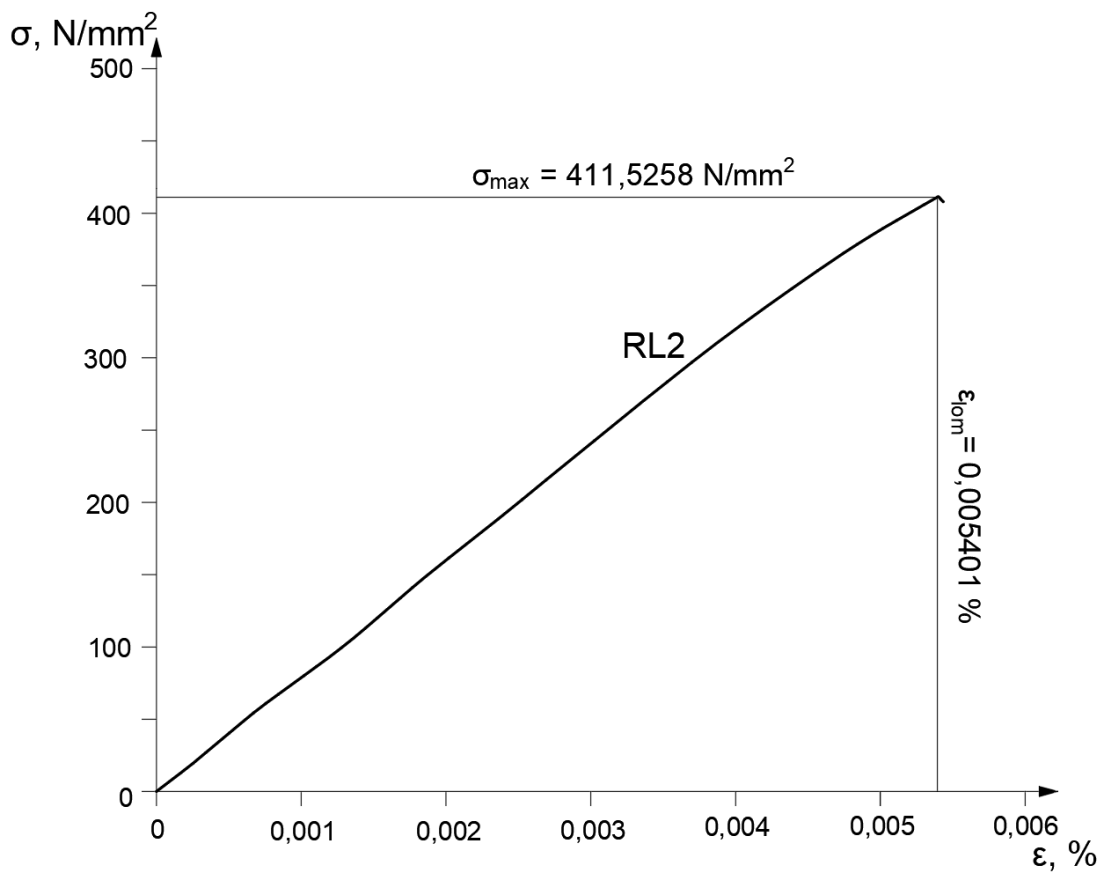
	OBLIK LOMA
RL1	LAB
RL2	LIB
RL3	LGM
RL4	LIB
RL5	LAB

Vrste lomova mogu biti različite, ali kod ovih uzoraka je bitno istaknuti prevladavnje ravnog loma na dnu uzorka. Svi uzorci su imali ravni lom. Od pet uzoraka, samo je jedan uzorak imao lom na sredini dok su ostali imali lom na dnu uzorka. U standardu nisu navedeni lomovi koji nisu dozvoljeni, što znači da su rezultati svih uzoraka valjani.

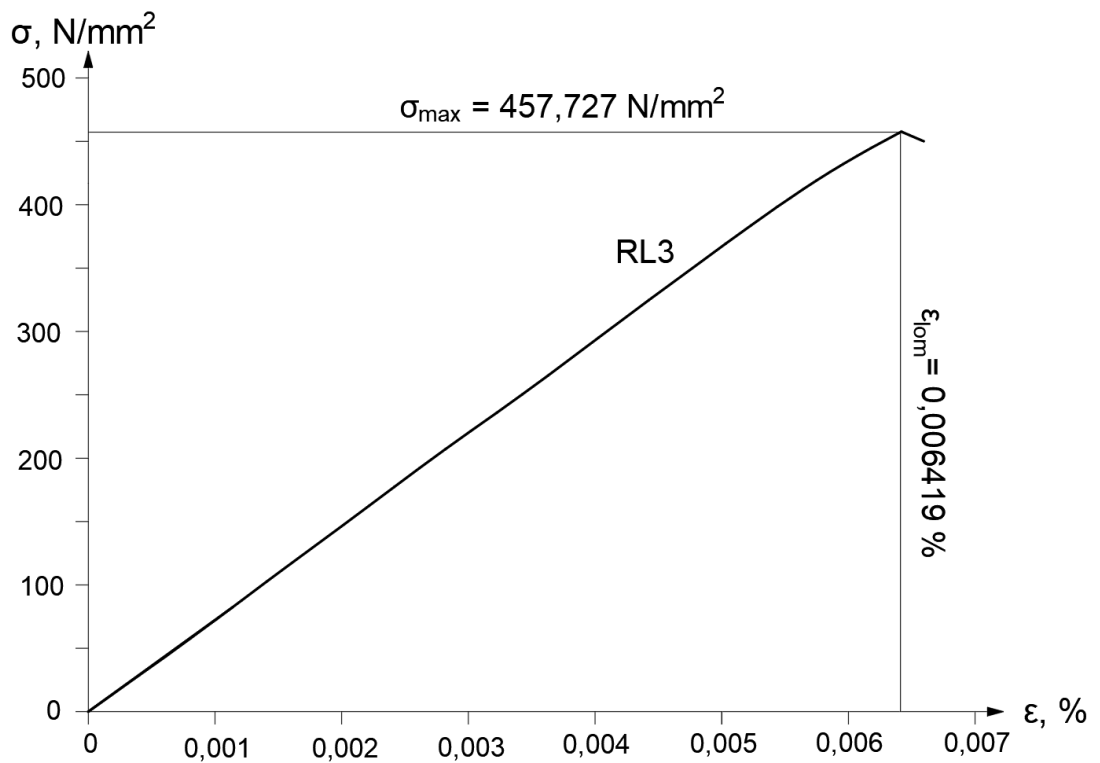
U sljedećim grafovima se prikazuju krivulje svakog uzorka u odnosu na vrijednosti maksimalnog naprezanja i deformacije od početka rastezanja do loma uzorka.



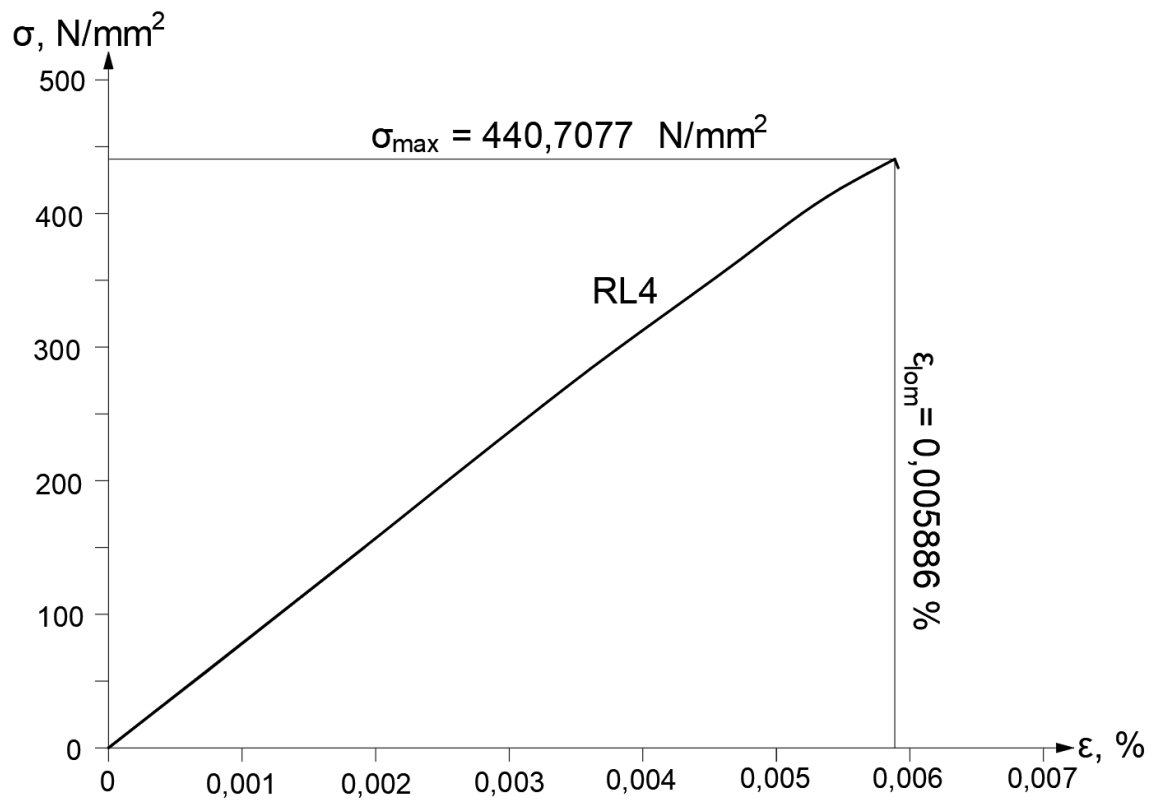
Slika 6.43. Graf σ - ϵ uzorak RL1



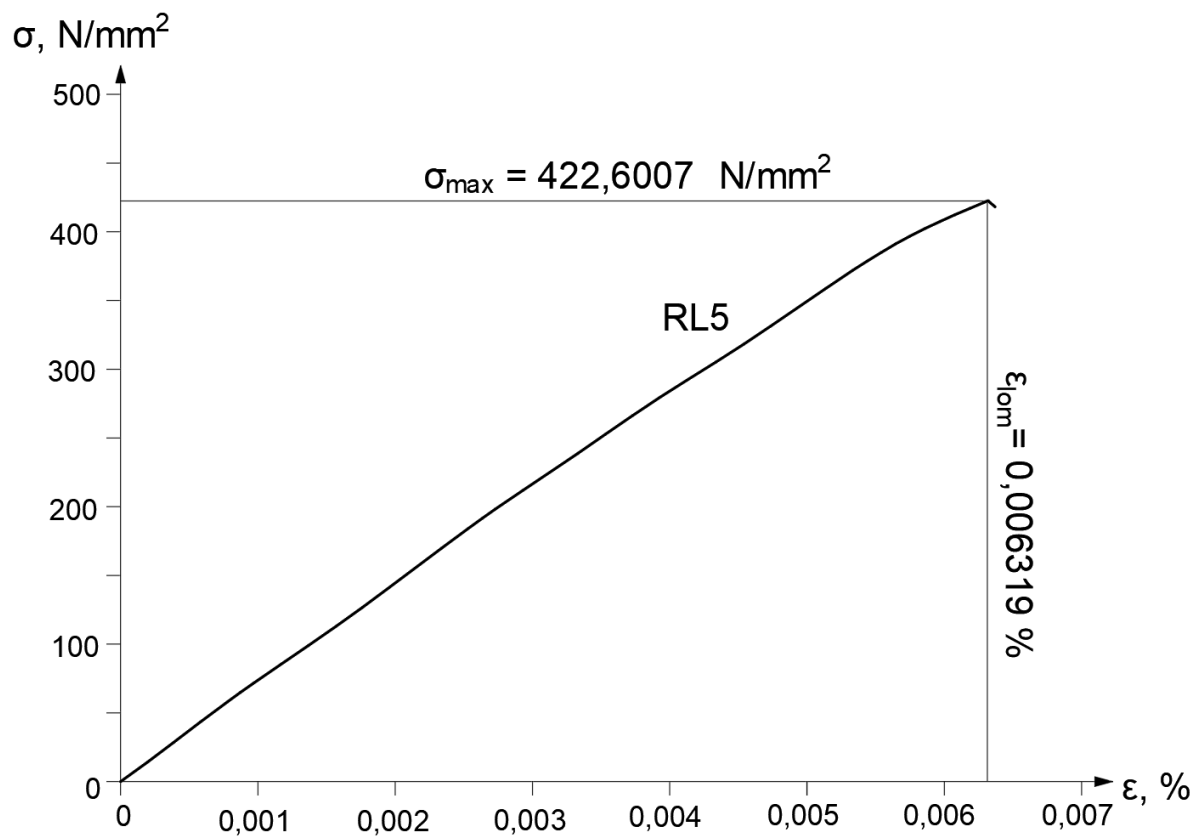
Slika 6.44. Graf σ - ϵ uzorak RL2



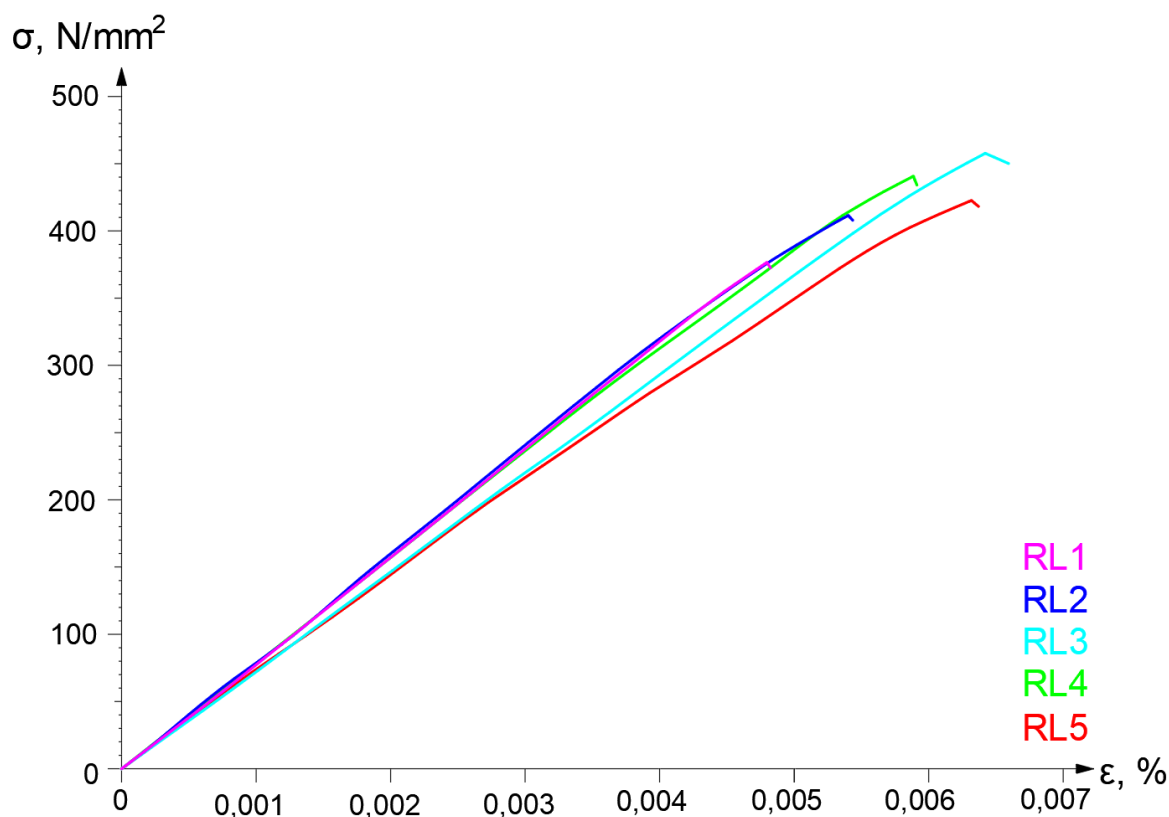
Slika 6.45. Graf σ - ϵ uzorak RL3



Slika 6.46. Graf σ - ϵ uzorak RL4



Slika 6.47. Graf σ - ϵ uzorak RL5



Slika 6.48. Usporedba uzoraka RL

Na svim grafovima se može uočiti linearnost krivulje i nagli lom. To dokazuje da se uzorak ravnomjerno rastezao i naglo pukao u trenutku maksimalnog normalnog naprezanja, što se može zamijetiti ravnim lomom kod svih pet uzoraka izrađenih ručnim dodirnim postupkom. Uzorak je nakon ravnog loma bio potpuno odvojen u dva dijela, što znači da se postigao potpuni lom uzorka. Na Slici 6.48. se vidi usporedba svih uzoraka ručnog dodirnog postupka. Najmanju vrijednost σ_{max} ima uzorak RL1, koja iznosi 376,616 MPa. Najveću vrijednost σ_{max} ima uzorak RL3, koja iznosi 457,727 MPa. Vrijednosti produljenja ϵ_{lom} ovisnog o veličini uzorka varira od 0,004797% kod RL1, do najvećeg produljenja od 0,006419% kod RL3. Što se tiče modula elastičnosti E_1 , kod RL3 je njegova najmanja vrijednost od 72,3849 GPa, a kod RL2 najveća u iznosu od 79,6727 GPa. Iako su poznate decimale svih vrijednosti, vrijednosti su se zaokružile radi bolje preglednosti. U Tablici 6.6. se mogu vidjeti najbitnije vrijednosti za svaki od uzoraka dobivene pomoću formula (4.12), (4.13) i (6.1).

Tablica 6.6. Promatrani parametri za usporedbu uzoraka RL

	RL1	RL2	RL3	RL4	RL5
F_{max} , N	11274	12565,9	14291	13442,1	13734
ΔL , mm	1,3816	1,5555	1,8488	1,6952	1,8261
σ_{max} , MPa	376,616	411,526	457,727	440,708	422,601
ε_{10m} , %	0,004797	0,005401	0,006419	0,005886	0,006319
E_1 , GPa ($\tan \alpha$)	76,2364	79,6727	72,3849	78,3913	72,6753
E_1 , GPa ($\sigma_{20}/\varepsilon_{20}$)	76,2368	79,6733	72,3849	78,3915	72,6752

U prikazanoj tablici su se također izvukli i statistički podaci vezani za srednju vrijednost svih pet uzoraka, standardna devijacija i standardna pogreška podataka, u prilogu je potpuna tablica sa statističkim podacima (*Prilog 3. Tablice eksperimenta vlačne čvrstoće sa statističkim podacima*). Srednja vrijednost maksimalnog naprezanja σ_{max} iznosi 421,835 MPa, uz standardnu pogrešku od 13,7769. Srednja vrijednost modula elastičnosti E_1 iznosi 75,8721 GPa, uz standardnu pogrešku od 1,4715. Već je spomenuto u poglavlju 6.4.1. kako se modul elastičnosti E_1 može dobiti preko formule (4.12) na dva načina. Jedan način je precizno mjerenje kuta na grafu, kojeg zatvara linearni dio početka krivulje i x-os. Drugi način je izmjeriti naprezanje po y-osi i deformaciju na x-osi, na kraju linearnog dijela krivulje. U tablicama su prikazana oba načina kako bi se utvrdila eventualna razlika. Razlika je minimalna što znači da je vrijednost modula elastičnosti E_1 vjerodostojna s oba načina mjerenja. Time se dobio uvid u točnost podataka, kao i srednja vrijednost svih promatranih parametara koji će se kasnije usporediti s proračunima.

Nakon testiranja uzoraka ručnog dodirnog postupka, krenulo se na testiranje uzoraka izrađenih postupkom vakuumiranja mokrog lamianta. Na *Slici 6.49.* je prikazano pet uzorka izrađenih postupkom vakuumiranja mokrog laminata nakon vlačnog testiranja.



Slika 6.49. Uzorci izrađeni postupkom vakuumiranja mokrog laminata nakon testiranja

Isto kao i kod rezultata uzoraka ručnog dodirnog postupka može se uočiti više različitih vrsta lomova uzoraka. Detaljno su se opisali lomovi uzoraka, prema *Slici 6.40.* preuzetoj iz standarda ASTM D 3039/D 3039M [3]. Isto kao i kod prethodnih rezultata, napravila se kategorizacija lomova uzoraka. Uzorci izrađeni postupkom vakuumiranja mokrog laminata su imali zanimljive lomove. Za razliku od uzoraka ručnog dodirnog postupka, ovi uzorci su imali više različitih vrsta lomova. Najzastupljeniji lom je XMV (2 uzorka), dok su ostali lomovi bili MMV (1 uzorak), SAT (1 uzorak) i XGM (1 uzorak). XMV predstavlja eksplozivni lom na više područja i na raznim mjestima na uzorku. Uzorci te vrste

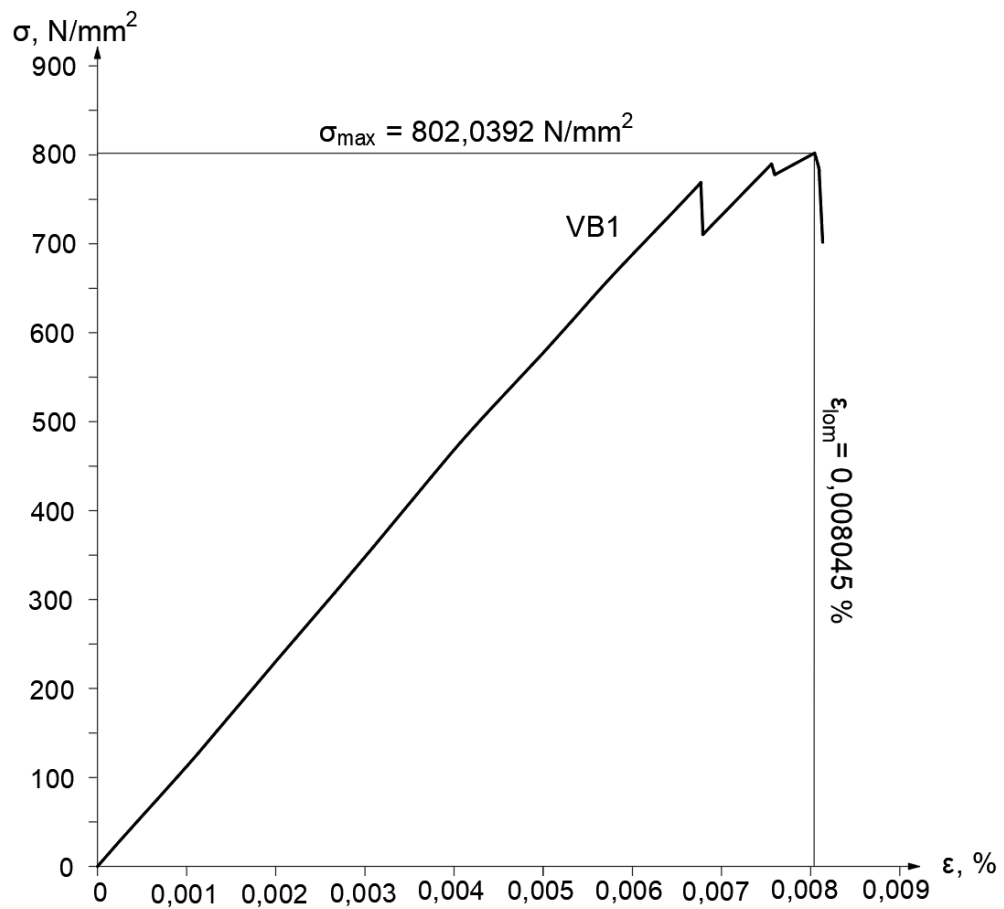
su VB3 i VB4. MMV predstavlja više vrsta lomova na više područja i na raznim mjestima na uzorku. MMV vrste loma je uzorak VB1. SAT je vrsta uzdužnog loma u području početka zadebljanja na vrhu uzorka. SAT vrsta loma je zatupljena kod uzorka VB2. XGM je vrsta eksplozivnog loma u mjernom području sredine uzorka. XGM uzorak predstavlja uzorak VB5. U *Tablici 6.7.* su prikazani svi uzorci ručnog dodirnog postupka sa kategorizacijom lomova.

Tablica 6.7. Kategorizacija lomova VB

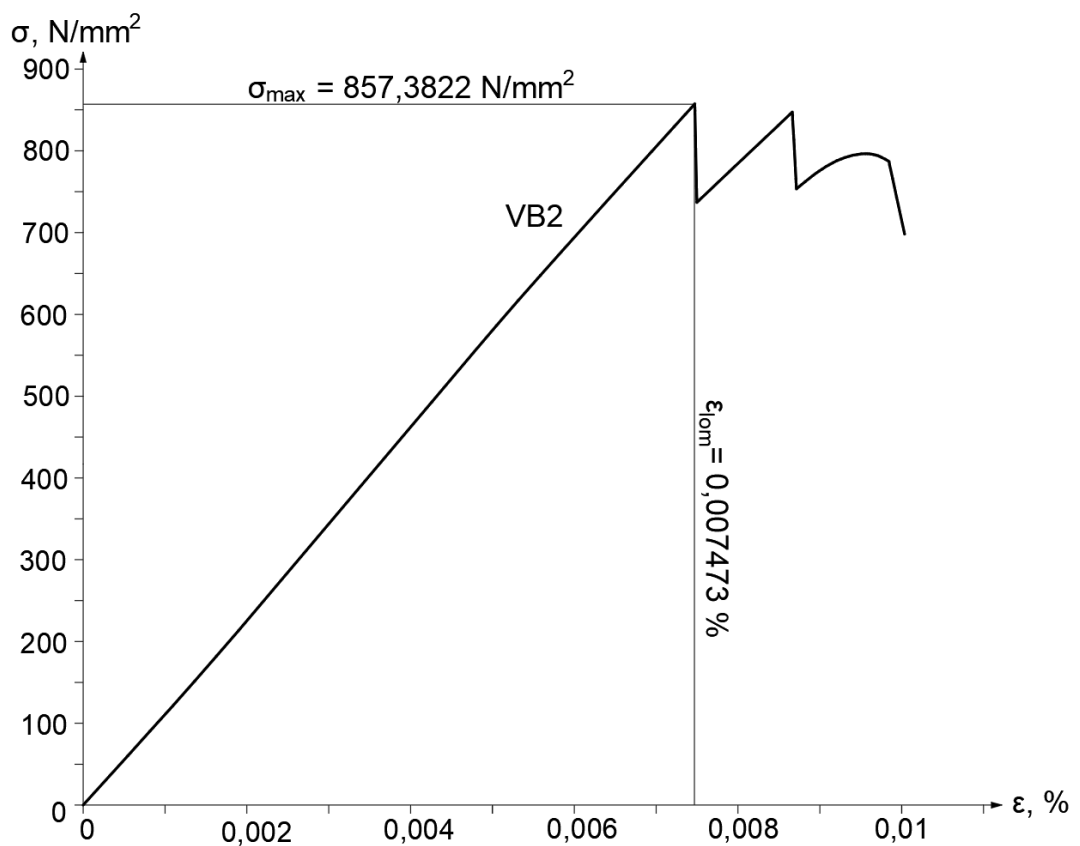
	OBLIK LOMA
VB1	MMV
VB2	SAT
VB3	XMV
VB4	XMV
VB5	XGM

Za razliku od uzoraka ručnog dodirnog postupka, može se zamjetiti da prevladava eksplozivni tip loma. Ovi uzorci su također imali lomove na više različitih mjesta, te se ne može točno odrediti koji lom je prvi nastao. Zbog toga što postoji više prisutnih vrsta lomova na pojedinim uzorcima, za očekivati je da će linija u grafovima maksimalnog naprežanja i deformacije σ - ε biti nelinearna. Uzrok tome je taj što se uzorak nakon prvog loma nastavio držati na ostatku vlakana, te nije došlo do potpunog loma. Potpuni lom nastao je tek kad su sva vlakna u uzorku popucala.

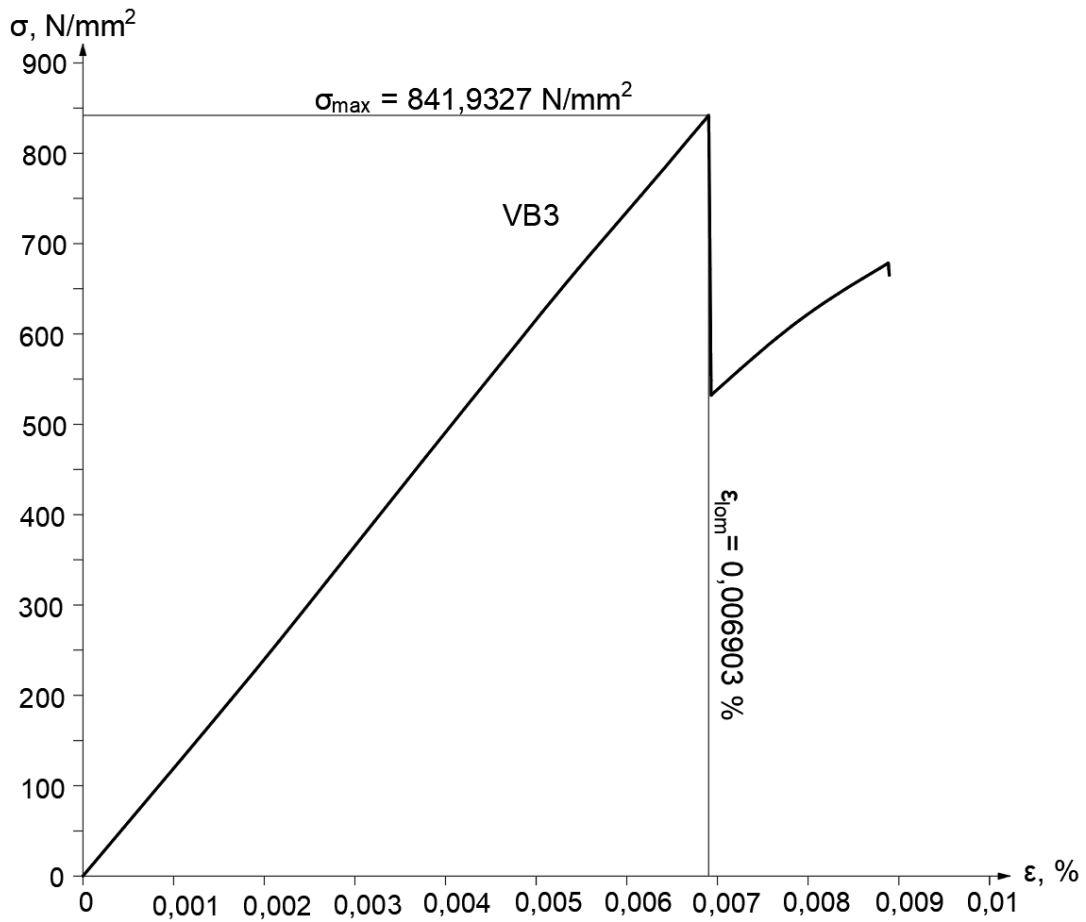
U sljedećim grafovima se prikazuju krivulje svakog uzorka u odnosu na vrijednosti maksimalnog naprežanja i deformacije od početka rastezanja do loma uzorka.



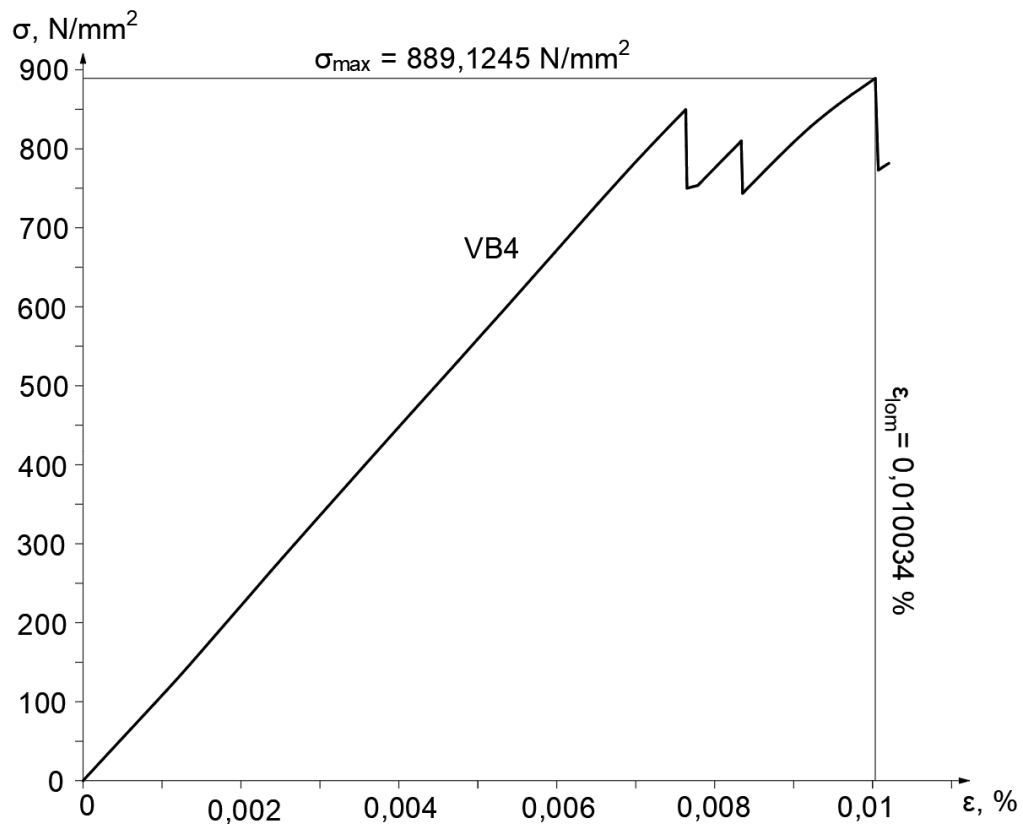
Slika 6.50. Graf σ - ϵ uzorak VB1



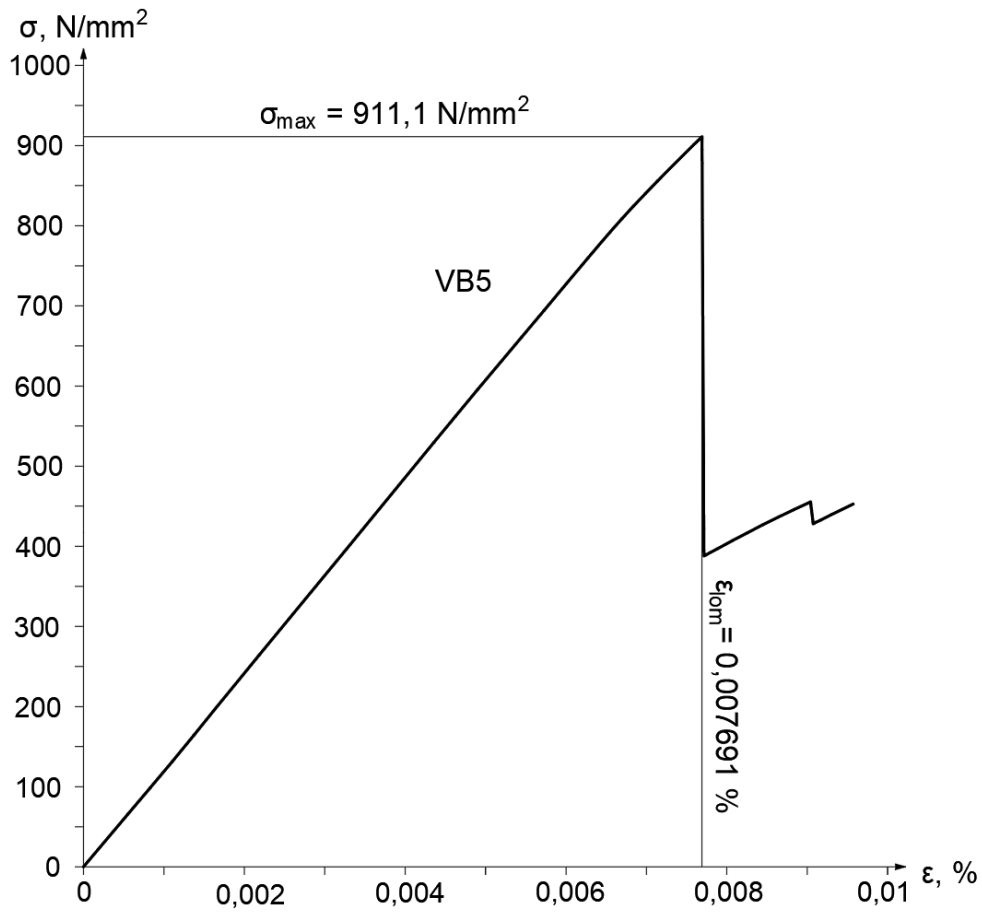
Slika 6.51. Graf σ - ϵ uzorak VB2



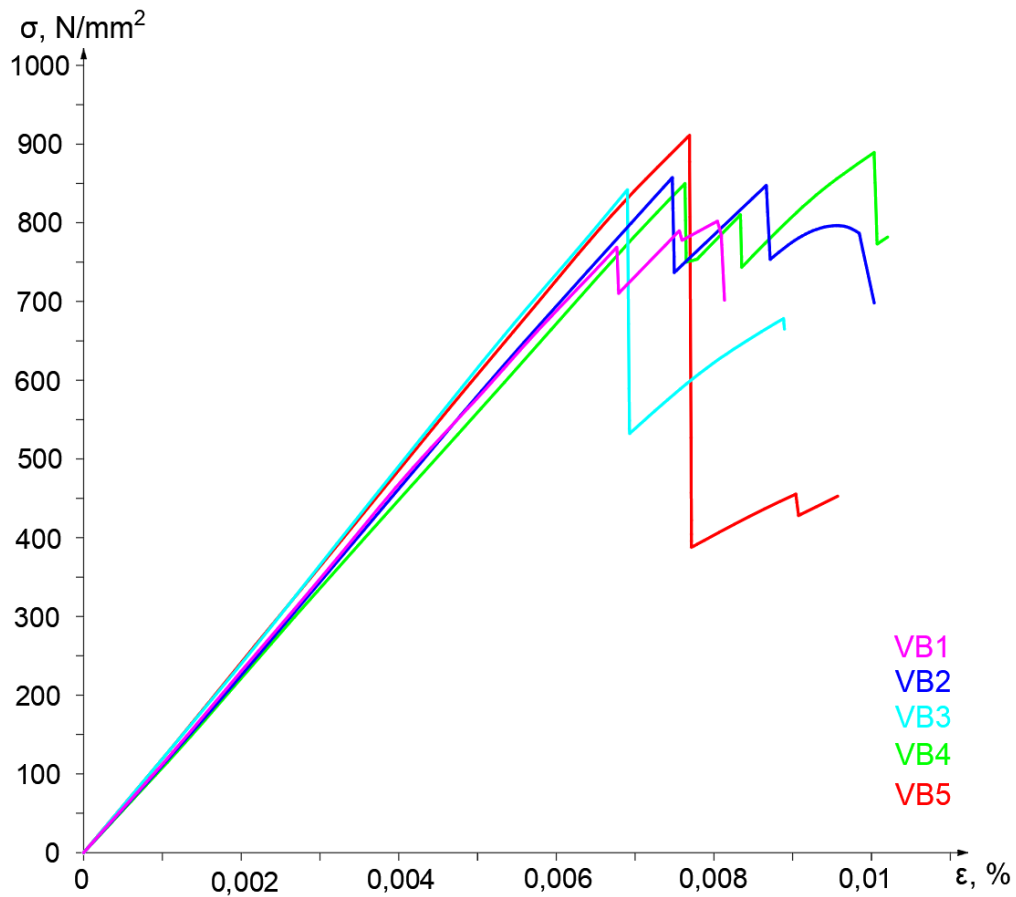
Slika 6.52. Graf σ - ϵ uzorak VB3



Slika 6.53. Graf σ - ϵ uzorak VB4



Slika 6.54. Graf σ - ϵ uzorak VB5



Slika 6.55. Usporedba uzoraka VB

Na prikazanim grafovima se uočava linearno područje kod svih uzoraka, kao i zanimljivi lomovi nakon σ_{max} . Kod ovih uzoraka je specifično to da svaki pad krivulje predstavlja lom određenog broja vlakana, ali ne i potpuni lom uzorka. Na primjer, kod uzoraka VB1 i VB4, uočava se da naprezanje σ ne popirna svoju maksimalnu vrijednost nakon prvog loma, nego tek nakon trećeg loma dolazi do potpunog loma uzorka i maksimalne vrijednosti naprezanja σ_{max} . Kod ostalih uzoraka VB2, VB3 i VB5, se maksimalno naprezanje ipak postiže na mjestu prvog loma. Ali, za razliku od VB3 i VB5 koji imaju prvi lom većeg intenziteta, uzorak VB2 ima prvi lom manjeg intenziteta jer su odmah nakon njega uslijedili još dva loma sličnog intenziteta dok uzorak nije postigao potpuni prijelom. Najmanju vrijednost σ_{max} ima uzorak VB1, koja iznosi 802,0392 MPa. Najveću vrijednost σ_{max} ima uzorak VB5, koja iznosi 911,1 MPa. Što se tiče modula elastičnosti E_1 , najmanju vrijednost ima uzorak VB4 u iznosu od 108,4261 GPa, a najveću vrijednost ima uzorak VB5 u iznosu od 120,5302 GPa. U *Tablici 6.8.* se mogu vidjeti najbitnije vrijednosti za svaki od uzoraka izrađenih postupkom vakuumiranja mokrog laminata dobivene pomoću formula (4.12), (4.13) i (6.1).

Tablica 6.8. Promatrani parametri za usporedbu VB

	VB1	VB2	VB3	VB4	VB5
F_{max} , N	15588,3	16377,6	15377,9	16899,5	18223,7
ΔL , mm	2,3169	2,1597	1,9879	2,8899	2,2227
σ_{max} , MPa	802,039	857,382	841,933	889,125	911,100
ε_{lom} , %	0,008045	0,007473	0,006903	0,010034	0,007691
E_1 , GPa ($\tan \alpha$)	112,4836	112,0231	119,8375	108,4261	120,5302
E_1 , GPa ($\sigma_{20}/\varepsilon_{20}$)	112,4843	112,0231	119,8379	108,4267	120,5305

Isto kao i kod prethodnih uzoraka ručnog dodirnog postupka, izradila se tablica s parametrima svakog uzorka. Također su se izvukli i statistički podaci vezani za srednju vrijednost svih pet uzoraka, standardna devijacija i standardna pogreška podataka. Ista tablica sa statističkim podacima se nalazi u prilogu (*Prilog 3.*). Srednja vrijednost maksimalnog naprezanja σ_{max} iznosi 860,3157 MPa, sa standardnom pogreškom od 18,9098. Srednja vrijednost modula elastičnosti E_1 iznosi 114,6601 GPa, sa standardnom pogreškom od 2,3645.

Na *Slici 6.56.* je prikazano pet uzorka izrađenih vakuumskim infuzijskim postupkom nakon vlačnog testiranja.



Slika 6.56. Uzorci izrađeni vakuumskim infuzijskim postupkom nakon testiranja

Kod ovih uzoraka se može uočiti manje različitih vrsta lomova uzoraka. Prema *Slici 6.40.* preuzetoj iz standarda ASTM D 3039/D 3039M [3], odradila se kategorizacija vrsta lomova kao i kod prethodnih uzoraka. Uzorci izrađeni vakuumskim infuzijskim postupkom imaju lomove tipova LGM (2 uzorka), LMV (2 uzorka) i LAB (1 uzorak). Sve navedene vrste lomova su ravni lomovi što znači da bi se na grafovima σ - ϵ trebao vidjeti nagli pad krivulje nakon postizanja maksimalnog naprežanja

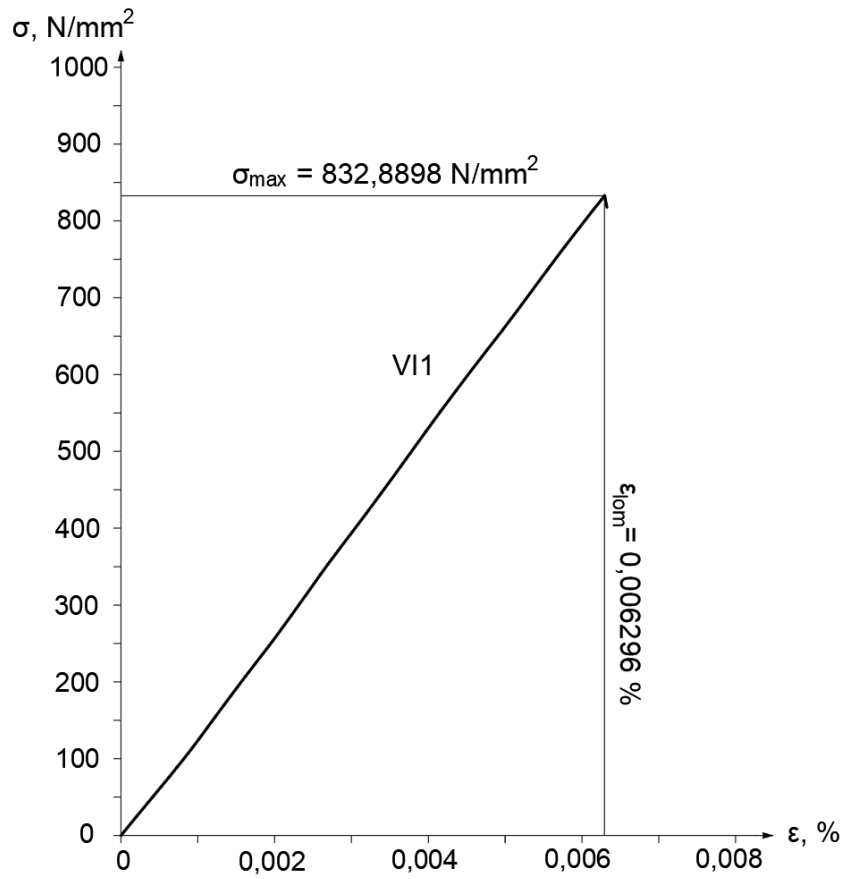
σ_{max} , kao kod uzoraka ručnog dodirnog postupka. LGM vrsta loma predstavlja ravni lom u mjernom području na sredini uzorka. Primjer LGM vrste loma su uzorci VI1 i VI5. LMV vrsta loma je ravni lom u više područja na raznim mjestima po uzorku. Primjer LMV vrste loma su uzorci VI2 i VI3. LAB vrsta loma je ravni lom smješten uz zadebljanje na dnu uzorka. Primjer LAB vrste loma je uzorak VI4. U *Tablici 6.9.* su prikazani svi uzorci vakuumske infuzije s kategorizacijom lomova prema standardu.

Tablica 6.9. Kategorizacija lomova VI

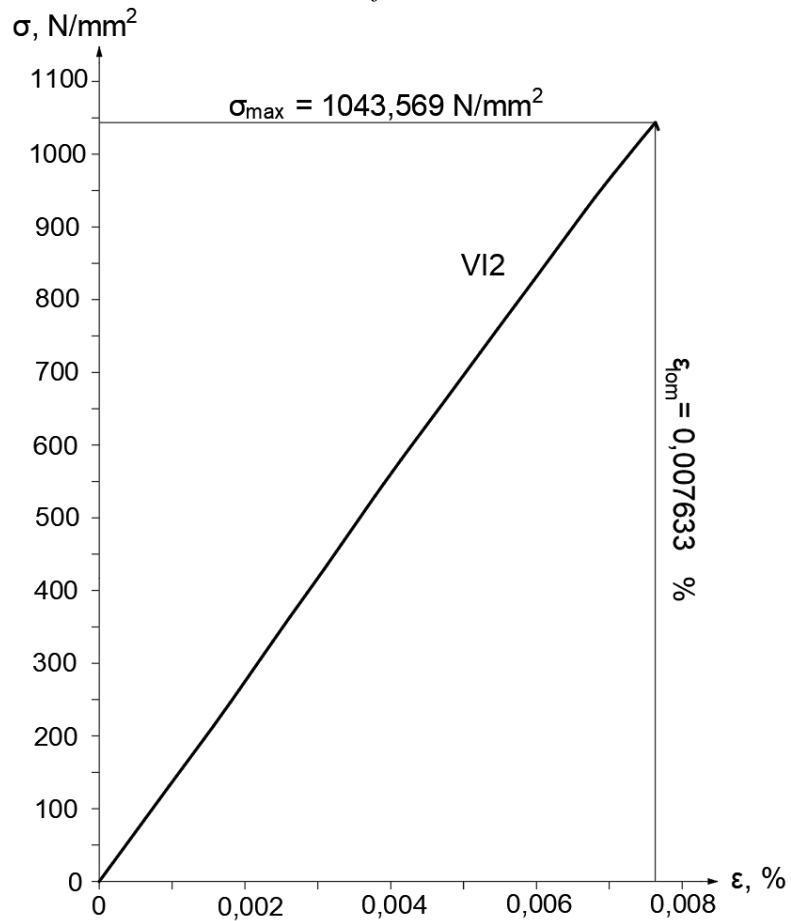
	OBLIK LOMA
VI1	LGM
VI2	LMV
VI3	LMV
VI4	LAB
VI5	LGM

Lomovi ovih uzoraka su slični lomovima uzoraka ručnog dodirnog postupka. Za razliku od uzoraka vakuumiranja mokrog laminata, ovi uzorci nisu imali eksplozivne vrste lomova, nego su potpuni lom doživjeli odmah nakon postizanja maksimalnog opterećenja σ_{max} .

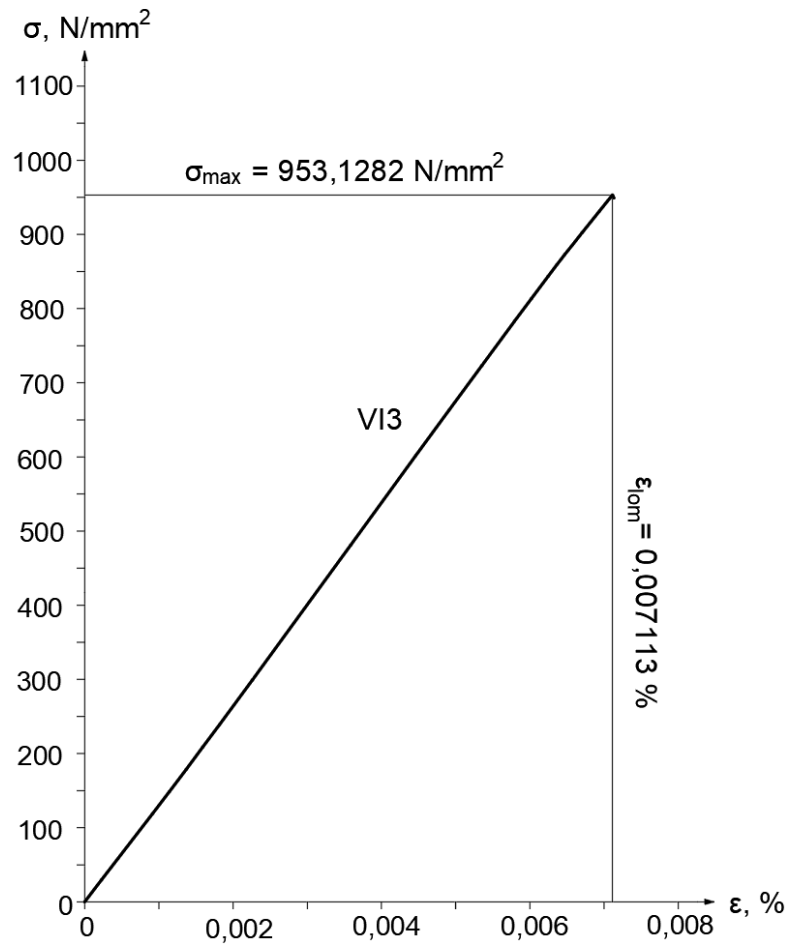
U sljedećim grafovima se prikazuju krivulje svakog uzorka u odnosu na vrijednosti maksimalnog naprezanja i deformacije od početka rastezanja do loma uzorka.



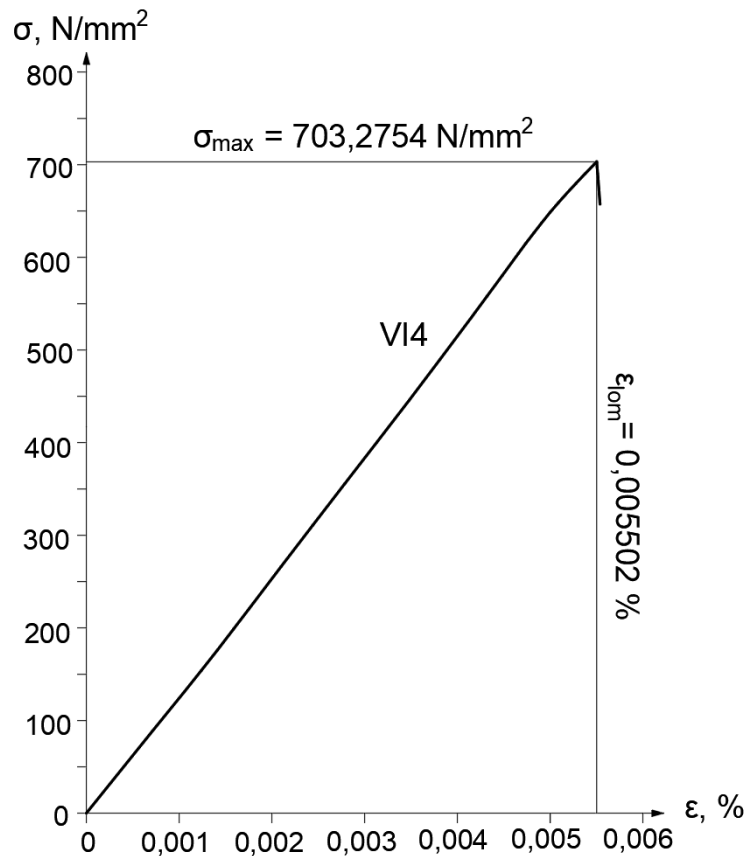
Slika 6.57. Graf σ - ϵ uzorak VI1



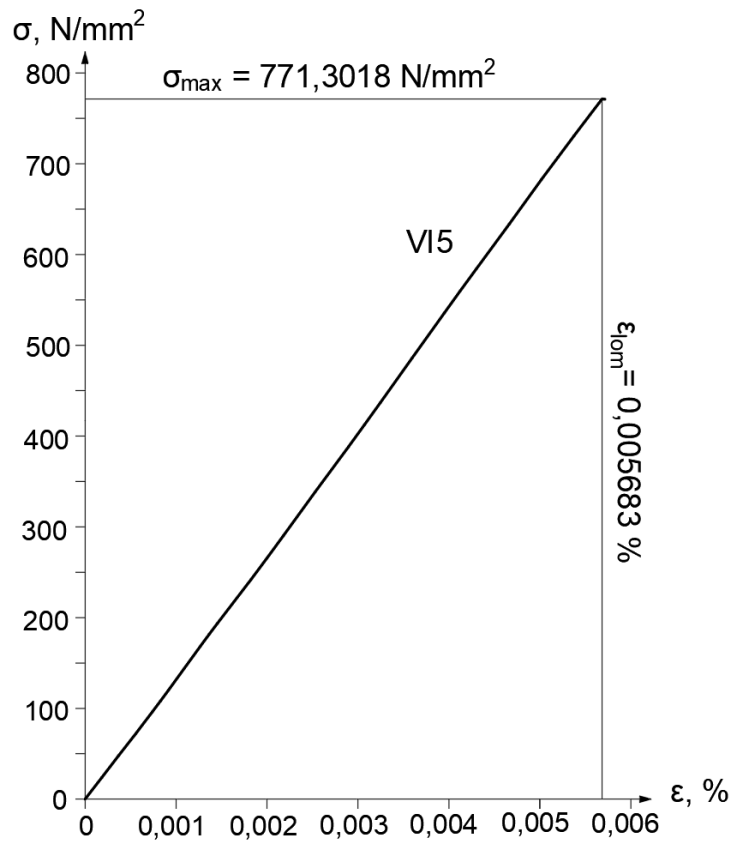
Slika 6.58. Graf σ - ϵ uzorak VI2



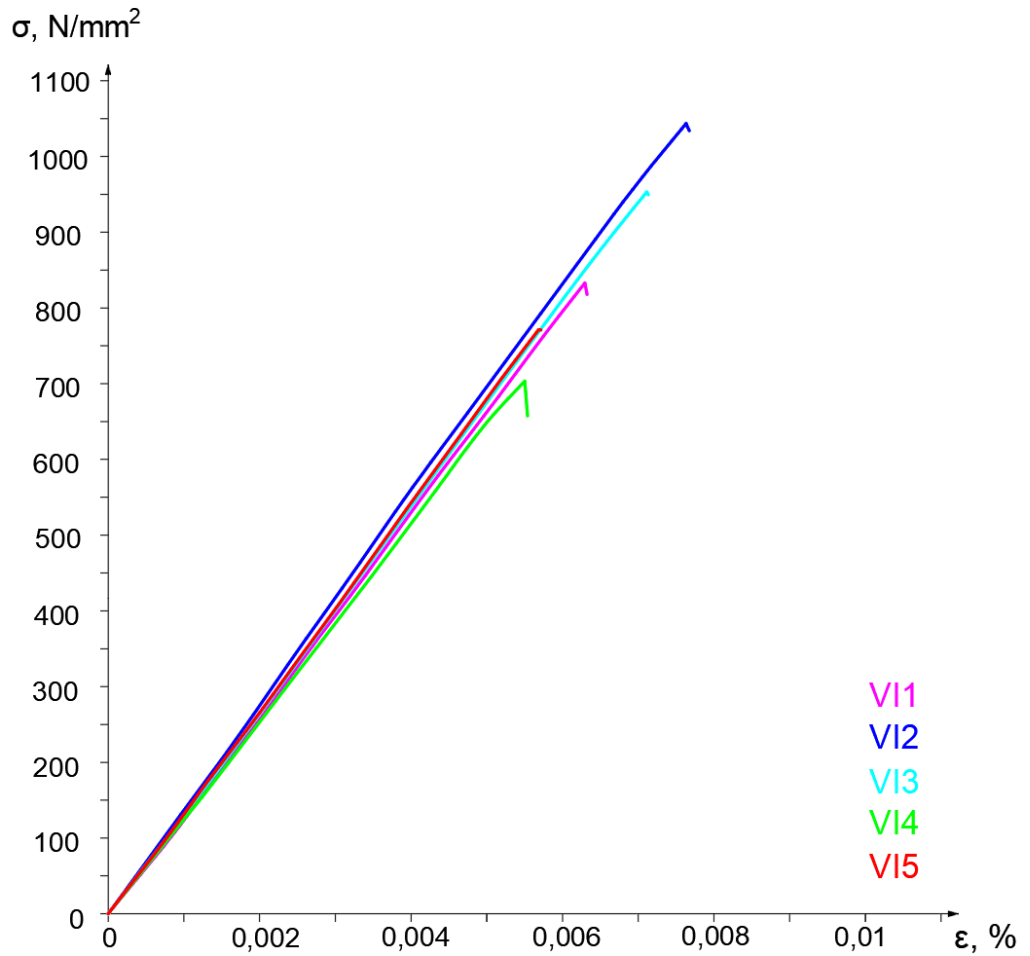
Slika 6.59. Graf σ - ϵ uzorak VI3



Slika 6.60. Graf σ - ϵ uzorak VI4



Slika 6.61. Graf σ - ϵ uzorak VI5



Slika 6.62. Graf σ - ϵ svih testnih uzoraka

Na grafovima ovih uzoraka mogu se uočiti jasna mjesta potpunog loma. Krivulje su linearno usmjerene prema vrijednostima maksimalnih naprezanja nakon čega uzorak doživljava potpuni lom svih vlakana. To se vidi naglim padom krivulje u svim grafovima. Usporedbom krivulja svih uzoraka vidi se da su uzorci ujednačeni, te da je nagib krivulja približno isti do vrijednosti deformacija 0,002 %. Najmanju vrijednost maksimalnog naprezanja σ_{max} ima uzorak VI4, koja iznosi 703,275 MPa. Najveću vrijednost maksimalnog naprezanja σ_{max} ima uzorak VI2, koja iznosi 1043,569 MPa. Vrijednost modula elastičnosti E_I je najmanja kod uzorka VII koja iznosi 122,1263 GPa, a najveća vrijednost modula elastičnosti E_I je kod uzorka VI2 koja iznosi 136,5628 GPa. U *Tablici 6.10.* se mogu vidjeti najbitnije vrijednosti za svaki od uzoraka izrađenih vakuumskim infuzijskim postupkom dobivene pomoću formula (4.12), (4.13) i (6.1).

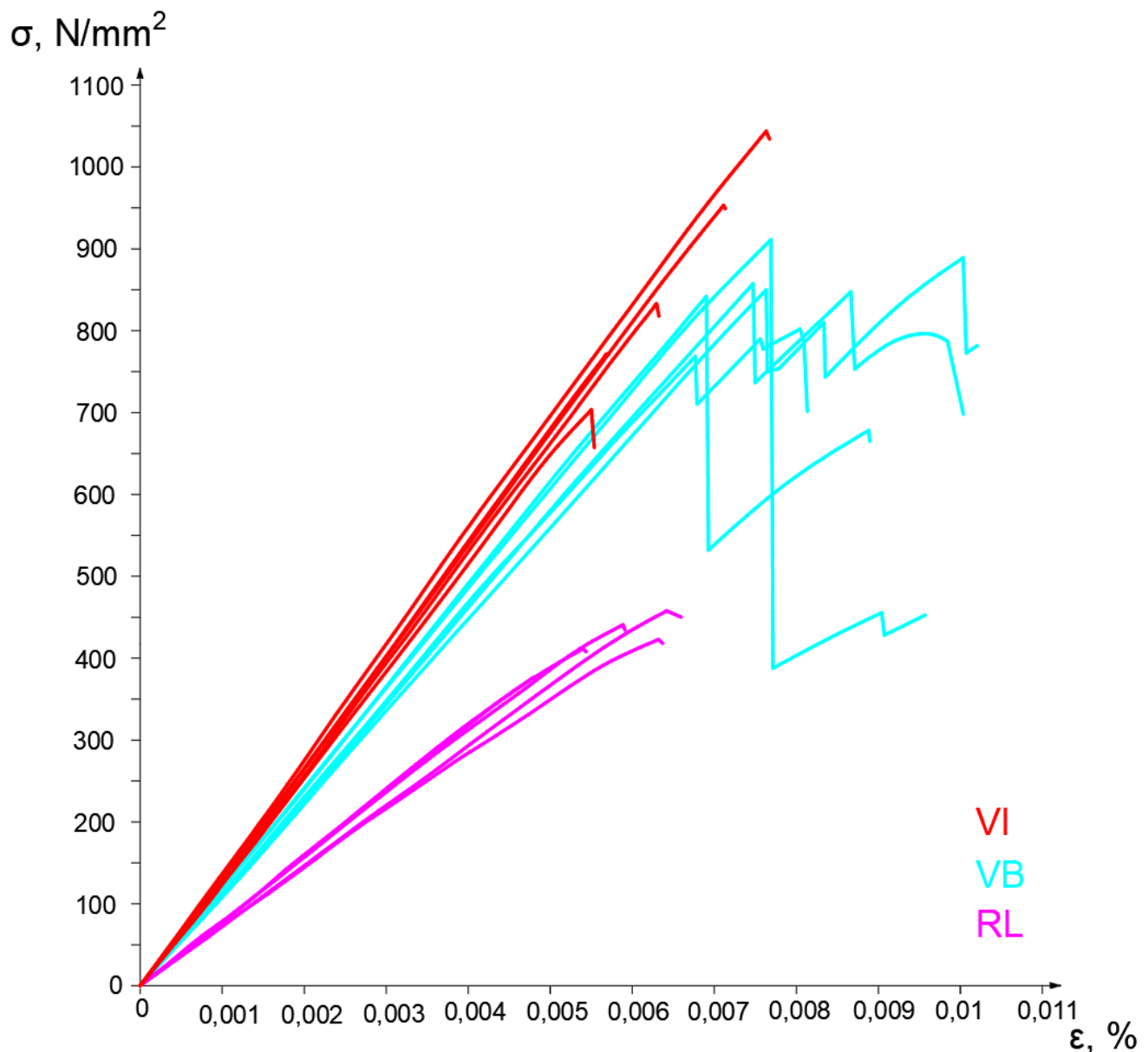
Tablica 6.10. Promatrani parametri za usporedbu uzoraka VI

	VII	VI2	VI3	VI4	VI5
F_{max} , N	14646,7	17424,3	16727,4	12691,8	13384,4
ΔL , mm	1,8195	2,1982	2,0558	1,5900	1,6368
σ_{max} , MPa	832,890	1043,569	953,128	703,275	771,302
ϵ_{lom} , %	0,006296	0,007633	0,007113	0,005502	0,005683
E_I , GPa (tan α)	122,1563	136,5628	131,0719	124,4439	130,0810
E_I , GPa ($\sigma_{20}/\epsilon_{20}$)	122,1574	136,5625	131,0723	124,4445	130,0811

Iz tablice se jasno vidi velika razlika u vrijednostima maksimalnog naprezanja σ_{max} uzorka VI2 i VI4, koja iznosi čak 340,2936 MPa razlike između uzoraka. Radi tih vrijednosti standardna pogreška zastupa veću vrijednost, a prikazana je u tablici u prilogu (*Prilog 3.*), s ostalim statističkim podacima. Srednja vrijednost maksimalnog naprezanja σ_{max} iznosi 860,833 MPa uz standardnu pogrešku od 61.454. Može se uočiti skoro ista srednja vrijednost maksimalnog naprezanja kao i kod uzoraka izrađenih postupkom vakuumiranja mokrog laminata. Srednja vrijednost modula elastičnosti E_I iznosi 128,8632 GPa, sa standardnom pogreškom od 2,55105. Iako su srednje vrijednosti maksimalnog naprezanja σ_{max} kod oba postupka skoro ista, vidi se razlika kod vrijednosti modula elastičnosti E_I . Razlog tome su vrijednosti deformacije ϵ_{lom} čija je srednja vrijednost kod postupka vakuumiranja mokrog laminata iznosila 0,00803, dok je kod ovog postupka iznosila 0,00645. Prema formuli (4.12) maksimalno naprezanje σ_{max} se dijeli s deformacijom ϵ_{lom} , što finalno daje veći modul elastičnosti kod ovog postupka izrade.

7. DISKUSIJA

Kroz izrađene eksperimente i obrade velikog broja podataka, potrebno je bilo izvući nekoliko zaključaka vezanih za cjelokupni rad. Cilj ovog rada je bio dokazati različita mehanička svojstva kompozitnog materijala izrađenog različitim tehnološkim metodama, što se i dokazalo. To dokazuje kombinacija svih grafova naprezanja i deformacija σ - ϵ , koji su u prošlim poglavljima bili izdvojeni za svaki uzorak posebno, (Slika 7.1.). U ovom grafu su različitim bojama prikazane različite metode izrade uzoraka. RL (boja magenta) predstavlja grupu uzoraka izrađenih ručnim dodirnim postupkom, VB (boja cijan) predstavlja grupu uzoraka izrađenih postupkom vakuumiranja mokrog laminata i VI (boja crvena) uzorke izrađene vakuumskim infuzijskim postupkom.



Slika 7.1. Graf σ - ϵ svih testiranih uzoraka u eksperimentu vlačne čvrstoće

Iz navedenog grafa svih testiranih uzoraka, istih dimenzija prema standardu ASTM D 3039/D 3039M [3], dolazi se do zaključka kako tehnološka metoda izrade kompozitnih materijala vakuumskim infuzijskim postupkom daje kompozitni materijal s najboljim mehaničkim svojstvima u smjeru vlakana. Osim toga, prema proračunu iz *Tablice 6.10.* mogu se uočiti veće vrijednosti modula elastičnosti E_l od ostalih metoda izrade kompozitnog materijala. Odmah iza tehnološke metode izrade vakuumskim infuzijskim postupkom, nalazi se postupak vakuumiranja mokrog laminata. Mehanička svojstva uzoraka izrađenih tim postupkom dosta su slične uzorcima vakuumske infuzije, ali je razlika vidna prema grafu. Razlog sličnosti ova dva postupka je primjena vakuuma na laminat, koji pritišće pokrivač kojim se laminat brtvi. Time se istiskuje višak smole prema separatoru za smolu, što uzrokuje manju debljinu laminata. Za razliku od svih ostalih testiranih uzoraka, ovaj postupak je izradio uzorke specifičnih lomova kod vlačnog testiranja. Uzorci izrađeni ovim postupkom imali su više vrsta različitih lomova po pojedinim uzorcima. Najzastupljeniji lom kod ove metode je bio eksplozivnog tipa, gdje se uzorak potpuno razletio nakon loma u više manjih komadića kompozita. Suprotno tome, uzorci izrađeni vakuumskim infuzijskim postupkom i uzorci izrađeni ručnim dodirnim postupkom imaju jasno naznačeno mjesto loma. To je vidljivo iz kategorizacije lomova uzoraka, gdje su svi uzorci tih tehnoloških metoda izrade imali ravni lom uzorka. Na to upućuje i graf σ - ϵ u kojem se jasno vidi nagli lom krivulje. Na kraju, mehanička svojstva uzoraka izrađenih ručnim dodirnim postupkom, su se pokazala najlošija, što se može vidjeti i na grafu u usporedbi s ostalim metodama, (*Slika 7.1.*). Uzrok lošijim mehaničkim svojstvima je višak smole koji se nanosi ručnim postupkom. U ovoj tehnološkoj metodi izrade, o kvaliteti kompozita i kvaliteti mehaničkih svojstava kompozita najviše ovisi ljudski faktor. Razlog tome je zato što osoba koja izrađuje laminat ovim postupkom ne može primijeniti točnu količinu smole koja je potrebna za povezivanje slojeva kompozita. Još jedan razlog lošije kvalitete i lošijih mehaničkih svojstava kompozita izrađenog ovom metodom je taj što se nema gdje odvoditi višak smole tokom izrade, te zbog tog viška smole nastaje laminat veće debljine. Prema obrađenim podacima uzoraka i izračunatim srednjim vrijednostima promatranih parametara, dolazi se do sljedećih zaključaka. Najveće produljenje uzorka također se nalazi kod postupka vakuumiranja mokrog laminata, a iznosi 2,3154 mm srednje vrijednosti. Ukoliko se ta vrijednost podijeli s duljinom uzorka prema formuli (4.13), dobije se srednja vrijednost duljinske deformacije od 0,008029% duljine uzorka. Produljenje kod uzoraka vakuumske infuzije iznosi 1,86 mm srednje vrijednosti i 0,006445% srednje vrijednosti duljinske deformacije ovisne o duljini uzorka. Kod uzoraka ručnog dodirnog postupka srednja vrijednost produljenja iznosi 1,6614 mm, a srednja vrijednost duljinske deformacije 0,0057644% ovisne o duljini uzorka. Najveća vrijednost produljenja koja se javlja kod uzoraka

izrađenih postupkom vakuumiranja mokrog laminata je zato što su ti uzorci imali više manjih lomova, što je omogućilo veće produljenje uzorka prije potpunog loma. To se može primjetiti i po krivuljama VB grupe na prikazanom σ - ε grafu (*Slika 7.1.*), jer su krivulje isjeckane na više mjesta. Zanimljivo je svratiti pozornost na vrijednosti maksimalnog naprezanja σ_{max} , pošto je ta srednja vrijednost testiranih uzoraka gotovo ista kod uzoraka vakuumske infuzije i uzoraka izrađenih vakuumiranjem mokrog laminata. Također je vidna velika razlika srednje vrijednosti maksimalnog naprezanja σ_{max} , uzoraka izrađenih ručnim dodirnim postupkom od vakuumskih metoda izrade. Koristeći sve prethodno spomenute parametre u kombinaciji s formulom (4.12), dobivaju se vrijednosti traženog modula elastičnosti E_l u smjeru vlakana. Srednja vrijednost modula elastičnosti E_l kod uzoraka vakuumske infuzije je najveća, a iznosi 128,9 GPa. Zatim kod uzoraka izrađenih postupkom vakuumiranja mokrog laminata, modul elastičnosti E_l iznosi 114,7 GPa, i kod uzoraka ručnog dodirnog postupka je ta vrijednost najmanja, a iznosi 75,9 GPa za isti sastav kompozita. U sljedećoj tablici se mogu vidjeti razlike između srednjih vrijednosti rezultata svake tehnološke metode, (*Tablica 7.1.*).

Tablica 7.1. Usporedba parametara različitih grupa izrade uzoraka

SREDNJE VRIJEDNOSTI	RL	VB	VI
F_{max} , N	13061,4	16493,4	14974,92
ΔL , mm	1,6614	2,3154	1,8600
σ_{max} , MPa	421,835	860,316	860,833
ε_{lom} , %	0,0057644	0,0080292	0,0064454
E_1 , GPa ($\tan \alpha$)	75,8721	114,6601	128,8632
E_1 , GPa ($\sigma_{20}/\varepsilon_{20}$)	75,8723	114,6605	128,8635

Prema odrađenim proračunima mikromehanike kompozita, ISO 12215-5:2008 norme [6] i ISO 12215-5:2019 norme [7], može se zaključiti kako krajnje vrijednosti traženog modula elastičnosti E_l , dobivene preko tih proračuna, nisu jednake. Vrijednosti stvarnog modula elastičnosti i proračunskog modula elastičnosti preko mikromehanike, za uzorke izrađene ručnim dodirnim postupkom se

razlikuju za 28%, kod uzoraka izrađenih vakumiranjem mokrog laminata ta razlika iznosi 12,5%, a kod uzoraka izrađenih vakuumskim infuzijskim postupkom 1,6% što je najbliža vrijednost stvarnog i proračunskog modula elastičnosti. Formulama iz proračuna putem ISO 12215-5:2008 norme [6], te razlike su manje. Kod ručnog dodirnog postupka razlika u vrijednosti modula elastičnosti iznosi 14,8%, kod uzoraka izrađenih vakuumiranjem mokrog laminata 3%, a kod uzoraka izrađenih vakuumskim infuzijskim postupkom 13,8%. Formulama iz proračuna putem ISO 12215-5:2019 norme [7], kod uzoraka ručnog dodirnog postupka razlika je 11%, za uzorke vakuumiranja mokrog laminata nisu priloženi podaci u ISO normi [7], a za uzorak vakuumske infuzije razlika je 11,6%. Nakon promatranja ovih podataka može se zaključiti da je za određivanje vrijednosti modula elastičnosti putem proračuna, najbliže bio proračun putem ISO 12215-5:2019 norme [7], iako nisu prikazane vrijednosti za postupak izrade vakuumiranjem mokrog laminata. U *Tablici 7.2.* su prikazane vrijednosti stvarnih i proračunskih modula elastičnosti.

Tablica 7.2. Usporedba vrijednosti modula elastičnosti E_1

SREDNJE VRIJEDNOSTI	RL	VB	VI
E_1 , GPa (tan α)	75,8721	114,6601	128,8632
E_1 , GPa (Proračun mikromehanike)	105,3294	131,0742	131,0742
E_1 , GPa (Proračun ISO 12215-5:2008)	88,989	110,9868	110,9868
E_1 , GPa (Proračun ISO 12215-5:2019)	85,445	-	113,912

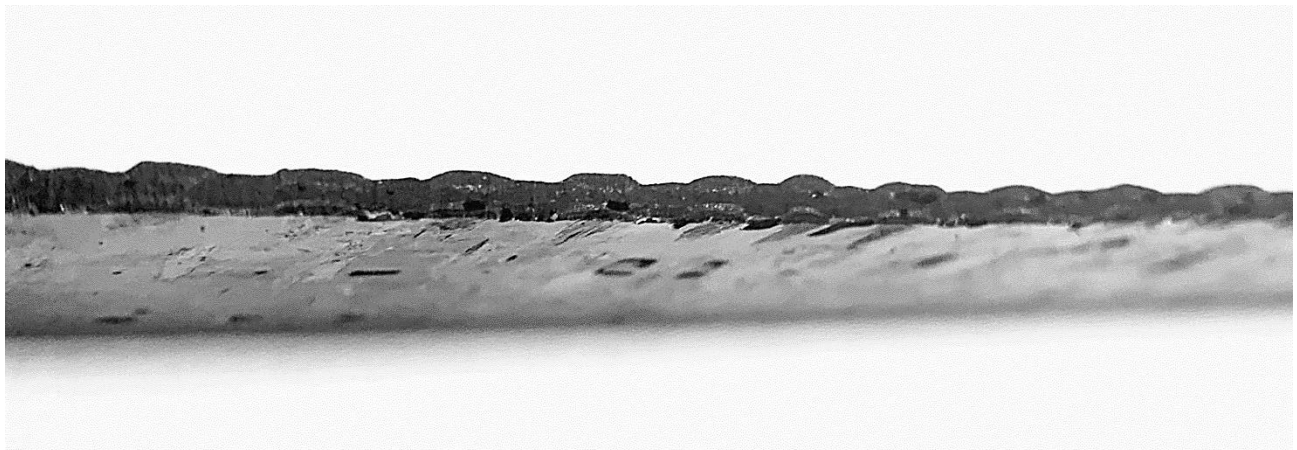
Kako bi se korigirala razlika u tim vrijednostima, preporučuje se minimalna korekcija vrijednosti masenog udjela vlakana ψ u laminatu, izvučenih iz ISO 12215-5:2008 norme [6]. Korekcija bi se bazirala na vrijednostima masenog udjela vlakana ψ u laminatu, dobivenih iz eksperimenta ispitivanja udjela vlakana u laminatu, obrađenog u ovom radu. Nakon obrade mehaničkih svojstava raznih testiranih uzoraka, valjalo bi iskomentirati eksperiment ispitivanja udjela vlakana u lamiantu prema ASTM D 2584 standardu [4]. U tom eksperimentu je cilj bio dobiti masene udjele vlakana i matrice, za različite tehnološke metode izrade. Uzorci su se zagrijavali u pećici na 565°C do potpunog izgaranja smole sadržane u uzorcima. Uzorci su se izvicali prije i poslije izgaranja, što je omogućilo točno određivanje masenog udjela vlakana u uzorku. Iako su se uzorci hladili u eksikatoru, vrijednosti

izračunate mase uzorka i stvarne mase uzorka su se minimalno razlikovale. Ta razlika je bila unutar 0,004 g. Prema podacima iz tablica sadržanih pod ovim eksperimentom (*Tablica 6.1.*, *Tablica 6.2.*, *Tablica 6.3.*), izrađena je *Tablica 7.3.* u kojoj su prikazane vrijednosti masenih udjela vlakana u laminatu.

Tablica 7.3. Usporedba vrijednosti masenih udjela vlakana različitih grupa izrade uzoraka

MASENI UDJELI VLAKANA		$\Psi_{RL} = W_{fRL}$	$\Psi_{VB} = W_{fVB}$	$\Psi_{VI} = W_{fVI}$
Ψ_{vlakna}	Maseni udio vlakana u laminatu ($1 - \Psi_{smola}$)	41,58%	69,76%	61,39%

Iz tablice se može primijetiti kako je maseni udio vlakana uzoraka izrađenog postupkom vakuumiranja mokrog laminata poprimio najveću vrijednost. Razlog tog rezultata je mogućnost da se nanjela premala količina smole tijekom izrade ili da se iz sustava izvuklo previše smole, što se i spomenulo u poglavlju 6.3.2. Ostali rezultati udjela vlakana u laminatu su očekivani. Jedina napomena bi bila u razlici stvarnog masenog udjela vlakana kod ručnog dodirnog postupka i priloženog masenog udjela vlakana iz ISO 12215-5:2008 [6], jer je realna vrijednost 0,4158, dok je vrijednost iz ISO norme 0,5445, za jednostvne laminate sastavljene od ugljičnih vlakana. Kao dodatak ovom eksperimentu, volio bih nadodati razliku u debljinama kompozita ovisno o tehnološkoj metodi izrade. Prema već spomenutim tablicama iz rezultata ovog eksperimenta (*Tablica 6.1.*, *Tablica 6.2.*, *Tablica 6.3.*), mogu se izvući debljine uzoraka. Uzorci izrađeni ručnim dodirnim postupkom su imali srednju vrijednost debljine uzorka u iznosu od 1,84 mm. U usporedbi s drugim uzorcima vakuumskih metoda izrade, ovi uzorci su bili najveće debljine. Uspio sam zabilježiti jednu sliku iz bliza na kojoj je prikazan presjek jednog uzorka izrađenog ručnim dodirnim postupkom, (*Slika 7.2.*). Presjek je orijentiran okomito na smjer vlakana.



Slika 7.2. Presjek uzorka ručnog dodirnog postupka iz bliza

Na slici se može primjetiti variranje debljine ovisne o mjestu mjerenja. Također se na nekoliko mjesta mogu uočiti rupice u kojima je ostao zrak tokom izrade laminata. Kod tehnološke metode izrade ručnim dodirnim postupkom se količina tih mjehurića zraka koji ostaju zarobljeni između slojeva, nikako ne može izbjeći. Te rupice zraka uzrokuju nepravilnosti kod spajanja više slojeva kompozitnog materijala, što na kraju utječe slabijim mehaničkim svojstvima laminata. To je dokazano rezultatima vlačnog testiranja uzoraka pod eksperimentom ispitivanja vlačne čvrstoće iz ovog rada. Isto su tako, uzorci izrađeni postupkom vakuumiranja mokrog laminata imali srednju vrijednost debljine uzoraka u iznosu od 1,14 mm. Tu vidimo značajnu razliku u debljini od uzoraka ručnog dodirnog postupka, s obzirom da se koristio isti sastav kompozita u kojem je bilo sadržano tri sloja ugljičnih vlakana i epoksidna smola. Također se iz tablica rezultata ovog eksperimenta (*Tablica 6.1.*, *Tablica 6.2.*, *Tablica 6.3.*), vidi variranje u debljini ovog kompozita, ali u puno manjim odstupanjima. Na *Slici 7.3.*, se može vidjeti presjek uzorka izrađenog postupkom vakuumiranja mokrog laminata.



Slika 7.3. Presjek uzorka izrađenog vakuumiranjem mokrog laminata iz bliza

Iz slike se može vidjeti nešto bolja povezanost između slojeva, ali se i dalje vide mjesta gdje se zadržao zrak. Bez obzira na zadržavanje mjehurića zraka između slojeva, ovi uzorci su pokazali jako dobra mehanička svojstva na vlak, što ukazuje na dobru kvalitetu izrade ovom metodom. Za kraj bih spomenuo da su uzorci izrađeni tehnološkom metodom vakuumske infuzije, imali jednaku debljinu

na svim područjima mjerenja, koja je iznosila 1,2 mm. Isto bih prikazao izgled presjeka uzorka izrađenog ovom metodom iz bliza, (Slika 7.4.).



Slika 7.4. Presjek uzorka izrađenog vakuumskim infuzijskim postupkom iz bliza

Kod ovih uzoraka se može vidjeti potpuna povezanost slojeva kompozita. Na presjeku se ne vide nikakvi znakovi mjehurića zraka zadržanih u kompozitu. Ovakav izgled presjeka uzorka kompozita, dati će najbolja mehanička svojstva kompozitnog materijala. Mehanička svojstva uzoraka izrađenih ovom metodom su dokazano najbolja. To se vidi iz rezultata eksperimenta ispitivanja vlačne čvrstoće, (Tablica 7.1.).

Dakako, treba se uzeti u obzir da su uzorci testirani u ovom radu bili jednostavne izvedbe na ravnom kalupu, sadržane od samo tri sloja vlakana koja su bila orijentirana u samo uzdužnom smjeru (orijentacija vlakana 0°).

8. ZAKLJUČAK

Ukoliko se bira tehnološka metoda izrade kompozitnog materijala, za najbolja mehanička svojstva preporuča se postupak vakuumske infuzije. Prema eksperimentima iz ovog rada, dokazalo se da se najbolja mehanička svojstva dobivaju točno tom tehnološkom metodom izrade. Tehnološka metoda izrade vakuumiranjem mokrog laminata također je pokazala dobra mehanička svojstva izrađenog kompozita, ali zbog zadržavanja sitnih mjehurića zraka između slojeva, nešto slabija od uzoraka vakuumske infuzije. Za ručni dodirni postupak se dokazalo kako se tom metodom izrađuje kompozit najlošijih mehaničkih svojstava, ali je za uzvrat najjeftinija metoda. Prema odrađenim eksperimentima, zaključuje se kako bi trebalo poboljšati preciznost proračuna i vrijednosti masenih udjela vlakana u laminatu jednostavne izvedbe, sadržanih u ISO 12215-5:2008 normi [6] i ISO 12215-5:2019 normi [7]. Razlog tome je taj što se stvarne vrijednosti masenog udjela vlakana u laminatu i proračunske vrijednosti masenog udjela vlakana u laminatu dosta razlikuju. Također bi trebalo ubaciti vrijednosti masenih udjela vlakana u laminatu kod izrade postupkom vakuumiranja mokrog laminata u ISO 12215-5:2019 normu [7]. Uz to se treba naglasiti kako su standardi ASTM D 3039/D 3039M – 00 [3] i ASTM D 2584 – 94 [4], jako dobro opisali procese eksperimentalnih ispitivanja. Kod izrade uzoraka su se uvažili podaci iz ASTM D 3039/D 3039M [3] vezani za izradu zadebljanja na krajevima uzoraka. To je poboljšalo i ubrzalo proces testiranja, te se preporučuje da se kod budućih eksperimentalnih ispitivanja vlačne čvrstoće prati standard i preporuke iz ASTM D 3039/D 3039M [3]. Također, kod izrade uzoraka se može zaključiti kako je metoda rezanja kompozita vodenim mlazom najpovoljnija zbog toga što se uzorak ne grije tokom rezanja, što uklanja mogućnost delaminacije uzorka. Sve navedeno predstavlja bazično ispitivanje mehaničkih osobina kompozitnih uzoraka. Primjena će se očitovati u pomoći pri numeričkim i strukturnim analizama kompozitnih komponenti ili čitavih struktura malih plovniha objekata.

LITERATURA

- [1] R.A. Shenoj, J.F. Wellicome – „COMPOSITE MATERIALS IN MARITIME STRUCTURES“, Cambridge University Press, New York USA, 1993.
- [2] D. Zenkert – „The Handbook of Sandwich Construction“, Dan Zenkert SWE/NOR, 1997.
- [3] ASTM – „D 3039/D 3039M (Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials)“, USA, 2002.
- [4] ASTM – „D 2584 (Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins)“, USA, 1994.
- [5] E.J. Barbero – „Introduction to COMPOSITE MATERIALS DESIGN“, CRC Press, Boca Raton USA, 2011.
- [6] EUROPEAN INTERNATIONAL STANDARD – „ISO 12215-5:2008“, 2008.
- [7] EUROPEAN INTERNATIONAL STANDARD – „ISO 12215-5:2008“, 2019.
- [8] D. Lanc – „Mehanika kompozita – Radni materijal“, Rijeka HR, 2022.
- [9] R. Dejhalla – „Gradnja i održavanja malih plovniha objekata – Radni materijal“, Rijeka HR, 2011.
- [10] A. Zamarin – „Konstrukcija malih plovniha objekata – Radni materijal“, Rijeka HR, 2022.
- [11] J. Brnić, G. Turkalj – „Nauka o čvrstoći I“, Sveučilište u Rijeci, Rijeka HR, 2004.
- [12] <https://www.toraycma.com/wp-content/uploads/T700S-Technical-Data-Sheet-1.pdf.pdf>
- [13] <https://media.easycomposites.co.uk/datasheets/EC-TDS-EL2-Epoxy-Laminating-Resin.pdf>
<https://media.easycomposites.co.uk/datasheets/EC-TDS-IN2-Infusion-Resin.pdf>
- [14] J.M.F. Paiva, S. Mayer, M.C. Rezende – „Comparison of tensile strength of different carbon fabric reinforced epoxy composites“, Sao Paulo BR, 2006.

POPIS SLIKA I TABLICA

Slike:

- Slika 2.1. Skica kompozitnog materijala [8]*
- Slika 2.2. Primjer tkanja pust [10]*
- Slika 2.3. Primjer tkanja pređa [10]*
- Slika 2.4. Primjer tkanja hasura [10]*
- Slika 2.5. Primjer tkanja sukno [10]*
- Slika 3.1. Skica ručnog dodirnog postupka*
- Slika 3.2. Skica postupka vakuumiranja mokrog laminata*
- Slika 3.3. Skica postupaka vakuumske infuzije*
- Slika 3.4. Trup sportskog plovila od ugljičnih vlakana napravljen postupkom vakuumske infuzije*
- Slika 3.5. Shema autoklav postupka*
- Slika 3.6. Shema RTM postupka [1]*
- Slika 4.1. Mikromehanika shema [5]*
- Slika 4.2. Prikaz RVE u kompozitu [5]*
- Slika 6.1. Izgled ugljičnih vlakana T700*
- Slika 6.2. Primjer zadebljanja na krajevima uzorka [14]*
- Slika 6.3. Rola UD karbonskih vlakana širine 500 mm*
- Slika 6.4. Pribor za mješanje i vaganje omjera smole*
- Slika 6.5. Mjesto i pribor za miješanja smole*
- Slika 6.6. Izgled završnog laminata izrađenog ručnim dodirnim postupkom nakon sušenja smole*
- Slika 6.7. a)rupičasta folija, b)tkanina za upijanje viška smole, c)peel ply*
- Slika 6.8. Postavljanje rupičaste folije nakon nanosa smole i slojeva laminata kistom*
- Slika 6.9. Prikaz namočenih slojeva iz bliza*
- Slika 6.10. Prikaz sustava nakon pokrivanja i brtvljenja (na desnoj strani slike se vidi cijev koja je zabrtvljena u sustavu)*
- Slika 6.11. Sustav cijevi separatora i pumpe prema vakuumiranom laminatu*
- Slika 6.12. Izgled završnog laminata izrađenog vakuumiranjem mokrog laminata nakon sušenja smole*
- Slika 6.13. Slaganje slojeva laminata na suho bez nanosa smole*
- Slika 6.14. Prikaz postavljenih priključaka i spiralnih cijevi prije postavljanja pokrivača i vakuumiranja*
- Slika 6.15. Zabrtvljeni sustav s pokrivačem prije spajanja cijevi dovoda i odvoda*
- Slika 6.16. Sustav spreman za vakuumski infuzijski postupak nakon testiranja vakuuma*
- Slika 6.17. Prikaz oznaka pomaka smole po vremenu od početka do kraja vakuumskog infuzijskog postupka*
- Slika 6.18. Prikaz finalnog laminata izrađenog vakuumskom infuzijom*
- Slika 6.19. Prikaz izrade zadebljanja na laminatima (svaka ploča predstavlja laminat izrađen jednom metodom laminiranja)*
- Slika 6.20. Stroj za rezanje vodenim mlazom*
- Slika 6.21. AutoCad nacrt rezanja uzoraka*
- Slika 6.22. Prikaz rezanja vodenim mlazom iz bliza*
- Slika 6.23. Grupirani uzorci nakon rezanja*
- Slika 6.24. Izgled uzoraka za eksperiment 1, a)ručni dodirni postupak, b)vakuumiranje mokrog laminata, c)vakuumska infuzija*
- Slika 6.25. Eksikator koji je korišten u eksperimentu*
- Slika 6.26. Pećica za izgaranje Nabertherm LV 3/11*

Slika 6.27. Digitalna precizna vaga
Slika 6.28. Infracrveni termometar
Slika 6.29. Uzorci u posudicama nakon izgaranja smole
Slika 6.30. Prikaz izrađenih zadebljanja
Slika 6.31. Skica uzoraka s označenim dimenzijama
Slika 6.32. Testo 480 mjerni uređaj
Slika 6.33. Kidalica Zwick/Roell Z600, radni prostor
Slika 6.34. Gornji radni prostor kidalice s hidrauličkim čeljustima
Slika 6.35. Uzorak u čeljustima s prihvatom ekstenzometra u sredini
Slika 6.36. Uzorci izrađeni ručnim dodirnim postupkom prije testiranja
Slika 6.37. Uzorci izrađeni postupkom vakuumiranja prije testiranja
Slika 6.38. Uzorci izrađeni postupkom vakuumske infuzije prije testiranja
Slika 6.39. Testni uzorci tab-ova prije testiranja
Slika 6.40. Kategorizacija lomova uzoraka [3]
Slika 6.41. Svi uzorci nakon testiranja
Slika 6.42. Uzorci izrađeni ručnim dodirnim postupkom nakon testiranja
Slika 6.43. Graf σ - ε uzorak RL1
Slika 6.44. Graf σ - ε uzorak RL2
Slika 6.45. Graf σ - ε uzorak RL3
Slika 6.46. Graf σ - ε uzorak RL4
Slika 6.47. Graf σ - ε uzorak RL5
Slika 6.48. Usporedba uzoraka RL
Slika 6.49. Uzorci izrađeni postupkom vakuumiranja mokrog laminata nakon testiranja
Slika 6.50. Graf σ - ε uzorak VB1
Slika 6.51. Graf σ - ε uzorak VB2
Slika 6.52. Graf σ - ε uzorak VB3
Slika 6.53. Graf σ - ε uzorak VB4
Slika 6.54. Graf σ - ε uzorak VB5
Slika 6.55. Usporedba uzoraka VB
Slika 6.56. Uzorci izrađeni vakuumskim infuzijskim postupkom nakon testiranja
Slika 6.57. Graf σ - ε uzorak VII
Slika 6.58. Graf σ - ε uzorak VI2
Slika 6.59. Graf σ - ε uzorak VI3
Slika 6.60. Graf σ - ε uzorak VI4
Slika 6.61. Graf σ - ε uzorak VI5
Slika 6.62. Graf σ - ε svih testnih uzoraka
Slika 7.1. Graf σ - ε svih testiranih uzoraka u eksperimentu vlačne čvrstoće
Slika 7.2. Presjek uzorka ručnog dodirnog postupka iz bliza
Slika 7.3. Presjek uzorka izrađenog vakuumiranjem mokrog laminata iz bliza
Slika 7.4. Presjek uzorka izrađenog vakuumskim infuzijskim postupkom iz bliza

Tablice:

Tablica 2.1. Klasifikacija kompozita [9]

Tablica 6.1. Rezultati eksperimenta prema ASTM D 2584 STANDARDU – uzorci ručnog dodirnog postupka

Tablica 6.2. Rezultati eksperimenta ASTM D 2584 STANDARDU – uzorci vakuumiranja mokrog lamianta

Tablica 6.3. Rezultati eksperimenta ASTM D 2584 STANDARDU – uzorci vakuumske infuzije

Tablica 6.4. Dimenzije testiranih uzoraka

Tablica 6.5. Kategorizacija lomova RL

Tablica 6.6. Promatrani parametri za usporedbu uzoraka RL

Tablica 6.7. Kategorizacija lomova VB

Tablica 6.8. Promatrani parametri za usporedbu VB

Tablica 6.9. Kategorizacija lomova VI

Tablica 6.10. Promatrani parametri za usporedbu uzoraka VI

Tablica 7.1. Usporedba parametara različitih grupa izrade uzoraka

Tablica 7.2. Usporedba vrijednosti modula elastičnosti E_1

Tablica 7.3. Usporedba vrijednosti masenih udjela vlakana različitih grupa izrade uzoraka

TABLICA SIMBOLA I INDEKSA

Tablica simbola

<i>Simbol</i>	<i>Jedinica</i>	<i>Naziv</i>
A, S	m^2	Površina poprečnog presjeka
B	m	Širina
E	Pa	Modul elastičnosti
F	N	Sila
L	m	Duljina
ΔL	m	Produljenje/skraćenje
t	m	Debljina
V_f, V_m	-	Volumni udio vlakana, volumni udio matrice
W_f, W_m	-	Maseni udio vlakana, maseni udio matrice
σ	Pa	Normalno naprezanje
ε	-	Duljinska deformacija
ρ	$kg\ m^{-3}$	Gustoća
α	°, rad	Kut
ψ	-	Maseni udio vlakana
φ	-	Volumni udio vlakana (ISO 12215-5:2019)
η	n/cm	Broj snopova po cm
TEX	g/km	Masa snopa po km

Tablica indeksa

<i>Indeksi</i>	<i>Naziv</i>
<i>f</i>	Vlakna (eng. <i>fibers</i>)
<i>m</i>	Matrica (eng. <i>matrices</i>)
<i>c</i>	Kompozit (eng. <i>Composites</i>)
<i>l</i>	U smjeru vlakana
<i>RL</i>	Ručni dodirni postupak
<i>VB</i>	Postupak vakuumiranja mokrog lamianta
<i>VI</i>	Vakuumski infuzijski postupak
<i>max</i>	Maksimalna vrijednost
<i>ut</i>	Krajnja vrijednost (eng. <i>Ultimate</i>)
<i>lom</i>	Vrijednost u trenutku loma
<i>20</i>	Vrijednost u linearnom dijelu grafa
<i>uzorak</i>	Uzorak
<i>uzorak.rač</i>	Uzorak putem računanja
<i>pos</i>	Posudica
<i>prije</i>	Prije
<i>poslije</i>	Poslije
<i>smola</i>	Smola
<i>vlakna</i>	Vlakna

SAŽETAK

Diplomski rad utvrđuje razlike kod mehaničkih svojstava kompozitnih materijala, izrađenih različitim tehnološkim metodama izrade. U radu je opisana teorija kompozitnih materijala, različite tehnološke metode izrade kompozita, eksperiment ispitivanja masenog udjela vlakana u laminatu i eksperiment ispitivanja uzoraka na vlačnu čvrstoću. Uzorci koji su se testirali su bili izrađeni od tri sloja ugljičnih vlakana povezanih epoksidnom smolom. Tehnološke metode kojima su se izrađivali uzorci bile su: ručni dodirni postupak, postupak vakuumiranja mokrog laminata i postupak vakuumske infuzije. Eksperiment ispitivanja masenog udjela vlakana u laminatu izrađen je prema standardu ASTM D 2584 (*Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins*). Eksperiment ispitivanja vlačne čvrstoće izrađen je prema standardu ASTM D 3039/D 3039M (*Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*). U rezultatima eksperimenata prikazali su se grafovi naprezanja i deformacije za svaki uzorak, iz kojih se uočila razlika između mehaničkih svojstava uzoraka izrađenih spomenutim tehnološkim metodama. U radu su korištene norme ISO 12215-5:2008 i ISO 12215-5:2019, prema kojima su se izradili proračuni modula elastičnosti E . U diskusiji su se rezultati proračuna usporedili sa stvarnim rezultatima dobivenim iz provedenih eksperimenata. Time je obuhvaćen ovaj diplomski rad u cjelinu, koja bi trebala biti poticaj i put u svijet brodogradnje i kompozitnih materijala sadašnjim i novijim generacijama.

Ključne riječi: kompozitni materijal, vlačna čvrstoća, ugljična vlakna, epoksidna smola

SUMMARY

This master's thesis determines the differences in the mechanical properties of composite materials made by different manufacturing methods. Thesis describes the theory of composite materials, different manufacturing methods of composites, the experiment of testing the mass fraction of fibers in the laminate and the experiment of testing specimens for tensile strength. The specimens that were tested were made of three layers of carbon fibers connected by epoxy resin. The manufacturing methods used to make the samples were: hand lay-up process, bag molding process and vacuum infusion process. The experiment of testing the mass fraction of fibers in the laminate was made according to the ASTM D 2584 standard (Standard Test Method for Loss on Ignition of Hardened Reinforced Resins). The experiment of testing specimens for tensile strength were performed according to the ASTM D 3039/D 3039M standard (Standard Test Method for Tensile Properties of Composite Materials with a Polymer Matrix). In the results of the experiments, graphs of stress and deformation for each sample were presented, from which the difference between the mechanical properties of the specimens made by the mentioned manufacturing methods was observed. The standards ISO 12215-5:2008 and ISO 12215-5:2019 were used for calculations of the modulus of elasticity E . In the discussion, the results of the calculations were compared with the actual results obtained from the conducted experiments. This covers this thesis as a whole, which should be a stimulus and path to the world of naval architecture and composite materials for current and newer generations.

Key words: composite materials, tensile strength, carbon fibers, epoxy resin

PRILOZI

Prilog 1. Tehnički list vlakana [12]



Technical Data Sheet

Product : UC 300 24K

Fiber	Warp	T700 24K or equivalent
	Weft	Thermoplastic yarn
Total nominal Areal weight	300 g/m ² ± 3%	
Weave	Unidirectional	
Width	500-1000mm	
Thread Count (per 1 cm)	Warp	1,80 ± 3%
	Weft	0,80 ± 3%
Compatibility	Epoxy, phenolic, polyester, vinyl ester	
Packing	50-100 lm	

ISO 9001 : 2015

ISO 14001 : 2015



Kordcarbon, a.s., Úprkova 683, 696 62 Strážnice, Czech Republic



Toray Composite Materials America, Inc.

T700S

STANDARD MODULUS CARBON FIBER

Excellent processability in traditional manufacturing methods (weaving, braiding, filament winding, prepreg, etc). Manufacturing locations include Japan, U.S., Korea, and France.

PRODUCT DESIGNATION

T700S	C	12,000	5	0	C
Fiber Type	Twist*	Filament Count	Sizing Type	Surface Treatment	Sizing Amount

* C: Never Twisted

FIBER PROPERTIES

PROPERTY	ENGLISH	METRIC	METHOD
Tensile Strength	711 ksi	4,900 MPa	TY-030B-01
Tensile Modulus	33.4 Msi	230 GPa	TY-030B-01
Strain at Failure		2.1%	TY-030B-01
Density		1.80 g/cm ³	TY-030B-02
Filament Diameter		7 μm	
Yield	6K	400 g/1000m	TY-030B-03
	12K	800 g/1000m	TY-030B-03
	24K	1,650 g/1000m	TY-030B-03

FUNCTIONAL PROPERTIES

PROPERTY	VALUE
CTE	-0.38 α -10 -6 /°C
Specific Heat	0.752 J/g·°C
Thermal Conductivity	0.096 J/cm·s·°C
Electric Resistivity	1.6 x 10 ⁻³ Ω·cm
Chemical Composition: Carbon	>93 %
Na + K	<50 ppm

RESIN SYSTEM COMPATIBILITY

SIZING TYPE & AMOUNT	RESIN SYSTEM COMPATIBILITY	METHOD
50C (1.0 %)	Epoxy, phenolic, polyester, vinyl ester	TY-030B-05
60E (0.3 %)	Epoxy	TY-030B-05
FOE (0.7 %)	Vinyl ester, compatible with epoxy	TY-030B-05

COMPOSITE PROPERTIES

PROPERTY	ENGLISH	METRIC	METHOD
Tensile Strength*	415 ksi	2,860 MPa	ASTM D-3039
Tensile Modulus*	19 Msi	134 GPa	ASTM D-3039
Tensile Strain		2.02%	ASTM D-3039
Compressive Strength*	210 ksi	1,450 MPa	SACMASRM1R-94
Flexural Strength*	245 ksi	1,690 MPa	ASTM D-790
Flexural Modulus*	17 Msi	120 GPa	ASTM D-790
ILSS	13 ksi	86.9 MPa	SACMASRM1R-94
In Plain Shear Strength	20 ksi	136 MPa	ASTM D-3518
90° Tensile Strength	12 ksi	81 MPa	ASTM D-3039

*Normalized to 60% fiber volume. Cured with epoxy at 130 °C.



T700S

T700S Rev. 3: Updated January 17, 2018



www.toraycma.com
253-846-1777

Prilog 2. Tehnički list smola [13]

Key Features

- Easy to use
- Medium Viscosity Resin
- Outstanding Wetting Abilities
- Good Mechanical Properties
- Choice of Hardener Speed

Product Description

EL2 is a high performance general purpose epoxy laminating resin for use in wet-lay or vacuum bagging carbon fibre, aramid or glass lamination.

This medium viscosity epoxy exhibits excellent wetting characteristics especially when used with carbon fibre and aramid fibre (such as Kevlar®) reinforcement making airbubbles in the laminate less likely than with some alternative epoxy systems.

The resin also exhibits excellent cured mechanical properties far in excess of many more traditional epoxy resin brands (as can be seen from the technical datasheets). Improved mechanical properties mean stronger, lighter, higher performance parts.

Recommended Uses

Use as a general purpose laminating epoxy, wet-laying or vacuum bagging composites such as glass fibre, carbon fibre and aramid fibre (Kevlar).

When cured the epoxy exhibits good flexural strength making it well suited to the lamination of structural parts. The resin also exhibits very good clarity making it also suitable for use when laminating unpainted carbon fibre composites.

Properties

The table below shows the typical uncured properties:

Property	Units	Resin	Hardener	Combined
Material	-	Epoxy Resin	Formulated Amine	Epoxy
Appearance	-	Clear Liquid	Amber Liquid	Clear Liquid
Viscosity @20 °C	mPas.	1200 – 1800	5 - 80	1000 – 1400
Density @20 °C	g/cm ³	1.13 – 1.17	0.90 – 1.06	1.05 – 1.15

How to Use

EL2 is a chemical product for professional use. It is essential to read and understand the safety and technical information before use.

Follow the guidelines for safe use outlined in the SDS which include the use of appropriate hand and eye protection during mixing and use.

Mix Ratio

Mix Ratio 100:30 by Weight

EL2 Epoxy Laminating Resin should be mixed with AT30 FAST or AT30 SLOW

Hardener at a ratio of 100 parts of resin to 30 parts of hardener, by weight. FAST and SLOW hardeners can be blended to achieve pot-life and demould times anywhere between those stated. However, you must still maintain the correct overall ratio of resin to hardener to ensure a proper cure.

When working with any epoxy resin, it is essential to mix the resin and hardener exactly at the correct mix ratio. Failure to do so will result in a poor or only partial cure of the resin, greatly reduced mechanical properties and possibly other adverse effects. Under no circumstances add 'extra hardener' in an attempt to speed up the cure time; epoxies do not work in this way.

Mixing Instructions

EL2 is a highly reactive (fast curing) resin system. Only weigh out and mix as much resin as you can use within the pot life.

Weigh or measure the exact correct ratio of resin and hardener into a straight sided container. Using a suitable mixing stick begin to mix the resin and hardener together to combine them completely.

Spend at least one minute mixing the resin and hardener together, paying particular attention to the sides and base of the container. Remember: Any resin that has not been thoroughly combined with hardener will not cure.

Once you have finished mixing in one container, it is good practice to transfer the mixed resin into a second container and undertake further mixing of the resin using a new mixing stick. Doing so will eliminate the risk of accidentally using unmixed resin from the bottom or sides of the container.

Pot-Life / Working Time / Cure Time

EL2 is a highly reactive resin system and once the resin has been mixed with the hardener, the reaction will start to give off heat (exotherm) which will further accelerate the cure of the resin, especially when the resin is in the mixing pot.

Transfer the resin from the mixing pot onto the part as soon as possible to extend the working time and avoid the risk of uncontrollable rapid cure in the mixing pot.

As with all epoxies, the pot-life/working time will vary significantly depending on the ambient temperature, the starting temperature of the resin and hardener and the amount of resin mixed.

EL2 can be used in ambient temperatures between 15°C (59°F) and 30°C (86°F). For best results, an ambient temperature of at least 20°C (68°F) is recommended. Ensure that both resin and hardener containers are within this temperature range before use.

The table below gives an indication of pot-life and cure properties:

	Pot-Life @ 25 °C	Gelation @ 25 °C	Demould Time @ 25 °C
AT30 SLOW*	95 - 115mins	8.5 - 10.5hrs	20 - 30hrs
AT30 FAST*	12 - 17mins	2 - 3hrs	4 - 6hrs

*Fast and slow hardeners can be blended to achieve pot-life and demould times anywhere between those stated above.

Full Cure / Post-Cure

As with most epoxy systems, where parts cure in normal ambient temperatures, full cure is not reached for several days. Although parts will be handleable after the listed demould time (at 25°C), full mechanical properties will take at least 14 days to develop in (at 25°C). Where possible, avoid exposing the cured resin to full service rigours for at least this time.

As with many post-cure cycles for resins, the post-cure cycle for our EL2 Epoxy Resin is not too sensitive and a range of different post-cure cycles will produce good results, specifically improved mechanical performance and elevated HDT/operating temperature. Post-curing parts that will be used at or exposed to elevated operating temperatures (such as vehicle bonnets/hoods in direct sunlight, engine-bay parts, car interior parts etc.) is strongly recommended to prevent distortion of the parts when they are put into service and experience these higher temperatures.

Where possible, parts should be post-cured still inside the mould to reduce distortion and improve surface finish (i.e. reduce 'print-through'). When post-curing parts in the mould, it is important to post-cure them without demoulding at all (i.e. don't demould and then put them back into the mould) otherwise you can get some strange patterns on the surface where some areas are post-cured in direct contact with the mould surface and others are not.

A simple and very effective post-cure cycle with the EL2 Epoxy Laminating Resin is as follows:

CYCLE #1 SUITABLE FOR MOST SITUATIONS

- 24hrs at room temperature
- 6hrs at 60°C

If you're encountering any surface finish issues (faint print-through) then you can experiment with a slower 'ramp rate' which sometimes improves things:

CYCLE #2 SUGGESTED FOR SUBTLE IMPROVEMENTS TO SURFACE FINISH

- 24hrs at room temperature
- 2hrs at 40°C
- 2hrs at 50°C
- 5hrs at 60°C

If you need to push the HDT of the finished part higher then you could increase post-cure up to a maximum of 80°C as follows:

CYCLE #3 SUGGESTED FOR HIGHEST POSSIBLE HDT/OPERATING TEMPERATURE

- 24hrs at room temperature
- 2hrs at 40°C
- 2hrs at 50°C
- 2hrs at 60°C
- 2hrs at 70°C
- 4hrs at 80°C

These are all just suggestions. Most situations just call for option #1; 6hrs at 60°C. Many customers also find that they can dispense with the 24hrs cure at ambient and simply load newly infused parts into the oven to begin the cure however this is something that you would need to experiment with yourself. A cure at ambient temperature before post-cure is generally favoured with most resin systems.

Mechanical Properties

Cured Resin Properties

	Units	AT30 SLOW	AT30 FAST
Hardness	Shore D	84 - 88	85 - 89
Linear Shrinkage	%	0.5	0.5
Tensile Strength	MPa	70.0 - 80.0	67.0 - 75.0
Elongation at Break	%	6.0 - 10.0	6.0 - 8.0
Flexural Strength	MPa	103 - 117	120 - 130
Flexural Modulus	MPa	2600 - 3200	3600 - 4000
H.D.T	°C	82 - 88	70 - 76

Transport and Storage

Resin and hardeners should be kept in tightly seal containers during transport and storage. Both the resin and hardener should be stored in ambient conditions of between 10°C (50°F) and 25°C (77°F).

When stored correctly, the resin and hardener will have a shelf-life of 12 months. Although it may be possible to use the resin after a longer period, a deterioration in the performance of the resin will occur, especially in relation to clarity and cure profile.

Pay particular attention to ensuring that containers are kept tightly sealed. Epoxy hardeners especially will deteriorate quickly when exposed to air.

Disclaimer

This data is not to be used for specifications. Values listed are for typical properties and should not be considered minimum or maximum.

Our technical advice, whether verbal or in writing, is given in good faith but Easy Composites Ltd gives no warranty; express or implied, and all products are sold upon condition that purchasers will make their own tests to determine the quality and suitability of the product for their particular application and circumstances.

Easy Composites Ltd shall be in no way responsible for the proper use and service of the product, nor for the safeguarding of personnel or property, all of which is the duty of the user. Any information or suggestions are without warranty of any kind and purchasers are solely responsible for any loss arising from the use of such information or suggestions. No information or suggestions given by us shall be deemed to be a recommendation to use any product in conflict with any existing patent rights. Before using any of our products, users should familiarise themselves with the relevant technical and safety datasheets provided by Easy Composites Ltd.



Easy Composites Ltd

Unit 39, Park Hall Business Village, Longton, Stoke on Trent, Staffordshire, ST3 5XA, United Kingdom.
Tel. +44 (0)1782 454499, Fax. +44 (0)1782 596868, Email sales@easycomposites.co.uk, Web www.easycomposites.co.uk

Key Features

- Ideal For Resin Infusion
- Ultra Low Viscosity Resin
- Outstanding Wetting Abilities
- Good Mechanical Properties
- Choice of Hardener Speed

Product Description

Our IN2 is a high performance epoxy resin that has been specifically formulated for use in resin infusion composites production.

As an infusion resin it is ultra-low viscosity ensuring that it is able to quickly infuse through a range of reinforcements. Its excellent mechanical strength makes it ideally suited for use with high performance reinforcements such as carbon fibre and aramids like Kevlar.

The resin also exhibits excellent cured mechanical properties far in excess of many more traditional epoxy resin brands (as can be seen from the technical data sheets). Improved mechanical properties mean stronger, lighter, higher performance parts.

Recommended Uses

This is a high performance low viscosity epoxy resin formulated specifically for use in resin infusion composites production. The resin cures to a clear finish.

This is the same epoxy infusion resin that is included with our Resin Infusion Complete Starter Kit.

When cured the epoxy exhibits good flexural strength making it well suited to the lamination of structural parts. The resin also exhibits very good clarity making it also suitable for use when laminating unpainted carbon fibre composites. Properties

The table below shows the typical uncured properties:

Property	Units	Resin	Hardener	Combined
Material	-	Epoxy Resin	Formulated Amine	Epoxy
Appearance	-	Clear Liquid	Amber Liquid	Clear Liquid
Viscosity @20°C	mPa.s.	500 – 800	10 - 20	200 – 450
Density @20°C	g/cm ³	1.08 – 1.18	1.07 – 1.13	1.12 – 1.18

How to Use

IN2 is a chemical product for professional use. It is essential to read and understand the safety and technical information before use.

Follow the guidelines for safe use outlined in the SDS which include the use of appropriate hand and eye protection during mixing and use.

Mix Ratio

Mix Ratio 100:30 by Weight

IN2 Epoxy Laminating Resin should be mixed with AT30 FAST or AT30 SLOW

Hardener at a ratio of 100 parts of resin to 30 parts of hardener, by weight. FAST and SLOW hardeners can be blended to achieve pot-life and demould times anywhere between those stated. However, you must still maintain the correct overall ratio of resin to hardener to ensure a proper cure.

Failure to do so will result in a poor or only partial cure of the resin, greatly reduced mechanical properties and possibly other adverse effects. Under no circumstances add 'extra hardener' in an attempt to speed up the cure time; epoxies do not work in this way.

Our IN2 Infusion Resin is available with a choice of two hardener speeds; 'FAST' which has a pot-life of 9-14mins and 'SLOW' which provides a pot-life of 80-100mins. As standard we recommend using IN2 Infusion Resin with the SLOW hardener, especially for larger infusion projects. For small projects where you are confident of the infusion time, use of the FAST hardener greatly reduces the demould time.

Mixing Instructions

IN2 is a highly reactive (fast curing) resin system. Only weigh out and mix as much resin as you can use within the pot life.

Weigh or measure the exact correct ratio of resin and hardener into a straight sided container. Using a suitable mixing stick begin to mix the resin and hardener together to combine them completely.

Spend at least one minute mixing the resin and hardener together, paying particular attention to the sides and base of the container. Remember: Any resin that has not been thoroughly combined with hardener will not cure.

Once you have finished mixing in one container, it is good practice to transfer the mixed resin into a second container and undertake further mixing of the resin using a new mixing stick. Doing so will eliminate the risk of accidentally using unmixed resin from the bottom or sides of the container.

Pot-Life / Working Time / Cure Time

IN2 is a highly reactive resin system and once the resin has been mixed with the hardener, the reaction will start to give off heat (exotherm) which will further accelerate the cure of the resin, especially when the resin is in the mixing pot.

Transfer the resin from the mixing pot onto the part as soon as possible to extend the working time and avoid the risk of uncontrollable rapid cure in the mixing pot.

As with all epoxies, the pot-life/working time will vary significantly depending on the ambient temperature, the starting temperature of the resin and hardener and the amount of resin mixed.

IN2 can be used in ambient temperatures between 15°C (59°F) and 30°C (86°F). For best results, an ambient temperature of at least 20°C (68°F) is recommended. Ensure that both resin and hardener containers are within this temperature range before use.

During an infusion, you can reduce the chance of the resin 'gelling' in the pot by mixing small quantities at a time and topping up the resin jug as the resin is drawn into the laminate. Once the resin is in the laminate, it is much less likely to exotherm and gel before you want it to.

IN2 EPOXY INFUSION RESIN

The table below gives an indication of pot-life and cure times:

	Pot-Life @ 25 °C	Gelation @ 25 °C	Demould Time @ 25 °C
AT30 SLOW*	80 - 100mins	8 - 11hrs	18 - 24hrs
AT30 FAST*	9 - 14mins	2 - 4hrs	6 - 8hrs

*Fast and slow hardeners can be blended to achieve pot-life and demould times anywhere between those stated above.

	25 °C	60 °C	100 °C	Full Cure at 25 °C
Cure Time	24hrs	6hrs	3hrs	7 Days

Full Cure / Post-Cure

As with most epoxy systems, where parts cure in normal ambient temperatures, full cure is not reached for several days. Although parts will be handleable after the listed demould time (at 25°C), full mechanical properties will take at least 14 days to develop in (at 25°C). Where possible, avoid exposing the cured resin to full service rigours for at least this time.

As with many post-cure cycles for resins, the post-cure cycle for our IN2 Epoxy Resin is not too sensitive and a range of different post-cure cycles will produce good results, specifically improved mechanical performance and elevated HDT/operating temperature. Post-curing parts that will be used at or exposed to elevated operating temperatures (such as vehicle bonnets/hoods in direct sunlight, engine-bay parts, car interior parts etc.) is strongly recommended to prevent distortion of the parts when they are put into service and experience these higher temperatures.

Where possible, parts should be post-cured still inside the mould to reduce distortion and improve surface finish (i.e. reduce 'print-through'). When post-curing parts in the mould, it is important to post-cure them without demoulding at all (i.e. don't demould and then put them back into the mould) otherwise you can get some strange patterns on the surface where some areas are post-cured in direct contact with the mould surface and others are not.

A simple and very effective post-cure cycle with the IN2 Epoxy Infusion Resin is as follows:

CYCLE #1 SUITABLE FOR MOST SITUATIONS

- 24hrs at room temperature
- 6hrs at 60°C

If you're encountering any surface finish issues (faint print-through) then you can experiment with a slower 'ramp rate' which sometimes improves things:

CYCLE #2 SUGGESTED FOR SUBTLE IMPROVEMENTS TO SURFACE FINISH

- 24hrs at room temperature
- 2hrs at 40°C
- 2hrs at 50°C
- 5hrs at 60°C

If you need to push the HDT of the finished part higher then you could increase post-cure up to a maximum of 80°C as follows:

CYCLE #3 SUGGESTED FOR HIGHEST POSSIBLE HDT/OPERATING TEMPERATURE

- 24hrs at room temperature
- 2hrs at 40°C
- 2hrs at 50°C
- 2hrs at 60°C
- 2hrs at 70°C
- 4hrs at 80°C

These are all just suggestions. Most situations just call for option #1; 6hrs at 60°C. Many customers also find that they can dispense with the 24hrs cure at ambient and simply load newly infused parts into the oven to begin the cure however this is something that you would need to experiment with yourself. A cure at ambient temperature before post-cure is generally favoured with most resin systems.

Mechanical Properties

Cured Resin Properties

	Units	AT30 SLOW	AT30 FAST
Colour		Pale yellow	Pale yellow
Machinability		Excellent	Excellent
Density 25°C	g/ml	1.08 - 1.12	1.08 - 1.12
Hardness 25°C	Shore D/15	84.5 - 88.5	86 - 90
Maximum Tg	°C	92 - 98	75 - 81
Water absorption (24h RT)	%	0.12 - 0.20	0.22 - 0.27
Water absorption (2hr 100°C)	%	0.58 - 0.70	0.95 - 1.00
Flexural strength	MN/m ²	112 - 124	95 - 109
Maximum strain	%	5 - 7	4 - 6
Strain at break	%	6 - 8	7 - 9
Flexural modulus	MN/m ²	3150 - 3550	2500 - 3100
Tensile strength	MN/m ²	65.5 - 73.5	67.0 - 75.0
Elongation at break	%	6 - 8	5 - 7

Transport and Storage

Resin and hardener should be kept in tightly seal containers during transport and storage. Both the resin and hardener should be stored in ambient conditions of between 10°C (50°F) and 25°C (77°F).

When stored correctly, the resin and hardener will have a shelf-life of 12 months. Although it may be possible to use the resin after a longer period, a deterioration in the performance of the resin will occur, especially in relation to clarity and cure profile.

Pay particular attention to ensuring that containers are kept tightly sealed. Epoxy hardeners especially will deteriorate quickly when exposed to air.

Disclaimer

This data is not to be used for specifications. Values listed are for typical properties and should not be considered minimum or maximum.

Our technical advice, whether verbal or in writing, is given in good faith but Easy Composites Ltd gives no warranty, express or implied, and all products are sold upon condition that purchasers will make their own tests to determine the quality and suitability of the product for their particular application and circumstances.

Easy Composites Ltd shall be in no way responsible for the proper use and service of the product, nor for the safeguarding of personnel or property, all of which is the duty of the user. Any information or suggestions are without warranty of any kind and purchasers are solely responsible for any loss arising from the use of such information or suggestions. No information or suggestions given by us shall be deemed to be a recommendation to use any product in conflict with any existing patent rights. Before using any of our products, users should familiarise themselves with the relevant technical and safety datasheets provided by Easy Composites Ltd.

Easy Composites Ltd

Unit 39, Park Hall Business Village, Longton, Stoke on Trent, Staffordshire, ST3 5XA, United Kingdom.

Tel. +44 (0)1782 454499, Fax, +44 (0)1782 596868, Email sales@easycomposites.co.uk, Web www.easycomposites.co.uk

Prilog 3. Tablice eksperimenta vlačne čvrstoće sa statističkim podacima

Tablica 6.6. Produžena tablica sa statističkim podacima

	RL1	RL2	RL3	RL4	RL5	SREDNJA VRIJEDSNOST	STANDARDNA DEVIJACIA	STANDARDNA POGREŠKA
F_{max} , N	11274	12565,9	14291	13442,1	13734	13061,4	1177,875038	526,7617308
ΔL , mm	1,3816	1,5555	1,8488	1,6952	1,8261	1,661436	0,195492193	0,087426767
σ_{max} , MPa	376,616	411,526	457,727	440,708	422,601	421,83544	30,80599913	13,77686164
ϵ_{lom} , %	0,004797	0,005401	0,006419	0,005886	0,006319	0,0057644	0,000674313	0,000301562
E_1 , GPa (tan α)	76,2364	79,6727	72,3849	78,3913	72,6753	75,872134	3,290287821	1,471461447
E_1 , GPa ($\sigma_{20}/\epsilon_{20}$)	76,2368	79,6733	72,3849	78,3915	72,6752	75,87231	3,290540221	1,471574323

Tablica 6.8. Produžena tablica sa statističkim podacima

	VB1	VB2	VB3	VB4	VB5	SREDNJA VRIJEDSNOST	STANDARDNA DEVIJACIA	STANDARDNA POGREŠKA
F_{max} , N	15588,3	16377,6	15377,9	16899,5	18223,7	16493,4	1144,094751	511,6547273
ΔL , mm	2,3169	2,1597	1,9879	2,8899	2,2227	2,315414	0,342831234	0,153318789
σ_{max} , MPa	802,039	857,382	841,933	889,125	911,100	860,31572	42,28381087	18,90989509
ϵ_{lom} , %	0,008045	0,007473	0,006903	0,010034	0,007691	0,0080292	0,001194941	0,000534394
E_1 , GPa (tan α)	112,4836	112,0231	119,8375	108,4261	120,5302	114,660116	5,287171969	2,364495186
E_1 , GPa ($\sigma_{20}/\epsilon_{20}$)	112,4843	112,0231	119,8379	108,4267	120,5305	114,660498	5,287107153	2,3644662

Tablica 6.10. Produžena tablica sa statističkim podacima

	VI1	VI2	VI3	VI4	VI5	SREDNJA VRIJEDSNOST	STANDARDNA DEVIJACIA	STANDARDNA POGREŠKA
F_{max} , N	14646,7	17424,3	16727,4	12691,8	13384,4	14974,92	2056,743039	919,8034493
ΔL , mm	1,8195	2,1982	2,0558	1,5900	1,6368	1,860038	0,263181295	0,117698253
σ_{max} , MPa	832,890	1043,569	953,128	703,275	771,302	860,83284	137,4153423	61,45400929
ϵ_{lom} , %	0,006296	0,007633	0,007113	0,005502	0,005683	0,0064454	0,000915104	0,000409247
E_1 , GPa (tan α)	122,1563	136,5628	131,0719	124,4439	130,0810	128,86316	5,704324186	2,551051329
E_1 , GPa ($\sigma_{20}/\epsilon_{20}$)	122,1574	136,5625	131,0723	124,4445	130,0811	128,863544	5,703851893	2,550840113