

# Izrada kompozitne tvorevine postupkom LRTM

---

**Mišura, Ivan**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2015**

*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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:538311>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-09**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Ivan Mišura**

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

doc. dr. sc. Ana Pilipović

Student:

Ivan Mišura

Zagreb, 2015.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum: 26 - 11 - 2015	Prilog
Klasa: 602-04/15-6/3	
Ur.broj: 15-170-15-433	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Ivan Mišura**

Mat. br.: 0035165802

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Izrada kompozitne tvorevine postupkom LRTM**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Production of composite product with LRTM**

Opis zadatka:

Polimerni kompoziti u industriji se primjenjuju više od pedeset godina. Prva primjena zabilježena je u maloj brodogradnji, a kasnije se proširila na ostala transportna sredstva i ostale industrijske primjene. Mnogobrojna odlična svojstva ovih materijala, niski troškovi te jednostavnost proizvodnje uvjetovali su veliko širenje područja njihove primjene.

Kompozitni materijali su kombinacija dva ili više materijala različitih svojstava koji daju materijal takvih svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe. Uz razvoj novih materijala razvili su se i novi postupci prerade. Novi postupak LRTM (Lako injekcijsko-posredno prešanje kapljevine smole s uloženim trodimenzionalnim predoblikom, e. *Light Resin Transfer Moulding*) sličan je postupku RTM uz najbitniju prednost da se gornja polovica kalupa izrađuje od bitno lakših materijala nego donja polovica kalupa, te je sila držanja kalupa ostvarena podtlakom, a ne mehanički.

U radu je potrebno opisati najnovije stanje na području primjene polimernih kompozita te opisati skupinu podtlakanih postupaka izrade kompozitnih tvorevina. Također je potrebno navesti prednosti i nedostatke postupka LRTM. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je izraditi kompozitnu tvorevinu postupkom LRTM s različitim vrstama predobljaka.

Zadatak zadan:

24. rujna 2015.

Rok predaje rada:

26. studenog 2015.

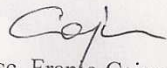
Predviđeni datum obrane:

2., 3. i 4. prosinca 2015.

Zadatak zadao:

Ana Pilipović  
Doc. dr. sc. Ana Pilipović

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Franjo Cajner

# Zahvala

Zahvalio bih se doc. dr. sc. Ani Pilipović, djelatnici *Katedre za preradu polimera i drva* na *Zavodu za tehnologiju*, na mentorstvu, pomoći te korisnim i pametnim savjetima koje mi je pružila tijekom izrade ovoga rada.

Zahvaljujem se ocu i majci za svu potporu i strpljenje tijekom svih godina studija.

Zahvaljujem se i svima onima koji su na bilo koji način pridonijeli uspješnom završetku studija.

## **Izjava**

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija na *Fakultetu strojarstva i brodogradnje* i navedenu literaturu.

Ivan Mišura

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ .....	i
POPIS SLIKA .....	iii
POPIS TABLICA.....	vi
POPIS OZNAKA I MJERNIH VELIČINA FIZIKALNIH OZNAKA .....	vii
POPIS KRATICA .....	viii
SAŽETAK.....	xii
SUMMARY .....	xiii
1. UVOD .....	1
2. KOMPOZITNI MATERIJALI .....	3
2.1. Definicija, podjela, svojstva i primjena .....	3
2.2. Česticama ojačani kompoziti.....	8
2.3. Vlaknima ojačani kompoziti.....	10
2.3.1. Podjela vlakana na osnovi promjera .....	12
2.3.2. Svojstva kompozita ojačanog vlaknima.....	14
2.3.3. Oblici vlakana .....	17
2.3.4. Materijali vlakana .....	19
2.3.4.1. Staklenim vlaknima ojačani polimerni kompoziti .....	21
2.3.4.2. Ugljičnim vlaknima ojačani polimerni kompoziti .....	22
2.3.4.3. Aramidnim vlaknima ojačani polimerni kompoziti .....	23
2.3.4.4. Ostali vlaknasti materijali za ojačavanje (B, SiC, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ).....	25
2.3.5. Matrice .....	25
2.3.5.1. Polimerne matrice – polimerni kompozit (PMC).....	27
2.3.5.1.1. Duromerne matrice – epoksidne (EP) i poliesterske (UP) smole.....	29
2.3.5.1.2. Plastomerne matrice – polipropilen (PP), poli(fenilen-sulfid) (PPS) i poli(eter-imid) (PEI) .....	30
2.3.6. Proizvodnja vlaknima ojačanih kompozita.....	31

2.3.6.1.	Postupci proizvodnje s otvorenim kalupom .....	32
2.3.6.1.1.	Dodirni postupak laminiranja – ručno polaganje .....	32
2.3.6.1.2.	Oblikovanje naštrcavanjem .....	33
2.3.6.1.3.	Namotavanje .....	34
2.3.6.1.4.	Pultrudiranje .....	36
2.3.6.2.	Postupci proizvodnje sa zatvorenim kalupom.....	37
2.3.6.2.1.	Izravno prešanje.....	37
2.3.6.2.2.	Injekcijsko prešanje .....	38
2.3.6.2.3.	Umreživanje u autoklavu.....	39
2.4.	Strukturni kompoziti.....	40
2.4.1.	Laminati (slojeviti kompozitni materijali).....	40
2.4.2.	Sendvič konstrukcije.....	41
2.5.	Ugljik-ugljik kompoziti (C/C).....	44
2.6.	Hibridni kompoziti.....	45
3.	LIGHT RTM (LRTM - LAKO PODTLAČNO INJEKCIJSKO PREŠANJE KAPLJEVITE SMOLE S ULOŽENIM TRODIMENZIONALNIM OJAČAVAJUĆIM PREDOBLIKOM).....	47
3.1.	Oprema .....	48
3.2.	Opis postupka LRTM .....	52
3.3.	Prednosti i nedostaci postupka LRTM .....	57
4.	EKSPERIMENTALNI RAD .....	60
4.1.	Uvod .....	60
4.2.	Svojstva smole i umreživala/katalizatora, dimenzije kalupa i materijala ojačavala (dimenzije kroja) i ostalih upotrebljenih sredstava.....	60
4.3.	Faze postupka LRTM .....	68
4.4.	Usporedba mjerenja debljine stijenki dvaju proizvoda .....	83
5.	ZAKLJUČAK .....	85
6.	LITERATURA.....	87



**POPIS SLIKA**

Slika 2.1. Faktori koji utječu na svojstva kompozita [4].....	4
Slika 2.2. Usporedba specifičnog modula elastičnosti i specifične čvrstoće nekih metala i kompozita [2] .....	6
Slika 2.3. Usporedba osnovnih tipova kompozita prema obliku ojačavala: (a) kompozit s česticama, (b) kompozit s vlaknima, (c) slojeviti kompozit [3].....	6
Slika 2.4. Vrste kompozita prema materijalu matrice i obliku ojačavala [4].....	7
Slika 2.5. Primjena kompozita u različitim industrijama [4] .....	7
Slika 2.6. Primjer metalnog matričnog kompozita s česticama – dio kočionog sustava automobila [6] .....	9
Slika 2.7. Brusna ploča [6] .....	10
Slika 2.8. Pločice za obradu metala rezanjem [6] .....	10
Slika 2.9. Svojstva materijala matrice i vlakna pojedinačno te kompozita u cjelini [6] .....	11
Slika 2.10. Orijehtacija vlakana u matrici [5] .....	12
Slika 2.11. $Al_{18}B_4O_{33}$ viskeri [4].....	13
Slika 2.12. Legura Ag-Cu ojačana s ugljičnim vlaknima [4].....	13
Slika 2.13. Žicom ojačana cijev [4].....	14
Slika 2.14. Utjecaj volumnog udjela vlakana na rasteznu čvrstoću ( $R_m$ ) i modul rasteznosti ( $E_r$ ) kompozita [4] .....	15
Slika 2.15. Različiti načini rasporeda vlaknastih ojačala: (a) kontinuirana jednosmjerna vlakna; b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna; c) ortogonalno raspoređena vlakna; d) višesmjerno usmjerena vlakna [4].....	15
Slika 2.16. Svojstva vlakana: (a) krivulja "naprežanje-istezanje", (b) usporedba specifične čvrstoće i specifičnog modula elastičnosti metala i nekih vlakana [2] .....	16
Slika 2.17. Polazni oblici vlakana: a) svitak niti; b) kratka sjeckana vlakna; c) tkanina; d) roving; e) mat [3, 8, 9] .....	17
Slika 2.18. Osnovne vrste tkanja vlakana [3].....	18
Slika 2.19. Podjela, prednosti i nedostaci matrica (kompozita) različitih materijala [4] .....	27
Slika 2.20. Vrijednost rastezne čvrstoće i modula elastičnosti različitih vrsta matrica [3].....	28
Slika 2.21. Proizvodnja kompozita laminiranjem [6] .....	33
Slika 2.22. Shematski prikaz naštrcavanja [3] .....	34
Slika 2.23. Prikaz vijčanog, prstenastog (obodnog), polarnog namotavanja te namotavanja paralelno s osi jezgre [3, 7] .....	35

Slika 2.24. Shematski prikaz postupka pultrudiranja [2] .....	36
Slika 2.25. Shematski prikaz umreživanja u autoklavu (a) i izgled stvarnog autoklava (b) [3] .....	39
Slika 2.26. Struktura laminata s različitim smjerovima polaganja vlakna u slojevima; a) jednosmjerno polaganje; b) višesmjerno polaganje [3].....	41
Slika 2.27. Izgled saćastih jezgri od aluminijske (a) i Nomexa (b) [3] .....	42
Slika 2.28. Kompozitni sendvič s jezgrom u obliku pčelinjeg saća [3] .....	43
Slika 2.29. Shematski prikaz izrade saćastih aluminijskih jezgri profiliranjem [6].....	43
Slika 2.30. Postupci proizvodnje C/C kompozita [3].....	45
Slika 2.31. Vrste vlakana i načini slaganja tih vlakana u matrici hibridnih kompozita [6] .....	46
Slika 3.1. Glavni dijelovi opreme potrebni za LRTM postupak [12] .....	48
Slika 3.2. Dijelovi opreme za postupak LRTM [12].....	49
Slika 3.3. Detaljniji prikaz nekih dijelova i postupaka [14].....	51
Slika 3.4. Donji dio kalupa i odušnik za zrak [12] .....	52
Slika 3.5. Gornja i donja polovica kalupa i ostali dijelovi opreme [12].....	52
Slika 3.6. Prvi korak postupka LRTM [12].....	53
Slika 3.7. Drugi korak postupka LRTM [12] .....	53
Slika 3.8. Treći korak postupka LRTM [12].....	54
Slika 3.9. Četvrti korak postupka LRTM – početak popunjavanja kalupa smolom [12].....	55
Slika 3.10. Četvrti korak postupka LRTM - popunjavanje kalupa smolom sve dok ne dođe u posudu za odvod smole [12] .....	55
Slika 3.11. Peti korak postupka LRTM [12] .....	56
Slika 3.12. Šesti korak postupka LRTM [12].....	56
Slika 3.13. Primjena postupka LRTM u brodogradnji [15] .....	57
Slika 3.14. Greške na kompozitnoj tvorevini nakon provedenog postupka LRTM - mjesta neispunjena smolom .....	58
Slika 3.15. Greške na kompozitnoj tvorevini nakon provedenog postupka LRTM - grananje mjehurića zraka (pogled na cijeli proizvod).....	59
Slika 3.16. Greške na kompozitnoj tvorevini nakon provedenog postupka LRTM - grananje mjehurića zraka (uvećano mjesto).....	59
Slika 4.1. Dimenzije kalupa .....	63
Slika 4.2. Dimenzije kroja.....	64
Slika 4.3. Izgled trodimenzionalnog predoblika: a) prije rezanja; b) s uvećanim dijelom.....	65
Slika 4.4. Mat - određivanje dimenzija kroja: a) prije rezanja; b) poslije rezanja .....	66

Slika 4.5. Odvajalo <i>FLEX - Z 5.0</i> .....	67
Slika 4.6. Ljepilo (adheziv) za povezivanje slojeva ojačavala.....	68
Slika 4.7. Gornja polovica kalupa: mjesta i površine premazane odvajalom .....	70
Slika 4.8. Donja polovica kalupa: mjesta i površine premazane odvajalom .....	70
Slika 4.9. Posuda za odvod smole i mjesta premazivanja odvajalom .....	71
Slika 4.10. Položeni predoblik i dva sloja mata u kalupnu šupljinu donje polovice kalupa .....	72
Slika 4.11. Spajanje polovica kalupa .....	73
Slika 4.12. Spojena oprema prije miješanja smole.....	74
Slika 4.13. Miješanje smole i umreživala/katalizatora.....	75
Slika 4.14. Smjerovi i redoslijed popunjavanja kalupa smolom .....	76
Slika 4.15. Smola s mjehurićima zraka u posudi .....	77
Slika 4.16. Gašenje pumpe i ostavljanje smole da potpuno umreži kroz 24 sata.....	78
Slika 4.17. Uklanjanje crijeva, posude za odvod smole i otvaranje kalupa .....	79
Slika 4.18. Očišćena posuda za odvod smole, poklopac, ventil i višak umrežene smole iz posude .....	79
Slika 4.19. Kompozitna tvorevina u donjoj polovici kalupa prije vađenja .....	80
Slika 4.20. Gotova kompozitna tvorevina: a) prednji pogled; b) stražnji pogled .....	81
Slika 4.21. Mjehurići zraka unutar tvorevine .....	82
Slika 4.22. Smjer grananja mjehurića zraka unutar tvorevine .....	83

**POPIS TABLICA**

Tablica 2.1. Usporedna svojstva materijala [4].....	5
Tablica 2.2. Svojstva kontinuiranih jednosmjernih staklenim, ugljičnim i aramidnim vlaknima ojačanih epoksidnih kompozita u uzdužnom i poprečnom smjeru (u svim slučajevima volumni udio vlakana iznosi 0,60) [2].....	20
Tablica 2.3. Prednosti i nedostaci vlakana [4] .....	20
Tablica 2.4. Tipična svojstva različitih vrsta staklenih vlakana [10] .....	21
Tablica 2.5. Neka svojstva aramidnih vlakana [7, 10] .....	24
Tablica 2.6. Mehanička svojstva materijala matrice [6] .....	26
Tablica 2.7. Svojstva hibridnih kompozita [3] .....	46
Tablica 4.1. Svojstva kapljevite smole [17] .....	61
Tablica 4.2. Svojstva umrežene smole [17] .....	61
Tablica 4.3. Usporedba proizvoda 1 i proizvoda 2 .....	84

**POPIS OZNAKA I MJERNIH VELIČINA FIZIKALNIH OZNAKA**

Oznaka ili kratica	Jedinica	Naziv veličine ili značenje kratice
$\alpha$ ( $CTE$ )	$[10^{-6}/K]$	koeficijent linearnog toplinskog rastezanja
$c$	$[%]$	koncentracija
$d$	$[\mu m]$	promjer vlakana
$D$	$[mm]$	duljina
$\varepsilon$	$[mm/mm, %]$	stupanj deformacije, istežanje
$\varepsilon_p$	$[mm/mm, %]$	prekidno istežanje
$E$ ( $E_r$ )	$[N/mm^2, GPa]$	modul elastičnosti, rastežnosti (Youngov modul)
$G$	$[GPa]$	modul smičnosti
$h_{pr}$	$[mm]$	debljina predoblika
$h_{ma}$	$[mm]$	debljina mata
$h_{uko}$	$[mm]$	ukupna debljina ojačavala
$h_{kt}$	$[mm]$	debljina stijenke kompozitne tvorevine
$h_{kt,sr}$	$[mm]$	srednja vrijednost (aritmetička sredina)
$n$		broj uzoraka mjerenja
$p$	$[bar, Pa, mmHg]$	tlak
$\rho$	$[kg/m^3]$	gustoća
$R_r$	$[N/mm^2, MPa]$	granica tečenja (razvlačenja)
$R_m$	$[N/mm^2, MPa]$	rastežna čvrstoća
$R$	$[mm]$	polumjer
$S$	$[mm]$	standardno odstupanje
$\check{S}$	$[mm]$	širina
$T$	$[^{\circ}C, K]$	temperatura
$T_g$	$[^{\circ}C, K]$	temperatura staklišta
$T_t$	$[^{\circ}C, K]$	temperatura tališta
$V_p$	$[%]$	volumni udio vlakana
$V$	$[mm]$	visina

**POPIS KRATICA**

ARALL	metalni laminat ojačan aramidnim vlaknima (e. <i>ARamid-ALuminum Laminate</i> )
A-staklo	visokoalkalno staklo
ABS	akrilonitril/butadien/stiren
Ag	srebro
Al	aluminij
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	aluminijev oksid
Al <sub>18</sub> B <sub>4</sub> O <sub>33</sub>	aluminijev borid
ASTM	Američko društvo za ispitivanje i materijale (e. <i>American Society for Testing and Materials</i> )
BMC	vlaknasti preprezi (e. <i>Bulk Moulding Compound</i> )
BS	butadien/stiren
BMI	bizmaleimid
B	bor
Ba <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	borov oksid
B <sub>4</sub> C	borov karbid
BN	borov nitrid
Barcol	test tvrdoće materijala
CMC	kompozit s keramičkom matricom (e. <i>Ceramic Matrix Composite</i> )
C/C	ugljik/ugljik kompozit
CVD	kemijsko prevlačenje iz parne faze (e. <i>Chemical Vapor Deposition</i> )
CVI	kemijska infiltracija iz parne faze (e. <i>Chemical Vapor Infiltration</i> )
C	ugljik
Ca	kalcij
Co	kobalt
Cu	bakar
Cu <sub>2</sub> O	bakrov oksid
CaCO <sub>3</sub>	kalcijev karbonat
DMO	izravna oksidacija metala (e. <i>Direct Metal Oxidation</i> )
E-staklo	električna klasa stakla
ECR-staklo	kemijski-otporno-modificirano E-staklo
EP	epoksidna smola
FAA	Savezna uprava za civilno zrakoplovstvo (e. <i>Federal Aviation Administration</i> )

GLARE	metalni laminat ojačan staklenim vlaknima (e. <i>GLAss-REinforced fibre metal laminate</i> )
GMT	staklenim matom ojačani plastomer (nj. <i>Glassmatenverstärkte Termoplaste</i> )
HM	visoki modul elastičnosti (e. <i>High Modulus of elasticity</i> )
HS	visoka čvrstoća (e. <i>High Strength</i> )
HIP	vruće izostatičko prešanje
HP	vruće prešanje
Hg	živa
HDT	temperatura postojanosti oblika (e. <i>Heat Deflection Temperature</i> )
IM	srednji ili prijelazni modul elastičnosti (e. <i>Intermediate Modulus of elasticity</i> )
ISO	Međunarodna organizacija za standardizaciju (e. <i>International Organisation for Standardization</i> )
LM	niski modul elastičnosti (e. <i>Low Modulus of elasticity</i> )
LRTM	lako injekcijsko-posredno prešanje kapljevite smole s uloženim trodimenzionalnim predoblikom (e. <i>Light Resin Transfer Molding</i> )
Li	litij
MMC	kompozit s metalnom matricom (e. <i>Metal Matrix Composite</i> )
Mg	magnezij
Mo	molibden
MgO	magnezijev oksid
MEKP	metil-etil-keton-peroksid
PMC	kompozit s polimernom matricom (e. <i>Polymer Matrix Composite</i> )
PREPREG	tkanine ili snopovi vlakana impregnirani polimernim materijalom u jednom ili više slojeva (e. <i>PREimPREGnated</i> )
PAN	poliakrilonitril
PC	polikarbonat
PE	polietilen
PP	polipropilen
PI	poliimid
PS	polistiren
PAI	poliamid imid
PEEK	poli(eter-eter-keton)
PEI	poli(eter-imid)
PPS	poli(fenilen-sulfid)

PSU	polisulfon
PUR	poliuretan
PVC	poli(vinil-klorid)
PIP	infiltracija polimera i piroliza
RPs	ojačana plastika (e. <i>Reinforced Plastics</i> )
RTM	injekcijsko-posredno prešanje kapljevite smole s uloženim trodimenzionalnim predoblikom (e. <i>Resin Transfer Molding</i> )
RRIM	reakcijsko injekcijsko prešanje kompozita (e. <i>RRIM – Reinforced Reaction Injection Moulding</i> )
RI	podtlačno ulijevanje (e. <i>RI – Resin Infusion</i> )
RFI	podtlačno ulijevanje s filmom (e. <i>RFI – Resin Film Infusion</i> )
S-staklo	staklo visoke čvrstoće
SMC	osmoljeni list (pločasti prepreg) (e. <i>SMC – Sheet Moulding Compound</i> )
SM	standardni modul elastičnosti (e. <i>Standard Modulus of elasticity</i> )
SRIM	reakcijsko injekcijsko prešanje integralnih pjenastih duromernih otpresaka s predoblikovanim ojačavalom (e. <i>SRIM – Structural Reaction Injection Moulding</i> )
SCRIMP	podtlačno ulijevanje Seeman (e. <i>SCRIMP – Seeman Composite Resin Infusion Molding</i> )
SMARTM	injekcijsko posredno prešanje kapljevite smole sa savitljivom dijafragmom i krutim postoljem (e. <i>SMARTM – Supported Mould Assisted Resin Transfer Moulding</i> )
Si	silicij
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	silicijev nitrid
SiO <sub>2</sub>	silicijev dioksid
SiC	silicijev karbid
SiO <sub>2</sub>	silicijev dioksid
TMC	debeli pločasti osmoljeni listovi (e. <i>Thick Moulding Compound</i> )
Ti	titanij
TiB <sub>2</sub>	titanijev borid
Ti-6Al-4V	titanova legura
URPs	neojačana plastika (e. <i>Unreinforced Plastics</i> )
UHM	vrlo visoki modul elastičnosti (e. <i>Ultra High Modulus of elasticity</i> )
UP	poliesterska smola



VARTM	podtlačno injekcijsko prešanje kapljevite smole s uložnim trodimenzionalnim predoblikom (e. <i>VARTM – Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding</i> )
VRTM	podtlačno injekcijsko prešanje kapljevite smole s uložnim trodimenzionalnim predoblikom (e. <i>Vacuum Resin Transfer Moulding</i> )
VI	podtlačnog injekcijskog prešanja (e. <i>VI – Vacuum Infusion</i> )
W	volfram
ZrO <sub>2</sub>	cirkonijev oksid

## SAŽETAK

U ovom radu opisani su kompozitni materijali i postupci proizvodnje kompozitnih tvorevina, gdje je detaljno opisan postupak lako podtlačno injekcijsko-posredno prešanje kapljevite smole s uložnim trodimenzionalnim ojačavajućim predoblikom, e. *Light Resin Transfer Moulding*, kao modifikacija dosadašnjeg RTM-a.

U opisu kompozitnih materijala riječ je o njihovoj definiciji, podjelama, svojstvima i primjeni. Opisani su česticama ojačani kompoziti, no naglasak je stavljen na vlaknima ojačane kompozite (svojstva, oblici vlakana, materijali vlakana, matrice – funkcija, svojstva, podjela, materijali, prednosti i nedostaci) i postupke proizvodnje vlaknima ojačanih kompozita (postupci proizvodnje s otvorenim i zatvorenim kalupom). Pod kompozitne materijale pripadaju još strukturni kompoziti (laminati i sendvič konstrukcije), ugljik/ugljik (C/C) kompoziti te hibridni kompoziti.

Pri opisu postupka lakog podtlačnog injekcijskog-posrednog prešanja kapljevite smole s uložnim trodimenzionalnim ojačavajućim predoblikom – LRTM, riječ je o definiciji, primjeni, opremi, opisu postupka, te prednostima i nedostacima.

U eksperimentalnom dijelu rada opisana je proizvodnja kompozitne tvorevine pomoću postupka LRTM kroz šest koraka. Opisuju se glavna i pomoćna oprema, materijali (ojačavalo i smola), kemijska sredstva, kako se pomoću dimenzija kalupa oblikuje kraj ojačavala, vremenski interval potreban da smola ispuni kalupnu šupljinu prije nego očvrsne, itd. Nakon postupka proizvodnje, debljina stijenke kompozitne tvorevine (proizvod 2) uspoređuje se s prethodnom kompozitnom tvorevinom (proizvod 1).

Ključne riječi: kompozitni materijali; lako podtlačno injekcijsko prešanje kapljevite smole s trodimenzionalnim ojačavajućim predoblikom.

## SUMMARY

In this work there is a description of composite materials and methods of manufacturing composite products with accent in detail on light resin transfer moulding as a modification of the former resin transfer moulding process.

In description of composite materials, it's about definitions, classifications, properties and applications. Particle reinforced composites are described, but accent is on fibre reinforced composite (properties, fibre forms, fibre materials, matrixes – function, classification, materials, advantages and disadvantages) and production processes for fibre reinforced composites (production processes with open and closed mould). Structural composites (laminates and sandwich panels), carbon/carbon (C/C) composites and hibrid composites are also part of composite materials.

Light resin transfer moulding – LRTM is described through definition, application, equipment, process description, advantages and disadvantages.

In experimental part of this work, LRTM proces is described in six steps through which production of a composite product is given. Main and assistant equipment, material used as a reinforcement, chemicals, how reinforcement is being formed using mould dimensions, time interval in which resin must be vacuumed into the mould before gel phase occurs and other is described. After composite product production is over, thickness of both composite products (Product 1 and Product 2) are measured and compared.

Key words: composite materials; light resin transfer moulding

## 1. UVOD

Teško je zamisliti moderni svijet bez neojačane plastike (e. *URPs - Unreinforced Plastics*) i ojačane plastike (e. *RPs - Reinforced Plastics*). Danas su sastavni dio svačijeg životnog stila, s proizvodima koji se kreću u rasponu od proizvoda široke potrošnje do složenih znanstvenih proizvoda. Zapravo, mnoga tehnička čuda, koja uzimamo zdravo za gotovo, bila bi nemoguća bez tih svestranih i ekonomičnih materijala. [1]

Pojam kompozit počeo se upotrebljavati 1940-tih godina u industriji ojačane plastike. Prema definiciji kompoziti su kombinacija dvaju ili više materijala s takvim svojstvima koja svaki materijal zasebno ne posjeduje i ponašaju se kao jedan materijal. Time se mogu postići neobične i neobičajene kombinacije svojstava kao što su krutost, čvrstoća, masa, ponašanje pri visokim temperaturama, kemijska postojanost (antikorozivnost), tvrdoća ili vodljivost (električna ili toplinska). [1, 2]

Priroda je načinila prvi kompozit. Drvo je kompozit vlakana celuloze koje zajedno drži ligninska matrica. Većina sedimentnih stijena (kamena) su kompoziti od čestica vezanih prirodnim cementom. Mnogo je metalnih legura zapravo kompozit iz nekoliko različitih konstituenata (sastojaka). Na makro skali to su sve homogeni materijali. Jedan od primjera kompozita su armirani beton i medicinske pilule i ostalo što uključuje ojačanu plastiku. [1]

Kompozitni materijali sastoje se od matrice i ojačavala. Mogu biti: metalno-metalni, metalno-keramički, metalno-polimerni, keramičko-polimerni, keramičko-keramički, polimerno-polimerni, polimerno-metalni, tj. temeljna podjela je na metalne, polimerne i keramičke kompozite. Daljni opis kompozitnih materijala, njihovu podjelu, svojstva, prednosti i nedostatke, te upotrebu u današnjem svijetu može se vidjeti u narednim poglavljima. [1, 2]

U ovom radu opisan je postupak oblikovanja kompozitnih tvorevina: LRTM (e. *Light Resin Transfer Moulding* – lako podtlačno injekcijsko prešanje kapljevite smole s ojačavajućim trodimenzionalnim predoblikom). Glavni pojam koji opisuje ovaj postupak je taj što se kompozit oblikuje podtlakom, iako se LRTM postupku može primjeniti i predtlak. Kod LRTM postupka upotrebljavaju se dvije polovice kalupa koje se zajedno spajaju te ga to klasificira u postupke zatvorenog kalupa. Specifičnost postupka je da se polovice kalupa rade

od različitog materijala, odnosno gornja polovica kalupa može biti načinjena od lakših materijala po čemu je i postupak dobio ime.

U eksperimentalnom dijelu rada objašnjava se LRTM postupak proizvodnje kompozitne tvorevine koja ima kao ojačavalo trodimenzionalni predoblik i dva sloja mata. Oba sloja mata i trodimenzionalni predoblik su napravljeni iz staklenih vlakana. Na kraju se mjeri i uspoređuje debljina kompozitnih tvorevina, tj. one koja ima kao ojačavalo samo trodimenzionalni predoblik i one koja osim trodimenzionalnog predoblika ima i dva sloja mata.

## 2. KOMPOZITNIMATERIJALI

### 2.1. Definicija, podjela, svojstva i primjena

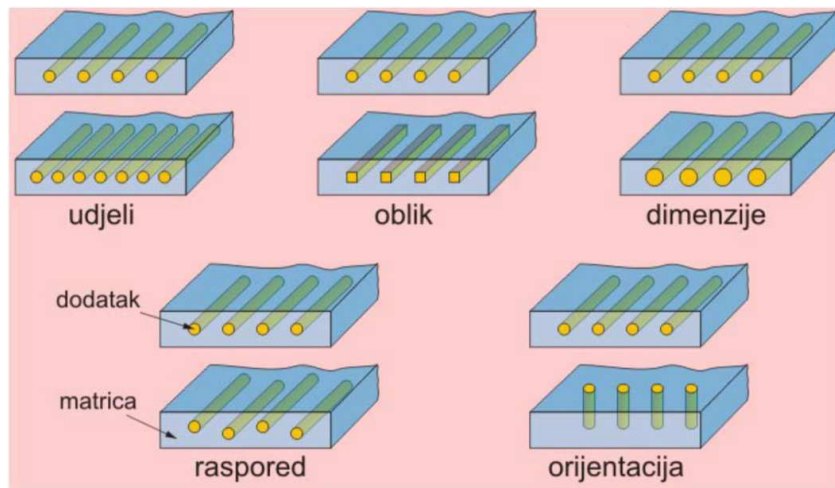
Kompozitni materijali ili ukratko kompoziti proizvedeni su umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava s ciljem dobivanja materijala takvih svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe. Tim putem mogu se postići neobične, odnosno kod drugih materijala neuobičajene kombinacije svojstava, kao što su krutost, čvrstoća, masa, ponašanje pri visokim temperaturama, kemijska postojanost (antikoroziivnost), tvrdoća ili vodljivost (električna i toplinska). Dakle, kompoziti su umjetno proizvedeni višefazni materijali koji imaju željenu kombinaciju najboljih svojstava konstitutivnih faza. [2]

U odnosu prema "tradicionalnim" materijalima kompoziti (naročito polimerni kompoziti) iskazuju brojne prednosti, kao što su: [3]

- postojanost na koroziju
- mala gustoća i mala masa
- povoljan odnos čvrstoće i gustoće (specifična čvrstoća)
- povoljan odnos modula elastičnosti i gustoće (specifična krutost)
- mogućnost proizvodnje dijelova složenog oblika
- jednostavno i jeftino održavanje
- dulji vijek trajanja
- mogućnost "projektiranja" strukture i svojstava.

Svaki kompozitni materijal u osnovi sadrži matricu i ojačavalo (drugu fazu). Stoga su ukupna svojstva kompozita određena sljedećim utjecajnim faktorima (slika 2.1): [3]

- svojstvima materijala matrice i ojačavala
- veličinom i rasporedom (raspodjelom) konstituenata
- volumnim udjelom konstituenata
- oblikom konstituenata
- prirodom i jakošću veza među konstituentima.



Slika 2.1. Faktori koji utječu na svojstva kompozita[4]

Funkcija matrice je da: [4]

- drži ojačavala zajedno
- štiti ih od vanjskih utjecaja
- ima važnu funkciju u prijenosu opterećenja na ojačavalo
- daje vanjsku formu kompozitu
- određuje njegova svojstva s obzirom na djelovanje atmosfere, itd.

Funkcija ojačavala je da budu nosivi element kompozita, tj. da osiguraju: [5]

- visoku čvrstoću
- visoki modul elastičnosti – krutost
- otpornost na trošenje.

Podjela kompozita najčešća je obzirom na:

- materijal matrice
- oblik ojačavala.

Prema vrsti materijala matrica može biti polimerna (polimerni kompoziti – PMC – e. *Polymer Matrix Composite*), metalna (metalni kompoziti – MMC – e. *Metal Matrix Composite*) i keramička (keramički kompoziti – CMC – e. *Ceramic Matrix Composite*). [3]

Prema vrsti materijala matrice slijedi temeljna podjela kompozita na polimerne, metalne i keramičke kompozite. [2]

Općenito, metali i polimeri rabe se kao materijali matrice da bi se ostvarila tražena duktilnost. U pravilu se kod kompozita s metalnom matricom s dodacima smanjuju trajne deformacije pri višim temperaturama, a kod kompozita s polimernom matricom povišuje čvrstoća i krutost. Keramičke matrice se dodatno ojačavaju radi poboljšanja lomne žilavosti. Danas se javlja i nova skupina kompozitnih materijala, a riječ je o ugljik/ugljik kompozitima načinjenima ulaganjem ugljičnih vlakana u piroliziranu ugljičnu matricu. Nadalje, značajni su i hibridni kompoziti koji sadrže ojačanje od barem dvije vrste različitih vlakana. [6]

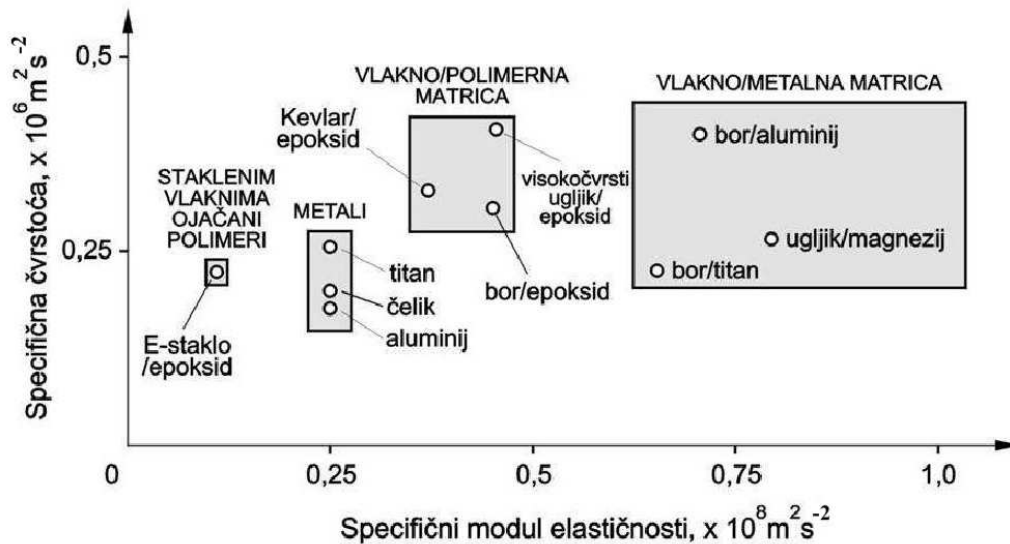
Svojstva materijala koji se upotrebljavaju za matrice kompozita prikazuje tablica 2.1.

Tablica 2.1. Usporedna svojstva materijala [4]

Svojstva	Metali	Polimeri	Keramika
Gustoća ( $\text{Mgm}^{-3}$ )	2-16	1-2	2-17
Talište ( $^{\circ}\text{C}$ )	200-3500	70-200	2000-4000
Toplinska provodljivost	visoka	niska	srednja
Toplinska rastezljivost	srednja	visoka	niska
Specifični toplinski kapacitet	nizak	srednji	visok
Električna vodljivost	visoka	vrlo niska	vrlo niska
Rastezna čvrstoća (MPa)	100-2500	30-300	10-400
Modul elastičnosti (GPa)	40-4000	0,7-3,5	150-450
Tvrdoća	srednja	niska	visoka
Postojanost na koroziju	srednja -slaba	dobra -srednja	dobra

Na slici 2.2 uspoređeni su specifični moduli elastičnosti i specifične čvrstoće nekih metala i kompozita.



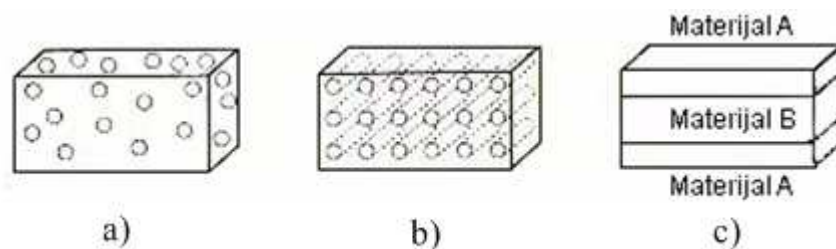


Slika 2.2. Usporedba specifičnog modula elastičnosti i specifične čvrstoće nekih metala i kompozita [2]

Prema obliku ojačavala razlikuju se (slika 2.3): [3]

- kompoziti s česticama
- vlaknima ojačani kompoziti
- slojeviti kompoziti (laminati)
- sendvič kompoziti (kompozitne sendvič konstrukcije).

Slojevite kompozite i sendvič konstrukcije moglo bi se nazvati "strukturnim kompozitima".[2]



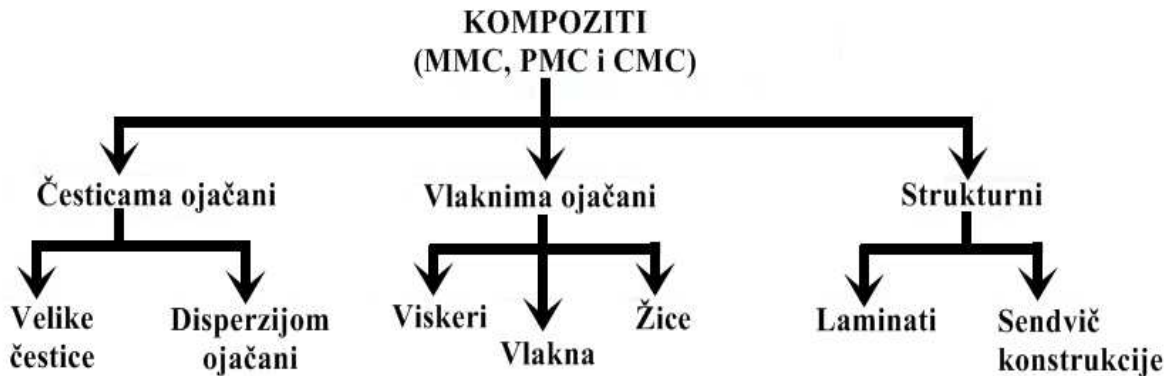
Slika 2.3. Usporedba osnovnih tipova kompozita prema obliku ojačavala: (a) kompozit s česticama, (b) kompozit s vlaknima, (c) slojeviti kompozit[3]

Osim prema obliku ojačavala (pogotovo kod polimernih kompozita), kompozitni materijali mogu se podijeliti prema materijalu ojačavala na: [2]

- staklenim vlaknima ojačani polimerni kompoziti
- ugljičnim vlaknima ojačani polimerni kompoziti

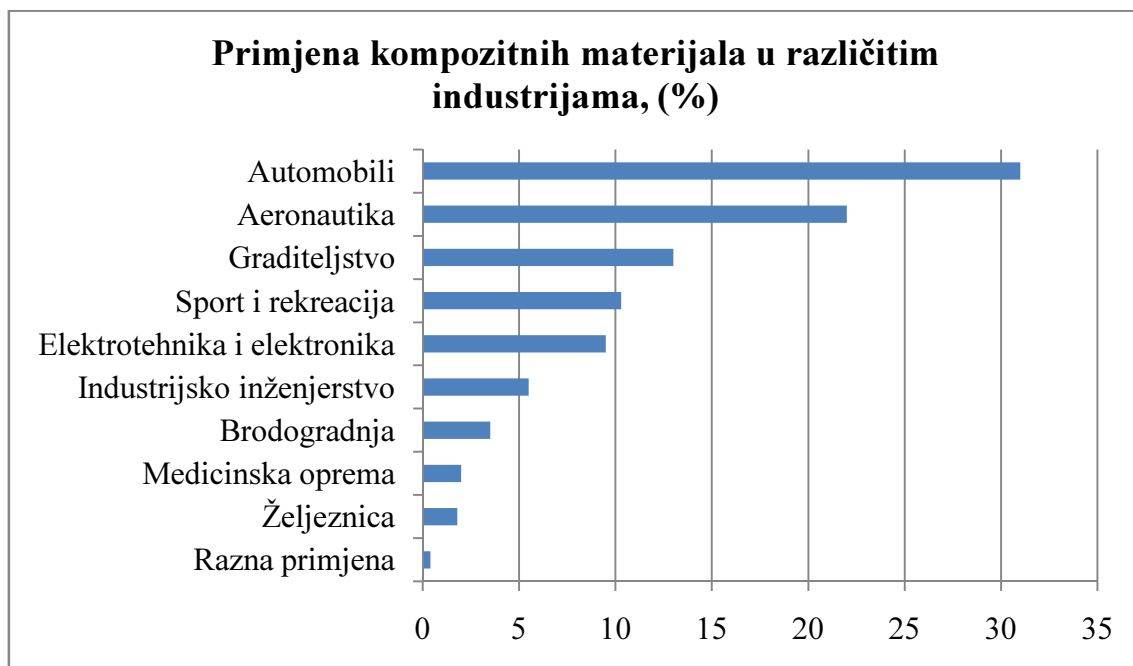
- aramidnim vlaknima ojačani polimerni kompoziti
- ostali vlaknasti materijali za ojačanje (B, SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

Slika 2.4 pokazuje vrste kompozita prema materijalu matrice i obliku ojačavala. [4]



Slika 2.4. Vrste kompozita prema materijalu matrice i obliku ojačavala [4]

Primjena kompozitnih materijala od prije desetak godina u različitim industrijama može se vidjeti na slici 2.5. Najveća primjena kompozitnih materijala je u automobilima, aeronautici, graditeljstvu, onda slijedi u sportu i rekreaciji, elektrotehnici i elektronici, industrijskom inženjerstvu, brodogradnji, a najmanje u medicinskoj opremi i željeznici.



Slika 2.5. Primjena kompozita u različitim industrijama [4]

## 2.2. Česticama ojačani kompoziti

Obzirom na veličinu čestica i način na koji čestice utječu na svojstva kompozita, kompoziti s česticama dijele se na dvije velike skupine: [2]

- kompozite s disperzijom
- kompozite s velikim česticama.

Kriterij za uočavanje razlike između jedne i druge skupine je prema promjeru čestica i volumnom udjelu čestica. Kompoziti s disperzijom imaju promjer čestica do  $0,1 \mu\text{m}$ , a kompoziti s velikim česticama promjer čestica veći od  $1,0 \mu\text{m}$ . U pravilu do volumnih udjela od  $V_p = 0,15$  može se govoriti o kompozitima s disperzijom, a kod volumnih udjela viših od  $0,20 \mu\text{m}$  o kompozitima s velikim česticama. [2]

Kod kompozita s disperzijom povišena čvrstoća postiže se ekstremno malim česticama disperzirane faze, koje usporavaju gibanje dislokacija. Razmatranje ovog mehanizma očvršćivanja je na nivou atoma. Kod kompozita s velikim česticama mehanička svojstva su poboljšana djelovanjem samih čestica. [2]

Jedna od najvažnijih razlika između kompozita s česticama i onih s vlaknima direktno proizlazi iz njihove granice. Kompoziti s česticama općenito su izotropni, tj. njihova svojstva (čvrstoća, krutost itd.) identična su u svim smjerovima, za razliku od kompozita s vlaknima koji su često anizotropni te svojstva se mijenjaju s obzirom na položaj vlakna. Anizotropnost se može djelomično prevladati slaganjem više slojeva ojačanja različite orijentacije pri čemu se dobiva slojeviti kompozit. [3]

Male čestice disperzirane su u matrici, a dimenzije su im od  $10 \text{ nm}$  do  $250 \text{ nm}$ . Svojom prisutnošću male čestice ometaju gibanje dislokacije matrice, te na taj način ojačavaju. Kompoziti s dodanim malim česticama se zbog toga nazivaju disperzijski ojačanim kompozitima. Za učinkovito ometanje gibanja dislokacije matrice, disperzirane male čestice moraju biti tvrde (oksidi metala), a učinak ojačanja osim o tvrdoći ovisi i o veličinama, oblicima, količinama i raspodjelama disperziranih čestica. U materijalu matrice se disperzirane čestice ne smiju otapati niti s njom kemijski reagirati. S druge strane male čestice moraju biti čvrsto povezane s materijalom matrice. [6]

Svojstva disperzijom ojačanih kompozita mogu se optimirati uzimanjem u obzir sljedećih smjernica: [2]

1. Disperzirana (raspršena) faza, tipičan primjer je tvrd i stabilan oksid, treba biti djelotvorna zapreka klizanju (smicanju);
2. Materijal koji služi kao disperzija treba biti optimalne veličine, oblika, raspodjele i udjela (količine);
3. Disperzirani materijal treba biti male rastvorljivosti u materijalu matrice. Osim toga ne smije doći do kemijskih reakcija između dispergenata i matrice.
4. Npr.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ne otapa se u aluminiju, dakle taj materijal je djelotvoran dispergent za legure aluminija; bakrov oksid se međutim pri povišenim temperaturama otapa u bakru, dakle sustav  $\text{Cu-Cu}_2\text{O}$  neće biti djelotvoran;
5. Između matrice i raspršenog materijala treba postojati dobra povezanost. Slaba rastvorljivost raspršenog materijala u matrici može doprinijeti dobrim i čvrstim vezama.

Sljedeće slike (slika 2.6, 2.7 i 2.8) prikazuju proizvode u kojima se primjenjuju česticama ojačani kompoziti.



Slika 2.6. Primjer metalnog matričnog kompozita s česticama – dio kočionog sustava automobila [6]



Slika 2.7. Brusna ploča [6]

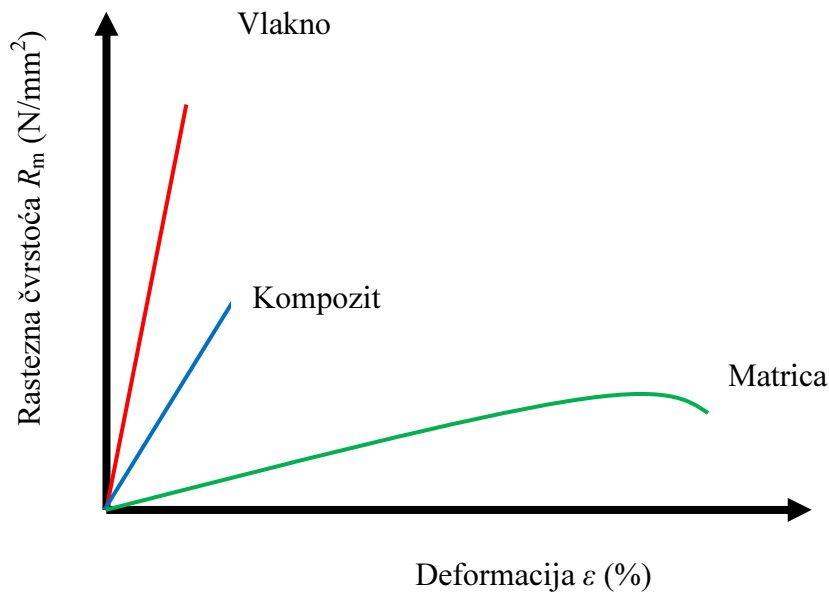


Slika 2.8. Pločice za obradu metala rezanjem [6]

### 2.3. Vlanknima ojačani kompoziti

Kod vlaknima ojačanih kompozita dolazi do izražaja poboljšanje čvrstoće, žilavosti, krutosti, te povećanja omjera čvrstoća/gustoća uslijed ugradnje čvrstih, krutih i krhkih vlakana u mekaniju, duktilniju matricu (slika 2.9). Efikasnost ojačanja najveća je kod ovakvog tipa kompozita. Materijal matrice prenosi opterećenje na vlakna te osigurava duktilnost i žilavost, budući da vlakna nose veći dio opterećenja. [2]

Vlanknima ojačani polimerni kompoziti mogu biti izotropni (mehanička svojstva jednaka u svim smjerovima), ortotropni (mehanička svojstva različita u različitim ortogonalnim smjerovima) ili anizotropni (mehanička svojstva se mijenjaju ovisno o smjeru). [2]



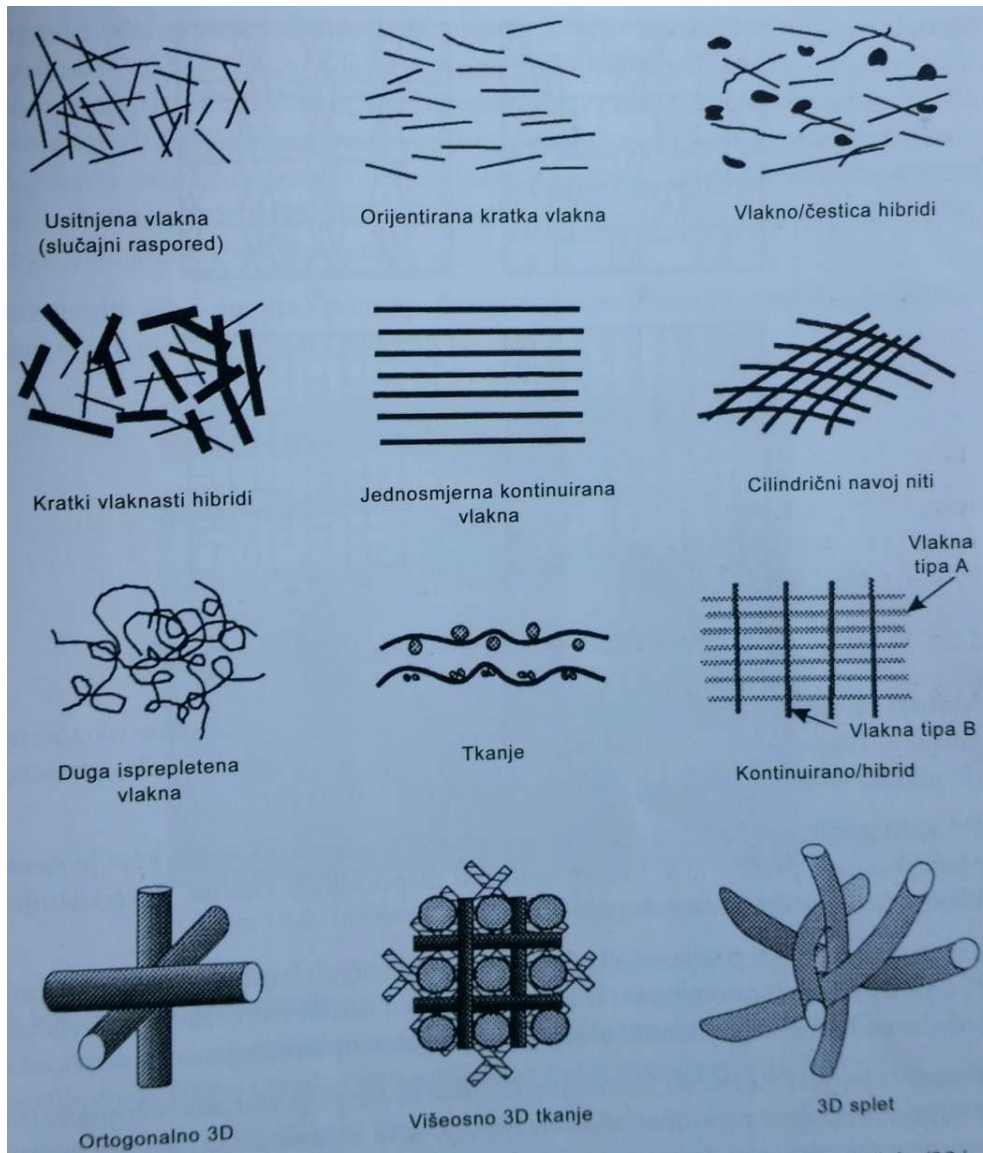
Slika 2.9.Svojstva materijala matrice i vlakna pojedinačno te kompozita u cjelini [6]

Vlakna se razlikuju prema: [4]

- vrsti
- duljini
- promjeru
- orijentaciji (slika 2.10)
- hibridizaciji.

Osnovni zadaci vlakana su: [6]

- prihvatanje opterećenja – kod konstrukcijskih kompozita vlakna nose od 70 % do 90 % opterećenja
- osiguranje čvrstoće, krutosti, toplinske stabilnosti
- osiguravanje električne vodljivosti ili izolacije, ovisno o namjeni kompozita.



Slika 2.10. Orijentacija vlakana u matrici [5]

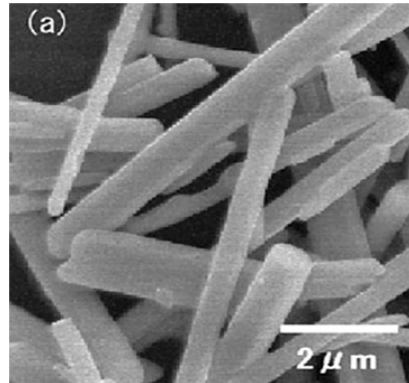
### 2.3.1. Podjela vlakana na osnovi promjera

Na osnovu promjera, vlakna su svrstana u tri skupine: [4]

- viskeri
- vlakna
- žice.

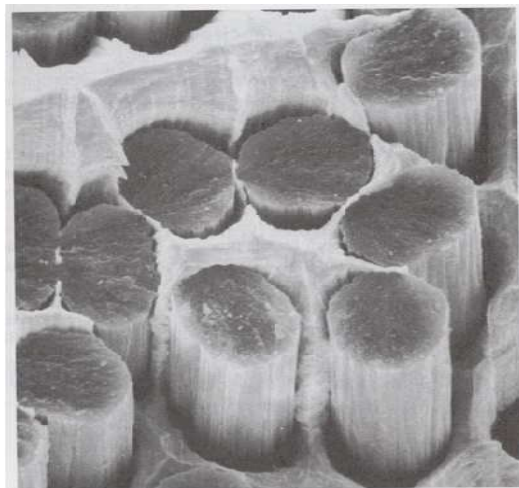
Viskeri su mali monokristali koji imaju ekstremno velik omjer "duljina/promjer" (slika 2.11). Posljedica malih dimenzija je veliki udio pravilnosti kristalne građe, pa gotovo nema mogućnosti tečenja što vodi do izuzetno visoke čvrstoće (oni su najčvršći poznati materijali).

Pored svih nabrojanih svojstava ne primjenjuju se zbog visoke cijene. Vrlo ih je teško ugraditi u matricu. Viskeri mogu biti od grafita (ugljika), silicij-karbida (SiC), silicij-nitrida (SiN) i aluminij-oksida ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). To su štapići promjera 0,1 do  $5\mu\text{m}$  i duljine do 5 mm. [4, 7]



Slika 2.11.  $\text{Al}_{18}\text{B}_4\text{O}_{33}$  viskeri [4]

Vlakna su ili polikristalna ili amorfna te imaju mali promjer. Materijali vlakana mogu biti polimerni ili keramički (aramid, staklo, ugljik, bor, aluminij-oksid i silicij-karbid). Neki primjeri vlakana mogu se vidjeti na slici 2.12. [4]



Slika 2.12. Legura Ag-Cu ojačana s ugljičnim vlaknima [4]

Žice su relativno velikog promjera, a tipični materijali su čelik, Mo i W. Primjenjuju se pri radijalnom ojačavanju (armiranju) automobilskih guma, pri namotavanju čahura/košuljica, te kod žicama omotanih visokotlačnih tuljaka. Na slici 2.14. vidi se žicom ojačana cijev.





Slika 2.13. Žicom ojačana cijev [4]

### **2.3.2. Svojstva kompozita ojačanog vlaknima**

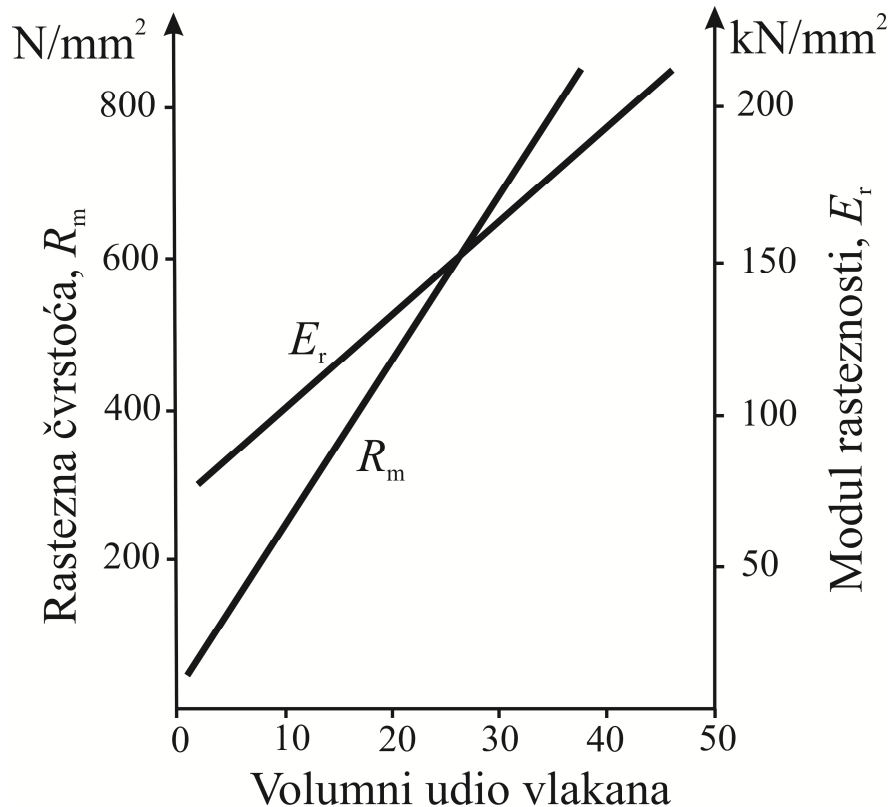
Svojstva kompozita ojačanog vlaknima ovise o: [4]

- a) Omjeru duljina/promjer vlakana
- b) Volumnom udjelu vlakana
- c) Usmjerenosti (rasporedu) vlakana
- d) Svojstvima vlakana
- e) Svojstvima matrice.

Prema navedenom:

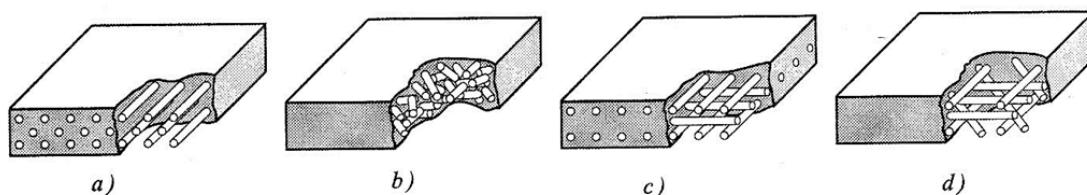
a) O omjeru duljina/promjer imamo podjelu vlakana koja se dijele na viskere, vlakna i žice. Svojstva kompozita i vlakana koje ovise o ovom omjeru opisane su u prethodna dva poglavlja (vidi naslov 2.3. i 2.3.1.).

b) Veći volumni udio vlakana (slika 2.14) dovodi do povišenja čvrstoće i krutosti kompozita. Gornja granica od oko 40% određena je sposobnošću, odnosno mogućnošću da se vlakna okruže materijalom matrice. [4]



Slika 2.14. Utjecaj volumnog udjela vlakana na rasteznu čvrstoću ( $R_m$ ) i modul rasteznosti ( $E_r$ ) kompozita [4]

c) Kontinuirana vlakna se teže proizvode i ugrađuju u matricu, ali osiguravaju najbolja svojstva. Diskontinuirana vlakna s velikim omjerom "duljina/promjer" znatno se lakše ugrađuju u matricu, i tako čine materijal visoke krutosti i čvrstoće. Slika 2.15 pokazuje različite načine rasporeda vlaknastih ojačava.



Slika 2.15. Različiti načini rasporeda vlaknastih ojačava: (a) kontinuirana jednosmjerna vlakna; b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna; c) ortogonalno raspoređena vlakna; d) višesmjerno usmjerena vlakna [4]

d) Vlakna trebaju biti čvrsta, kruta, male mase, a također trebaju imati visoko talište. Materijal vlakana morali bi imati visoki specifični modul elastičnosti ili čvrstoće. Specifična

čvrstoća (slika 2.16) opisuje se jednadžbom 2.1, a specifični modul elastičnosti jednadžbom 2.2:

$$\text{specifična čvrstoća} = \frac{R_m(R_r)}{\rho} \quad (2.1)$$

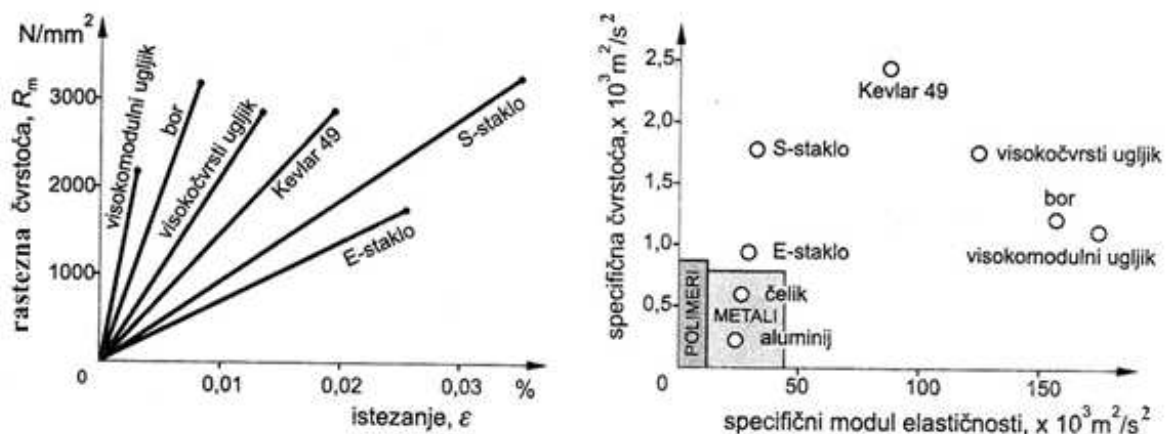
$$\text{specifični modul elastičnosti} = \frac{E}{\rho} \quad (2.2)$$

gdje su:  $E$  - modul elastičnosti,  $[\text{N}/\text{mm}^2]$

$R_m$  - rastezna čvrstoća,  $[\text{N}/\text{mm}^2]$

$R_r$  - granica razvlačenja,  $[\text{N}/\text{mm}^2]$

$\rho$  - gustoća,  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ . [4]

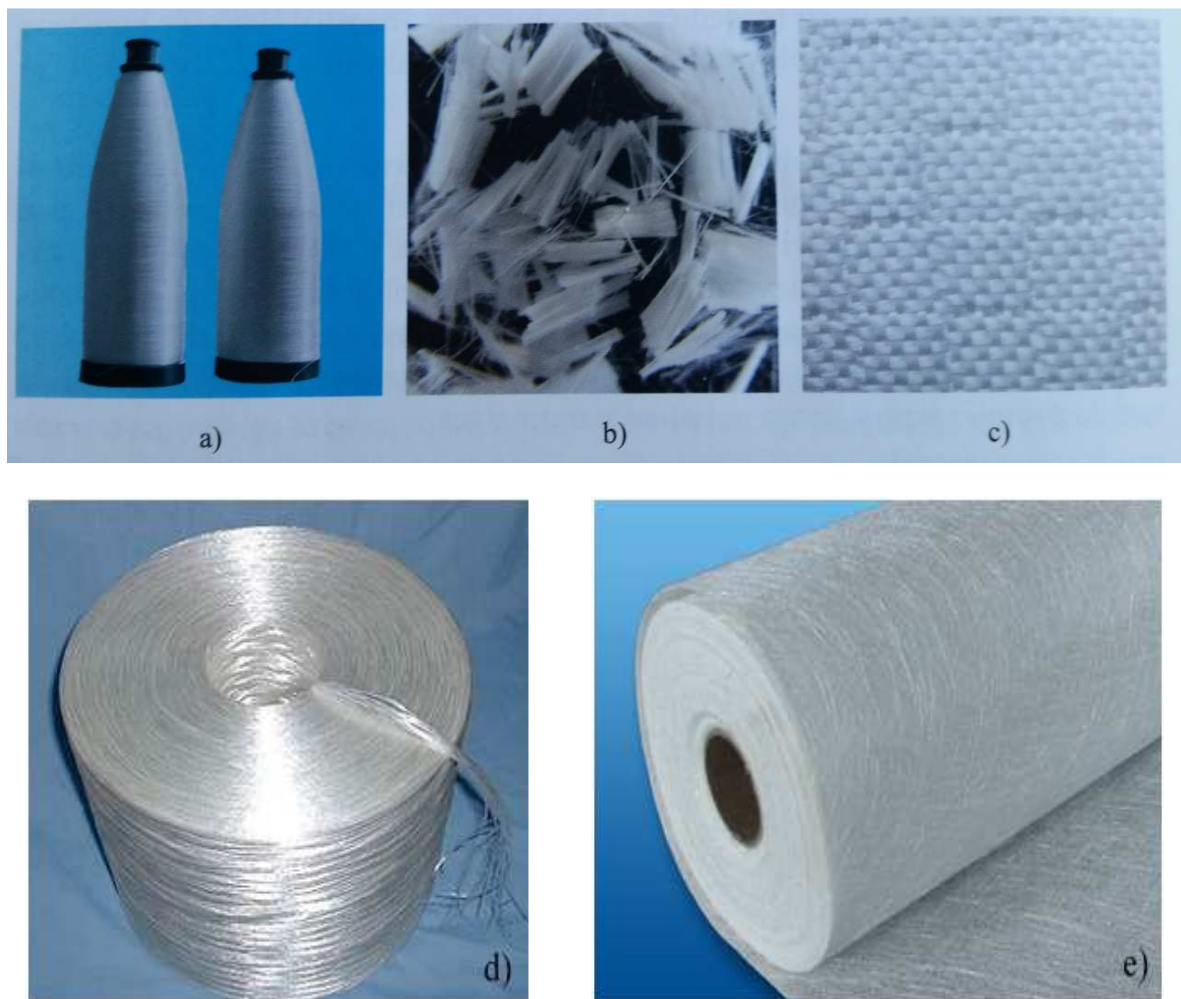


Slika 2.16. Svojsva vlakana: (a) krivulja "naprezanje-istezanje", (b) usporedba specifične čvrstoće i specifičnog modula elastičnosti metala i nekih vlakana [2]

e) Uobičajeno je da su mnogi materijali matrice žilavi i duktilni tako da prenose opterećenje na vlakna te onemogućavaju da pukotine od prekinutih vlakana napreduju kroz cijeli kompozit. Matrica također treba biti čvrsta tako da pridonosi sveukupnoj čvrstoći kompozita. U krajnoj liniji na prikladnost matrice utječe talište. Polimeri se mogu primjenjivati do maksimalne temperature od 80 °C za nezasićene poliesterske smole, a do 315 °C za poliimide. Metalne matrice dopuštaju više temperature. Na slici 2.16 uspoređeni su specifični modul elastičnosti i specifična čvrstoća nekolicine kompozita s metalima. [2]

### 2.3.3. Oblici vlakana

Vlakna se na tržištu pojavljuju u obliku svitaka pojedinačnih vlakana (niti), mata (rogazine), rovinga (beskonačnih strukova), tkanina satkanih od dugih kontinuiranih vlakana ili kao isjeckana kratka vlakna (slika 2.17). [3]



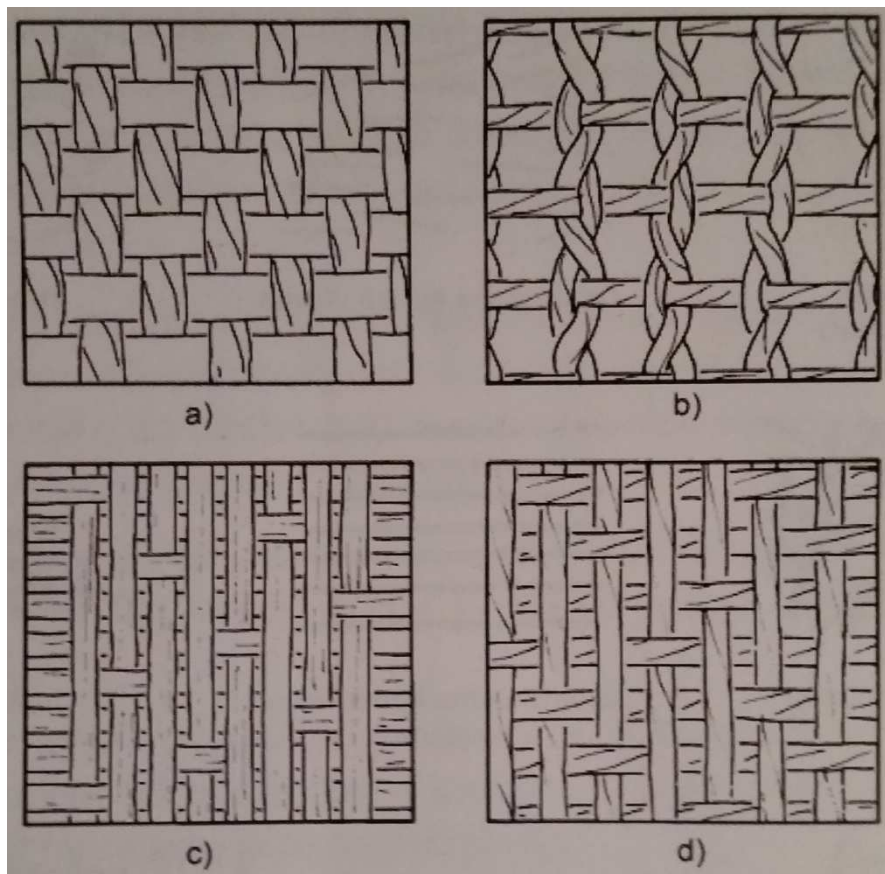
Slika 2.17. Polazni oblici vlakana: a) svitak niti; b) kratka sjeckana vlakna; c) tkanina; d) roving; e) mat [3, 8, 9]

Ojačanja vlaknima moguće je izvesti na različite načine, ovisno o obliku njihova polaganja i dimenzijama vlakana (slika 2.10). [3]

Tkanine, odnosno trake, čine isprepletana vlakna i to su najčešći predoblici ojačanja za zrakoplovne konstrukcije. Tkanine predimpregnirane polimernom smolom poznate su pod nazivom preprezi. Slojevi tkanina se mogu različito usmjeravati. Ovisno o načinu njihova

polaganja i vrsti tkanja, mijenjaju se svojstva kompozita. Pod tkanjem se podrazumijeva način prepletanja niti (vlakana). [3]

Najčešće vrste tkanja prikazane su slikom 2.18. Slika 2.18.a predočava ravno tkanje (e. *Plain*) gdje jedno vlakno naizmjenice prolazi ispod i iznad vlakana osnove čime se postiže najviša mehanička otpornost. Jednoliko tkanje na slici 2.18.b (e. *Leno*) koristi se pri izradi laganih membrana, a za zakrivljene dijelove zrakoplova i projektila primjenjuje se savitljivo tkanje (e. *Eight-Harness Satin Weave*), slika 2.18.c, u kojem vlakno nakon podvlačenja ispod jedne niti prelazi preko sedam osnovnih niti. Za manje zakrivljene površine prikladno je i tkanje prikazano na slici 2.18.d (e. *Four Harness Satin-Crowfoot*) koje je još uvijek dovoljno oblikovljivo budući da vlakno prije podvlačenja prelazi iznad triju niti osnove. [3]



Slika 2.18. Osnovne vrste tkanja vlakana [3]

Matovi su najzastupljeniji oblik ojačavala (slika 2.17.e). Oni sadrže vlakna duljine oko 50 mm slučajno raspoređena i natopljena smolom. Vlakna moraju biti tako povezana da u svim smjerovima jednoliko preuzimaju opterećenje. [2]

Pri postupcima naštrcavanja vlakana, upotrebljavaju se rovinzi (slika 2.17.d) koje je sjeckanjem moguće pretvoriti u kratka slučajno raspoređena vlakna. Tako usitnjena vlakna pri nanošenju se natapaju smolom. Rovinzi se rabe pri proizvodnji rotacijski – simetričnih šupljih izradaka, primjerice postupkom namotavanja. U tom slučaju pravilnim usmjeravanjem vlakana izradci su sposobni preuzeti i aksijalna i radijalna opterećenja. [3]

Preprezi (e. *PREimPREGnated*) su tkanine ili snopovi vlakana natopljeni (impregnirani) polimernim materijalom u jednom ili više slojeva. Tijekom natapanja ne smije doći do polimerizacije. Čvrsti kompozitni izradak nastaje prešanjem slojeva preprega uz zagrijavanje u autoklavu tako da polimerna smola omekša ili polimerizira. Slojevi tkanine mogu biti različite orijentacije vlakana i vrste tkanja. [2]

Osmoljeni list (pločasti prepreg); e. *SMC – Sheet Moulding Compound*, izrađuje se od smjese nezasićene poliesterske smole, očvršćivala, mineralnih punila, vlaknastih ojačala i još nekih dodataka, i ta smjesa se izravno preša. Debljina osmoljenog lista je 2-3 mm, a vlakna su duljine 12-50 mm i mogu biti slučajno raspoređena ili usmjerena. [2]

Matrice preprega su najčešće od epoksidnih i fenolnih smola, ali im se ne dodaju punila i ostali dodaci, kao što je to slučaj kod SMC-a. Preprege je moguće prerađivati samo postupcima prešanja i postupcima očvršćivanja kompozita u autoklavu. [2]

Za izradu plastomernih kompozita primjenjuju se staklenim matom ojačani plastomer – GMT (nj. *Glassmatenverstärkte Termoplaste*). Taj se predoblik vlakana natapa pretežno polipropilenom (PP), a rjeđe poliamidima (PA). GMT se može izrađivati i od usitnjenih vlakana, postupkom sličnim proizvodnji papira. Vlakna se miješaju s matričnim prahom u kapljevini, najčešće vodi, i ta se smjesa nanosi na sito kako bi se kapljevina ocijedila. Pločasti GMT poluproizvodi nastaju zagrijavanjem i očvršćivanjem smjese. [3]

#### **2.3.4. Materijali vlakana**

Osim prema obliku ojačavala (pogotovo kod polimernih kompozita), kompozitni materijali mogu se podijeliti prema materijalu ojačavala na: [2]

- a) staklenim vlaknima ojačani polimerni kompoziti
- b) ugljičnim vlaknima ojačani polimerni kompoziti

- c) aramidnim vlaknima ojačani polimerni kompoziti
- d) ostali vlaknasti materijali za ojačanje (B, SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

Tablica 2.2 svojstva kontinuiranih i jednosmjernih staklenim, ugljičnim i aramidnim vlaknima ojačanih epoksidnih kompozita u uzdužnom i poprečnom smjeru. [2]

Tablica 2.2. Svojstva kontinuiranih jednosmjernih staklenim, ugljičnim i aramidnim vlaknima ojačanih epoksidnih kompozita u uzdužnom i poprečnom smjeru (u svim slučajevima volumni udio vlakana iznosi 0,60) [2]

Svojstvo	Staklo (E-staklo)	Ugljik (visokočvrsti)	Aramid (Kevlar 49)
Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )	2100	1600	1400
Rastezni modul elastičnosti (kN/mm <sup>2</sup> )			
Uzdužno	45	145	76
Poprečno	12	10	5,5
Rastezna čvrstoća (N/mm <sup>2</sup> )			
Uzdužno	1020	1240	1380
Poprečno	40	41	30
Istezljivost (prekidno istezanje) (%)			
Uzdužno	2,3	0,9	1,8
Poprečno	0,4	0,4	0,5

Prednosti i nedostatke vlakana opisuje tablica 2.3.

Tablica 2.3. Prednosti i nedostaci vlakana [4]

Ojačavalo	Prednosti	Nedostatci
E-staklo, S-staklo	Specifična čvrstoća, cijena	Krutost, dinamička izdržljivost
Aramidna vlakna	Specifična čvrstoća	Pritisna čvrstoća, upijanje vlage
HS (visokočvrsta) ugljična	Specifična čvrstoća, krutost	Cijena
UHM (ultravisoko modulna) ugljična	Izuzetno visoka krutost	Čvrstoća, cijena

### 2.3.4.1. *Staklenim vlaknima ojačani polimerni kompoziti*

Upotreba staklenih vlakana datira do antičkih Egipćana. Staklo je amorfni materijal sastavljen od silicijske mreže. Postoje četiri glavne klase stakla koje se komercijalno upotrebljavaju: visokoalkalno (A-staklo), električna klasa (E-staklo), kemijski-otporna-modificirana E klasa stakla (ECR-staklo) i klasa visoke čvrstoće (S-staklo) koje se upotrebljava pri povišenim temperaturama. Vlakna se mogu proizvesti od bilo kojih navedenih klasi stakla, međutim stakleno vlakno E-stakla se najčešće upotrebljavaju u svrhu ojačavanja, iako stakleno vlakno S-stakla ima najvišu rasteznu čvrstoću i modul elastičnosti od navedenih četiri klase stakla (tablica 2.4). [10]

Tablica 2.4. Tipična svojstva različitih vrsta staklenih vlakana [10]

Materijal	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )	Rastezna čvrstoća (MPa)	Youngov modul (GPa)	Koeficijent toplinskog rastezanja (10 <sup>-6</sup> /K)	Prekidno istezanje (%)
E- staklo	2620	3450	81	5,0	4,9
S- staklo	2500	4590	89	5,6	5,7
A- staklo	2500	3050	69	8,6	5,0

Staklenim vlaknima ojačan polimerni kompozit sastoji se od staklenih vlakana, kontinuiranih ili diskontinuiranih, koja se nalaze u polimernoj matrici; ovaj tip kompozita proizvodi se u najvećim količinama. Staklo se može izvlačiti u vlakna (tzv. E-staklo i S-staklo) promjera od 3 do 20 μm. Približan sastav E-stakla je sljedeći: 54 % SiO<sub>2</sub>, 14 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 22 % (CaO+MgO), 10 % B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. S-staklo je drugačijeg sastava i boljih mehaničkih svojstava. [2]

Staklo je popularan materijal za ojačavanje iz nekoliko razloga:[2]

1. Lako ga se iz rastaljenog stanja izvlači u obliku visokočvrstih vlakana;
2. Lako ga se dobavlja te se primjenom brojnih postupaka proizvodnje kompozita ekonomično mogu proizvoditi staklenim vlaknima ojačani polimerni materijali;
3. Budući da su vlakna relativno čvrsta, kada ih se uloži (ugradi) u polimernu matricu, dobiva se kompozit vrlo visoke specifične čvrstoće;
4. Kombiniranjem s različitim polimerima postiže se kemijska inertnost što daje kompozite korisne za primjenu u različitim korozivnim sredinama.



Većina staklenim vlaknima ojačanih polimernih kompozita imaju temperaturu primjene do 200 °C, jer pri višoj temperaturi većina polimera počinje teći ili dolazi do pogoršanja njihovih svojstava. Temperatura primjene može se povisiti do 300 °C primjenom visokočvrstog rastaljenog silicijeva dioksida za vlakna i visokotemperaturnih polimera kao što su npr. poliimidne smole. [2]

Poznati su mnogi primjeri primjene staklenim vlaknima ojačanih polimernih kompozita: kućišta (kabine) vozila i trupovi plovila, cijevi, spremnici, te industrijski podovi. Industrija transporta primjenjuje sve veće količine staklenim vlaknima ojačanih polimernih materijala u težnji da smanji masu vozila i poveća djelotvornost transporta kapljevine. [2]

#### *2.3.4.2. Ugljičnim vlaknima ojačani polimerni kompoziti*

Ugljična vlakna poznata su više od 100 godina, međutim tek nakon 1950-tih povećanje interesa za ojačanjima visoke čvrstoće i male mase u zrakoplovnoj primjeni učinila su njihovu primjenu češćom. Termin ugljično vlakno često se naizmjenično primjenjuje s terminom grafitno vlakno, iako se međusobno razlikuju. [10]

Ugljik je visokoučinkovit vlaknasti materijal koji se najčešće primjenjuje za ojačavanje suvremenih kompozita s polimernom matricom. Razlozi za to su sljedeći:[2]

1. Ugljična vlakna imaju, od svih vlaknastih materijala za ojačavanje, najviši specifični modul i najvišu specifičnu čvrstoću;
2. Visok rastezni modul i visoku čvrstoću zadržavaju i pri povišenim temperaturama, osim što može biti problema zbog oksidacije pri visokim temperaturama;
3. Kod sobne temperature, vlaga i niz otapala, kiselina i lužina ne razaraju ugljična vlakna; Ova vlakna karakterizira niz posebnih fizikalnih odnosno mehaničkih svojstava koja omogućuju da kompoziti s tim vlaknima postiču specifična inženjerska svojstva;
4. Razvijeni su postupci proizvodnje vlakana i kompozita koji su relativno jeftini.

Ugljična vlakna sadrže  $\approx 95\%$  C i karboniziraju pri 980-1480 °C dok grafitna sadrže 99 % C i najprije karboniziraju, a zatim grafitiziraju pri 1985-3035 °C. Općenito, grafitizacija rezultira povišenjem modula elastičnosti i električne vodljivosti. Ugljična vlakna proizvode se

karbonizacijom ili pirolizom nekog organskog filameta (niti) koje se lako dobije vučenjem ili pređenjem. Organske niti poznate kao tzv. prethodnici (e. *Precursors*) danas su uglavnom poliakrilnitril (PAN) ili katran (e. *Pitch*). Vlakna visokog modula elastičnosti se proizvode od PAN prethodnika postupkom koji tipično obuhvaća prvo oksidaciju pri 200-250 °C, a zatim karbonizaciju u neoksidirajućoj atmosferi pri 100 °C, a na kraju se provodi grafitizacija u neoksidirajućoj atmosferi pri 2500-3000 °C. Površina dobivenih vlakana se završno kemijski obrađuje radi dobrog prijanjanja uz matične materijale. Vlakna dobivena od smole općenito imaju viši modul elastičnosti, ali i manju pritisku i rasteznu čvrstoću u odnosu prema vlaknima od PAN-a. Ta su vlakna i znatno poroznija, što smanjuje njihovu čvrstoću. Vlakna od smole mogu imati dobru električnu vodljivost. [3]

Prema čvrstoći i krutosti, ugljična vlakna se klasificiraju u sljedeće skupine:[3]

1. Visokočvrsta vlakna (HS);
2. Vlakna standardnog modula elastičnosti (SM);  $E = 220$  GPa;
3. Vlakna srednjeg ili prijelaznog modula elastičnosti (IM);  $E = 240$  GPa;
4. Vlakna visokog modula elastičnosti (HM);  $E = 300$  GPa;
5. Vlakna ultravisokog modula elastičnosti (UHM);  $E = 450$  GPa.

Uobičajeno promjeri vlakana su od 4 do 10  $\mu\text{m}$  a dostupna su kao kontinuirana i rezana. Ugljična vlakna uobičajeno su presvučena zaštitnim epoksidnim slojem, što poboljšava vezanje s polimernom matricom. [2]

Ugljičnim vlaknima ojačani polimerni kompoziti u sadašnje vrijeme primjenjuju se za sportsku i rekreacijsku opremu (ribolovni i golf štapovi), namotavana kućišta raketnih motora, spremnike pod tlakom, konstrukcijske dijelove vojnih i komercijalnih letjelica (npr. dijelovi krila, trupa, stabilizatora i komponenti za upravljanje). [2]

#### 2.3.4.3. *Aramidnim vlaknima ojačani polimerni kompoziti*

Aramidi su aromatski poliamidi i dva najčešća člana ove skupine su "Kevlar" i "Nomex" koji su prvi put predstavljeni u ranim 1970-tima. Aramidna vlakna su posebno poželjna radi izuzetnog omjera gustoća-čvrstoća koja je iznad one kod metala. Postoje različiti tipovi (Kevlar 29, 49 i 149) koji se razlikuju po mehaničkim svojstvima (tablica 2.5). [2, 10]

Tablica 2.5. Neka svojstva aramidnih vlakana [7, 10]

Tip vlakna	Gustoća (kg/cm <sup>3</sup> )	Youngov modul (GPa)	Rastezna čvrstoća (GPa)	Promjer (μm)	Prekidno istezanje (%)
Kevlar 29 (visoka žilavost)	1440	85	3,0-3,6	12	4,0
Kevlar 49 (visok modul elastičnosti)	1440	131	3,6-4,1	12	2,8
Kevlar 149 (ultravisoki modul elastičnosti)	1470	186	3,5	12	2,0

Aramidna vlakna pripadaju skupini aromatskih plastomernih poliamida, ali za razliku od alifatskih koji mekšaju i tale se pri povišenim temperaturama, ova su vlakna toplinski stabilna, tj. zadržavaju mehaničku otpornost pri temperaturama od -200 do 200 °C. Vlakna su karakteristične žute boje, higroskopna, relativno slabe adhezijske veze s matricom, skuplja od staklenih vlakana, nemagnetična, osjetljiva na ultraljubičasto zračenje te na djelovanje kiselina i lužina, ali su relativno inertna prema drugim otapalima i kemikalijama. Osim toga poznata su po svojoj krutosti, otpornosti na udar, otpornosti na puzanje i pojavu zamora. [3]

Primjena aramidnih vlakana nije očito ograničena samo na sektor za visoke performanse. Zapravo, veliki dio primjene je u kombiniranju s drugim ojačalima kao hibrida, gdje se precizno dobivaju tražena svojstva. Aramidna vlakna rabe se za ojačavanje fenolne matrice u izradi konstrukcijskih elemenata zrakoplova bombardera, kao što su primjerice vrata otvora za bombe koja moraju biti čvrsta, otporna na udar i ne manje važno, otporna na zapaljenje. Tipični primjeri ovih aramidnih kompozita su neprobojni prsluci, sportski artikli, gume, užad, projektili, tlačne posude, kao zamjena azbesta kod automobilskih kočnica, spojki i brtvi. [1, 3, 8]

#### 2.3.4.4. Ostali vlaknasti materijali za ojačavanje ( $B$ , $SiC$ , $Al_2O_3$ )

Staklena vlakna, ugljična vlakna i aramidna vlakna najčešća su vlaknasta ojačavala koja se primjenjuju kod polimernih kompozita. Drugi vlaknasti materijali, kao npr. vlakna bora te vlakna silicijeva karbida ( $SiC$ ) i aluminijska oksida ( $Al_2O_3$ ), primjenjuju se u daleko manjoj mjeri. Polimerni kompoziti ojačani vlaknima bora rabe se za izradu komponenti vojnih letjelica, krila helikopterskih rotora, te neke sportske artikle. Vlakna od  $SiC$  i  $Al_2O_3$  primjenjuju se za izradu teniskih reketa, tiskanih pločica i vrhova raketa. [2]

Druga vlakna za ojačavanje, trenutačno manje komercijalno zanimljiva, uključuju azbestna, keramička vlakna, vlakna silicijeva karbida, viskerna vlakna, prirodna vlakna (vlakna konoplje, jute, agave, pamuka, crnogorice, bambusa itd.) i mineralna vlakna (vlakna volastonita (e. *Wollastonite Fibers*), mika vlakna (e. *Mica*)). [1, 7]

#### 2.3.5. Matrice

Uobičajeno je da su materijali matrice žilavi i duktilni kako bi prenosili opterećenje na vlakna, a s druge strane spriječili da pukotine između prekinutih vlakana napreduju kroz cijeli kompozit. No naravno, matrica mora biti i dovoljno čvrsta kako bi pridonijela ukupnoj čvrstoći kompozita. [3]

Matrica obično čini od 30 do 40 % strukture kompozita. Ima veliki broj funkcija kao što su: [6, 10]

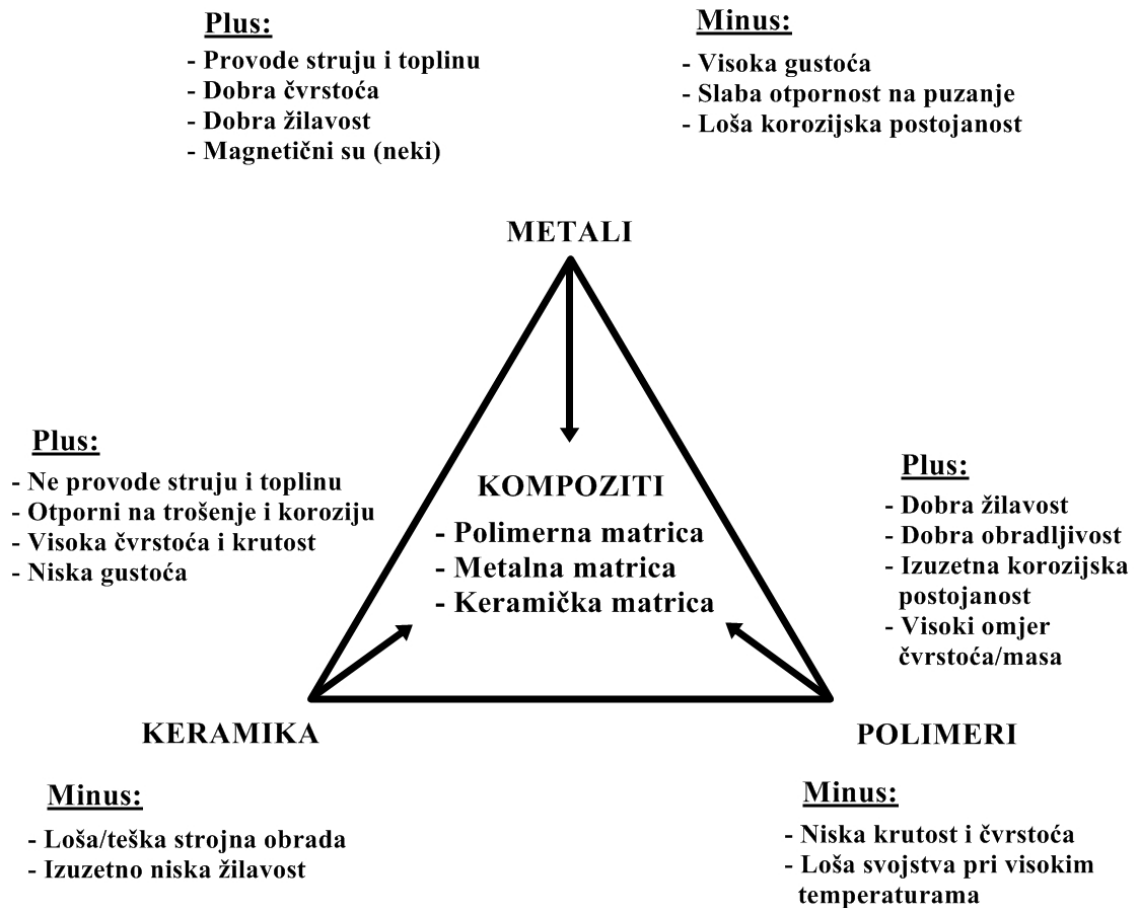
- a) povezuje komponente zajedno i odlučuje o termo-mehaničkoj stabilnosti kompozita;
- b) štiti ojačanja od trošenja/abrazije i okoliša
- c) pomaže u distribuciji naprezanja (ponaša se kao sredstvo prijenosa naprezanja)
- d) osigurava trajnost, interlaminarnu (međuslojnu) žilavost i smičnu/pritisnu/poprečnu čvrstoću kompozita kao cjeline;
- e) održava željenu orijentaciju vlakana i razmake u specifičnim strukturama
- f) osigurava dobru kvalitetu površine, te na taj način potiče proizvodnju dijelova u konačnom obliku ili blisko konačnom obliku
- g) formira vanjski oblik kompozitne konstrukcije.

Mehanička svojstva matrice dana su tablicom 2.6.

Tablica 2.6. Mehanička svojstva materijala matrice [6]

Tip matrice	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$E$ (GPa)	$G$ (GPa)	$R_m$ (MPa)	$\varepsilon$ (%)	$\alpha$ (10 <sup>-6</sup> /°C)	$T_g$ (°C)
Poliester	1500	4,5	2	90	5	200	110
Vinil ester	1150	4	-	90	5	53	150
Epoksid	1400	6	2,2	130	8,5	70	250
Bismaleimid	1320	3,6	1,8	78	6,6	49	300
Poliiimid	1890	4,9	-	120	3	90	320
Poliester imid	1270	3	-	105	60	62	217
Poliamid imid	1400	5	-	95-185	12-18	36	240-270
PPS	1340	3,3	-	70-75	3	54-110	85
PEEK	1320	-	-	92-100	150	-	143
Polisulfon (PS)	1240	2,5	-	70-75	50-100	56-100	190
Polipropilen (PP)	900	1-1,4	-	25-38	300	110	-20 - -5
Polikarbonat (PC)	1200	2,4	-	45-70	50-100	70	133
Aluminij	2700	70	-	200	-	-	-
Ti-6Al-4V	4500	110	-	1000	-	-	-
Borosilikatno staklo	2300	60	-	100	-	3,5	-
MgO	3600	210-300	-	97-130	-	13,8	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4000	360-400	-	250-300	-	8,5	-
SiC	3200	400-440	-	310	-	4,8	-

Podjela, prednosti i nedostaci matrica (kompozita) od različitih materijala dani su slikom 2.19.



Slika 2.19. Podjela, prednosti i nedostaci matrica (kompozita) različitih materijala [4]

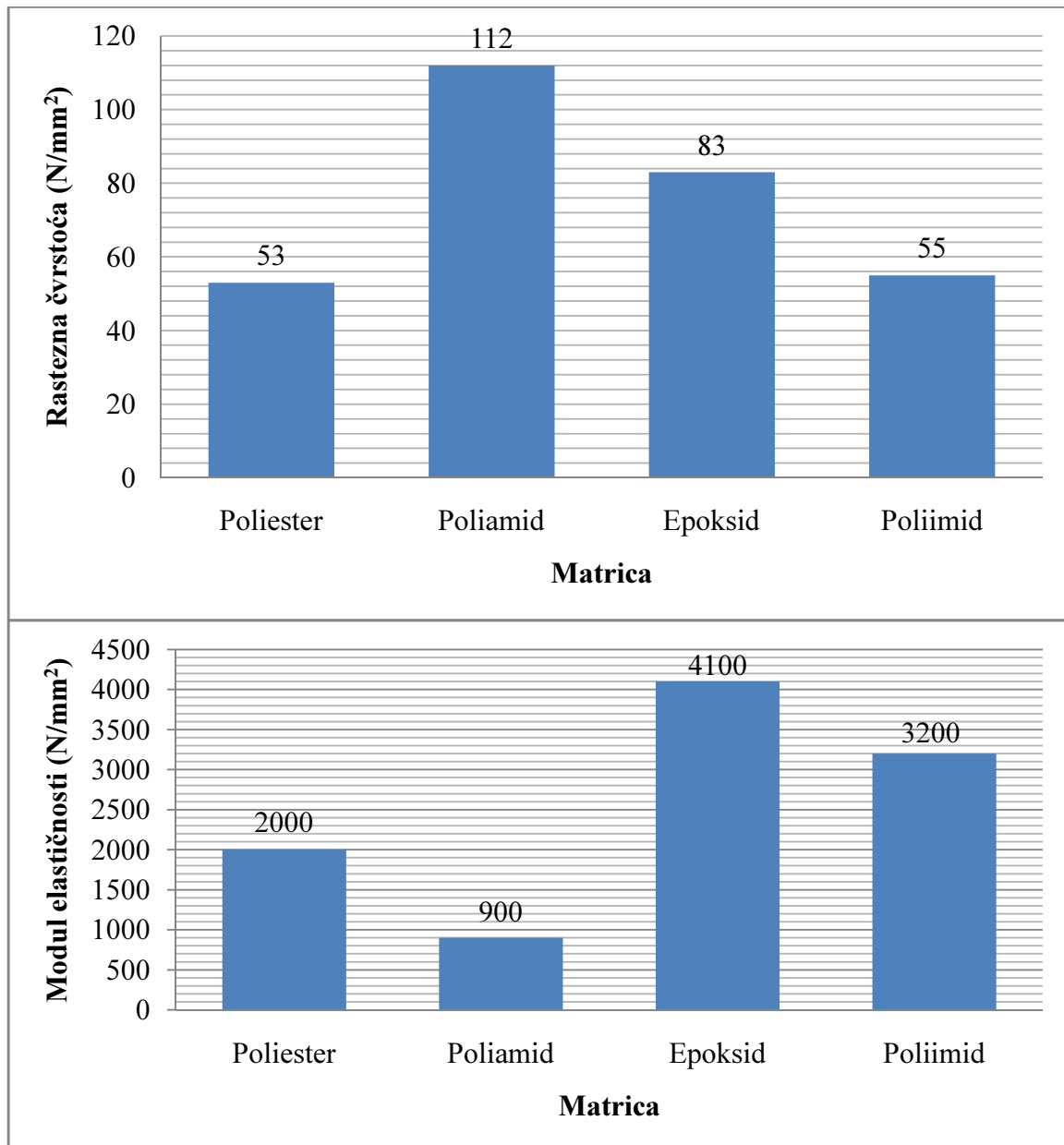
### 2.3.5.1. Polimerne matrice – polimerni kompozit (PMC)

Kompoziti s polimernom matricom sastavljeni su od polimerne smole kao matrice s vlaknima kao komponentom za ojačavanje. Pojam "smola" u ovom se kontekstu primjenjuje za obilježavanje polimera-tvari visoke molekularne mase koji treba ojačati. Ovi materijali rabe se u najvećoj mogućoj raznolikosti primjene kompozita, i to obzirom na količinu, obzirom na svojstva pri sobnoj temperaturi, lakoću proizvodnje, te cijenu. [2]

Vrste polimernih matrica su: [7]

- duromerne – poliesterske (UP), epoksidne (EP), vinil-esterske, fenolne smole, itd.
- plastomerne – poliamid (PA), poliester (PE), polipropilen (PP), akrilonitril/butadien/stiren (ABS), visokotemperaturni plastomeri (poli(eter-eter-ke-ton) (PEEK), poli(fenilen-sulfid) (PPS), poli(eter-imid) (PEI).

Svojstva poput rastezne čvrstoće i modula elastičnosti nekih matrica dani su slikom 2.20.



Slika 2.20. Vrijednost rastezne čvrstoće i modula elastičnosti različitih vrsta matrica [3]

Duromeri pri zagrijavanju stvaraju ireverzibilne kemijske veze među polimernim lancima koji su međusobno snažno umreženi. Pri ponovnom zagrijavanju, oni ne mijenjaju stanje, već ostaju kruti sve dok se pod djelovanjem visoke temperature potpuno ne razgrade. Ovo ukazuje i na velik problem pri njihovoj primjeni, koji je danas sve važniji: nije ih moguće reciklirati omekšavanjem matrice već samo mehanički usitniti čime se dobiva sitni granulati ili prah koji u sebi sadrži i vlakna i matricu. Za razliku od njih, plastomeri imaju svojstvo da se pri hlađenju stvrdnjavaju, ali se pri ponovnom zagrijavanju omekšavaju te ih je moguće ponovno oblikovati. Ovo omogućuje popravljavanje dijelova koji su izrađeni od ovih kompozita, kao i

njihovo djelomično recikliranje. Nadalje, kod plastomera je moguća određena kristalnost, dok su duromeri isključivo amorfni. Kristalnost je uzrokovana usmjerenošću lanaca. Oni dijelovi polimera (ili oni polimeri) koji su kristalasti imaju višu gustoću, ali i bolja mehanička svojstva i postojanost na otapala (što je uzrokovano smanjenom molekularnom aktivnošću, odnosno većom uređenošću molekula). [6]

#### 2.3.5.1.1. Duromerne matrice – epoksidne (EP) i poliesterske (UP) smole

Epoksidne smole spadaju u skupinu amorfni polimera koje karakterizira pojava gumaste faze pri višim te staklaste faze pri nižim temperaturama. Epoksidi koji polimeriziraju pri sobnojtemperaturi pogodni su za upotrebu pri temperaturama do 50 °C dok se ovisno o tipu očvršćivalaostale vrste epoksida obrađuju pri temperaturama između 120 i 180 °C. Kemijske reakcije koje se pri polimerizaciji događaju jesu egzotermne te upotreba velike količine katalizatora ili previsoke temperature polimerizacije može dovesti do toplinske degradacije matrice, a time isamog kompozita. Ovo je razlog zbog kojeg se posebna pažnja mora posvetiti izradi kalupa, posebice ako se radi o debljim ili većim dijelovima. Da bi im se promijenila mehanička svojstva, epoksidima se mogu dodavati različite tvari u svrhu sniženja viskoznosti prilikom obrade, povećanja prekidnog istezanja uz sniženje modula elastičnosti, poboljšanje otpornosti širenju pukotina, promjena gustoće i dr. [6]

Neka od svojstava epoksidnih smola su: [7]

- a) izvrsna mehanička svojstva;
- b) postojanost na atmosferilije;
- c) vrlo dobra postojanost na djelovanje agresivnih medija i vode;
- d) u laminatnim konstrukcijama – dobro prijanjanje za ojačavalo i dobra postojanost na utjecaj vlage – idealne u izradi plovila, za izradu kvalitetnijih brodskih trupova ili češće kao površinski, zaštitni sloj trupa načinjenog od, na vodu manje postojanog, poliesterskog kompozita;
- e) dobra električna svojstva;
- f) dobra otpornost na zamor materijala.

Nedostatci su: [7]

- a) teško je dobiti proizvod koji je istovremeno žilav i postojan pri visokim temperaturama;



- b) podložnost UV razgradnji;
- c) za visoku proizvodnost zahtijevaju umreživanje pri povišenim temperaturama;
- d) visoka cijena.

Eposkidne smole primjenjuju se kod postupaka namotavanja filamenata, u avioindustriji, brodogradnji, elektroindustriji, pri izradi kalupa, itd. [7]

Poliesterska smola (UP) također pripadaju duromerima, a proizvode se egzotermnim kemijskim reakcijama pri kojim se nezasićeni poliesteri miješaju s relativno malom količinom inicijalizatora (katalizatora). Kao kod epoksida, i ovdje materijal pri polimerizaciji prolazi iz kapljevit, prekogumaste do čvrste faze. [6]

Poliesterske smole (UP) su najviše primjenjivana vrsta smole i to posebice u brodograđevnoj industriji. Karakterizira ih se niska cijena. Mješavina su poliestera i monomera (najčešće stirena). Uz dodatak stirena (do 50 %) snizuje se viskoznost smole i olakšava primjena (stiren služi za povezivanje molekula poliestera i samim time i očvršćuje materijal). Poliesteri su makromolekule na bazi diabazičnih kiselina (ortoftalna, izoftalna, tereftalna kiselina, itd.) i diola kao što su etilen glikol, propilen glikol, neopentil glikol, bisfenol i dr. [7]

Prednosti poliesterskih smola su: povišena rastezna i savojna čvrstoća, snižena osjetljivost na krhki lom, dobra kemijska postojanost i postojanost na koroziju, dobra postojanost na atmosferilije, lako se prerađuju, itd. [7]

Nedostaci su: imaju ograničen rok trajanja jer nakon nekog vremena počinju gelirati (stoga se često u postupku proizvodnje dodaju male količine usporavala), vrlo lako se razgrađuju. [7]

#### 2.3.5.1.2. Plastomerne matrice – polipropilen (PP), poli(fenilen-sulfid) (PPS) i poli(eter-imid) (PEI)

Plastomeri su najšire klasificirani kao amorfni, kristalasti i kristalni mada svi ispoljavaju kristalnost u većoj ili manjoj mjeri. Nadalje, kristalasti elastomeri pokazuju znatno bolju postojanost u tječajima goriva, hidrauličkih fluida i dr. u odnosu na amorfne. Amorfni plastomeri pokazuju veliku isprepletenost polimernih lanaca, a pri zagrijavanju te se veze kidaju i polimer se ponaša kao viskozni fluid. Amorfni plastomeri su i u određenoj mjeri

osjetljivi na otapala, te su znatno osjetljiviji na puzanje i zamor nego kristalasti. Plastomeri su znatno manje skloni upijanju vlage, manje su osjetljivi na udarna oštećenja. Mogu se u ograničenoj mjeri popravljati ponovnim zagrijavanjem i zavarivati. No, temperature i tlakovi na kojima polimeriziraju su znatno viši u odnosu na duromere. [6]

Prednosti plastomernih matrica su: neograničeno dugo skladištenje preprega pri sobnoj temperaturi bez umreživanja, pogodnost za automatizirane postupke prerade, mogućnost postizanja visoke kompaktnosti kompozita, mogućnost recikliranja, brz ciklus proizvodnje i dr. [7]

Polipropilen (PP) je najčešće korišteni polimer kao matrica u kompozitima. Prednosti su mu niska gustoća, staklište na 160 °C, otporan je na zamor materijala te postojan na velik broj kemijskih otapala, lužina i kiselina. Jedan od nedostataka je podložnost degradaciji uslijed izlaganja UV zrakama. Primjenjuje se u automobilskoj industriji (odbojnici, unutrašnjost), za izradu namještaja, čamaca i dr.[7]

Poli(fenilen-sulfid) (PPS) je visoko kristalasti polimer (stupanj kristalnosti do 60 %) s odličnom toplinskom stabilnošću te kemijskom i vatro postojanošću što ga čini atraktivnim materijalom (i dopuštenim, prema FAA) za zrakoplovne interijere. Materijal zadržava dobra svojstva i pri temperaturama do 200 °C kada počinje postupno snižavanje mehaničkih svojstava.[6]

Poli(eter-imid) (PEI) je amorfan plastomer visokih mehaničkih svojstava. Dimenzijski je stabilan (zbog amorfne strukture), ima izraženo malo stezanje te visoko izraženu izotropiju u usporedbi s većinom kristalastih polimera. Visoka  $T_g$  omogućava upotrebu pri temperaturama do 200 °C. Kemijski je vrlo postojan na velik broj kemikalija te na atmosferske utjecaje. Primjenu mu ograničava vrlo visoka viskoznost u rastopljenom stanju. [6]

### ***2.3.6. Proizvodnja vlaknima ojačanih kompozita***

Polimerni kompoziti ojačani vlaknima mogu se proizvesti različitim postupcima, od kojih su najčešći: dodirno laminiranje (polaganje), naštrcavanje, namotavanje, pultrudiranje, izravno prešanje, injekcijsko prešanje, prešanje kapljevine, toplo oblikovanje plastomera i dr. U sljedećem poglavlju tekstu opisan će se neki postupci i njihove karakteristike. [3]

### 2.3.6.1. *Postupci proizvodnje s otvorenim kalupom*

Kod ovih postupaka primjenjuje se samo jedna površina kalupa koja može biti pozitivne ili negativne orijentacije. Najčešće se kao matrice upotrebljavaju duromerne smole poput epoksidne ili poliesterske, a kao ojačavalo vlakna E-stakla. Smola i vlakna nanose se u slojevima sve dok se ne dosegne željena debljina. Vlakna mogu biti u obliku matova, strukova ili pletenih užadi. Primjenom preprega cijeli postupak se može bitno pojednostaviti. Nakon nanošenja slojeva smole i vlakana slijedi postupak umreživanja (očvršćivanja).

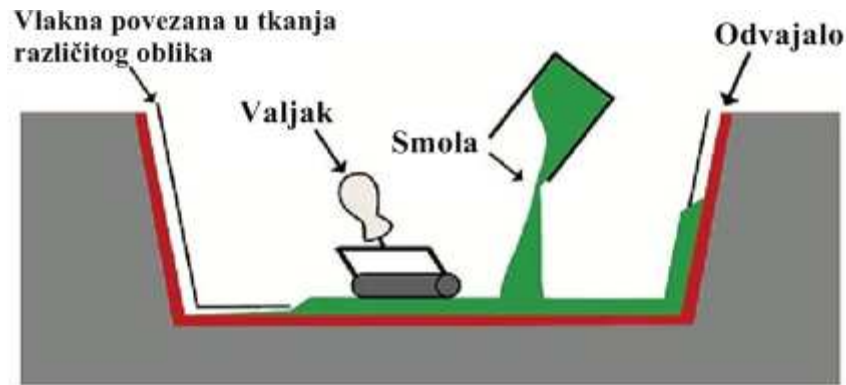
Postupci proizvodnje s otvorenim kalupom imaju niz prednosti pred onima sa zatvorenim kalupom: niža cijena zbog primjene samo jedne strane kalupa, mogućnost dobivanja vrlo velikih i složenih oblika, veći broj različitih kombinacija materijala matrice i ojačavala.

Nedostatak ovog postupka je taj što je glatka samo jedna površina izratka. Kod postupaka proizvodnje s otvorenim kalupom potrebno je uložiti dosta rada kod polaganja slojeva smole i vlakana, što zahtjeva kvalificirane radnike. Nedostatak je i dulje vrijeme umreživanja jer se radi o izradcima velikih dimenzija koje je teže toplinski obraditi. [3]

#### 2.3.6.1.1. *Dodirni postupak laminiranja – ručno polaganje*

Proizvodi od vlaknima ojačanih polimera prvobitno su izrađivani postupkom ručnog laminiranja, a postupak je i danas najčešće upotrebljavan (npr. u izradi plovila i modela). Kod ručnog laminiranja se napovršine izrađenog kalupa nanose odvajalo (olakšava vađenje proizvoda iz kalupa) i materijal matrice (slika 2.21). Potom se polaže sloj ojačanja – pogodno oblikovanih vlakana (npr. satentkanja staklenih vlakana) i ponovo se valjkom nanosi sloj materijala matrice uz istiskivanje zraka. Nadalje se izmjenično nanose slojevi ojačanja i matrice sve do postizanja zahtijevane debljine stijenke proizvoda. Do očvršćivanja dolazi u atmosferskim uvjetima. [6]

Materijali matrica mogu biti gotovo svi duromeri: poliesteri, vinil-ester, epoksidne smole, fenoli, itd. Mogu se rabiti sve vrste vlakana, a problemi se mogu javiti jedino u slučaju primjene aramidnih vlakana koja se ručno teže natapaju. [3]



Slika 2.21. Proizvodnja kompozita laminiranjem [6]

Prednosti postupka: [7]

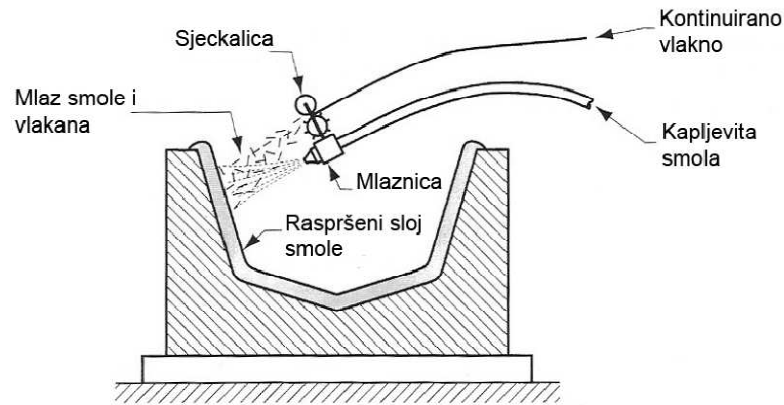
- vrlo jednostavan postupak koji se primjenjuje već dulje vrijeme
- malen trošak izrade alata
- veliki izbor vrsti materijala i dobavljača
- udio vlakana je veći i vlakna su dulja nego u slučaju polaganja naštrcavanjem
- moгуćnost izrade komplicirane geometrije i velikih volumena.

Nedostatci postupka: [6, 7]

- kvaliteta postupka u velikoj mjeri ovisi o vještini radnika
- teško je proizvesti kompozite s malim udjelom smole bez pukotina
- upotrebljavaju se smole niske viskoznosti što znatno utječe na svojstva
- smole obično imaju manju molekularnu masu, što znači da mogu biti štetniji od proizvoda s većom molekularnom masom
- problem je uklanjanje stirena nastalog iz poliestera i vinil-estera.

#### 2.3.6.1.2. Oblikovanje naštrcavanjem

Pri ovom postupku (e. *Spray-up*) vlakno se kontinuirano uvlači u ručni pištolj u kojem se sječe na manje komadiće i dodaje u ulaz tekuće smole (slika 2.22). Takva se mješavina naštrcava u kalup gdje se umrežava u atmosferskim uvjetima. Kao materijal matrice uglavnom se primjenjuju poliesteri, dok se za ojačanje primjenjuje isključivo stakleni roving. [3]



Slika 2.22. Shematski prikaz naštrecavanja [3]

Prednosti postupka: [7]

- a) široka primjena postupka već niz godina
- b) vrlo jeftin način taloženja vlakna i smole
- c) mali trošak izrade alata
- d) visoka brzina.

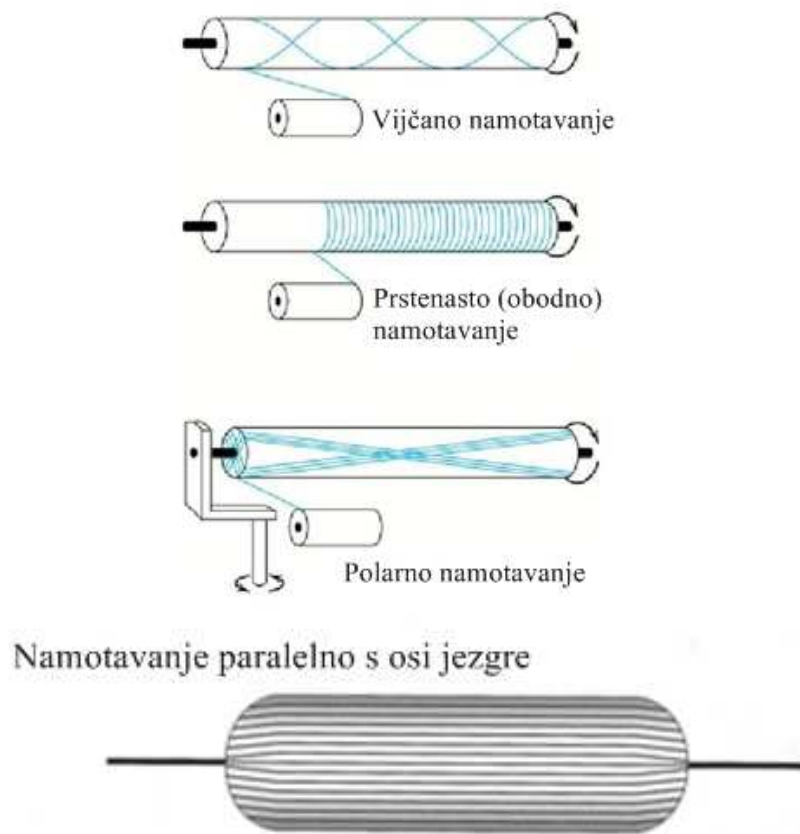
Nedostatci postupka: [3, 7]

- a) potreba za nešto većom količinom smole, što povećava masu kompozitne tvorevine
- b) za ojačanja se upotrebljava samo kratka i sječena vlakna, tako da konačni proizvod ima ograničena mehanička svojstva
- c) smole moraju imati malu viskoznost kako bi se mogle naštrecavati, a to najčešće ide na štetu mehaničkih i toplinskih svojstava
- d) problem može predstavljati i prisutnost stirena čija je uporaba u nekim slučajevima i zakonom ograničena.

### 2.3.6.1.3. Namotavanje

Namotavanje (e. *Filament Winding*) je postupak u kojem se kontinuirana vlakna (niti ili filament) namotavaju na model (obično cilindrični) tako da oblikuju cilindrični izradak. Vlakna se najprije provlače kroz kupku koja sadrži smolu, a zatim se kontinuirano namotavaju na cilindrični model, često primjenom automatizirane opreme za namotavanje. Postoji više načina namotavanja: vijčano, prstenasto (obodno) i polarno o čemu ovise i mehanička svojstva (slika 2.23). Nakon nanošenja niza slojeva slijedi očvršćivanje u peći ili pri sobnoj temperaturi nakon čega se model odstranjuje. Kao alternativa mogu se namotavati

tanki preprezi. Namotavanjem se postiže vrlo visoki omjer čvrstoće i gustoće te visoki stupanj orijentiranosti vlakana. Uobičajene namotavane konstrukcije su oplata (kućišta) raketnih motora, spremnici i dr. [3]



Slika 2.23. Prikaz vijčanog, prstenastog (obodnog), polarnog namotavanja te namotavanja paralelno s osi jezgre [3, 7]

Prednosti postupka: [3, 6]

- vrlo brza i ekonomična izrada s mogućnošću automatiziranja
- mogućnost reguliranja količine smole na vlaknima
- visoki omjer čvrstoće i gustoće, visoki udio vlakana (do 80 %) koji jamči višu čvrstoću
- moгу se dobiti odlična mehanička svojstva kompozita, ako su vlakna položena u smjeru djelovanja opterećenja (postiže se namještanjem kuta namotavanja).

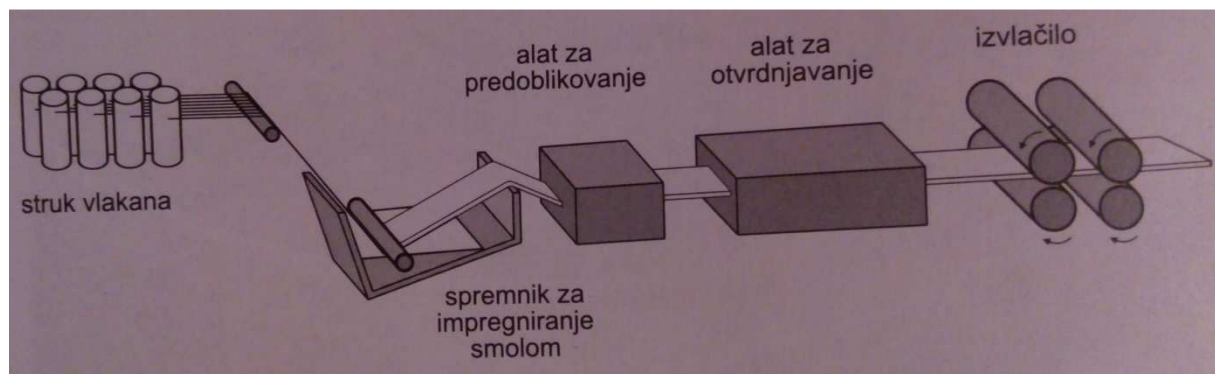
Nedostatci postupka: [3, 5, 6]

- moguća izrada samo osno-simetričnih oblika

- b) u slučaju izrade dijelova velikih dimenzija, troškovi modela na koji se namotava mogu biti visoki
- c) izračunavanje kuta namatanja vlakna
- d) smještaj vlakana na različite oblike nije uvijek lagan (npr. uzdužno)
- e) oblici proizvoda koji se dobivaju su ograničeni.

#### 2.3.6.1.4. Pultrudiranje

Pultrudiranje se primjenjuje za proizvodnju proizvoda konstantnog poprečnog presjeka/oblika različitih duljina (npr. štapovi, cijevi, grede itd.). Ovim postupkom, koji je shematski prikazan slikom 2.24, kontinuirani roving (e. *Roving* = struk; slobodan, neuvijen snop kontinuiranih vlakana koja su izvlačena zajedno u paralelnim snopovima), prethodno impregniran (natopljen) duromernom smolom izvlači/provlači se kroz čelični alat odgovarajućeg oblika (posljedično također odgovarajućeg omjera udjela smole i vlakana). Štapovi nakon toga prolaze kroz alat za očvršćivanje čime se konačno oblikuju; alat je također zagrijavan, u pravilu zato da bi inicirao očvršćivanje matrice. Uređaj za izvlačenje vuče štap kroz alate te time određuje brzinu proizvodnje. Cijevi i šuplji elementi mogu se proizvesti primjenom odgovarajućih oblika alata. Glavna ojačavala su staklena, ugljična te aramidna vlakna uobičajenih udjela od 40 do 70 vol. %. Matrice su najčešće od poliesterskih, vinilesterskih te epoksidnih smola. [2]



Slika 2.24. Shematski prikaz postupka pultrudiranja [2]

Prednosti postupka pultrudiranja jesu: [6]

- a) brz, ekonomičan postupak;
- b) homogen materijal i svojstva;
- c) visoka čvrstoća i dobra mehanička svojstva u smjeru vlakana;

- d) kemijska postojanost;
- e) pogodnost obrade odvajanjem čestica;
- f) dobra kvaliteta površine;
- g) neograničena duljina profila;
- h) komplicirani profili.

Nedostatci postupka pultrudiranje jesu: [6]

- a) anizotropnost (dobra mehanička svojstva samo u uzdužnom smjeru);
- b) izrada isključivo profila;
- c) ograničena veličina u poprečnom smjeru;
- d) visoka cijena alata (velika ulaganja u opremu).

### 2.3.6.2. *Postupci proizvodnje sa zatvorenim kalupom*

Postupci proizvodnje sa zatvorenim kalupom dosta su česti kod izrade kompozita. Dijele se na postupke posrednog prešanja, izravnog prešanja i injekcijskog prešanja. [3]

#### 2.3.6.2.1. Izravno prešanje

Izravno prešanje može se izvesti u hladnom ili grijanom kalupu.

Kod hladnog izravnog prešanja kalup se najprije premazuje odvajalom i gelnom prevlakom. Zatim se u kalup ulaže predoblik za ojačavanje načinjen od tkanine i potom se ulijeva smola. Nakon toga se kalup zatvara te smola umrežava pri sobnoj temperaturi. Prednosti ovog postupka su dobra kvaliteta otpresaka, nema potrebe za grijanjem kalupa, sile držanja kalupa su niske što pojeftinjuje proizvodnju, a nedostatak je niža proizvodnost.[3]

Kod toplog izravnog prešanja pločasti osmoljeni matovi (SMC), vlaknasti preprezi (BMC) ili debeli pločasti osmoljeni matovi (TMC) ulažu se u grijani kalup preše. Djelovanjem tlaka i povišene temperature postiže se tečenje smjese smole i vlakana u kalupu. Smjer tečenja određuje orijentaciju vlakana. Nakon što je kalupna šupljina popunjena slijedi umreživanje pri čemu je kalup još uvijek pod tlakom. Nakon što otpresak dovoljno očvrstne on se vadi iz kalupa, a umreživanje se može nastaviti u peći.[3]



Otpresci su visoke krutosti i čvrstoće i imaju visoku kvalitetu površine, a postupak je prikladan za masovnu proizvodnju. Nedostaci su skupi strojevi i kalupi, potreba za pripremom i pravilnim umetanjem pripremaka. [3]

#### 2.3.6.2.2. Injekcijsko prešanje

Injekcijsko prešanje vlaknima ojačanih duromera i plastomera čest je postupak proizvodnje kompozitnih izradaka. Postoji nekoliko inačica tog postupka ovisno o tome je li se injekcijski preša smjesa smole i ojačavala, ili se sama smola preša u kalup u koji je već položena tkanina kao ojačavalo. Umjesto predtlaka smola se može infiltrirati podtlakom. Pri injekcijskom ili posrednom prešanju kapljevita smola se pod tlakom ubrizgava u kalupnu šupljinu na uloženi trodimenzionalni predoblik tkanine (e. *RTM – Resin Transfer Moulding*). Kao materijali rabe se nezasićene poliesterske smole, epoksidne smole i fenolne smole s umreživalima, s udjelom ojačavala i do 70 %. Postupak se odvija u autoklavu uz diferencijalni tlak, a ciklus traje relativno kratko (oko 15 minuta) budući da grijani kalup ubrzava umreživanje.[3]

Inačice injekcijskog prešanja jesu:[3]

1. reakcijsko injekcijsko prešanje kompozita (e. *RRIM – Reinforced Reaction Injection Moulding*);
2. reakcijsko injekcijsko prešanje integralnih pjenastih duromernih otpresaka s predoblikovanim ojačavalom (e. *SRIM – Structural Reaction Injection Moulding*).

Prednosti RRIM i SRIM postupaka jesu: automatizirano doziranje i miješanje, dobra kvaliteta površine, primjenjivost za srednje velike serije i umjereni troškovi rada. Nedostaci su: značajna ulaganja u stroj i kalup, opasnost od krivog ulaganja tkanine, te ograničenost veličine otpresaka dimenzijama stroja.[3]

Postoji niz drugih inačica injekcijskog prešanja: [3]

1. podtlačno ulijevanje (e. *RI – Resin Infusion*) i podtlačno ulijevanje s filmom (e. *RFI – Resin Film Infusion*) te podtlačno ulijevanje Seeman (e. *SCRIMP – Seeman Composite Resin Infusion Molding*)
2. podtlačno injekcijsko prešanje kapljevite smole s ulošnim trodimenzionalnim predoblikom (e. *VARTM – Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding*). To je kombinacija RTM-a i podtlačnog injekcijskog prešanja (e. *VI – Vacuum Infusion*) s

krutim ili fleksibilnim kalupima. Smola i vlakna nanose se na kalup, a laminat se oblikuje zajedničkim djelovanjem stlačenog zraka i podtlaka u autoklavu uz diferencijalni tlak. Laminat je prekriven elastičnom folijom – vrećom od gume, polietilena i sl.

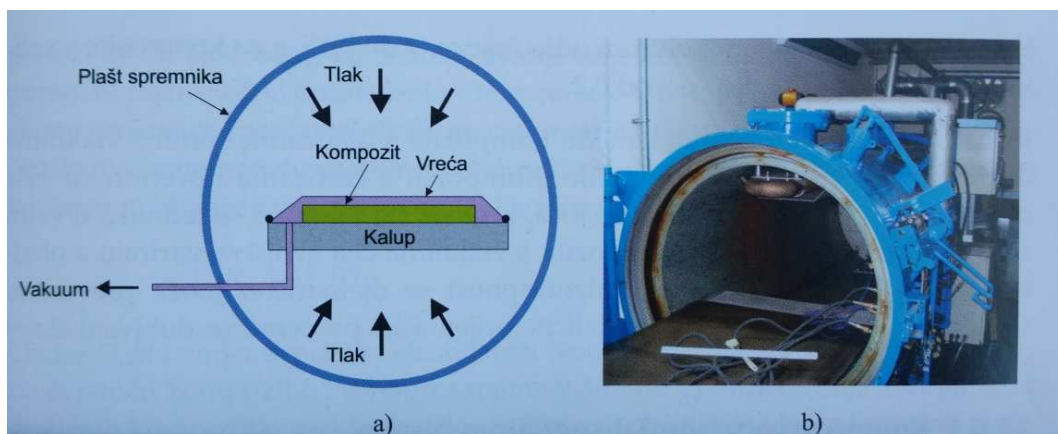
- injekcijsko posredno prešanje kapljevite smole sa savitljivom dijafragmom i krutim postoljem (e. *SMARTM - Supported Mould Assisted Resin Transfer Moulding*). Ovaj je postupak vrlo ekonomičan i pogodan za proizvodnju srednje velikih serija (desetci tisuća) kompozitnih otpresaka dobrih svojstava.

Većina ovih postupaka je razvijena unatrag desetak godina s ciljem oblikovanja kompozitnih dijelova u kalupu na gotovo konačan oblik i sa što nižim troškovima.[3]

Više o RTM postupku nalazi se u četvrtom poglavlju.

### 2.3.6.2.3. Umreživanje u autoklavu

Autoklav je posebna komora pod tlakom u kojoj se provodi umreživanje (slika 2.25). Plinovi kao što su dušik, ugljični dioksid ili njihove smjese sa zrakom u autoklavu se nalaze pod tlakom od maksimalno 15 MPa. Autoklavne komore se griju plinom ili električno do temperature maks. 700 °C. [3]



Slika 2.25. Shematski prikaz umreživanja u autoklavu (a) i izgled stvarnog autoklava (b) [3]

Autoklavno oblikovanje (e. *Autoclave Moulding*) podrazumijeva uporabu preprega, ali se mogu umreživati i drugi predoblici kompozita koji su dobiveni mokrim laminiranjem ili umreživanjem kaučukove smjese. Kod autoklavnog oblikovanja rabe se preprezi sa staklenim, ugljičnim, aramidnim, plastomernim, borovim, te SiC i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vlaknima.[3]

Postupak započinje sječenjem traka preprega u željeni oblik i zatim se višeslojni prepreg, s prije definiranom orijentacijom ojačanja u pojedinim slojevima ulaže u komoru. Prepreg se preša pod tlakom pomoću gumene vreće. Preprezi umrežuju pri povišenom tlaku i temperaturi što omogućuje odgovarajuće istiskivanje viška smole iz slojeva i kraće vrijeme umreživanja. Cijeli postupak očvršćivanja traje oko 6 sati s time da se u prvom satu pri temperaturi od oko 125 °C i pod tlakom istiskuje smola, a zatim slijedi umreživanje pri oko 175 °C. Računalnim upravljanjem parametara mogu se postići željeni ciklusi umreživanja. [3]

Ovaj postupak autoklavnog oblikovanja većinom se primjenjuje u zrakoplovnoj industriji zbog postizanja visoke kvalitete i točnosti dimenzija kompozitne tvorevine. Nedostatci su potreba za održavanjem stalnog tlaka i temperature, dugotrajnost postupka, veliki udio ljudskog rada, neprikladnost za serijsku proizvodnju i potreba za dodatnim materijalima. [3]

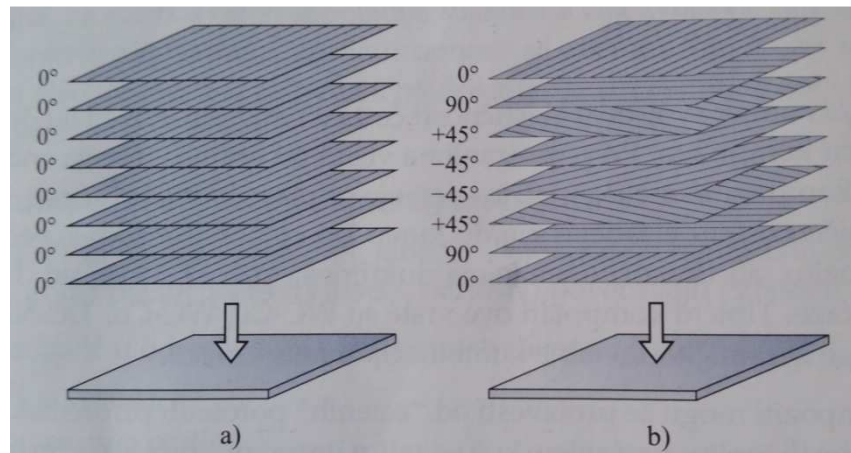
## **2.4. Strukturni kompoziti**

Slojevite kompozitne materijale i sendvič konstrukcije mogle bi se nazvati "strukturni kompoziti". Uobičajeno je da su "strukturni kompoziti" sastavljeni od homogenog i kompozitnog materijala čija svojstva ne ovise samo o svojstvima konstitutivnih materijala, već i o geometrijskom rasporedu elemenata konstrukcije. Predstavnici uobičajenih strukturnih kompozita su laminatne konstrukcije (slojevite) i sendvič konstrukcije. [2]

### **2.4.1. Laminati (slojeviti kompozitni materijali)**

Slojevite (laminatne) konstrukcije odnosno odgovarajući kompoziti sastavljeni su od dvodimenzionalnih slojeva ili ploča ("panela") s preferiranim smjerom visoke čvrstoće, kao što se npr. susreće kod drva, odnosno kod usmjerenih vlaknima ojačanih polimernih materijala. Slojevi su složeni i dodatno međusobno čvrsto povezani, a svojstva variraju obzirom na orijentiranje vlakana (smjerovi visoke čvrstoće) u pojedinim slojevima. Slojevi se mogu razlikovati u materijalu, po orijentaciji ojačanja ili njegovom obliku. Platirani metali su primjer metalnih laminata, gdje vanjski slojevi općenito moraju zadovoljiti neki od zahtjeva kao što su postojanost na koroziju ili otpornost na trošenje odnosno poboljšati izgled proizvoda, dok unutrašnji sloj mora imati visoku čvrstoću. Druge kombinacije uključuju metal/polimer, polimer/polimer i slične varijacije materijala. [2, 3]

Kompoziti koji su ojačani polaganjem vlakana u jednom smjeru (slika 2.26.a) imaju usmjerena svojstva i općenito su čvršći i krući u smjeru polaganja vlakana, nego poprečno na taj smjer. S druge strane, modul smičnosti postiže svoj maksimum kada kut između vlakana i osi glavnog opterećenja iznosi  $45^\circ$ . Kako bi se smanjila anizotropija svojstava i omogućila uporaba kompozita u sustavima višesmjernog opterećenja, potrebno je načiniti laminat s više slojeva, od kojih svaki ima drugačije usmjerenje vlakana (slika 2.26.b).



Slika 2.26. Struktura laminata s različitim smjerovima polaganja vlakna u slojevima; a) jednosmjerno polaganje; b) višesmjerno polaganje [3]

Dobra prionjivost u graničnim područjima matrica/ojačavalo i čvrstoća vezanja slojeva odlučujući su za mehaničku otpornost i trajnost laminata. Iz toga je razloga međuslojna čvrstoća jedan od najvažnijih pokazatelja za procjenu kvalitete slojevitih kompozita. [3]

#### 2.4.2. Sendvič konstrukcije

Sendvič konstrukcije sastoje se od dvaju čvrstih i krutih tankih vanjskih slojeva od metala, polimera, kompozita ili drva, između kojih se nalazi jezgra od znatno lakšeg materijala. Zahvaljujući maloj masi odlikuju se visokom specifičnom čvrstoćom i visokom specifičnom krutošću. [3]

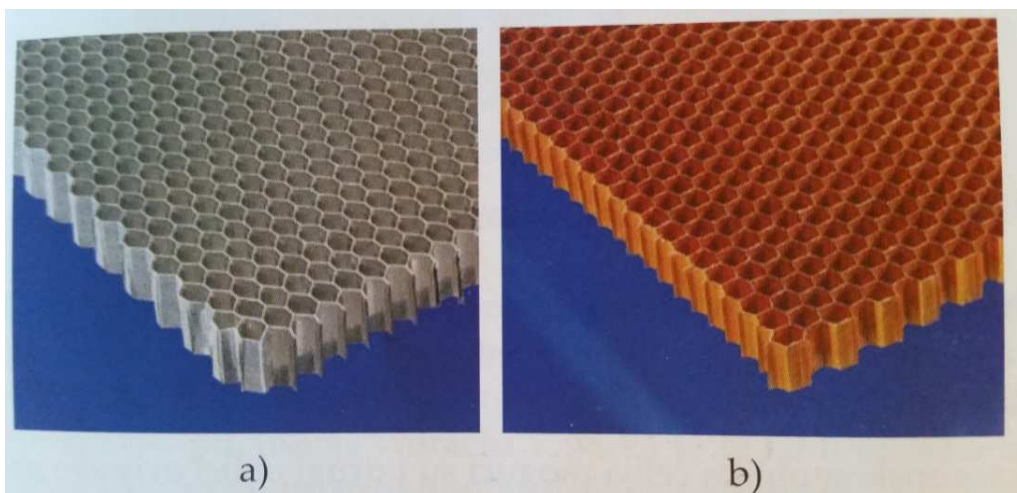
Materijali za jezgre moraju ispunjavati specifične zahtjeve za što manjom masom, prigušenjem zvuka i energije udara, toplinskom izolacijom i sličnim svojstvima. [3]

Jezgra mora zadovoljiti i posebne zahtjeve kao što su: [3]

- a) dovoljna krutost u smjeru okomitom na ravninu vanjskih slojeva kako bi se održao dovoljan razmak između njih i da bi se spriječilo nabiranje vanjskih slojeva pod utjecajem tlačnih opterećenja
- b) dovoljna smična čvrstoća da pri djelovanju savojnog opterećenja ne bi došlo do klizanja vanjskih slojeva.

Sljedeći metalni i nemetalni materijali primjenjuju se za jezgre: [3]

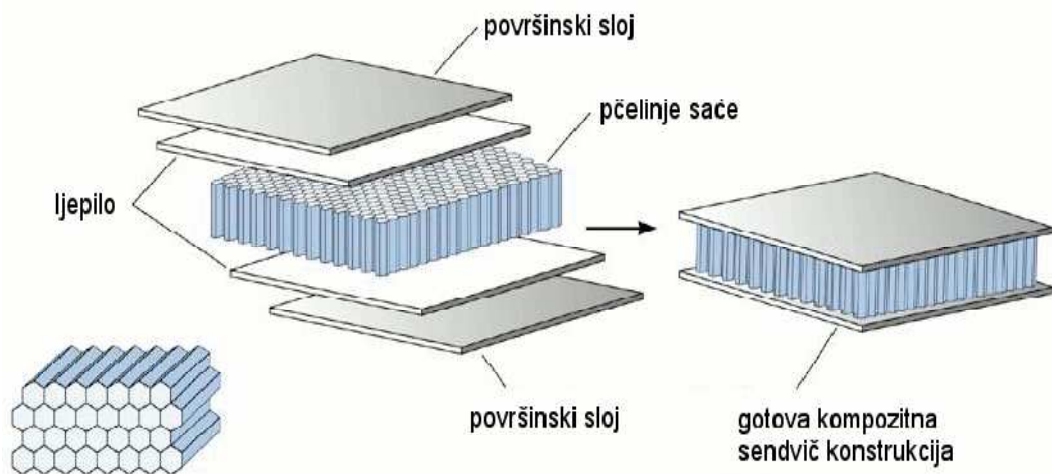
1. metali (najčešće aluminij) i aramidni papir (Nomex) u obliku heksagonskih ćelija (saća) – slika 2.27, ali i u drugim pravilnim oblicima otvorenih ćelija;
2. polimerne pjene od poli(vinil-klorida) (PVC), polistirena (PS), poliuretana (PUR), polieterimida (PEI), akrilne pjene; u primjeni se nalaze pjene gustoće od 40 do 200 kg/m<sup>3</sup> i debljine 5 do 50 mm;
3. aluminijeve i magnezijeve pjene;
4. aluminijevi ili polimerni kompoziti (aramidna vlakna u kombinaciji s akrilnitril/butadien/stirenskom (ABS), polikarbonatnom (PC), polipropilenskom (PP) ili polietilenskom (PE) matricom) u obliku saća;
5. drvo (balza, cedar).



Slika 2.27. Izgled saćastih jezgri od aluminija (a) i Nomexa (b) [3]

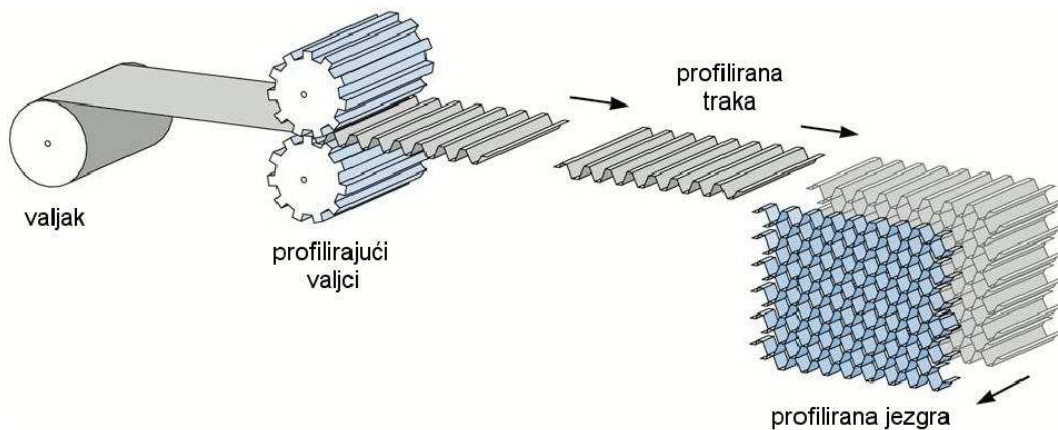
Površinski slojevi mogu biti, a često i jesu, načinjeni od materijala više čvrstoće i krutosti. Za vanjske slojeve preferiraju se legure aluminija, vlaknima ojačani polimerni kompoziti, titanove legure i čelik. Spajanje jezgre i površinskih slojeva izvodi se uglavnom lijepljenjem, laserskim zavarivanjem i sličnim postupcima. [3]

U zrakoplovstvu je osobito raširena sendvič konstrukcija s aluminijskom jezgrom heksagonskog oblika pčelinjih saća i s tankim vanjskim slojevima, većinom od Al-limova ili laminata (slika 2.28). Time se dobiva vrlo postojan, krut, čvrst i izuzetno lagan sendvič. [3]



Slika 2.28. Kompozitni sendvič s jezgrom u obliku pčelinjeg saća [3]

Slika 2.29 prikazuje postupak oblikovanja saćastih aluminijskih jezgri profiliranjem limova. [3]



Slika 2.29. Shematski prikaz izrade saćastih aluminijskih jezgri profiliranjem [6]

Valjane Al-folije ili limovi oblikuju se u željeni oblik provlačenjem kroz profilirane valjke te se tako profilirani međusobno povezuju tvoreći strukturu sa šesterokutnim ćelijama. Osim heksagonskog oblika ćelija mogući su i drugi oblici ovisno o načinu filiranja. [3]

Sendvič paneli imaju široku primjenu, npr.: krovovi, podovi i zidovi zgrada; oplata krila, trupa i repa zrakoplova. [2]

## 2.5. Ugljik-ugljik kompoziti (C/C)

Radi se o relativno novim i vrlo skupim materijalima kod kojih su i matrica i ojačalo od ugljika. Razlog visoke cijene je u vrlo složenom postupku proizvodnje kojim se čista ugljična vlakna ugrađuju u piroliziranu ugljičnu matricu (slika 2.30).[3]

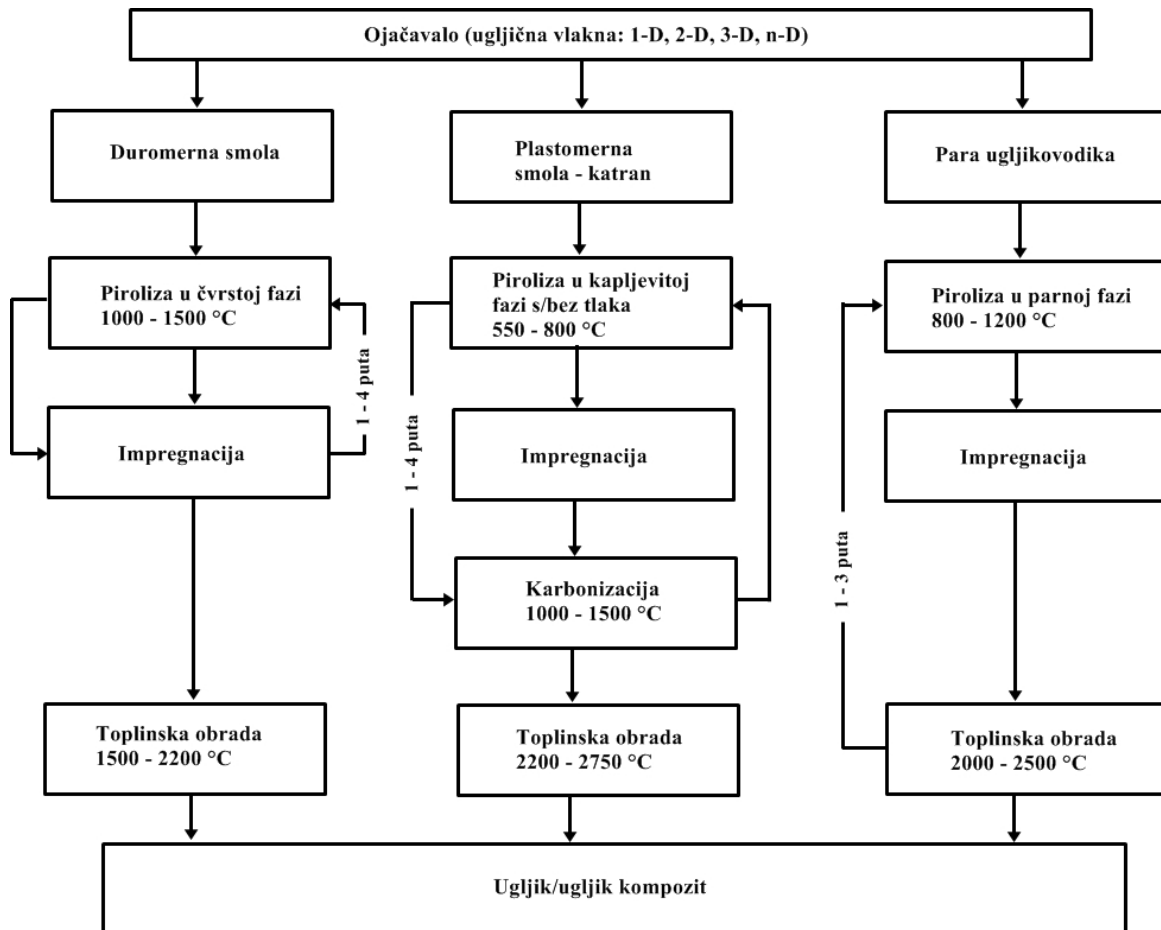
C/C kompoziti se mogu proizvesti različitim tehnologijama. Najčešće se primjenjuju tri postupka: [3]

- a) piroliza iz duromernih smola;
- b) karbonizacija;
- c) CVD (e. *Chemical Vapour Deposition* – kemijsko prevlačenje iz parne faze) postupak.

Prva faza kod svih postupaka je slaganje ugljičnih predoblika. Može se raditi o spletu vlakana raspoređenih u jednom ili više smjerova, ili to mogu biti različite porozne ugljične strukture. Na te predoblike dodaje se matrica koja se zatim sjedinjuje s ojačanjima različitim postupcima. Jedan od njih je tzv. CVI (e. *Chemical Vapour Infiltration* – kemijska infiltracija u parnoj fazi). Zgušnjavanje se postiže infiltracijom plinovitih ugljikovodika kao što su metan ili propan u porozne oblike pri temperaturama od 1000 °C do 1400 °C. Kako bi se postigla potpuna gustoća kompozita, nužno je ponavljanje infiltracija što produljuje ukupno trajanje postupka. [3]

Drugi način je impregnacija predoblika s kapljevitom smjesom katran/fenolna smola, a zatim slijedi proces karbonizacije pri vrlo visokim temperaturama (od 1000 do 2700 °C). Piroliza katran/smola matrice može se odvijati pri povišenim ili normalnim tlakovima. Taj proces zahtijeva više ponavljanja, ali je njihov broj manji nego u slučaju prethodno opisanog procesa. [3]

Primjenjuju se u raketnim motorima i konstrukcijama suvremenih vojnih zrakoplova. [6]



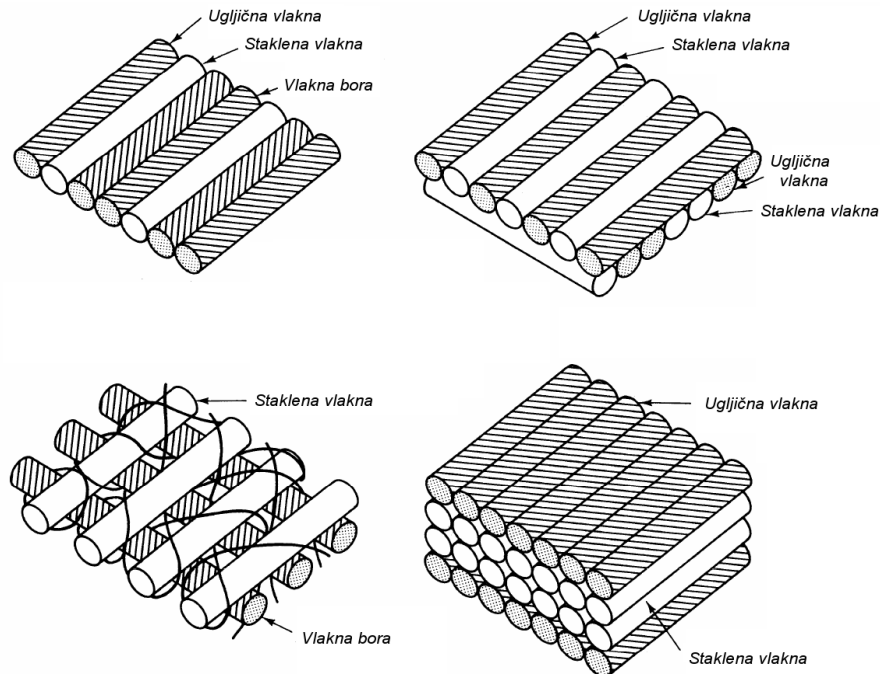
Slika 2.30. Postupci proizvodnje C/C kompozita [3]

## 2.6. Hibridni kompoziti

Relativno novija vrsta vlaknima ojačanih kompozita su tzv. hibridni kompoziti koji se dobivaju uporabom više vrsta vlakana u jedinstvenoj matrici. Velika prednost ovakvih kompozita je znatno bolja kombinacija svojstava, nego što je to kod kompozita ojačanih samo jednom vrstom vlakana. Postoje razne kombinacije vlakana i matrica, ali ipak najčešće se primjenjuju ugljična i staklena vlakna u polimernoj matrici (slika 2.31). Ugljična vlakna imaju relativno visoku čvrstoću i krutost te nisku gustoću. Visoka cijena često je faktor koji ograničava njihovu širu primjenu. Nasuprot ugljičnim vlaknima nalaze se staklena vlakna koja imaju lošija mehanička svojstva, ali im je cijena znatno niža. Kombiniranjem spomenutih vlakana dobiva se kompozit više čvrstoće i žilavosti, te relativno niže cijene u usporedbi samo sa staklenim ili ugljičnim vlaknima ojačanim kompozitima. Postoji vrlo velik broj načina slaganja vlakana u matrici što za posljedicu ima i različita svojstva kompozita. Tako, na primjer, vlakna mogu biti usmjerena u jednom smjeru ili orijentirana u različitim smjerovima, laminati se mogu slagati iz različitih slojeva pri čemu je svaki sloj sastavljen od drugog tipa



ojačavala. Kada je ovakav kompozit rastezno opterećen, lom se ne pojavljuje iznenada. Tipična primjena hibridnih kompozita su razni dijelovi konstrukcija primjenjivih u kopnom, zračnom i pomorskom prometu, sportski rekviziti te razna ortopedska pomagala. [3]



Slika 2.31. Vrste vlakana i načini slaganja tih vlakana u matrici hibridnih kompozita [6]

U tablici 2.7 navedeni su neki primjeri hibridnih kompozita i njihova svojstva. [3]

Tablica 2.7. Svojstva hibridnih kompozita[3]

Ojačanje ugljičnim i aramidnim vlaknima	<ul style="list-style-type: none"> <li>- dobra žilavost i rastezna čvrstoća od aramida</li> <li>- dobra pritisna i rastezna čvrstoća od ugljičnih vlakana</li> <li>- niska gustoća, ali relativno visoka cijena</li> </ul>
Ojačanje aramidnim i staklenim vlaknima	<ul style="list-style-type: none"> <li>- mala gustoća, dobra žilavost i rastezna čvrstoća od aramida</li> <li>- pritisna i rastezna čvrstoća od stakla</li> <li>- niska cijena</li> </ul>
Ojačanje ugljičnim i staklenim vlaknima	<ul style="list-style-type: none"> <li>- dobra pritisna i rastezna čvrstoća, krutost i niska gustoća od ugljičnih vlakana, niska cijena</li> </ul>

### **3. LIGHT RTM (LRTM - LAKO PODTLAČNO INJEKCIJSKO PREŠANJE KAPLJEVITE SMOLE SULOŽENIM TRODIMENZIONALNIM OJAČAVAJUĆIM PREDOBLIKOM)**

Postupak LRTM (e. *Light Resin Transfer Moulding*) ili lako podtlačno injekcijsko prešanje kapljevite smole s uloženim trodimenzionalnim ojačavajućim predoblikomspada u postupke oblikovanja sa zatvorenim kalupom. Postupak je kombinacija RTM (e. *Resin Transfer Moulding*) i podtlačnog injekcijskog prešanja (e. *VI – Vacuum Infusion*) s krutim ili fleksibilnim kalupima. Postupak je razvijen s ciljem oblikovanja kompozitnih dijelova u kalupu na gotovo konačan oblik i sa što nižim troškovima. Postupak se primjenjuje za proizvodnju kompozitnih dijelova veličine serije 200 – 5000 po godini i ima smanjene troškove rada i izrade alata (kalupa) uz visoku produktivnost, te zbog toga istiskuje tradicionalni RTM postupak. Postupak se još može naći u literaturi kao VARTM (e. *Vacuum Assited Resin Transfer Moulding*) ili VRTM (e. *Vacuum Resin Transfer Moulding*). [3, 11, 12, 13]

PostupakLRTM primjenjuje se u: [3, 10]

- brodogradnji
- proizvodnji sportske opreme
- proizvodnji kompozitnih dijelova u zrakoplovnoj industriji
- proizvodnji dijelova za automobile
- proizvodnji lopatica vjetroturbina
- proizvodnji robe široke potrošnje itd.

Za LRTM postupakpotreban je podtlak za ubrizgavanje kapljevite smole u zatvoreni kalup i kao mehanizam za stezanje gornjeg i donjeg dijela kalupa između kojeg se nalazi ojačavajući predoblik (tkanina, vlakna i sl.).

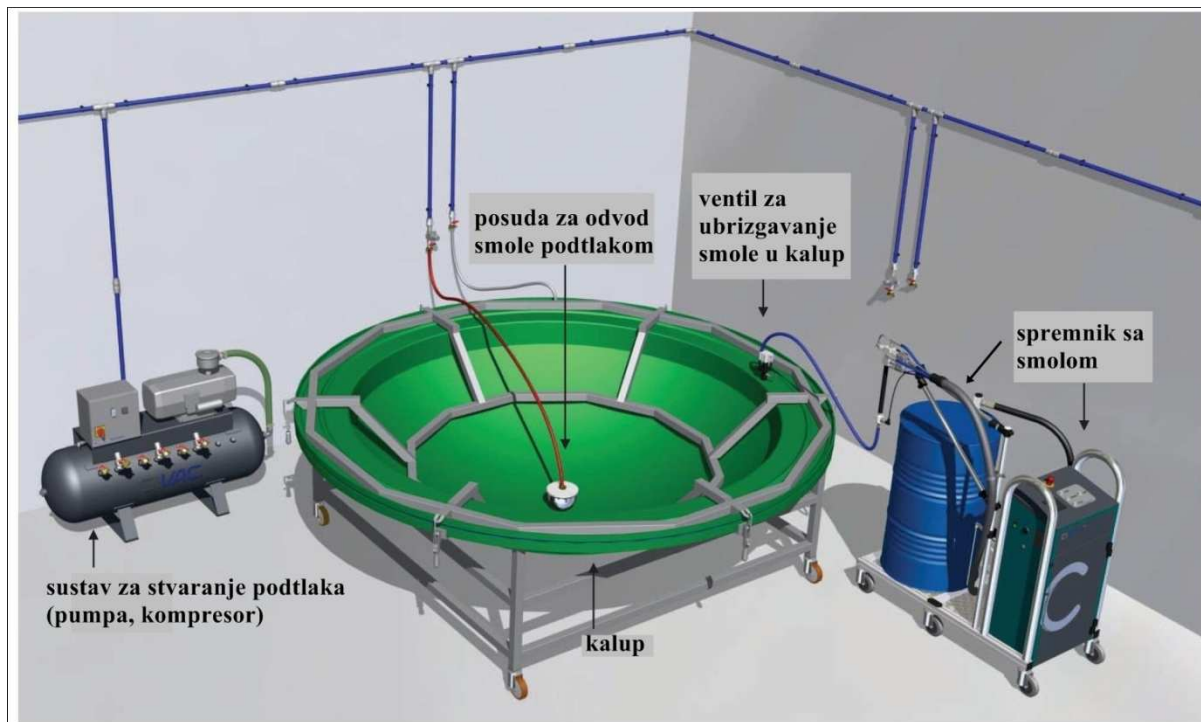
Postupak se općenito sastoji od sljedećih koraka: [14]

- 1) priprema kalupa (opcija: s ili bez gelne prevlake)
- 2) postavljanje ojačavala ili materijala jezgre u donji kalup
- 3) zatvaranje kalupa
- 4) ubrizgavanje smole u kalup (predtlakom ili podtlakom)

- 5) zasićenje ojačavala smolom
- 6) umreživanje smole
- 7) razdvajanje polovica kalupa i vađenje proizvoda iz kalupa.

### 3.1. Oprema

Osnovni dijelovi opreme postupka LRTM prikazani su slikom 3.1, a detaljniji opis opreme i postupka prikazan je slikama 3.2 i 3.3.



Slika 3.1. Glavni dijelovi opreme potrebni za LRTM postupak [12]

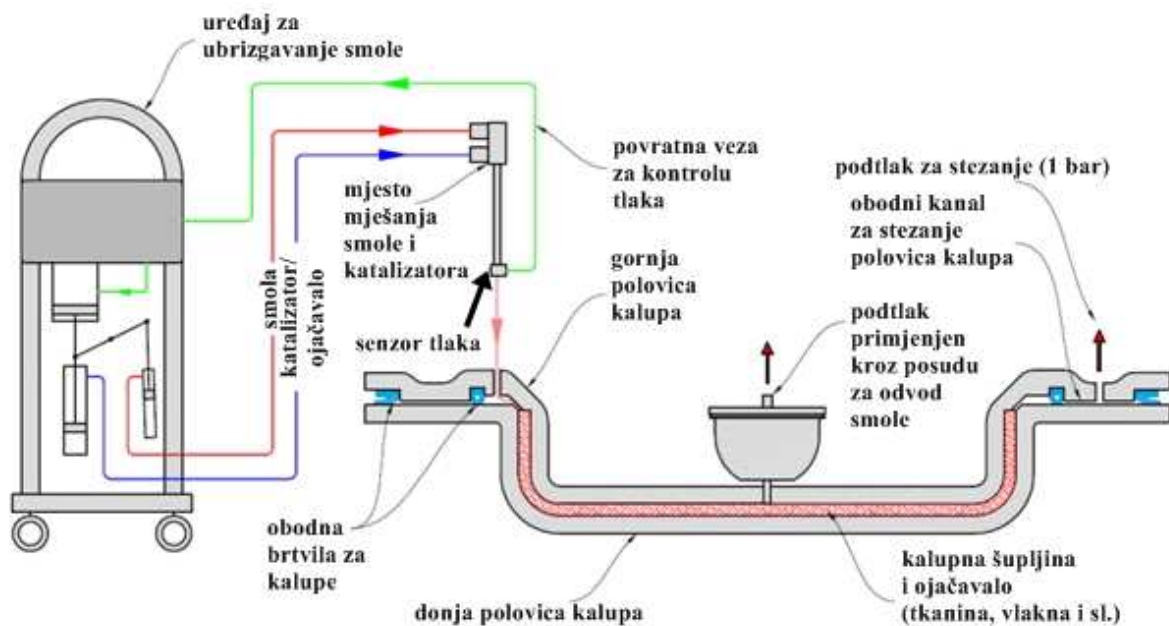
Slika 3.1 prikazuje sustav za stvaranje podtlaka (pumpa, kompresor) (e. *Vacuum System*), posudu za odvod smole podtlakom (e. *Vacuum Catch Pot*), spojene polovice kalupa (e. *Mould*), ventil za ubrizgavanje smole u kalup (e. *Injection Valve*) i uređaj za ubrizgavanje smole (spremnik sa smolom) (e. *Injection Machine*).

Slika 3.2 prikazuje dijelove opreme za LRTM postupak: [12]

- uređaj za ubrizgavanje smole (e. *Injection machine*)
- smola (e. *Resin*)
- katalizator/ojačavalo (e. *Catalyst/Hardener*)

- mjesto mješanja smole i katalizatora/ojačavala (e. *Mix head*)
- senzor tlaka (e. *Pressure sensor*)
- povratna veza za kontrolu tlaka (e. *Pressure control feedback*)
- gornjapolovica kalupa (e. *Upper Mould*)
- obodna brtvila za kalupe (e. *Peripheral mould seals*)
- donjapolovica kalupa (e. *Lower Mould*)
- kalupna šupljina i ojačavalo (tkanina, vlakna i sl.) (e. *Mould cavity containing reinforcement*)
- podtlak (0,5 bara) primjenjen kroz posudu (usisni priključak cijevi) za odvod smole; strelica pokazuje smjer djelovanja podtlaka na slici 3.2 (e. *Vacuum applied through catchpot (0,5 bar)*)
- obodni kanal koji služi za stezanje dvije polovice kalupa (e. *Peripheral channel, used to clamp mould halves together*)
- podtlak za stezanje (1 bar) (e. *Vacuum (1bar)*).

Strelice na slici 3.2 prikazuju smjer gibanje smole, katalizatora i smjese poslije miješanja pod utjecajem podtlaka, kao i kontrolu (regulaciju) tlaka povratnom vezom, te smjer djelovanja podtlaka za stezanje dvije polovice kalupa.



Slika 3.2. Dijelovi opreme za postupak LRTM [12]

Glavni dio uređaja za ubrizgavanje smole je podtlačna pumpa koja za postupak LRTM mora biti u mogućnosti postizanja tlaka u iznosu 1 bara. Pumpe koje se primjenjuje u postupku LRTM karakterizira kapacitet protoka u većini slučajeva u iznosu 25 m<sup>3</sup>/h. U principu postupak LRTM ne troši (vuče) veliki volumen smole pri ubrizgavanju. Povećanjem broja kalupa i cijevi, koji mogu imati sitna propuštanja, može dovesti do smanjenja efektivnog kapaciteta pumpe u ubrizgavanju smole što uzrokuje neželjene padove tlaka i probleme stezanja kalupa. [12, 14]

Smola se ubrizgava iz posude i miješa se s katalizatorom u mjestu za mješanje, te izmiješana kroz cijev putuje u kalupnu šupljinu gdje se nalazi ojačavalo (vlakna u obliku tkanina, mata ili predoblika). Smole se odabiru prema parametrima viskoznosti i reaktivnosti. U postupku LRTM upotrebljavaju se smole male viskoznosti kako bi se smanjilo vrijeme popunjavanja kalupa. Prikladna viskoznost smole za postupak LRTM kreće se između 100 – 250 mPas. Reaktivnost opisuje vrijeme koje je potrebno smoli u prijelazu iz kapljevine u gumasto stanje, pa u čvrstu fazu. Iznos tog vremena je bitan jer je u postupku LRTM potrebno osigurati dovoljno vremena da smola može ispuniti cijelu kalupnu šupljinu, te se ostavlja kratak sigurnosni interval vremena ako dođe do gašenja stroja pri ubrizgavanju smole. [12, 14]

Obodna brtvila za kalupe brtve donju i gornju polovicu kalupa na dva mjesta po cijelom opsegu i onemogućavaju izlazak smole izvan kalupa. [12]

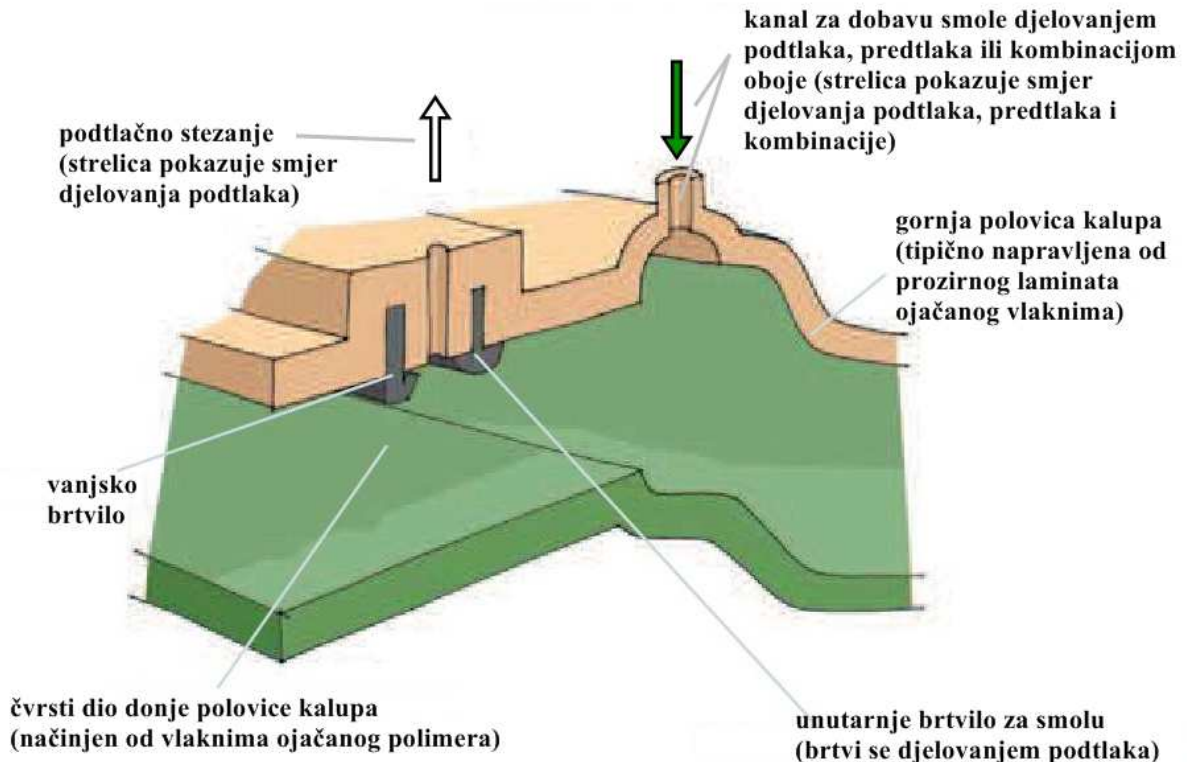
Obodni kanal povezuje dvije polovice kalupa djelovanjem podtlaka u iznosu od 1 bara i nalazi se između dva obodna brtvila za kalupe. [12]

Odvodnik smole služi kao posuda u koju se skuplja višak smole iz kalupa i blokira ulaz smole u podtlačnu pumpu. [16, 14]

Slika 3.3 detaljnije prikazuje neke dijelove i postupke (stezanje polovica kalupa podtlakom i dobavljanje smole podtlakom, predtlakom malog iznosa ili kombinacijom oboje) kao što su: [14]

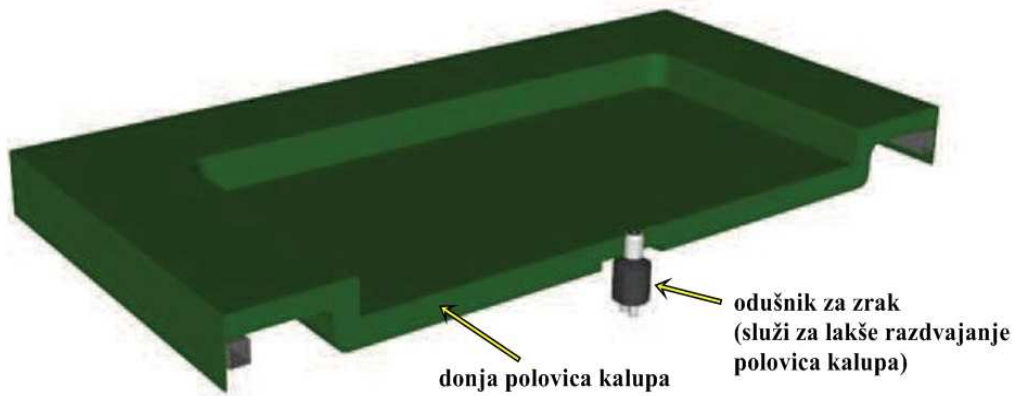
- čvrsti dio donjeg kalupa načinjen od vlaknima ojačanog polimera (e. *Rigid mould*)
- vanjsko brtvilo (e. *Closing seal*)
- unutanje brtvilo za smolu (brtvi se djelovanjem podtlaka)(e. *Resin vacuum seal*)

- podtlačno stezanje, strelica pokazuje smjer djelovanja podtlaka (e. *Vacuum clamping*)
- kanal za dobavu smole djelovanjem podtlaka, predtlaka malog iznosa ili kombinacijom oboje; strelica pokazuje smjer djelovanja podtlaka, predtlaka i kombinacije (e. *Resin feed channel by vacuum or light pressure or combination*)
- gornji kalup male mase (tipično napravljen od prozirnog laminata ojačanog vlaknima)(e. *Lightweight upper mould (typically transparent FRP laminate)*)



Slika 3.3. Detaljniji prikaz nekih dijelova i postupaka [14]

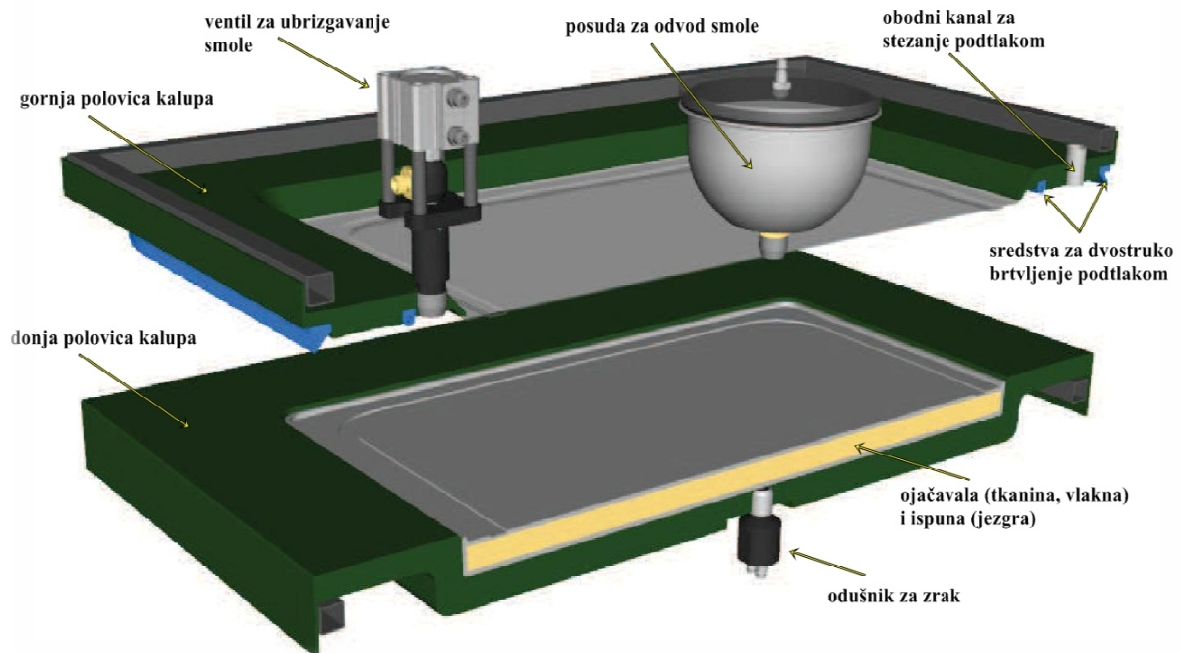
Slika 3.4 pokazuje na donjoj polovicikalupaodušnik za zrak (e. *Air Ejector*) koji služi za odvod/dovod zraka pri čemu se lakše razdvajaju polovice kalupa kod završetka postupka LRTM.



Slika 3.4. Donji dio kalupa i odušnik za zrak [12]

### 3.2. Opis postupka LRTM

Prije početka opisa postupka LRTM, slika 3.5 prikazuje položaj donje i gornje polovice kalupa, posude za odvod smole, ventila za ubrizgavanje smole, sredstva za dvostruko brtvljenje podtlakom, obodnog kanala za stezanje podtlakom, ojačavala (tkanina, vlakna) i ispune (jezgra) u donjoj polovici kalupa i odušnika za zrak.



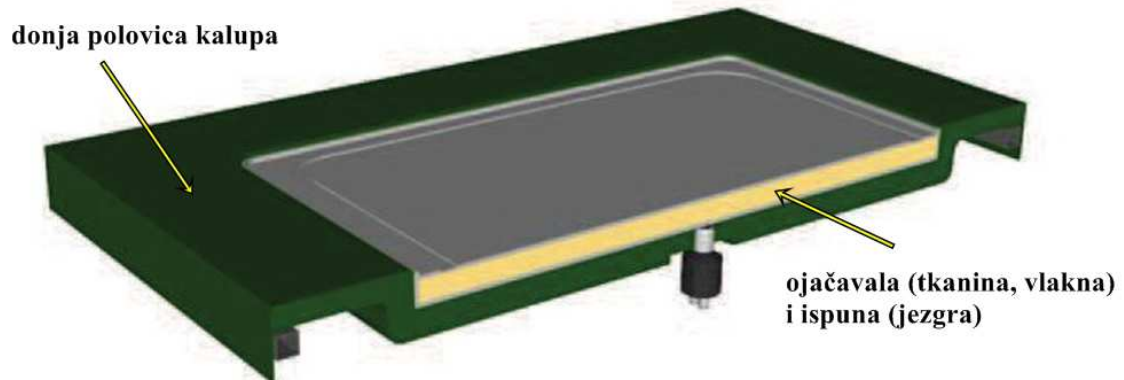
Slika 3.5. Gornja i donja polovica kalupa i ostali dijelovi opreme [12]



Postupak LRTM sastoji se od nekoliko koraka:

1. korak (slika 3.6):

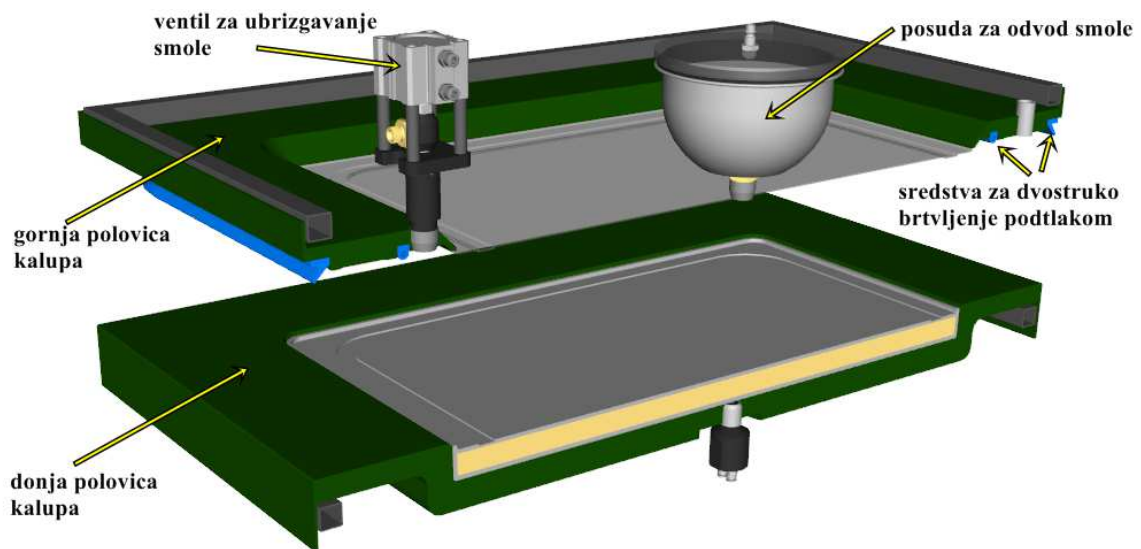
- priprema donjeg kalupa, premazivanje s odvajalom (opcija: gelna prevlaka) i postavljanje ojačavala (tkanina, predoblika, vlakna) i ispune (jezgre; ako je potrebno)
- skraćivanje viška ojačavala na dimenziju kalupa, izrada kroja



Slika 3.6. Prvi korak postupka LRTM [12]

2. korak (slika 3.7):

- pozicioniranje gornje polovice iznad donje polovice kalupa

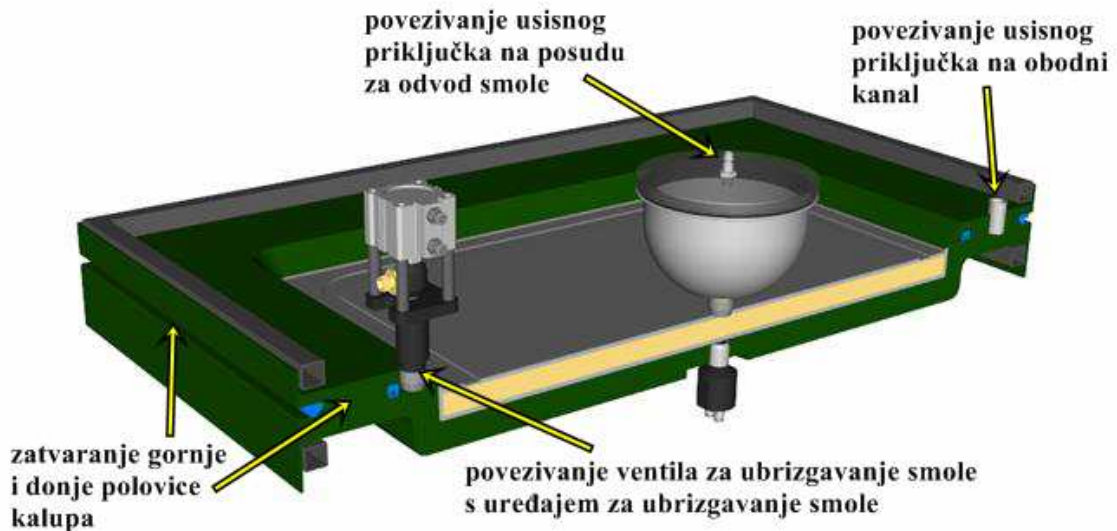


Slika 3.7. Drugi korak postupka LRTM [12]



## 3. korak (slika 3.8):

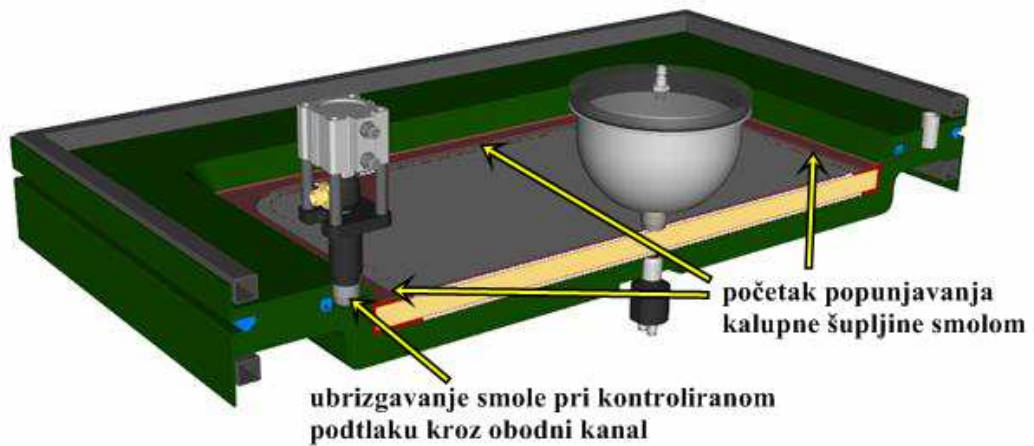
- zatvaranje gornje i donje polovice kalupa
- povezivanje ventila za ubrizgavanje smole s uređajem za ubrizgavanje smole
- povezivanje usisnog priključka na obodni kanal
- povezivanje usisnog priključka na posudu za odvod smole



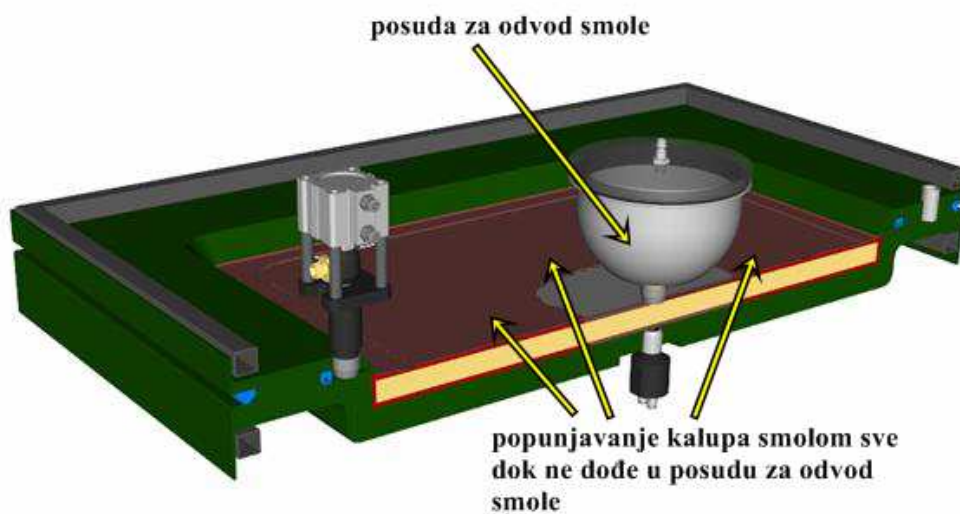
Slika 3.8. Treći korak postupka LRTM [12]

## 4. korak:

- dodavanje umreživala/katalizatora u smjesu s kapljevitom smolom, te mješanje smjese
- otvaranje ventila za ubrizgavanje smole i ubrizgavanje smole u kalupnu šupljinu pri kontroliranom podtlaku pri čemu natapa ojačani predoblik (ojačavalo) (slika 3.9)
- popunjavanje kalupa smolom sve dok ne dođe u posudu za odvod smole (slika 3.10)



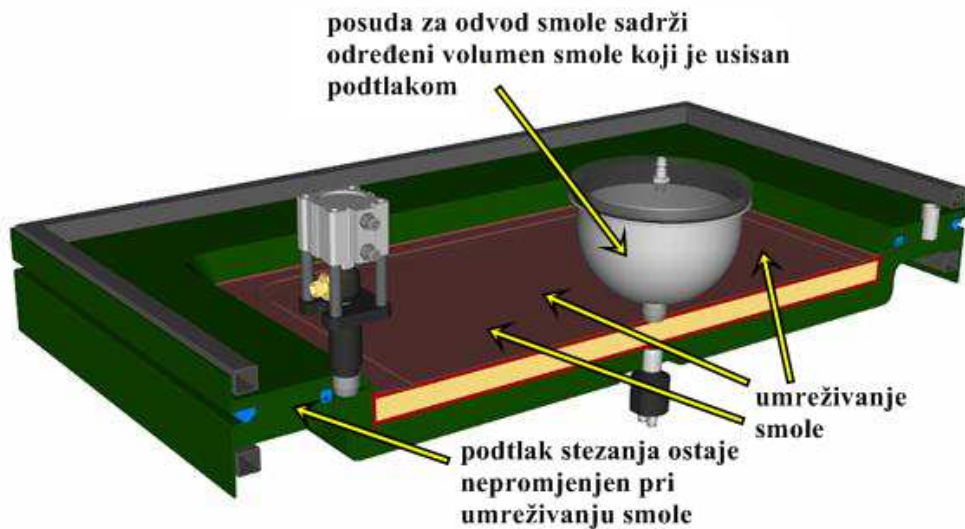
Slika 3.9. Četvrti korak postupka LRTM – početak popunjavanja kalupa smolom [12]



Slika 3.10. Četvrti korak postupka LRTM - popunjavanje kalupa smolom sve dok ne dođe u posudu za odvod smole [12]

5. korak (slika 3.11):

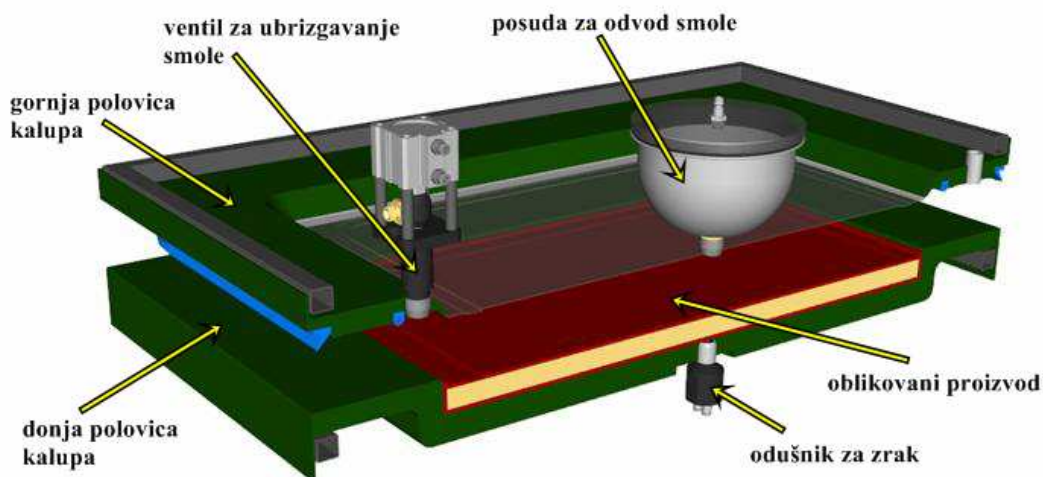
- punjenje smolom posude za odvod smole pri čemu podtlak stezanja ostaje nepromjenjen
- umreživanje smole (pri sobnoj temperaturi)



Slika 3.11. Peti korak postupka LRTM [12]

6. korak (slika 3.12):

- dovod zraka kroz odušnik za zrak (lakše odvajanje polovica kalupa)
- odvajanje ventila za ubrizgavanje i posude za odvod smole
- odvajanje gornje i donje polovice kalupa
- vađenje oblikovanog proizvoda iz donje polovice kalupa



Slika 3.12. Šesti korak postupka LRTM [12]

Nakon što je oblikovani proizvod izvađen iz kalupa, određeni dijelovi proizvoda obrađuju se postupcima obrade odvajanjem čestica (rubovi) kako bi se dobio završni oblik.

Slika 3.13 prikazuje primjenu u brodogradnji.



Slika 3.13. Primjena postupka LRTM u brodogradnji [15]

### 3.3. Prednosti i nedostaci postupka LRTM

Prednosti postupka LRTM su: [13, 14, 16]

- visoka produktivnost
- smanjeni troškovi rada
- poboljšana dimenzijska stabilnost (točnost)
- kalupi izrađeni od kompozitnih materijala (npr. polimer ojačan staklenim vlaknima) ili od aluminija i čelika za masovnu proizvodnju
- osigurava 300 – 400% povećanje produktivnosti po  $m^2$  u odnosu na postupke s otvorenim kalupom
- smanjene emisije stirena zbog odvijanja postupka u zatvorenom kalupu
- mogućnost proizvodnje dviju glatkih površina zbog gelne prevlake na obje površine kalupa
- čišći proizvodni pogon zbog odvijanja postupka u zatvorenom kalupu

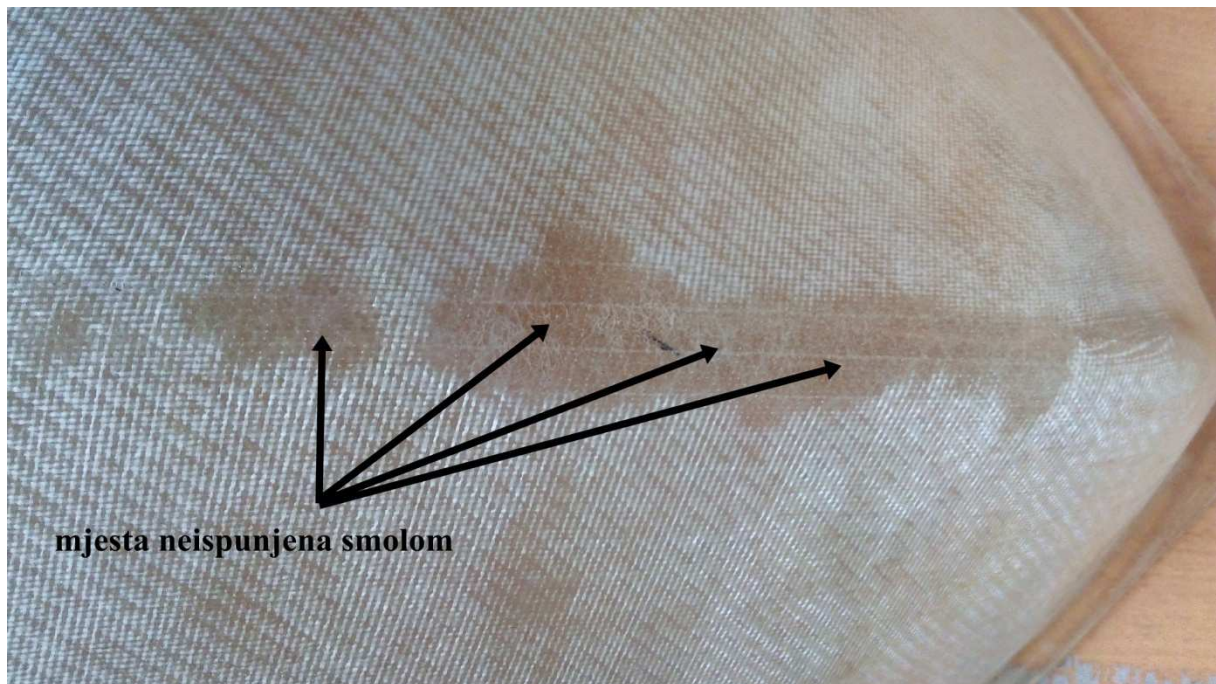
Nedostaci postupka LRTM su: [16]

- oblik kalupa utječe na protok smole
- poravnavanje predoblika i ojačavala je kritično – ograničenja oblika (polumjeri, kutevi)
- potreba za nepropusnim i dimenzijski točnim kalupima radi međusobnog spajanja
- viši troškovi kalupa i alata (potrebna dva kalupa)



- viši troškovi ojačavala (upotrebljavaju se složene tkanine i rovinzi (strukovi), te njihove kombinacije)
- neispunjenost predoblika smolom (slika 3.14)
- mogući zaostali zrak u kalupu (slika 3.15 i 3.16)

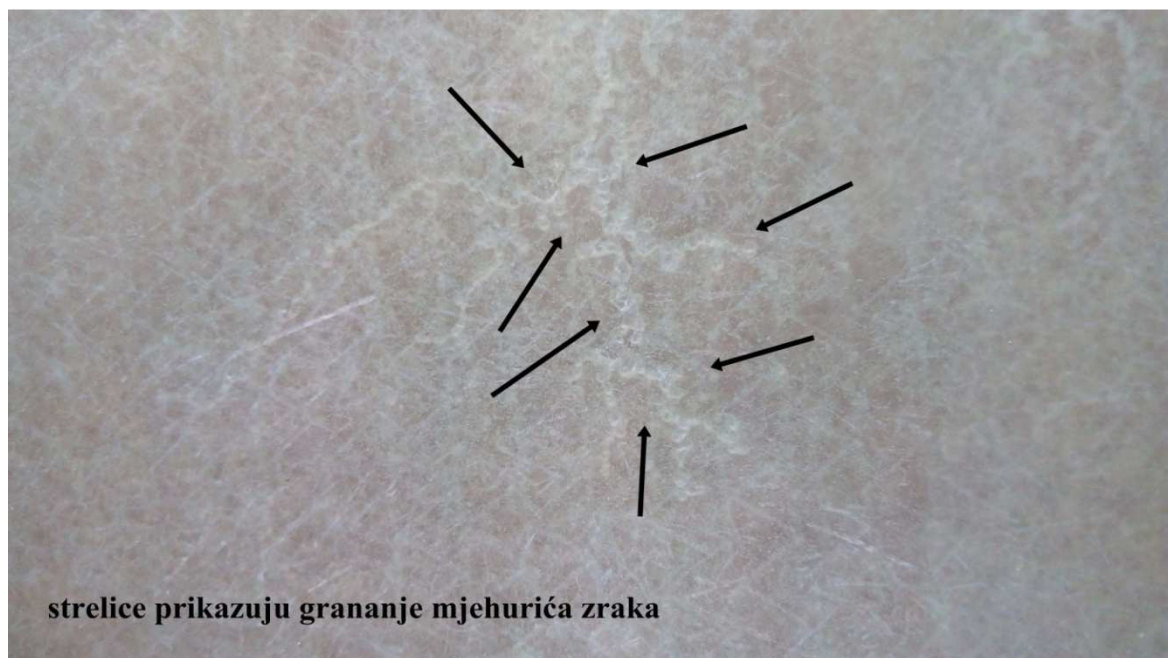
Na izvađenom proizvodu mogu se uočiti određene greške koje su nastale lošim provođenjem smole kroz kalup, tj. nedovoljnim usisavanjem volumena zraka iz kalupa, pa nastaju šupljine i mjesta gdje nema smole što utječe na svojstva proizvoda (slika 3.14, 3.15 i 3.16).



Slika 3.14. Greške na kompozitnoj tvorevini nakon provedenog postupka LRTM - mjesta neispunjena smolom



Slika 3.15. Greške na kompozitnoj tvorevini nakon provedenog postupka LRTM - grananje mjehurića zraka (pogled na cijeli proizvod)



Slika 3.16. Greške na kompozitnoj tvorevini nakon provedenog postupka LRTM - grananje mjehurića zraka (uvećano mjesto)

## **4. EKSPERIMENTALNI RAD**

### **4.1. Uvod**

U ovom dijelu rada opisan je postupak LRTM i proizvodnja kompozitne tvorevine navedenim postupkom. Uz opis samog postupka, dane su dimenzije kalupa, svojstva i dimenzije korištenih materijala kao ojačavala u obliku kroja (trodimenzionalni predoblik i mat iz staklenih vlakana), svojstva i količina smole, upotrebjeno odvajalo, ljepilo, količina i svojstva umreživala (katalizatora), te opisi ostale opreme i zapažanja prilikom postupka proizvodnje.

Na kraju su dane usporedbe rezultata mjerenja debljine stijenki dvaju proizvoda koji se razlikuju u broju korištenih slojeva ojačavala, odnosno i usporedbe srednjih vrijednosti (aritmetičke sredine) i standardnih odstupanja (standardne devijacije). U prvom se proizvodu kao ojačavalo upotrebljava samo jedan sloj trodimenzionalnog predoblika iz staklenih vlakana, a u drugom se proizvodu osim trodimenzionalnog predoblika upotrebljavaju i dva sloja mata (drugi i treći sloj ojačavala).

### **4.2. Svojstva smole i umreživala/katalizatora, dimenzije kalupa imaterijala ojačavala (dimenzije kroja) i ostalih upotrebljenih sredstava**

Za ovu tvorevinu primjenjuje se smola *AROPOL G 105 E* (netiksotropna, ortoftalna, nezasićena, predubrzana poliesterska smola), te su joj svojstva dana u tablici 4.1 i tablici 4.2.

Tablica 4.1. Svojstva kapljevite smole [17]

Svojstva pri 23 °C	Iznos	Mjerna jedinica	Norma ispitivanja
Viskoznost, Brookfield RV2, 10 okr/min	180	mPas	ISO 2555
Viskoznost (konus i ploča)	180	mPas	ISO 2884
Udio stirena	41	%	ISO 4864
Gustoća ( $\rho$ )	1,1	kg/dm <sup>3</sup>	ISO 2811
Vrijeme umreživanja pri 1 % MEKP-50 umreživala/katalizatora	13	min	D006
Maksimalna postignuta temperatura kod umrežavanja pri 1 % MEKP-50	120	°C	D006

Tablica 4.2. Svojstva umrežene smole [17]

Svojstva	Iznos	Mjerna jedinica	Norma ispitivanja
Rastezna čvrstoća	55	MPa	ISO 527
Rastezni modul	3600	MPa	ISO 527
Prekidno istežanje	2,0	%	ISO 527
Savojna čvrstoća	90	MPa	ISO 178
Modul čvrstoće pri savijanju	4100	MPa	ISO 178
Temperatura postojanosti oblika (HDT)	66	°C	ISO 75/2 (A)
Tvrdoća	45	Barcol	ASTM D2583
Apsorpcija vode do 24 sata	19	mg/uzorku	ISO 62-80
Apsorpcija vode do 28 dana	90	mg/uzorku	ISO 62-80
<ul style="list-style-type: none"> <li>• dimenzije testiranog uzorka 50x50x4 mm</li> </ul>			

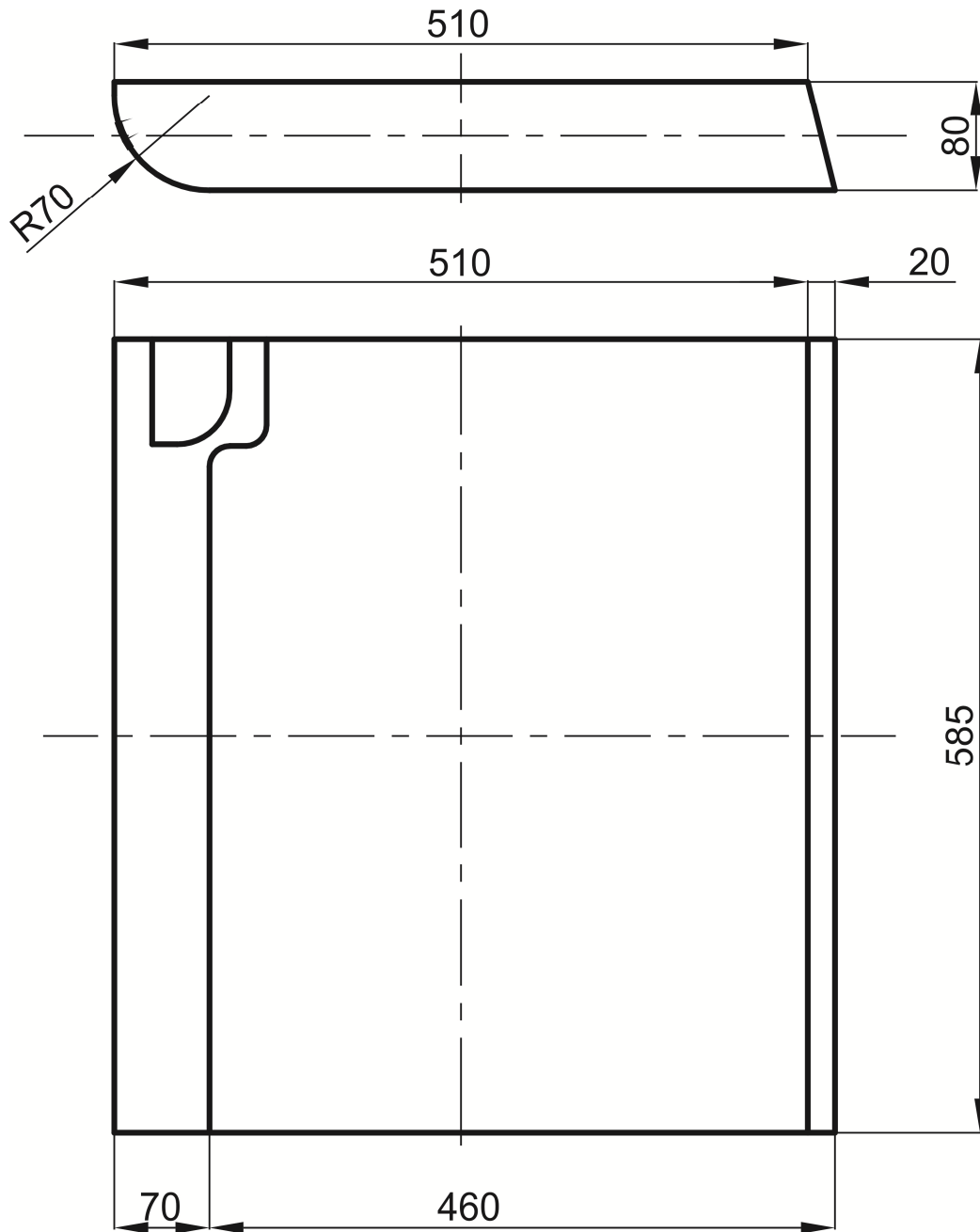
Smola *AROPOL G 105 E* treba se skladištiti u prostorijama nepromjenjive temperature ispod 20 °C i na mjestima u kojima ne može doći do direktnog kontaktom sa sunčevim zrakama. Produljeno skladištenje izvan predloženih uvjeta skladištenja utječe na svojstva kapljevite smole (viskoznost i vrijeme umreživanja). Preporuča se miješanje smole prije uporabe. Skladištena smola ima vijek trajanja 6 mjeseci. Smola se pogotovo upotrebljava kod injekcijskog prešanja i hladnog prešanja (*e. cold press moulding*).



Navedena smola ima vrijeme nakon kojeg počinje prelaziti iz kapljevite u gelnu, pa u čvrstu fazu i ono iznosi 13 minuta. Volumen upotrebene kapljevite smole za ovaj postupak iznosi 3 litre. Količina potrebne smole za ovaj postupak je oko 1,6 kg s time da treba ostaviti malo više kao ostatak u posudi.

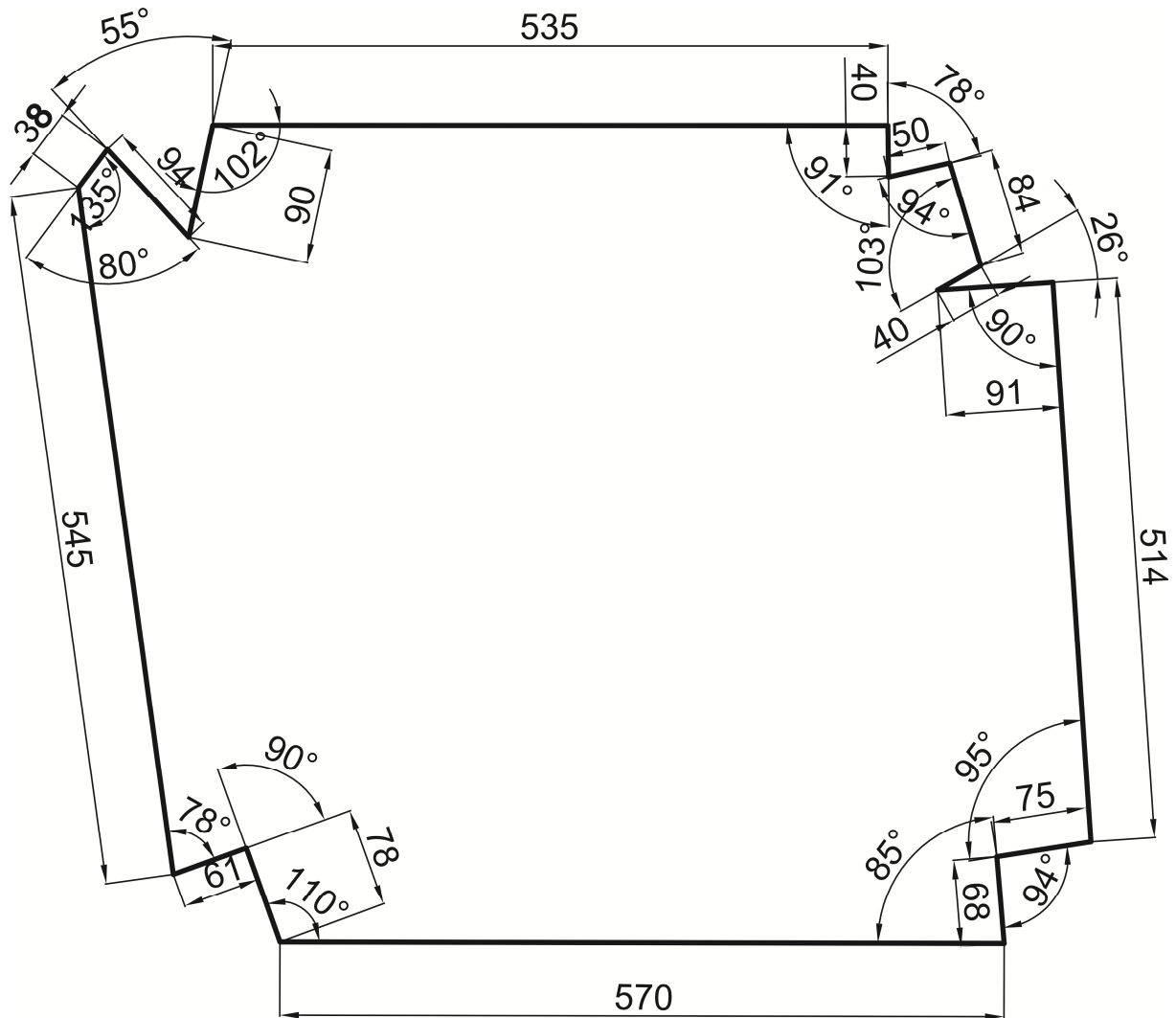
U smolu se dodaje 1 % umreživala/katalizatora MEKP-50 od ukupne mase korištene smole. MEKP-50 je metil-etil-keton-peroksid i upotrebljava se za ubrzavanje kemijske reakcije, tj. umreživanja smole (prelazak iz kapljevite u gelnu, pa u krutu fazu). U ovom eksperimentu količina dodanog katalizatora iznosi 30 grama.

Dimenzije kalupa dane su slikom 4.1. Kalupna šupljina (razmak između gornje i donje polovice kalupa) je visine 3-4 mm. Površina gornje polovice kalupa nema teksturu (hrapavost), tj. glatke je površine, dok površina donje polovice kalupa ima teksturu (hrapavost).



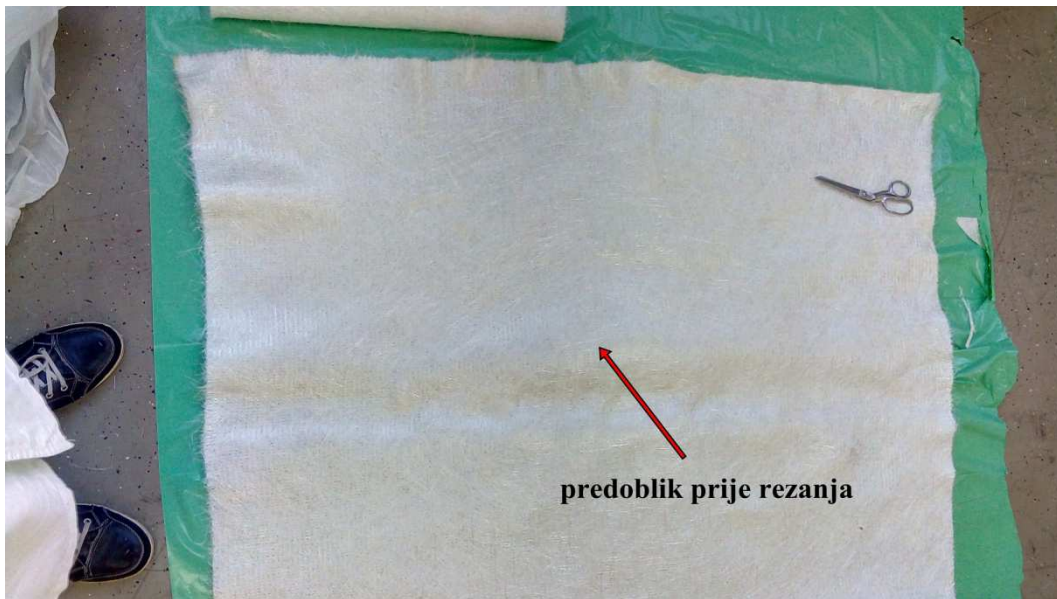
Slika 4.1. Dimenzije kalupa

Dimenzije kroja ojačavala (trodimenzionalnog predoblika i mata) određuju se prema dimenzijama kalupa i tvorevine. Prema dimenzijama kalupa kraj se kroji ručno škarama ili strojnim načinom. Kraj mora biti unutar dimenzija kalupa, ne smije izvirati izvan kalupa, a slojevi moraju biti pravilno položeni u kalup. Dimenzije koje odstupaju skraćuju se škarama na zadane. Zadane dimenzije kroja dane su slikom 4.2 i predstavljaju odmotane površine kalupa u dvodimenzionalnom prikazu.



Slika 4.2. Dimenzije kroja

Trodimenzionalni predoblik se sastoji od 2 sloja mata između kojih se nalazi sloj sitnih staklenih vlakana. Slojevi su prošiveni koncem i time vezani zajedno. Oba sloja mata su napravljena iz staklenih vlakana. Debljina trodimenzionalnog predoblika iznosi 3 mm. Slika 4.3.a i b prikazuju trodimenzionalni predoblik prije rezanja i slojeve prošivene koncem (uvećani dio).



a.)



b.)

Slika 4.3. Izgled trodimenzionalnog predoblika: a) prije rezanja; b) s uvećanim dijelom

Dva sloja mata koji su drugi i treći sloj ojačavala izrađeni su iz staklenih vlakana. Debljina sloja mata iznosi 0,5 mm i ima gustoću 450 g/m<sup>3</sup>. Slikom 4.4.a i b prikazano je određivanje dimenzija kroja mata prije i poslije rezanja.



a.)



b.)

Slika 4.4. Mat - određivanje dimenzija kroja: a) prije rezanja; b) poslije rezanja



Za premazivanje kalupa upotrebljava se odvajalo. Kalup se premazuje 2-3 puta odvajalom, s vremenskim razmakom od 15 minuta između svakog sloja premaza, ako prije nije tretiran odvajalom. U ovom eksperimentalnom radu kalup je bio prije tretiran odvajalom tako da je samo jednom premazan odvajalom *FLEX-Z 5.0* (slika 4.5).



Slika 4.5. Odvajalo *FLEX - Z 5.0*

Kako bi se spriječila pomicanja i deformacije slojeva ojačavala može se upotrijebiti ljepilo. Ljepilo (slika 4.6) se smije nanositi samo između slojeva ojačavala, ali ne smije doći u dodir s kalupom. U ovom eksperimentalnom radu ljepilo nije upotrebjeno.



Slika 4.6. Ljepilo (adheziv) za povezivanje slojeva ojačavala

### 4.3. Faze postupka LRTM

Prije samog početka postupka potrebno je napraviti pripremu glavne i pomoćne opreme, te materijala.

Glavna oprema:

- a) gornja i donja polovica kalupa (očistiti površine od prošlog postupka)
- b) posuda za odvod smole (očistiti unutrašnju površinu i kanal kroz koji ulazi smola)
- c) ventil za ubrizgavanje smole (provjeriti čistoću šupljina)
- d) obodni kanal za stezanje podtlakom (provjeriti čistoću šupljine)
- e) pumpa i zaštitna posuda (provjeriti funkcionalnost)
- f) crijevo za povezivanje kalupa, pumpe, zaštitne posude i posude sa smolom (odrediti odgovarajuću dužinu i čistoću)
- g) posuda za miješanje smole (određenog volumena i čistoće)

Materijali ojačavala:

- a) odabrati vrstu i dimenzije materijala koji služe kao ojačavalo

Kemijska sredstva:

- a) odvajalo za tretiranje površine kalupa
- b) umreživalo/katalizator (dodaje se određena količina u kapljevitu smolu)

- c) opcija: može se koristiti ljepilo (adheziv) za povezivanje slojeva ojačavala
- d) smola (volumen potreban za ispunjavanje kalupe šupljine, cca. 2-3 litre. To je količina smole za ispunjavanje kalupa u ovom radu)

Pomoćna oprema:

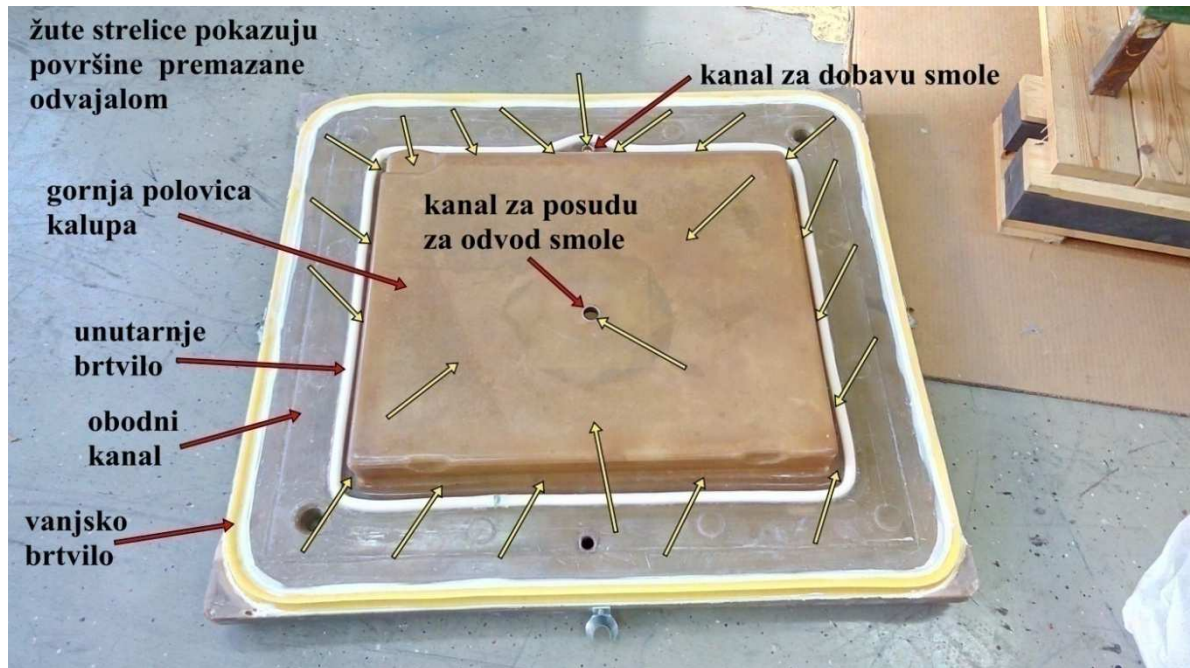
- a) škare (za rezanje materijala na određeni kraj)
- b) metar (za određivanje dimenzija kalupa i kroja)
- c) skalpel
- d) kuta (za zaštitu)
- e) gumene rukavice (za zaštitu)
- f) flomaster (za označavanje zadanih dimenzija na materijalu)
- g) olovka i papir (za zapisivanje podataka tijekom postupka)
- h) pomično mjerilo – za mjerenje debljine stijenki konačnog proizvoda

Postupak se sastoji od sljedećih koraka:

1. korak:

- a) određene površine gornje i donje polovice kalupa, te posude za odvod smole (cijela površina gornje polovice kalupa i unutarnje brtvilo, uključujući kanal za ubrizgavanje smole iz kante, kanal i unutrašnju površinu posude za odvod smole; cijela površina donje polovice kalupa uključujući i područje do vanjskog brtvila) (slika 4.7, 4.8 i 4.9) premazuju se odvajalomu jednom sloju, te se čeka neko vrijeme da se odvajalo osuši (cca. 10 - 15 min.).Odvajalo se upotrebljava kako se smola ne bi zalijepila, prilikom ubrizgavanja, za polovice kalupa, tj. kako bi odvajanje kompozitne tvorevine iz kalupa bilo lakše.

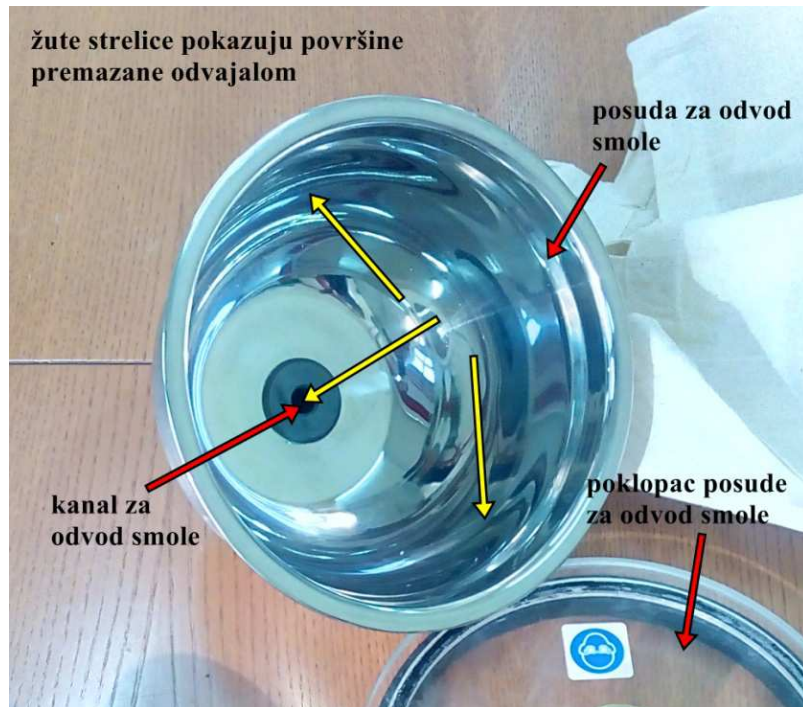




Slika 4.7. Gornja polovica kalupa: mjesta i površine premazane odvjalom

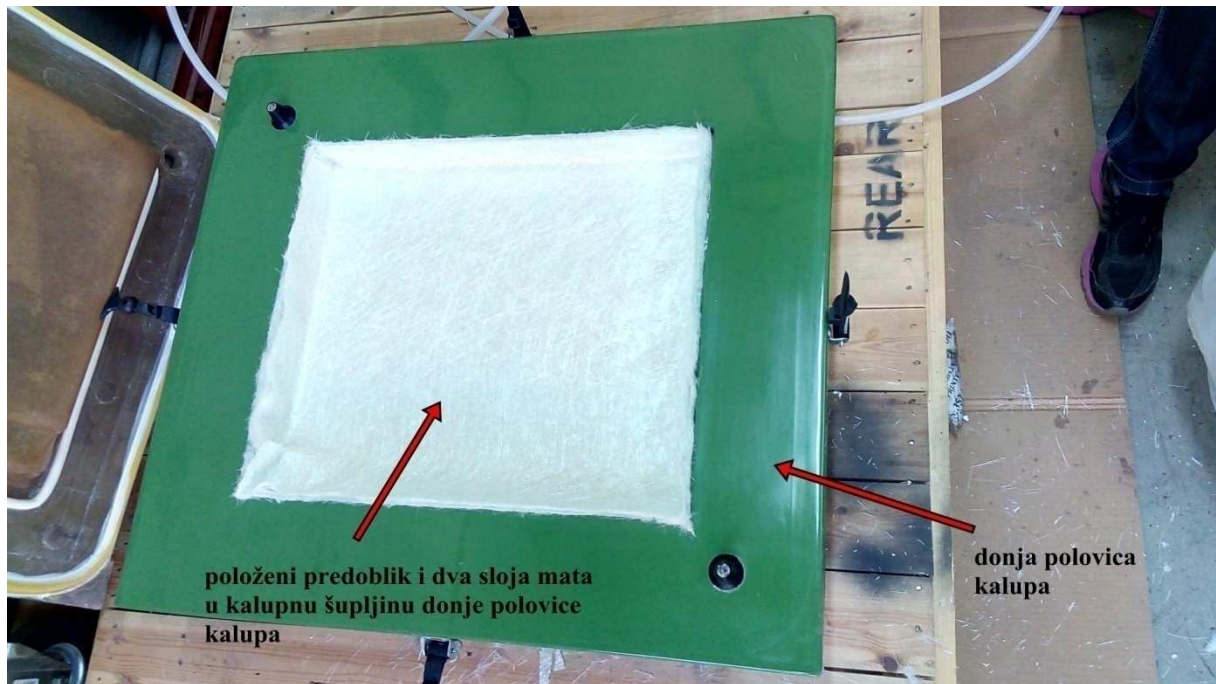


Slika 4.8. Donja polovica kalupa: mjesta i površine premazane odvjalom



Slika 4.9. Posuda za odvod smole i mjesta premazivanja odvjalom

- b) nakon premazivanja odvjalom, odabire se materijal ojačavala i prema izmjerenim dimenzijama kalupa izrađuje se kraj.
- c) u kalupnu šupljinu donje polovice kalupa stavlja se prvo kraj trodimenzionalnog predoblika, a nakon njega dva sloja mata (slika 4.10). Dimenzije ojačavala moraju biti jednake s rubovima kalupa, tj. ne smije doći do preklapanja slojeva ojačavala i izviranja izvan donje polovice kalupa što se ispravlja (reže) škarama na prave dimenzije. Mat je zajedno s predoblikom rezan na dimenzije kalupa prema kroju.

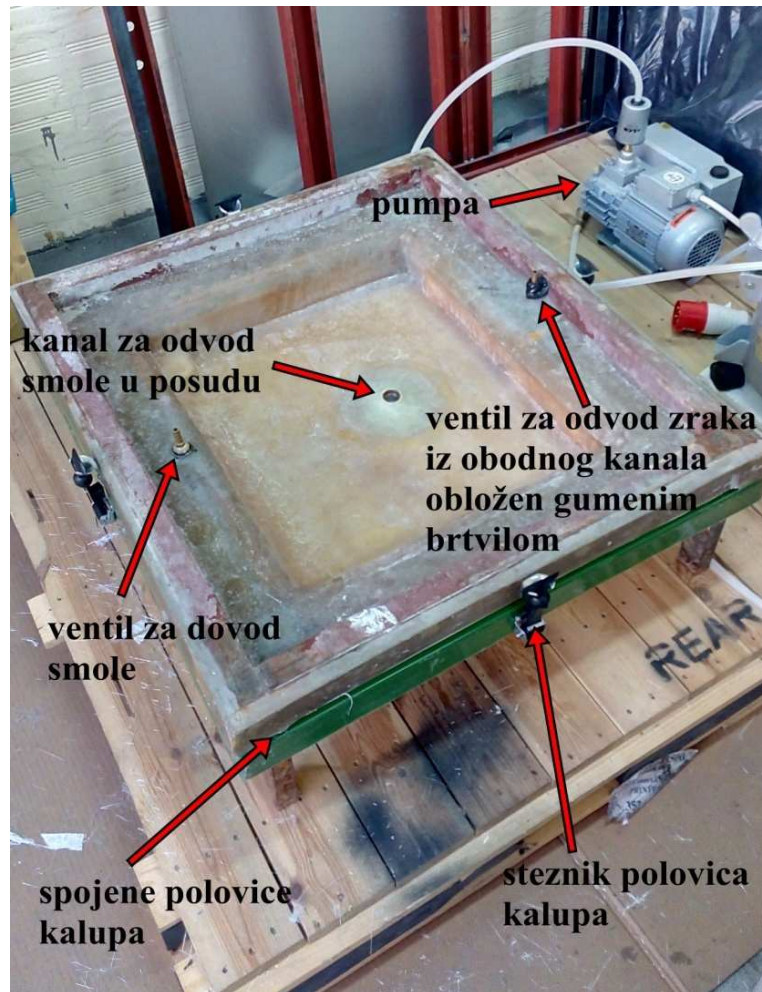


Slika 4.10. Položeni predoblik i dva sloja mata u kalupnu šupljinu donje polovice kalupa

2. korak:

- a) u drugom koraku sklapaju se gornja i donja polovica kalupa (slika 4.11). Pri spajanju važno je paziti na položaj slojeva ojačavala, tj. ne smije doći do savijanja, deformacija između slojeva, pomicanja u raznim smjerovima i izviranja iz kalupa. Kako bi se spriječilo pomicanje slojeva ojačavala, može se koristiti ljepilo (adheziv).



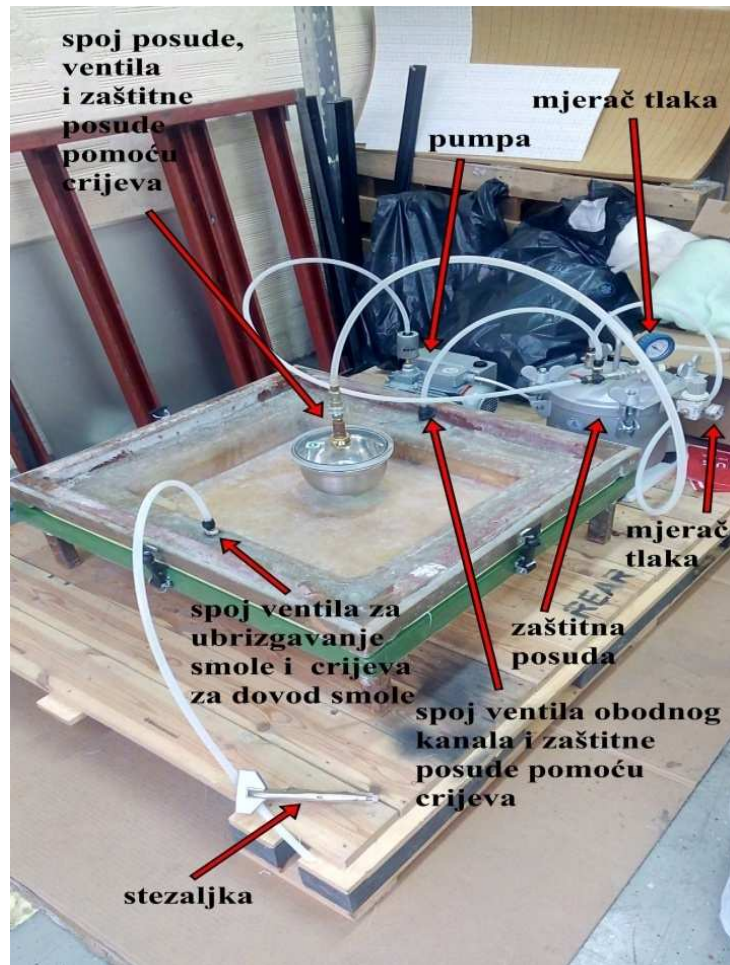


Slika 4.11. Spajanje polovica kalupa

- b) kada su polovice kalupa pravilno spojene, stežu se steznici na svim stranama kalupa. Nakon postavljanja ventila za dovod smole i ventila za odvod zraka iz obodnog kanala, stavlja se na navedene ventile gumena brtvila (slika 4.11) koja služe da tlak stezanja ostane konstantan, nema istjecanja smole na spoju ventila za dovod smole i crijeva koje ide do kante sa kapljevitom smolom i da drže crijeva pričvršćenima za ventile (sprječavaju odvajanje).

3. korak (slika 4.12) :

- a) slika 4.12 opisuje povezivanje pumpe, zaštitne posude, posude za odvod smole, ventila za ubrizgavanje smole i ventila obodnog kanala pomoću prozirnih crijeva. Stezaljkom (slika 4.12) se steže crijevo kako ne bi došlo do prijevremenog usisavanja smole pri radu pumpe dok se usisava zrak iz kalupa. Zaštitna posuda služi kako smola prilikom usisavanja iz kalupa ne bi završila u pumpi i time je oštetila.



Slika 4.12. Spojena oprema prije miješanja smole

#### 4. korak:

- a) prije nego li dođe do miješanja smole i umreživala/katalizatora potrebno je usisati zrak iz kalupne šupljine u kojoj se nalazi ojačavalo. To se postiže uključanjem pumpe i njezinim radom neko određeno vrijeme (3-8 min) što ovisi o veličini kalupa i snazi pumpe. Tijekom rada pumpe crijevo mora biti stegnuto stezaljkom (slika 4.12). Kada je sigurno da je zrak većim dijelom usisan, kreće se s miješanjem kapljevite smole i umreživala/katalizatora u vremenu od 2 do 3 minute. (slika 4.13).



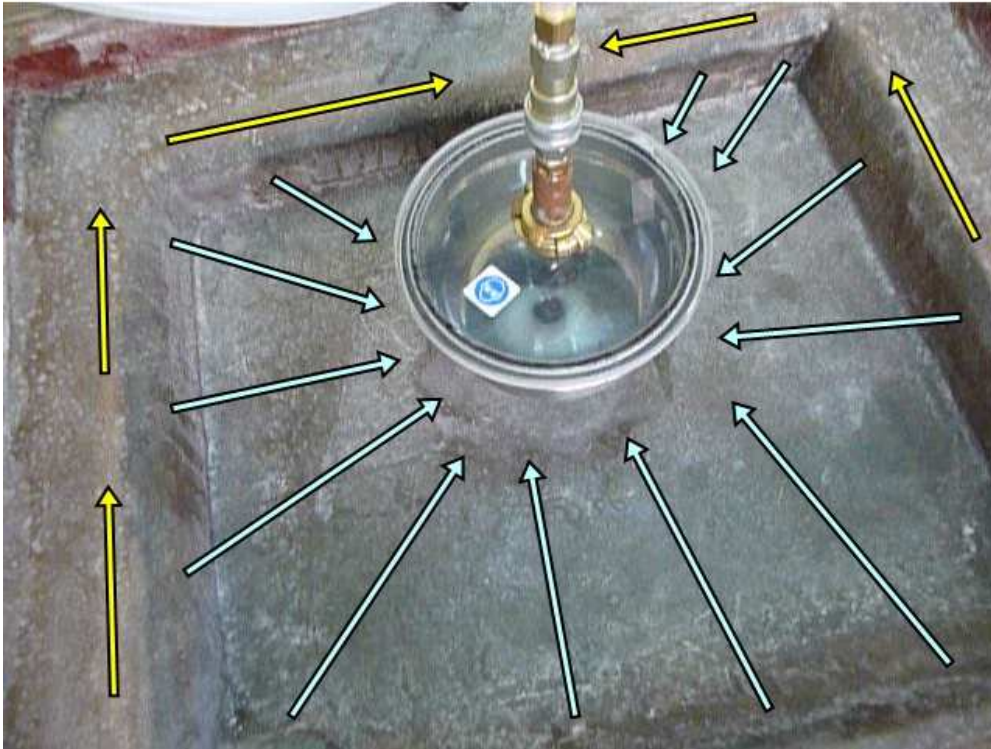
Slika 4.13. Miješanje smole i umreživala/katalizatora

- b) nakon miješanja uklanja se stezaljka i crijevo se polaže u posudu sa smjesom te se otvara ventil za ubrizgavanje smole i smola teče crijevom u kalup gdje natapa ojačavalo počevši od ruba kalupa (od unutarnjeg brtvila) prema sredini kalupa (slika 4.14).



**smjerovi i redoslijed popunjavanja kalupa:**

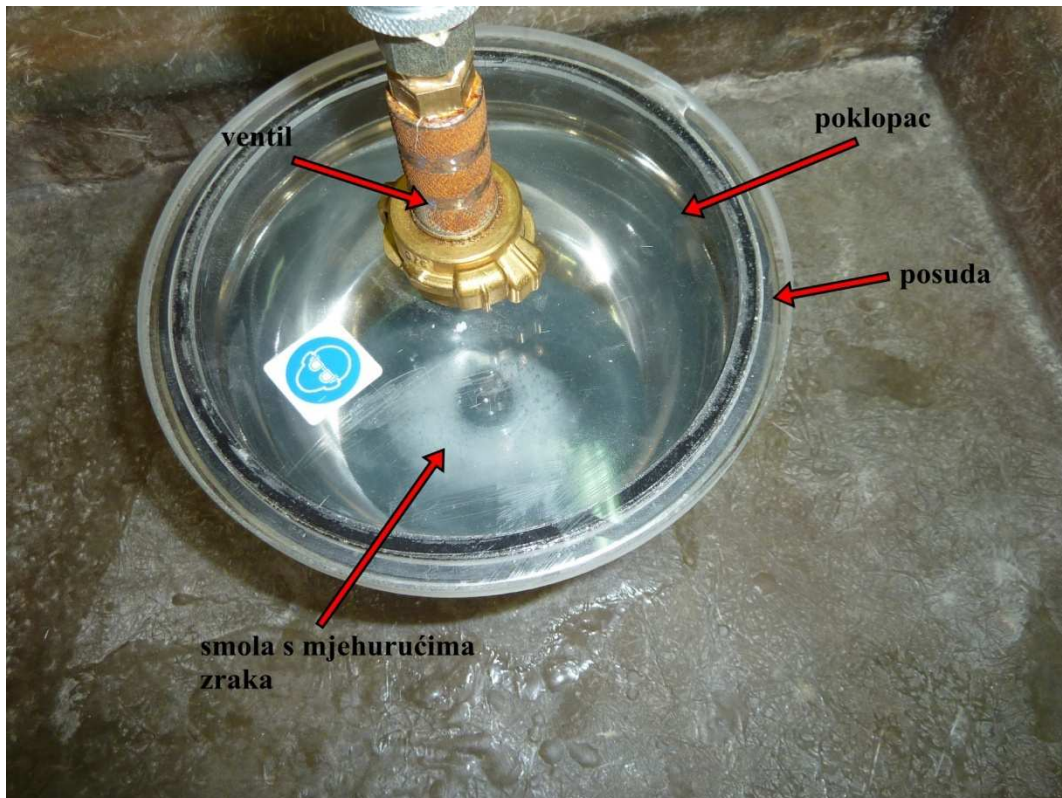
1. žute strelice (po obodu)
2. plave strelice (bočne i donja površina kalupa)



Slika 4.14. Smjerovi i redoslijed popunjavanja kalupa smolom

**5. korak:**

- a) kada dolazi do punjenja kalupa i natapanja ojačavala smolom, smola se zajedno s preostalim zrakom u kalupu usisava podtlakom u posudu za odvod smole. Dokle god ima zraka u kalupu, u posudi za odvod smole javljat će se mjehurići (slika 4.15).



Slika 4.15. Smola s mjehurićima zraka u posudi

- b) podtlak stezanja treba ostati konstantan kako ne bi došlo do ulijevanja smole u obodni kanal između unutarnjeg i vanjskog brtvila
- c) dovod smole može se zaustaviti, kada se vidi da u kalupu ima dovoljno smole i kada u posudi za odvajanje smole smola počne očvršćivati, tako što se crijevo za dovod smole stegne stezaljkom
- d) pumpa ostaje upaljena dok ne prođe 13 minuta potrebnih za očvršćivanje smole. Nakon toga pumpa se gasi i sve se ostavlja 24 sata kako bi došlo do potpunog umreživanja smole (slika 4.16). Tokom umreživanja smole temperatura raste unutar kalupa do 120 °C što se može osjetiti na površini kalupa.

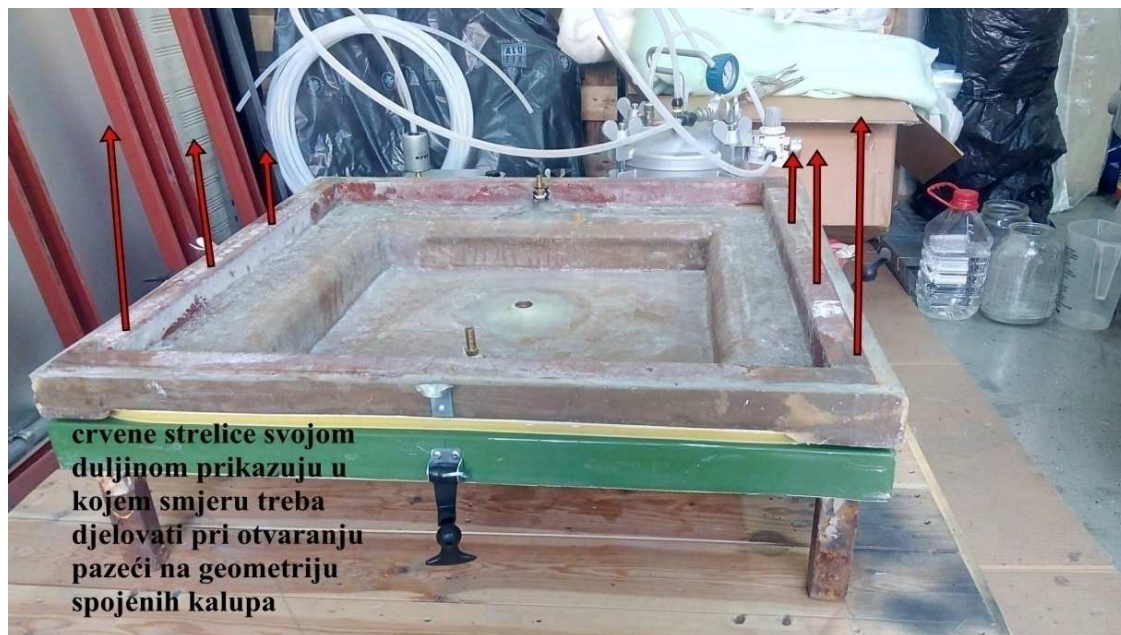




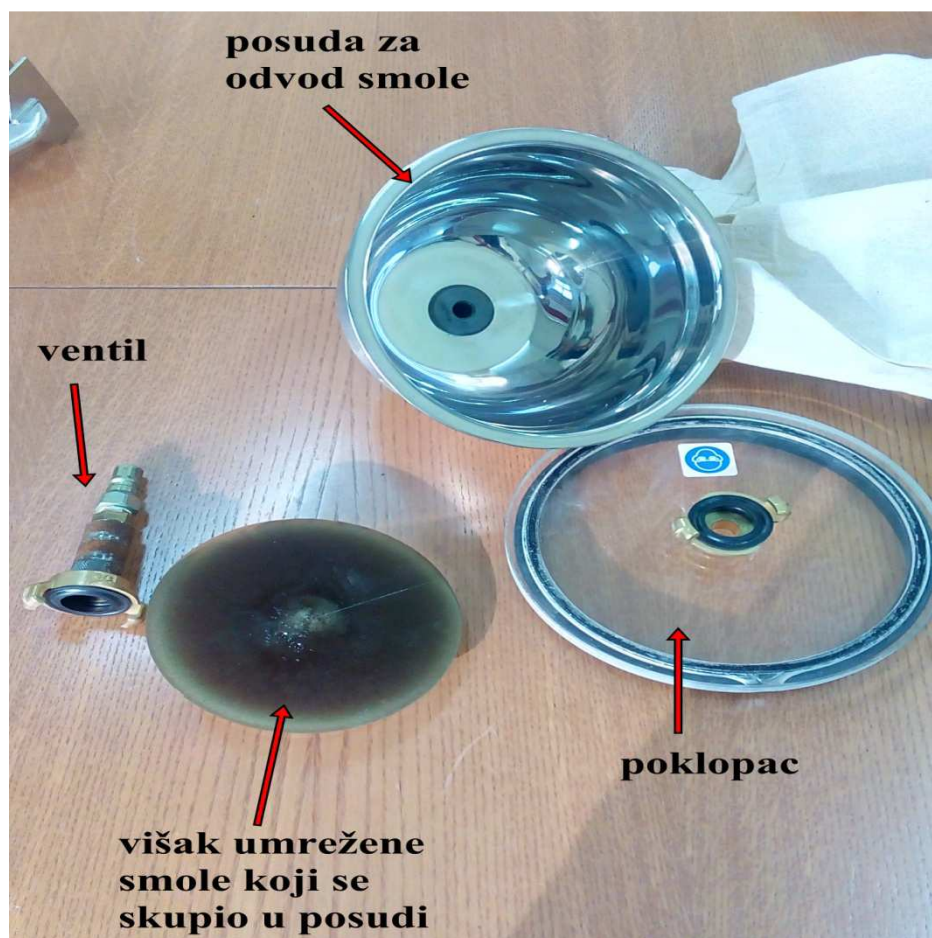
Slika 4.16. Gašenje pumpe i ostavljanje smole da potpuno umreži kroz 24 sata

6. korak:

- a) nakon 24 sata završilo se umreživanje smole i oprema se razdvaja i čisti. Odvajaju se crijeva od ventila na posudi za odvod smole, ventila za obodni kanal i ventila za dovod smole iz posude, te steznici polovica kalupa (slika 4.17 – strelice su okomite na površinu kalupa i njihova duljina prikazuje gdje i u kojem smjeru treba djelovati većom silom). Posuda za odvod smole razdvaja se od kalupa, te se čisti kanal u posudi kroz koji je prolazila smola (slika 4.18).



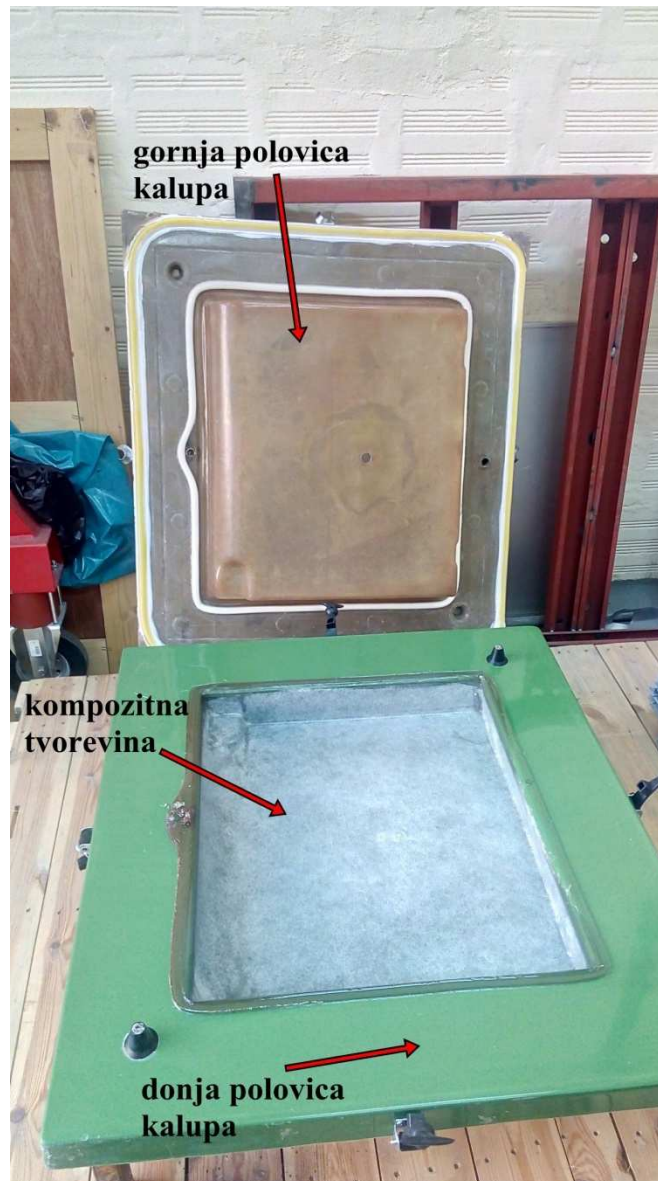
Slika 4.17. Uklanjanje crijeva, posude za odvod smole i otvaranje kalupa



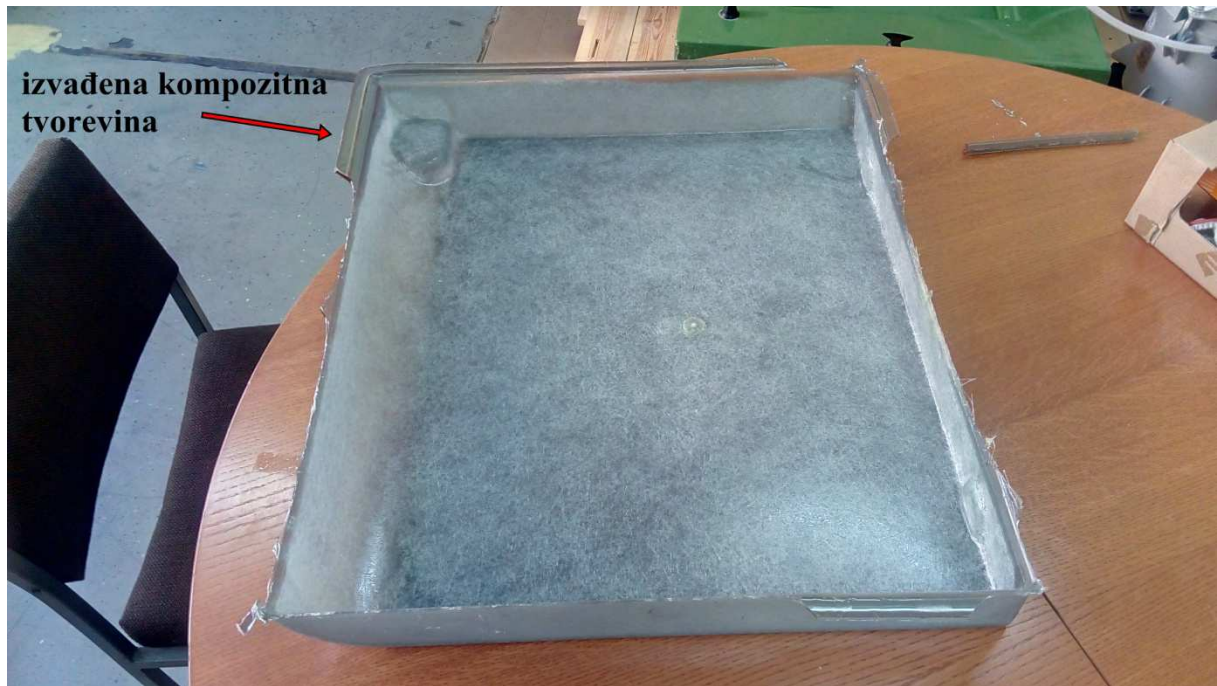
Slika 4.18. Očišćena posuda za odvod smole, poklopac, ventil i višak umrežene smole iz posude



- b) odvaja se gornja od donje polovice kalupa (slika 4.19), te se kompozitna tvorevina vadi iz kalupa (slika 4.20.a i b).



Slika 4.19. Kompozitna tvorevina u donjoj polovici kalupa prije vađenja



a.)



b.)

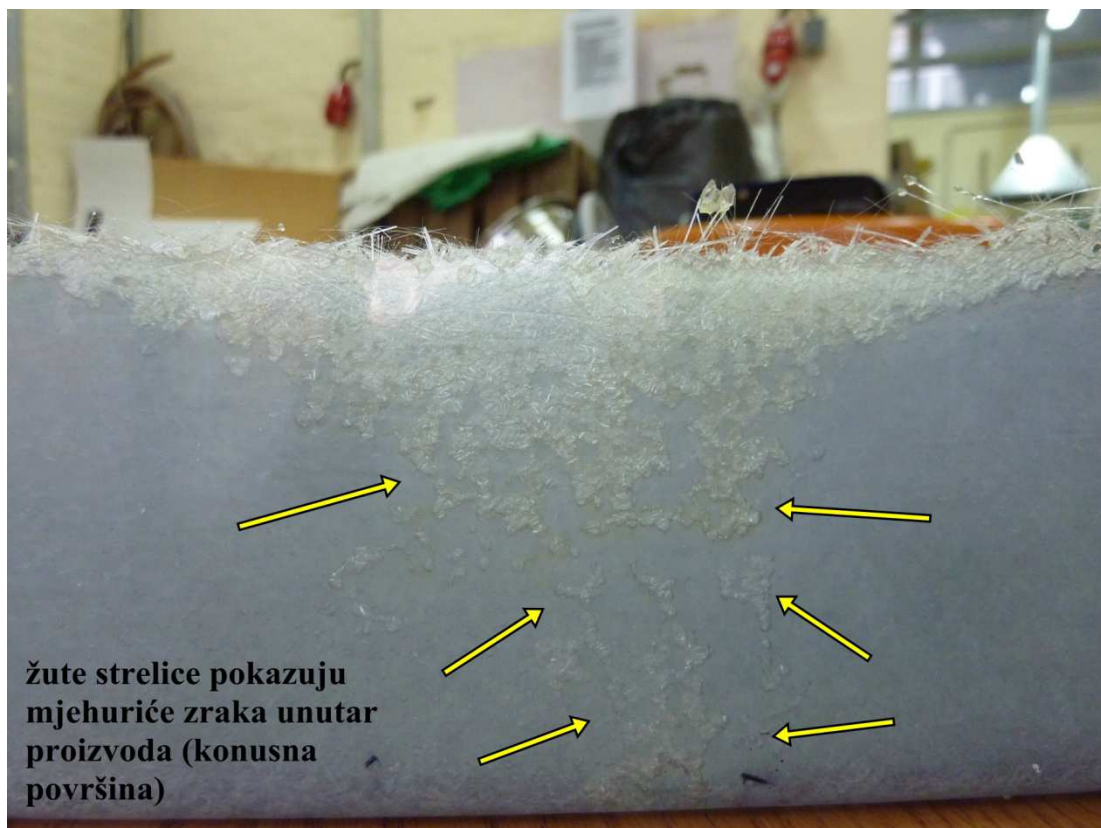
Slika 4.20. Gotova kompozitna tvorevina: a) prednji pogled; b) stražnji pogled

Nakon provedenog postupka, kompozitna tvorevina se pregledava i traže se greške na proizvodu. Rubovi se uklanjaju obradom odvajanjem čestica na konačne dimenzije. Ako

proizvod ne zadovoljava zadane standarde, tj. ako postoje greške na proizvodu, proizvod se uništava ili ide na recikliranje.

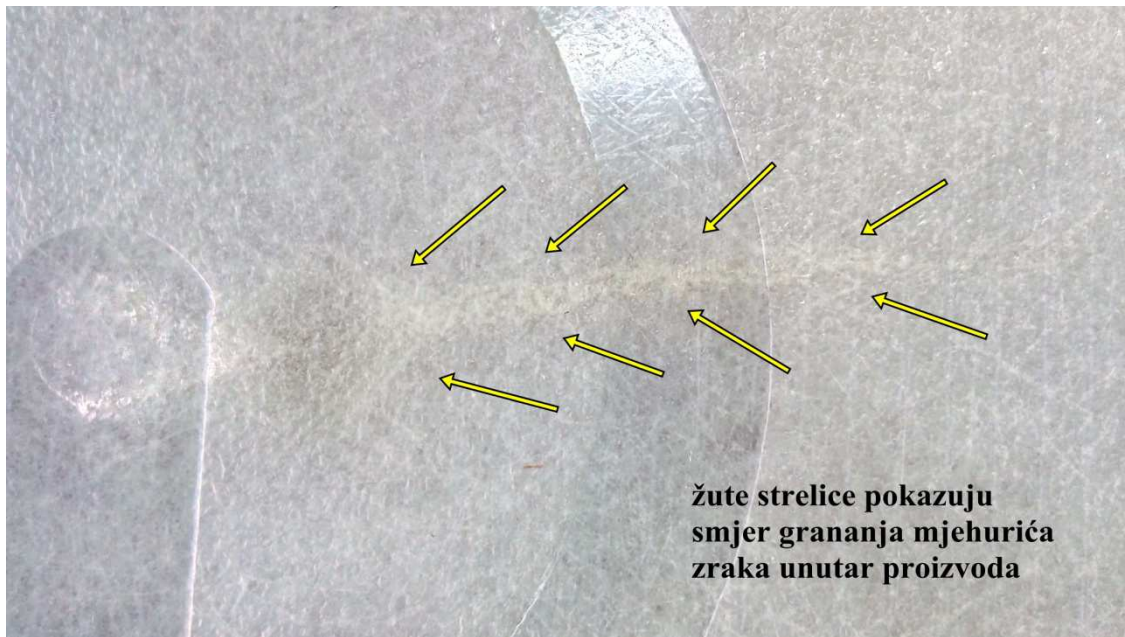
Greške mogu uključivati:

- mjehuriće zraka zarobljene unutar proizvoda (grananje mjehurića zraka) (slika 4.21 i slika 4.22). Samo na konusnoj površini vidi se grananje mjehurića zraka koje ide od posude za odvod smole prema konusnoj površini (slika 4.21 i 4.22).
- deformacije na proizvodu uzrokovane lošim namještanjem ojačavala u kalupnu šupljinu (savijanje slojeva, izviranje slojeva iz kalupa i sl.) zbog određene geometrije kalupa (polumjeri, kutevi, konusi, itd.)



Slika 4.21. Mjehurići zraka unutar tvorevine





Slika 4.22. Smjer grananja mješurica zraka unutar tvorevine

#### 4.4. Usporedba mjerenja debljine stijenki dvaju proizvoda

Postupkom LRTM izrađena su dva proizvoda. Prvi proizvod kao ojačavalo ima samo trodimenzionalni predoblik, a drugi proizvod ima trodimenzionalni predoblik i dva sloja mata koja se postavljaju na njega.

Ukupna debljina ojačavala (jednadžba 4.1), srednja vrijednost (jednadžba 4.2) i standardno odstupanje (jednadžba 4.3) izračunava se prema jednadžbama:

$$h_{uko} = h_{pr} + h_{ma} \quad (4.1)$$

$$h_{kt,sr} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_{kti}) \quad (4.2)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{n=1}^n (h_{kti} - h_{kt,sr})^2} \quad (4.3)$$

gdje su:

$h_{uko}$  - ukupna debljina ojačavala, [mm]

$h_{pr}$  - debljina predoblika, [mm]

$h_{ma}$  - debljina mata, [mm]

$n$  - broj uzoraka mjerenja, [mm]

$h_{kti}$  - iznos debljine stijenke kompozitne tvorevine, [mm]

$h_{kt,sr}$  - srednja vrijednost (aritmetička sredina) debljine stijenke kompozitne tvorevine, [mm]

$S$  - standardno odstupanje, [mm].

Tablica 4.3. Usporedba proizvoda 1 i proizvoda 2

	Proizvod 1	Proizvod 2
Vrsta i broj ojačavala	trodimenzionalni predoblik	trodimenzionalni predoblik i dva sloja mata
Debljina predoblika ( $h_{pr}$ ; mm)	3	3
Debljina mata ( $h_{ma}$ ; mm)	-	2x0,5
Ukupna debljina ojačavala ( $h_{uko} = h_{pr} + h_{ma}$ ; mm)	3	4
Broj uzoraka mjerenja ( $n$ )	6	6
Iznos debljine stijenke kompozitne tvorevine ( $h_{kt1} \dots h_{kt6}$ ; mm)	$h_{kt1} = 3,18; h_{kt2} = 3,17;$ $h_{kt3} = 3,23; h_{kt4} = 3,0$ $h_{kt5} = 3,03; h_{kt6} = 3,0$	$h_{kt1} = 3,3; h_{kt2} = 3,44;$ $h_{kt3} = 3,58; h_{kt4} = 3,5;$ $h_{kt5} = 3,6; h_{kt6} = 3,82$
Srednja vrijednost ( $h_{kt,sr}$ ; mm)	3,10	3,54
Standardno odstupanje ( $S$ ; mm)	0,09406	0,15958

## 5. ZAKLJUČAK

Kompozitni materijali nalaze sve veću primjenu u modernom svijetu, te se njihov razvoj sve više povećava te predstavljaju budućnost u razvoju tehnike i poboljšanja kvalitete ljudskog života. Kako se od kompozita danas radi mnogo različitih proizvoda kao što su dijelovi automobila, zrakoplova, brodova, robe široke potrošnje, pa sve do složenih znanstvenih proizvoda, postupci proizvodnje (oblikovanja) moraju zadovoljiti zahtjeve visoke kvalitete, visoke produktivnosti, smanjenja troškova rada, jednostavnosti izvođenja postupka i sl.

Postupak proizvodnje (oblikovanja) proizvoda u ovom radu je postupak LRTM koji primjenjuje podtlak za oblikovanje i predstavlja inačicu, odnosno poboljšanje tradicionalnog RTM postupka time što LRTM postupak ima visoku produktivnost, smanjene troškove rada, kalupe izrađene iz kompozitnih materijala (smanjena masa kalupa), iako kalupi mogu biti izrađeni i iz aluminijske i čelika za masovnu proizvodnju, te je još i isplativiji u odnosu na podtlačno oblikovanje tradicionalnog RTM postupka za komadnu proizvodnju. Postupak LRTM ima još prednosti kao što su smanjenje emisije stirena zbog toga što se postupak odvija u zatvorenom kalupu, mogućnost proizvodnje dviju glatkih površina zbog nanošenja gelne prevlake na obje površine kalupa i čišći proizvodni pogon zbog odvijanja postupka u zatvorenom kalupu. Poboljšanjem postupka, tj. smanjenjem nedostataka kao što su visoki troškovi kalupa i alata (potrebne dvije polovice kalupa), boljim projektiranjem i konstrukcijom oblika kalupa koji utječe na protok smole, projektno i konstrukcijsko pojednostavljenje izrade i potreba nepropusnih i dimenzijski točnih kalupa kod međusobnog spajanja, smanjenje troškova ojačavala primjenom jednostavnih tkanina i rovinga i njihovih kombinacija, te boljom kontrolom u određivanju dimenzija predoblika i ojačavala, te smanjenje kritičnosti poravnavanja, ovaj postupak može zauzeti važno mjesto u proizvodnji kompozitnih materijala.

U eksperimentalnom dijelu rada objašnjen je postupak LRTM pomoću kojega je proizvedena kompozitna tvorevina (proizvod 2). Postupak je opisan kroz šest koraka u kojima je opisana glavna i pomoćna oprema, materijali ojačavala, kemijska sredstva, svojstva smole, dimenzije kalupa i kroja i ostale operacije u postupku. Nakon završetka postupka proizvodnje, došlo se do nekih važnih spoznaja kao što su: prije miješanja smole potrebno je uključiti pumpu i pustiti je da usisava zrak iz kalupa te tek kada prođe određeno vrijeme crijevo za usisavanje



staviti u posudu sa promiješanom smolom kako ne bi došlo do „pomaknutog intervala“ u kojem pumpa radi no ne dolazi do ubrizgavanja smole u kalup zbog viška volumena zraka u kalupu. Također je važno paziti na vrijeme umreživanja smole, a dimenzije ojačavala uvijek moraju biti unutar zadanih dimenzija kalupa. Značajan je položaj mjesta posude za odvod smole koji utječe na kvalitetu proizvoda zajedno s geometrijom i hrapavosti kalupa, te kompozitna tvorevina nakon proizvodnje ide na obradu odvajanjem čestica i sl. Dobivena kompozitna tvorevina (proizvod 2) je uspoređena s prethodno proizvedenom kompozitnom tvorevinom (proizvod 1). Slikama su pokazane greške koje se javljaju na kompozitnim tvorevinama (grananje mjehurića zraka koji su zarobljeni u proizvodu). Razlika dvaju proizvoda je u broju slojeva ojačavala. Kod jednog je upotrebljen samo trodimenzionalni predoblik iz staklenih vlakana (proizvod 1), a drugi osim trodimenzionalnog predoblika ima i dva sloja mata iz staklenih vlakana (proizvod 2). Razlika broja korištenih slojeva materijala kao ojačavala utjecala je na samu debljinu stijenke svake kompozitne tvorevine. Zbog toga, pri mjerenju debljine stijenke kompozitna tvorevina 2 ima veću debljinu stijenke od kompozitne tvorevine 1. Mjerenje je izvršeno na šest mjesta, te se sa zadanim podacima izračunala srednja vrijednost i standardno odstupanje.

Razvoj kompozitnih materijala, matrica i ojačavala, postupka oblikovanja (u ovom radu postupak LRTM) može značiti eksponencijalni rast u tehničkom području koji sigurno donosi uz mnoge prednosti i neke nove probleme.

## 6. LITERATURA

- [1] Rosato, V., D., Rosato, V., D.: Reinforced Plastics Handbook (Third edition), Elsevier Advanced Technology, Oxford, 2004.
- [2] Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2006.
- [3] Ćorić, D., Filetin, T.: Materijali u zrakoplovstvu, FSB, Zagreb, 2012.
- [4] Internet: [http://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1369657197-0-materijaliikompoziti2013.pdf](http://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1369657197-0-materijaliikompoziti2013.pdf), 27.3.2015.
- [5] Internet: [http://www.fsb.unizg.hr/zavod\\_za\\_materijale/download/8f5b1e68977077c0bc5053548b75628c.pdf](http://www.fsb.unizg.hr/zavod_za_materijale/download/8f5b1e68977077c0bc5053548b75628c.pdf), 27.3.2015.
- [6] Tomašić, D.: Primjena kompozitnih tvorevina u zrakoplovnoj industriji, diplomski rad, FSB, Zagreb, 2011.
- [7] Šercer, M., Pilipović, A.: Proizvodnja kompozitnih tvorevina – nastavni materijali, FSB, Zagreb, 2014.
- [8] Internet: <http://www.fiberglass.name/newsinfo.asp?ArticleID=68>, 18.8.2015.
- [9] Internet: [https://www.google.hr/search?q=reinforcement+mat&biw=1280&bih=952&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0CAyQAUoAWoVChMI0OH3zpHfyAIVxTgaCh3HXQ\\_q#tbm=isch&q=mat+composite+reinforcement&imgc=koewlHrLn3HGqM%3A](https://www.google.hr/search?q=reinforcement+mat&biw=1280&bih=952&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0CAyQAUoAWoVChMI0OH3zpHfyAIVxTgaCh3HXQ_q#tbm=isch&q=mat+composite+reinforcement&imgc=koewlHrLn3HGqM%3A), 18.8.2015.
- [10] Akovali, G.: Handbook of Composite Fabrication, Rapra Technology Limited, UK, 2001.
- [11] Internet: <http://www.moldedfiberglass.com/processes/processes/closed-molding-processes/vacuum-infusion-molding>, 20.8.2015.
- [12] Internet: [http://compositesgateway.org/presentation/Tooling\\_for\\_Closed\\_Mould\\_Processes-%2027-11-13.pdf](http://compositesgateway.org/presentation/Tooling_for_Closed_Mould_Processes-%2027-11-13.pdf), 20.8.2015.
- [13] Internet: <https://www.rtmcomposites.com/process/light-rtm-lrtm>, 20.8.2015.
- [14] Internet: [http://www.gi-ni.net/1/images/stories/downloads/rtm\\_lght\\_page\\_by\\_page.pdf](http://www.gi-ni.net/1/images/stories/downloads/rtm_lght_page_by_page.pdf), 20.8.2015.
- [15] Internet: <http://www.atlanticcomposites.com/ribs>, 20.8.2015.

- [16] Internet: <http://www.compositesworld.com/knowledgecenter/closed-molding/Closed-Mold-Process/Resin-Transfer-Molding>, 20.8.2015.
- [17] Internet: <http://www.gel-top.dk/cgi-files/mdmgfx/file-599-318218-15339.pdf>, 6.11.2015.