

# Proizvodnja kompozitnih tvorevina centrifugalnim lijevanjem

---

Vlahović, Marin

Master's thesis / Diplomski rad

2010

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:217899>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-15**

*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**

**DIPLOMSKI RAD**

**Marin Vlahović**

**Zagreb, 2010.**

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**

# **DIPLOMSKI RAD**

**Mentor:**

**prof. dr. sc. Mladen Šercer**

**Marin Vlahović**

**Zagreb, 2010.**

## SAŽETAK

Tema ovoga rada je izrada stijenke trupa broda od polimernog kompozitnog materijala, te izrada kalupa koji je potreban za proizvodni postupak izrade te kompozitne tvorevine. Objasnjeni su kriteriji prema kojima se donosi odluka o izboru materijala za izradu broda, te su opisane prednosti i nedostaci materijala koji se koriste u brodogradnji (drvo, čelik i polimeri). Objasnjeno je zašto su polimerni kompozitni materijali zbog svoje kombinacije svojstava, vrlo pogodni za izradu brodova ali i drugih proizvoda (npr. u zrakoplovnoj, automobilskoj i vojnoj industriji).

Opisana su svojstva kompozitnih materijala općenito. Navedene su prednosti koje posjeduju polimerni kompozitni materijali, kao što su jednostavni proizvodni postupci i kombinacije pozitivnih svojstava gotovog proizvoda, te neograničenost oblika i dimenzija. Objasnjeno je od čega se sve mogu sastojati polimerni kompozitni materijali, te zbog čega imaju tako povoljna mehanička svojstva. Prikazana je podjela kompozitnih materijala s obzirom na vrstu ojačavala. Detaljnije su opisani kompozitni materijali s vlaknastim ojačanjem, jer se oni koriste za izradu polimernih brodova. Ukratko su opisane vrste ojačavala, dok su staklena vlakna (vrsta ojačavala) opisana detaljnije jer se najčešće upotrebljavaju u izradi brodova od kompozitnih tvorevina. Ukratko su opisane polimerne matrice, te su detaljnije opisane epoksidne i poliesterske smole (vrste matrica) zbog njihove česte upotrebe u brodogradnji.

Spomenuti su proizvodni postupci za izradu tvorevina od polimernih kompozitnih materijala, te su opisani oni koji se najčešće upotrebljavaju u brodogradnji. Detaljno je opisan postupak podtlačnog ulijevanja smole, koji se smatra najboljim zbog kvalitete gotovog proizvoda (povoljnog omjera smole i vlakana, zbog kojega posjeduje zavidna mehanička svojstva). Spomenuto je i ukratko objasnjena izrada brodova od sendvič konstrukcija, s jezgrom od krute PVC pjene i površinskim slojevima od polimernog kompozitnog materijala.

Objasnjene su mogućnosti i prednosti automatiziranog postupka proizvodnje i montaže polimernih kompozitnih tvorevina, te je spomenuto spomenut problem isplativosti. Opisan je postupak proizvodnje i priprema kalupa za izradu kompozitne tvorevine, tj. dobivanje oblika za kalup trupa broda (modeliranje 3D virtualnog modela na računalu). Spomenuto je, te ukratko objasnjena mogućnost korištenja reverzibilnog inženjerstva za izradu kalupa.

Za potrebe eksperimentalnog rada postupkom centrifugalnog lijevanja izrađene su sendvič ploče koje se sastoje od poliesterske smole (površinski slojevi), te sintetske i bio PUR pjene (jezgre). Uspoređena su ta dva sendvič materijala (sendviča sa jezgrom od sintetske i bio PUR pjene), na osnovi ispitane savojne čvrstoće.

# Sadržaj

Popis slika.....	V
Popis tablica.....	VIII
Popis kratica.....	IX
Izjava.....	X
Zahvala.....	XI
1. Uvod.....	1
2. IZBOR MATERIJALA ZA IZRADU BRODA.....	2
2.1. Drvo u brodogradnji.....	3
2.1.1. Karakteristike drva u brodogradnji.....	4
2.1.2. Polimerni materijali u završnoj obradi drvenog broda.....	5
2.2. Čelik u brodogradnji.....	6
2.3. Polimerni kompozitni materijali u brodogradnji.....	7
3. KOMPOZITNE TVOREVINE.....	9
3.1. Definicija kompozitnih materijala.....	9
3.2. Podjela kompozitnih materijala.....	9
3.3. Svrha kompozitnih materijala.....	10
4. POLIMERNI KOMPOZITNI MATERIJALI.....	11
4.1. Općenito o polimernim kompozitnim materijalima.....	11
4.2. Svojstva polimernih kompozita.....	11
4.3. Zastupljenost polimernih kompozitnih materijala u proizvodnim tehnologijama.....	13
4.4. Polimerni kompozitni materijali s obzirom na vrstu ojačavala.....	14
4.4.1. Polimerni kompoziti s vlaknastim ojačanjem.....	14
4.5. Laminati.....	16
4.6. Sendvič konstrukcije.....	16
4.6.1. Primjena sendvič konstrukcija u brodogradnji.....	17
4.7. Ojačavala.....	19
4.7.1. Staklena vlakna.....	20
4.7.2. Ugljikova vlakna.....	21

4.7.3.	Aramidna vlakna .....	22
4.7.4.	Hibridna vlakna.....	22
4.7.4.1.	Borna vlakna.....	23
4.7.5.	Keramička vlakna.....	23
4.7.6.	Vlakna biljnog porijekla.....	23
4.8.	Polimerne matrice.....	24
4.8.1.	Duromerne matrice.....	25
4.8.1.1.	Epoksidne matrice (EP).....	25
4.8.1.2.	Poliesterske smole (UP).....	25
4.8.1.3.	Vinilesterske smole.....	26
4.8.1.4.	Fenolne matrice.....	27
4.8.1.5.	Usporedba svojstava smola .....	27
4.8.2.	Plastomerne matrice.....	29
5.	POSTUPCI PROIZVODNJE POLIMERNIH KOMPOZITNIH TVOREVINA.....	31
5.1.	Ručni dodirni postupak laminiranja.....	31
5.2.	Dodirni postupak sa štrcanjem.....	33
5.3.	Podtlačno oblikovanje.....	34
5.4.	Injekcijsko – posredno prešanje kapljevite smole s uloženim trodimenzionalnim ojačavajućim predoblikovanjem (RTM).....	35
5.5.	Podtlačno ulijevanje.....	36
5.5.1.	Opis postupka podtlačnog ulijevanja smole.....	36
5.5.2.	Prednosti postupka podtlačnog ulijevanja.....	37
5.5.3.	Nedostaci.....	39
5.5.4.	Priprema za postupak podtlačnog ulijevanja.....	40
5.5.4.1.	Priprema kalupa.....	41
5.5.4.2.	Cijevi za dovod i odvod smole.....	45
5.5.4.2.1.	Izbor i postavljanje cijevi za dovod smole.....	45
5.5.4.2.2.	Izbor i postavljanje cijevi za odvod smole podtlakom.....	47
5.5.4.3.	Postavljanje zaštitne folije i spajanje cijevi za dovod smole.....	47
5.5.4.4.	Priprema za ulijevanje.....	49
5.5.4.5.	Postavljanje cijevi.....	49
5.5.4.6.	Ulijevanje smole.....	50
5.5.5.	Eksperimentiranje i poboljšavanje.....	50

5.5.6.	Uobičajeni način postavljanja.....	52
5.5.7.	Proizvodnja kompozitnih tvorevina velikih dimenzija.....	53
5.5.8.	Usporedba proizvodnih postupaka.....	53
6.	AUTOMATIZACIJA PROIZVODNJE I MONTAŽE BRODOVA.....	56
6.1.	Prednosti automatizirane proizvodnje.....	56
6.2.	Investiranje u robotizaciju proizvodnje.....	57
6.3.	Primjena robota (manipulatora) u proizvodnji i montaži.....	58
6.3.1.	Mehanička obrada polimernih kompozitnih tvorevina.....	61
7.	KALUP ZA IZRADU BRODA OD POLIMERNOG KOMPOZITA.....	62
7.1.	Reverzibilno inženjerstvo.....	63
7.1.1.	Dobivanje CAD modela broda primjenom reverzibilnog inženjerstva.....	66
7.1.1.1.	Trodimenzionalna digitalizacija mjernim sustavom TRITOP.....	66
7.1.1.2.	Trodimenzionalna digitalizacija mjernim sustavom ATOS.....	70
7.2.	Postupak izrade kalupa.....	74
8.	EKSPERIMENTALNI RAD.....	77
8.1.	Oblikovanje jezgre sendvič konstrukcije s peteroosnom glodalicom.....	78
8.2.	Izrada sendvič konstrukcije postupkom centrifugalnog lijevanja.....	80
8.2.1.	Oštećenje poklopca kalupa za izradu sendvič ploča.....	85
8.3.	Ispitivanje savojne čvrstoće izrađenih sendvič ploča.....	86
	Zaključak.....	93
	Literatura.....	94

## Popis slika

Slika 2.1.	Prikaz trupa drvenog broda.....	3
Slika 4.1.	Prikaz poboljšanih svojstava polimernih kompozita .....	12
Slika 4.2.	Raspored vlakana : a) kontinuirana jednosmjerna vlakna, b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna, c) ortogonalno raspoređena vlakna, d) višesmjerno usmjerena vlakna .....	15
Slika 4.3	Primjeri tvornički različito pletenih vlakana ojačala .....	15
Slika 4.4.	Laminantna struktura kompozita.....	16
Slika 4.5.	Prikaz nastajanja sendvič panela.....	17
Slika 4.6.	Prikaz krute PVC pjene koja se upotrebljavaju kao jezgra u sendvič konstrukciji broda.....	19
Slika 4.7.	Prikaz staklenih vlakana.....	20
Slika 4.8.	Ugljikova vlakna .....	21
Slika 4.9.	Aramidna vlakna (Kevlar).....	22
Slika 4.10.	Dijagram deformacije-naprezanja kompozitnih materijala.....	28
Slika 4.11.	Dijagram naprezanja-deformacija do loma tri vrste smola .....	20
Slika 5.1.	Ručno dodirno laminiranje .....	32
Slika 5.2.	Dodirni postupak štrcanja .....	33
Slika 5.3.	Podtlačno oblikovanje .....	34
Slika 5.4.	Pojednostavljeni prikaz RTM postupaka .....	35
Slika 5.5.	Pojednostavljeni prikaz procesa podtlačnog ulijevanja .....	36
Slika 5.6.	Proces podtlačnog ulijevanja s jednostavnim kalupom .....	40
Slika 5.7.	Prikaz raspodjele cijevi za dovod smole pri izradi trupa broda .....	41
Slika 5.8.	Pletivo od staklenih vlakana.....	43
Slika 5.9.	Prikaz položenog ojačavala na kalup .....	44
Slika 5.10.	Filter i cijev T-oblika .....	46
Slika 5.11.	Prikaz postavljanja filtera u kalup .....	46
Slika 5.12.	Prikaz postavljene spiralne cijevi duž ruba kalupa .....	47
Slika 5.13.	Prikaz spajanja filtera za smolu.....	48
Slika 5.14.	Prikaz kraja cijevi za odvod smole koji se nalazi u kalupu .....	50
Slika 5.15.	Pojednostavljeni prikaz nepravilnog i pravilnog postavljanja cijevi: a) nepravilno i b) pravilno.....	51
Slika 5.16.	Prikaz upotrebe spiralnih cijevi kao produžetak cijevi za dovod i odvod smole.....	52



Slika 5.17. Prikaz ugradnje električnih i drugih instalacija u trup broda, te prikaz gotovog proizvoda .....	53
Slika 6.1. Shematski prikaz upotrebe automatizirane robotske ruke za postupak štrcanja vlakana .....	60
Slika 6.2. Prikaz upotrebe automatizirane robotske ruke za postupak štrcanja vlakana.....	60
Slika 6.3. Korištenja automatizirane robotske ruke na vodilici za postupak štrcanja vlakana na kalupe .....	61
Slika 7.1. Prikaz 3D CAD modela broda.....	62
Slika 7.2. Originalni predmet koji je potrebno rekonstruirati i rezultat 3D digitalizacije.....	64
Slika 7.3. Detalj poligonizirane mreže s prikazanim trokutima.....	64
Slika 7.4. Analiza kontinuiranosti rekonstruiranog CAD modela pomoću "zebra uzorka" .....	65
Slika 7.5. Provjera točnosti rekonstruiranog CAD modela.....	65
Slika 7.6. Fotogrametrijski sustav TRITOP firme GOM mbH.....	67
Slika 7.7. Prikaz prostornog položaja kamere i mjernih točaka u programu TRITOP.....	68
Slika 7.8. Rezultat fotogrametrijskog snimanja .....	68
Slika 7.9. Dobiveni trodimenzionalni kompjutorski model broda.....	69
Slika 7.10. Karakteristične linije (paralelni presjeci) trupa broda.....	69
Slika 7.11. Trodimenzionalni skener ATOS.....	70
Slika 7.12. Uzorci linija i stereo postava.....	71
Slika 7.13. Kalibracijski objekt.....	72
Slika 7.14. Kodirana (lijevo) i nekodirana (desno) mjerna točka.....	73
Slika 7.15. Prikaz oblaka točaka u Imageware-u.....	73
Slika 7.16. Pojednostavljeni prikaz kompozitne tvorevine od koje se izrađuje kalup.....	74
Slika 7.17. Pojednostavljeni prikaz izrade 3D kalupa pomoću uzdužnih/poprečnih presjeka...	75
Slika 7.18. Proces polimerizacije.....	76
Slika 8.1. Prikaz 3D virtualnog CAD modela jezgre sendvič konstrukcije u <i>SolidWorks</i> -u....	78
Slika 8.2. Prikaz sučelja računala peteroosne CNC glodalice.....	79
Slika 8.3. Oblikovanje PUR pjene s peteroosnom CNC glodalicom.....	79
Slika 8.4. Oblikovana PUR pjena.....	80
Slika 8.5. Uređaj za centrifugalno lijevanje.....	80
Slika 8.6. Prikaz O – prstena kod uređaja za centrifugalno lijevanje.....	81
Slika 8.7. Prikaz metalne zaštite uređaja za centrifugalno lijevanje.....	81
Slika 8.8. Prikaz zatvorenog kalupa uređaja za centrifugalno lijevanje.....	82
Slika 8.9. Prikaz tečenja smole tijekom vrtnje kalupa.....	83
Slika 8.10. Proces polimerizacije.....	83

Slika 8.11. Prikaz vezivanja smole samo za donju površinu PUR pjene.....	83
Slika 8.12. Prikaz sendvič konstrukcije dobivene centrifugalnim lijevanjem.....	84
Slika 8.13. Prikaz upotrebe odstoynika pri izradi sendvič ploče.....	84
Slika 8.14. Prikaz sendvič konstrukcije s jezgrom od bio PUR pjene.....	85
Slika 8.15. Prikaz ispitnih tijela s jezgrom od bio i sintetske PUR pjene.....	86
Slika 8.16. Pojednostavljeni prikaz ispitivanja savojne čvrstoće.....	87
Slika 8.17. Prikaz progiba ispitnog tijela pri ispitivanju savojne čvrstoće.....	87
Slika 8.18. Prikaz ispitivanja savojne čvrstoće ispitnih tijela sa sintetskom i PUR pjenom.....	88
Slika 8.19. Prikaz ispitnog tijela s jednoliko raspoređenom smolom sa obje strane PUR pjene.....	88

## Popis tablica

Tablica 1. Biranje koeficijenta profila broda.....76

Tablica 2. Prikaz dimenzija ispitnih tijela, udaljenosti između oslonaca kidalice, najviše moguće sile opterećenja prije loma, te savojne čvrstoće sendvič konstrukcije s površinskim slojevima od poliesterske smole i jezgre od sintetske PUR pjene.....89

Tablica 3. Prikaz dimenzija ispitnih tijela, udaljenosti između oslonaca kidalice, najviše moguće sile opterećenja prije loma, te savojne čvrstoće sendvič konstrukcije s površinskim slojevima od poliesterske smole i jezgre od bio PUR pjene.....89

## Popis kratica

Al – aluminij

BMC – Bulk Moulding Compounds

CAD – Computer Aided Design

CAE – Computer Aided Engineering

CAM – Computer Aided Manufacturing

CNC – Computer Numerical Control

CVI – Controlled Vacuum Infusion

EP – epoksidna smola

FEM – Finite Element Method

FW – Filament Winding

ILSS – interlaminarna smična čvrstoća

NURBS – Nonuniform Rational B-Splines

PA – poliamid

PAI – poli (amid-imid)

PAN – poliakrilonitrila

PAS – poli (aril-sulfon)

PEEK – poli (eter-eter-keton)

PUR – poliuretan

PP – polipropilen

PPS – poli (fenil-sulfid)

PPTA – poli-p-fenilentereftalamid

PVC – poli vinil-klorid

RI – Resin Infusion

RTM – Resin Transfer Moulding

SCRIMO – Seeman Composites Resin Infusion Molding Process

SMC – Sheet Molding Compound

UP – poliesterske smole

UV – ultra violetno

VARTM – Vacuum Assisted Resin Transfer Molding

VB – Vacuum Bagging

VIP – Vacuum Infusion Process

VOV – volumni omjer vlakana

2D – dvodimenzionalno

3D – trodimenzionalno

## **Izjava**

Izjavljujem da sam ovaj rad radio samostalno, uz potrebne konzultacije i navedenu literaturu.

**Marin Vlahović**

## Zahvala

Zahvaljujem se svom mentoru prof. dr. sc. Mladenu Šerceru na vodstvu i pomoći tijekom izrade rada. Također se zahvaljujem i asistenticama na Katedri za preradu polimera, dipl. ing. Ani Pilipović i dipl. ing. Maji Rujnić – Sokele, na pomoći pri izradi ovoga rada.

Zahvaljujem se dipl. ing. Damiru Ruljančiću, vlasniku poduzeća Board Guardian, na stručnoj pomoći pri izradi uzoraka za ispitivanje i doniranim materijalima.

Zahvaljujem se dipl. ing. Božidaru Bušetinčanu na pomoći pri ispitivanju savojne čvrstoće polimernih sendvič materijala.

Zahvaljujem se dipl. ing. Stipi Nevistiću, na opisivanju postupka izrade brodova od kompozitnih polimera na temelju iskustva u brodogradnji.

Zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima na potpori i razumijevanju tijekom moga studiranja, a posebno svojim roditeljima Ljiljani i Luki, koji su mi omogućili bezbrižno studiranje i bili najveća potpora.

## 1. UVOD

Brod je financijski skup proizvod, u čiju su izradu uložena znatna materijalna sredstva, vrijeme, znanje i rad. U svakoj proizvodnoj industriji, pa tako i u brodogradnji, moraju se zadovoljiti uvjeti kao što su niska cijena, kratki rokovi isporuke i dobra kvaliteta, te uz to i ostvarivanje financijske dobiti. Potrebno je postići što bolju cijenu proizvoda na tržištu, uz što niže troškove proizvodnje i isporuke. Pri projektiranju brodske konstrukcije potrebno je uz funkcionalnost voditi računa i o estetici, kako bi se zainteresirali kupci.

Brodska konstrukcija je temeljni element svakog broda, materijalizira formu broda, osigurava plovnost, tvori unutrašnji korisni prostor broda i odvaja ga od morske okoline te preuzima sva opterećenja koja ta okolina nameće brodu. [1]

Kod rješavanja konstrukcije projektant nije potpuno slobodan jer mora konstrukciju uskladiti s funkcijom broda i općim planom rasporeda prostora. Konstrukcijska rješenja znatno utječu na trajnost konstrukcije te na početnu cijenu i na cijenu održavanja. Treba uzeti u obzir tehnološke mogućnosti brodogradilišta kao i broj brodova koji se trebaju sagraditi (jedan brod, mala ili velika serija). [1]

Konstrukcijom broda projektant mora obuhvatiti sljedeće elemente: [1]

- Određivanje opterećenja u skladu s namjenom broda i područjem plovidbe
- Izbor materijala, vrste konstrukcije i konstruktivnih rješenja
- Dimenzioniranje elemenata konstrukcije i spojeva
- Definiranje konstrukcije s pripadnim detaljima (nacrtima ili CAD modelima)

## 2. IZBOR MATERIJALA ZA IZRADU BRODA

Pri izboru materijala za izradu broda važno je voditi računa o ekonomskoj računici. Poželjno je izabrati materijal koji će omogućiti izradu kvalitetnog proizvoda u kratkome vremenu, imajući u vidu cijenu i postupak izrade.

Mehanička svojstva brodograđevnih materijala provjeravaju se mjerenjem ponašanja ispitnih uzoraka pri opterećenju. Svi materijali se provjeravaju i odobravaju već kod proizvođača pa prije ugradnje dolaze u brodogradilište s odgovarajućim atestima. Pored mjerenja svojstava osnovnih materijala mjere se i svojstva kompozita i izrađenih elemenata konstrukcije [1]

Materijali u brodogradnji moraju zadovoljavati određene kriterije, kao što su: [1]

- omjeru čvrstoće i mase
- modulu elastičnosti
- podobnosti oblikovanju i obradi
- troškovima izrade konstrukcije (cijeni materijala, utrošenom rada, energiji i dodatnom materijala za obradu)
- troškovima održavanja (površinskoj obradi, pripremi i zaštiti, nepropusnosti, popravcima)
- trajnosti (umoru materijala, koroziji, postojanosti na visoke i niske temperature, gubljenju svojstava s vremenom, truleži i nametnicima)

Pri izboru materijala za izradu broda potrebno je znati ima li materijal zahtijevana svojstva (mehanička, električka, toplinska), te mijenjaju li se ona s vremenom. Potrebno je voditi računa o utjecaju okoline na materijal i na pojavu korozije. Dakle, važni faktori pri izboru materijala u brodogradnji su funkcionalnost i toplinska stabilnost. [1]

Estetika (izgled broda) je u brodogradnji često od velike važnosti, pa je potrebno odabrati materijal koji se može oblikovati u željeni oblik, te da sam materijal u konačnici izgleda prihvatljivo. [19]

Materijal treba biti prikladan glede pouzdanosti i kvalitete, a ujedno proizvod mora biti prihvatljive cijene. Vrlo je važan odabir proizvodnog procesa za kvalitetu, ali i cijenu proizvoda. Danas je i mogućnost recikliranja materijala također vrlo važna. [1]



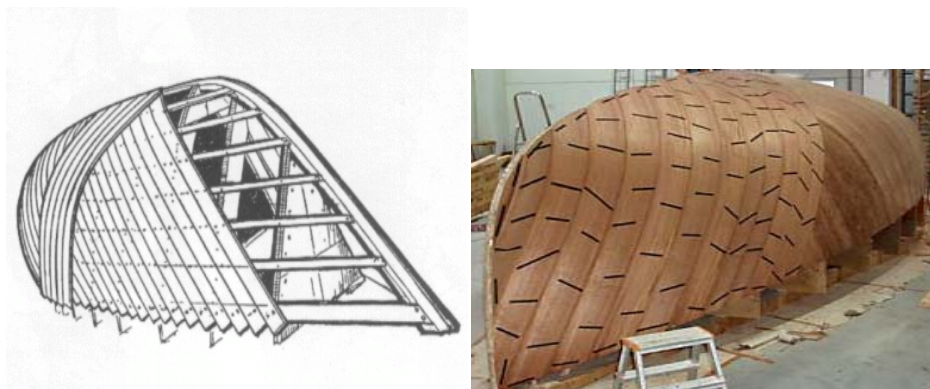
## 2.1. Drvo u brodogradnji

U brodogradnji drvo ima niz prednosti ispred drugih materijala. Estetska svojstva i vizualni doživljaj boravka u okruženju prirodnog materijala su mnogima važni kod odabira materijala za izradu broda (drvo je uvijek u modi). Nedostatak drvenih brodova je duga, komplicirana proizvodnja i održavanje. Serijska proizvodnja drvenih brodova je u praksi gotovo nezamisliva. U tom segmentu, brodovi izrađeni od polimernih kompozita su u velikoj prednosti. [2, 3]

Značajan problem pri izradi drvene konstrukcije je spajanje pojedinih komada drva u građevni element. Spoj dvaju komada drva može se izvesti na mnogo načina, kao što su: [1]

- mehaničko spajanje korištenjem samo drva u spoju
- spajanje metalnim elementima (čavlima, zakovicama, vijcima, svornjacima)
- lijepljenje posebnim vodootpornim ljepilom

Svi ti načini spajanja opterećuju drvo i u smjeru poprijeko na vlakna pa se inherentna slabost spoja mora nadoknaditi gomilanjem materijala. Na slici 2.1. je prikazano spajanje trupa drvenog broda.



Slika 2.1. Prikaz trupa drvenog broda [3]

Primjena epoksidne smole izazvala je veliki napredak u izradi drvenih brodova. Epoksidne smole su dobar impregnator drva ali i odlično ljepilo. Brodovi kod kojih su sve drvene površine izložene vanjskim utjecajima (vlage, morske soli, UV zračenja, itd.) zaštićene epoksidnom smolom, imaju poboljšana svojstva, te troškovi održavanja takvog trupa se ne razlikuju mnogo od održavanja brodova od polimernih kompozita (polimerne smole ojačane staklenim vlaknima). Intervali održavanja ovise o vremenu upotrebe broda u moru, kvaliteti premaza te kvaliteti nanošenja premaza. Usprkos tome, proizvodnja drvenih brodova zahtjevan je, skup i dug proces. [2, 3]

### 2.1.1. Karakteristike drva u brodogradnji

Osnovna karakteristika drva, najstarijeg brodograđevnog materijala, je njegova usmjerenost. Drvo ima različita svojstva u tri moguća smjera naprezanja. Najbolje svojstva su povezana sa smjerom rasta drva pa je u uzdužnom smjeru čvrstoća drva najveća. Radijalni i tangencijalni smjer imaju slična mehanička svojstva ali u tangencijalnom smjeru drvo bubri više nego u radijalnom. [1]

Svojstva drva koja je potrebno poznavati u brodogradnji su: vrsta drva, sadržaj vlage, pritisna čvrstoća, savojna čvrstoća, gustoća, vlačna čvrstoća, youngov modul, poissonov koeficijent, te prekidno istežanje. [1]

Drvo kao materijal ako se kvalitetno održava je najotpornije na tzv. zamor materijala. Zamor materijala jest smanjenje njegovih mehaničkih svojstava poglavito čvrstoće uslijed intenzivnih dinamičkih opterećenja. [2, 3]

Drvo mijenja svoje dimenzije s promjenom vlage (bubri kod povećanja postotka vlage) i to različito kod raznih vrsta drva. Vlažnost drva određena je udjelom vode u ukupnoj masi vlažnog drva. [1]

Cijena drva varira od vrste do vrste ali i mehanička svojstva i trajnost variraju u sličnom omjeru. Svaka vrsta drva ima svoja svojstva, pa se različite vrste drveta često koriste za različite dijelove broda. Vrste drva u brodogradnji su: ariš, bagrem, borovi (alpski, crni, obični i primorski), brijest, bukva, crnika – česmina, čempres, murva - dud bijeli, grab, hrastovi (kitnjak, medunac i lužnjak), jasen, javor, jela, kesten, rogač, smreka. [1]

Drvo ima bolja toplinska, akustična, galvanska i kemijska svojstva u odnosu na druge uobičajene materijale, tako da nema problema s kondenzacijom, korozijom i osmozom. Za razliku od poliesterske smole, aluminijske i visokovrijednih čelika, drvo ima najveći tzv. koeficijent kvalitete (omjer između njegove čvrstoće i volumne težine). [2, 3]

### 2.1.2. Polimerni materijali u završnoj obradi drvenog broda

Danas u gradnji drvenih brodova važan faktor su i polimerni materijali. Kod drvenih brodova polimeri se koriste kod završne obrade broda tj. drvene površine izložene vanjskim utjecajima (vlage, morske soli, UV zračenja, itd.) zaštićene su epoksidnom smolom. Osnovni nedostatak drva u brodogradnji je što ono neprekidno mijenja volumen zbog upijanja i isušivanja vlage i biva podložno napadajima drvotočaca koji ga izjedaju. [2, 3]

Epoksidne smole pripremljene za primjenu u brodogradnji posjeduju dva važna svojstva, a to su: lijepljenje kojim se postiže vrlo čvrsta konstrukcija trupa, te stvaranje površinskog sloja koji sprječava daljnje upijanje vlage pa drvo postaje potpuno stabilan materijal (uz uvjet da je zaštićeno epoksidnom smolom sa svih strana). Impregniranjem drvo postaje praktički drugi materijal, a kako i lijepljeni dijelovi drže gotovo jednako kao i drvo, može se reći da je drvogradnja epoksidima zapravo kompozitna gradnja. Nanošenjem epoksidne smole, prirodni materijal kao što je drvo poprima sve dobre odlike umjetno stvorene plastike, zadržavajući istodobno svoje najbolje prednosti: lakoću, elastičnost, plovnost i jednostavnost obrade. Zbog ultravioletnog zračenje sunca koje oduzima površinski sjaj i kvalitetu, nakon impregniranja epoksidnom smolom potrebno je nanijeti jednokomponentnu ili dvokomponentnu brodsku boju. [2, 3]

Ispitivanjem na probnim komadima različitih materijala (polimerna smola ojačana staklenim vlaknima, aluminij, lamelirano drvo s epoksidnom smolom) izloženih dinamičkim opterećenjima od 1000000 ciklusa u vremenu od 30 sati ustanovilo se da su trajno izgubili na svojoj čvrstoći: [2, 3]

- polimerna smola ojačana staklenim vlaknima je zadržala samo 22 % svoje izvorne čvrstoće;
- aluminij je zadržao 37 % svoje izvorne čvrstoće;
- lamelirano drvo s epoksidnom smolom je zadržalo 64 % svoje izvorne čvrstoće.

Priprema epoksidne smole je jednostavna: na pet težinskih dijelova smole dodaje se jedan dio ukrućivača, promiješa i smjesa je spremna za rad. Za nanošenje se koriste spužvasti valjci, nazubljene lopatice, četke i kistovi. Mogu se koristiti samo na temperaturi od oko 18 °C, inače proces skrućivanja epoksidne smole neće biti završen. [2, 3]

## 2.2. Čelik u brodogradnji

Upotreba čeličnih konstrukcija olakšala je proizvodnju brodova velikih dimenzija. U brodogradnji se zahtijeva posebna kvaliteta čelika. Čelik se nabavlja u obliku ploča ili cijevi raznih profila. Narudžbom 6 mjeseci unaprijed osiguravaju se niže cijene (i do 50 %), ali je brodogradilište izloženo riziku vezanom uz gomilanje zaliha. Čelični dijelovi broda moraju biti zaštićeni od korozije i nakupljanja vegetacija i životinjskih organizama ispod vode, što znatno otežava održavanje takvoga broda. Skidanje postojeće hrđe s limova kao i ostataka boje predstavlja opasnu operaciju sa stajališta zaštite okoliša, pa se to mora odvijati uz posebne mjere opreza i zaštite. [4]

Svojstva metala koje je potrebno uzeti u obzir u brodogradnji su: kemijski sastav, gustoća, prekidna čvrstoća, produljenje kod lima, granica razvlačenja ili konvencionalno naprezanje od 0,2 %, stanje obrade (toplinske ili mehaničke), youngov modul, poissonov koeficijent, minimalni radijus savijanja. [1]

Zaštita od korozije mora se planirati od samog početka projektiranja broda kako bi bila zadovoljavajuća i dugotrajna. Potrebno je: [1]

- osigurati adekvatnu ventilaciju i odvodnjavanje u cilju minimizacije skupljanja kondenzata
- izbjegavati udubljenja s neodgovarajućom drenažom
- izbjegavati primjenu upijajućih materijala u kontaktu s površinom metala
- dobro pripremiti površinu prije primjene bilo kojeg zaštitnog sloja (npr. boje)
- primijeniti tehniku spajanja na mokro u cilju stvaranja brtvene zone protiv prodora vlage ili tekućine
- osigurati lagani pristup u svrhu nadzora nad korozijom i održavanja

Najraširenija tehnologija zaštite brodske trupa od korozije jest zaštita premazima, ali važna za spomenuti je i katodna zaštita. Životni vijek broda mora biti nekoliko desetljeća, u uvjetima koji su s korozijskoga stajališta iznimno nepovoljni. Korozijska oštećenja mogu uzrokovati velike probleme na brodskoj konstrukciji, što osim materijalne štete može uzrokovati ljudske žrtve, te ekološke probleme. [4]

### 2.3. Polimerni kompozitni materijali u brodogradnji

Polimerni kompozitni materijali upotrebljavaju se u brodogradnji zbog niske cijene, brze i automatizirane izrade, mogućnosti oblikovanja i bojenja. Prednosti brodova izrađenih od polimernih kompozita su: jednostavnije izrade, zadovoljavajuće čvrstoće i relativno malih troškova održavanja. [5]

Na samom početku izrade polimernih brodova, koristio se isključivo ručni dodirni postupak laminiranja. Međutim zahtjevi za višom čvrstoćom uz manju težinu, te zahtjevi za smanjivanjem emisije stirena doveli su do novih proizvodnih postupaka. Prije svih treba spomenuti postupak podtlačnog ulijevanja smole (eng. VIP- Vacuum Infusion Process), gdje se na suho posložena staklena ojačavala, nakon zatvaranja zaštitnom folijom (podtlačnom vrećom) pomoću pumpe podtlakom odstranjuje zrak iz kalupa. Iz spremnika se zatim pomoću podtlaka u kalupu ulijeva smola, a zatim pomoću pumpe odstranjuje višak smole. Taj je postupak vrlo povoljan, jer se s njime postiže optimalni omjer smole i staklenih vlakana u brodskoj konstrukciji, što rezultira povoljnim omjerom mase i čvrstoće tako proizvedenog plovila. Osim toga ovaj postupak je prihvatljiv i iz ekoloških razloga, jer zbog zatvorenog kalupa nema emisije stirena. [5]

Svojstva polimernih kompozitnih materijala koje je potrebno poznavati u brodogradnji su: [1]

- Vrsta smole (poliesterska, vinil-esterska, epoksidna,...)
- Vrsta ojačavala (E-staklo, S-staklo, aramidna vlakna, ugljična vlakna,...)
- Vrsta tkanja (mat, roving, jednosmjerni roving, bi-, tri- ili kvadri-aksijalni,...)
- Vrsta jezgre (PVC pjena, saće,...)
- Omjer mase ojačavala i mase laminata
- Gustoća
- Tvrdća po Barcolu
- Poissonov koeficijent
- Youngov modul na vlak, tlak i savijanje
- Tlačna, vlačna i savojna čvrstoća
- Progib

Pored tih svojstava bitno je i vrijeme želiranja, tiksotropnost, zapaljivost, itd.

Kvalitetnim izvođenjem proizvodnog postupka i zadovoljavajućim održavanjem brod izrađen od polimernih kompozitnih materijala, može imati znatno duži životni vijek. Osmoza je proces promjena unutar trupa od polimernog kompozita, tj. prolaz fluida kroz membranu ili porozno tijelo. [6]

S vanjske strane plovila su zaštićena od vode gelnom prevlakom. Gelna prevlaka je poliesterska smola specijalno namijenjena za izradu završnog sloja, koji ga zaštićuje od korozije i istovremeno osigurava zadovoljavajući estetski izgled. Ako je sloj gelne prevlake tanak, polimerizacija je loša pa materijal brzo strada, ali ne valja niti da je predebeli sloj jer onda teži skupljanju pri čemu se otvaraju sitne rupice kroz koje kasnije voda prodire u nezaštićen donji sloj laminata. Također se može desiti da voda prodre u laminat i ondje stvori kemijsku reakciju. Voda zaostala pri izradi trupa ulazi kroz gelnu prevlaku i u strukturi reagira s kemijskim komponentama stvarajući kisele spojeve, koji stvaraju mjehuriće. Pucanjem tih mjehurića na gelnoj prevlaci nastaju udubljenja kroz koje je omogućen prolaz vode u laminata, te trup počinje upijati vodu poput spužve. [7, 8]

Duljina razdoblja do pojave osmoze ovisi o nekoliko čimbenika, primjerice vrsti i temperaturi vode u kojoj se plovilo nalazi, a najvažnija je kvaliteta izrade trupa. 15 % slučajeva osmoze na trup broda nastaje u prve tri godine, a većina ostalih slučajeva osmoze događa se unutar 5 - 7 godina eksploatacije plovila. [6]

Mjehurići i zvjezdaste pukotine su najčešći upozoravajući znakovi. Ako je tekućina u mjehurićima kiselkastog mirisa, masna ili ljepljiva, najvjerojatnije je riječ o osmozi. Zvjezdaste pukotine obično nastaju zbog jakog naprezanja ili udara, a mogu omogućiti vodi da uđe u laminat. Nanošenje gelne prevlake u neodgovarajućim uvjetima može prouzročiti loše rezultate otvrdnuća i rezultirati poroznošću koja može omogućiti prodiranje vode. [6]

### 3. KOMPOZITNE TVOREVINE

#### 3.1. Definicija kompozitnih materijala

Kompoziti su homogeni materijali dobiveni spajanjem dvaju ili više različitih materijala s ciljem postizanja specifičnih karakteristika i svojstava kakva ne posjeduje niti jedan sastojak sam za sebe. Sastoje se od osnovnog materijala (matrice) i dodatnog materijala (ojačavala i/ili punila). [9]

Kompozitni materijali mogu posjedovati neobične, tj. kod drugih materijala neuobičajene kombinacije svojstava (krutost, čvrstoća, težina, ponašanje pri visokim temperaturama, kemijska postojanost, tvrdoća, električna ili toplinska vodljivost). [10]

#### 3.2. Podjela kompozitnih materijala

Temeljna podjela kompozita je:

- metalni kompoziti
- keramički kompoziti
- polimerni kompoziti

Kompoziti se mogu dijeliti prema: [9]

- materijalu matrice (metalni kompoziti, polimerni kompoziti, keramički kompoziti)
- materijalu ojačavala (kompoziti sa staklenim vlaknima ili s metalnim ojačanjem)
- obliku ojačavala (vlaknasti kompoziti, kompoziti sa česticama)
- rasporedu ojačavala (kontinuirani kompoziti, diskontinuirani kompoziti)
- postupku izrade (izravno prešani kompoziti, namotavani kompoziti)
- primjeni (konstrukcijski kompoziti, elektrotehnički kompoziti)

Kompoziti mogu biti: metalno-metalni, metalno keramički, metalno-polimerni, keramičko-polimerni, keramičko-keramički, polimerno-polimerni, polimerno metalni. Kompoziti mogu biti s vlaknima, s česticama i slojeviti. [10]

### 3.3. Svrha kompozitnih materijala

Kompoziti se stvaraju u cilju poboljšanja kombinacija mehaničkih karakteristika kao što su krutost i žilavost, te čvrstoće u uvjetima djelovanja okoline odnosno pri povišenim temperaturama. [10]

Kompozitnim materijalima se postiže [11]:

- povišenje krutosti, čvrstoće i dimenzijske stabilnosti
- povišenje udarne žilavosti
- povišenje toplinske postojanosti
- sniženje troškova
- sniženje apsorpcije vode
- sniženje toplinske ekspanzije
- poboljšanje otpornosti na trošenje
- veću korozijsku postojanost
- smanjenje mase
- poboljšanu konstrukcijsku fleksibilnost



## **4. POLIMERNI KOMPOZITNI MATERIJALI**

### **4.1. Općenito o polimernim kompozitnim materijalima**

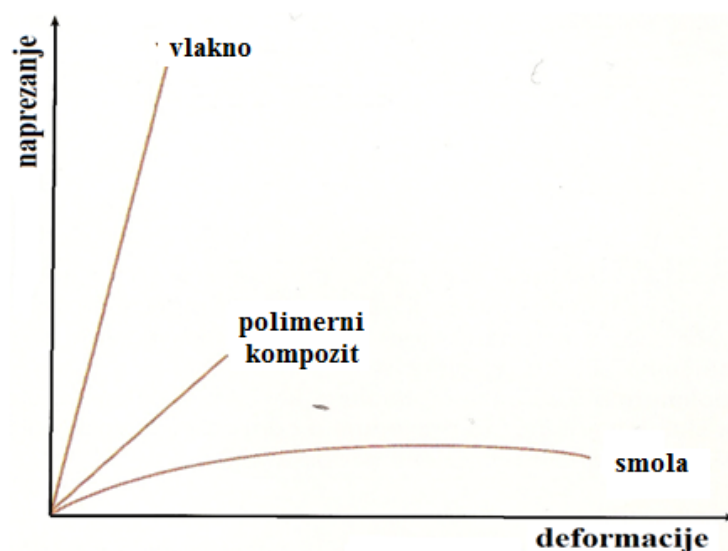
Polimerni kompoziti su najproširenija vrsta kompozita. Zastupljeni su u raznim granama industrijske proizvodnje (automobilskoj industriji, brodogradnji, građevinarstvu, elektrotehnici i elektronici, zrakoplovstvu, vojnoj industriji, te u svemirskim programima) gdje vrlo uspješno zamjenjuju klasične konstrukcijske materijale. Sastoje se od polimerne matrice i punila i/ili ojačavala. Polimerne matrice mogu biti napravljene na temelju duromernih smola (npr. epoksidne, ili nezasićene smole), kaučukovih smjesa, te plastomera. [10]

Ponašanje polimernog kompozita ovisi o svojstvima materijala i ojačavala, veličini i rasporedu konstituenata, volumnom udjelu konstituenata, obliku konstituenata, prirodi i jakosti veza među konstituentima. Kompoziti mogu istovremeno postići: visoku čvrstoću, visoku krutost i malu masu, postojanost na različite medije i druge kombinacije svojstava. Moguća je izrada složenih oblika od polimernih kompozita. Njihovom primjenom dolazi do sniženja troškova naknadne obrade dijelova. Također jedna od odlika polimernih kompozita je dimenzijska stabilnost pri ekstremnim radnim uvjetima. [9]

### **4.2. Svojstva polimernih kompozita**

Polimerni se kompoziti zbog svojih svojstava sve više primjenjuju u brodogradnji, zrakoplovstvu, građevini i automobilskoj industriji. Važna temeljna svojstva polimernih materijala su čvrstoća, žilavost, krutost, a nezaobilazna su i neka specifična svojstva kao npr. međuslojna čvrstoća i sadržaj šupljina. [10]

Kako se polimerni kompoziti sastoje od smole ojačane vlaknima, svojstva polimernih kompozita ovise o svojstvima vlakna, svojstvima smole, volumnom omjeru vlakana naspram smole (VOV) te geometriji i orijentaciji vlakana u kompozitu. Na slici 4.1. je prikazano kako polimerni kompozit sadrži svojstva koja nema niti jedna njegova komponenta pojedinačno. Najvažnija karakteristika kompozitnih materijala je da se njihova svojstva mogu oblikovati prema željama i potrebama gotovog proizvoda (izdržljivost kompozita na tlak, vlak, smik i savijanje). [7]



Slika 4.1. Prikaz poboljšanih svojstava polimernih kompozita [7]

Prednosti kompozitnih polimernih materijala u odnosu na druge konstrukcijske materijale su: povoljne vrijednosti specifične čvrstoće i specifične krutosti, mala gustoća, dobra kemijska postojanost, dobro prigušenje vibracija, relativno laka i ne suviše skupa proizvodnja konstrukcijskih dijelova. Naravno postoje i nedostaci, a to su: krutost (nedeformabilnost), mogućnost raslojavanja i mrvljenja, anizotropnost svojstava, skupe komponente. [7]

Kemijski sastav polimerne matrice bitno određuje svojstva polimernih kompozita. U primjeni prevladavaju duromerne matrice, prvenstveno one poliesterskog i epoksidnog tipa. Različiti tipovi poliesterske matrice uz isto ojačavalo mogu pokazati različita svojstva. Za svojstva kompozita važna je ne samo vrsta ojačavala nego i njegova usmjerenost i raspodjela u matrici. [7]

Zbog heterogene strukture polimernih kompozita sposobnost povezivanja matrica i ojačavala bitno utječe na svojstva. Za homogenizaciju kompozita važna je kompatibilnost matrice i ojačavala, a često se koriste organske matrice s anorganskim ojačavala (staklom). [7]

Kompoziti gotovo uvijek sadrže šupljine raznih oblika i veličina koje nastaju zbog neuklopljenih mjehurića zraka u viskoznoj fazi smole tijekom izrade ili su posljedica lošeg kvašenja vlakna (npr. uslijed neodgovarajuće viskoznosti matrice). Te šupljine smanjuju svojstva i bitno utječu na djelovanje medija. [7]

Mehanizmi postizanja svojstava kompozitnih materijala su: [9]

- **Adicijski efekt** - doprinos pojedinog sastojka neovisan je o doprinosu drugih (npr. gustoća kompozita je približno srednja vrijednost gustoće njegovih sastojaka proporcionalno njihovim masenim udjelima)
- **Komplementarni efekt** - svaki sastojak doprinosi ostvarenju samo određenog svojstva kompozita (sendvič kompoziti - unutarnji sloj preuzima i prenosi opterećenja, a vanjski slojevi služe primjerice samo za poboljšanje postojanosti na atmosferske utjecaje)
- **Interakcijski efekt** - određena svojstva kompozita bolja su nego pojedinačna svojstva njegovih sastojaka - dolazi do sinergističkog djelovanja sastojaka

### 4.3. Zastupljenost polimernih kompozitnih materijala u proizvodnim tehnologijama

Isplativost je glavni uvjet prihvaćanja i opstanka bilo kojeg materijala na tržištu. Važan čimbenik je također i zaštita okoliša i zdravlja ljudi pa je važna mogućnost oporabivosti odbačenih proizvoda i prijelaz na održive postupke proizvodnje (zatvoreni kalupi). Svjetski je trend proizvodnja zelenih polimernih tvorevina što podrazumijeva da se pri njihovoj proizvodnji, uporabi i zbrinjavanju vodi računa o zahtjevima zaštite okoliša i smanjenju potrošnje neobnovljivih izvora. [10]

Osnovna podjela polimera izgleda ovako:

1. Plastomeri – podliježu deformacijama pod utjecajem temperature.
2. Duromeri – toplinski postojani pa mogu biti konstrukcijski materijali.
3. Elastomeri (kaučuci)

Najviše se upotrebljavaju duromerne kompozitne tvorevine, i to poliesteri, epoksidi i vinil-esteri. Poliesteri imaju dobra mehanička svojstva i lako se prerađuje (pri sobnoj temperaturi), te najprihvatljivije cijene. Epoksidi imaju veću kemijsku postojanost, manju kontrakciju volumena i bolja električna svojstva. Vinil-esteri se lako prerađuju kao poliesteri a kemijski su postojani skoro kao epoksidi. [7]

Duromerne kompozitne tvorevine mogu se proizvoditi tradicionalnim postupcima u otvorenim kalupima (ručni dodirni postupak, štrcanje), ali i automatiziranim kao npr. namotavanje, pultrudiranje. Veliku važnost ima i tzv. „čišća“ proizvodnja kompozitnih tvorevina u zatvorenim

kalupima (npr. posredno prešanje, podtlačni injekcijski postupak, podtlačno ulijevanje...), kao i korištenje smola koje ne sadrže stiren. [10]

Postoji potreba za kraćim vremenom razvoja proizvoda i kraćim vremenom dolaska na tržište što zahtjeva razdvajanje i paralelan razvoj pojedinih faza tijekom proizvodnje polimernih proizvoda. Upotrebom računala postiže se veliki napredak u uspješnoj proizvodnji polimernih materijala i proizvoda u svim fazama od početne ideje do zbrinjavanja iskorištenih proizvoda. [10]

#### **4.4. Polimerni kompozitni materijali s obzirom na vrstu ojačavala**

Prema vrsti ojačavala kompoziti mogu biti: [9]

- kompoziti s vlaknastim ojačanjima (nositelji mehaničkih svojstava su vlakna)
- kompoziti s dispergiranim česticama (nositelj mehaničkih svojstava je matrica)
- hibridni kompoziti (s vlaknima i dispergiranim česticama)

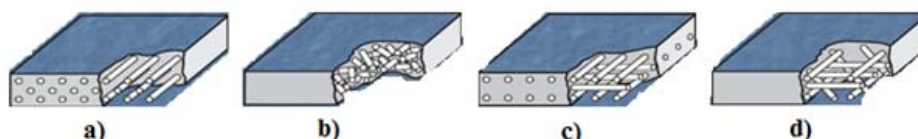
##### **4.4.1. Polimerni kompoziti s vlaknastim ojačanjem**

Funkcija vlakana je da nose opterećenje, a zbog visoke čvrstoće mogu zaustaviti širenje pukotine. Vlakna se razlikuju prema: vrsti materijala, duljini, promjeru, orijentaciji i hibridizaciji. S obzirom na duljinu i orijentaciju vlakana dijele se na kompozite s kratkim vlaknima i česticama, one s dugim jednosmjerno orijentiranim vlaknima i one s dugim višesmjerno orijentiranim vlaknima (najveća djelotvornost ojačavala). [9]

Niti su vlakna u užem smislu, imaju izvrsna mehanička svojstva ali su izrazito anizotropna (u smjeru vlakana čvrstoća materijala je vrlo često i do nekoliko puta veća nego okomito na vlakna). Viskeri su vrlo tanke niti monokristala koje posjeduju izvrsna mehanička svojstva zbog pravilne kristalne strukture. Imaju velik omjer duljina/promjer, tj. imaju mnogo manji promjer u odnosu na duljinu. [9]

Vlakna mogu biti beskonačno duga (kontinuirana vlakna) ili kratka (diskontinuirana vlakna). Promjeri vlakana mogu biti u rasponu od 1  $\mu\text{m}$  do 1 mm. Volumni udio vlakna u kompozitu može iznositi i više od 70 %. [12]

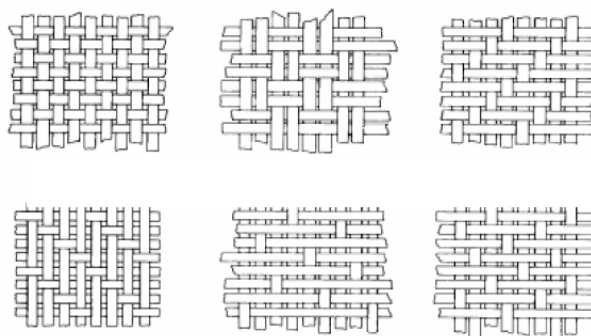
Ključan je odnos volumena i obodne površine vlakna. Prijenos opterećenja s matrice na vlakna postiže se preko obodne površine. S obzirom da se povećanjem prijena opterećenja s matrice na vlakna povećava čvrstoća kompozita, pomoću vrlo malih promjera vlaknaca postižu se visoke čvrstoće kompozitnih materijala. Danas su uobičajeni promjeri vlaknaca  $3\ \mu\text{m} - 30\ \mu\text{m}$ . Na slici 4.2. su prikazani različiti rasporedi vlakana u matrici. [12]



Slika 4.2. Raspored vlakana: a) kontinuirana jednosmjerna vlakna, b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna, c) ortogonalno raspoređena vlakna, d) višesmjerno usmjerena vlakna [9]

Jednosmjerno usmjerenje kontinuiranih vlakana može se primijeniti na izradu proizvoda kod kojih se žele postići bolja mehanička svojstva u jednom smjeru. Na taj način dolaze do izražaja anizotropna svojstva kompozita. Kod ortogonalnih višesmjernih i kratkih slučajno usmjerenih vlakana kompoziti imaju izraženija izotropna svojstva. Od vlakana se mogu izraditi tkanine ili trake. Slojevi traka mogu se različito usmjeravati. Jednosmjerna vlakna imaju optimalnu krutost i čvrstoću kada je opterećenje paralelno s vlaknima. Osim u jednom smjeru vlakna možemo polagati ortogonalno ili pod nekim drugim kutom. Time se snižava čvrstoća, ali i postižu jednoličnija svojstva kompozita. [12]

Vlaknasti polimerni kompozitni materijali su anizotropni pa imaju bolja svojstva u smjeru vlakana. Pojava usmjerenosti mehaničkih svojstava uklanja se laminiranjem nekoliko slojeva kompozita od kojih svaki ima vlakna usmjerena u drugom smjeru. Na slici 4.3. su prikazani primjeri tvornički različito pletenih vlakana. Ukoliko je potrebno proizvesti materijal izotropnih mehaničkih svojstava, koriste se vlaknasta ojačavala koja nemaju pravilnu usmjerenost. [9]



Slika 4.3. Primjeri tvornički različito pletenih vlakana [11]

Prednosti vlaknastih polimernih kompozita su: [9]

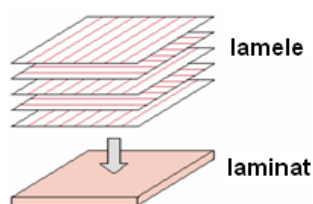
- znatno više specifične čvrstoće i krutosti
- postojanost prema većini kiselina i lužina
- relativno niska cijena proizvodnje i obrade
- velika mogućnost prigušenja vibracija i dobra tarna svojstva

Nedostaci vlaknastih polimernih kompozita su: [9]

- osjetljivost na raslojavanje i mrvljenje
- mogućnost širenja pukotina duž vlakna
- napetosti izazvane skupljanjem matrice pri i nakon proizvodnje tvorevine
- anizotropnost svojstava i visoka cijena

#### 4.5. Laminati

Osnova kompozitne konstrukcije je laminat. Laminati su strukturirani polimerni kompoziti koji kao ojačanje imaju samo jednu vrstu vlakana, koja se ovisno o potrebi laminiraju u predviđenim smjerovima i slojevima. Polimerni laminat su kemijskom reakcijom stvrdnute i staklenim vlaknima ojačane epoksidne ili poliesterske smole. Lamele s različito orijentiranim vlaknima ojačavala slažu se i lijepe međusobno u laminat uz djelovanje tlaka, kao što je prikazano na slici 4.4., te se tako dobiva laminatna struktura kompozita. [9]



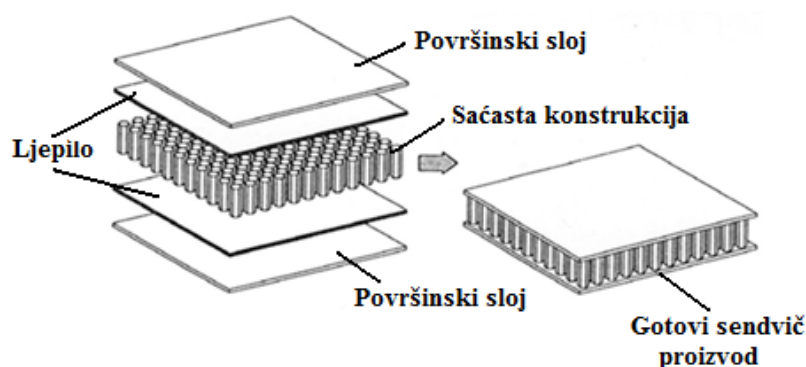
Slika 4.4. Laminantna struktura kompozita [11]

#### 4.6. Sendvič konstrukcije

Sendvič konstrukcije (sendvič materijali) su strukturni kompoziti koji ne ovise o svojstvima matrica i ojačavala već o geometrijskom rasporedu elemenata konstrukcije. Sastoje se od tankih

vanjskih (površinskih) slojeva spojenih, ali i razdvojenih, s materijalom male mase za popunjavanje, kao što je npr. polimerna pjena (slika 4.5.). Materijal za popunjavanje i vanjski slojevi ne trebaju biti čvrsti niti kruti, a sendvič posjeduje oba ta svojstva. Kao materijali površinskih (vanjskih) slojeva najčešće se upotrebljavaju aluminijski limovi i vlaknima (staklenim ili ugljičnim) ojačani polimeri, a nešto rjeđe čelici. Za jezgre sendvič konstrukcija upotrebljava se velik broj materijala. [13]

Posebno mjesto zauzimaju sendvič konstrukcije na osnovi polimernih materijala. Osnovna prednost takovih konstrukcija je u njihovoj visokoj mehaničkoj krutosti, otpornosti umoru, žilavosti, kemijskoj postojanosti itd. Njihova primjena dovodi do smanjenja mase konstrukcije, te posljedično povećanja nosivosti. [13]



Slika 4.5. Prikaz nastajanja sendvič panela [13]

Primjena sendvič konstrukcija je u: građevini (krovovi, podovi, pregradne stijene i sl.), zrakoplovstvu (oplate krila, trupa, repa, unutarnje uređenje zrakoplova i sl.), pri gradnji vozila (automobili, kamioni, željeznička vozila) i vrlo značajna primjena u brodogradnji. [13]

#### 4.6.1. Primjena sendvič konstrukcija u brodogradnji

Sendvič konstrukcije susreću se u brodogradnji pri izradi nosivih konstrukcija, ali i pri izradi konstrukcija kod kojih zahtjevi u pogledu mehaničkih svojstava nisu prioritet. Posebno maloj brodogradnji, za brze brodove kao i u nekim posebnim slučajevima. Zbog svoje velike raznolikosti (po sastavu, svojstvima, mogućnostima izrade itd.), primjena sendvič materijala u brodogradnji je raznovrsna. Sendvič materijali se ponajprije upotrebljavaju pri proizvodnji brzih brodova i to za tzv. “strukturne” i “nestruckturne” dijelove.“ [13]

„Strukturni dijelovi” su oni koji su u uporabi izrazito mehanički opterećeni, tj. dijelovi kod kojih je pri izboru materijala i pri dimenzioniranju prioritetno udovoljavanje zahtjevima koji su povezani s mehaničkim opterećenjem. “Nestrukturni dijelovi” su oni kod kojih su prioritetni zahtjevi u pogledu dekorativnosti (estetike, boje itd.), samogasivosti, kemijske postojanosti itd. [13]

Kod brodova sendvič materijali posebno su zanimljivi zbog smanjenja mase što rezultira većom brzinom plovila, povećanjem nosivosti, te smanjenjem potrošnje goriva. Sendvič materijali imaju povišenu krutost što smanjuje potrebu za podupiranjem, a time doprinose fleksibilnosti prostora. Ovi materijali imaju povišenu dinamičku čvrstoću, otporniji su na udarna opterećenja, a u slučajevima kada su komponente kemijski postojane, kemijski je postojana i sendvič konstrukcija. [13]

Jezgra u sendvič konstrukciju uvodi dodatnu komponentu koja ima funkciju prenošenja smičnih naprezanja između dviju oplata sendviča.

Materijal jezgre može biti: [1]

- puno drvo (najčešće laganije vrste četinjača)
- furnirska ploča (brodograđevne kvalitete)
- balza (rezana s vlaknima okomitim na površinu sendviča, npr. BALTEK)
- pjenasti umjetni materijali (različite gustoća, na bazi PVC - poli vinil-klorid, poliuretan i fenol-formaldehidna pjena)
- saće (karton sa smolom, Al folija, npr. TERMANTO)

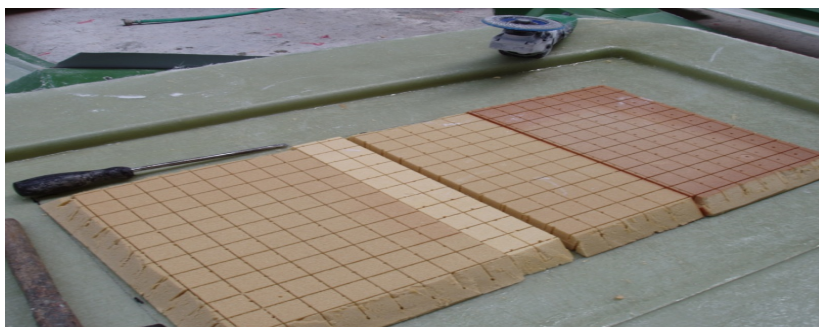
Sendvič konstrukcije korištene u brodogradnji sastoje se od kombinacije poliesterskih ili epoksidnih laminata i pjenastih materijala. One posjeduju dobra mehanička i termoizolacijska svojstva. U brodogradnji se koristi ekspanzirani PVC. Za izradu trupa broda koristi se kruta PVC pjena (slika 4.6.), koja je predviđena (oblikovana) za dinamičko opterećenje. Ta kruta pjena ima visoku otpornost na udarce i dobru zvučnu izolaciju. U slučaju opetovanih koncentriranih sila (udaraca) ne dolazi do uništenja ili savijanja materijala. [7]

Prevlaka za sendvič konstrukciju pri izradi trupa broda je polimerni kompozit koji se sastoji od poliesterske, vinil-esterske ili epoksidne smole ojačan staklenim vlaknima. Pri spajanju PVC pjene i laminata mora se osigurati besprijekorna i snažna veza između laminata i tvrde pjene, i moraju se izbjeći migracije stirena s neotvrdnute smole u pjenasti materijal. Migracije stirena u



penasti materijal se mogu izbjeći izoliranjem premazom tvrde PVC pjene prije postupka laminiranja. [7]

Postupci vezivanja tvrde PVC pjene na laminat su: ručno laminiranje, ugradnja tvrde PVC pjene na otvrdnuti laminat s lijepilom, poliesterskom smolom ili poliesterskim kitom, te ugradnja tvrde PVC pjene na neotvrdnuti (mokri) laminat. [7]



Slika 4.6. Prikaz krute PVC pjene koja se upotrebljavaju kao jezgra u sendvič konstrukciji broda [14]

#### 4.7. Ojačavala

Ojačavala moraju ispunjavati uvjet čvrstoće, modula elastičnosti, kompatibilnosti s matricom, gustoće, kemijske postojanosti, nekoroziivnosti, itd. Općenito ojačavala mogu biti: [1]

- prirodna vlakna (pamuk, sisal, lan, itd.)
- staklena vlakna (E-staklo, S-staklo, R-staklo)
- poliesterska vlakna (Dacron, Terilen, itd.)
- aramidna vlakna (Kevlar, Twaron, itd.)
- ugljična vlakna (Carbon)
- metalna vlakna (žica ili žičano pletivo)

Bez obzira na materijal vlakna se rijetko direktno koriste bez prethodne pripreme u obliku poluproizvoda. Nakon postupka proizvodnje individualna vlakna se grupiraju u strukove koji se zatim namataju u klupka. Najčešće vrste poluproizvoda su mat, roving, platna i tkanine.

U nastavku su opisane neke vrste ojačavala. [1]

#### 4.7.1. Staklena vlakna

Staklena ojačavala su nosilac mehaničkih svojstava kompozita. Staklena vlakna (filamenti) su najčešće upotrebljavana ojačavala u polimernim kompozitima (za duromere i plastomere). Dobivaju se raznim tehnološkim postupcima iz staklene taljevine. Na tako proizvedena vlakna nanosi se aparatura koja vlaknima daje potrebna mehanička svojstva i specifičnu kompatibilnost s različitim smolama za postupke proizvodnje kompozitnih proizvoda. Ova vrsta vlakana je najčešće korištenja u brodogradnji. [7]

Staklena vlakna se proizvode kao kratka (isjeckani roving) i dugačka vlakna (kontinuirani roving). Dugačka vlakna (slika 4.7.) se upotrebljavaju kod postupaka sa štrcanjem vlakana štrcanja, za tkanje (ručno i strojno nanošenje u otvorene kalupe). Kratka vlakna (sječena) se upotrebljavaju u duromerima i smjesama koje se prerađuju postupcima ubrizgavanja ili injekcijskog prešanja. [7]

Za postupke podtlačnog injekcijskog prešanja i pultrudiranja u otvorenim kalupima se upotrebljava mat. Mat je proizvod sječene rovinga (dužine oko 5 cm), koji se sastoji od jednoliko debelog sloja vlakana površinski razbacanih u svim smjerovima (neusmjerena vlakna), a koja na okupu drži posebno ljepilo (u obliku emulzije ili praha) topivo u matrici ili su okomito na površinu prošivena vlaknima od istog ili drugog materijala. Mat brzo impregnira (natapa se), dobre je prozirnosti i dobrih mehaničkih svojstava. U matu nisu dozvoljene šupljine (rupe) promjera preko 50 mm. Laminat izrađen s matom rezultira podjednakim svojstvima u svim smjerovima. [7, 1]



Slika 4.7. Prikaz staklenih vlakana [11]

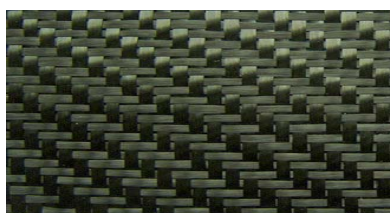
Svojstva kompozita sa staklenim vlaknima su: [7]

- povišena rastezna čvrstoća i modul rastezljivosti;
- povoljnog su omjera čvrstoće i mase;
- postojani su pri povišenim temperaturama i koroziji;
- dimenzijski su stabilni;

- dobra električna svojstva;
- postojani su na starenje;
- relativno se jednostavno i jeftino prerađuju u gotove proizvode.

#### 4.7.2. Ugljikova vlakna

Najveći rast na tržištu vlakana bilježe ugljikova vlakna. Ugljikova vlakna (slika 4.8.) se postupkom grafitizacije dobivaju najčešće od poliakrilonitrila (PAN) koji daje najbolja svojstva vlaknima. Postupak dobivanja iz PAN-a je skup. Proizvode se još i od katrana i celuloze. Podešavanjem parametara tijekom procesa grafitizacije dobivaju se ili vlakna visoke rastezne čvrstoće ili vlakna visokog modula rastezljivosti. Nakon oblikovanja se tretiraju (nanošenje tzv. apreture) kako bi se poboljšalo njihovo prianjanje uz matricu. Promjer vlakana je 4  $\mu\text{m}$  do 10  $\mu\text{m}$ . Na osnovu vrijednosti modula vlaka (Youngov modul) dijele se na vlakna standardne, srednje, visoke i ultra- visoke čvrstoće. [9]



Slika 4.8.. Ugljikova vlakna

Koriste se u zrakoplovnoj i automobilskoj industriji, za izradu sportske opreme, te sve češće u brodogradnji. Kompozitna struktura napravljena od ugljičnih vlakana i epoksidne smole koristi se u svim područjima tehnike i proizvodnji sportskih rekvizita, glazbala, vozila i letjelica. [9]

Svojstva ugljikovih vlakana su: [9]

- najvišu krutost od svih komercijalno dostupnih vlakana
- vrlo visoka rastezna i pritisna čvrstoća i na povišenim temperaturama
- odlična postojanost na otapala, vlagu, kiseline, puzanje i zamor materijala

### 4.7.3. Aramidna vlakna

Aramidna vlakna su umjetni organski polimeri (aromatski poliamid), proizvedeni pređenjem kontinuiranog vlakna iz kapljevite smjese. Najčešće se koriste u kombinaciji s epoksidnim i poliesterskim smolama. Tako dobivena vlakna imaju tipičnu zlatno žutu boju, a karakterizira ih visoka rastezna čvrstoća i niska gustoća. Imaju sjajni omjer čvrstoće i mase koji je povoljniji od metala. Najpoznatija aramidna vlakna su Kevlar (poli-p-fenilentereftalamid – PPTA), prikazana na slici 4.9., te Twaron. [9, 15]

Sadržavaju visoka mehanička svojstva pri temperaturama od  $-200^{\circ}\text{C}$  do  $+200^{\circ}\text{C}$ . Podložna su na djelovanje jakih kiselina, ali su postojana na otapala i druge kemikalije. Dije se na temelju vrijednosti modula rastezljivosti. Svi tipovi aramidnih vlakana imaju dobru udarnu žilavost, a oni s nižim modulom rastezljivosti vrlo intenzivno se koriste u balistici. Aramidna vlakna se tkaju jednostavnije od staklenih, ugljičnih ili keramičkih vlakana. [7, 12]



Slika 4.9. Aramidna vlakna (Kevlar)

Aramidna vlakna u suvremenim mješavinama već nadomještaju čelik i aluminij. Jedna su od osnovnih komponenata za izradu polimernih materijala gdje se traže izuzetna toplinska i mehanička svojstva. Upotrebljavaju se u izradi zračnih i svemirskih letjelica, vojnoj industriji (pancirke), brodogradnji, industriji sportske opreme, građevinarstvu i elektronskim uređajima. [7]

### 4.7.4. Hibridna vlakna

Hibridna vlakna su sastavljena od dvaju ili više vrsti vlakana. Spajanjem vlakana postižu se optimalna svojstva. Hibridizacija se izvodi najčešće izravno pri proizvodnji kompozitnog proizvoda. Najčešće se primjenjuje hibrid ugljikovih/aramidnih/staklenih vlakana - u brodogradnji i zrakoplovstvu. Upotrebom hibrida proizvoda se poboljšava udarna žilavost, sprječava galvanska korozija i snižava cijena. [7]

#### **4.7.4.1. Borna vlakna**

Ugljikova ili metalna vlakna ponekad se prevlače slojem bora kako bi se poboljšala ukupna svojstva vlakna. Mana bornih vlakana je visoka cijena koja ograničava upotrebu tih vlakana, pa se koriste najčešće samo za zrakoplovne konstrukcije s velikim toplinskim opterećenjima i na specijalizirane sportske proizvode. Bor/ugljkov hibrid u epoksidnoj matrici ima bolja mehanička svojstva nego bilo koje vlakno pojedinačno. Prednosti bornih vlakana su dobra svojstva obzirom na pritisno opterećenje, torziju i druga kombinirana opterećenja. Poteškoće se javljaju pri obradi zbog visoke tvrdoće tih vlakana. [9]

#### **4.7.5. Keramička vlakna**

Keramička vlakna su anorganskog porijekla. Proizvode se od različitih vrsta keramičkih materijala, najčešće aluminijevog oksida i silicijevog karbida. Uglavnom su kao ojačanja zanimljiva zbog visoke toplinske postojanosti i postojanosti na djelovanje vlage, te su primjerena za kompozite koji su podvrgnuti ekstremnim opterećenjima. Keramička vlakna se najčešće upotrebljavaju s epoksidnim smolama. Koriste se za proizvodnju industrijske opreme koja je podvrgnuta teškim uvjetima, pretežno u kemijskoj industriji. Najčešće se koriste u obliku viskera u izradi konstrukcija namijenjenih ekstremnim uvjetima. [7]

#### **4.7.6. Vlakna biljnog porijekla**

Biljna vlakna postaju sve interesantnija kao zamjena za staklena vlakna. Nažalost, čvrstoća biljnih vlakana je relativno niska u usporedbi sa staklenim vlaknima. Prirodna vlakna se koriste u drvno-plastomernim kompozitima ili kao zamjena za ostala vlakna. Najčešće se rabe drvena vlakna (bor, jasen, hrast), vlakna agave, ljuske riže i kukuruz konoplja, juta, te agave. [10]

Briga za okoliš u kombinaciji s niskom cijenom pobudila su interes za drvena i biljna vlakna kao ojačavala u plastomernim kompozitima. U usporedbi sa staklenim vlaknima postiže se manja proizvodnost, imaju slabija mehanička svojstva, slabiju postojanost na vlagu i okolišne uvjete. Prednosti su im niža gustoća i cijena, te lakše recikliranje. Prirodna vlakna su sklona razgradnji

pri temperaturama prerade većine plastomera što ograničava broj tih materijala koji mogu poslužiti kao matrice. [10]

#### 4.8. Polimerne matrice

Polimerne matrice povezuju komponente i određuju termomehaničku postojanost kompozita, zaštićuju ojačavalo od trošenja/abrazije i okoliša, pomažu pri raspodjeli nametnutog opterećenja budući da djeluju kao medij za prijenos naprezanja, daju: trajnost, međuslojnu žilavost i smičnu/tlačnu/poprečnu čvrstoću sustavu, održavaju željenu orijentaciju vlakana i razmake u kompozitu. Materijal matrice u pravilu mora ispuniti više funkcija, od kojih su neke ključne za postizanje zadovoljavajućih performansi kompozita. Matrica ne smije kemijski reagirati s vlaknom i mora dobro prijanjati uz vlakna. [9]

Matrica može biti materijal koji u krutom stanju zadovoljava većinu svojstava, kao što su: čvrstoća, modul elastičnosti, adhezivnost, gustoća, nepropusnost, nezapaljivost, neškodljivost, tiksotropnost, itd. [1]

Karakteristike matrice su: [11]

- čvršća od ojačavala
- osigurava dobro povezivanje s ojačavalom
- osigurava zaštitu ojačavala od utjecaja okoline
- osigurava prijenos opterećenja s jednog na drugi dio ojačavala
- snižava posmično naprezanje kompozita

Vrste polimernih matrica su: [9]

- **Duromerne** (poliesterske, epoksidne, vinil-esterske, fenolne smole, itd.)
- **Plastomerne** (PA–poliamid, PE –polietilen, PP – polipropilen, visokotemperaturni plastomeri (PEEK– polietereketon, PPS – polifenilsulfid))

## 4.8.1. Duromerne matrice

### 4.8.1.1. Epoksidne smole (EP)

Najčešće upotrebljavane duromerne matrice su epoksidne smole. Posjeduju sjajna mehanička svojstva, sjajnu postojanost na agresivne medije, te visoku toplinsku postojanost. Samim time imaju dugotrajnu postojanost na vanjske utjecaje. Osobita adhezivna svojstva dolaze do izražaja u primjeni ovih smola kod izrade laminatnih trupova. [7]

Kompozit s matricom od epoksidne smole koja je ojačana staklenim vlaknima posjeduje: [9]

- izvrsna mehanička svojstva
- postojanost na atmosferilije - proširena primjena u zrakoplovnoj industriji
- vrlo dobra postojanost na djelovanje agresivnih medija i vode
- u laminatnim konstrukcijama ih odlikuje dobro prijanjanje za ojačavala i dobra postojanost na utjecaj vlage što ih čini idealnim u izradi plovila, za izradu kvalitetnijih brodskih trupova ili češće kao površinski (zaštitni sloj) trupa.

Najveći nedostatak epoksidnih smola je njihova cijena. Prvenstveno se koriste kod izrade trupova jako opterećenih jedinica u brodogradnji i avionskoj industriji. [9]

### 4.8.1.2. Poliesterske smole (UP)

Zasićeni poliesteri su linearni lančani polimeri. Mogu se modificirati s diizocijantima, gdje je prvi korak produljenje lanaca ili vezanje dva poliesterska lanca zajedno. Takvi modificirani zasićeni poliesteri su vrlo postojani na kemikalije i abraziju, te imaju odličnu adheziju. Samim time imaju široku uporabu. [7]

Kompoziti s poliesterskim smolama, te ojačani staklenim vlaknima se vrlo često koristi, posebice u brodograđevnoj industriji. Razlog toga su niska cijena i relativna jednostavnost korištenja. Koristi se mješavina poliestera i monomera, najčešće stirena. Dodatak stirena (do 50 %) snižava viskoznost smole i olakšava primjenu (stiren služi za povezivanje molekula poliestera i samim

time i očvršćuje materijal). Poliesterske smole imaju ograničeni rok trajanja, pa se često u postupku proizvodnje dodaju male količine usporavala. [9]

Poliesteri su makromolekule na bazi diabazičnih kiselina (ortoftalna, izoftalna, tereftalna kiselina itd.) i diola kao što su etilen glikol, propilen glikol, neopentil glikol, bisfenol itd. Nezasićene poliesterske smole su najviše zastupljene unutar velike grupe poliesterskih smola. [9]

Poliesterske smole se odlikuju nizom dobrih svojstava koja su im u kratkom vremenu omogućila brzi razvoj i široku primjenu u proizvodnoj industriji. Alati i kalupi su im jednostavni i razmjerno jeftini, kalupi se mogu izraditi od gipsa, metala, drva, te od epokidne i poliesterske smole. Mogu se prerađivati pri sobnoj temperaturi, a gotovi proizvodi su postojani i na visokim temperaturama. Daju veliku slobodu pri odabiru oblika gotovog proizvoda, te su dimenzionalno stabilni. [7]

Poliesterske smole imaju sposobnost brzog prelaženja iz tekućeg u kruto stanje bez velikog razvijanja hlapljivih nusprodukata što omogućava kratke proizvodne cikluse te preradu pod niskim pritiskom ili bez primjene pritiska. Tvrdća i elastičnost poliestera može varirati u vrlo širokim granicama, te su moguće varijacije od krutih do savitljivih proizvoda. Podnose dodatak jeftinih punila uz minimalni utjecaj na mehanička i ostala svojstva gotovih proizvoda. Posjeduju odlična optička svojstva, mogu se lagano bojati organskim i anorganskim bojama (pigmentima), a uz opreznu preradu i izbor smole mogu se dobiti vrlo prozirni predmeti. [7]

Slabo provode toplinu (neki specijalni poliesteri se odlikuju odličnom toplinskom stabilnošću). Primjenjuju se kao antikorozivni materijali zbog postojanosti prema atmosferijama i kemijske postojanosti. Posjeduju dobra električna i dielektrična svojstva pa su zastupljeni u elektronici i elektrotehnici. Specijalni tipovi poliestera su samogasivi, što im dodatno proširuje područje primjene. [7]

#### **4.8.1.3. Vinil-esterske smole**

Vinil-esterske smole su zapravo epoksi vinil-esterske smole otopljene u stiren-monomeru. Odlikuju se visokom reaktivnošću, dobrom preradom i dugim rokom trajanja. Osiguravaju visoku postojanost na široki spektar kiselina, lužina i otapala, te visoku toplinsku postojanost



oblika. Vinil-esterske smole sve se više pojavljuju u brodogradnji naročito kod većih plovnih jedinica. [7]

Svojom molekulskom strukturom slične su poliesterima, ali imaju nešto bolja mehanička svojstva. Čvršće su od poliesterskih smola, te su bitno postojanije na vlagu i kemikalije (neke kiseline, lužine i druga otapala). Često se upotrebljavaju kao završni premaz brodskih trupova, te kao različiti dodaci čime se poboljšava postojanost na djelovanje UV zraka, te vatrootpornost. Mogu se primijeniti do temperature približno 125 °C. [9,16]

#### **4.8.1.4. Fenolne smole**

Fenolne smole su toplinski postojane, samogasive, te tvrde. Imaju povišenu postojanost prema utjecaju organskih otapala i kiselina. Pri umreživanju otpuštaju veliku količinu hlapljivih tvari što nepovoljno utječe na mehanička svojstva smole kao matrice. Relativno su krhke i slabijih mehaničkih svojstava od epoksidnih i poliesterskih smola. [9, 16]

#### **4.8.1.5. Usporedba svojstava smola**

Uspoređene su smole koje se najčešće koriste u brodogradnji, a to su epoksidne, poliesterske i vinil-esterske smole.

##### **Adhezijska svojstva**

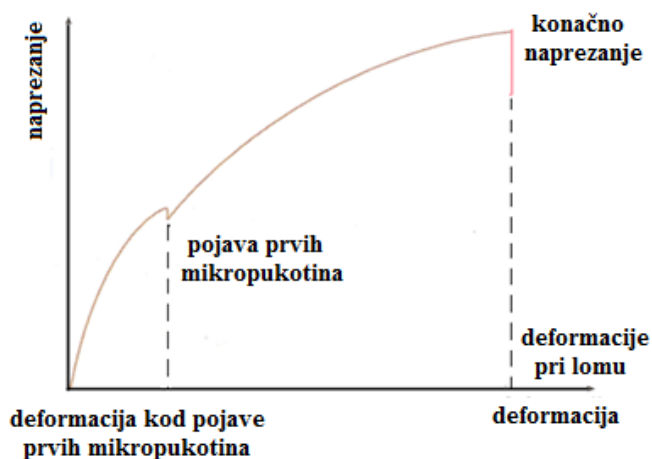
Epoksidne smole upotrebljavaju se kao ljepila s velikom adhezijom, a prilikom polimerizacije pokazuju najmanje skupljanje volumena. Poliesterske smole stvaraju najmanju adheziju s ojačanjima, vinilesterske smole nešto veću, a epoksidne najveću. [7]

##### **Mehanička svojstva**

Krutost i vlačna čvrstoća su dva najvažnija mehanička svojstva. Epoksidne smole imaju najbolja mehanička svojstva, zatim slijede vinil-esterske pa poliesterske smole. [7]

## Otpornost na stvaranje mikropukotina

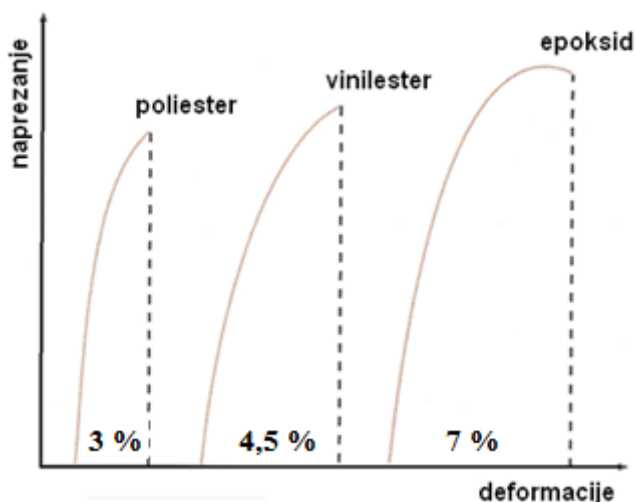
Proces pucanja započinje pojavom mikropukotina. Prije potpunog pucanja kompozitnog materijala naprezanje će postići razinu kod koje dolazi do poprečnih mikropukotina koje nisu u ravni s opterećenjem. Izradom kompozitnih materijala treba se izbjeći stvaranje mikropukotina. Na slici 4.10. je prikazano da su deformacije kod kojih se javljaju mikropukotine puno manje od deformacija pri lomu. [7]



Slika 4.10. Dijagram deformacije-naprezanja kompozitnih materijala [2]

Grafična čvrstoća kompozita ovisi o grafičnoj čvrstoći vlakana, tako da pojava mikropukotina ne smanjuje izravno grafična svojstva materijala. U mediju kao što je voda, laminat s mikropukotinama će absorbirati puno više vode od neoštećenog laminata. To dovodi do povećanja težine konstrukcije, hidrolize smole, gubitka krutosti te samim time do pada grafičnih svojstva materijala. [7]

Na slici 4.11. prikazana je otpornosti smola na stvaranje mikropukotina. Od tri smole koje su uzete u obzir, epoksidna smola je najotpornija, a poliesterska je najmanje otporna na stvaranje mikropukotina. [7]



Slika 4.11. Dijagram prekidnog napreznja-deformacija tri vrste smola [7]

### Otpornost na zamor

Kompozitni materijali imaju odličnu otpornost na zamor u usporedbi s većinom metala. Otpornost kompozita na zamor ovisi o tvrdoći smole, njejoj otpornosti na mikropukotine, te količini šupljina koje nastaju kao posljedica proizvodnog postupka. Epoksidne smole su otpornije na zamor u usporedbi s poliesterskim i vinil-esterskim smolama. [7]

### Otpornost na bubrenje

Smole bubre kada su izložene djelovanju vode. Epoksidne smole su otpornije na bubrenje u usporedbi s poliesterskim i vinil-esterskim smolama zbog svoje kemijske građe. Povišenje temperature vode ubrzava bubrenje materijala. Poliesterski laminat uronjen u vodu povišene temperature, u periodu od godine dana zadržati će samo 65 %, a epoksidni laminat 90 % svoje interlaminarne smične čvrstoće (ILSS). [7]

#### 4.8.2. Plastomerne matrice

Najčešća plastomerna matrica korištena u kompozitnim materijalima je polipropilen (PP). Polipropileni su ojačani uglavnom staklenim vlaknima, te se tako postiže žilav kompozit s relativno visokom toplinskom postojanošću oblika (do 150 °C). Primjenjuju se u automobilskoj industriji (branici i dijelovi unutrašnjosti automobila). [9]

Prednosti plastomernih matrica: [9]

- neograničeno dugo skladištenje preprega pri sobnoj temperaturi;
- pogodni su za automatizirane postupke prerade;
- mogućnost postizanja visoke kompaktnosti kompozita;

Vrste plastomernih matrica su: [9]

- poli (amid-imid) (PAI)
- poliamid (PA)
- poli (aril-sulfon) (PAS)

Odlikuje ih visoka toplinska postojanost, čak u vrlo ekstremnim uvjetima vlage, agresivnih atmosfera i slično. Mnoge od njih samogasive su bez dodataka.

Od visokotemperaturnih plastomera postoje: [9]

Poli (fenil-sulfid) (PPS) se koristi kao zamjena za Al-legure, npr. krila aviona. Masa krila se smanjuje za oko 20 % kg, čime se snižava potrošnja goriva, poboljšava se otpornost na udarna opterećenja, te se poboljšava postojanost na agresivne medije (gorivo, sredstvo za odleđivanje, itd). [9]

Poli (eter-eter-keton) (PEEK) zbog dobrog ponašanja u slučaju požara i odlične toplinske i kemijske postojanosti nalaze primjenu u brodskoj, zrakoplovnoj i automobilskoj industriji, te elektroindustriji, izoliranju kabela, za izradu implantanata i ortopedskih pomagala. [9]

## 5. POSTUPCI PROIZVODNJE POLIMERNIH KOMPOZITNIH TVOREVINA

Postoje mnogi postupci proizvodnje polimernih kompozitnih tvorevina, kao što su ručni dodirni postupak laminiranja, dodirni postupak sa štrcanjem vlakana, pultrudiranje (40 % – 70 % ojačavala), postupak namotavanja filamenata (FW- eng. *Filament Winding*), podtlačno oblikovanje laminata (autoklav), injekcijsko – posredno prešanje kapljevite smole s uloženim trodimenzionalnim ojačavajućim predoblikovanjem (RTM-eng. *Resin Transfer Moulding*), centrifugalno lijevanje, izravno prešanje SMC-a i BMC-a, podtlačno ulijevanje smole (VIP- eng. *Vacuum Infusion Process*), itd..

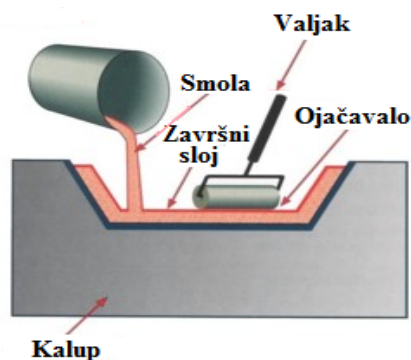
Postupci se razlikuju po kvaliteti gotovog proizvoda, cijeni izrade, vremenu trajanja i složenosti. Vrlo je bitno odabrati optimalan proizvodni postupak prije početka proizvodnje, kako bi se dobio proizvod željenih karakteristika i cijene. Za proizvodnju brodova od polimernih kompozita se najčešće koriste: ručni dodirni postupak laminiranja, štrcanje vlakana, injekcijsko – posredno prešanje kapljevite smole s uloženim trodimenzionalnim ojačavajućim predoblikovanjem (RTM), podtlačno ulijevanje smole, te podtlačno oblikovanje. Postupak podtlačnog ulijevanja smole smatra se najoptimalnijim za izradu kvalitetnih brodova, konkurentnih na svjetskom tržištu.

### 5.1. Ručni dodirni postupak laminiranja

Ručni dodirni postupak laminiranja koristi se za izradu proizvoda velikih dimenzija u malim serijama, gdje nije bitno što je samo jedna strana glatka (npr. čamci, bazeni, kalupi).

Postupak ručnog dodirnog laminiranja je prikazan na slici 5.1.. Započinje tako da se na kalup premazan tvarima za lakše odvajanje, najprije kistom nanosi sloj smole spremne za polireakciju uz umreživanje, ali bez ojačavala i punila. Zatim se redom nanose slojevi staklenog mata ili tkanine natopljeni hladno smolom za umreživanje, a valjkom se istiskuje zrak zadržan između slojeva. Smola bez ojačavala i punila čini i završni sloj u debljini dovoljnoj da pokrije stakleno ojačanje. Tako se dobije slojevit izradak, laminat. Kalupi za ručno laminiranje otvoreni su i nastoje se graditi jednostavno i od jeftinog materijala, drva ili nekoga polimernog materijala, rjeđe od metala. [7, 9]

Materijali matrice u postupku ručnog dodirnog laminiranja mogu biti sve vrste smola, kao npr.: poliesterske, vinil-esterske, epoksidne, te fenolne smole. Mogu se koristiti svi tipovi vlakana (problemi se jedino mogu javiti u slučaju težih aramidnih vlakana koje je teže natopiti ručno). [9]



Slika 5.1. Ručno dodirno laminiranje

Prednosti ručnog dodirnog postupka su: [7, 9]

- vrlo jednostavan postupak koji se primjenjuje već dulje vrijeme;
- malen trošak izrade alata;
- veliki izbor vrsti materijala i dobavljača;
- udio vlakana je veći i vlakna su dulja nego u slučaju polaganja naštrcavanjem,
- rad na sobnoj temperaturi,
- potreban mali radni prostor.

Nedostaci ručnog dodirnog postupka laminiranja su: [7, 9]

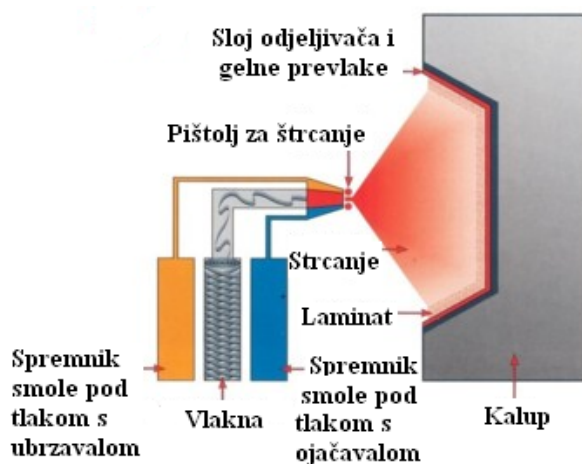
- kvaliteta postupka u velikoj mjeri ovisi o radniku;
- teško je proizvesti kompozite s malim udjelom smole bez pukotina;
- smole obično imaju manju molekularnu masu, što znači da mogu biti štetniji od proizvoda s većom molekularnom masom;
- ekološki nepovoljan postupak zbog isparavanja nevezanog sitiren-monomera;
- problem je uklanjanje stirena nastalog iz poliestera i vinil estera;
- moraju se koristiti smole male viskoznosti što znatno utječe na svojstva;
- nije moguće postići maksimalna mehanička svojstva;
- veliki udio rada u cijeni proizvoda.

Alati i pribor za rad su plosnati i okrugli kistovi od svinjske dlake, valjci od janječeg krzna, te metalni (Al) ili polietilenski valjci (roleri) za istiskivanje zraka, menzure ili pipete za doziranje katalizatora i ubrzavala, te polietilenske posude za preradu smjesa. [7]

## 5.2. Dodirni postupak sa štrcanjem

Postupak ručnoga dodirnog laminiranja može se ubrzati djelomičnim mehaniziranjem postupka. Štrcanje vlaknima je djelomično mehanizirani postupak u kojemu se na ravnu ploču ili u kalup nanosi smjesa smole i isjeckanih staklenih vlakana pomoću stlačenoga zraka. Kao materijal matrice se uglavnom koriste poliesterske i/ili epoksidne smole, dok se za ojačanje koriste isključivo staklena isjeckana vlakna. Ovaj se postupak primjenjuje pri izradi proizvoda većih dimenzija, a ekološko je vrlo nepovoljan. [9]

Karakteristika ovog postupka je da se smola nalazi u dva spremnika, u jednome je pomiješana s umreživalom (katalizatorom), u drugome s ubrzavalom (slika 5.2.). Te se dvije smjese štrcaju odvojeno, pištoljem za štrcanje, a istodobno se štrca i isjeckano stakleno vlakno. Vlakno je pomoću uređaja za rezanje isjeckano na duljinu od 16 - 50 mm i na kalup se nanosi putem komprimiranog zraka. Te komponente se štrcanjem iz pištolja spajaju, pri čemu dolazi do njihovog očvršćivanja na površini kalupa ili ploče. Očvršćivanjem komponenata dolazi do njihovog zgušćivanja. Kalup prethodno treba biti pripremljen, tj. premazan odvajalom, a potom zaštitno-dekorativnom gelnom prevlakom. Zalutali zrak potrebno je istiskivati valjkom da bi proizvod bio kvalitetan. [7, 9]



Slika 5.2. Dodirni postupak štrcanja

Prednosti postupka štrcanja su: [9]

- široka primjena postupka već niz godina
- vrlo jeftin način taloženja vlakna i smole
- mali trošak izrade alata

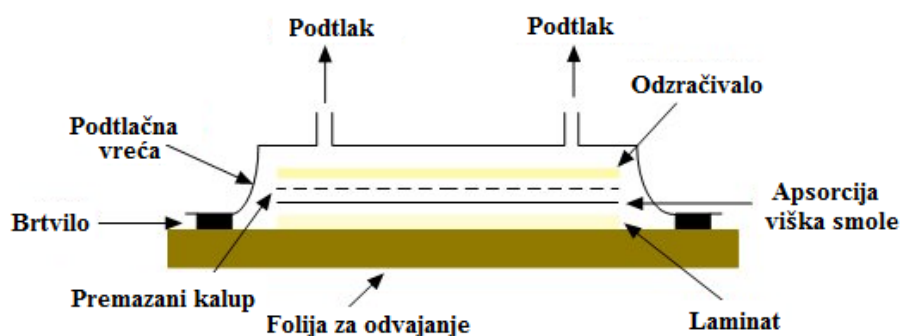
Nedostaci postupka štrcanja su: [9]

- sadrže nešto veću količinu smole tako da imaju veću masu (loš omjer mase i čvrstoće)
- za ojačavala se koriste samo kratka isječena vlakna, tako da konačni proizvod ima ograničena mehanička svojstva
- smole moraju imati malu viskoznost kako bi se mogle naštrcavati, a to najčešće ide na štetu mehaničkih i toplinskih svojstava
- problem može predstavljati i udio stirena koji je u nekim slučajevima i zakonom ograničen

### 5.3. Podtlačno oblikovanje

Proizvodni postupak podtlačnog oblikovanja započinje ručnim slaganjem svih komponenata kompozita (smole i vlakana, odjeljivala, gelne prevlake) nakon čega se na njega stavlja polimerna folija (podtlačna vreća), kao što je prikazano na slici 5.3.. Pomoću podtlačne pumpe uklanja se zrak iz unutrašnjosti zatvorenog kalupa, tj. ispod zaštitne vreće. Pomoću tog podtlaka u zatvorenome kalupu se poboljšava spajanje elemenata kompozita. Podtlačne vreće uvelike pridonose optimalnom odnosu smole i ojačavala (tj. uklanjaju višak smole), a rezultat toga je lakši i čvršći proizvod. [4, 17]

Kod podtlačnog oblikovanja najčešće se kao matrica koriste fenolne i epoksidne smole, zato što kod poliesterskih i vinil-esterskih smola problem može predstavljati povećana ekstrakcija stirena. Kao ojačavala mogu se koristiti sve vrste vlakana. [9]



Slika 5.3. Podtlačno oblikovanje [17]

Glavni nedostaci podtlačnog oblikovanja je činjenica da je postupak nešto skuplji i zahtjeva prilično veliku vještinu operatera (vrlo bitno kod kontrole miješanja i udjela smole). [9]



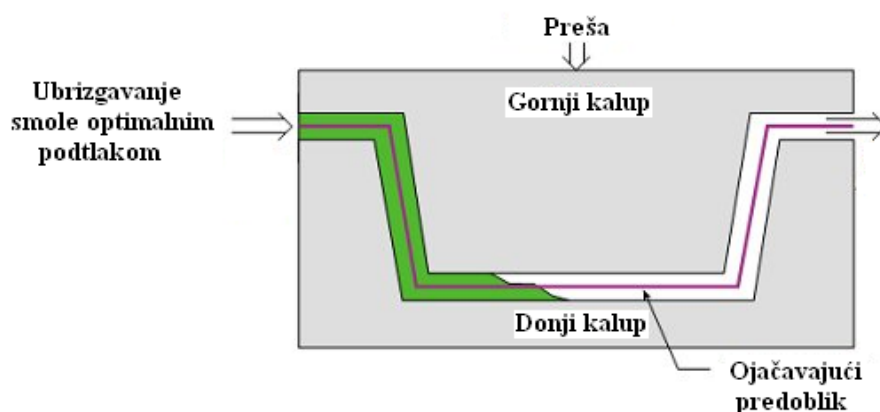
Prednosti podtlačnog oblikovanja su: [9]

- proizvodnja kompozita s većim udjelom vlakana
- manje pukotina u materijalu
- bolje je vlaženje vlakana i protok smole kroz ojačavala zbog djelovanja povišenog tlaka
- podtlačni pokrov smanjuje količinu ishlapljenih štetnih tvari tijekom skrućivanja

#### 5.4. Injekcijsko – posredno prešanje kapljevite smole s uloženim trodimenzionalnim ojačavajućim predoblikovanjem (RTM)

RTM postupak je u osnovi injekcijsko prešanje. Osigurava poboljšanu kvalitetu proizvoda i višu brzinu proizvodnje. Ekološki gledano se dobiva relativno prihvatljiv proizvod, jer zbog zatvorenog kalupa osigurava smanjenu emisiju stirena. RTM postupci se mogu podijeliti na one koji koriste podtlak i on koji ga ne koriste. RTM postupci su brži, mogu se bolje kontrolirati, povoljniji su nego klasični ručni postupci. Varijante uz pomoć podtlaka funkcioniraju na principu da se stakleno ojačavalo polaže u šupljine kalupa, te se nakon toga tekuća smola ulijeva putem podtlaka. Nominalni podtlak nije veći od 0,5 bara. [7]

Proizvodni postupak započinje postavljanjem predoblika od vlakana u kalup (mogu se stvoriti različiti oblici koji se drže vezivom). Kalup se zatvara te se u njega i podtlačno ubrizgava smola (slika 5.5.). Nakon što je kalup popunjen zatvaraju se mjesta na kojima je ubrizgana smola i dolazi do skrućivanja (umreživanja) pri povišenim ili sobnim temperaturama. Mogu se koristiti gotovo sve vrste matrica i vlakana. [9]



Slika 5.4. Pojednostavljeni prikaz RTM postupaka [17]

Prednosti RTM postupka su: [9]

- proizvodnja kompozita s visokim udjelom vlakana i s niskim udjelom pukotina u materijalu
- ne predstavlja opasnost za okoliš, zbog zatvorenog kalupa
- povoljni estetski izgled površine

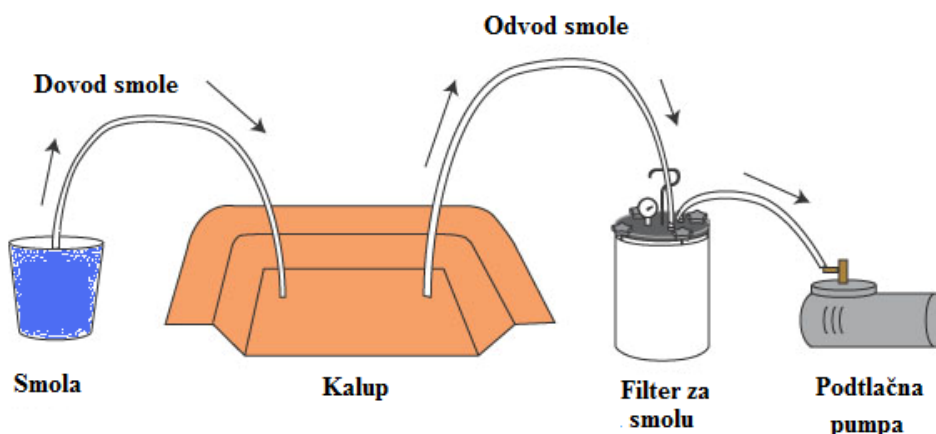
Nedostaci RTM postupka su: [9]

- vrlo skup i težak alat
- proizvodnja je ograničena na manje komade
- zbog neiskustva i nestručnog korištenja, mogu se pojaviti mjesta na proizvodu koja nisu popunjena smolom, što može dovesti do velikog škarta

## 5.5. Podtlačno ulijevanje

### 5.5.1. Opis postupka podtlačnog ulijevanja smole

Postupak podtlačnog ulijevanja (VIP- eng. *Vacuum Infusion Process*) je postupak u kojemu se pomoću podtlaka smolu dovodi do laminata i višak smole odstranjuje iz kalupa. Ojačavalo je ručno položeno u kalup u kojemu je podtlak. Unutrašnjost klupa je sa cijevi spojena sa spremnikom u kojemu se nalazi smola (slika 5.5.). Kada je podtlak u kalupu dovoljno visok, smola se dovodi kroz cijev u unutrašnjost kalupa do laminata. Višak smole se podtlakom pomoću podtlačne pumpe (0,8 bara do 0,9 bara) odstranjuje iz kalupa (slika 5.5.). [18]



Slika 5.5. Pojednostavljeni prikaz postupka podtlačnog ulijevanja [18]

Postupci koji imaju približno istu tehnologiju za izradi kvalitetnih kompozitnih proizvoda velikih dimenzija su:

- Podtlačno injekcijsko prešanje smole (VARTM – eng. *Vacuum Assisted Resin Transfer Molding*),
- Podtlačno ulijevanje (RI – eng. *Resin Infusion*),
- Injekcijsko prešanje kompozita Seeman-ovim postupkom (SCRIMP – eng. *Seeman Composites Resin Infusion Molding Process*),
- Kontrolirano podtlačno ubrizgavanje (CVI – eng. *Controlled Vacuum Infusion*).

### 5.5.2. Prednosti postupka podtlačnog ulijevanja

Postupak podtlačnog ulijevanja pruža niz poboljšanja u odnosu na tradicionalne postupke kao što su ručni dodirni postupak laminiranja i postupak štrcanja vlakana. Podtlačne vreće uvelike pridonose optimalnom odnosu smole i ojačavala a rezultat toga je lakši i čvršći proizvod. [18]

Neke od bitnih prednosti postupka podtlačnog ulijevanja su: [18]

- optimalniji omjer smole i ojačavala
- manji utrošak smole (manja masa proizvoda)
- ujednačena raspodjela smole u laminatu
- trajanje procesa nije vremenski ograničeno
- zdraviji i čistiji proces (zatvoreni kalup)

Postupkom podtlačnog ulijevanja (VIP) postiže se bolji omjer smole ojačavala nego kod običnog podtlačnog oblikovanja (eng. *Vacuum Bagging*). Uobičajeni ručni dodirni postupak laminiranja (eng. *hand lay-up*) rezultira velikim udjelom smole u kompozitnom proizvodu. Povoljan (optimalan) omjer smole i ojačavala u brodogradnji dobiven postupkom podtlačnog ulijevanja je 60 % smole i 40 % ojačavala. Nepovoljan omjer smole i ojačavala loše utječe na proizvod (npr. brod). Veći udio smole u kompozitnoj tvorevini (brodu) rezultira većom masom tvorevine, ali i lošijim mehaničkim karakteristikama (smanjena otpornost na lom). Veći udio smole u polimernom trupu broda rezultira slabijim manevarskim sposobnostima i većom potrošnjom goriva, zbog veće mase broda.

Podtlačnim oblikovanjem uklonjeni su neki nedostaci koji su karakteristični za ručni dodirni postupak laminiranja jer se podtlakom dio viška smole odstranjuje iz kalupa, a kalup je zatvoren što je također velika prednost (čišća metoda). Količina viška smole ovisi o vrsti smole i ojačala, vremenskom faktoru, itd.. [18]

Postupak podtlačnog ulijevanja ima drugačiji pristup, smola se ulijeva pomoću podtlaka u zatvoreni kalup u kojemu su već postavljeni odvajalo, ojačavalo i gelna prevlaka. Višak smole u kalupu se odstranjuje podtlakom pomoću podtlačne pumpe. Podtlačno odstranjivanje viška smole rezultira minimalnim potrebnim udjelom smole u kompozitnoj tvorevini (optimalnim omjerom smole i ojačavala, 3/2), te samim time smanjenu masu tvorevine i povećanu čvrstoću. Standardni ručni dodirni postupak između ostalog ovisi i o ljudskom faktoru, dok postupak podtlačnog ulijevanja udio smole u kompozitnoj tvorevini je konstantno povoljan (optimalan). [18]

Vrlo važna prednost postupaka podtlačnog ulijevanja je vrijeme. Mnoge smole su ograničene s vremenom od 30 minuta do 2 sata koliko im treba da se stvrdnu nakon što su nanosene u kalup. To vremensko ograničenje je iznimno nepogodno pri postupku podtlačnog oblikovanja, ako nastanu neki nepredviđeni problemi (npr. oštećenje zaštitne folije), nakon što je smola već dovedena u kalup. Takvi nepredviđeni problemi mogu rezultirati neravnomjernim nanašanjem ili viškom smole u kompozitnoj tvorevini, tj. škartom. [18]

Postupak podtlačnog ulijevanja omogućava neograničeno vrijeme trajanja procesa proizvodnje kompozitne tvorevine, a samim time ima svoje prednosti. Dode li do curenja smole iz kalupa, ili oštećenja cijevi za odstranjivanje viška smole podtlakom, postupak se privremeno može prekinuti da se uklone nepravilnosti bez utjecaja na kvalitetu proizvoda. [18]

Od velike važnosti u postupku podtlačnog ulijevanja je i tzv. zatvoreni kalup koji omogućava čišći postupak koji je manje opasan za zdravlje radnika i ekološko je pogodniji od ručnog dodirnog laminiranja (otvoreni kalup). U postupku podtlačnog ulijevanja nema potrebe za dugim ručnim nanošenjem smole kistom ili valjkom, tako da su radnici zaštićeni od emisije stirena koja je štetna za zdravlje. Iako je kalup zatvoren potrebno je nositi zaštitnu masku i imati dobar ventilacijski sustav, jer dolazi do emisije para smole iz spremnika za smolu. [18]

### 5.5.3. Nedostaci

Svaki proizvodni postupak ima svoje nedostatke. U postupku podtlačnog ulijevanja to su problemi koji se mogu dogoditi zbog ljudskog faktora, najčešće zbog nedovoljnog poznavanja tehnologije, te nepažnje ili nemara radnika. U postupku podtlačnog ulijevanja neke nepravilnosti u pripremi komponenata kompozitne tvorevine ili postavljanju podtlačne vreće (zaštitne folije) mogu uzrokovati značajnu štetu (škarta i gubitak vremena). Posebno oprezno se mora postupati kada se ovim postupkom proizvod izrađuje prvi puta. [18]

Pripreme za ovaj postupak relativno su složene. Potrebno je nanijeti odvajalo i gelna prevlaka, te postaviti pletivo ili tkaninu (staklena vlakna), cijevi za dovod i odvod smole podtlakom kao i nastavke tih cijevi s filterom, brtvilo i zaštitnu foliju. Za različite oblike kalupa cijevi se trebaju postavljati na različite načine da bi proizvod bio kvalitetan, što se ponekad treba naučiti tzv. postupkom „pokušaja i pogrešaka“. Cijevi i filtere treba kvalitetno postaviti prije zatvaranja kalupa zaštitnom folijom. [18]

Vrlo važno je da cijeli proizvodni postupak (npr. raspored cijevi na zaštitnoj foliji) bude dobro isplaniran, jer u suprotnome može vrlo lagano doći do nepravilnosti u postupku tj. škarta. Curenje zraka iz kalupa ili cijevi uzrokuje pad podtlaka pa samim time i loš ili nikakav protok smole. Zaustavljanje protoka smole u laminatu može prouzročiti uništavanje izradka (gubitka materijala i vremena), a najsigurniji način zaštite od takvog ishoda je pažljivo planiranje i provođenje procesa. [18]

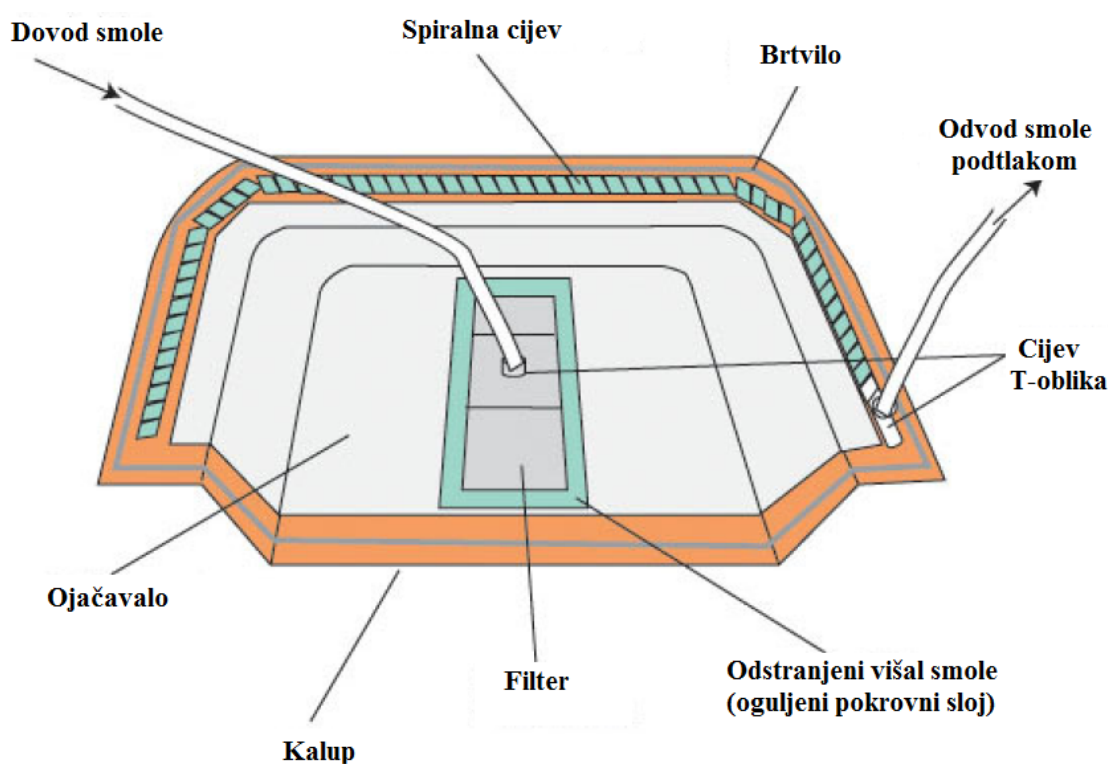
Za dobivanje optimalnog rasporeda cijevi, osim prethodnog iskustva u ovome postupku je ključna metoda „pokušaja i pogrešaka“. Zbog toga je vrlo važno imati na umu da će pri izradi nekog novog proizvoda vrlo vjerojatno nekoliko početnih proizvoda biti uništeno. Prethodnim iskustvom, pažljivim planiranjem i dokumentiranjem i razmatranjem tih propalih pokušaja će se sam njihov broj smanjiti na prihvatljivih 1 do 2 „pogrešna“. [18]

Ovisno o složenosti oblika će naravno ovisiti broj „pogrešaka“ (jednostavniji oblici često uspiju iz prvog pokušaja). Također je potrebno pratiti tok smole u kalupu i olakšati dotok smole na mjesta u kalupu gdje smola dolazi teže ili nikako. Čak i najmanja promjena u rasporedu cijevi može pridonijeti velikoj razlici u kvaliteti proizvoda. Za složene postupke proizvodnje preporučljivo je najmanje 6 mjeseci testiranja, pripreme i planiranja višeserijske proizvodnje. Za pokusne pokušaje se koriste jeftiniji materijali i manje količine materijala. [18]

#### 5.5.4. Priprema za postupak podtlačnog ulijevanja

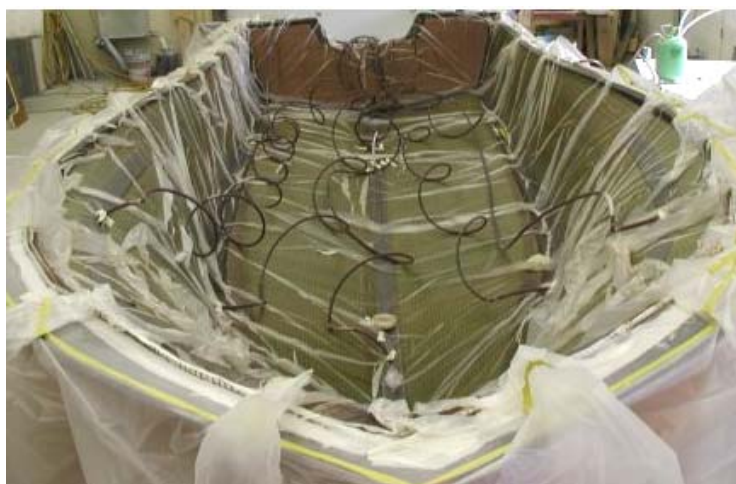
Kod pokusnih pokušaja postupkom podtlačnog ulijevanja potrebno je dobro proučiti kako ta tehnologija funkcionira, te kako se komponente kompozitnog polimera ponašaju tijekom postupka proizvodnje. Potrebno je imati na umu da je izrada svakog proizvoda jedinstvena i često je za svaki proizvod potreban drugačiji pristup iako prijašnja iskustva mogu pomoći. [18]

U nastavku je opisan pojednostavljen postupak sa samo jednom cijevi za dovod smole u središte kalupa (slika 5.6.). Višak smole se odstranjuje iz kalupa kroz cijev uz pomoć podtlačne pumpe. Na slici 5.6. prikazan je postupak podtlačnog ulijevanja s jednostavnim kalupom. [18]



Slika 5.6.. Postupak podtlačnog ulijevanja s jednostavnim kalupom [18]

U praksi se zbog velike površine kalupa i složenijih oblika koristi više cijevi za dovod smole u kalup, a njihov raspored na zaštitnoj foliji je planiran kako bi se omogućilo jednoliko dovođenje smole do svakog dijela kalupa (slika 5.7.), jer u suprotnome može vrlo lagano doći do nepravilnosti u procesu tj. škarta.



Slika 5.7. Prikaz raspodjele cijevi za dovod smole pri izradi trupa broda

Redoslijed radnji koje se trebaju obaviti u postupku podtlačnog ulijevanja: [18]

- Priprema kalupa – izbor ojačavala, odvajala i gelne prevlake, te medija za olakšavanje tečenja
- Cijevi za dovod i odvod smole – određivanje njihovog rasporeda i postavljanje
- Zaštitna folija – postavljanje i onemogućavanje curenja smole i zraka (zatvoreni kalup)
- Podtlačna pumpa – povezivanje kalupa sa pumpom pomoću cijevi i određivanje tlaka
- Priprema za ulijevanje – izbor smole i spajanje spremnika smole i kalupa pomoći cijevi
- Ulijevanje smole – dodavanje ubrzavala u smolu (po potrebi)
- Eksperimentiranje i poboljšavanje

#### 5.5.4.1. Priprema kalupa

Kod pripreme kalupa vrlo je važno da je dobrim poliranjem površina kalupa glatka i sjajna. Kvaliteta obrade površine proizvoda je u izravnoj vezi s površinom kalupa. Kalup mora imati obod (od oko 20 mm) na koji se stavlja spiralna cijev i brtvilo (slika 5.6.). Kada je kalup ispoliran i očišćen na njega se nanosi odvajalo i gelna prevlaka. [18]

**Odvajalo** je sloj materijala koji se nanosi na kalup kako bi se spriječilo lijepljenje odljevka za kalup, te osiguralo jednostavno vađenje gotovog proizvoda, bez oštećenja. Kod malih serije koriste se jednokratna odvajala na osnovi polivinil alkohola ili voska. Debljina sloja odvajala na

kalupu kreće se između 0,1  $\mu\text{m}$  i 1  $\mu\text{m}$ , tako da se geometrija kalupa gotovo identični preslikava na odljevak. Tri osnovne grupe odvajala za kalupe su: [7]

- jednokratni (*eng. sacrificial*)
- unutarnji (*eng. internal*)
- polutrajni (*eng. semi-permanent*)

U industrijskoj velikoserijskoj proizvodnji upotrebljava se višekratno odvajalo na osnovi karnaba voska. Postoje i interna odvajala koja se upotrebljavaju u specijalnim slučajevima i dodaju se direktno u smolu. Odvajalo se nanosi pamučnom krpom na manju površinu kalupa (cca. 50 cm x 50 cm). Nakon nekoliko sekundi počinje se sušiti na površini kalupa pa ga je potrebno istrljati čistom suhom krpom da se ukloni višak. Broj potrebnih slojeva ovisan je o stanju kalupa i vrsti odvajala. Vremenski intervali između pojedinih nanosa kao i između posljednjeg nanosa i početka proizvodnje variraju ovisno o vrsti odvajala i uvjetima sušenja. [7]

**Gelna prevlaka** je poliesterska smola specijalno namijenjena za izradu završnog sloja, koji služi za površinsku zaštitu materijala. Gelna prevlaka je tanki nearmirani sloj koji prekriva laminat s vanjske strane, štiti ga od korozije i istovremeno osigurava zadovoljavajući estetski izgled. Može se bojati (pigmentirati) tako da se proizvod ne treba lakirati. Dodaje mu se 6 % do 10 % boje. Debljina premaza ručnim postupkom (kistom) je 0,4 mm do 0,8 mm, a potrošak smole je 400  $\text{g}/\text{m}^2$  do 700  $\text{g}/\text{m}^2$ . [7]

Posjeduje svojstva kao što su: dobra elastičnost i postojanost na apsorociju vode i agresivne medije, postojanost na UV zračenje i dobar sjaj. Brzina otvrdnjavanja gelne prevlake ovisi o temperaturi okoline i relativne vlažnosti u prostoriji. Temperatura radnog prostora mora biti od 16°C do 25°C, a relativna vlažnost u prostoriji ne smije prelaziti 66 %. [7]

Ako je sloj gelne prevlake tanji, polimerizacija je manjkava pa materijal brzo strada, ali ne valja niti da je predebeo sloj jer onda teži skupljanju pri čemu se otvaraju sitne rupice kroz koje kasnije voda prodire u nezaštićen donji sloj laminata, a takva je gelna prevlaka podložnija na mehanička oštećenja. Poroznost se tijekom vremena povećava, kako se sloj smole troši. Bojana gelna prevlaka je sklonija propadanju od bijelog, što je posljedica prirodne sposobnosti odbijanja svjetla kod bijelih pigmenata.

Korištenjem gelne prevlake postiže se: [8, 19]

- manji sjaj površine kompozitne tvorevine (slabije uočljive ogrebotine)



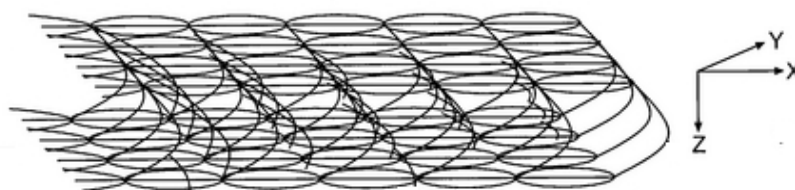
- mekša poliesterska smola omogućava lakše poliranje
- ravna površinu za bojanje (nije potrebno dodatno kitanje tako da je snižena cijena bojanja kao i vremenski period bojanja)
- lako su dostupni kitovi za popravljjanje gelne prevlake (povoljne cijene)

Korištenje gelne prevlake u postupku izrade kompozitne tvorevine ima i svoje nedostatke. Kompliciranije je održavanje jer zahtijeva poliranje abrazivnim materijalima i nanošenje voska da bi se postigao dugovječni sjaj. Dugi vijek održavanja smanjuje debljinu sloja smole na površini, te samim time povećava vrijeme potrebno za održavanje sjaja. Postoji ograničenje u odabiru boja (uključujući i boje kita za popravke). Popravci gelne prevlake mogu biti zahtjevni radovi, jer se površina mora nanovo brusiti i polirati. Mekša smola znači i veću osjetljivost, tako da lakše dolazi do napuknuća i pojave tzv. efekta paukove mreže. [8, 19]

**Izbor ojačavala** je vrlo važna odluka u bilo kojem postupku proizvodnje kompozitne tvorevine. Različite vrste ojačavala kao i različite vrste tkanja ili pletiva mogu imati utjecaj na protok smole u kalupu. U postupku podtlačnog ulijevanja se najčešće upotrebljavaju staklena vlakna. [18]

Većina tkanina tkanih staklenim vlaknima omogućava dobru propusnost i olakšan protok smole. Tkanine koje su rjeđe tkane su pogodnije za ovaj postupak zbog boljeg protoka smole. Upotrebljavaju se i staklena vlakna koja nisu tkana. Kod dugih usmjerenih vlakana koja nisu tkana će protok smole u smjeru vlakana biti će bolji nego kod kratkih isjeckanih vlakana koja nisu tkana. I duga usmjerena i kratka isjeckana vlakna imaju dobru propusnost. [18]

Pletiva od staklenih vlakana (slika 5.8.) se često koriste kao ojačavala u postupku podtlačnog ulijevanja zbog oblika njihove konstrukcije. Pletena staklena vlakana ne samo da omogućavaju bolji protok smola, već pridonose čvrstoći kompozitne tvorevine kao i obujmu (debljini) pa nije potrebno nekoliko slojeva pletiva. [18]

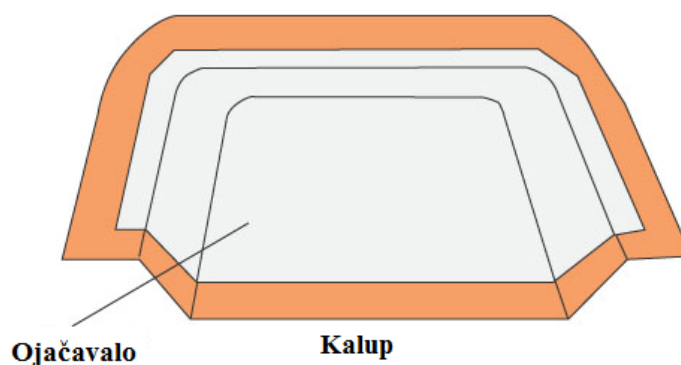


Slika 5.8. Pletivo od staklenih vlakana

Od ostalih vrsta vlakana, također se mogu koristiti aramidna vlakna (Kevlar) i karbonska vlakna u postupku podtlačnog ulijevanja. Protok smole kada se upotrebljavaju aramidna ili karbonska

vlakna je sporiji nego kada se koriste staklena vlakna pa postupak traje duže. Protok smole se može ubrzati ako se koriste vinil-esterske i epoksidne smole. Upotrebom aramidnih ili karbonskih vlakna dobivaju se vrlo dobra mehanička svojstva kompozitne tvorevine kao i njena reducirana masa. Bitan faktor je i cijena jer su staklena vlakna znatno jeftinija kao i poliesterske smole. [18]

**Oblik kalupa** je bitan faktor u postupku podtlačnog ulijevanja smole. Kada je oblik kalupa složeniji javljaju se poteškoće pri polaganju ojačavala na kalup (slika 5.9.). Teško je ponekada postići da položeno ojačavalo strogo slijedi oblik kalupa. Također ako je kalup složenijeg oblika dolazi do problema odvajanja gotovog proizvoda od kalupa.



Slika 5.9. Prikaz položenog ojačavala na kalup [18]

Za postupak podtlačnog ulijevanja vrlo je bitan dobar protok smole kroz cijevi i kalup. U ovome postupku smola u kalup ulazi kroz cijev (ili više cijevi ako je kalup složenijeg oblika). Cijevi su usmjerene i nepomično spojene na gornji dio kalupa (zaštitnu foliju). Smola kao svaki fluid uvijek teče linijom manjeg otpora, a nažalost ojačavala (staklena vlakna) uglavnom otežavaju protok smole. [18]

**Korištenje medija za olakšavanje protoka smole** je specifično i karakteristično za postupak podtlačnog ulijevanja smole. Kako smola do laminata teče kroz cijevi koje su planski pozicionirane, nepomično pričvršćene i usmjerene, te kako uvijek teče linijom manjeg otpora, te u praksi dolazi do smanjenja protoka smole ili potpunog prestanka protoka smole zbog ojačavala (staklenih vlakana) koje otežava protok. Pletena ili tkana staklena vlakna otežavaju protok smole unutar kalupa i ta činjenica može uvelike naškoditi uspješnosti cijelog proizvodnog postupka, tj. kvaliteti samoga proizvoda. [18]

Potrebno je koristiti medij koji svojom strukturom olakšava protok smole. Bez prisutnosti medija za olakšavanje protoka vrlo je teško postići da proizvodni postupak bude u potpunosti uspješan i da se izbjegnu škart proizvodi. Medij za olakšavanje protoka smole se polaže između dva sloja ojačavala (pletiva ili tkanine) te se na taj način olakšava protok smole i povećava kvaliteta proizvoda, te osigurava uspješnost proizvodnog postupka. [18]

Postoji nekoliko vrsta medija za olakšavanje protoka smole ovisno o potrebama. Mogu omogućiti brzi protok smole, te smanjiti vrijeme trajanja procesa. Struktura takvih medija se sastoji od nasumično orijentiranih najlonskih niti, koje omogućavaju nesmetani protok smole. Neki mogu omogućiti vrlo dobru prilagodljivost, a sastoje se od šesterokutnih kanala za protok smole koji omogućavaju olakšani protok smole. [18]

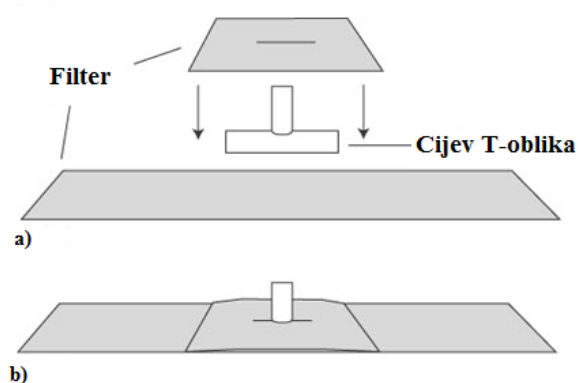
#### **5.5.4.2. Cijevi za dovod i odvod smole**

Potrebno je vrlo temeljito isplanirati postavljanje i pozicioniranje cijevi za dovod i odvod smole na podtlačnu vreću (zaštitna folija), prije početka ulijevanja smole, kako bi se proizvela polimerna kompozitna tvorevina željene (zadovoljavajuće) kvalitete. [18]

##### **5.5.4.2.1. Izbor i postavljanje cijevi za dovod smole**

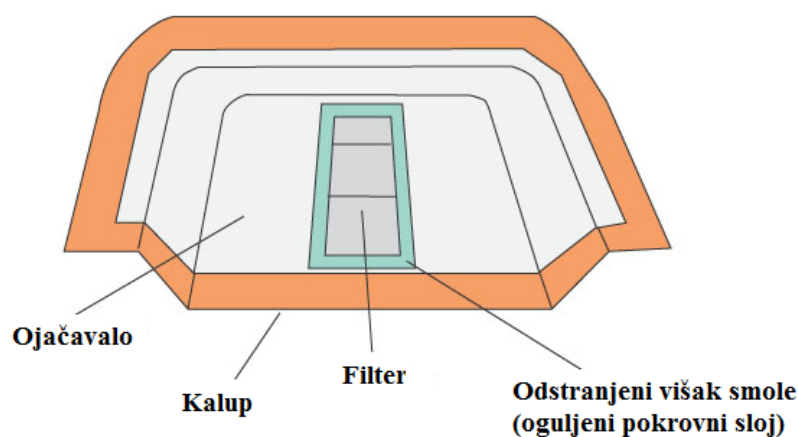
Cijevi za dovod smole u laminat potrebno je postaviti prije zatvaranja kalupa (postavljanja zaštitne folije). Vrlo važno je da cijeli proizvodni postupak (raspored tj. pozicioniranje cijevi) bude dobro isplaniran, jer u suprotnome može vrlo lagano doći do nepravilnosti u postupku tj. škarta. U postupku postavljanja cijevi potrebno je koristiti elemente koji su karakteristični isključivo za postupak podtlačnog ulijevanja, kao npr. spiralne cijevi i filteri. [18]

**Filteri** (slika 5.10.) se koriste u gotovo svim postupcima podtlačnog ulijevanja. Postavljaju se na vrh laminata (slika 5.11.) a nakon završetka se uklanjaju iz laminata povlačenjem iz kalupa. U filter se stavlja i cijev T-oblika koja služi za učvršćivanje i usmjerenje cijevi za dovod smole (slika 5.10.). Cijev T-oblika se uklanja iz laminata zajedno sa filterom. [18]



Slika 5.10. Filter i cijev T-oblika [18]

Filter se postavlja na gornji dio laminata (slika 5.11.) i osigurava kvalitetniji i ravnomjerniji protok smole u unutrašnjosti kalupa. Cijevi za dovod smole spojene su sa cijevi T-oblika koja se nalazi unutar filtera (slika 5.10.). Struktura filtera omogućava da smola prvo popuni cijeli filter pa se tek onda počne ulijevati u laminat ravnomjerno u svim smjerovima. Dimenzije filtera su točno određene da bi se filterom moglo prekriti željenu (potrebnu) površinu laminata. Na taj način se smola u laminat ne ulijeva samo u jednoj točki, nego ravnomjerno kroz cijelu površinu filtera. [18]



Slika 5.11. Prikaz postavljanja filtera u kalup [11]

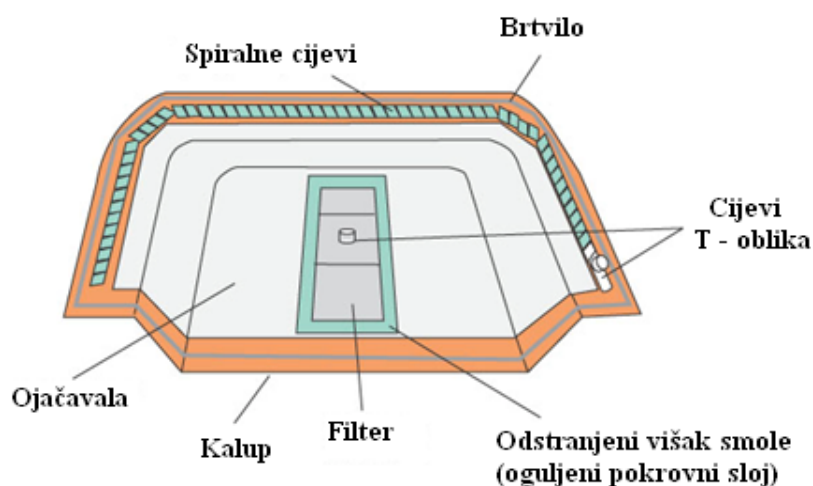
Potrebno je paziti kako se filter postavlja jer postoji opasnost da se ne može izvaditi iz laminata na kraju proizvodnog postupka. Važno ga je premazati odvajalom kako bi se na kraju postupka mogao izvaditi iz laminata. [18]

**Spiralna cijev** je zapravo polimerna traka koja je namotana u obliku cijevi. Zbog svoga oblika (konstrukcije), zrak ili smola mogu ući u cijev ili izaći iz cijevi duž cijele njezine duljine. Ovo svojstvo čini spiralne cijevi vrlo pogodne za njihovo korištenje u postupku podtlačnog ulijevanja.

Kada se upotrebljavaju kao cijevi za dovod smole, protok smole je brz, a smola istovremeno curi kroz njih duž cijele njihove duljine. Spiralne cijevi je također važno premazati odvajalom kako bi se na kraju postupka mogle izvaditi iz laminata. [18]

#### 5.5.4.2.2. Izbor i postavljanje cijevi za odvod smole podtlakom

Spiralne cijevi se koriste za odstranjivanje viška smole podtlakom. Pritom olakšavaju da smola dospije u svaki rubni dio laminata. Cijev (cijevi) za dovod smole postavlja se u središte površine laminata, ili ako ih je više onda se planski raspodijele po površini laminata. Spiralne cijevi se postavljaju tako da „prate“ oblik ruba kalupa (slika 5.12.). Dok smola teče kroz spiralnu cijev zbog podtlaka u njoj, smola iz nje curi uz rubove kalupa (tj. laminata) gdje je to potrebno, uzevši u obzir da smola teče linijom manjeg otpora, u ovom slučaju tamo gdje nedostaje smole. [18]



Slika 5.12. Prikaz postavljene spiralne cijevi duž ruba kalupa [18]

Potrebno je znati da spiralne spiralne cijevi imaju tendenciju da se isprave nakon što ih se postavi u željeni zakrivljeni oblik. Zbog toga se primjenjuje brtvilo u obliku trake (slika 5.12.).

#### 5.5.4.3. Postavljanje zaštitne folije i spajanje cijevi za dovod smole

##### Konstruiranje zaštitne folije

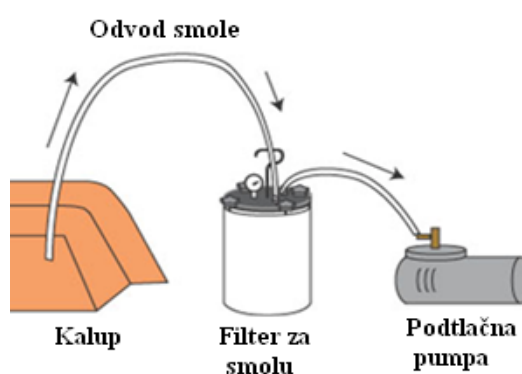
Nakon što je u kalup postavljeno i nanoseno sve što je potrebno (gelna prevlaka, odvajalo, ojačavalo, medij za olakšavanje tečenja, cijevi za odvod smole, spiralne cijevi i brtvilo) potrebno je konstruirati zaštitnu foliju. Površina postavljene folije mora biti zategnuta te mora omogućiti

da ispod nje stane sve što je potrebno za postupak podtlačnog ulijevanja smole. Nepravilnosti pri konstruiranju zaštitne folije mogu rezultirati neravnomjernom raspodjelom smole u laminatu ili otežanim protokom smole. [18]

Kada je zaštitna folija konstruirana (postavljena na kalup) na nju je potrebno pričvrstiti cijevi za dovod i odvod smole. Cijev kroz zaštitnu foliju prolazi kroz rez. Potreban je oprez pri pravljenju reza, kako on ne bi bio uzrok curenju smole. Prije nego se podtlačna pumpa uključi, cijevi za dovod i odvod smole je potrebno dobro pričvrstiti. [18]

**Filter za smolu** je hermetični spremnik koji se nalazi na jednome dijelu podtlačne cijevi za odvod smole između laminata i podtlačne pumpe (slika 5.13.). Zadatak filtera za smolu je sprječavanje kontakta podtlačne pumpe sa smolom, kako ne bi došlo do kvara na pumpi. [11]

Podtlačnu cijev za odvod smole iz laminata je potrebno spojiti na filter za smolu, a ne izravno na podtlačnu pumpu. Zatim se pomoću cijevi poveže filter za smolu i podtlačna pumpa. U filter za smolu ulaze smola i zrak. Zrak nastavlja tok sve do pumpe, a smola ostaje u spremniku. Ako je potrebno (kod velikih kalupa) može se upotrijebiti nekoliko spremnika. Na površinu unutrašnjosti spremnika filtera za smolu potrebno je nanijeti odvajalo (vosak) da se olakša uklanjanje stvrdnute smole. [18]



Slika 5.13. Prikaz spajanja filtera za smolu [18]

Kada su sve komponente postupaka podtlačnog ulijevanja postavljene i spojene preostaje još spajanje podtlačne pumpe. Poželjno je imati snažniju pumpu jer se na taj način olakšava i ubrzava protok smole kroz laminat. [18]

Kada se podtlačna pumpa pokrene najveći problem predstavlja eventualno curenje smole u sustavu. Najmanje curenje u sustavu može narušiti potrebne karakteristike gotovog proizvoda ili ga potpuno uništiti. Postupak podtlačnog ulijevanja smole nije vremenski ograničen pa je omogućeno pronaći sve izvore curenja zraka iz kalupa prije nego se u kalup počne ulijevati smola. Unatoč tome neki izvori curenja su toliko mali da ih je teško ili gotovo nemoguće pronaći. Postoje instrumenti koji pomažu pri pronalaženju pukotina (izvora curenja) na temelju otkrivanja ultrazvučnih frekvencija. [18]

#### **5.5.4.4. Priprema za ulijevanje**

Karakteristike gotovog proizvoda ovise o izboru smole. U postupku podtlačnog ulijevanja smole može se koristiti bilo koja vrsta smole. Naravno, potrebno je uzeti jedno vrlo važno svojstvo smole, a to je viskoznost. Viskoznost je svojstvo fluida da se opire tečenju. Kada se u proizvodnom postupku upotrebljava smola koja ima nižu viskoznost to znatno olakšava i ubrzava protok smole u laminatu. Kada se upotrebljava smola visoke viskoznosti potreban je veći broj cijevi za dovod smole i više planiranja zbog povoljnog pozicioniranja tih cijevi. [18]

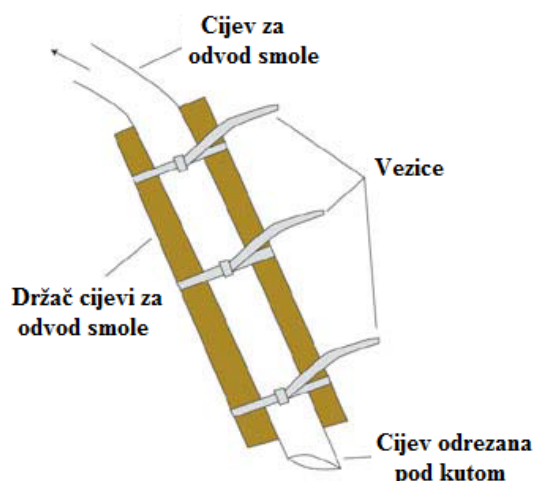
Vinil-esterska smola često se upotrebljava u ovom postupku, jer je zbog svoje niske viskoznosti vrlo pogodna za ovaj proces. Poliesterska smola je s obzirom na viskoznost manje pogodna od vinil-esterske smole, ali više od epoksidne smole. [18]

Epoksidna smola ima visoku viskoznost, pa je potrebno upotrebljavati jače podtlačne pumpe i medij za olakšavanje tečenja smole, više cijevi za dovod smole i više planiranja. Prednost upotrebe epoksidne smole je prije svega visoka kvaliteta gotovog proizvoda (vrlo dobra mehanička svojstva). [18]

#### **5.5.4.5. Postavljanje cijevi**

Cijevi za odvod smole potrebno je učvrstiti jer njihovo pomicanje može uzrokovati curenje smole i/ili zraka. Držać cijevi za odvod smole je daska od čvrstog materijala koja sprečava

savijanje cijevi (slika 5.14.). Poželjno je da kraj cijevi koji je u kalupu bude odrezan pod kutom od oko  $60^\circ$  da se olakša protok smole (slika 5.14.). [18]



Slika 5.14. Prikaz kraja cijevi za odvod smole koji se nalazi u kalupu [18]

#### 5.5.4.6. Ulijevanje smole

Prije početka ulijevanja smole u sustav potrebno je provjeriti jesu li svi elementi sustava dobro spojeni i pričvršćeni. Tijekom postupka potrebno je pratiti protok smole kroz laminat. Smola mora natopiti cijeli laminat. Kada smola natopi cijeli laminat više nema potrebe za dovodom smole u kalup. Zatim je potrebno odspojiti cijevi za dovod smole. Nakon toga podtlačna pumpa će nastaviti odstranjivati višak smole iz kalupa. Potrebno je da pumpa i dalje nastavi raditi iako je prekinut dovod smole kako bi se osigurao podtlak u kalupu, da bi se spriječio ulaz zraka u kalup. [18]

#### 5.5.5. Eksperimentiranje i poboljšavanje postupka podtlačnog ulijevanja

Postoje alati i naprave koji mogu biti od velike pomoći i olakšati i ubrzati čitavi postupak. Mogu uštedjeti vrijeme i pomoći skupiti korisnih podataka za daljnje eksperimentiranje.

Korisno je znati temperaturu smole u svakom trenutku proizvodnog postupka. Na temelju temperature smole može se odrediti npr. kada se smola počinje skrućivati (rast temperature) i



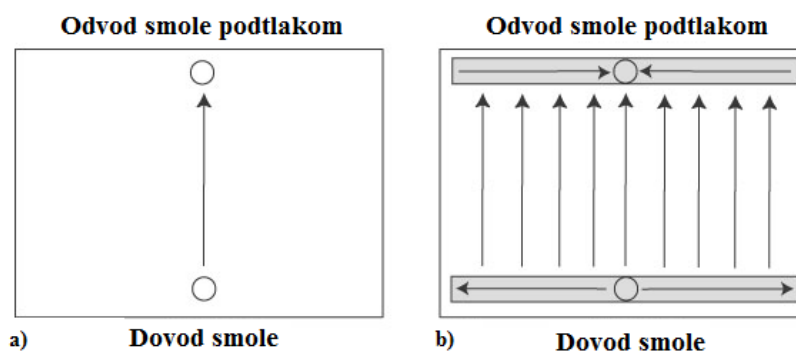
kada je laminat ponovno na sobnoj temperaturi. Temperatura smole se mjeri na nekoliko mjesta (npr. kod cijevi za dovod i odvod smole). [18]

Mjerenje brzine protoka također može biti korisno. Potrebno je početi mjerenje vremena u trenutku kada se smola počne ulijevati u laminat. Zatim u pravilnim vremenskim razmacima označiti razinu smole u kalupu. [18]

Način izvođenja procesa bitno ovisi o dimenzijama i obliku kalupa, kao i o vrsti ojačavala i smole koja se koristi u procesu. Potrebno je razumjeti kako zapravo radi postupak podtlačnog ulijevanja. Pokretanjem podtlačne pumpe sav zrak koji se nalazi unutar zatvorenoga kalupa biva uklonjen. Unutrašnjost hermetički zatvorenog kalupa tijekom proizvodnog postupka je zrakoprazni prostor. Podtlačna pumpa ne usisava smolu u kalup, to radi stvoreni podtlak u kalupu.

Nakon što se pomoću podtlačne pumpe sav zrak ukloni iz kalupa, teoretski se pumpa može isključiti, a ulijevanje smole u kalup će se i dalje nastaviti odvijati. U praksi pumpa naravno mora ostati uključena do završetka trajanja proizvodnog postupka. Kako bi se postiglo jednoliko namakanje laminata smolom potrebno je znati da smola teče linijom manjeg otpora, te da smola teži ispunjenju zrakopraznog prostora. [18]

Poznavajući dvije predhodno navedene karakteristike tečenja smole olakšava se planiranje proizvodnog postupka. Potrebno je dobro planiranje procesa kako bi se jednoliko natopio smolom cijeli laminat, jer jedino tako se može dobiti ispravan proizvod koji sadrži sva potrebna svojstva. Potrebno je upotrebljavati produžetke za cijevi za dovod i odvod smole unutar kalupa. Na slici 5.15. prikazano je nepravilno i pravilno postavljanje cijevi za dovod i odvod smole. [18]



Slika 5.15. Pojednostavljeni prikaz nepravilnog i pravilnog postavljanja cijevi:

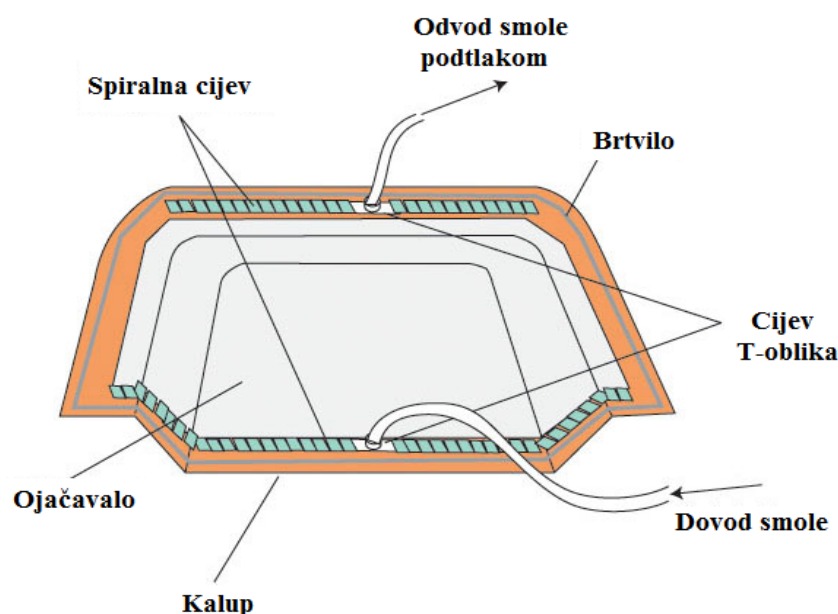
a) nepravilno i b) pravilno [18]

U primjeru na slici 5.15. prikazano je: [18]

- a) Unutar kalupa nisu korišteni produžeci za cijevi za dovod i odvod smole. Nekorištenje produžetaka rezultira protokom smole najkraćim mogućim putem od cijevi za dovod smole do podtlačne cijevi za odvod smole, što rezultira nedovoljnim namakanjem laminata smolom.
- b) Unutar kalupa su korišteni produžeci za cijevi za dovod i odvod smole. Ti su produžeci kod podtlačnih cijevi za odvod smole zapravo spiralne cijevi (trake namotane u obliku cijevi), a kod cijevi za dovod smole to su filteri. Kroz te produžetke, prikazane na slici 5.15. sivom bojom, smola teče vrlo brzo. Laminat će biti temeljitije i potpunije namočen korištenjem tih produžetaka.

### 5.5.6. Uobičajeni način postavljanja cijevi za dovod i odvod smole

Često se kao produžetak cijevi za dovod i odvod smole u kalupu upotrebljavaju samo spiralne cijevi (slika 5.16.). Spiralna cijev koja služi kao produžetak cijevi za dovod smole se vrlo brzo ispuni smolom. Kada je spiralna cijev ispunjena smolom, smola počinje teći linijom manjeg otpora najbližim putem do spiralne cijevi koja služi kao produžetak cijevi za odvod smole podtlakom. Ovaj način postavljanja je jednostavniji od upotrebe filtera kao produžetka cijevi za dovod smole. Smola u ovom slučaju treba prijeći dužu udaljenost (cijelu širinu kalupa, tj. laminata). Ovaj način postavljanja nije pogodan za proizvodnju kompozitnih tvorevina velikih dimenzija. [18]



Slika 5.16. Prikaz upotrebe spiralnih cijevi kao produžetaka cijevi za dovod i odvod smole [18]

### 5.5.7. Proizvodnja kompozitnih tvorevina velikih dimenzija

Kod proizvodnje kompozitnih tvorevina velikih dimenzija smola treba prijeći veću udaljenost od cijevi za dovod smole do cijevi za odvod smole. Što je ta udaljenost veća to je protok smole sporiji, pa se javlja veći otpor tečenja. Rješenje u tom slučaju je upotreba većeg broja cijevi za dovod i odvod smole, kao i smole s većom viskoznošću te medij za olakšavanje protoka smole.

Vrlo važno je da cijeli proizvodni postupak bude dobro isplaniran, jer u suprotnome može vrlo lagano doći do nepravilnosti u postupku tj. škart proizvoda. Kada se smola počne ulijevati u unutrašnjost kalupa najčešće je prekasno za ispravljanje nepravilnosti, jer čak i najmanje curenje zraka može uzrokovati nepravilnosti u postupku.

Polimerni kompozitni materijali su vrlo povoljni u brodogradnji, a jedan od razloga je što se mogu oblikovati po želji i potrebama, neovisno o dimenzijama broda. U gotovu kompozitnu tvorevinu se ugrađuju električne i druge instalacije (slika 5.17.), a eventualne nepravilnosti na površini trupa broda se ispravljaju mehaničkim obradama i poliesterskim kitom.



Slika 5.17. Prikaz ugradnje električnih i drugih instalacija u trup broda, te prikaz gotovog proizvoda [14]

### 5.5.8. Usporedba proizvodnih postupaka

Kako bi se odabrao proizvodni postupak za izradu broda od kompozitnog polimera potrebno je poznavati karakteristike (prednosti i nedostatke) postupaka. Za proizvodnju kompozitnih brodova koriste se postupci: ručni dodirni postupak laminiranja, dodirni postupak štrcanja

vlakana, podtlačno oblikovanje, podtlačno ulijevanje smole itd.. No ipak najčešće se koriste ručni dodirni postupak laminiranja i postupak podtlačnog ulijevanja smole. U nastavku su prikazane njihove prednosti i nedostaci. [20]

### **Omjer matrice i ojačavala [20]**

Omjer smole i ojačavala u laminatu utječe na masu kompozitne tvorevine i na njegova mehanička svojstva. Brodom koji je manje mase je lakše upravljati (olakšano je manevriranje), te je potrebno manje energije za njegov pogon (manja potrošnja goriva).

Izrazito lošiji omjer ojačavala i smole u gotovom proizvodu ima ručni dodirni postupak laminiranja zbog nedovoljno učinkovitog odstranjivanja viška smole. Kvaliteta tog postupka u velikoj mjeri ovisi o radniku kao i postizanje zadovoljavajućeg omjera smole i ojačavala za taj postupak. Tim postupkom teško je proizvesti kompozite s malim udjelom smole bez pukotina. Vrlo povoljan omjer postiže se postupkom podtlačnog ulijevanja smole, kojim se dobije kompozitna tvorevina sa 60 % smole i 40 % vlakana.

Omjer mase ojačavala i matrice ovisi o mnogo faktora: vrsti ojačavala, vrsti tkanja, tehnologiji nanošenja (ručno, strojno), načinu konsolidacije (ručno, podtlak), kvalificiranosti radne snage, te kontroli postupka. Stvarne udjele se može kontrolirati tek nakon završetka postupka očvršćivanja laminata spaljivanjem uzorka. Kao pomoćna kontrola koristi se praćenje mase ojačavala i utroška smole za vrijeme laminiranja.

### **Cijena [20]**

Najjeftiniji proizvodni postupak je ručni dodirni postupak, dok je postupak podtlačnog ulijevanja smole je skuplji. Razlika u cijeni je prisutna zbog opreme (alata i naprava) koja je potrebna, kao što je podtlačna pumpa, zaštitna folija, cijevi za dovod i odvod smole, itd..

### **Zdravlje i zagađenje [20]**

Na emisiju stirena djelovat će sastav poliesterske smjese i izbor postupka prerade. Postupak podtlačnog ulijevanja smole je znatno zdraviji za radnike i ekološki prihvatljiviji prihvatljiviji od ručnog dodirnog laminiranja. Razlog toga je što se kod podtlačnog ulijevanja upotrebljavaju zatvoreni kalup, dok je kod ručnog dodirnog laminiranja kalup otvoren pa dolazi do emisije stirena.

Stiren monomer se u proizvodnom postupku izrade polimerne kompozitne tvorevine koristi kao razrjeđivalo za postizanje potrebne viskoznosti smole, te kao sastojak u procesu očvršćivanja. U visokim koncentracijama monomeri su štetni za zdravlje, te su zato propisane granične količine monomera koje su dopuštene u radnom okolišu. Postoje granične norme, tj. profesionalne higijenske granice koje ukazuju na najveću prihvatljivu prosječnu koncentraciju para tijekom jednog radnog dana (8 sati). [7]

Zadovoljavajući ventilacijski sustav u proizvodnim halama je uz pravilno određivanje stirenskih para vrlo bitan pri proizvodnji poliesterskih tvorevina, jer omogućuje bolju zaštitu okoliša i očuvanje zdravlja zaposlenika. Izborom proizvodnog postupka sa tzv. zatvorenim kalupom se uvelike pridonosi očuvanju zdravlja i okoliša. [7]

### **Rizik uspješnosti proizvoda [20]**

U postupku podtlačnog ulijevanja neke nepravilnosti u pripremi komponenata kompozitne tvorevine ili postavljanju podtlačne vreće (zaštitne folije) mogu uzrokovati značajnu štetu (škart i gubitak vremena). Posebno oprezno se mora postupati kada se ovim postupkom proizvod izrađuje prvi puta. Za različite oblike kalupa cijevi se trebaju postavljati na različite načine da bi proizvod bio kvalitetan, što se ponekad treba naučiti tzv. postupkom „pokušaja i pogrešaka“.

Ručni dodirni postupak laminiranja je vrlo jednostavan, te je opasnost da dođe do krivog izvođenja procesa vrlo mala.

### **Kvaliteta gotovog proizvoda [20]**

Postupkom podtlačnog ulijevanja smole postiže se bolji omjer smole ojačavala nego kod ručnog dodirnog postupka laminiranja. Uobičajeni ručni dodirni postupak laminiranja rezultira velikim udjelom smole u kompozitnom proizvodu. Osim smanjenja potrošnje smole, postupkom podtlačnog ulijevanja smole se dobije lakši i čvršći proizvod, koji bolje konkurira na tržištu brodogradnje. Kod ručnog dodirnog postupka se često ne uspije odstraniti sav zrak kao i višak smole iz laminata, što bitno utječe na svojstva gotovog proizvoda.

## 6. AUTOMATIZACIJA PROIZVODNJE I MONTAŽE BRODOVA

Kod automatizacije proizvodnje i montaže u bilo kojem postrojenju od velike je važnosti poznavati tehnologije izrade i tehnologiju montaže dijelova sklopa. Uz to, potrebno je poznavati kinematiku i dinamiku manipulatora ili robota u postrojenju, kao i pomoću upravljanja i regulacije optimirati proizvodni proces. Glavni razlog automatizacije proizvodnje je ekonomska isplativost, odnosno stvaranje profita.

Tvrtke koje se upuštaju u takve zahvate moraju biti sigurni da će im to biti financijski isplativo. Moraju točno znati kako će optimirati proizvodni/montažni sustav, kako na primjeren način uključiti nove tehnologije u proizvodni proces, te trebaju ispuniti uvjet da proizvodnja i montažni sklop bude željene kvalitete.

Na svjetskom tržištu opstati mogu samo tvrtke koje prihvate koncept agilne proizvodnje, odnosno tvrtke koje će moći lako, brzo i jeftino prijeći s proizvodnje (i/ili montaže) jednog proizvoda na proizvodnju drugog proizvoda (tj. proizvodnju različitih proizvoda). Poznato je da se industrijska postrojenja automatiziraju, odnosno osuvremenjuju ako je planirana masovna, serijska proizvodnja. Agilna proizvodnja je proizvodni koncept koji se zasniva na visokoj automatizaciji i robotizaciji što joj omogućuje fleksibilnost. Potrebno je posebnu pozornost posvetiti održavanju tih kompleksnih proizvodnih (montažnih) sustava i na taj način poboljšati performanse za osiguranje potrebne kvalitete proizvoda i sigurnosti na radu, inače međusobno ovisnih kategorija. [21]

### 6.1. Prednosti automatizirane proizvodnje

Fleksibilni tehnološki sustavi (npr. roboti ili manipulatori) mogu raditi bez prekida 24 sata dnevno i 365 dana u godini, što daje 8460 sati godišnje raspoloživog rada. Rad ljudi u 3 smjene teško je organizirati, a zbog organizacijskih gubitaka za rad u jednoj smjeni, uz dobru organizaciju može se računati na oko 1400 sati rada godišnje, a to je u odnosu 8460 raspoloživih sati 16,5 % iskorištenja raspoloživog kapaciteta. Od velike važnosti je i sigurnost radnika, poznato je da je upotreba epoksidnih i poliesterskih smola štetno za zdravlje radnika, pa je radnike poželjno udaljiti iz takvih proizvodnih postupaka. [22]

Godišnje se u svijetu dogodi: [21]

- oko 250000000 nezgoda na radu
- oko 160 milijuna radnika obolijeva od profesionalnih bolesti
- oko 1,2 milijuna radnika umire zbog posljedica nezgoda na radu i profesionalnih bolesti
- godišnje na radu pogine 8600 ljudi (1999.)
- godišnje se zbog radnih nezgoda gubi oko 600 milijuna radnih dana.

Dobro organiziranom, automatiziranom proizvodnjom moguće je omogućiti proizvodnju bez zaliha u zadanome roku, bez grešaka i škarta, frekventnu isporuku malih količina, a sve u svrhu financijske isplativosti. [21]

Da bi se shvatile prednosti automatizirane proizvodnje proizvodnog koncepta sa stajališta kvalitete i zaštite na radu, u odnosu na nerobotiziranu i neautomatiziranu ili nedovoljno robotiziranu i automatiziranu proizvodnju, potreban je pregled poteškoća i gubitaka koji postoje i koji se smanjuju s porastom stupnja implementacije koncepta agilne proizvodnje, odnosno automatizacije i robotizacije. Prema istraživanju Europske agencije za sigurnost na radu i zaštitu zdravlja, stres na radnom mjestu prisutan je kod svakog trećeg radnika Europske unije. Prema prikupljenim podacima stresom na poslu u EU obuhvaćeno je 28 % zaposlenih ili 41,2 milijuna ljudi. Posljedica stresa na poslu je 50 - 60% svih izgubljenih radnih dana, ali i oko 5 milijuna nesreća na radu. [21]

## **6.2. Investiranje u robotizaciju proizvodnje**

Osnovne činjenice koje utječu na odluku o kupovini robota (tj. manipulatora) su kapacitet proizvodnje i cijena radne snage. Nema smisla kupovati robota ako će on raditi samo jednu smjenu i to u pola kapaciteta. Investiranje u robote nije opravdano tamo gdje je radna snaga toliko jeftina da se on neće isplatiti u kratkom vremenskom roku (od jedne do tri godine). Velik broj takvih robota se upotrebljava u automobilskoj industriji prvenstveno zbog masovne proizvodnje i visokoj tržišnoj vrijednosti tog „sklopa“ tj. proizvoda (automobila). Naravno, važno je imati na umu da u brodogradnji često proizvodnja nije serijska, ili te serije nisu dovoljno velike da bi se isplatilo investirati u automatizaciju proizvodnje. Unatoč tome, automatizacija se može isplatiti ako se tehnologija može i zna prilagoditi svakom novom proizvodu, u prihvatljivom vremenskom razdoblju.

### 6.3. Primjena robota (manipulatora) u proizvodnji i montaži

Internacionalna organizacija za standardizaciju (fra. *Organisation internationale de normalization* ISO) definira robote kao automatski upravljane, multifunkcionalne manipulatore, koji su programirani za pomicanje u tri ili više osi, te mogu biti pomični ili nepomični (fiksirani).

Kada se priča o automatiziranoj proizvodnji i montaži često se misli na robotske ruke koje brzo, funkcionalno, sigurno i točno mogu obavljati neke zadatke. Sve veća uporaba manipulatora (robota) ima i svoje društvene posljedice. Njihovim uvođenjem u tvorničke hale bez posla ostaje veliki broj nekvalificiranih radnika koji su do sada obavljali jednostavne i dosadne radnje. Cijena robota stalno pada i roboti sve više ulaze u široku uporabu. Bitno je spomenuti da se osim robotskih ruku u brodogradnji upotrebljavaju i CNC (eng. *Computer Numerical Control*) strojevi (tokarilce, bušilice, glodalice), npr. za rezanje staklenih vlakana i krutih PVC pjena na željene dimenzije.

Robote je potrebno na pravi način uklopiti u proizvodni proces. Potrebna je integracija mehanike s elektronikom i umjetnom računalnom inteligencijom u postupku projektiranja i izrade tehnoloških sustava. Mogu se podijeliti po vrsti pogona (električni, hidraulički, pneumatski), po geometriji radnog prostora (pravokutna, cilindrična, sferna), po načinu upravljanja kretanjem (od točke do točke - nije bitna putanja nego točnost pozicioniranja, kontinuirano gibanje po putanji - bitna je trajektorija i točnost pozicioniranja). [23]

Robote pokreću različiti motori. Gibanje se prenosi s motora na pokretne dijelove robota različitim prijenosnicima. Prijenosnici služe osim za prijenos gibanja i za promjenu brzine gibanja i zakretnog momenta. Najjednostavnije se prijenos gibanja ostvaruje vratilom, ali se gibanje može prenijeti i remenom, lancem, zupčanicima, zubnom letvom. Današnji se industrijski roboti sastoje od mehanizma robota i njegove kinematike, energetskim pogonima koji pokreću mehanizam, računalnog upravljanja, senzorike, itd.. [24]

Roboti se dijele na tri generacije, definirane prema složenosti informatičkog sustava:

I. Generacija (programirani roboti) su roboti koji imaju samo pamćenje (memoriju) u kojoj je pohranjen program. Uz ograničenu inteligenciju i osjete, znatno zaostaju u spretnosti i pokretljivosti prema čovjekovoj ruci. U industrijskim postrojenjima su najrašireniji, jer problem rukovanja rješavaju u jednostavnim slučajevima, koji su česti u industriji.



II. Generacija (senzibilni roboti) su roboti opremljeni sensorima vida, dodira i opipa, te sensorima sile. Preko senzora sile dobivaju informaciju o stanju okoline, a pomoću jednostavne logike ugrađene u računalo ovi su roboti sposobni reagirati. Na taj način, kontrolom sile mogu se zaštititi uređaji i smanjiti ograničenost okoline.

III. Generacija (inteligentni roboti) su roboti opremljeni su sustavima za raspoznavanja i računalima nove generacije. Cijeli sustav trebao bih imati svojstva višeg stupnja inteligencije, tj. donošenje odluka u definiranim uvjetima, te učenje i odlučivanje u definiranim uvjetima. Za umjetnu inteligenciju najvažnija je mogućnost učenja, tj. povezivanja novih iskustava sa postojećim znanjem pohranjenim u memoriju. Ovi bi roboti u budućnosti trebali zamijeniti čovjeka u nepovoljnim radnim uvjetima.

Roboti si u industriji podijeljeni u četiri skupine:

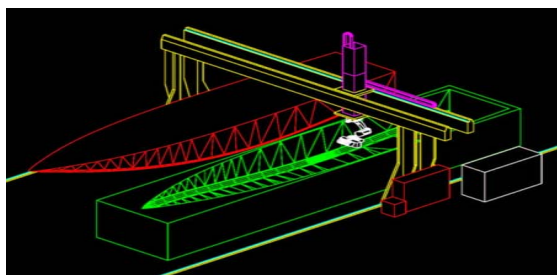
- Roboti za opsluživanje i transport alata i obradaka
- Tehnološki roboti, opremljeni alatima (klijesta, pištolji za zavarivanje, brusilice, pile)
- Mjerni roboti (portalne ili konzolne konstrukcije)
- Montažni roboti koji su najzastupljeniji zbog potrebe u industriji za brzinom rada, različitosti pokreta, točnosti i ponovljivosti

Za zadavanje trajektorije (putanje kretanja) robota najčešće se koriste tri metode:

- opisivanje trajektorije programskim kodom (zgodno za trajektorije koje možemo matematički opisati, npr. kružnice, elipse, poligoni...)
- učenje trajektorije tako da čovjek rukom provede robota po trajektoriji, to jest putanji po kojoj će se taj robot trebati kretati, te ju tako robot snimi i poslije ponavlja (robot se prebaci u poseban mod te ga se ručno pomiče)
- detektiranje karakterističnih kontura pomoću vizijskog sustava, te određivanje trajektorije na temelju njihovih pozicija (ili označavanje trajektorije na samom obradku markerima, koje robot prati pomoću vizijskog sustava)

Najčešće je sad slučaj da se programski zadaju neki okviri gdje je ta trajektorija. Najbolji se rezultat dobiju kombiniranjem sve tri metode. Pomoću vizijskih sustava se samo eliminiraju greške koje nastaju zbog promjene ulaznih parametara (npr. dio dođe malo drugačije pozicioniran, pa se preko vizijskog sustava odredi pogreška i korigiraju se programski zadane točke za taj iznos pogreške koji je vizijski sustav odredio). Vizijski sustavi se kao jedini način vođenja robota, za sada koristi samo eksperimentalno.

Robotske ruke se mogu koristiti za automatizirano štrcanje vlakana po površini kalupa (slika 6.1. i slika 6.2.), te dodatnu obradu gotovog polimernog obradka (rezanje, glodanje, bušenje, itd.). Kretanje robotske ruke (traktorija) u postupku automatiziranog štrcanja vlakana se može definirati ručnim pomicanjem robotske ruke po površini kalupa (robotska ruka pamti tu putanju i ponavlja je po potrebi). Putanja kretanja robota kod rezanje rupa na površini kabine broda ili trupa broda (npr. za izradu prozora) se može definirati opisivanjem traktorije programskim kodom.



Slika 6.1. Shematski prikaz upotrebe automatizirane robotske ruke za postupak štrcanja vlakana [25]

Na robotsku se ruku mogu montirati različiti alati, kao što su pištolj za štrcanje, brusilica, pila itd. U brodogradnji se robotske ruke često koriste za izradu polimernih tvorevina (kabine ili trupa broda) postupkom štrcanja vlakana (slika 6.2.). Za manje elemente brodske konstrukcije nema potrebe za nikakvim vodilicama, jer robotska je ruka svojim opsegom kretanja sposobna doseći svaki dio kalupa.



Slika 6.2. Prikaz upotrebe automatizirane robotske ruke za postupak štrcanja vlakana [26]

Kod izrade trupa broda, ili bilo kojeg elementa većih dimenzija, potrebno je koristiti vodilice, koje služe za transport robotske ruke (slika 6.3.).



Slika 6.3. Upotreba automatizirane robotske ruke na vodilici za postupak štrcanja vlakana na kalupe [25]

### 6.3.1. Mehanička obrada polimernih kompozitnih tvorevina

Primjena staklenih vlakana kao ojačavala otežava mehaničku obradu zbog strukture takvog kompozita. Postupci mehaničke obrade polimernih kompozitnih materijala su rezanje, glodanje, štancanje, bušenje i tokarenje. Polimerni kompoziti ojačani staklenim vlaknima mogu se obrađivati suhim i mokrim postupcima, ovisno o željenoj kvaliteti obrade površine i debljini stjenke koja se obrađuje. Obradom suhim postupkom primjenjuju se alati od običnih alatnih čelika (karbidni i dijamantni sijekujući alati). Obradom mokrim postupkom moguća je primjena brusnih ploča, te se tako smanjuje potrošnja i oštećenje alata. Obrada mokrim postupkom je neophodna kada se obrađuju predmeti debljih stijenaka, te je takva obrada najekonomičnija za postizanje precizne i kvalitetne obrade površine. Alate potrebne za mehaničku obradu polimernih kompozitnih tvorevina je moguće montirati na robotsku ruku, pa postupak može biti obavljen bez prisustva ljudi. [7]

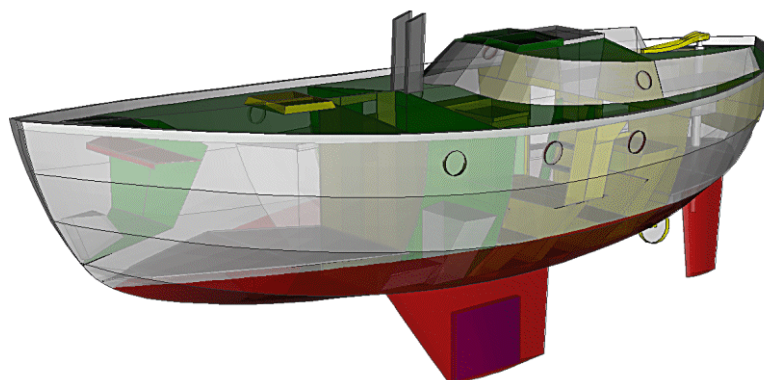
Rezanje se može obaviti običnim cirkularnim pilama, dijamantnim pilama i brusnim pločama. Za bolju i kvalitetniju obradu, postizanje glatkoće reznih komada (potrebna u brodogradnji) potrebno je koristiti pilu s gustim zupcima. Glodanje tvorevina od poliestera obavlja se običnim glodalicama iz standardnih alata, te je preporučljivo glodati s većim brzinama (130 okretaja u minuti). Štancanje se obavlja normalnim alatima. Štancati se mogu ploče od cca 23 mm, koje je preporučljivo prije toga ugrijati. Bušenje je radi postizanja točnije i čvrste bušotine poželjno obavljati sa stolnom ili stupnom bušilicom, minimalna brzina svrdla treba biti 130 okretaja u minuti. [7]

## 7. KALUP ZA IZRADU BRODA OD POLIMERNOG KOMPOZITA

Proizvodnja u današnje vrijeme započinje modeliranjem na računalu. Prije nego se počne razmišljati o proizvodnji potrebno je modelirati virtualni 3D prototip proizvoda na računalu. Trodimenzionalno modeliranje na računalu olakšava postizanje željenih osobina proizvoda, te postizanje željenih dimenzija i oblika. Modeliranje trodimenzionalnih objekata na računalu se koristi u mnogim proizvodnim industrijama (npr. za proizvodnju automobila, aviona, brodova, elisa za vjetro-generatore, kao i za proizvodnju mnogih proizvoda malih dimenzija).

Prednost modeliranja virtualnog prototipa na računalu je mogućnost izrade nekoliko različitih varijanti proizvoda i naknadno biranje najoptimalnijeg, uzevši u obzir proizvodni postupak, estetiku, te ponašanje pod utjecajem različitih opterećenja i deformacija. Također je moguće uzeti u obzir i plovnost broda, kao npr. hidrodinamiku trupa broda, te aerodinamiku kabine broda. Virtualni 3D objekt moguće je u računalnom programu podvrgnuti simulaciji opterećenja, te vidjeti kolike se deformacije (plastične ili elastične) događaju pri različitim opterećenjima, uzevši u obzir dimenzije, masu i materijal, te mnoge druge bitne parametre. Vrlo bitna prednost virtualnog oblikovanja elemenata je smanjenje vremena i utrošenog materijala potrebnog za izradu proizvoda, što na kraju utječe i na konačnu cijenu proizvoda.

Takvi trodimenzionalni virtualni prototipovi oblikovani na računalu su CAD modeli (slika 7.1.). CAD (eng. *Computer Aided Design*) je skup postupaka i alata koji se koriste pri kreiranju geometrijske reprezentacije dijelova i sklopova koji se projektiraju, dimenzioniraju, arhiviraju, razmjene konstrukcijskih dijelova i sklopova između timova i organizacija, generiranju ulaznih podataka za CAE i CAM postupke. [27]



Slika 7.1. Prikaz 3D CAD modela broda

Prednosti korištenja CAD alata su: [27]

- Povećana učinkovitost - automatizacija zadataka koji se ponavljaju, korištenje standardnih dijelova iz postojeće baze, automatsko generiranje nacrtu potrebnih za izradu dijela/sklopa
- Izmjenljivost - prilikom izmjena nije potrebno ponavljati sve naredne korake, omogućeno je praćenje prethodnih iteracija u dizajnu
- Komunikacija između članovima razvojnog tima, te s drugim aplikacijama (FEM, CAM)
- Mogućnosti obavljanja različitih analiza: svojstva materijala (masa, inercija), te kolizija između pojedinih dijelova.

### 7.1. Reverzibilno inženjerstvo

Reverzibilno inženjerstvo (eng. *reverse engineering*) je postupak izvođenja tehničke dokumentacije iz gotovog proizvoda (postojećeg objekta), umjesto da se na temelju nacrtu izrađuje proizvod. To je proces otkrivanja tehnoloških principa nekog proizvoda, objekta ili sustava kroz analizu njegove strukture, funkcije i rada. Koristi se kada:

- je potrebno izmijeniti samo neke dijelove postojeće konstrukcije
- originalan proizvođač ne proizvodi više proizvod, a tržište ga traži
- ne postoji originalna dokumentacija
- „oponašanje,, konkurencije
- je potrebna kontrola dimenzija i oblika
- je prototip napravljen u glini, pjeni

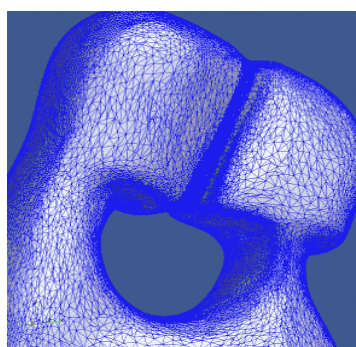
Razvoj novih proizvoda ili alata često se temelji na već postojećim proizvodima ili fizičkim modelima. Jednostavne geometrijske oblike se relativno lagano i u kratkome vremenskom razdoblju može definirati na računaru, na temelju nekoliko jednostavnih izmjera poput promjera i udaljenosti. Proizvodi koji su iz funkcionalnih, estetskih i ergonomskih razloga većinom vrlo složenog oblika je moguće rekonstruirati u nekom od CAD sustava, te na taj način dobiti računalni model prikladan za daljnje projektiranje, izradu alata i pripremu proizvodnje. Takve slobodno definirane (zakrivljene) površine mogu se precizno rekonstruirati jedino na temelju velikog broja mjernih točaka, a njih je klasičnim mjernim metodama vrlo teško ili nemoguće izmjeriti u dovoljnom broju. [28]

Proces reverzibilnog inženjerstva sastoji se od mjerenje oblika objekta te rekonstruiranja njegovog trodimenzionalnog modela (slika 7.2.). Optički sustavi za trodimenzionalnu digitalizaciju u kratkom vremenu mogu odrediti velik broj mjernih točaka s površine objekta koji treba biti rekonstruiran. Ovakav detaljan mjerni rezultat omogućuje vrlo preciznu i brzu računalnu rekonstrukciju oblika, pa tako smanjuju vrijeme razvoja i povećavaju kvalitetu proizvoda. [28]



Slika 7.2.. Originalni predmet koji je potrebno rekonstruirati i rezultat 3D digitalizacije

Podaci dobiveni trodimenzionalnom digitalizacijom obrađuju se kako bi se dobila detaljna poligonizirana mreža (slika 7.3.) koja detaljno opisuje digitalizirani objekt, oblaci točaka (nekoliko milijuna mjernih točaka), ili rezultati u obliku presjeka, karakterističnih linija ili zasebnih točaka. Daljnjom obradom ovih podataka u programskim paketima za rekonstrukciju CAD modela dobivaju se površinski (NURBS) odnosno volumenski modeli (STEP, IGES). [28]



Slika 7.3. Detalj poligonizirane mreže s prikazanim trokutima

Trodimenzionalni rezultat digitalizacije u obliku poligonizirane mreže učitava se pomoću STL-formata u odgovarajuće programe za rekonstrukciju površina. Kod programa koji ne podržavaju obradu velikog broja mjernih točaka prikladniji je rad s presjecima (krivuljama) koje se eksportiraju u npr. VDA, IGES ili ASCII formatima. [28]



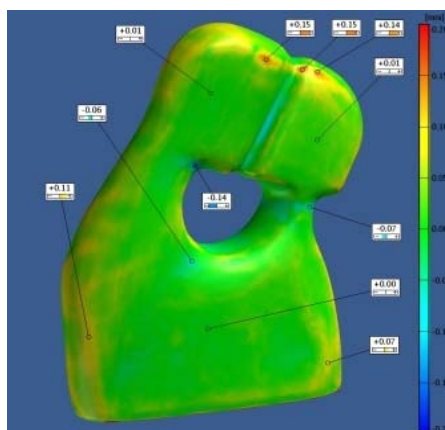
Tijekom postupka rekonstrukcije opisuje se površina objekta zakrivljenim matematičkim definiranim plohama (najčešće NURBS ili BESSIER). Kada je cijela površina matematički opisana odnosno zatvorena, površinski se model pretvori u tijelo ("solid") - volumenski model prikladan za rad s uobičajenim i široko rasprostranjenim CAD sustavima. [28]

Postupak je znatno jednostavniji i precizniji što je rezultat digitalizacije kvalitetniji i potpuniji. Kvaliteta rekonstruiranog CAD modela procjenjuje se na temelju glatkoće kreiranih površina, odnosno valovitosti pojedinih ploha i kontinuiteta među njima (poklapanje, tangentnost, i zakrivljenost), a analizu olakšavaju alati poput simulacije odsjaja "zebra uzorka" (slika 7.4.). [28]



Slika 7.4. Analiza kontinuiranosti rekonstruiranog CAD modela pomoću "zebra uzorka"

Oblik fizičkog modela opisuje veliki broj mjernih točaka, tako da se provjera točnosti oblika i dimenzija modela rekonstruiranog CAD modela provodi cjelovito po kompletnoj površini. Odstupanja od fizičkog originala (najviše 0,15 mm) prikazuje se pomoću boja (Slika 7.5.). Crvenom i plavom bojom prikazana su najveća odstupanja na površini rekonstruiranog CAD modela. Plava boja pokazuje udubljenja a crvena ispupčenja, dok je zelenom bojom prikazana točno rekonstruirana površina CAD modela. Time se uklanja opasnost od kreiranja površina, koje su doduše glatke i lijepe, no vrlo netočne, što se kod primjene NURBS ili BESSIER funkcija učestalo događa. [28]



Slika 7.5. Provjera točnosti rekonstruiranog CAD modela

### 7.1.1. Dobivanje CAD modela broda primjenom reverzibilnog inženjerstva

Kako bi se postigla trodimenzionalna digitalizacija objekata dužih od 10 metara (npr. broda), potrebno je koristiti dva sustava za 3D digitalizaciju, a to su TRITOP i ATOS. Korištenjem ovih mjernih sustava trodimenzionalna digitalizacija vrlo kompliciranih fizičkih originalnih uzorka je jednostavna i izuzetno precizna, te je olakšan i proces rekonstrukcije CAD modela. Cjeloviti rezultat sastavljen od velikog broja mjernih točaka (i do nekoliko milijuna) omogućava brzo i točno kreiranje matematičkih površina, kao i njihovu detaljnu kontrolu.

Korištenjem samo ATOS-a (najčešćeg sustava za 3D digitalizaciju), kod većih objekata dolazi do nagomilavanja pogreške. Kada se pomoću sustava ATOS skenirao objekt velikih dimenzija s jedne strane objekta, i dodaje (tj. „lijepi“) skenove jedan pokraj drugoga, sve do kraja objekta, dolazi bi do slijedne pogreške. Takva se pogreška pojavljuje jer se svaki slijedeći sken nužno ne poklapa s prethodnim u zajedničkim točkama. Kako bi se izbjegla pojava slijedne pogreške, objekt je prvo potrebno 3D digitalizirati pomoću sustava TRITOP, kako bi se dobile puno točnije, egzaktnije pozicije svih referentnih točaka, tj. pozicije markera koji su nalijepljeni na površinu objekta kojega je potrebno digitalizirati. Tako dobivene točne pozicije referentnih točaka uvelike pomažu u daljnjem postupku 3D digitalizacije sustavom ATOS. Sustav ATOS pomoću tih referentnih točaka precizno spaja skenove. U nastavku je opisan proces 3D digitalizacije, pomoću sustava TRITOP i ATOS.

#### 7.1.1.1. Trodimenzionalna digitalizacija mjernim sustavom TRITOP

TRITOP je mobilni optički mjerni sustav koji visokom preciznošću određuje 3D položaj markera i drugih uočljivih elemenata s površine mjernoga objekta i omogućava brzo i efikasno mjerenja na licu mjesta. Trodimenzionalno određivanje oblika nekog postojećeg proizvoda fotogrametrijskim sustavom TRITOP u cilju izrade točnog CAD modela koji odgovara stvarnom stanju sastoji se od: [28]

- priprema objekta – postavljanje markacija (markera), adaptera i linija
- fotografiranja - digitalnom fotogrametrijskom kamerom iz različitih položaja
- automatske obrade – izračuna pozicija mjernih točaka u prostoru pomoću računala
- rezultata – koji se mogu precizno izmjeriti, prikazati i usporediti s CAD modelom ili nominalnim vrijednostima



Potrebna oprema se sastoji od profesionalnog digitalnog fotoaparata, računala za obradu rezultata, referentne motke, markera, adaptera, linije i dodatne opreme. (slika 7.6.).



Slika 7.6. Fotogrametrijski sustav TRITOP firme GOM mbH.

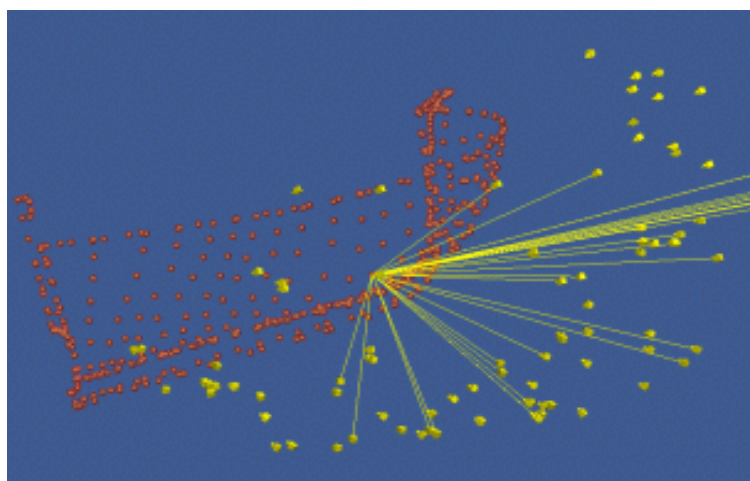
Na postojeći proizvod potrebno je nalijepiti niz mjernih točaka (markera) tako da dovoljno precizno opisuju oblik njenog trupa. Na strateški odabrana mjesta koja treba izmjeriti po mjernom se objektu postavljaju kružne markacije, adapteri i linije. Markacije daju mjerne točke s površine objekta, linije služe za određivanje presjeka, a adapterima se mjere položaj i oblik geometrijskih elemenata (provrti, rubovi, cilindri, kugle itd.). [28]

Snimanje se provodi kvalitetnim digitalnim fotoaparatom visoke rezolucije. Snimanje se obavlja ručno, te nije potrebna nikakva stabilna konstrukcija. Zbog toga je TRITOP lako prenosiv i izuzetno robustan mjerni sustav. Potrebno je snimiti 100-tinjak fotografija iz različitih položaja, koje se nakon toga obrađuju računalom. [28]

Najprije se u digitalnim fotografijama s visokom točnošću automatski pronalaze sve mjerne točke (referentne markacije), koje su vidljive kao svijetli kružići na tamnoj podlozi. U kratkom vremenu određuje se velik broj mjernih točaka (precizan položaj u prostoru) s površine objekta (trupa broda) koji treba biti rekonstruiran. [28]

Potrebno je svakoj točki ustanoviti položaj u svim snimkama u kojima se ona pojavljuje. TRITOP provodi predkalibraciju na principu triangulacije i optimizaciju rezultata "metodom izjednačenja zrakovnog snopa". Mjerilo snimanja određuje se na temelju referentnih motki, čije su dužine baždarene na sobnoj temperaturi s točnošću boljom od 0,01 mm, a korigiraju se u ovisnosti o temperaturi prostora u kojem se mjerenje provodi. [28]

Konačan rezultat ove automatizirane analize precizne su trodimenzionalne koordinate mjernih točaka u zajedničkom koordinatnom sustavu. Na slici 7.7 prikazan je položaj mjernih točaka s trupa broda (crveni kružići) i pozicije kamere odakle su fotografije snimane (žuta boja). Linije predstavljaju optičke pravce projekcije jedne mjerne točke kroz objektiv kamere u svim položajima snimanja u kojima je ta točka bila vidljiva. Sjecište ovih pravaca definira položaj te mjerne točke u prostoru. Takvi pravci poznati su za sve mjerne točke. [28]



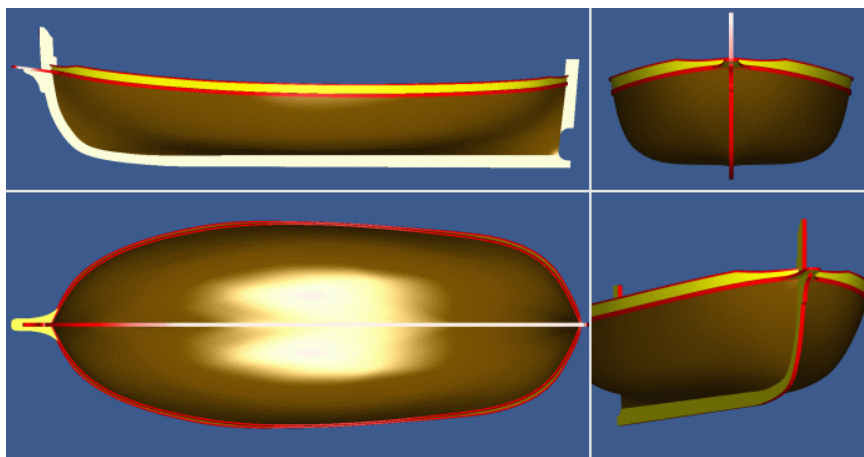
Slika 7.7. Prikaz prostornog položaja kamere i mjernih točaka u programu TRITOP

Nakon što je izračunat položaj mjernih točaka u prostoru (koordinate  $x,y,z$ ), trodimenzionalni oblik broda postaje poznat (slika 7.8.). Kada se dobije trodimenzionalni oblik broda omogućeno je određivanje njegovih realnih dimenzija, ali i kompletna kompjutorska rekonstrukcija trupa.



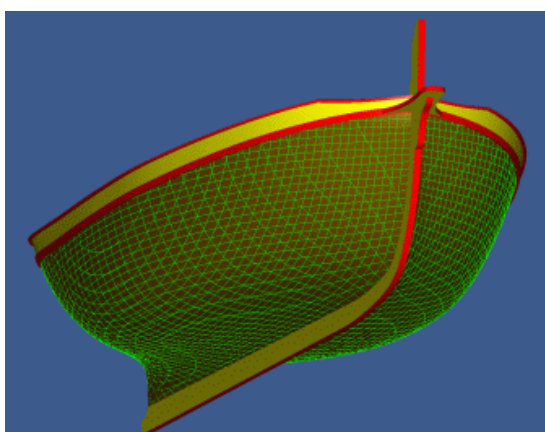
Slika 7.8. Rezultat fotogrametrijskog snimanja

Trodimenzionalni kompjutorski model broda izrađen na temelju mjernih točaka izmjerenih fotogrametrijom prikazan je u na slici 7.9.). Trodimenzionalne koordinate mjernih točaka mogu se pomoću TRITOP-a precizno izmjeriti, prikazati, te usporediti s CAD modelom ili nominalnim vrijednostima. [28]



Slika 7.9. Dobiveni trodimenzionalni kompjutorski model broda

Računalni trodimenzionalni (CAD) model broda vjerno predstavlja svoj original, a lako je provesti i željene modifikacije, bez opasnosti da se naruši sklad forme broda. Karakteristične linije trupa, odnosno paralelni presjeci u horizontalnoj, uzdužnoj i poprečnoj ravnini prikazani su na slici 7.10. [28]



Slika 7.10. Karakteristične linije (paralelni presjeci) trupa broda

Potrebna mjerenja postojeće forme broda lako se provode pomoću fotogrametrijskog sustava TRITOP zbog njegove visoke mjerne točnosti, prenosivosti i lakoće korištenja. Detaljan mjerni rezultat omogućuje vrlo preciznu i brzu računalnu rekonstrukciju oblika, pa tako smanjuje vrijeme razvoja i povećava kvalitetu proizvoda. [28]

TRITOP deformacijski modul omogućava snimanje višestrukih stanja opterećenja objekata. Praćenjem promjene položaja markera i drugih elemenata određuje se gibanje i deformacije promatranoga objekta. Mjerni izvještaji se jednostavno automatiziraju, a rezultati eksportiraju pomoću standardiziranih formata. [28]

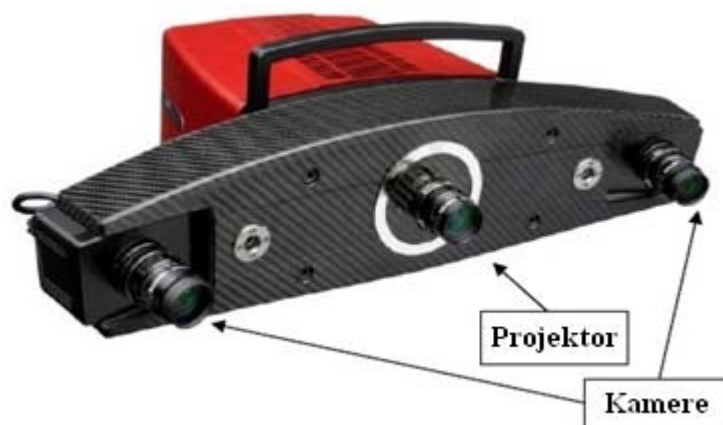
### 7.1.1.2. Trodimenzionalna digitalizacija mjernim sustavom ATOS

Područje uporabe optičkog 3D sustava za digitalizaciju ATOS je vrlo široko. Izuzetne radne karakteristike, velika razlučivost detalja, te širok raspon mjernih područja omogućuju djelotvorno i precizno prikupljanje i prikazivanje podataka za kontrolu kvalitete, reverzibilno inženjerstvo, brzu proizvodnju prototipova, brzo glodanje i brzu izradu alata, te digitalno modeliranje i montažu. Primjenjuje se u strojarstvu, brodogradnji, graditeljstvu, u arhitekturi kao virtualna realnost, u arheologiji pri dokumentiranju ili repliciranju, umjetnosti, medicini itd.

Mjerna nesigurnost sustava ovisi o veličini objekta. Tako je objekte veličine oko 4 metra moguće izmjeriti sa mjernom nesigurnošću boljom od 0,1 mm, a male objekte sa mjernom nesigurnošću boljom od 0,01 mm. [29]

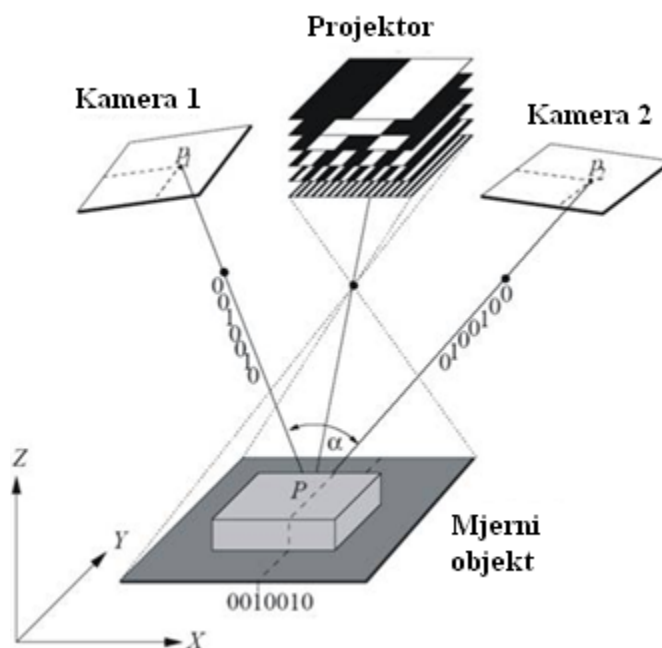
Sustav ATOS je temeljen na principu triangulacije. Na mjerni objekt projicira uzorke paralelnih linija i snima ih pomoću dvije digitalne kamere (slika 7.11.). Brza i detaljna mjerenja oblika objekta mjerenja moguće je provesti kombinirajući stereo postavu sa centralno postavljenim projektorom, koji na objekt mjerenja projicira različite uzorke linija (slika 7.12.), koje su tako koncipirane da kontrolirano u vremenu mijenjaju svjetloću pojedinog piksela na objekt. Na osnovi primljene refleksije vrši se izračunavanje pozicija točaka objekta u prostoru. [29]

Budući da svaka od kamera (slika 7.11.) omogućuje po dva osjeta u slikovnom koordinatnom sustavu pojedine kamere, a objektna mjerna točka je definirana sa tri prostorne koordinate ovaj predefinirani model senzora ne zahtijeva poznavanje relativnog položaja projektora u odnosu na položaje kamere. [29]



Slika 7.11. Trodimenzionalni skener ATOS

Projecirane linije snimaju se pomoću dvije kalibrirane kamere, pa računalo s vrlo visokom točnošću automatski izračunava 3D koordinate za svaki od maksimalno 4 milijuna piksela u kameri, za samo nekoliko sekundi. Mjerno područje sustava je 150 mm x 150 mm do 2000 mm x 2000 mm, dok je mjerni volumen 490 mm x 300 mm x 170 mm. [29]



Slika 7.12. Uzorci linija i stereo postava

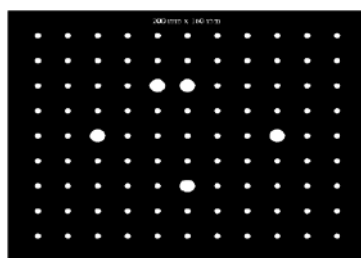
U svakom pojedinačnom mjerenju sustav ATOS automatski prepoznaje referentne točke koje se nalaze unutar mjernog volumena, pomoću kojih se sva pojedinačna mjerenja postavljaju u zajednički koordinatni sustav. Zahvaljujući ovoj strategiji ATOS možemo postaviti na stativ i pomicati oko objekta mjerenja bez potrebe za posebnim uređajima za pozicioniranje. Sustav automatski detektira vanjske utjecaje kao što su vibracije i prema potrebi ponavlja mjerenje. [29]

Mjerni postupak se sastoji od: [29]

- Priprema modela i sustava
- Kalibracija sustava
- Projekcija i snimanje slika
- Rješavanje problema jednoznačnosti
- Triangulacija objektnih koordinata
- Povezivanje višekratnih mjerenja
- Prikaz i obrada rezultata

Mjerni objekt potrebno je postaviti u vidno polje sustava. Površina objekta ne smije biti reflektirajuća, već difuzna, jer su kamere vrlo osjetljive na reflekske od površine objekta. Na mjestima lokalne preosvjetljenosti slike nastaje gubitak informacije. Difuznost se jednostavno postiže sprejanjem izuzetno finog titan-dioksidovog praha. Namještanjem geometrije sustava kamera, prsteni za regulaciju objektiva trebaju se učvrstiti jer bilo kakav njihov pomak mijenja parametre orijentacije kamera. [29]

Kalibracijom sustava dovodimo u odnos objektne i slikovne koordinate, odnosno koliko piksela odgovara jednom milimetru. To postizemo kalibracijskim objektom (slika 7.13.) koji je strogo definiranog oblika i geometrije, koji se postavlja u vidno polje kamere. [29]



Slika 7.13. Kalibracijski objekt

U većini se slučajeva pri kalibriranju stereosustava svaka kamera kalibrira zasebno, te se pomoću geometrijske transformacije vrši zajedničko usklađivanje. Kalibracijski objekt snimi se kamerama u petnaestak različitih položaja zarotiran oko svoje osi i nagnut na različite strane. Budući da relativni međusobni položaj kalibracijskih točaka ostaje uvijek isti, dobiva se predefiniran sustav jednadžbi koji se rješava metodom izjednačavanja zrakovnog snopa. [29]

Sljedeći korak je projekcija promjenjive svjetlosne karakteristike na površinu mjernog objekta da bi se moglo lakše riješiti problem jednoznačnosti, tj. koja točka u jednoj kameri odgovara točki u drugoj kameri – olakšano traženje stereopara. Postoji vremensko, objektno i direktno kodiranje svjetla. [29]

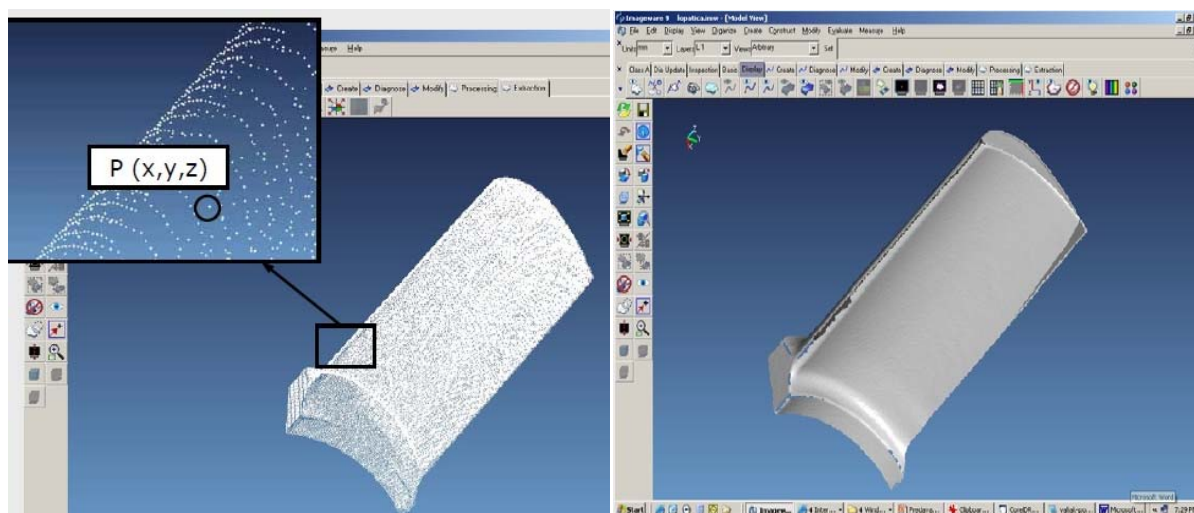
Nakon što su poznati položaji stereoparova u slici, slijedi njihovo trianguliranje radi određivanja prostornog položaja točke. U većini situacija jedno skeniranje nije dovoljno da bi konstruirali kompletan model predmeta. Za potpunu digitalizaciju objekta potrebno je napraviti više pojedinačnih mjerenja sa različitih strana da bi dobili cjelokupne informacije o predmetu. Najčešće se koriste samoljepljive kodirane i nekodirane bijele točke (slika 7.14.) na crnoj podlozi koje se lijepe na objekt. [29]



Slika 7.14. Kodirana (lijevo) i nekodirana (desno) mjerna točka

Sva pojedinačna mjerenja postavljaju se u zajednički koordinatni sustav upravo pomoću tih mjernih točaka. 3D digitalizacijom dobiva se velik broj točaka s površine mjernog objekta koji je prikladno prikazati preko oblaka točaka. [29]

Oblak točaka se prikazuje kao proizvoljan oblak koji čine nesređene točke u raspršenom obliku ili u obliku polilinija (izlomljenih linija). Za određivanje oblaka točaka koristimo računalni program *Imageware* (slika 7.15.) koji razlikuje četiri osnovne vrste oblaka točaka koje se temelje na unutarnjem rasporedu točaka. *Imageware* je alat za slobodno oblikovanje oblaka točaka, krivulja i ploha. [29]

Slika 7.15. Prikaz oblaka točaka u *Imageware*-u

Rezultat ovakvog načina mjerenja je skup trodimenzionalnih xyz točaka koji se naziva oblak točaka. Nakon toga programski paket ATOS izračunava poligoniziranu mrežu objekta sa vrlo visokom rezolucijom, postavljajući male trokute na zakrivljenim, a velike na ravnim dijelovima površine objekta. Na taj način dobivamo poligoniziranu mrežu prihvatljive veličine bez gubljenja na detaljnosti iste. Poligonizirane mreže mogu se sastojati i od nekoliko milijuna trokuta i na taj način vrlo detaljno opisuju objekt mjerenja (slika 7.15.). Daljnja obrada podataka dobivenih skeniranjem uvelike ovisi o potrebama i zadacima za daljnju primjenu tih rezultata. [29]

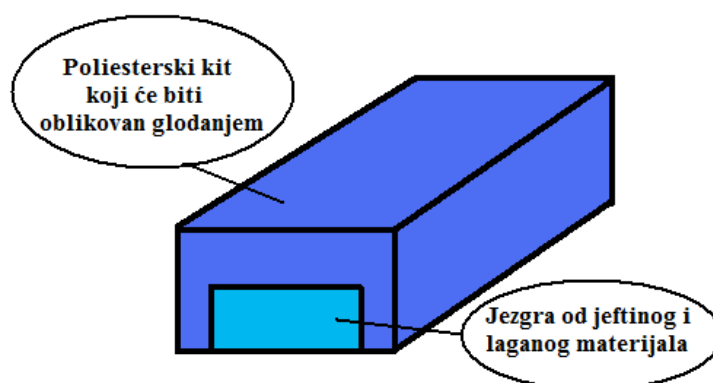


## 7.2. Postupak izrade kalupa

Kalupi za izradu polimernih kompozitnih tvorevina se izrađuju na osnovi trodimenzionalnog virtualnog CAD modela. Postoje dva načina izrade kalupa, a to su:

- izrada kalupa peteroosnom glodalicom (skuplji i bolji način)
- izrada kalupa pomoću uzdužnih ili poprečnih presjeka

Za izradu kalupa pomoću peteroosne glodalice koristi se kompozitna tvorevina (slika 7.16.), koja mora dimenzijama i oblikom približno odgovarati budućem kalupu. Vanjski materijal te kompozitne tvorevine je poliesterski kit, a unutarnji materijal je od jeftinog i laganog materijala (npr. drva, pjenastog polistirena, stiropora). Ta kompozitna tvorevina oblikuje se peteroosnom glodalicom na osnovu trodimenzionalnog virtualnog CAD modela broda. Ako glodalica nije dovoljno velika (za izradu brodova velikih dimenzija), kalup se može napraviti od nekoliko manjih dijelova.

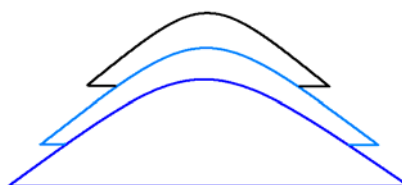


Slika 7.16. Pojednostavljeni prikaz kompozitne tvorevine od koje se izrađuje kalup

Površina kalupa mora biti vrlo glatka i potpuno odgovarati CAD modelu broda na računalu. Taj uvjet je velikim dijelom u ovome slučaju postignut samim glodanjem peteroosnom glodalicom (oko 95 % površine kalupa), ali ostaju neke sitne nepravilnosti koje se moraju ručno popraviti pomoću kita.

Drugi način je jeftiniji ali kompliciraniji, te je potrebno više vremena utrošiti na dodatno sređivanje površine kalupa, kako bi se postigla zahtijevana kvaliteta površine. Pomoću CAD modela kalupa (broda) odrede se poprečni ili uzdužni presjeci, koji su u obliku 2D ploča (slika 7.17.). Pomoću CNC stroja izrežu se ploče na osnovu poprečnih ili uzdužnih presjeka CAD modela, a spajanjem tih ploča postiže se oblik realnog kalupa. Mjesta gdje se te ploče spajaju potrebno je ručno doraditi kitom kako bi se postigla zadovoljavajuća kvaliteta površine.





Slika 7.17. Pojednostavljeni prikaz izrade 3D kalupa pomoću uzdužnih/poprečnih presjeka

Pomoću ova dva načina dobije se tzv. „muški“ dio kalupa, a za izradu polimerne kompozitne tvorevine je potreban „ženski“ dio kalupa. „Ženski“ dio kalupa izrađuje se od poliesterske smole i staklenih vlakana na osnovi „muškog“ dijela kalupa.

Površina gotove polimerne kompozitne tvorevine identična je površini kalupa. Iz tog razloga je vrlo važno da na površini kalupa nema nikakvih nepravilnosti. Sve nepravilnosti površine kalupa potrebno je popraviti (brušenjem, kitanjem), jer se u suprotnom te nepravilnosti moraju popravljati na svakom pojedinačnom gotovom proizvodu.

Kalupi se izrađuju tako da omogućavaju gradnju većeg broja identičnih objekata. Za vrlo veliku očekivanu proizvodnju izrađuju se vrlo skupi i čvrsti dvostrani kalupi u kojima se laminat formira podtlakom. [1]

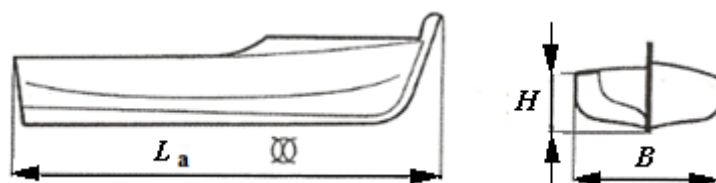
Kalup mora ostvariti četiri funkcije. Prva funkcija kalupa je stvaranje povezanosti među česticama ( $F_{M1po}$ ), druga funkcija je prestrukturiranje na molekularnoj razini ( $F_{MPpo}$ ). Treća funkcija kalupa je prastrukturiranje na nadmolekularnoj i višim razinama ( $F_{MPpsn}$ ), i četvrta funkcija prastrukturiranja na molekularnoj razini ( $F_{MPpsm}$ ). [10]

$$F_{MPR} = F_{M1po} + F_{Mppo} + F_{MPpsn} + F_{MPpsm} \quad (1)$$

Na osnovi površine kalupa može se odrediti koliko je potrebno polimerne smole i ojačavala za izradu broda. Prikaz pojednostavljenog izračunavanja površine kalupa broda s obzirom na dimenzije i profil: [7]





$$A = (2 L_a + B + H) K \quad [m^2] \quad (2)$$

Gdje je:  $A$  – površina za jedan sloj (za oba boka)



Slika 7.18. Dimenzije broda [7]

Tablica 1. Biranje koeficijenta profila broda

Biranje koeficijenata		k
batala		1,15
gajeta, guc		1,25
pasara		1,35
pasara punije forme		1,45

## 8. EKSPERIMENTALNI RAD

Eksperimentalnim radom ispitana su mehanička svojstva sendvič konstrukcija s različitim kombinacijama vanjskog sloja i jezgre, te je ustanovljeno koja bi se eventualno mogla upotrebljavati za izradu stjenke trupa broda. Sendvič konstrukcije su strukturni kompoziti, ovisni o geometrijskom rasporedu elemenata konstrukcije, koji se sastoje se od tankih vanjskih slojeva, spojenih (ali i razdvojenih) s materijalom male mase. Materijal za popunjavanje i vanjski slojevi ne trebaju biti čvrsti niti kruti, a sendvič posjeduje oba ta svojstva. Njihova primjena dovodi do smanjenja mase konstrukcije, te posljedično povećanja nosivosti. Vanjski sloj sendvič konstrukcija koji se upotrebljava pri izradi stjenke trupa broda je polimerni kompozit koji se sastoji od poliesterske, vinil-esterske ili epoksidne smole ojačane staklenim vlaknima. U ovom eksperimentalnom radu željelo se ispitati kakav će biti spoj (veza) između smole (poliesterske i epoksidne) i poliuretana (PUR) pjene (bio i sintetske), pa sendvič konstrukcija nije ojačana staklenim vlaknima. Planirano je ispitati svojstva sendvič konstrukcija sa sljedećim kombinacijama površinskog sloja i jezgre:

- Poliesterska smola (površinski sloj) i bio PUR pjena (jezgra)
- Poliesterska smola (površinski sloj) i sintetska PUR pjena (jezgra)
- Epoksidna smola (površinski sloj) i bio PUR pjena (jezgra)
- Epoksidna smola (površinski sloj) i sintetska PUR pjena (jezgra)

Poliuretan (PUR) pjene imaju tendenciju da tijekom godina dođe do razgradnje površine na dodiru jezgre i laminata, što dovodi do delaminacije, a samim time i ograničava njihovu uporabu. Najčešće se upotrebljavaju u lagano opterećenim sendvič pločama, najčešće za toplinsku izolaciju. PUR pjene mogu se upotrebljavati za apsorpciju zvuka, te pri temperaturama do 150°C. Lako se režu i obrađuju u željeni oblik, pri čemu dolazi do pojavljivanja prašine opasne po zdravlje. Nisu pogodne za toplo oblikovanje zbog otpuštanja otrovnih plinova, a iz istog razloga se ne smiju spaljivati. [16]

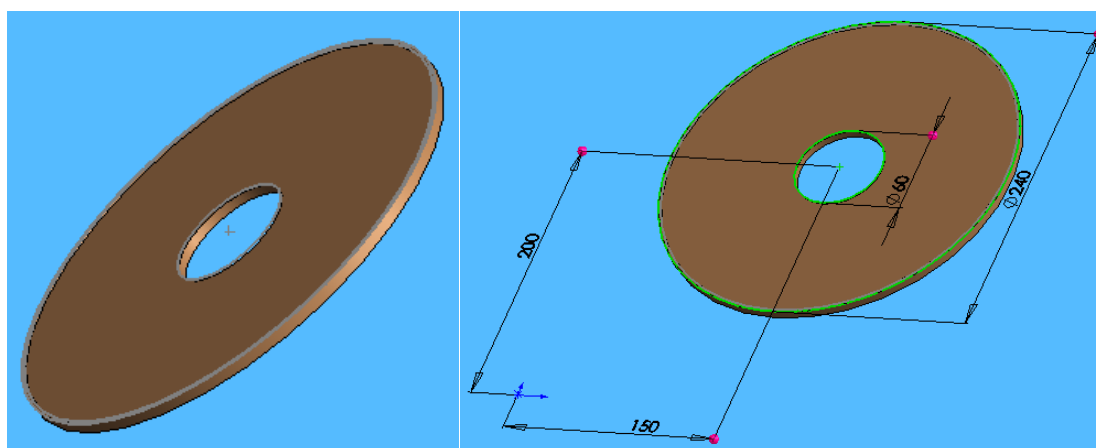
Kako bi se ispitala mehanička svojstva polimerne sendvič konstrukcije, potrebno je izraditi ispitna tijela (epruvete), koja moraju biti sljedećih dimenzija: 140 mm x 15 mm x 7 mm (slika 8.14.), prema normi ISO 178: 1993(E). Polimerne sendvič konstrukcije mogu se izraditi ručnim laminiranjem, ugradnjom PUR pjene u otvrdnuti laminat s lijepilom ili poliesterskim kitom, te ugradnja PUR pjene na neotvrdnuti (mokri) laminat.

Za potrebe eksperimentalnog rada sendvič konstrukcija je izrađena postupkom centrifugalnog lijevanja. Tim postupkom izrađuju se najčešće ojačani cilindrični šuplji proizvodi (npr. ojačane cijevi), a sastoji se od toga da se staklena vlakna ulažu u cilindrični kalup, te se nakon toga u unutrašnjost kalupa uvodi smola s umreživalom i ubrzavalom, nakon čega dolazi do polireakcije i umreživanja smole. Smola i ojačavalo se nanose štrcanjem na unutrašnju plohu rotirajućeg kalupa. Smola se uvodi u središte kalupa, te pod utjecajem centrifugalne sile prodire prema stjenci kalupa, natapajući ojačavalo.

### 8.1. Oblikovanje jezgre sendvič konstrukcije s peteroosnom glodalicom

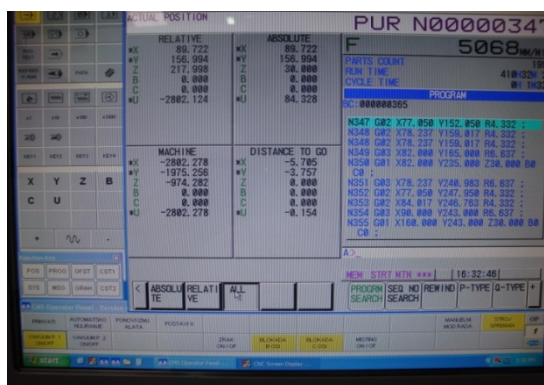
Sendvič konstrukcija za potrebe ovog eksperimentalnog rada izrađena je postupkom centrifugalnog lijevanja. Oblik i dimenzije PUR pjene koja se koristi u radu kao jezgra sendvič konstrukcije, potrebno je prilagoditi obliku i dimenzijama kalupa uređaja za centrifugalno lijevanje (slika 8.5.). Sintetska i bio PUR pjena su u obliku pravokutnih ploča dimenzija 250 mm x 250 mm x 45mm, te ih je potrebno doraditi kako bi se mogle koristiti za ovaj postupak. Kalup uređaja za centrifugalno lijevanje kružnog je oblika, promjera 240 mm i visine 6 mm. Oblik i dimenzije sintetske i bio PUR pjene postignuti su s CNC peteroosnom glodalicom, a taj postupak oblikovanja je opisan u nastavku.

U računalnom programu *SolidWorks* potrebno je modelirati 3D virtualni CAD model jezgre sendvič konstrukcije (slika 8.1.). Potrebno je definirati dimenzije tog CAD modela, te poziciju s obzirom na ishodište koordinatnog sustava (slika 8.1.). Na osnovu CAD modela modeliranog u *SolidWorks*-u definiraju se traktorije (putanje kretanja) alata peteroosne CNC glodalice.



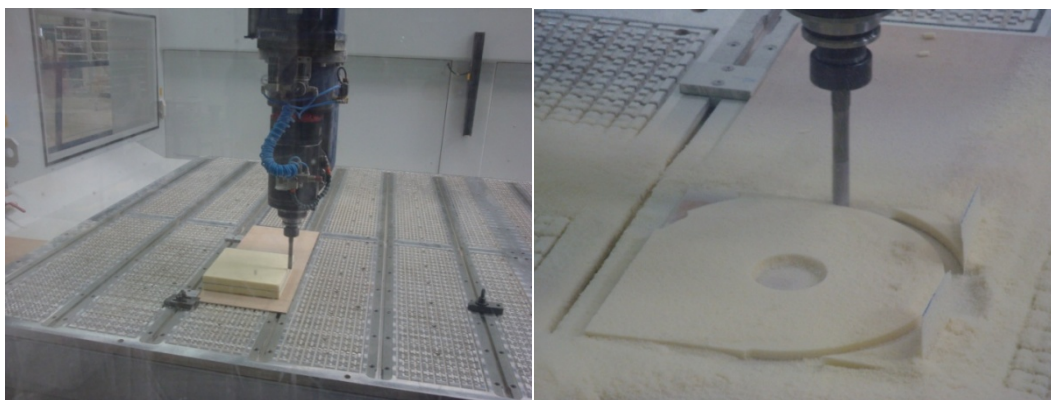
Slika 8.1. Prikaz 3D virtualnog CAD modela jezgre sendvič konstrukcije u *SolidWorks*-u

CAD model PUR pjene se unosi u računalni program CNC glodalice, u kojemu je potrebno definirati materijal obradka, brzinu obrade, vrstu alata, te položaj i orijentaciju alata i obradka s obzirom na referentnu točku na radnoj površini stroja (peteroosne CNC glodalice). Na osnovi unesenih parametara računalni program definira traktorije (putanje kretanja) alata, te određuje vrijeme trajanja obrade. Na slici 8.2. je prikazano sučelje računala peteroosne CNC glodalice, na kojemu su vidljivi kodovi kojima su definirane traktorije kretanja alata (G - kodovi), te zadani parametri.



Slika 8.2. Prikaz sučelja računala peteroosne CNC glodalice

Obradak (PUR pjenu u obliku pravokutne ploče) je potrebno pozicionirati na radnu površinu peteroosne CNC glodalice s obzirom na referentnu točku (slika 8.3.). Između obradka i radne površine je preporučljivo postaviti tanku ploču od jeftinog materijala, kako se ne bi oštetila radna površina. Prilikom rezanja ploča od poliuretana (PUR pjene) pojavljuje se prašina opasna po zdravlje, pa je preporučena upotreba maske.



Slika 8.3. Oblikovanje PUR pjene s peteroosnom CNC glodalicom

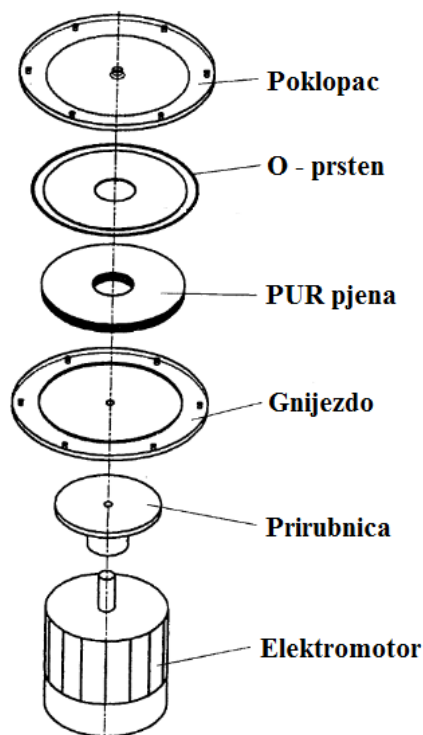
Na slici 8.4. vidljiv je konačni oblik bio i sintetske PUR pjene. Bio PUR pjena je smeđe boje a sintetska je svijetlo žute boje (slika 8.4.). Obradene su tri bio i tri sintetske PUR pjene, dimenzija 240 mm i visine 6 mm.



Slika 8.4. Oblikovana PUR pjena

## 8.2. Izrada sendvič konstrukcije postupkom centrifugalnog lijevanja

Uređaj za centrifugalno lijevanje se sastoji od elektromotora i kalupa (slika 8.5.). Kalup se sastoji od poklopca koji u središnjem dijelu ima otvor za ulijevanje smole, gnijezda i O – prstena koji služi za brtvljenje poklopca i gnijezda. Poklopac i gnijezdo su izrađeni od poli(metil-metakrilata) (PMMA), koji omogućuje promatranje tečenja smole unutar kalupa. Elektromotor se nalazi ispod radne površine stola, a prirubnica i kalup iznad, te je oko njih postavljena metalna zaštitna pregrada (slika 8.7.) kako bi se izbjegle ozljede radnika tijekom rada uređaja.



Slika 8.5. Uređaj za centrifugalno lijevanje [30]

Prije početka izrade sendvič konstrukcije važno je sa površine poklopca, O – prstena i gnijezda ukloniti nečistoće i premazati ih odvajalom, kako bi se gotovi izradak mogao odvojiti od kalupa. Svi O – prsteni (slika 8.6.) kod ovoga uređaja imaju promjer 240 mm, ali se razlikuju po visini. Visina gotovog izratka ovisi o korištenom O – prstenu. Za potrebe ovog eksperimentalnog rada korišten je najmanji O – prsten, kako bi se dobila visina sendvič konstrukcije 7mm.



Slika 8.6. Prikaz O – prstena kod uređaja za centrifugalno lijevanje

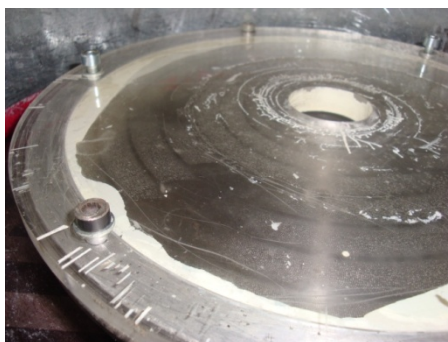
Na površinu gnijezda je potrebno staviti O – prsten (slika 8.7.), unutar kojega se stavlja PUR pjena obrađena pomoću CNC peteroosne glodalice (slika 8.4.).



Slika 8.7. Prikaz metalne zaštite uređaja za centrifugalno lijevanje

Zatim se na prsten stavlja prozirni poklopac (slika 8.8.) kojega je potrebno pričvrstiti sa šest vijaka, kako ne bi došlo do istjecanja smole iz kalupa tijekom centrifugalnog lijevanja. Nakon što je poklopac pričvršćen, uređaj se može pustiti u pogon.





Slika 8.8 Prikaz zatvorenog kalupa uređaja za centrifugalno lijevanje

Potrebno je odrediti masu smjese smole i umreživala koja će se ulijevati u kalup. Omjer smole i umreživala mora biti 100 : 54. Masa smjese smole i umreživala se u ovome eksperimentalnom radu računa na slijedeći način:

$$m = \rho_s \{ [(R_k^2 \pi) h_k] - [(R_{pv}^2 \pi) h_p - (R_{pu}^2 \pi) h_p] \}, \quad \text{kg} \quad (3)$$

Gdje su:

$m$  – masa smole i umreživala (100 : 54),

$R_k$  – polumjer kalupa,

$R_{pv}$  – vanjski polumjer PUR ploče,

$R_{pu}$  – unutarnji polumjer PUR ploče,

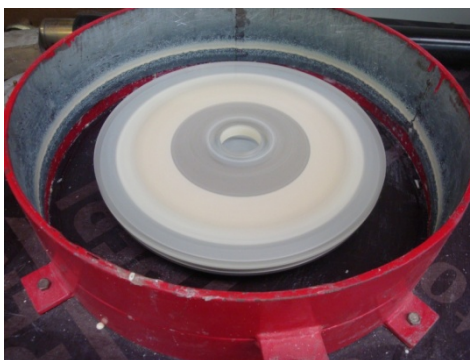
$h_k$  – visina kalupa,

$h_p$  – visina PUR ploče,

$\rho_s$  – gustoća smjese smole i umreživala.

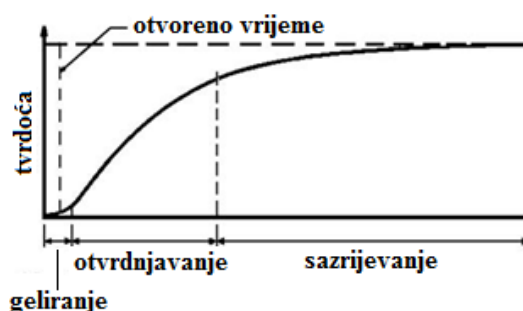
Kada je izračunata masa smjese smole i umreživala koju je potrebno uliti u kalup kako bi se unutrašnjost kalupa napunila smolom, potrebno je odrediti koliki maseni udio mora sačinjavati smola, a koliki umreživalo (100 : 54). Precizna vaga se upotrebljava za postizanje smjese smole i umreživala. Kada je postignuta smjesa mase  $m$  i željenog omjera, treba se dobro promiješati. Uređaj se zatim pušta u pogon, te se nakon što postigne konstantnu kutnu brzinu u njega može kroz otvor na središtu poklopca početi ulijevati smjesa smole i umreživala. Kako bi se izradila sendvič konstrukcija, ta smjesa mora popuniti unutrašnjost kalupa. Uslijed centrifugalne sile koja je posljedica kutne brzine i promjera, te mase smole savladavaju se otpori tečenja, te masa smole dopire do vanjskog oboda kalupa. Na slici 8.9. je prikazan uređaj za centrifugalno lijevanje koji je pušten u pogon, te izgled unutrašnjosti kalupa sa nedovoljno ulivene smjese smole i umreživala.





Slika 8.9. Prikaz tečenja smole tijekom vrtnje kalupa

Nakon što se ulije potrebna masa smjese smole i umreživala, kojom se ispunjava cijeli kalup, on se još neko vrijeme treba vrtiti da bi iz njega kroz otvor na sredini poklopca izašao zrak. Frekvencija vrtnje elektromotora u ovom eksperimentalnom radu iznosi  $1400 \text{ min}^{-1}$ . Vrijeme trajanja vrtnje kalupa mora biti duže od vremena potrebnog za polimerizaciju smole. Polimerizacija je reakcija spajanja više manjih monomera u jednu dugačku molekulu čime nastaje polimer (slika 8.10.). Ako se kalup prestane okretati prerano, tada na smolu koja je još uvijek u tekućem stanju prestaje djelovati centrifugalna sila, te ona pod utjecajem gravitacijske sile teče na dno kalupa, ispod PUR pjene koja ima manju gustoću od smole.



Slika 8.10. Proces polimerizacije

Dakle, preranim zaustavljanjem vrtnje kalupa se ne postiže željeni izgled sendvič konstrukcije. U tom slučaju se polimerna smola veže samo za jednu površinu PUR pjene (slika 8.10.), te takva novonastala tvorevina nema svojstva sendvič konstrukcije.



Slika 8.11. Prikaz vezivanja smole samo za donju površinu PUR pjene

Tijekom procesa polimerizacije dolazi do stezanja (smanjenja volumena) smole, pa je važno da je ona približno jednoliko raspoređena s obje strane jezgre kako ne bi došlo do savijanja novonastale tvorevine. Nakon prestanka rada elektromotora i vrtnje kalupa poželjno je da se sendvič konstrukcija ostavi u kalupu određeno vrijeme kako ne bi došlo do promjene njenoga oblika. Na slici 8.11. je prikazana gotova sendvič konstrukcija izvađena iz kalupa dobivena centrifugalni lijevanjem.



Slika 8.12. Prikaz sendvič konstrukcije dobivene centrifugalnim lijevanjem

Kako bi se smanjila deformacija PUR pjene tijekom vrtnje kalupa, na nju su s obje strane postavljene odstoynici debljine 1 mm (slika 8.12.). Upotrebom odstoynika je željeno izbjeći savijanje PUR pjene unutar kalupa. Taj pokušaj nije dao željene rezultate, a odstoynici su otežavali protok smole u kalupu, pa se u daljnjem eksperimentalnom radu više nisu upotrebljavali.



Slika 8.13. Prikaz upotrebe odstoynika pri izradi sendvič ploče

Tijekom izrade sendvič konstrukcija za potrebe eksperimentalnog rada primijećeno je da kod gotovog izradka PUR pjena nije cijela prekrivena poliesterskom smolom. Isprva je pretpostavljeno da je možda došlo do pogreške u računanju mase smjese umreživala i smole koju je potrebno uliti u kalup, ili da je PUR pjena upila dio te smjese. Ali je pri daljnjoj izradi ploča,

kod sendvič konstrukcije s jezgrom od bio PUR pjene koja je smeđe boje (pa je lagano primijetiti gdje nedostaje smole), primijećeno da smole nedostaje u rubnim dijelovima, tj. kraj vanjskog oboda kalupa (slika 8.13.), tj. na mjestu gdje bi je zbog djelovanja centrifugalne sile trebalo biti najviše. Nakon toga je primijećen trag smole po unutrašnjem obodu metalne zaštite, koji je vidljiv na slici 8.9., i koji je bio nakon svake nove izrađene ploče sve uočljiviji. Razlog je bio istjecanje smole iz kalupa tijekom vrtnje.



Slika 8.14. Prikaz sendvič konstrukcije s jezgrom od bio PUR pjene

Nakon što je ustanovljeno istjecanje smole iz kalupa, probana je izrada ploča sa što kraćim vremenom vrtnje kalupa. Rezultat nije bio zadovoljavajući jer zbog prekratkog vremena vrtnje polimerizacija nije bila završena (slika 8.10.), pa nije bila moguća izrada željene sendvič konstrukcije. Promjenom omjera smole i umreživala u smjesi koja se ulijeva u kalup moguće je skraćivanje vremena potrebno za polimerizaciju. Snižavanjem viskoznosti smole postiže se skraćivanje vremena potrebnog da smola ispuni cijeli kalup, ali samim time se uzrokuje i nedovoljno brtvljenje kalupa i gubitak smole.

### 8.2.1. Oštećenje poklopca kalupa za izradu sendvič ploča

Postupkom centrifugalnog lijevanja su izrađene četiri sendvič ploče, nakon čega je došlo do oštećenja poklopca, tj. loma poklopca kraj jednog utora koji služi za brtvljenje kalupa s vijcima. Zbog tog oštećenja uređaj za centrifugalno lijevanje se više nije mogao upotrebljavati, pa eksperimentalni rad nije mogao biti obavljen kako je planirano. Četiri izrađene sendvič ploče nisu bile željene strukture, tj. poliesterska pjena nije bila nanosena podjednako s obje strana PUR pjene (slika 8.10.). Izrađene su samo sendvič ploče sa poliestersko smolom: dvije ploče s bio PUR pjenom kao jezgrom i površinskim slojevima od poliesterske smole, te dvije ploče s sintetskom PUR pjenom kao jezgrom i površinskim slojevima od poliesterske smole.

Postupak centrifugalnog lijevanja nije uobičajen za izradu sendvič konstrukcija, te je planirano da će se tek nakon nekoliko izrađenih sendvič ploča postići željena struktura. Nažalost, zbog oštećenja poklopca daljnja izrada sendvič ploča nije bila moguća, te su mehanička svojstva mogla ispitati samo za sendvič konstrukcije s poliesterskom smolom kao površinskim slojem, te koje nemaju željenu strukturu.

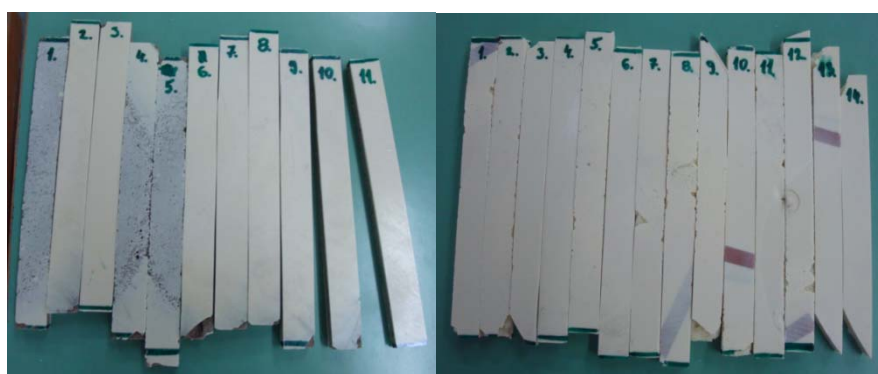
### 8.3. Ispitivanje savojne čvrstoće izrađenih sendvič ploča

Zbog loše kvalitete sendvič ploča izrađenih za potrebe ovog eksperimentalnog rada, odlučeno je da će se dva različita materijala:

- sendvič ploča sa **bio PUR pjennom** kao jezgrom i poliesterskom smolom kao površinskim slojevima;
- sendvič ploča sa  **sintetskom PUR pjennom** kao jezgrom i poliesterskom smolom kao površinskim slojevima;

usporediti s obzirom na savojnu čvrstoću, jer ispitivanje ostalih mehaničkih svojstava nije smatrano zanimljivim.

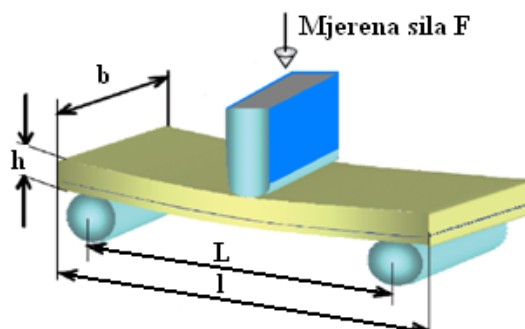
Ploče izrađene eksperimentalnim radom je potrebno izrezati na željene dimenzije kako bi se dobila ispitna tijela (epruvete). Za usporedbu ova dva materijala (sendvič konstrukcije) upotrijebljena je norma ISO 178: 1993(E). Pomoću te norme su odabrane potrebne dimenzije ispitnih tijela, te ovisno o njima i udaljenost između oslonaca kidalice (slika 8.15.) koja se upotrebljava za ispitivanje savojne čvrstoće. Na slici 8.14. prikazane su sendvič ploče izrezane na potrebne dimenzije, te označene rednim brojevima, radi olakšane dokumentacije dobivenih rezultata.



Slika 8.15. Prikaz ispitnih tijela s jezgrom od bio i sintetske PUR pjene

Savojna čvrstoća ispitnog tijela se računa na osnovu najviše moguće sile koju ono može izdržati prije nego dođe do loma. Ispitno tijelo se postavlja na dva oslonca, te se opterećuje pritisnom silom (slika 8.15.). Dimenzije ispitnog tijela su  $b$  (širina),  $h$  (visina) i  $l$  (duljina), a udaljenost između oslonaca je  $L$ . Udaljenost između oslonaca računa se prema normi ISO 178: 1993(E):

$$L = 16 h, \quad \text{mm} \quad (4)$$



Slika 8.16. Pojednostavljeni prikaz ispitivanja savojne čvrstoće [31]

Sva ispitna tijela ispitana su kidalicom (Rauenstein), a njihove dimenzije su približno:

$h = 7 \text{ mm}$ ,

$b = 15 \text{ mm}$ ,

$l = 140 \text{ mm}$ .

Kidalica koja je korištena u eksperimentalnom radu ima tri mjerna područja:

A – od 0 do 950 N,

B – od 0 do 2400 N,

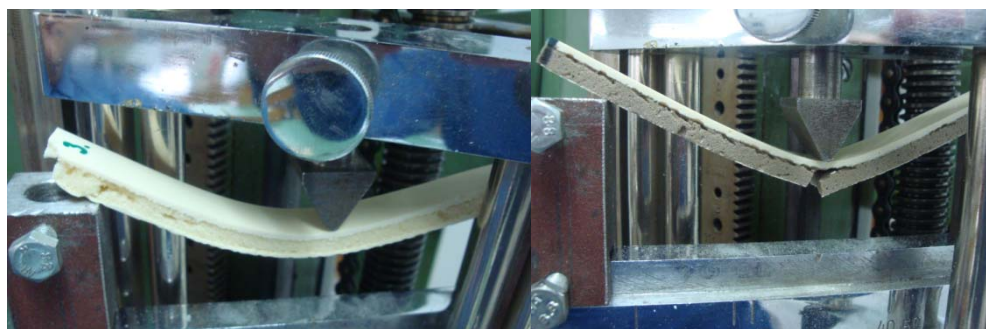
C – od 0 do 4800 N.

Savojna čvrstoća sendvič konstrukcija ispitana je u mjernom području B (od 0 do 2400 N) kidalice. Na slici 8.16. prikazano je ispitno tijelo s sintetskom PUR pjenom opterećeno okomito na površinu poliesterskog vanjskog sloja sendvič konstrukcije.



Slika 8.17. Prikaz progiba ispitnog tijela pri ispitivanju savojne čvrstoće

Rezultati ispitivanja su pouzdaniji što je veći broj ispitnih tijela, jer se kao konačan rezultat uzima srednja vrijednost rezultata svakog pojedinačnog ispitnog tijela. Tijekom ispitivanja zapisuje se za svako pojedinačno ispitno tijelo, sila koja je potrebna da dođe do loma. U ovome eksperimentalnom radu ispitano je 13 ispitnih tijela s sintetskom i 11 s bio PUR pjenom (slika 8.17.), te je za svaku od njih dokumentirano: dimenzije ispitnih tijela, udaljenost između oslonaca kidalice, te najviše moguće sile opterećenja prije loma (tablice 1. i 2.).



Slika 8.18. Prikaz ispitivanja savojne čvrstoće ispitnih tijela sa sintetskom i PUR pjenom

Kod postavljanja svakog ispitnog tijela na kidalicu, strana na kojoj je bilo više poliesterske smole je bila okrenuta prema gore (slika 8.17.), kako bi bili postignuti jednaki uvjeti. Rijetko koje ispitno tijelo je imalo željenu sendvič strukturu, tj. podjednaku raspodjelu smole s gornje i donje strane PUR pjene (slika 8.18.).



Slika 8.19. Prikaz ispitnog tijela s jednoliko raspoređenom smolom s obje strane PUR pjene

Na temelju najveće moguće sile opterećenja svakog pojedinačnog ispitnog tijela, dobivene ispitivanjem na kidalici, računa se njegova savojna čvrstoća:

$$\sigma = \frac{F L 6}{4 b h^2}, \quad \frac{N}{mm^2} \quad (5)$$

Gdje su:

$\sigma$  - savojna čvrstoća,

$F$  - mjerena sila,

$L$  - udaljenost između oslonaca,

$b$  - širina ispitnog tijela,

$h$  - visina ispitnog tijela.

Tablica 2. Prikaz dimenzija ispitnih tijela, udaljenosti između oslonaca kidalice, najviše moguće sile opterećenja prije loma, te savojne čvrstoće sendvič konstrukcije s površinskim slojevima od poliesterske smole i jezgre od **sintetske PUR pjene**.

<b>REDNI BROJ</b>	<b>b</b> mm	<b>h</b> mm	<b>L</b> mm	<b>F</b> N	<b>ČVRSTOĆA</b> N / mm <sup>2</sup>
1	14,4	7,3	112	23	5,03
2	15,0	7,3	112	20	4,2
3	15	7,2	112	30	6,48
4	15,1	7,3	112	20	4,18
5	15	7,3	112	45	9,45
6	15,2	7,2	112	62	13,22
7	14,5	7,3	112	21	4,39
8	14,8	7,5	112	21	4,24
9	14,5	7,3	112	56	12,18
10	14,2	7,3	112	19	4,22
11	14,5	7,3	112	12	2,61
12	14,5	7,3	112	12	2,61
13	14,9	7,3	112	32	6,77

Tablica 3. Prikaz dimenzija ispitnih tijela, udaljenosti između oslonaca kidalice, najviše moguće sile opterećenja prije loma, te savojne čvrstoće sendvič konstrukcije s površinskim slojevima od poliesterske smole i jezgre od **bio PUR pjene**.

<b>REDNI BROJ</b>	<b>b</b> mm	<b>h</b> mm	<b>L</b> mm	<b>F</b> N	<b>ČVRSTOĆA</b> N / mm <sup>2</sup>
1	14,5	7,2	112	22	4,92
2	14,5	7,3	112	80	17,39
3	15,1	7,1	112	19	4,19
4	14,9	7,3	112	15	3,17
5	15,3	7	112	10	2,22
6	14,5	7,3	112	46	10
7	14,5	7,5	112	20	4,12
8	14,7	7,3	112	25	5,36
9	14,3	7,5	112	20	4,18
10	14	7,3	112	70	15,76
11	15,2	7,3	112	10	2,07

Na temelju izračunate savojne čvrstoće svakog pojedinačnog ispitnog tijela (tablica 2. i 3.) potrebno je izračunati njihovu aritmetičku sredinu. Aritmetička sredina se računa za neki skup brojeva kao kvocijent zbroja članova i broja članova skupa, u matematičkoj notaciji:

$$\sigma_{ar.} = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \dots + \sigma_n)}{n}, \quad \text{N / mm}^2 \quad (6)$$

Gdje je:

$\sigma_{ar.}$  – aritmetička sredina savojne čvrstoće svih ispitnih tijela,

$\sigma_i$  – savojna čvrstoća pojedinačnog ispitnog tijela,

$n$  – broj ispitnih tijela (epruveta).

Aritmetička sredina savojne čvrstoće svih ispitnih tijela sa sintetskom PUR pjenom kao jezgrom iznosi:

$$\sigma_{ar.sintetska} = \mathbf{6,12} \text{ N / mm}^2$$

Aritmetička sredina savojne čvrstoće svih ispitnih tijela sa bio PUR pjenom kao jezgrom iznosi:

$$\sigma_{ar.bio} = \mathbf{6,67} \text{ N / mm}^2$$

Na temelju ovog ispitivanja je moguće zaključiti da se korištenjem bio PUR pjene kao jezgre u sendvič konstrukcijama sa poliesterskom smolom kao površinskim slojem postiže neznatno bolja savojna čvrstoća materijala, u odnosu na sendvič konstrukciju sa sintetskom PUR pjenom kao jezgrom.

Potrebno je izračunati standardnu devijaciju rezultata dobivenih ispitivanjem na temelju izračunate savojne čvrstoće svakog pojedinačnog ispitnog tijela (tablica 2. i 3.), kako bi se dobio pokazatelj homogenosti rezultata. Standardna devijacija označava mjeru raspršenosti podataka u skupu. Interpretira se kao prosječno odstupanje od prosjeka i to u apsolutnom iznosu. Matematička notacija standardne devijacije:

$$\sigma_{dev.} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_i - \sigma_{ar.})^2}{n}}, \quad \text{N / mm}^2 \quad (7)$$



Standardna devijacija savojne čvrstoće svih ispitnih tijela sa sintetskom PUR pjenom kao jezgrom iznosi:

$$\sigma_{\text{dev.sintetska}} = \mathbf{3,31} \text{ N / mm}^2$$

Standardna devijacija savojne čvrstoće svih ispitnih tijela sa bio PUR pjenom kao jezgrom iznosi:

$$\sigma_{\text{dev.bio}} = \mathbf{5,01} \text{ N / mm}^2$$

Na temelju izračunatih standardnih devijacije ispitnih tijela od ova dva materijala može se zaključiti da je izračunata aritmetička sredina savojne čvrstoće ispitnih tijela s sintetskom PUR pjenom kao jezgrom pouzdaniji podatak.

Rezultate ispitivanja pojedinih ispitnih tijela koji su drastično različiti od srednje vrijednosti potrebno je izbaciti iz razmatranja kada se na temelju rezultata za veći broj uzoraka, njihovom aritmetičkom sredinom određuje konačni rezultat ispitivanja. Na taj se način ostvaruju točniji rezultati mjerenja.

Na temelju aritmetičke sredine savojne čvrstoće svih ispitnih tijela sa sintetskom PUR pjenom kao jezgrom iz razmatranja su izbačena ispitna tijela: 6, 9, 11 i 12 (tablica 2.), jer su najviše odstupala. Nakon toga je ponovno izračunata aritmetička sredina i standardna devijacija savojne čvrstoće ispitnih tijela sa sintetskom PUR pjenom kao jezgrom:

$$\sigma_{\text{ar.sintetska1}} = \mathbf{5,44} \text{ N / mm}^2$$

$$\sigma_{\text{dev.sintetska1}} = \mathbf{1,7} \text{ N / mm}^2$$

Nakon toga je su temelju aritmetičke sredine savojne čvrstoće svih ispitnih tijela sa bio PUR pjenom kao jezgrom iz razmatranja izbačena ispitna tijela: 2, 6 i 10 (tablica 3.), jer su najviše odstupala. Nakon toga je ponovno izračunata aritmetička sredina i standardna devijacija savojne čvrstoće ispitnih tijela sa bio PUR pjenom kao jezgrom:

$$\sigma_{\text{ar.bio1}} = \mathbf{3,78} \text{ N / mm}^2$$

$$\sigma_{\text{dev.bio1}} = \mathbf{1,25} \text{ N / mm}^2$$

Nakon izbacivanja iz razmatranja ispitnih tijela koja su najviše odstupala od prvobitno izračunate aritmetičke sredine savojne čvrstoće, zaključeno je da sendvič ploča s poliesterskim vanjskim slojevima i jezgrom od sintetske PUR pjene ima višu čvrstoću.

**Važno je spomenuti da:**

- sendvič ploče koje su izrađene u eksperimentalnom radu nemaju potrebnu strukturu (slika 8.18.), tj. poliesterska smola nije podjednako raspoređena s obje strane PUR pjene;
- su neka ispitna tijela koja su izbačena iz razmatranja zbog odstupanja od prvobitno izračunate aritmetičke sredine savojne čvrstoće, zapravo imala željenu strukturu sendvič konstrukcije, te su imala zamjetno veću savojnu čvrstoću;
- na savojnu čvrstoću bitno utječe debljina sloja poliesterske smole.

**U daljnjim ispitivanjima trebalo bi se isprobati:**

- izraditi sendvič ploče s poliesterskom i epoksidnom smolom, te usporediti njihova mehanička svojstva;
- upotrijebiti ojačavalo (staklena vlakna) u izradi sendvič ploča postupkom centrifugalnog lijevanja, te ispitati utjecaj slojeva broja ojačavala na mehanička svojstva;
- usporediti sendvič konstrukcije izrađene postupkom ručnog dodirnog laminiranja, te one postupkom centrifugalnog lijevanja;
- odrediti potrebno vrijeme vrtnje kalupa uređaja za centrifugalno lijevanje kako bi se završio postupak polimerizacije smole;
- odrediti optimalni omjer smole i umreživala u smjesi koja se ulijeva u kalup uređaja za centrifugalno lijevanje;
- odrediti vrijeme koje je potrebno da izradak ostane u kalupu uređaja za centrifugalno lijevanje, kako ne bi došlo do njegove deformacije.

## Zaključak

Upotreba polimernih materijala u brodogradnji je vrlo zahvalno područje zbog brze i automatizirane izrade, relativno niske cijene proizvodnih postupaka, te neograničenosti oblika i dimenzija. Prednosti brodova izrađenih od polimernih kompozita su jednostavnija izrada, relativno niski troškovi održavanja, mala masa, te ono što je najvažnije, zadovoljavajuća mehanička svojstva (npr. čvrstoća). Podtlačno ulijevanje smole smatra se najboljim postupkom izrade polimernih tvorevina u brodogradnji zbog kvalitete gotovog proizvoda (povoljnog omjera smole i vlakana, zbog kojega posjeduje zavidna mehanička svojstva).

Kako bi se osigurala izrada kvalitetnog kompozita sa potrebnim mehaničkim i uporabnim svojstvima, potrebno je unaprijed isplanirati cijeli proizvodni postupak. Na temelju ispitivanja potrebno je odrediti količinu potrebne smole, vrstu smole, vrstu ojačavala, broj slojeva ojačavala, iznos podtlaka u postupku podtlačnog ulijevanja, vrijeme potrebno za skrućivanje polimerne tvorevine, vrstu i debljinu jezgre u sendvič konstrukciji, itd.

Svojstva trupa broda koji se treba izraditi, kao što su: optimalni oblik i dimenzije (utječu na plovnost), masa i materijal izrade određuju se prije same izrade s CAD / CAM računalnim programima. Na temelju 3D virtualnog modela broda je moguće ispitati utjecaj deformacija i naprezanja na trup broda, te se može postići optimalan oblik.

U eksperimentalnom radu nije dobivena željena struktura izrađenih sendvič ploča zbog istjecanja smole iz kalupa uređaja za centrifugalno lijevanje tijekom vrtnje, koje je uzrokovano oštećenjem poklopca kalupa. Poliesterska smola nije jednoliko raspoređena s obje strane PUR pjene, pa se dobiveni rezultati ispitivanja ne mogu smatrati kao mjerilo za sendvič konstrukcije. Kako bi se izradio sendvič kompozit sa željenom strukturom (s jednolikom raspodjelom poliesterske smole s obje strane PUR pjene) potrebno je odrediti potrebno vrijeme vrtnje kalupa uređaja za centrifugalno lijevanje kako bi se završio postupak polimerizacije smole, te odrediti optimalni omjer smole i umreživala u smjesi koja se ulijeva u kalup uređaja za centrifugalno lijevanje. Također je važno odrediti vrijeme koje je potrebno da izradak ostane u kalupu uređaja za centrifugalno lijevanje, kako ne bi došlo do njegove deformacije.

Obavljeno ispitivanje obuhvaća samo jedno mehaničko svojstvo, te bi za potpunu karakterizaciju sendvič kompozita ispitivanje trebalo biti opsežnije i obuhvatiti ostala mehanička svojstva.

## Literatura:

1. I. Grubišić: Konstrukcija malih brodova, [www.fsb.hr/kmb](http://www.fsb.hr/kmb), 2005.
2. W. Turnšek: Brodogradnja za amatere, Priručnici, Drvogradnja-epoksidi, [www.walterturnsek.t-com.hr](http://www.walterturnsek.t-com.hr), 2009.
3. “Zašto drvo?”, [www.enavigo.hr/hr/zastodrvo.asp](http://www.enavigo.hr/hr/zastodrvo.asp), 2009.
4. I. Juraga, I. Stojanović i T. Noršić: Zaštita brodske trupa od korozije i obraštanja, FSB, UDC 620.193/.197.6:629.5.024, 2007.
5. J. Perić, A. Zamarin i T. Matulja: Proračun elemenata strukture trupa malog putničkog plovila, UDK 629.5.02-036.5:629.5.024:629.5.011, 2007.
6. Croatian Maritime Portal, „Brodarstvo-pomorstvo-more“, [Jadranbrod.com](http://Jadranbrod.com), 2009.
7. W. Kunej: Poliesterski kompoziti, 2. Prošireno izdanje, Zagreb, 2006.
8. [www.sevensea.hr/hrv/awlgrip](http://www.sevensea.hr/hrv/awlgrip), 2009.
9. M. Šercer: Predavanja- Prerada kompozitnih tvorevina, FSB, Zagreb, 2008./2009.
10. Tomislav Filetin: Materijali i tehnološki razvoj, Zagreb, 2002.
11. L. Pomenić: Predavanja – Kompoziti, Materijali i tehnološki postupci, Stručni studij elektrotehnike
12. „Polimerni materijali ojačani vlaknima“ i „Tekstil u visokogradnji“, [www.gradimo.hr](http://www.gradimo.hr), 2009.
13. J. Indof i Đ. Španiček: Primjena sendvič konstrukcija na osnovi polimernih materijala u brodogradnji, FSB, Zagreb, 2004.
14. Printz Adriatic: Ana Pilipović - Fotografije postupak podtlačnog ulijevanja smole, 2009.
15. K. Hlede: Diplomski rad, Polimerni kompoziti za izradu daske za jedrenje, FSB, Zagreb, 2003.
16. H. Kosovec: Diplomski rad, Polimerni kompoziti, FSB, Zagreb, 2002.
17. Composites Materials Technology from Gurit, [www.gurit.com](http://www.gurit.com), 2009.
18. Vacuum Infusion- The Equipment and Process of Resin Infusion, [www.fibreglast.com](http://www.fibreglast.com), 2009.
19. Nautica, [www.nautica.st/index.php?option=com\\_content&task=view&id=167&Itemid=83](http://www.nautica.st/index.php?option=com_content&task=view&id=167&Itemid=83), 2009.
20. FRAM, Controlled vacuum infusion, [www.fram.nl/index.html](http://www.fram.nl/index.html), 2009.
21. F. Veljović, M. Imamović, H. Bajrić: Stručni rad, Agilna proizvodnja u funkciji održavanja sigurnosti i kvalitete, UDK 658.624.018.2, 2006.
22. “Naprave i automatizacija za zavarivanje u srodne tehnike”, [www.sfsb.hr/kth/zavar/zavar/naprave.pdf](http://www.sfsb.hr/kth/zavar/zavar/naprave.pdf), 2007.
23. TŠRB: Mehatronika, [www.tsrb.hr](http://www.tsrb.hr), 2007.

24. Strojarska tehnologija II., FFRI, 2007.
25. Quicksilver Innovations, LLC, Marine Robotic Systems Integration, [www.compositemfg.com](http://www.compositemfg.com), 2010.
26. High-Volume Preforming for Automotive Application, [www.compositesworld.com](http://www.compositesworld.com), 2010.
27. F. Kolonić i J. Matuško: Mehanički CAD, FER, Predavanja, Zagreb 2009.
28. „Reverzibilno inženjerstvo“, „TRITOP“ i „ATOS“, [www.topomatika.com](http://www.topomatika.com), 2009.
29. M. Horvat: Seminarski rad, „3D digitalizacija“, FSB, Zagreb, 2009.
30. M. Šercer i D. Ruljančić: Polimeri, Proizvodnja laminiranih kompozita centrifugalnim lijevanjem, 19 (8 - 12) 202 – 204 (1998)
31. A. Lončar, D. Vojvodić, F. Matejiček i V. Jerolimov: Savojna čvrstoća materijala za izradbu proteznih baza, Acta Stomatol Croat. 2006; 40(2) : 151 – 61
32. Wikipedija, [http://hr.wikipedia.org/wiki/Glavna\\_stranica](http://hr.wikipedia.org/wiki/Glavna_stranica)