

Prerada i ispitivanje polimernih kompozitnih tvorevina ojačanih 3D staklenim tkaninama

Kapac, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:200457>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-10-03**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Luka Kapac

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Ana Pilipović, dipl. ing.

Student:

Luka Kapac

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se svojoj mentorici izv. prof. dr. sc. Ani Pilipović na prihvaćanju vođenja ove teme te na danim uputama, smjernicama i stručnoj recenziji rada.

Zahvaljujem se Katji i Srečku Podbevšek iz tvrke SPS d.o.o. iz Kamnika iz Slovenije na doniranim *Parabeam* 3D staklenim tkaninama koji su korišteni u ovom diplomskom radu.

Veliko hvala mojem ocu Davoru, majci Belindi i braći Borni i Roku na strpljenju, razumijevanju i potpori tijekom studiranja. Posebno hvala mojim prijateljima Luki i Dunji P., Dragutinu R., Filipu M., Nikoli I., Krešimiru N., Dominiku R., Jurju R., Mariji P. i Zdravku A.

Luka Kapac



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	602-04/21-6/1
Ur. broj:	15-1703-21

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **LUKA KAPAC**

Mat. br.: 035206014

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Prerada i ispitivanje polimernih kompozitnih tvorevina ojačanih 3D staklenim tkaninama**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Processing and testing of polymer composite product reinforced with 3D glass fabrics**

Opis zadatka:

Polimerni kompoziti se sve više primjenjuju u transportnoj industriji, ne samo u sportskim automobilima, nego i za gospodarska vozila i prijevoz putnika. Kompozitni materijali se mogu načiniti u cilju postizanja upravo onih svojstava koja nisu ostvariva kod pojedinih komponenata. Najveća prednost im je niska masa uz dobra mehanička svojstva. Najčešće se primjenjuju klasične tkanine od staklenih i ugljičnih vlakana uz duromernu poliestersku ili epoksidnu matricu. Nedavno su se u velikoj mjeri počele primjenjivati 3D tkanine koje se sastoje od dva sloja tkanine međusobno prošivane zajedno te time omogućuju elastičnost i povrat tkanine nakon djelovanja sile pritiska.

U radu je potrebno napraviti kratki pregled polimernih kompozita, od ojačavala i matrice do postupaka prerade. Također je potrebno dati osvrt na 3D tkanine, njihova svojstva, načine prerade i područja primjene.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je ustanoviti mogućnosti prerade samih 3D staklenih tkanina i njihovog spajanja s klasičnim tkaninama uz slaganje određenih kombinacija debljine gotove tvorevine, a sve u cilju primjene u gospodarskim vozilima za oplata. Nakon prerade različitih kombinacija debljine 3D tkanine i klasičnih tkanina, potrebno je ispitati njihova mehanička svojstva (rastezna i savojna svojstva te žilavost).

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

Zadatak zadan:
30. rujna 2021.

Rok predaje rada:
2. prosinca 2021.

Predviđeni datum obrane:
13. prosinca do 17. prosinca 2021.

Zadatak zadao: *Ana Pilipović*
prof. dr. sc. Ana Pilipović

Predsjednica Povjerenstva:
Runje
prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	I
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
POPIS KRATICA	V
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. KOMPOZITNI MATERIJALI.....	3
2.1. Podjela kompozita prema materijalu matrice.....	5
2.1.1. Kompoziti s metalnom matricom.....	5
2.1.2. Kompoziti s keramičkom matricom.....	7
2.1.3. Kompoziti s polimernom matricom	8
2.2. Podjela kompozita prema obliku ojačavala	9
2.2.1. Kompoziti s česticama	9
2.2.2. Vlasknima ojačani kompoziti	11
2.2.2.1. Staklenim vlasknima ojačani polimerni kompoziti	16
2.2.2.2. Ugljičnim vlasknima ojačani polimerni kompoziti	17
2.2.2.3. Aramidnim vlasknima ojačani polimerni kompoziti.....	18
2.2.3. Slojeviti kompozitni materijali.....	20
2.2.4. Sendvič konstrukcije	21
2.3. Proizvodnja i prerada vlasknima ojačanih kompozita	22
2.3.1. Ručni postupak laminiranja	22
2.3.2. Dodirni postupak sa štrcanjem.....	24
2.3.3. Pultrudiranje.....	25
2.3.4. Namotavanje	25
2.3.5. Podtlačno ulijevanje.....	26
2.3.6. Postupak injekcijskog-posrednog prešanja kapljevite smole s umetnutim trodimenzionalnim ojačavajućim predoblikom (eng. Resin Transfer Moulding - RTM).....	27
3. 3D TKANINE.....	28
3.1. 3D tkanine tvrtke <i>Parabeam</i>	32
4. PRIMJENA KOMPOZITNIH MATERIJALA U TRANSPORTNIM VOZILIMA	38
5. EKSPERIMENTALNI DIO	44
5.1. Izrada kompozitnih ploča.....	44
5.2. Izrezivanje ispitnih tijela.....	49
5.3. Ispitivanje mehaničkih svojstava kompozitnih ploča	49
5.3.1. Ispitivanje rasteznih svojstava	49
5.3.2. Ispitivanje savojnih svojstava	50
5.3.3. Ispitivanje žilavosti	56
5.4. Rasprava.....	60

6. ZAKLJUČAK.....	61
7. LITERATURA.....	62
8. PRILOZI.....	66

POPIS SLIKA

Slika 2.1.	Kompozitni materijal [5]	3
Slika 2.2.	Podjela kompozita s obzirom na materijal matrice i ojačavala [7]	4
Slika 2.3.	Osnovni tipovi kompozita prema obliku ojačavala: a) kompozit s česticama, b) kompozit s vlaknima, c) slojeviti kompozit [8].....	4
Slika 2.4.	Klipnjača s Al matricom ojačana Al ₂ O ₃ česticama [10]	5
Slika 2.5.	Kočni disk od kompozita sa SiC matricom ojačan ugljičnim vlaknima [10].....	7
Slika 2.6.	Krov, poklopac prtljažnika, poklopac motora, odbojnici i vrata <i>Trabanta 600</i> od kompozita s polimernom matricom [19]	9
Slika 2.7.	Kompozit s česticama – abraziv [21]	10
Slika 2.8.	Različiti načini rasporeda vlaknastih ojačavala: a) kontinuirana jednosmjerna vlakna, b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna, c) ortogonalno raspoređena vlakna, d) višesmjerno usmjerena vlakna [8].....	11
Slika 2.9.	Utjecaj usmjerenja vlakana obzirom na naprezanje na Ti-leguru ojačanu vlaknima bora [8]	12
Slika 2.10.	Utjecaj volumnog udjela vlakna bor-silicij-karbida („Borsic“) na svojstvo ojačanog aluminija [8].....	12
Slika 2.11.	Vrste tkanja: a) obično tkanje, b) leno, c) 8-tkani saten, d) 4-tkani saten [14]	13
Slika 2.12.	Svojstva vlakana: (a) krivulja „naprezanje-istezanje“, (b) usporedba specifične čvrstoće i specifičnog modula elastičnosti metala i nekih vlakana [8]	15
Slika 2.13.	Usporedba specifičnog modula elastičnosti i specifične čvrstoće nekih metala i kompozita [8]	15
Slika 2.14.	Staklena vlakna [26].....	16
Slika 2.15.	Ugljična vlakna [27].....	18
Slika 2.16.	Aramidna vlakna [28].....	18
Slika 2.17.	Struktura laminata s različitim smjerovima polaganja vlakna u slojevima; a) jednosmjerno polaganje; b) višesmjerno polaganje [30].....	20
Slika 2.18.	Kompozitni sendvič s jezgrom u obliku pčelinjeg saća [14].....	21
Slika 2.19.	Postupak ručnog laminiranja [34]	23
Slika 2.20.	Dodirni postupak sa štrcanjem [38].....	24
Slika 2.21.	Prikaz postupka pultrudiranja [14]	25
Slika 2.22.	Prikaz vijčanog, prstenastog (obodnog) i polarnog namotavanja [14].....	26
Slika 2.23.	Postupak podtlačnog ulijeivanja [38]	26
Slika 2.24.	Postupak RTM [14]	27
Slika 3.1.	Primjeri 3D tkanina [42].....	28
Slika 3.2.	Razlika između 2D i 3D tkanine [43,44].....	28
Slika 3.3.	Vrste 3D tkanina na temelju puta veziva: a) ORT, b) LTL i c) AI [41].....	31
Slika 3.4.	Primjeri mogućih uzoraka vezivanja za ORT: a) običan, b) keper i c) saten [41]	31
Slika 3.5.	<i>Parabeam</i> 3D tkanina od E-stakla [47]	32
Slika 3.6.	Vertikalni stupovi <i>Parabeam</i> 3D tkanine u obliku broja 8 [46].....	33
Slika 3.7.	Odnos tlačne čvrstoće i omjera vlakana i smole [48].....	35
Slika 3.8.	Upute za preradu <i>Parabeam</i> 3D staklenih tkanina [48]	36
Slika 4.1.	Putnički autobus <i>Citea</i> tvrtke <i>VDL Bus & Coach</i> [54]	40
Slika 4.2.	Kompozitne komponente na autobusu <i>Citea</i> [54].....	40
Slika 4.3.	Električni autobus <i>Dancer</i> (lijevo) i trolejbus <i>Škoda 14Tr</i> (desno) [55,56].....	41
Slika 4.4.	Unutrašnjost prikolice [57].....	42

Slika 4.5.	<i>Karsan e-Jest</i> namijenjen za promet u park-šumi Marjan [59].....	42
Slika 5.1.	Struktura izrađenih ploča.....	45
Slika 5.2.	Nanošenje odvajala i poliranje kalupa.....	45
Slika 5.3.	Vaganje smole i katalizatora i miješanje.....	46
Slika 5.4.	Postupak izrade ploče.....	47
Slika 5.5.	Povratak <i>Parabeam</i> 3D staklenih tkanina u prvobitni položaj nakon deformiranja.....	48
Slika 5.6.	Natapanje sloja tkanine odnosno mata smolom i istiskivanje zraka.....	48
Slika 5.7.	Dodavanje <i>end tabova</i> na krajeve ispitnih tijela za ispitivanje rastezних svojstava.....	50
Slika 5.8.	Dijagram savojne sile – pomaka za prvu ploču S-1.....	51
Slika 5.9.	Dijagram savojne sile – pomaka za drugu ploču S-2.....	52
Slika 5.10.	Dijagram savojne sile – pomaka za treću ploču S-3.....	52
Slika 5.11.	Dijagram savojne sile – pomaka za četvrtu ploču S-4.....	53
Slika 5.12.	Dijagram savojne sile – pomaka za petu ploču S-5.....	53
Slika 5.13.	Dijagram savojne sile – pomaka (prikaz krivulja srednjih vrijednosti) svih pet ploča.....	54
Slika 5.14.	Savijanje ispitnog tijela S-3-2: a) početak ispitivanja, b) popuštanje vezivnih vlakana, c) rastezno pucanje vlakana na dnu ispitnog tijela.....	55
Slika 5.15.	Uređaj za ispitivanje žilavosti po Charpyu.....	56
Slika 5.16.	Uređaj za ispitivanje žilavosti po Izodu.....	57
Slika 5.17.	Srednje vrijednosti žilavosti po Charpyu i Izodu.....	58
Slika 5.18.	Ispitni tijelo Ž-5-3 nakon ispitivanja žilavosti.....	59
Slika 5.19.	Srednje vrijednosti žilavosti po Izodu u ponovljenom ispitivanju.....	59

POPIS TABLICA

Tablica 2.1.	Svojstva nekih metalnih kompozita ojačanih kontinuiranim jednosmjernim vlaknima [8]	6
Tablica 2.2.	Čvrstoća pri sobnoj temperaturi i žilavost Al_2O_3 za različite sadržaje SiC viskera [8].....	8
Tablica 2.3.	Primjeri i primjena odabranih kompozita s disperzijom [8].....	10
Tablica 2.4.	Orijentacijske vrijednosti svojstava nekih materijala za ojačavanje [8].....	14
Tablica 2.5.	Svojstva kontinuiranih jednosmjernih staklenim, ugljičnim i aramidnim vlaknima ojačanih epoksidnih kompozita u uzdužnom i poprečnom smjeru (u svim slučajevima volumni udio vlakana iznosi 0,6) [8].....	19
Tablica 3.1.	Tehnički podaci za <i>Parabeam</i> 3D staklene tkanine impregnirane s poliesterskom smolom [48]	37
Tablica 5.1.	Potrebna količina smole ovisno o vrsti ojačavala (dimenzije ojačavala 250 x 300 mm i omjer ojačavala i smole 1:1,1)	46
Tablica 5.2.	Dimenzije, masa te izračunata gustoća kompozitnih ploča	49
Tablica 5.3.	Rezultati ispitivanja savojnih svojstava.....	54
Tablica 5.4.	Usporedba rezultata ispitivanja kompozitnih ploča.....	60

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis oznake
a_{cU}	kJ/m^2	Žilavost po Charpyu bez zareza
a_{iU}	kJ/m^2	Žilavost po Izodu bez zareza
b	mm	Širina
E	kN/mm^2	Modul rastezljivosti
E_c	J	Apsorbirana energija kod udara
E_f	N/mm^2	Modul savitljivosti
E_f/ρ	$\times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}^2$	Specifični modul savitljivosti
EI	Nm^2	Savojna krutost
F_1	N	Sila 1
F_2	N	Sila 2
G_c	N/mm^2	Modul smicanja
h	mm	Debljina
K_{IC}	$\text{N/mm}^{3/2}$	Lomna žilavost
L	mm	Razmak između oslonaca
R	$\text{m}^2\text{K/W}$	Toplinski otpor
R_m	N/mm^2	Rastezna čvrstoća
s_1	mm	Pomak pri opterećenju silom 1
s_2	mm	Pomak pri opterećenju silom 2
α_L	K^{-1}	Koeficijent linearnog toplinskog rastezanja
λ	W/mK	Toplinska provodnost
ρ	kg/m^3	Gustoća
σ_c	N/mm^2	Pritisna čvrstoća
τ	N/mm^2	Smična čvrstoća

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
AI	Isprepletenost pod kutem – e. <i>angle interlock</i>
Ag	Srebro
Al	Aluminij
AlMg1SiCu	Legura aluminija
AlN	Aluminijev nitrid
Al ₂ O ₃	Glinica
Al ₂ O ₃ -SiO ₂	Mulit
B ₄ C	Bor-karbid
Be	Berilij
BeO	Berilij-oksidi
CdO	Kadmij-oksidi
CMC	Keramički kompozit – e. <i>ceramic matrix composites</i>
Co	Kobalt
CO ₂	Ugljikov dioksid
FPR	Polimeri ojačani vlaknima – e. <i>fiber reinforced polymers</i>
LTL	Samo kroz susjedne slojeve – e. <i>layer-to-layer</i>
Mg	Magnezij
MgO	Magnezij-oksidi
MCM	Metalni kompozit – e. <i>metal matrix composites</i>
Ni-20%Cr-ThO ₂	Legura nikla
ORT	Ortogonalna isprepletenost – e. <i>orthogonal interlock</i>
Pb	Olovo
PbO	Olovov oksid
PMC	Polimerni kompozit – e. <i>polymer matrix composites</i>
Pt	Platina
RTM	Postupak injekcijskog-posrednog prešanja kapljevite smole s umetnutim trodimenzionalnim ojačavajućim predoblikom – e. <i>resin transfer moulding</i>
Si	Silicij
SiC	Silicijev karbid
SiO ₂	Silicijev dioksid
Si ₃ N ₄	Silicijev nitrid
ThO ₂	Torijev oksid
TT	Kroz cijelu debljinu tkanine – e. <i>through-thickness</i>
UV	Ultraljubičasto – e. <i>ultraviolet</i>
W	Volfram
Y ₂ O ₃	Itrijev oksid

ZrO₂

Cirkonijev dioksid

SAŽETAK

Kompozitni materijali se izrađuju u cilju postizanja upravo onih svojstava koja nisu ostvariva kod pojedinačnih komponenata. Najveća prednost kompozitnih materijala je niska masa uz dobra mehanička svojstva i zbog toga postaju sve prisutniji u raznim granama industrije, posebno u transportnoj industriji.

U ovom radu opisana je podjela kompozita prema materijalu matrice i ojačavala, gdje se najveća pažnja posvetila vlaknima ojačanim polimernim kompozitima. Opisani su najznačajniji postupci prerade kompozita s naglaskom na postupak ručnog laminiranja koji je primijenjen u eksperimentalnom dijelu rada.

Industrija iskazuje sve veće zanimanje za izradu predoblika (tkanje) koja su blizu veličini i obliku gotovog proizvoda za vlaknima ojačane kompozite. Tradicionalno se predoblik izrađivao od 2D tkanina, no nedavno se pokazalo da se 3D tkanine mogu uspješno upotrebljavati. Glavne prednosti 3D tkanina uključuju smanjenje mase, uklanjanje delaminacije, smanjen rizik od pukotina, kraće vrijeme proizvodnje i smanjenje troškova. Glavna prednost smanjenje mase ujedno je i okosnica ovog diplomskog rada da se ustanovi primjena tih materijala u transportnoj industriji.

U eksperimentalnom dijelu opisana je izrada pet kompozitnih ploča od 3D staklenih tkanina tvrtke *Parabeam*. Provedena su ispitivanja rasteznih i savojnih svojstava i žilavosti. Na temelju rezultata provedena je usporedba i analiza.

Ključne riječi: 3D tkanina, kompozitni materijali, rastezna svojstva, savojna svojstva, transportna industrija, žilavost

SUMMARY

Composite materials are made in order to achieve properties that are not achievable with individual components. The biggest advantage of composite materials is low mass with good mechanical properties and therefore they are becoming more and more present in various branches of industry, especially in the transport industry.

This paper describes the division of composites according to the matrix material and reinforcements, where the greatest attention was paid to fiber reinforced polymer composites. The most significant methods of composite processing are described, with an emphasis on the hand lay-up procedure used in the experimental part of the paper.

The industry is showing increasing interest in making roving preforms that are close to the size and shape of the finished product for fiber-reinforced composites. Traditionally, the preform was made of 2D fabrics, but recently it has been shown that 3D fabrics can be used successfully. The main advantages of 3D fabrics include weight reduction, removal of delamination, reduced risk of cracks, shorter production time and reduced costs. The main advantage of weight reduction is also the backbone of this thesis to establish the application of these materials in the transport industry.

In the experimental part, the production of five composite panels made from *Parabeam* 3D glass fabrics is described. Tensile, flexural properties and toughness tests were performed. Based on the results, a comparison and analysis was performed.

Key words: 3D fabric, bending properties, composite materials, tensile properties, toughness, transport industry

1. UVOD

Težnja za istraživanjem i stvaranjem je jedna od temelja ljudske prirode. Ta težnja je pokretač raznim otkrićima i revolucijama koja su olakšavale i poboljšavale živote ljudima i pomogle razvoju civilizacija. Jedan od odgovora na pitanje može li se napraviti nešto novo, nešto bolje su kompozitni materijali.

Prva poznata upotreba kompozita pripisana je Mezopotamcima. Ti su drevni ljudi zalijepili drvene trake pod različitim kutovima kako bi stvorili šperploču 3400. pr. Kr. Između 2181 i 2055. pr. Kr., Egipćani su primijenili slojeve lana i papirusa natopljenog gipsom za izradu obrednih pogrebnih maski. Oko 1500. pr. Kr., egipatski i mezopotamski graditelji i obrtnici primjenjivali su slamu za ojačavanje opeke od blata, keramike i čamaca. [1]

Oko 1200. godine Mongoli su izumili prve kompozitne lukove izrađene od kombinacije drveta, bambusa, kostiju, tetiva stoke, rogova i svile povezanih prirodnom borovom smolom. Ovi mali, snažni, izuzetno precizni lukovi bili su oružje od kojeg se najviše plašilo do izuma učinkovitog vatrenog oružja u 14. stoljeću. [1]

Moderna era kompozita započela je kada su znanstvenici razvili plastiku. Do tada su prirodne smole dobivene iz biljaka i životinja bile jedini izvor ljepila i veziva. U ranim godinama 20. stoljeća razvijena je plastika poput vinila, polistirena, fenola i poliestera. Ovi novi sintetički materijali nadmašili su smole dobivene iz prirode. Međutim, sama plastika ne može pružiti dovoljno čvrstoće za neke konstrukcijske primjene. Ojačavanje je bilo potrebno kako bi se osigurala dodatna čvrstoća i krutost. [2]

1935. Owens Corning predstavio je prva staklena vlakna. Staklena vlakna, u kombinaciji s polimerom (zvan kao stakloplastika) stvorila je nevjerojatno jaku strukturu koja je ujedno i lagana. Ovo je bio početak industrije polimera ojačanih vlaknima (e. *Fiber Reinforced Polymers (FRP)*). [2]

Drugi svjetski rat iznjedrio je potrebu za kompozitnim materijalima koji su lakši, jači i postojani na vremenske utjecaje. Prije Drugog svjetskog rata, krila prvih zrakoplova izrađeni su od tankih slojeva drva i smole. Kako je započeo Drugi svjetski rat, zrakoplovi su izrađivani od stakloplastike kako bi se smanjila masa i spriječila korozija. Osim čvrstoće i male mase takvog materijala, Drugi svjetski rat donosi otkriće "nevidljivosti" stakloplastike radio

frekvencijama, te se počela primjenjivati za izradu kućišta za elektroničku radarsku opremu tijekom rata. [3]

Nakon rata, vojna potražnja za stakloplastikom i FRP materijalima opada. Krajem 1940-ih obilježena je javna i komercijalna upotreba stakloplastike i FRP-a u proizvodnji. Čim su stakloplastika i FRP postali potrošački proizvod, nautička i automobilska industrija postali su sljedeći glavni potrošači tih materijala. [3]

U 1970-ima industrija kompozita počela se još više razvijati. Razvijene su bolje plastične smole i poboljšana armaturna vlakna. Tvrtka *DuPont* je razvila aramidno vlakno poznato pod nazivom Kevlar, koje se primjenjivao u pancirkama zbog visoke rastezne čvrstoće, visoke gustoće i male mase. U to vrijeme su razvijena i ugljična vlakna; sve su češće zamjenjivala dijelove izrađene od čelika. [2]

Sve viša čvrstoća kompozitnih materijala omogućila je njihovu upotrebu u javnoj infrastrukturi. Tijekom ranih 1980-ih izgrađeni su prvi mostovi od kompozita u Aziji i Europi. Pješачki mostovi od kompozita i betonski mostovi armirani s FRP-om mogli su se pronaći diljem svijeta do 1990-ih. [3]

Industrija kompozita se i dalje razvija, većim dijelom je usmjerena na obnovljive izvore energije. Na primjer, lopatice vjetroagregata stalno pomiču ograničenja veličine i zahtijevaju primjenu naprednih kompozitnih materijala. [2]

2. KOMPOZITNI MATERIJALI

Kompozitni materijali ili kompoziti (slika 2.1) su višefazni materijali dobiveni kombinacijom različitih materijala u svrhu postizanja svojstava koje pojedinačni materijali sami po sebi ne mogu postići. Oni nisu višefazni materijali u kojima se različite faze prirodno tvore reakcijama, faznim transformacijama ili drugim pojavama. Kompozitni materijali trebaju se razlikovati od legura, koje mogu sadržavati više komponenata, ali nastaju postupcima poput lijevanja. Kompoziti se mogu prilagoditi različitim svojstvima odgovarajućim odabirom njihovih komponenti, njihovih omjera, raspodjele, morfologije, stupnjeva kristalnosti, kristalografskih tekstura, kao i strukture i veze među komponentama. Zbog svoje prilagodljivosti, kompoziti se mogu dizajnirati tako da zadovolje potrebe zrakoplovne, automobilske, elektroničke, građevinarske, energetske, biomedicinske i druge industrije. Kao rezultat toga, kompoziti čine većinu komercijalnih inženjerskih materijala. [4]



Slika 2.1. Kompozitni materijal [5]

Kompoziti često pokazuju mnoge korisne karakteristike; u mnogim slučajevima kompoziti su čvršći, manje gustoće ili jeftiniji u usporedbi s konvencionalnim konstrukcijskim materijalima. Primjeri kompozita su beton, ojačana guma, vlaknima ojačani polimeri, drvo (celulozna vlakna ugrađena u hemicelulozu), kosti (meki protein kolagen u kombinaciji s tvrdim mineralom apatitom) i dr. [6]

Kompoziti su sastavljeni od pojedinačnih osnovnih materijala, koji se nazivaju konstituentima. Kompozit se sastoji od matrice i ojačavala. Matrica okružuje i drži ojačavala na njihovim mjestima. Ojačavala doprinose svojim specifičnim fizičkim i mehaničkim svojstvima, čime se poboljšavaju svojstva matrice. Postignuti sinergizam između dviju faza

2.1. Podjela kompozita prema materijalu matrice

2.1.1. Kompoziti s metalnom matricom

Kompoziti s metalnom matricom, kao što ime govori, sastoje se od vlakana ili čestica okruženih metalnom matricom. Primjena metalne matrice nudi potencijal proizvodnje kompozita s vrlo visokom krutošću i čvrstoćom, kao i s vrlo visokom temperaturnom postojanošću. Postojanost pri povišenim temperaturama nije samo superiornija od kompozita s polimernom matricom, već i od samih čistih metala. [9]

Na slici 2.4 prikazan je primjer uporabe kompozita s metalnom matricom.



Slika 2.4. Klipnjača s Al matricom ojačana Al₂O₃ česticama [10]

U strukturnim primjenama matrica se obično sastoji od lakšeg metala poput magnezija, titana ili aluminija. U visokotemperaturnim primjenama uobičajene su matrice od kobalta i legura kobalt-nikal. Kontinuirana ugljikova, silicijev karbid ili keramička vlakna neki su od materijala koji se mogu ugraditi u metalnu matricu. [11]

Na primjer, kompoziti s metalnom matricom se sve češće upotrebljavaju u automobilskoj industriji. Ovi kompoziti imaju matrice od aluminija, a ojačavaju je vlaknima od silicijevog karbida. Svemirska era povećala je potražnju za kompozitima s metalnom matricom koji imaju visoku specifičnu krutost i minimalan koeficijent toplinskog rastezanja. [11]

U tablici 2.1 prikazana su svojstva nekih metalnih kompozita.

Tablica 2.1. Svojstva nekih metalnih kompozita ojačanih kontinuiranim jednosmjernim vlaknima [8]

Vlakno	Matrica	Volumni udio vlakana, %	Gustoća ρ , kg/m ³	Uzdužni modul rastezljivosti E , kN/mm ²	Uzdužna rastezna čvrstoća R_m , N/mm ²
Ugljično vlakno	Al-legura 6061 AlMg1SiCu	41	2440	320	620
Vlakno bora		48	-	207	1515
SiC		50	2930	230	1480
Al ₂ O ₃	Al-legura 380,0 Al-Si-Mg	24	-	120	340
Ugljično vlakno	Mg-legura AZ31	38	1830	300	510
„Borsic“	Titan	45	3680	220	1270

Neki od primjera primjene kompozita s metalnom matricom su: [11]

- potisnici za trkaće motore
- svrdla od tvrdog metala
- oklopi za tenkove
- automobilska industrija - disk kočnice, pogonska vratila, motori
- komponente zrakoplova - strukturna komponenta stajnog trapa mlažnjaka
- okviri za bicikle
- dijelovi za satelite
- moduli s gusto naslaganim čipovima u elektronici
- dijelovi u akceleratorima čestica.

Iako kompoziti s metalnom matricom imaju prednosti u odnosu na kompozite s polimernom matricom, kao što su bolja otpornost na abraziju, otpornost puzanju, postojanost na razgradnju organskim kapljevina, dimenzijska stabilnost i nezapaljivost, oni su ograničeni u primjeni zbog svoje puno veće mase i troškova proizvodnje. [9]

2.1.2. Kompoziti s keramičkom matricom

Glavne prednosti keramičkih materijala u odnosu na druge materijale su njihova postojanost na oksidaciju i visoke temperature, njihova visoka tališta i visoka tlačna čvrstoća. Nažalost, keramika je krhka i stoga ima relativno niske vrijednosti žilavosti. Jedna od metoda povećanja žilavosti keramike je ojačavanje vlaknima, viskerima ili česticama. [9]

Kompoziti s keramičkom matricom su vrsta kompozita s keramikom kao ojačavalom i kao matricom. Ovi kompoziti su razvijeni za primjenu pri zahtjevnim toplinskim i mehaničkim opterećenjima, kao što su zrakoplovna, nuklearna, automobilska (slika 2.5), svemirska i kemijska industrija. [12]



Slika 2.5. Kočni disk od kompozita sa SiC matricom ojačan ugljičnim vlaknima [10]

Strukturna keramika koja se upotrebljava kao materijal matrice može se kategorizirati kao oksidna ili neoksidna. Glinica (Al_2O_3) i mulit ($Al_2O_3 - SiO_2$) su dvije najčešće upotrebljene oksidne keramike. Poznati su po svojoj toplinskoj i kemijskoj stabilnosti. Uobičajena neoksidna keramika su silicijev karbid (SiC), silicijev nitrid (Si_3N_4), bor-karbid (B_4C) i aluminijev nitrid (AlN). Od ovih keramika najčešće se upotrebljava silicijev karbid, jer ima izvrsnu postojanost pri visokim temperaturama. Silicijev nitrid se primjenjuje kada se zahtjeva visoka čvrstoća, a aluminijev nitrid je od interesa zbog svoje visoke toplinske provodnosti. [13]

Ojačavala koja se primjenjuju u kompozitima s keramičkom matricom su SiC, Si_3N_4 , AlN, i druga keramička vlakna. Od ovih, SiC se najčešće upotrebljava zbog svoje toplinske stabilnosti i kompatibilnosti sa širokim raspon oksidnih i neoksidnih keramičkih matrica.

Oblici u kojima se ojačavala upotrebljavaju u keramičkim kompozitima su viskeri, čestice i monofilamentna i višefilamentna kontinuirana vlakna. [13]

U tablici 2.2 prikazana je čvrstoća i žilavost Al_2O_3 za različite sadržaje SiC viskera pri sobnoj temperaturi.

Tablica 2.2. Čvrstoća pri sobnoj temperaturi i žilavost Al_2O_3 za različite sadržaje SiC viskera [8]

Volumni udio viskera	Čvrstoća, R_m , N/mm ²	Lomna žilavost, K_{IC} , N/mm ^{3/2}
0	-	142
10	455 ± 55	225
20	655 ± 135	237...285
30	850 ± 130	190

Keramički kompoziti se primjenjuju za umetke reznih alata i za mehanički i tribološki opterećene dijelove izložene visokim radnim temperaturama ($> 1600\text{ }^\circ\text{C}$) kao što su primjerice pojedini dijelovi motora. [8,14]

2.1.3. Kompoziti s polimernom matricom

Za razliku od kompozita s keramičkom matricom, u kojem se ojačavalo prvenstveno upotrebljava za poboljšanje žilavosti, ojačavalo u kompozitu s polimernom matricom daje čvrstoću i krutost koje nedostaje matrici. Funkcija relativno slabe matrice je ta da povezuje ojačavala i na njih prenosi opterećenje. Kao i kod drugih kompozita, ojačavala mogu biti u obliku čestica i viskera, a najčešće u obliku vlakana ili tkanina. [15]

Postoji nekoliko različitih polimernih materijala koje se mogu upotrijebiti za izradu matrice kompozita. Među polimernim kompozitima, duromerni kompoziti prevladavaju nad plastomernim kompozitima. [16]

I duromerni i plastomerni materijali imaju svoje mjesto na tržištu. Općenito govoreći, duromeri su prisutni već duže vrijeme i imaju dobro utvrđeno mjesto na tržištu, često imaju niže cijene sirovina i omogućuju lako vlaženje vlaknastih ojačavala i jednostavno oblikovanje. Drugim riječima, duromerne kompozite je često lakše obraditi nego plastomerne. Plastomeri su čvršći i manje lomljivi od duromera, imaju bolju kemijsku postojanost, ne

trebaju biti skladišteni pri niskim temperaturama kao neumreženi duromeri (preprezi) i mogu se lakše reciklirati i popraviti. [16]

Primjeri plastomernih materijala koji se upotrebljavaju kao materijali matrice su polietilen, polipropilen, polistiren, polikarbonat, poliacetal, poli(amid-imid), poli(eter-eter-keton), polisulfon, poli(fenilen-sulfid), poli(eter-imid), itd. [17]

Primjeri duromernih materijala koji se upotrebljavaju kao materijali matrice su epoksidne, poliesterske i fenolne smole, ureje, melamin, silikon i poliimid. [17]

Polimerni kompoziti se upotrebljavaju u ortopediji i kirurgiji, za izradu vojne i sportske opreme, za izradu dijelova strojeva i vozila (slika 2.6), itd. [18]



Slika 2.6. Krov, poklopac prtljažnika, poklopac motora, odbojnici i vrata *Trabanta 600* od kompozita s polimernom matricom [19]

2.2. Podjela kompozita prema obliku ojačavala

2.2.1. *Kompoziti s česticama*

Ovo su jedna od najčešće korištenih vrsta kompozita zbog svoje dostupnosti, a i zbog ekonomičnosti. Mogu se podijeliti u dvije skupine s obzirom na veličinu čestica i mehanizam ojačavanja – kompoziti s velikim česticama i kompoziti s disperzijom. [20]

Kompoziti s velikim česticama sadrže relativno velike količine grubih čestica. Često su osmišljeni kako bi proizveli različite kombinacije svojstava, a ne nužno da bi ih poboljšali. Mogu se koristiti u kombinaciji sa svim vrstama materijala matrice – metalnom, keramičkom

i polimernom matricom. Primjer kompozita s velikim česticama je rezna oštrica od tvrdog metala – čestice volfram karbida ili titan karbida ugrađene u matricu od kobalta ili nikla. [20]
Na slici 2.7 prikazan je primjer kompozita s velikim česticama.



Slika 2.7. Kompozit s česticama – abraziv [21]

U slučaju kompozita s disperzijom veličina čestica je razmjerno manja, u rasponu od 0,01 do 0,1 μm . Ojačanje se događa na atomskoj i molekularnoj razini, slično precipitacijskom očvršćivanju kod metala. Primjer je torijev dioksid (ThO_2) dispergirani u niklu koji daje čvrstoću pri povišenim temperaturama. [20]

U tablici 2.3 su navedeni dodatni primjeri i primjene nekih kompozita s disperzijom.

Tablica 2.3. Primjeri i primjena odabranih kompozita s disperzijom [8]

Sustav	Primjena
Ag-CdO	Električni kontakti
Al- Al_2O_3	Nuklearni reaktori
Be-BeO	Svemirska tehnika i nuklearni reaktori
Co- ThO_2 , Y_2O_3	Magnetski materijali postojani puzanju
Ni-20 % Cr- ThO_2	Dijelovi turbina
Pb-PbO	Ploče akumulatora
Pt- ThO_2	Električne komponente
W- ThO_2 , ZrO_2	Grijači

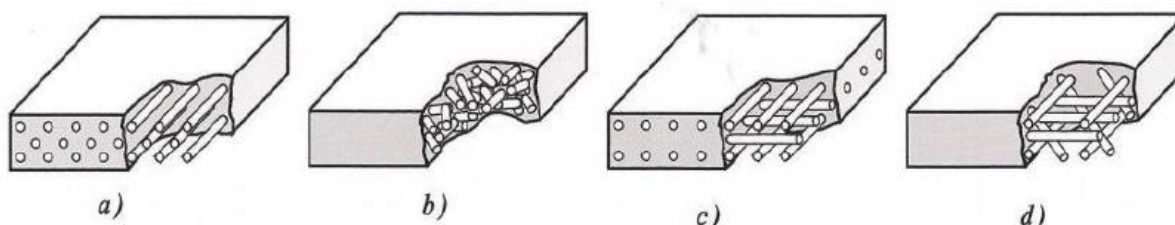
Ojačavanje kompozita česticama je manje učinkovito od ojačavanja vlaknima. Kompoziti ojačani česticama prvenstveno doprinose povišenju krutosti, ali također mogu postići povišenje čvrstoće i žilavosti. U svim slučajevima, poboljšanja su manja nego što bi se to postiglo u kompozitu ojačanim vlaknima. Glavna prednost kompozita s česticama je niska cijena i jednostavnost proizvodnje i oblikovanja. [9]

2.2.2. *Vlaknima ojačani kompoziti*

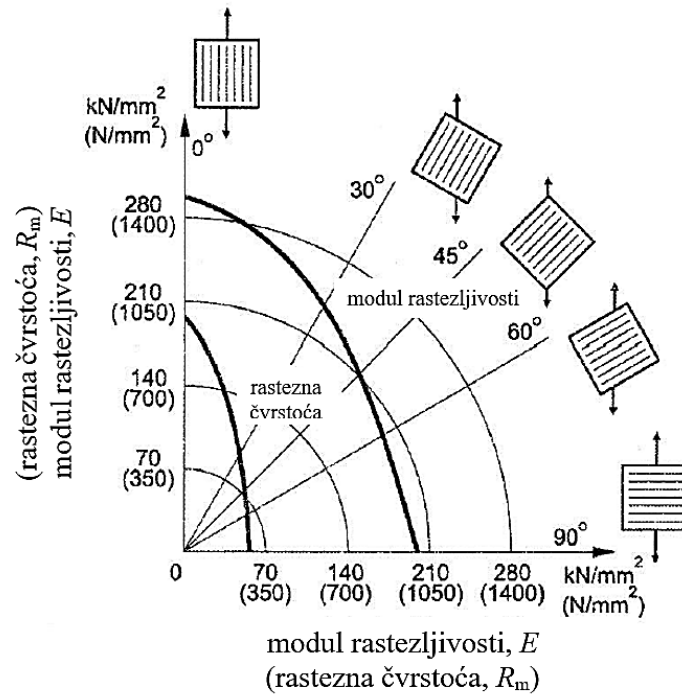
Vlakna se najčešće primjenjuju kao ojačavala u kompozitima i imaju najveći utjecaj na svojstva kompozitnih materijala. Razlog tome je to što vlakna imaju velik omjer „duljina/promjer“, što može osigurati učinkovit prijenos posmičnog naprezanja između matrice i vlakana, te mogućnost obrade i izrade kompozita u različitim oblicima koristeći različite tehnike. [16]

Kompozit ojačan vlaknima nudi ne samo veliki omjer čvrstoće i mase, nego i iznimna svojstva poput visoke izdržljivosti, krutosti, svojstva prigušivanja vibracija, savojne čvrstoće i postojanosti na koroziju, trošenje, udarce i vatru. Ovaj veliki broj različitih značajki doveli su kompozitne materijale do primjene u strojarskoj, građevinskoj, zrakoplovnoj, automobilskoj, biomedicinskoj, pomorskoj i mnogim drugim proizvodnim industrijama. [22]

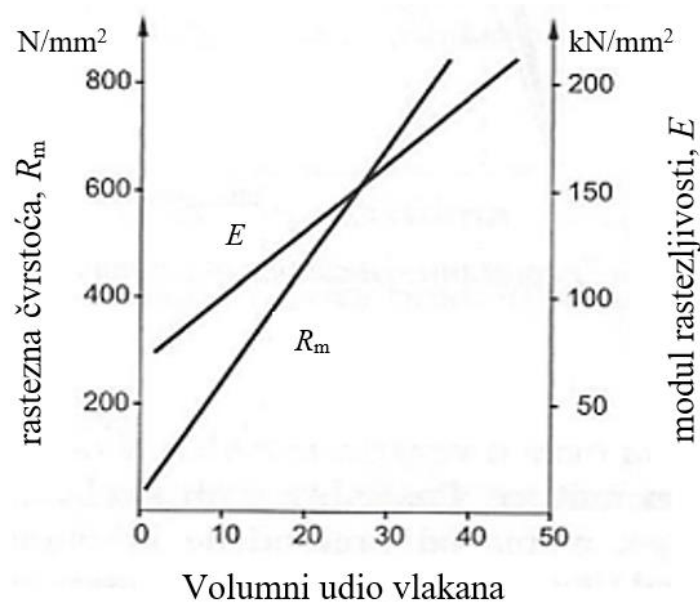
Kontinuirana vlakna imaju velik omjer „duljina/promjer“, dok diskontinuirana vlakna imaju mali omjer. Kompoziti od kontinuiranih vlakana obično imaju neku željenu orijentaciju, dok diskontinuirana vlakna općenito imaju nasumičnu orijentaciju (slika 2.8). Kompoziti od kontinuiranih vlakana se često izrađuju u laminarnom obliku slaganjem pojedinačnih tkanina kontinuiranih vlakana u različitim smjerovima kako bi se postigla željena čvrstoća i krutost (slika 2.9), a volumni udjeli vlakana se kreću do 40 do 70 % (slika 2.10). Vlakna stvaraju kompozite visoke čvrstoće zbog svog malog promjera i sadrže daleko manje nedostataka (obično površinski nedostaci) u usporedbi s homogenim materijalom. U pravilu, što je manji promjer vlakna, viša je njegova čvrstoća, ali često se troškovi povećavaju kako promjer postaje manji. Osim toga, vlakna visoke čvrstoće manjeg promjera imaju veću fleksibilnost i podložniji su izradi postupcima poput tkanja ili namotavanja. Tipični materijali vlakna uključuju staklo, aramid i ugljik, koji mogu biti kontinuirani ili diskontinuirani. [23]



Slika 2.8. Različiti načini rasporeda vlaknastih ojačavala: a) kontinuirana jednosmjerna vlakna, b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna, c) ortogonalno raspoređena vlakna, d) višesmjerno usmjerena vlakna [8]



Slika 2.9. Utjecaj usmjerenja vlakana obzirom na naprezanje na Ti-leguru ojačanu vlaknima bora [8]



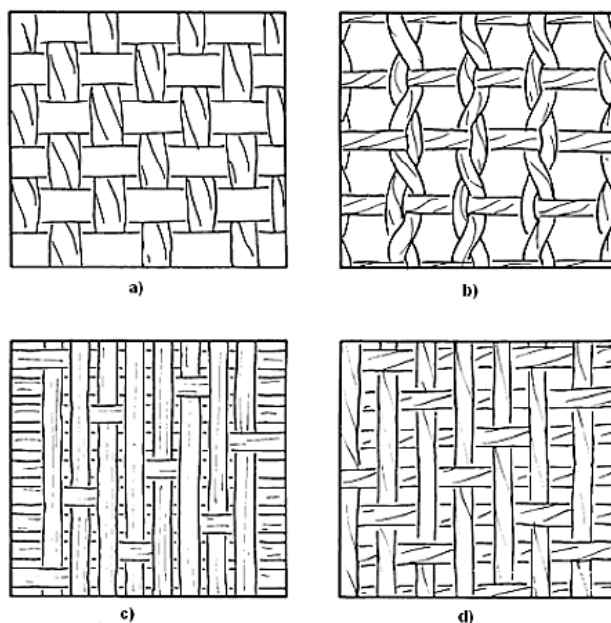
Slika 2.10. Utjecaj volumnog udjela vlakna bor-silicij-karbida („Borsic“) na svojstvo ojačanog aluminija [8]

Na temelju promjera i karaktera, vlakna su grupirana u tri različite grupe: viskeri, vlakna i žice. Viskeri su vrlo mali monokristali koji imaju izuzetno velike omjere duljine i promjera. Kao posljedica njihovih malih dimenzija, imaju visok stupanj pravilnosti kristalne građe i praktički su bez grešaka, što objašnjava njihovu iznimno visoku čvrstoću; oni su među

najjačim poznatim materijalima i usprkos tome, viskeri se ne primjenjuju često kao ojačavala jer su izuzetno skupi. Štoviše, teško je i često nepraktično ugraditi viskere u matricu. Mogu biti od silicijevog karbida, silicijevog nitrda, aluminijevog oksida i grafita. [24]

Vlaknasti materijali općenito su ili polimeri ili keramika i mogu biti kristalasti ili amorfni (npr. aramid, aluminijev oksid, silicij karbid, ugljik, bor i staklo). Fine žice imaju relativno velike promjere; tipični materijali uključuju čelik, volfram i molibden. Žice se primjenjuju kao radijalna čelična armatura u automobilskim gumama, pri namotavanju visokotlačnih crijeva i čahura i sl. [24]

Za primjene gdje je potrebno više od jedne orijentacije vlakana primjenjuje se tkanina. Ovisno o vrsti tkanja, načinu polaganja i usmjeravanja tkanina, mijenjaju se svojstva kompozita. Na slici 2.11 su prikazane najčešće vrste tkanja. Slika 2.11a predstavlja obično tkanje (e. *plain*) gdje svako vlakno osnove prolazi naizmjenično ispod i iznad svakog vlakna potke i tako se postiže najviša mehanička otpornost. Jednolično tkanje (e. *leno*) na slici 2.11b se obično primjenjuje zajedno s drugim vrstama tkanja jer ako se upotrebljava samo, njegova „otvorenost“ ne bi mogla proizvesti učinkovitu kompozitnu komponentu, no samostalno se može primijeniti za izradu laganih membrana. Za zakrivljene površine kao što su dijelovi projektila i zrakoplova primjenjuje se saten tkanje (e. *eight-harness satin weave*) prikazano na slici 2.11c, a za manje zakrivljene površine primjenjuje se tkanje prikazano na slici 2.11d (e. *four harness satin – crowfoot*). [14,25]

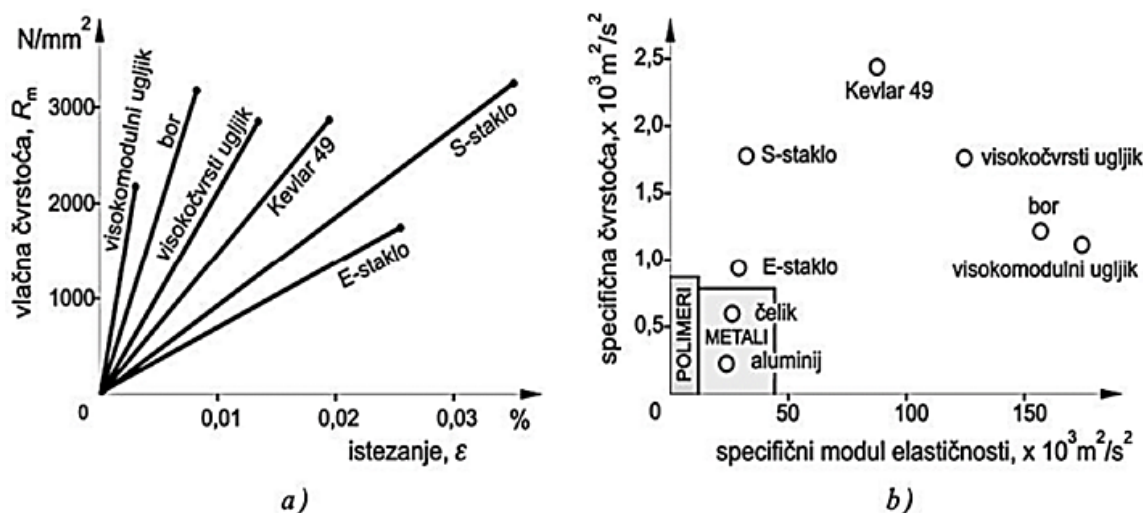


Slika 2.11. Vrste tkanja: a) obično tkanje, b) leno, c) 8-tkani saten, d) 4-tkani saten [14]

Za izradu vlakana primjenjuju se materijali koji imaju visok specifični modul elastičnosti ili čvrstoću jer vlakna moraju biti lagana, čvrsta i kruta, a isto tako moraju imati visoko talište. U tablici 2.4 i na slici 2.12 su navedeni neki podaci za svojstva ojačavala. [8]

Tablica 2.4. Orijentacijske vrijednosti svojstava nekih materijala za ojačavanje [8]

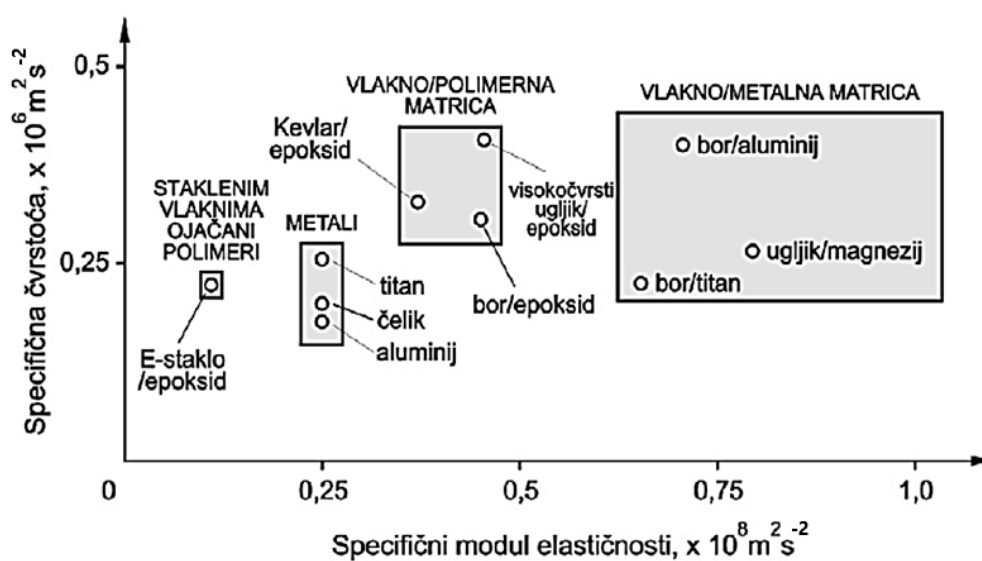
Materijal	Gustoća ρ , kg/m^3	Rastezna čvrstoća, N/mm^2	Specifična čvrstoća, $(\times 10^6 \text{m}^2/\text{s}^2)$	Modul rasteznosti, kN/mm^2	Specifični modul, $(\times 10^6 \text{m}^2/\text{s}^2)$
Viskeri					
Grafit	2200	20700	9,1	700	318
Silicijev nitrid (Si_3N_4)	3200	5000...7000	1,56...2,2	350...380	109...118
Aluminijev oksid (Al_2O_3)	4000	10000...20000	2,5...5	700...1500	175...375
Silicijev karbid (SiC)	3200	20000	6,25	480	150
Vlakna					
Aluminijev oksid	3950	1380	0,35	379	96
Aramid (Kevlar 49)	1440	3600...4100	2,5...2,85	131	91
Ugljik	1780...2150	1500...4800	0,7...2,7	228...724	106...407
E-staklo	2580	3450	1,34	72,5	28
Bor	2570	3600	1,4	400	156
Silicijev karbid	3000	3900	1,3	400	133
PE-UHMW (Spectra 900)	970	2600	2,68	117	121
Metalne žice					
Visokočvrsti čelik	7900	2390	0,3	210	26,6
Molibden	10200	2200	0,22	324	31,8
Volfram	19300	2890	0,15	407	21,1



Slika 2.12. Svojstva vlakana: (a) krivulja „naprezanje-istezanje“, (b) usporedba specifične čvrstoće i specifičnog modula elastičnosti metala i nekih vlakana [8]

Matrica mora biti žilava da prenese opterećenje na vlakna i spriječi širenje pukotina, te mora biti i dovoljno čvrsta da pridonese sveukupnoj čvrstoći kompozita, no na prikladnost matrice najviše utječe njeno talište. Polimeri se obično mogu primjenjivati do $80\text{ }^\circ\text{C}$ ako se primjenjuju nezasićene poliesterske smole, odnosno do $315\text{ }^\circ\text{C}$ ako je matrica od poliamida. Metalne matrice se mogu primjenjivati pri višim temperaturama. [8]

Na slici 2.13 uspoređeni su specifični modul elastičnosti i specifična čvrstoća pojedinih kompozita s metalima.



Slika 2.13. Usporedba specifičnog modula elastičnosti i specifične čvrstoće nekih metala i kompozita [8]

U nastavku se razmatraju sljedeći polimerni kompoziti ojačani vlaknima koji su ujedno i najčešće primjenjivani:

- staklenim vlaknima ojačani polimerni kompoziti
- ugljičnim vlaknima ojačani polimerni kompoziti
- aramidnim vlaknima ojačani polimerni kompoziti.

2.2.2.1. Staklenim vlaknima ojačani polimerni kompoziti

Staklena vlakna, slika 2.14, su najčešće primjenjena vlakna u kompozitima s polimernom matricom. Glavne prednosti staklenih vlakana su niska cijena, visoka rastezna čvrstoća, visoka kemijska postojanost i izvrsna izolacijska svojstva. Nedostaci su relativno niski modul rasteznosti i velika gustoća (među komercijalnim vlaknima), osjetljivost na abraziju tijekom rukovanja (što često smanjuje njegovu rasteznu čvrstoću), relativno niska otpornost na zamor i visoka tvrdoća (što uzrokuje prekomjerno trošenje kalupa za oblikovanje i alata za rezanje). [13]



Slika 2.14. Staklena vlakna [26]

Dvije najvažnije vrste staklenih vlakana koje se primjenjuju su E-staklo i S-staklo. Iako E-staklo nema dobra mehanička svojstva kao S-staklo, ono se i dalje najčešće upotrebljava zbog niske cijene. E-staklo se sastoji od približno 54 % SiO_2 , 14 % Al_2O_3 , 22 % CaO i 10 % B_2O_3 . S-staklo je skuplje od E-stakla, ali ima veći omjer čvrstoće i mase te se stoga prvenstveno

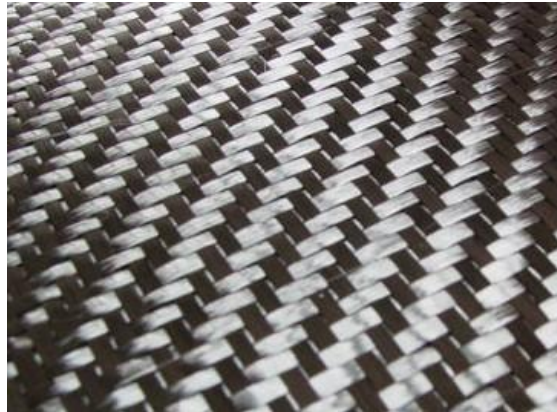
primjenjuje u zrakoplovnoj industriji. S-staklo se sastoji od približno 65 % SiO_2 , 25 % Al_2O_3 i 10 % MgO . [9]

Staklenim vlaknima ojačani polimerni kompoziti imaju nekoliko ograničenja. Unatoč visokoj čvrstoći, ne posjeduju dovoljnu krutost koja je potrebna za neke primjene. Većina ovih kompozita su ograničeni na radne temperature ispod 200 °C; pri višim temperaturama polimeri počinju teći ili se razgrađuju. Radne temperature se mogu povisiti na otprilike 300 °C upotrebom staklenih vlakana visoke čistoće i visokotemperaturnih polimera, poput poliimidne smole. [14]

Poznate su mnoge primjene ovih kompozita: automobilska i brodska karoserija, spremnici, cijevi i industrijski podovi. U nastojanju da se smanji masa vozila, a time i potrošnja goriva, transportna industrija primjenjuje sve veće količine polimera ojačanih staklenim vlaknima. [8]

2.2.2.2. *Ugljičnim vlaknima ojačani polimerni kompoziti*

Ugljična vlakna, slika 2.15, komercijalno su dostupna s različitim modulima rasteznosti u rasponu od 207 GPa do 1035 GPa. Općenito, vlakna niskog modula imaju manju gustoću, niže troškove izrade, višu rasteznu i pritisnu čvrstoću, te više prekidno istezanje u odnosu na vlakna s visokim modulom. Među prednostima ugljičnih vlakana su njihovi iznimno visoki omjeri rastezne čvrstoće i mase kao i omjeri modula rasteznosti i mase, vrlo nizak koeficijent linearne toplinske rastezljivosti (koje osigurava dimenzionalnu stabilnost u primjenama kao što su npr. svemirske antene), velika dinamička izdržljivost i visoka toplinska provodnost (koja je čak viša od toplinske provodnosti bakra). Nedostaci su njihova općenito niska prekidna istezljivost, niska žilavost i visoka električna provodnost, što može uzrokovati kratke spojeve u nezaštićenim električnim strojevima. Njihova visoka cijena ih je do sada isključivala iz komercijalnih primjena, pa se prvenstveno primjenjuju u zrakoplovstvu, gdje smanjenje mase ima prioritet nad smanjenjem troškova. [13]



Slika 2.15. Ugljična vlakna [27]

Promjeri vlakana obično se kreću između 4 i 10 μm i mogu biti kontinuirana i usitnjena. Ugljična vlakna su obično obložena zaštitnom apreturom koja poboljšava prijanjanje s polimernom matricom. [24]

Polimerni kompoziti ojačani ugljičnim vlaknima trenutno se intenzivno upotrebljavaju u sportskoj i rekreacijskoj opremi (štapovi za ribolov, palice za golf), kućištima raketnih motora, tlačnim spremnicima i dijelovima vojnih i komercijalnih zrakoplova i helikoptera (npr. krila, trupovi zrakoplova, stabilizatori, komponente kormila i sl.). [24]

2.2.2.3. Aramidnim vlaknima ojačani polimerni kompoziti

Iako se često primjenjuje niz različitih polimernih vlakana, najpopularnija od njih su aramidna. Aramidna vlakna, slika 2.16, generički su naziv za aromatična poliamidna vlakna, koje je *Du Pont* prvi put komercijalno proizveo 1972. pod trgovačkim imenom Kevlar. [9]



Slika 2.16. Aramidna vlakna [28]

Aramidna vlakna imaju najnižu gustoću i najveći omjer rastezne čvrstoće prema masi među trenutnim vlaknima koja se primjenjuju kao ojačavala. Kevlar 49 trgovački je naziv jednog od aramidnih vlakana dostupna na tržištu. Kao ojačavalo, aramidna vlakna se primjenjuju u mnogim plovilima i zrakoplovima zbog manje mase, visoke rastezne čvrstoće i otpornosti na udarna oštećenja. Također imaju negativan koeficijent linearnog toplinskog rastezanja (α_L) u uzdužnom smjeru, koje se primjenjuje pri projektiranju kompozitnih ploča s niskim toplinskim rastezanjem. Glavni nedostaci kompozita ojačanih aramidnim vlaknima su niska tlačna čvrstoća i poteškoće u rezanje ili strojnoj obradi. [13]

Aramidna vlakna imaju vrhunsku postojanost pri povišenim temperaturama, nisku zapaljivost i visoku otpornost na organska otapala. Aramidna vlakna počinju se razgrađivati na oko 500 °C. "Inertna" svojstva aramidnih vlakana nude svestranost za širok raspon primjena. Međutim, aramidna vlakna su osjetljiva na ultraljubičasto (UV) svjetlo, kiseline i određene soli. [29]

Svojstva kontinuiranih i jednosmjernih staklenim, ugljičnim i aramidnim vlaknima ojačanih epoksidnih kompozita navedena su u tablici 2.5.

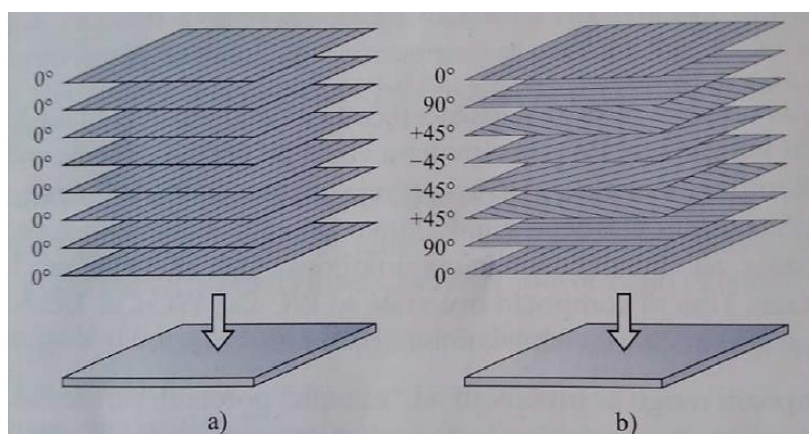
Tablica 2.5. Svojstva kontinuiranih jednosmjernih staklenim, ugljičnim i aramidnim vlaknima ojačanih epoksidnih kompozita u uzdužnom i poprečnom smjeru (u svim slučajevima volumni udio vlakana iznosi 0,6) [8]

Svojstvo	Staklo (E-staklo)	Ugljik (visokočvrsti)	Aramid (Kevlar 49)
Gustoća ρ , kg/m ³	2100	1600	1400
Modul rasteznosti, kN/mm ²			
Uzdužno	45	145	76
Poprečno	12	10	5,5
Rastezna čvrstoća, N/mm ²			
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

2.2.3. Slojeviti kompozitni materijali

Slojeviti kompozit ili laminat sastoji se od dvodimenzionalnih slojeva ojačavala u kojima su vlakna orijentirana u određenom smjeru, kao npr. u drvetu i u kompozitima ojačanim kontinuiranim usmjerenim vlaknima. Debljina slojeva je obično u rasponu od 0,1 do 1 mm. [13,24]

Kompoziti ojačani kontinuiranim vlaknima su obično slojeviti kompoziti u kojima su pojedini slojevi vlakana (tkanine) orijentirani tako da osiguravaju najbolja svojstva u smjeru u kojem djeluje opterećenje (slika 2.17). Jednosmjerni laminati izuzetno su jaki i kruti u uzdužnom smjeru. Međutim, oni su vrlo slabi u poprečnom smjeru jer opterećenje mora nositi puno slabija polimerna matrica. Dok vlakno visoke čvrstoće može imati rasteznu čvrstoću od 3500 MPa ili više, tipične polimerne matrice obično imaju rasteznu čvrstoću od samo 35 do 70 MPa. [23]



Slika 2.17. Struktura laminata s različitim smjerovima polaganja vlakna u slojevima; a) jednosmjerno polaganje; b) višesmjerno polaganje [30]

Laminati također mogu biti i od diskontinuiranih vlakana. Diskontinuirana vlakna se mogu orijentirati u jednom smjeru ili nasumično. Kompoziti ojačani diskontinuiranim vlaknima imaju nižu čvrstoću i modul rastezljivosti od kompozita s kontinuiranim vlaknima. Međutim, s nasumičnom orijentacijom vlakana moguće je dobiti jednaka mehanička i fizička svojstva u svim smjerovima. [13]

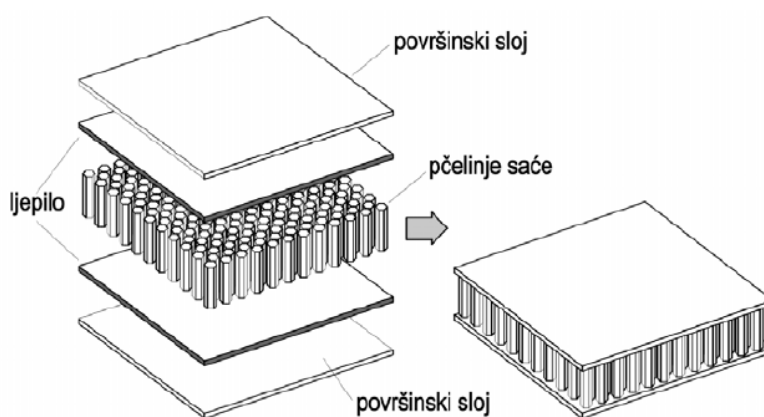
Debljina potrebna za podnošenje zadanog opterećenja dobiva se slaganjem slojeva tkanina u određenom redoslijedu. Moguće je kombinirati različite vrste vlakana koje tvore *interply* ili *intraply* hibridni laminat. *Interply* hibridni laminat sastoji se od različitih vrsta vlakana u

različitim slojevima, dok se *intraply* hibridni laminat sastoji od dvije ili više različitih vrsta vlakana prošivenih u istom sloju tkanine. Upotrebljava se ista matrica za cijeli laminat tako da se stvori jednolika veza između slojeva. [13]

2.2.4. Sendvič konstrukcije

Sendvič konstrukcije su dizajnirane da budu lagane grede ili ploče s relativno visokom krutošću i čvrstoćom. Sendvič konstrukcija sastoji se od dva vanjska sloja između kojih je zalijepljena deblja jezgra. Vanjski slojevi izrađeni su od relativno krutog i čvrstog materijal, tipično legure aluminija, polimera ojačanog vlaknima, titana, čelika ili šperploče; oni daju visoku krutost i čvrstoću konstrukciji te moraju biti dovoljno debeli da izdrže rastezna i tlačna naprezanja. Materijal jezgre je lagan i obično ima nizak modul elastičnosti. Jezgreni materijali obično spadaju u tri kategorije: krute polimerni pjene (fenolne, epoksidne, poliuretanske pjene), drvo (balsa) i materijali (aluminijske legure i polimeri) u obliku pčelinjih saća. [24]

Pčelinje saće (slika 2.18) se često primjenjuju u zrakoplovima i relativno su skupe. Balsa je jeftinija i ima dobar omjer krutosti i mase. Budući da je prirodni materijal, mehanička svojstva mogu varirati, može degradirati i dostupan je samo u ograničenoj mjeri. Polimerne pjene se često primjenjuju i dostupne su razne vrste polimera u raznim standardnim gustoćama. [31]



Slika 2.18. Kompozitni sendvič s jezgrom u obliku pčelinjeg saća [14]

2.3. Proizvodnja i prerada vlaknima ojačanih kompozita

Za izradu kompozita ojačanog vlaknima koji zadovoljava željene specifikacije, vlakna bi trebala biti ravnomjerno raspoređena unutar matrice. [24]

U nastavku će biti opisani samo neki postupci, gdje će se najveća pažnja posvetiti ručnom laminiranju kojim će se izraditi ploče za eksperimentalni dio rada.

2.3.1. Ručni postupak laminiranja

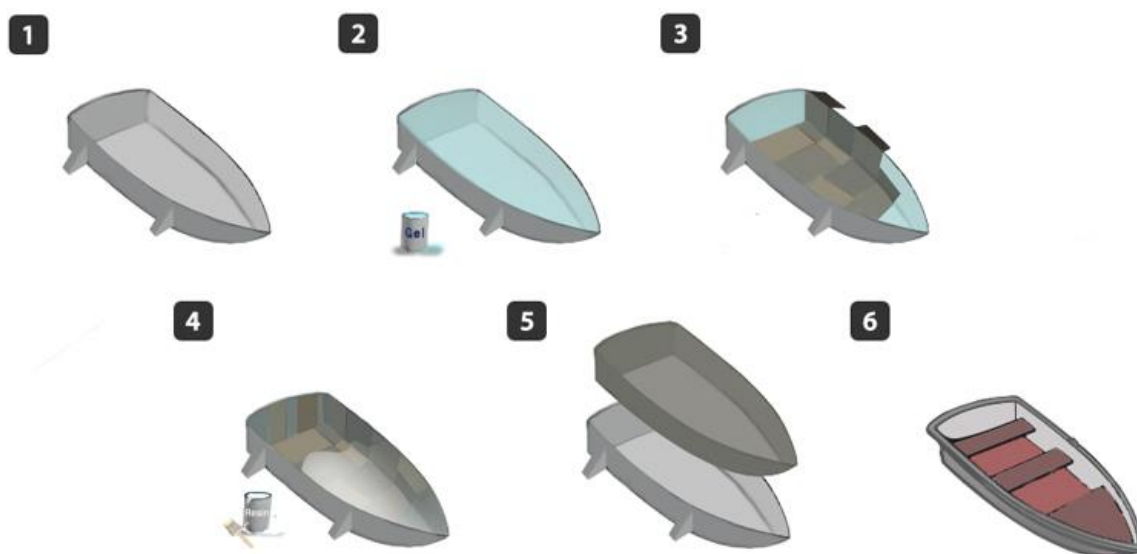
Ručni postupak laminiranja je metoda polaganja tkanina sloj po sloj dok se ne dobije željena debljina. Ovo metoda izrade kompozita traži najviše vremena i rada. Prednosti ove metode su mogućnost kontrolirane orijentacije dugih vlakna, te sposobnost izrade proizvoda nepravilnog oblika. Ovaj postupak je najstarija i najjednostavnija metoda koja se primjenjuje za proizvodnju vlaknima ojačanih kompozita. Kapitalna ulaganja relativno su niska. Veličina proizvoda koji se može izraditi gotovo nema ograničenja. Kalupi mogu biti izrađeni od drveta, lima, gipsa i vlaknima ojačanih kompozita. [32]

Kalup ima oblik željenog proizvoda. Da bi površina proizvoda bila sjajna ili teksturirana, površina kalupa treba biti odgovarajuće obrađena. Ako vanjska površina proizvoda mora biti glatka, proizvod se izrađuje unutar ženskog kalupa. Isto tako, ako unutrašnjost mora biti glatka, tada se oblikovanje vrši na muškom kalupu. Na kalupu ne smije biti nedostataka, jer će se ti nedostaci vidjeti na proizvodu. [33]

Postupak ručnog laminiranja, slika 2.23, sastoji se od sljedećih koraka:

- 1) Priprema kalupa – potrebno je ukloniti svu prašinu i prljavštinu i očistiti kalup čistom krpom. Nakon toga nanijeti odvajalo na površinu kalupa. [34,35]
- 2) Nanošenje gelne prevlake – gelna prevlaka daje potrebnu glatkoću. To je obično tanki sloj smole debljine nekoliko mm na površini proizvoda. Dodavanjem odgovarajućih pigmenata u smolu dobiva se željena boja površine. Gelna prevlaka tvori zaštitni sloj koji štiti vlakna od kontakta s vodom i kemikalijama. Ako je pretanak, uzorak vlakana postat će vidljiv. Ako je predebeo, doći će do pukotina. [36]

- 3) Postavljanje tkanina – tkanina se postavlja u kalup prethodno natopljena smolom. Nakon toga se valjkom ili kistom pritisne tkanina u kalup, pazi se da se ne stvore zračni džepovi ili boranje tkanine. Postupak se ponavlja dok se ne postigne željena debljina proizvoda. [37]
- 4) Finalizacija – po potrebi se dodaje još smole i valjkom raznosi smola da bude ravnomjerno raspoređena i uklanjaju se mjehurići zraka. [34]
- 5) Vađenje iz kalupa – nakon stvrdnjavanja smole proizvod se vadi iz kalupa i uklanja se višak tkanine i smole s rubova i brusi gdje je potrebno. [34]
- 6) Gotovi proizvod – nakon dodatne obrade i dorade proizvod je spreman za isporuku. [34]



Slika 2.19. Postupak ručnog laminiranja [34]

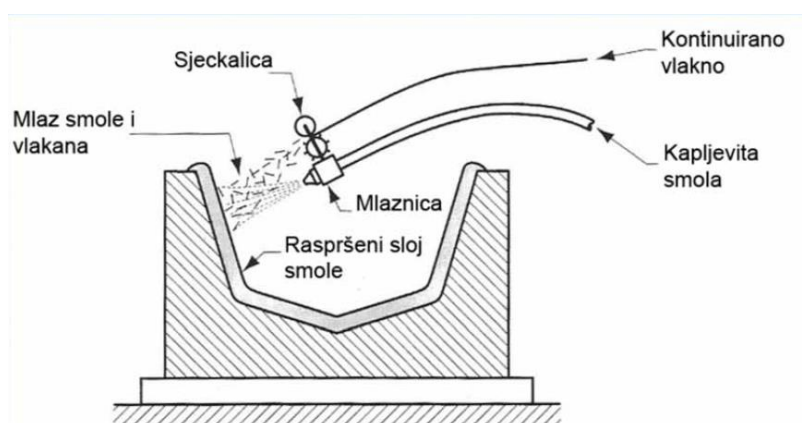
U postupku ručnog laminiranja može doći do grešaka. U nastavku će biti opisane moguće greške i ponudit će se rješenja za njih: [37]

- Mjehurići: mogu se pojaviti pri nanošenju tkanina, često zbog previše smole. Također uzroci mogu biti prevelika viskoznost smole, nepravilno odabran materijal tkanine, sloj tkanine nije dovoljno pritisnut itd. Da bi se to izbjeglo treba se kontrolirati količina smole, ukloniti pjenu iz smole, dodati odgovarajuća količina razrjeđivača (poput acetona), odabrati tkaninu koja se lako zasićuje smolom, itd.

- Curenje smole: kada se kalup ručno laminira, često se javlja fenomen curenja smole. Glavni razlozi curenja smole su preniska viskoznost smole, komponente smole nisu dobro promiješane, premala količina sredstva za stvrdnjavanje. Punilo (poput silicijevog dioksida) povećava viskoznost smole. Podešavanjem količine sredstva za stvrdnjavanje smanjuje se curenje.
- Raslojavanje: može se pojaviti zbog nedovoljne količine smole, previsoke temperature stvrdnjavanja, itd. Potrebno je kontrolirati količinu smole i temperaturu stvrdnjavanja.
- Pukotine: Pri izradi i primjeni kalupa pojavljuju se pukotine na površini kalupa. Glavni razlog ove pojave je taj što je sloj gelne prevlake predebeo i na njega utječe nepravilno vađenje proizvoda. Debljinu sloja gelne prevlake treba strogo kontrolirati. Prilikom vađenja proizvoda iz kalupa po mogućnosti primjeniti komprimiran zrak.

2.3.2. *Dodirni postupak sa štrcanjem*

U dodirnom postupku sa štrcanjem, slika 2.20, matrica u obliku kapljevite smole i nasjeckana ojačavala u obliku vlakna raspršuju se s dva odvojena mlaza na površinu kalupa. Vlakna se usitne na duljinu od 25–50 mm, a zatim rasprše zračnim mlazom istovremeno s raspršivanjem smole u unaprijed utvrđenom omjeru. Dodirni postupak sa štrcanjem dopušta brzo stvaranje jednolikog kompozitnog premaza, međutim, mehanička svojstva materijala su ograničena jer ova metoda ne može koristiti kontinuirana vlakna. [17]

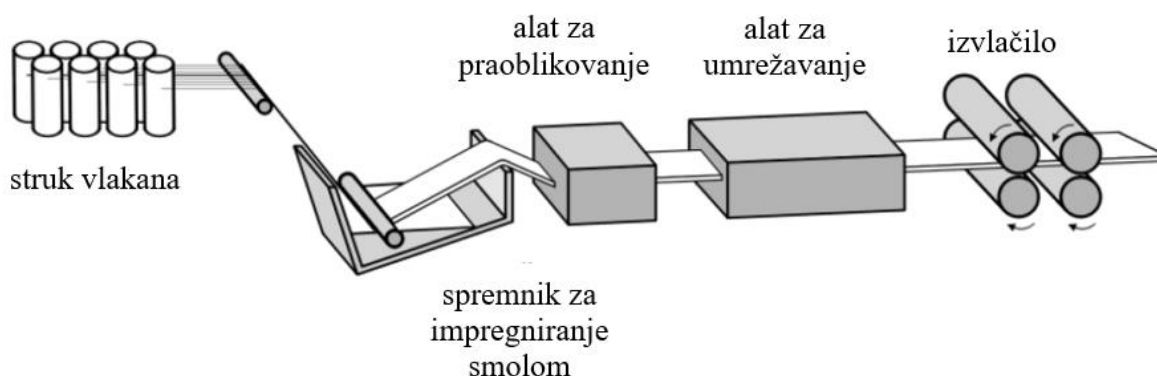


Slika 2.20. Dodirni postupak sa štrcanjem [38]

Smjer vlakana je nasumičan. Debljina se kontrolira trajanjem prskanja na određenom mjestu. Ovaj postupak se općenito koristi za velike objekte ili za premaze u građevinarstvu i pomorstvu. [31]

2.3.3. Pultrudiranje

Pultrudiranje, slika 2.21, je automatizirani proces proizvodnje kompozitnih materijala u kontinuirane profile konstantnog poprečnog presjeka. Veliki broj profila kao što su šipke, cijevi i različiti strukturni oblici mogu se proizvesti pomoću odgovarajućih matrica. [17]

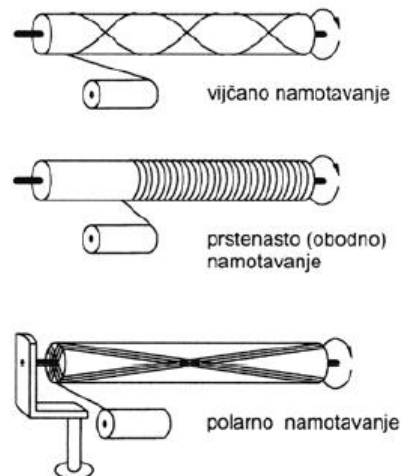


Slika 2.21. Prikaz postupka pultrudiranja [14]

U ovom se postupku kontinuirani snop suhih vlakana provlači kroz zagrijanu kupku za vlaženje smolom. Navlaženi snop uvlači se u zagrijane matrice i u tim matricama nastaje željeni oblik poprečnog presjeka vučenih vlakna. Smola se umrežuje i nastaje kompozit. Izradak se zatim reže na dijelove određene duljine. Ovaj je postupak ograničen na ravne dijelove s konstantnim presjekom, kao što su I i T profili, okvira i ljestve. [16]

2.3.4. Namotavanje

Namotavanje je postupak izrade kompozita koji može biti visoko automatiziran i ponovljiv, s relativno niskim troškovima materijala. Jezgra oko koje se namotavaju vlakna je postavljena vodoravno između oslonaca. Suha vlakna prolaze kroz kupku za vlaženje smolom. Alat za nanošenje vlakana pomiče se naprijed-natrag duž rotirajuće jezgre, postavljajući vlakna na jezgru u unaprijed određenoj konfiguraciji (slika 2.22). [16]

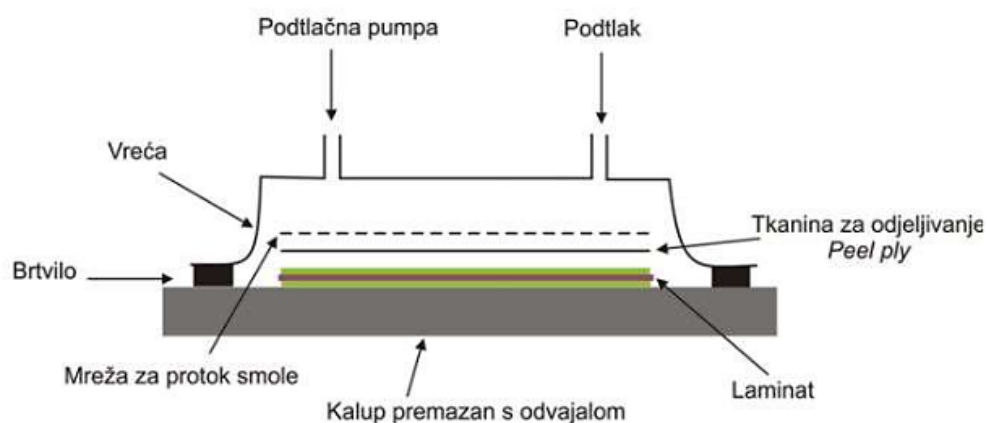


Slika 2.22. Prikaz vijčanog, prstenastog (obodnog) i polarnog namotavanja [14]

Namotavanje je postupak koji se primjenjuje za izradu rotacijskih tijela kao što su cijevi, tube, cilindri i sfere i često se primjenjuje za izgradnju velikih spremnika i cijevi za kemijsku industriju. [17]

2.3.5. Podtlačno ulijevanje

Podtlačno ulijevanje, slika 2.23, je postupak u kojem se suha vlakna postavljaju u kalup, a perforirane ili spiralne cijevi se postavljaju između podtlačne vrećice i spremnika smole. Nakon što se postigne podtlak dolazi do usisavanja smole kroz perforirane cijevi i tako se natapaju vlakna i popunjava kalup. [22]



Slika 2.23. Postupak podtlačnog ulijevanja [38]

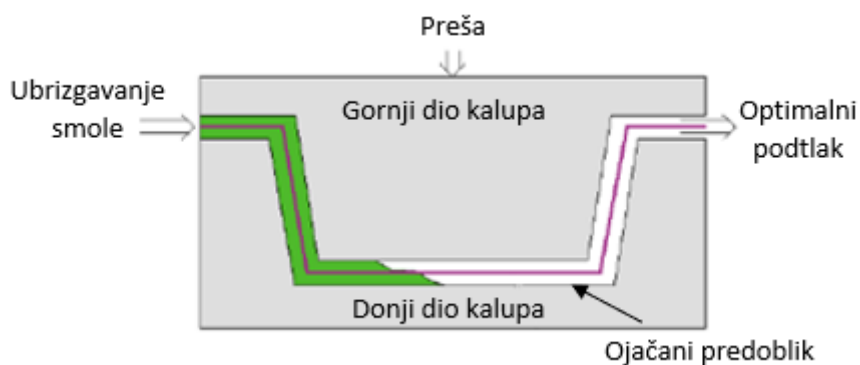
Ojačavalo može biti bilo koji porozni materijal kompatibilan sa smolom. Tipični materijali su anorganska vlakna (najčešće staklena vlakna), organska vlakna poput lana ili kombinacije vlakana s drugim materijalima kao što su polimerne pjene, balsa i pčelinje saće. Smole su obično duromerne, ali se mogu primijeniti i plastomerne smole. [39]

Na ojačavala se mogu postaviti i tkanina za odjeljivanje (eng. *peel ply*) i mreža za protok smole ukoliko je to potrebno. [38]

Ovaj postupak ne ostavlja prostora za višak zraka u kompozitu, što ga čini popularnim za proizvodnju velikih predmeta poput trupova brodova i lopatice vjetroturbina. [22]

2.3.6. *Postupak injekcijskog-posrednog prešanja kapljevite smole s umetnutim trodimenzionalnim ojačavajućim predoblikom (eng. Resin Transfer Moulding - RTM)*

U postupku RTM, slika 2.24, suhi predoblik od vlakana se postavlja u kalup. Najčešće se smola ubrizgava u najnižu točku kalupa i puni kalup prema gore i tako smanjuje mogućnost zarobljavanja zraka. Kad smola popuni kalup, zatvaraju se mjesta gdje se smola dovodi u kalup i dolazi do umreživanja. [17]



Slika 2.24. Postupak RTM [14]

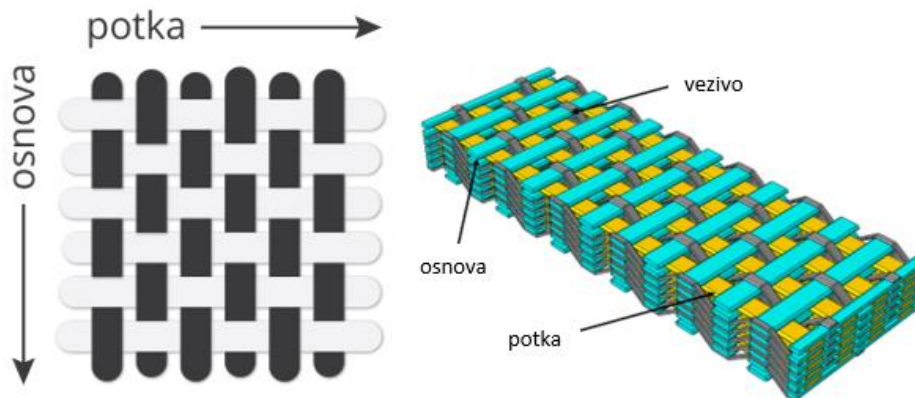
Postupak RTM je dobro uspostavljena tehnika proizvodnje kompozita koja je vrlo pogodna za izradu kompozita za automobilske i zrakoplovne komponente. Ovaj proces je vrlo popularan zbog velike produktivnosti i niskih troškova proizvodnje. [40]

3. 3D TKANINE

Industrija iskazuje sve veće zanimanje za izradu predoblika koja su blizu veličini i obliku gotovog proizvoda za vlaknima ojačane kompozite. Tradicionalno se predoblik izrađivao od 2D tkanina, no nedavno se pokazalo da se 3D tkanine, slika 3.1, mogu uspješno upotrebljavati. U 3D tkanju vlakna potke, osnove i veziva prolaze preko, duž i kroz tkanine u smjerovima X, Y i Z, dok su u 2D tkanju samo vlakna potke i osnove (slika 3.2). Proizvodnja jednodijelne tkanine i smanjenje vremena potrebnog za brzu proizvodnju kompozita dvije su glavne prednosti primjene 3D tkanina. [41]



Slika 3.1. Primjeri 3D tkanina [42]



Slika 3.2. Razlika između 2D i 3D tkanine [43,44]

Dvodimenzionalne (2D) laminirane kompozite karakterizira njihova visoka specifična krutost i čvrstoća u ravnini (X,Y). Međutim, mnoge su stvarne primjene izložene uvjetima opterećenja izvan ravnine (u Z osi) koji onemogućuju primjenu 2D laminata kao pravog rješenja. Neki primjeri primjene kod kojih se na konstrukciju nameću uvjeti opterećenja izvan ravnine su lopatice vjetroagregata, žice i ukrućenja u zrakoplovima, posude pod tlakom i u građevinskim primjenama. Stoga se pojavila potreba za kompozitnim materijalima s poboljšanim svojstvima "izvan ravnine". Ova potreba zahtijeva zamjenu 2D laminiranih kompozita trodimenzionalnim (3D) tekstilnim strukturama. "Poboljšana svojstva izvan ravnine" nisu jedina prednost 3D kompozita. [41]

3D tkanje je tehnologija u nastajanju koja nudi razne prednosti kako u pogledu 2D kompozitne proizvodnje, tako i u odnosu na tradicionalnije konstrukcijske materijale, poput čelika i aluminijske. Ključne prednosti uključuju smanjenje mase, uklanjanje delaminacije, smanjen rizik od pukotina, kraće vrijeme proizvodnje i smanjenje troškova: [45]

- Smanjenje mase: 3D tkani kompoziti drastično su lakši od metalnih konstrukcija. To je osobito važno za zrakoplovnu industriju. Procjenjuje se da će svaki kilogram mase uštedenog iz zrakoplova uštedjeti operateru zrakoplova otprilike milijun dolara operativnih troškova, prvenstveno goriva, tijekom njegovog života. Pametna primjena 3D tkanih kompozitnih struktura u dizajnu zrakoplova može smanjiti masu zrakoplova do 30 %, što rezultira znatnim uštedama operativnih troškova.
- Uklanjanje delaminacije: Delaminacija se događa kada se dva ili više slojeva 2D tkanog kompozita međusobno razdvoje ili se delaminiraju. Delaminacija smanjuje čvrstoću i pouzdanost dijela, koji se mora zamijeniti kako bi se spriječila oštećenja i ozbiljni sigurnosni problemi. Delaminacija je primarni uzrok oštećenja 2D laminiranih kompozita.

3D tkanje stvara kompozitne strukture blizu veličine i oblika gotovog proizvoda, koje su u potpunosti međusobno povezane predom, za razliku od 2D kompozita koji uključuju brojne različite slojeve materijala koji su umjetno povezani. To znači da ne postoji rizik od raslojavanja u 3D tkanim kompozitima, osiguravajući da zadržavaju čvrstoću i pouzdanost.

- Smanjen rizik od pukotina: 2D laminirani kompoziti skloni su pucanju, posebno u zakrivljenim konstrukcijama, poput struktura u obliku slova T. Zbog ograničenja zakrivljenosti u slojevima, mnogi 2D oblici imaju znatne praznine u zglobovima i presjecištima. Ti su prostori i džepovi često ispunjeni smolom koja može puknuti.

3D tkani kompoziti, čak i u složenim oblicima, nemaju prazne džepove, jer se njihov strukturni integritet proteže duž sve tri osi. Stope pukotina u 3D tkanim kompozitima stoga su daleko niže nego u 2D laminiranim kompozitima.

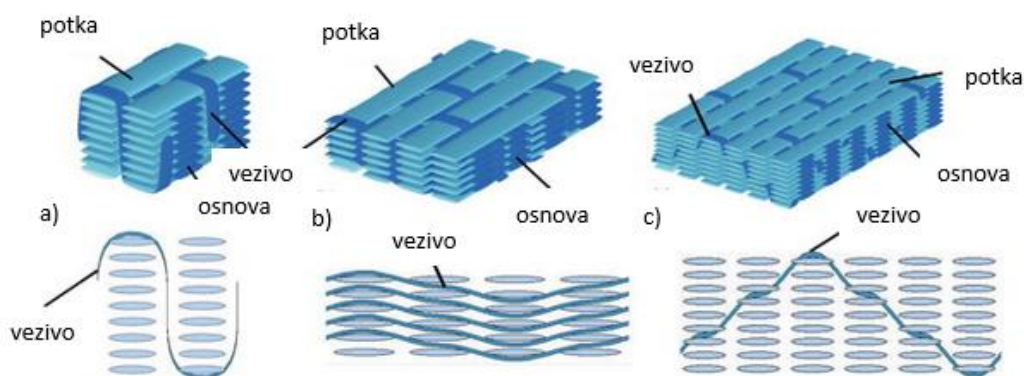
- Kraće vrijeme proizvodnje: 2D proizvodnja kompozita dug je i precizan postupak. Brojni slojevi 2D materijala tkaju se, pojedinačno ili u većem formatu, a zatim izrezuju u određenu veličinu. Ti se slojevi prethodno impregniraju određenim smolama, te se tako dobivaju preprezi. Ti se preprezi zatim slažu i oblikuju u kalupu laminiranjem. Laminiranje se često obavlja ručno, skupo je i izuzetno dugotrajno. Nakon umreživanja smole, potrebna je daljnja obrada kako bi se dobio gotov proizvod. Potrebni sekundarni procesi obrade mogu uključivati rezanje, struganje, brušenje i bušenje.

Suprotno tome, 3D tkanje kompozitnih struktura jednostavnije je, brže i isplativije. Tkanjem cijelih struktura u 3D, spori i skupi postupak laminiranja - najduži i najskuplji dio proizvodnje dvodimenzionalne laminirane kompozitne strukture - potpuno se eliminira, što znatno ubrzava proizvodnju i smanjuje troškove.

- Smanjenje troškova: Primjenom 3D tkanih kompozitnih struktura umjesto tradicionalnih metalnih ili 2D laminiranih kompozita može se osigurati smanjenje troškova i kroz proizvodni proces i tijekom životnog vijeka proizvoda. Neizravno smanjenje troškova rezultat je smanjenja operativnih troškova, na primjer smanjenje potrošnje goriva. Osim toga, budući da su 3D tkani kompoziti jači, otporniji i manje skloni lomljenju od 2D laminiranih kompozita, rjeđe zahtijevaju zamjenu, smanjujući troškove zamjene i održavanja.

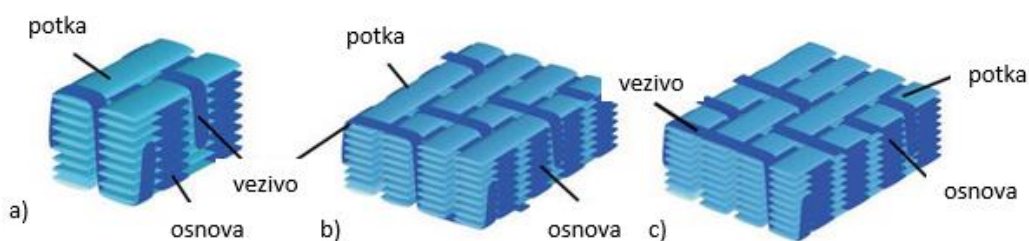
Općenito, 3D tkani kompoziti mogu se podijeliti u dvije glavne skupine, ovisno o tome koliko duboko vezivo prodire kroz tkaninu. Pod vezivom se smatra nit koja je od istog materijala kao što je i sama tkanina. Vezivo može biti isprepletano kroz cijelu debljinu tkanine (TT – e. *through-thickness*), slika 3.3a, ili može biti isprepletano samo kroz susjedne slojeve (LTL – e.

layer-to-layer), slika 3.3b. Zatim se ova podjela dalje dijeli prema isprepletenom kutu konstrukcije. Prva kategorija je isprepletenost pod kutem (AI – e. *angle interlock*), slika 3.3c, u kojoj isprepleteni kut između veziva i potke može imati bilo koju vrijednost osim 90° . Druga je kategorija poseban slučaj prve. Ortogonalna isprepletenost (ORT – e. *orthogonal interlock*), slika 3.3a, nastaje kada je kut isprepletanja veziva i potke jednak 90° . [41]



Slika 3.3. Vrste 3D tkanina na temelju puta veziva: a) ORT, b) LTL i c) AI [41]

Uzorak tkanja koji se primjenjuje tijekom postupka tkanja također može utjecati na klasifikaciju 3D tkanina. Na primjer, u slučaju ORT tkanja, učestalost puta veziva od gornje do donje površine tkanja može varirati od običnog (slika 3.4a) do kepera (slika 3.4b) ili satena (slika 3.4c). To će izravno utjecati na veličinu jedinične stanice, stupanj stezanja, elastičnost i otpornost na oštećenje/raslojavanje. [41]



Slika 3.4. Primjeri mogućih uzoraka vezivanja za ORT: a) običan, b) keper i c) saten [41]

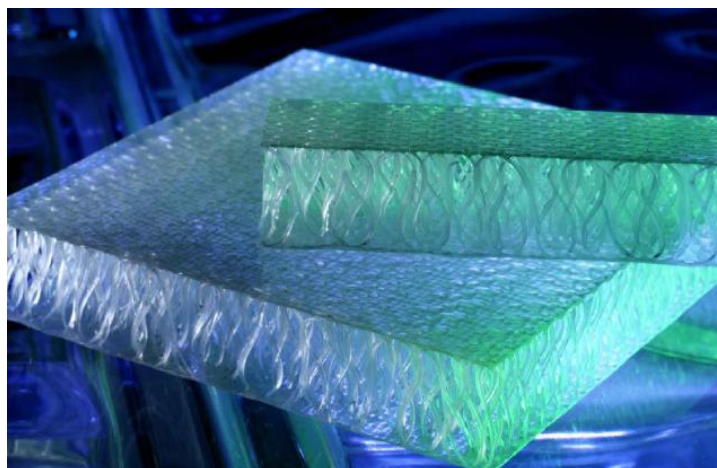
Primjene 3D tkanih kompozita u industriji u posljednje vrijeme strahovito rastu. U aplikacijama koje zahtijevaju prijenos opterećenja kao što su zakrivljene grede, T-zglobovi i nosači, upotrebene su 3D tkana AI i LTL pletiva. Glavne prednosti su bolja otpornost na interlaminarno smicanje i radijalno naprezanje. Također se 3D tkana AI i LTL pletiva uspješno upotrebljavaju u nosačima greda s integriranim ukrućenjima izvan osi. 3D tkani LTL

kompoziti primjenjuju su u automobilske industriji, a 3D tkani ORT kompoziti primjenjuju se za zamjenu čeličnih greda visoke čvrstoće, te za ultra lagane izmjenjivače topline u automobilske industriji. Koncept se temelji na visokoj toplinskoj vodljivosti ORT tkanih kompozita zahvaljujući predivima za vezivanje koji stvaraju vodljivi put za odvođenje topline. Štoviše, ORT tkani kompoziti uspješno se primjenjuju za proizvodnju kućišta motora i lopatica ventilatora za zrakoplove *A-320-neo*, *737-MAX* i *Comac C-919*. [41]

3.1. 3D tkanine tvrtke *Parabeam*

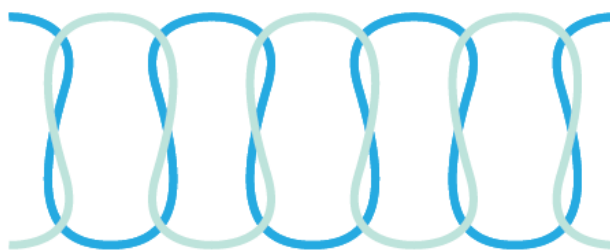
U eksperimentalnom radu primijenit će se 3D tkanine tvrtke *Parabeam*, te će se one detaljnije opisati.

Parabeam B.V. izumitelj je i izvorni proizvođač trodimenzionalnih tkanina od E-stakla (slika 3.5). Njihova tehnologija sendvič-strukture široko se primjenjuje u brojnim primjenama u industriji kompozita. [46]



Slika 3.5. *Parabeam* 3D tkanina od E-stakla [47]

Staklene tkanine *Parabeam 3D* satkane su od E-stakla za jednostavnu, brzu proizvodnju visokokvalitetnih sendvič konstrukcija. Dva dvosmjerno tkana laminirana sloja povezana su međusobno vertikalno upletenim stupovima u obliku broja 8 (slika 3.6). Stupovi djeluju poput opruga i odmiču laminirane slojeve na unaprijed zadanu visinu. Ova snažna i lagana sendvič struktura ima mnoge prednosti u odnosu na tradicionalne sendvič strukture, kao i na proizvode od drva i laminata. [46]



Slika 3.6. Vertikalni stupovi *Parabeam* 3D tkanine u obliku broja 8 [46]

Kada se smola nanese na *Parabeam* tkaninu, smola zasićuje staklenu pređu ne puneći prazan prostor između laminiranih slojeva jer stupovi kapilarnim efektom upijaju smolu i tako stvaraju šuplji prostor između laminiranih slojeva. Budući da je potrebna samo minimalna količina smole, gubici smole su minimalni. [46]

Parabeam nudi dvije vrste staklenih tkanina: *ParaGlass* i *ParaTank*.

ParaGlass se primjenjuje u sljedećim primjenama: [46]

- Kopneni prijevoz – povoljan omjer mase i čvrstoće smanjuje ugljični otisak u masovnom prijevozu i pojedinačnim vozilima. To ga čini izuzetno vrijednim pri proizvodnji dijelova za električna vozila.

Otporan na truljenje, gljivice i alge, *ParaGlass* se primjenjuje kao primarna jezgra za podno grijanje u vlakovima i autobusima. U tropskim područjima primjenjuje se u kondenzatorskim sustavima za klimatizirane vagone metroa i vlakova. Ekonomičniji je i lakši od saća, često se primjenjuje kao izolator zvuka i topline u željezničkim vagonima. Može se upotrijebiti i kao obloga prilikom obnove vlakova.

- Pomorstvo – postojan na vlagu i koroziju, *ParaGlass* nudi brojne prednosti u morskim plovilima. Dobro se veže s ostalim konstrukcijskim materijalima, poput drveta, čelika i aluminijske pjene. Njegova visoka izolacijska svojstva dodaju vrijednost bilo kojoj vrsti ili veličini plovila.

ParaGlass je čvršći od šperploče, jeftiniji od tikovine, manje mase i lakši za nanošenje od saća. Postupkom laminiranja u jednom koraku koji štedi vrijeme i troškove rada, obično se primjenjuje na plivačkim platformama i poklopcima motora, kao i za otvore, podove, ormariće, stropne ploče, palube, unutarnje ploče, itd.

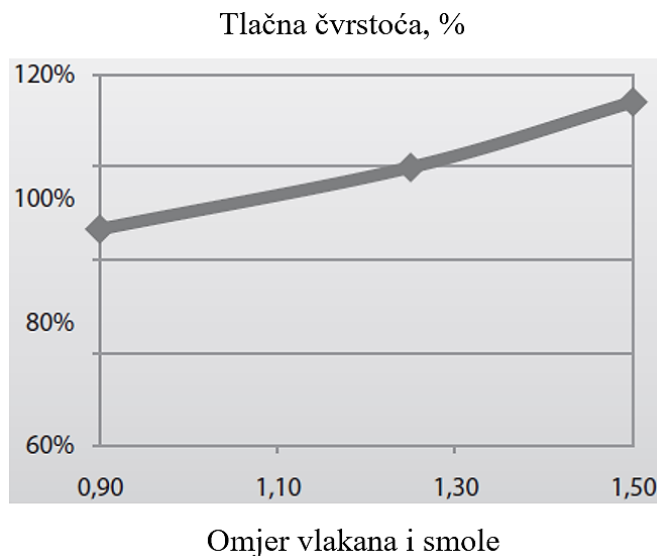
- Zrakoplovstvo – u bilo kojem tipu i veličini zrakoplova, *ParaGlass* se sve više primjenjuje zbog svojih prednosti u odnosu na ostale materijale poput saća, stakloplastike ili *Nomexa*. Iako lagan, pruža konstantnu tlačnu čvrstoću te ima izuzetno visoka protupožarna svojstva u kombinaciji s vatrootpornim smolama.

Kombinacija E-stakla s aramidnim vlaknima također povišuje čvrstoću sendvič konstrukcije. Primjenjuje se za izradu pregrada, upravljačkih ploča/kabina, unutarnjih stropova i zidova. U manjim zrakoplovima primjenjuje se i za propelere.

- Graditeljstvo – *ParaGlass* je do 50 % lakši od standardnih vatrootpornih staklenih vlakana i do 50 % je jeftiniji za prijevoz od metalnih limova. U zgradama, kupolama i bilo kakvim arhitektonskim dizajnama, tkanina od E-stakla olakšava konstrukciju složenih oblika, često uklanjajući složenu montažu i zavarivanje. *ParaGlass* se može primijeniti kao podloga za ojačanje ravnih mramornih fasada i zakrivljenih mramornih obloga.

ParaTank se obično primjenjuje i u kompozitnim i u čeličnim spremnicima. *ParaTank* je razvijen za upotrebu u jednoslojnim i dvoslojnim spremnicima. Šupljina stvorena između slojeva jača strukturu spremnika i stvara međuprostor za otkrivanje curenja. U jednoslojnim spremnicima od stakloplastike i čelika, *ParaTank* stvara oblogu unutar spremnika koja ih pretvara u dvoslojni spremnik. Ova obloga spremnika pretvara čelični spremnik u spremnik postojan na koroziju. [46]

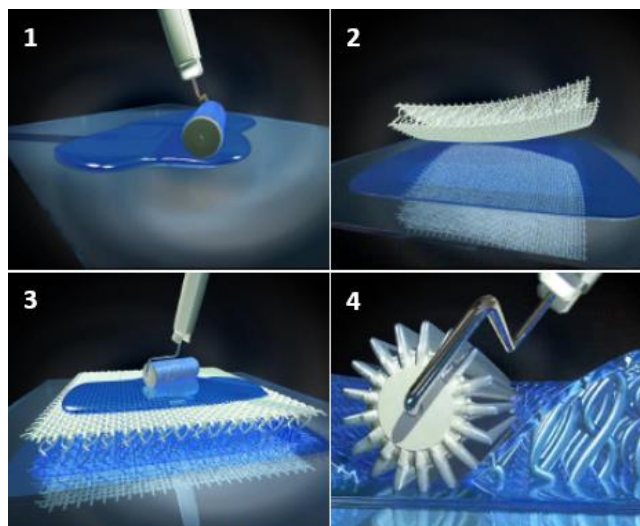
Parabeam 3D staklena tkanina kompatibilna je s gotovo svim duromernim smolama poput poliesterske, vinilesterske, epoksidne i fenolne smole i smole punjene aluminijevim hidroksidom. Sadržaj smole ovisi o željenoj masi i tlačnoj čvrstoći. Optimalni omjer vlakana i smole kreće se između 1:0,9 i 1:1,5 (slika 3.7). [48]



Slika 3.7. Odnos tlačne čvrstoće i omjera vlakana i smole [48]

Zbog prirode *Parabeam* 3D staklenih tkanina upute za primjenu, slika 3.8, su vrlo jednostavne: [48]

- 1) Ravnomjerno nanijeti približno 40 % preporučene količine smole na površinu kalupa.
- 2) Nanijeti *Parabeam* 3D staklenu tkaninu u sloj smole i valjati tkaninu od sredine prema van valjkom za postizanje dobrog kontakta.
- 3) Preko tkanine ravnomjerno nanijeti preostalih 60 % preporučene količine smole. Kapilarni efekt u *Parabeam* 3D staklenoj tkanini automatski će impregnirati tkaninu. Odzračivanje nije potrebno jer su slojevi tanki i zrak će izlaziti sa svih strana.
- 4) Nježno valjanje gornje strane tkanine osigurat će ravnu površinu. Za sve tkanine do 22 mm maksimalna visina postiže se laganim valjanjem u smjeru potke.



Slika 3.8. Upute za preradu *Parabeam* 3D staklenih tkanina [48]

U tablici 3.1 prikazani su tehnički podaci za *Parabeam* 3D staklene tkanine impregnirane s poliesterskom smolom. Smola je standardna s prosječnim mehaničkim svojstvima. Sva mehanička i toplinska svojstva dobivaju se na laminatima pripremljenim prema uputama za preradu. [48]

Tablica 3.1. Tehnički podaci za Parabeam 3D staklene tkanine impregnirane s poliesterskom smolom [48]

Tkanina		ParaGlass								ParaTank			
Tip		3	5	8	10	12	15	18	22	3	4,5	6	
Za laminiranu debljinu (prosječna debljina laminata, ne suhe tkanine)													
Laminat	mm	3	5	8	10	12	15	18	22	3	4,5	6	
Lice	mm	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4	
Gustoća (omjer vlakana i smole 1:1,1)													
Tkanina	kg/m ²	0,78	0,84	0,93	1,43	1,5	1,6	1,72	1,68	0,75	0,85	0,9	
Laminat	kg/m ²	1,64	1,76	1,95	3,01	3,15	3,36	3,61	3,53	1,8	2,05	2,2	
Toplinska svojstva													
Toplinska provodnost, λ	W/mK	0,06	0,06	0,06	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,06	0,06	0,06	
Toplinski otpor, R	m ² K/W	0,05	0,09	0,13	0,13	0,16	0,19	0,22	0,28	0,05	0,07	0,11	
Mehanička svojstva													
Pritisna čvrstoća, σ_c	N/mm ²	sr.	8,8	4,8	2,7	1,5	1,1	1	0,9	0,4	8	7	4
		min	7,8	3,7	2	1,4	1	0,9	0,7	0,3	7,1	5,4	4
Smična čvrstoća, τ	N/mm ²	sr.	1	0,8	0,5	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	1,5	2,9	2,3
		min	0,9	0,7	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,7	1,3	1
Modul smicanja, G_c	N/mm ²	sr.	5,7	9,5	13,4	7,3	6,9	2	1,8	0,8	80	70	60
		min	4,2	7,6	10,3	1,8	1,7	1,2	0,8	0,6	12	15	20
Savojna krutost, EI	Nm ²	sr.	0,9	3,2	7,5	18,1	26,6	38	55,9	44	1	1,9	4,1
		min	0,5	2,8	6,8	13,6	21,6	25,6	31,3	32,8	0,8	1,6	3

4. PRIMJENA KOMPOZITNIH MATERIJALA U TRANSPORTNIM VOZILIMA

Povećanje svijesti javnosti o pitanjima okoliša, energije i očuvanja materijala u svim fazama životnog vijeka proizvoda (od sirovine do zbrinjavanja/recikliranja) stavlja industriju općenito, a posebno prometnu industriju pod povećanim pritiskom da smanji emisiju CO₂ i uštedi energiju. Zaštita okoliša i sigurnost su sve više pod utjecajem zakona i vlade reguliraju strože standarde uštede goriva i smanjenja emisija. Suočeni s intenzivnijim državnim regulacijama i zahtjevima tržišta, proizvođači proizvoda koji troše energiju suočavaju se s novim izazovima kako bi se smanjila masa i poboljšala učinkovitost uz minimaliziranje utjecaja na okoliš. U području prijevoza, potrošači žele vozila koja su učinkovitija, ali sigurna i udobna za vožnju. [49,50]

Najnoviji zahtjevi koje treba uzeti u obzir pri projektiranju vozila za kopneni prijevoz uključuju: [51]

- Sigurnost s obzirom na nove oblike opskrbe energijom (npr. prirodni plin, gorive ćelije);
- Sigurnost putnika;
- Smanjena povreda pješaka u slučaju nesreće;
- Otpornost na vandalizam, uključujući otpornost na udarce;
- Jednostavnost popravka, kako integriranih dijelova tako i zamjene komponenti;
- Moderan dizajn sa složenim površinama;
- Integrirane strukturne funkcije koje omogućuju učinkovitiju primjenu prostora;
- Jednostavna i brza montaža i tehnike spajanja za isplativu montažu i proizvodnju;
- Površine bez korozije i geometrijski točne;
- Zaštita od požara, smanjenje dima i toksičnosti i krutost konstrukcije u slučaju požara;
- Cijena.

Kompoziti postaju sve važniji u dizajnu novog vozila. Nude značajne mogućnosti za poboljšanje performansi proizvoda u smislu čvrstoće, krutosti i otpornosti na sudare, u kombinaciji sa smanjenjem mase i uštedom prostora. Vozila javnog prijevoza se smatraju primarnim ciljevima za primjenu kompozita. [49]

Vozila javnog prijevoza igraju važnu ulogu u transportnoj industriji i u industrijaliziranim zemljama i u zemljama u razvoju. Iako je udio putnika u javnom prijevozu relativno mali u usporedbi s privatnim automobilima (10 % za autobuse, 5 % za vlakove), ograničenja u obliku uštede energije i ekoloških razloga dovest će do povećane potražnje za javnim prijevozom, uglavnom u slučajevima s ograničenim pristupom (poput gradskih središta). [49]

Masa i mehanička svojstva materijala ključni su čimbenici pri dizajniranju mnogih funkcija i značajki današnjih autobusa i iz tog razloga se odabiru kompoziti zbog svojih prednosti. Staklenim vlaknima ojačani kompoziti pružaju dugotrajnost, smanjuju složenost proizvodnje i daju željenu završnu obradu za interijer i eksterijer autobusa. [52]

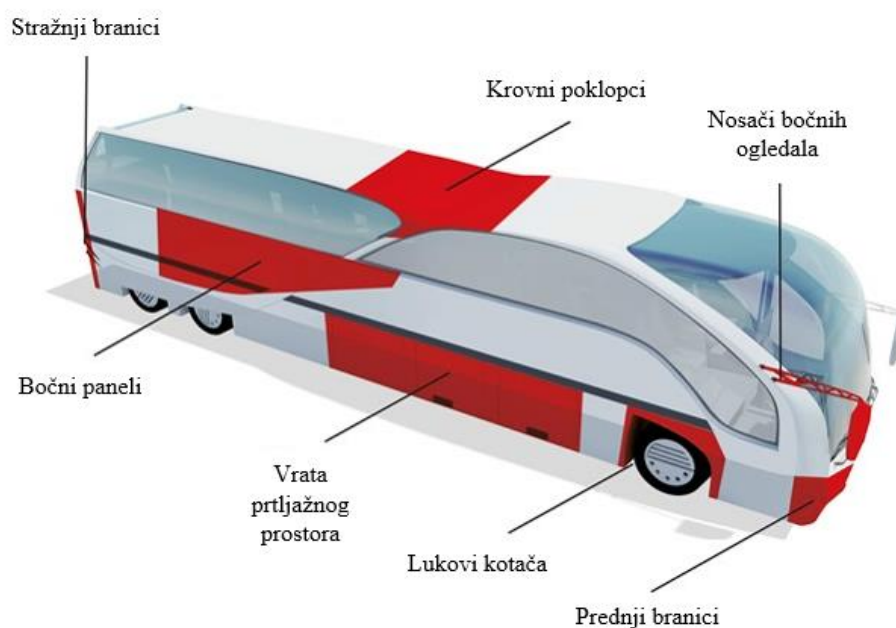
Bočni paneli od kompozita ojačanog staklenim vlaknima lako odolijevaju svakodnevnim udarcima i udubljenjima kojima su izloženi autobusi, udubine se lako izravnavaju, a ako je potrebno, popravci se lako izvode u depou. Zagađenje ili sol na cesti ne predstavljaju problem za kompozite jer su postojani na koroziju, a to znači manje održavanja tijekom životnog ciklusa autobusa. [52]

Kompoziti ojačani staklenim vlaknima imaju izolacijske karakteristike koje olakšavaju i učinkovitije održavaju unutarnju temperaturu kako bi putnicima bila ugodna vožnja i ljeti i zimi. Kompozitni dijelovi stvaraju manje buke i vibracija od metalnih dijelova. Kompozitni materijali mogu dodatno smanjiti broj dijelova i masu autobusa ugradnjom mnogih različitih značajki u jedan profil. [53]

Proizvođač putničkih autobusa *VDL Bus & Coach* na tržištu je predstavio svoju novu seriju autobusa *Citea*, slika 4.1, koja uključuje više lakih kompozitnih komponenti. *VDL Bus & Coach* ima reputaciju za korištenje modularnog dizajna u dizajniranju svojih proizvoda. Ovaj modularni pristup olakšava izgradnju autobusa po narudžbi, istovremeno pojednostavljujući popravak autobusa, održavanje i opskrbu rezervnim dijelovima. *VDL* već ima dobro iskustvo u primjeni kompozita u svojim autobusima, ali za autobus *Citea* je želio pojačati svoje napore u smanjenju mase i učinkovitosti proizvodnje za srednje velike proizvodne serije. Na slici 4.2 prikazani su dijelovi autobusa koji su izrađeni od kompozita. [54]



Slika 4.1. Putnički autobus *Citea* tvrtke *VDL Bus & Coach* [54]



Slika 4.2. Kompozitne komponente na autobusu *Citea* [54]

Prva generacija električnog autobusa *Dancer* iz Litve je 2019. godine dobila europski certifikat za prijevoz putnika. Lansiranje *Dancera* slijedi nakon provedenih testiranja na starom *Škodinom* trolejbusu koji je u *Dancerovim* laboratorijima pretvoren u električni autobus (slika 4.3). Nakon toga, koncept električnog autobusa nastao je primjenom kompozitnih materijala. Vozilo je dugo 12 metara i opremljeno je ZF AxTrax motorima u kotačima koje daje ukupno 250 kW. [55]



Slika 4.3. Električni autobus Dancer (lijevo) i trolejbus Škoda 14Tr (desno) [55,56]

Proizvođač tvrdi da je „izumio najlakši autobus na svijetu“ i navodi da je prazan autobus težak 9,77 tona, s prostorom za 92 putnika (32 sjedala). Proizvođač kvantificira potrošnju energije električnog autobusa na oko 1 kWh/km (vrlo niska vrijednost u usporedbi s postojećim modelima koji su već na tržištu). *Dancer* je opremljen litij-titanskom baterijom od 60 kWh i namijenjen je za brzo punjenje putem pantografa. [55]

Kompozitni materijali se također primjenjuju i u kamionima. Osim svih prednosti koje kompoziti pružaju, kao što su postojanost na koroziju, lakše održavanje i popravljavanje i manja potrošnja goriva, smanjenja mase kamiona i prikolica je najvažnija jer to znači veća dopuštena masa tereta koja se smije prevoziti. Kompozitni dijelovi koji se primjenjuju na kamionima su bočne stranice, krovovi, vrata, podovi i unutrašnjost kabine. U prikolicama se unutarnji zidovi i podovi izrađuju od kompozita kako bi se poboljšali higijenski uvjeti za prijevoz hrane, poboljšala toplinska izolacija i otpornost na udarce i ogrebotine i stvorile protuklizne površine (slika 4.4) [57]



Slika 4.4. Unutrašnjost prikolice [57]

Električni minibus *e-Jest* tvrtke *Karsan* nedavno je stigao u Split za promet u park-šumi Marjan (slika 4.5). S jedinstvenim dimenzijama u klasi od 6 metara, velikom sposobnošću i dometom, *e-Jest* je ujedno i prvi potpuno električni *Karsan* model koji je ušao u promet u Hrvatskoj. [58]



Slika 4.5. Karsan e-Jest namijenjen za promet u park-šumi Marjan [59]

e-Jest je opremljen *BMW*-ovim električnim motorom koji proizvodi snagu od 126 kW i okretni moment od 290 Nm s baterijama od 44 ili 88 kWh koje je također proizveo *BMW*.

Domet je do 210 km, zahvaljujući sustavu regenerativnog kočenja koji osigurava povrat energije. Ovaj električni minibus je opremljen s 10,1-inčnim multimedijским zaslonom osjetljivim na dodir, potpuno digitalnom kontrolnom pločom, pokretanjem bez ključa i USB priključcima kao i opcionalnom infrastrukturom kompatibilnom s WiFi mrežom. [58]

5. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada bit će opisana izrada i ispitivanje kompozitnih tvorevina ojačanih 3D staklenim vlaknima u svrhu primjene u gospodarskim vozilima za oplata i podove. Izradit će se 5 sendvič ploča debljine 20 ± 2 mm kombinacijom 3D staklenih tkanina tvrtke *Parabeam* različitih debljina, staklenog mata i staklene tkanine. Kao materijal matrice odabrana je poliesterska smola. Iz tih ploča će se izrezati ispitna tijela na kojima će se ispitati savojna i rastezna svojstva i žilavost. Debljine ploče od 20 mm izabrane su iskustveno prema preporuci proizvođača kompozitnih tvorevina za potrebe primjene takvih materijala za podove gospodarskih vozila i minibusa.

5.1. Izrada kompozitnih ploča

Ploče su izrađene ručnim postupkom laminiranja. Za materijal matrice je odabrana nezasićena poliesterska smola *POLYLITE 440-800* zbog svoje cijene i zadovoljavajućih mehaničkih svojstava. Smola se miješa s katalizatorom u omjeru od 1 do 3 %. Otvoreno radno vrijeme smole je 35 do 45 minuta. Kao ojačavalo primijenjena su 3D staklena vlakna tvrtke *Parabeam* debljine 5, 8 i 12 mm te stakleni mat i tkanina.

Ploče su izrađene na sljedeći način (slika 5.1):

- Ploča 1: 12 mm *Parabeam* – 8 mm *Parabeam*
- Ploča 2: tkanina – 12 mm *Parabeam* – 5 mm *Parabeam* – tkanina
- Ploča 3: mat – 12 mm *Parabeam* – 5 mm *Parabeam* – mat
- Ploča 4: 4 x 5 mm *Parabeam*
- Ploča 5: tkanina – 5 mm *Parabeam* – 8 mm *Parabeam* – 5 mm *Parabeam* – tkanina.

Tkanine su slagane navedenim redoslijedom, odnosno prva tkanina je na dnu i u kontaktu s kalupom i ta strana je glatka, a zadnja tkanina je na vrhu i ta strana je hrapava. Ploče su izrađene u dimenzijama 250 x 300 mm i debljine 20 ± 2 mm. Dimenzija ploče je izabrana sukladno dostupnom kalupu i potrebnim dimenzijama svih ispitnih tijela za provedbu ispitivanja rasteznih i savojnih svojstava i žilavosti.



Slika 5.1. Struktura izrađenih ploča

Tijek izrade ploča tekao je na sljedeći način. Ojačavala su odrezana na potrebne dimenzije (250 x 300 mm) i kalup je očišćen acetonom. Nakon toga nanosi se odvajalo i nakon 10 minuta od nanošenja kalup se polira. Postupak se ponavlja dva puta kako bi se postigao visoki sjaj (slika 5.2).



Slika 5.2. Nanošenje odvajala i poliranje kalupa

Poliesterska sloma se miješa s 2 % katalizatora. Za precizno određivanje udjela komponenata primijenjena je laboratorijska vaga (slika 5.3). Udio staklenih vlakana i poliesterske smole je 1:1,1 po preporuci proizvođača staklenih vlakana *Parabeam*. Vaganjem svake vrste ojačavala određena je potrebna količina smole (tablica 5.1).

Tablica 5.1. Potrebna količina smole ovisno o vrsti ojačavala (dimenzije ojačavala 250 x 300 mm i omjer ojačavala i smole 1:1,1)

Vrsta ojačavala	Masa ojačavala, g	Potrebna količina smole, g
Stakleni mat	35	40
Staklena tkanina	80	90
<i>Parabeam</i> 5 mm	64	70
<i>Parabeam</i> 8 mm	68	75
<i>Parabeam</i> 12 mm	115	130

U tablici se nalaze orijentacijske vrijednosti potrebne količine smole, odnosno nije postignut skroz točan omjer od 1:1,1 nego se uzela malo veća količina smole zbog gubitaka smole na kistovima, valjcima, posudama i curenjima na i oko kalupa.



Slika 5.3. Vaganje smole i katalizatora i miješanje

Kompozitne ploče se izrađuju prema uputama opisanim u poglavlju 3.1. Na kalup se prvo izlije i ravnomjerno raspoređi približno 40 % količine smole. Zatim se nanosi *Parabeam* 3D staklena tkanina u sloj smole i valjkom se valja od sredine prema van kako bi se postigao dobar kontakt s kalupom. Preko tkanine se nanosi ravnomjerno preostalih 60 % smole.

Nježno valjanje gornje strane tkanine će osigurati ravnu površinu. Kapilarni efekt u *Parabeam* 3D staklenoj tkanini impregnira tkaninu. Postupak se ponavlja dok se ne nanese sve potrebne tkanine, prema slici 5.1.

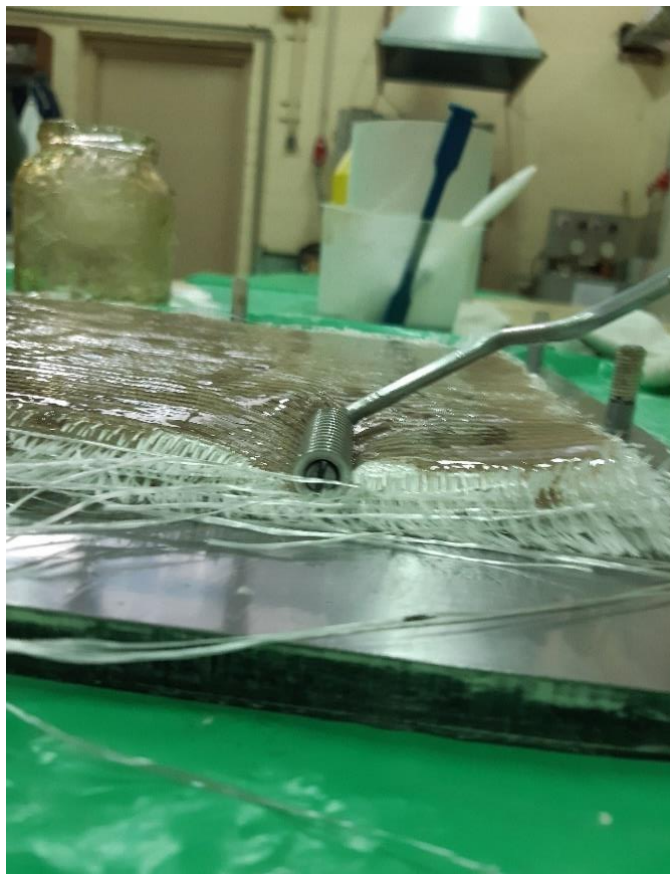
Na slici 5.4 je prikazan postupak izrade ploče.



Slika 5.4. Postupak izrade ploče

Nakon postavljanja svih slojeva tkanine ploča se ostavlja da umreži 24 sata i nakon umrežavanja se vadi iz kalupa. Nakon čišćenja i ponovnog nanošenja odvajala i poliranja, kalup je spreman za sljedeću uporabu.

Parabeam 3D staklene tkanine su zbog svoje strukture vrlo jednostavne za primjenu. Nije ih potrebno odzračivati, pri valjanju se vraćaju u prvobitni položaj (slika 5.5) i slaganjem *Parabeam* 3D staklenih tkanina vrlo brzo se dođe do željene debljine izratka.



Slika 5.5. Povratak *Parabeam* 3D staklenih tkanina u prvobitni položaj nakon deformiranja

Na ovaj način su izrađene ploče 1 i 4. Ploče 2, 3 i 5 se razlikuju u tome što na vanjskim stranama imaju stakleni mat ili tkaninu. U tim slučajevima se na početku i na kraju postavljaju tkanine ili mat koje se moraju dobro natopiti (slika 5.6).



Slika 5.6. Natapanje sloja tkanine odnosno mata smolom i istiskivanje zraka

Nakon izrade svih kompozitnih ploča i odrezivanja rubova izmjerene su im dimenzije i masa te im je izračunata gustoća (tablica 5.2).

Tablica 5.2. Dimenzije, masa te izračunata gustoća kompozitnih ploča

Kompozitna ploča	Dimenzije, mm	Masa, g	Gustoća ρ , kg/m ³
Ploča 1	155 x 282 x 19	199,8	240,58
Ploča 2	155 x 285 x 18	332,8	418,54
Ploča 3	157 x 285 x 19	262,2	308,41
Ploča 4	150 x 283 x 21	293	328,68
Ploča 5	159 x 285 x 19	407	472,71

5.2. Izrezivanje ispitnih tijela

Iz ploča su izrezana ispitna tijela zadanih dimenzija za ispitivanje rasteznih i savojnih svojstava i žilavosti.

Rastezna svojstva ispituju se prema normi HRN EN ISO 527-4:2008. Prema navedenoj normi dimenzije ispitnih tijela su 25 x 250 mm, a debljina je određena prema debljini ploče. [60]

Savojna svojstva ispituju se prema normi HRN EN ISO 14125:2005. Prema navedenoj normi dimenzije ispitnih tijela su 15 x 60 mm, a debljina je određena prema debljini ploče. [61]

Ispitivanje žilavosti po Charpyu se ispituje prema normi HRN EN ISO 179-1:2010. Prema navedenoj normi dimenzije ispitnih tijela su 10 x 80 mm, a debljina je određena prema debljini ploče. [62]

U prilogu u tablicama 8.1, 8.2 i 8.3 navedene su dimenzije ispitnih tijela za ispitivanje rasteznih i savojnih svojstava i žilavosti.

5.3. Ispitivanje mehaničkih svojstava kompozitnih ploča

5.3.1. Ispitivanje rasteznih svojstava

Ispitivanje rasteznih svojstava se provodi prema normi HRN EN ISO 527-4:2008.

Zbog toga što su *Parabeam* tkanine šuplje, prilikom stezanja ispitnog tijela u čeljusti kidalice može doći do deformacije ispitnog tijela. Da se minimalizira deformacija i tako smanji mogućnost klizanja ispitnih tijela iz čeljusti kidalice, na krajeve ispitnih tijela dodani su dodatni slojevi staklenog mata (eng. *end tab*) koji će biti u kontaktu s čeljustima kidalice. Na krajevima s gornje i donje strane ispitnih tijela dodani su po 3 sloja staklenog mata dimenzija 25 x 50 mm (slika 5.7) prema navedenoj normi.



Slika 5.7. Dodavanje end tabova na krajeve ispitnih tijela za ispitivanje rasteznih svojstava

Prilikom ispitivanja je nažalost ipak došlo do klizanja ispitnih tijela iz čeljusti kidalice te zbog toga ispitivanje nije valjano.

5.3.2. Ispitivanje savojnih svojstava

Ispitivanje savojnih svojstava se provodi prema normi HRN EN ISO 14125:2005. Ispitivanje je provedeno na kidalici *Shimadzu AGS-X* maksimalne sile 10 kN. Ispitivanje se provelo pomoću metode savijanja u 3 točke pri brzini od 5 mm/min i na razmaku oslonaca $L = 40$ mm.

Modul savitljivosti se određuje prema izrazu: [61]

$$E_f = \frac{L^3}{4bh^3} \cdot \frac{F_2 - F_1}{s_2 - s_1} \quad (1)$$

Gdje je:

L	mm	razmak između oslonaca
b	mm	širina ispitnog tijela
h	mm	debljina ispitnog tijela
F_1	N	sila 1
F_2	N	sila 2

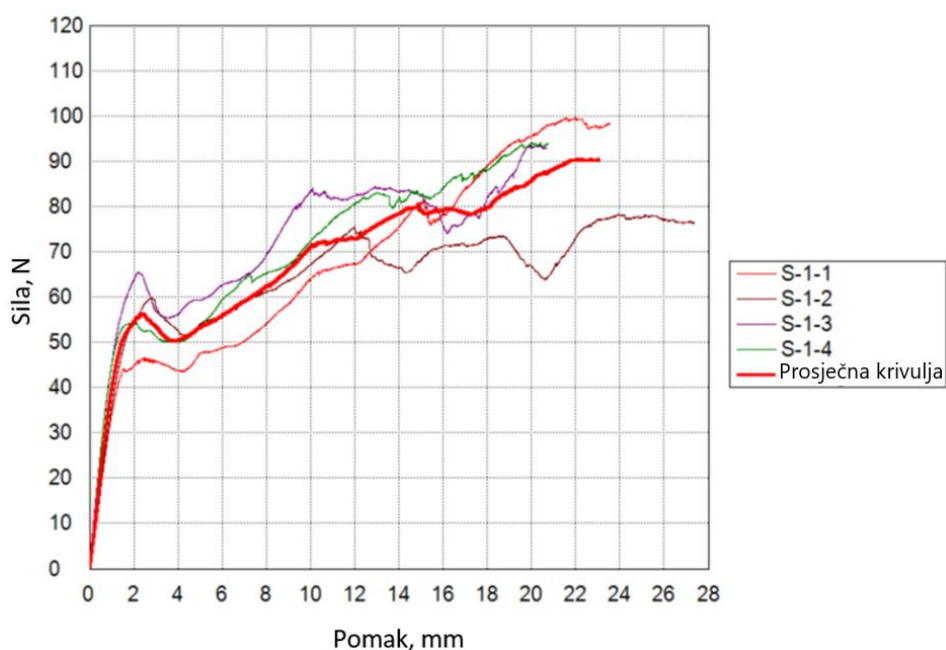
- s_1 mm pomak pri opterećenju silom 1
 s_2 mm pomak pri opterećenju silom 2.

Savijanje je provedeno na način da je opterećenje bilo na hrapavoj strani ispitnih tijela, odnosno glatka strana ispitnih tijela oslonjena je na oslonce. Pod pojmom glatka strana ispitnih tijela misli se na prvi, donji, sloj laminata koji je u kontaktu s kalupom prilikom prerade.

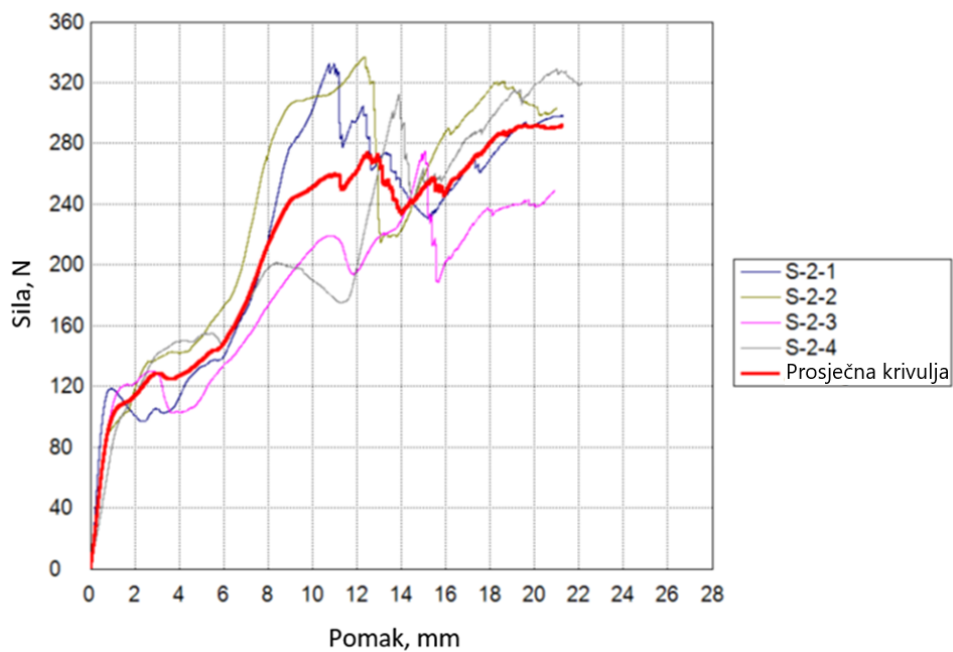
Prilikom ispitivanja savojnih svojstava ispitna tijela nisu pukla, nego je ispitivanje zaustavljeno prije nego je došlo do propadanja ispitnog tijela između oslonaca, te sukladno tome i općenito prema ponašanju ispitnih tijela prilikom savijanja nije moguće izračunati savojnu čvrstoću, prekidnu čvrstoću ni pripadajuće progibe te je izračunat samo modul savitljivosti prema jednadžbi u normi HRN EN ISO 14125. Modul savitljivosti za kompozitne ploče 2-5 izračunat je za vrijednosti sila (odnosno njihovih pripadajućih vrijednosti čvrstoće i deformacije) $F_1 = 40$ N i $F_2 = 60$ N, dok za kompozitnu ploču broj 1 za sile $F_1 = 20$ N i $F_2 = 40$ N.

Ispitno tijelo je s donje strane početne tkanine *Parabeam* počelo pucati u obliku rasteznog pucanja vlakana prema normi HRN EN ISO 14125, no nikada nije puklo do kraja.

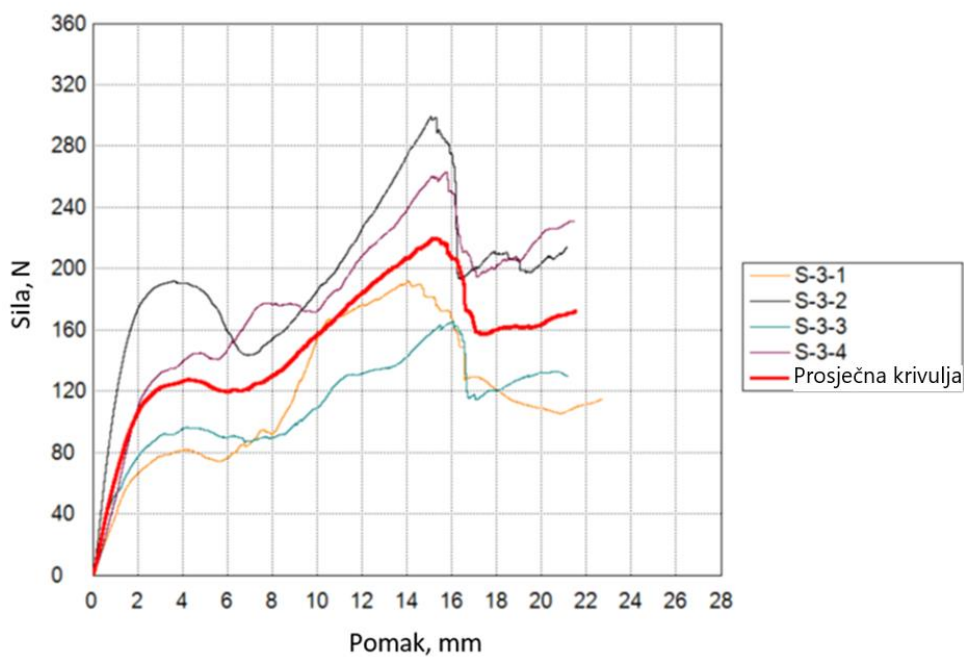
Na slikama 5.8 do 5.12 su prikazani dijagrami savojne sile – pomaka za ispitna tijela ploča 1 do 5, a na slici 5.13 je prikazana usporedba krivulja srednjih vrijednosti svih pet ploča. Rezultati ispitivanja savojnih svojstava nalaze se u tablici 5.3.



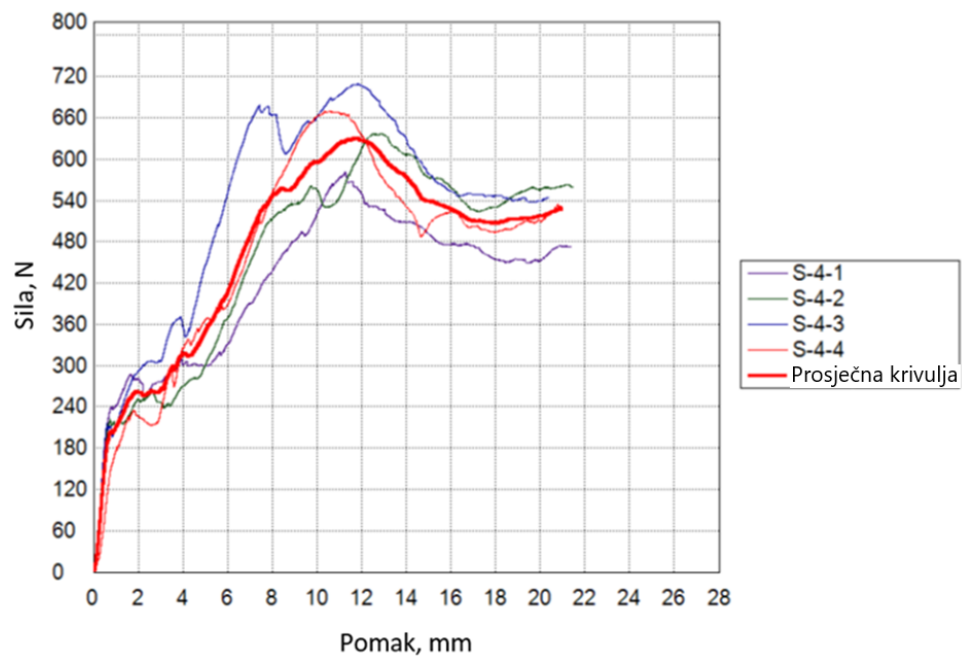
Slika 5.8. Dijagram savojne sile – pomaka za prvu ploču S-1



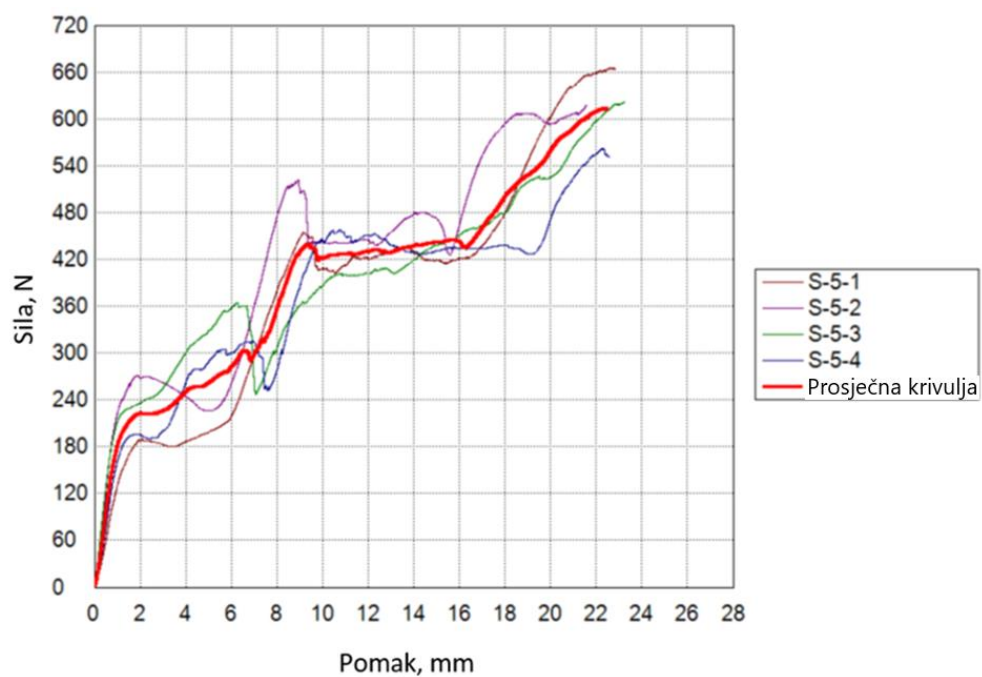
Slika 5.9. Dijagram savojne sile – pomaka za drugu ploču S-2



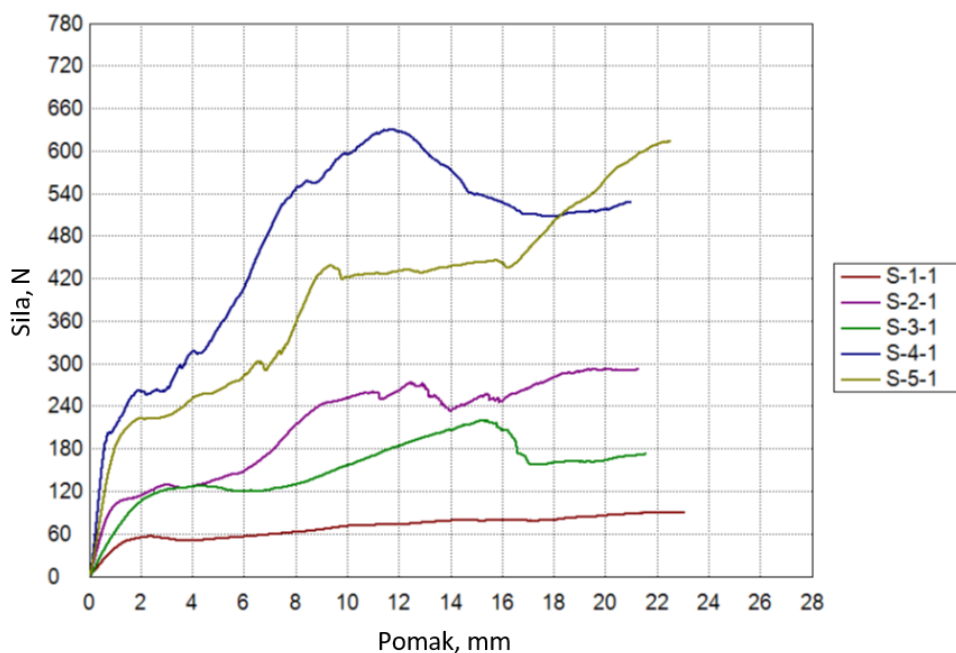
Slika 5.10. Dijagram savojne sile – pomaka za treću ploču S-3



Slika 5.11. Dijagram savojne sile – pomaka za četvrtu ploču S-4



Slika 5.12. Dijagram savojne sile – pomaka za petu ploču S-5



Slika 5.13. Dijagram savojne sile – pomaka (prikaz krivulja srednjih vrijednosti) svih pet ploča

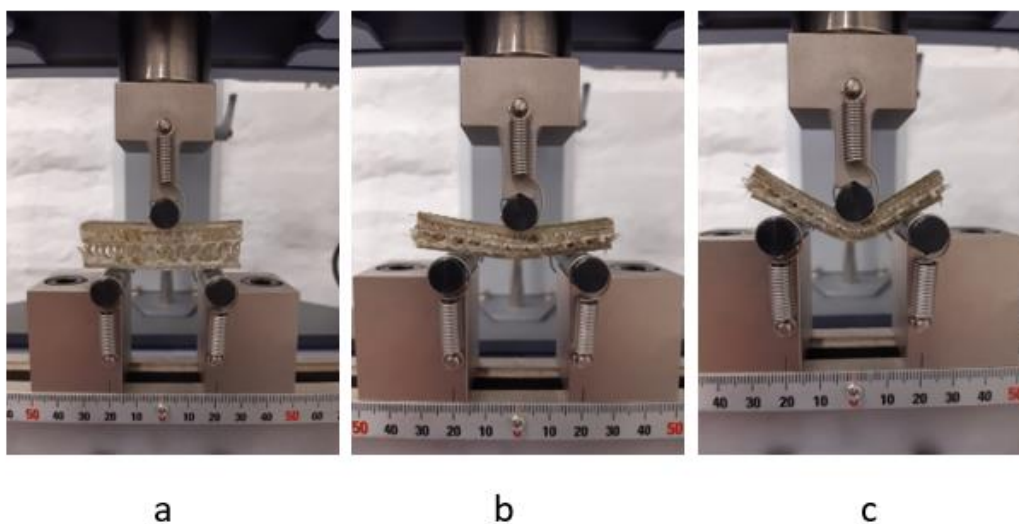
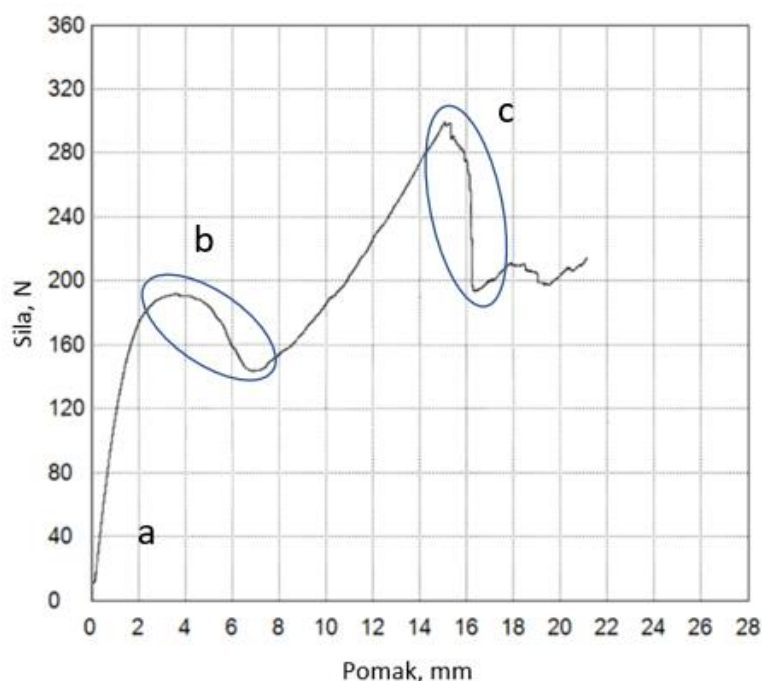
Tablica 5.3. Rezultati ispitivanja savojnih svojstava

Sila 20 - 40 N		Sila 40 - 60 N							
Ispitno tijelo	Modul savitljivosti E_f , N/mm ²	Ispitno tijelo	E_f , N/mm ²	Ispitno tijelo	E_f , N/mm ²	Ispitno tijelo	E_f , N/mm ²	Ispitno tijelo	E_f , N/mm ²
S-1-1	6,08766	S-2-1	32,1105	S-3-1	8,57474	S-4-1	40,7927	S-5-1	19,8897
S-1-2	5,75066	S-2-2	21,7323	S-3-2	17,2012	S-4-2	41,9057	S-5-2	43,1225
S-1-3	7,63638	S-2-3	21,1065	S-3-3	13,5023	S-4-3	42,8191	S-5-3	36,8986
S-1-4	8,63425	S-2-4	13,8534	S-3-4	7,27244	S-4-4	29,3255	S-5-4	23,3395
Srednja vrijednost \bar{x}	7,02724		22,2007		11,6377		38,7108		30,8126
Standardna devijacija S	1,34982		7,51217		4,57772		6,31146		11,0111

Iz navedenih dijagrama i tablice 5.2 vidljivo je da najbolje rezultate postižu ispitna tijela iz ploče broj 4 koja se sastoji od 4 sloja *Parabeam* tkanina debljine 5 mm, zbog toga što ima

najmanje šupljina i najveći broj površina (vanjske površine i spojne površine) za razliku od ostalih ploča.

Zanimljivo je ponašanje ovih kompozitnih ploča prilikom savijanja. Na početku, opterećenje nose i površine i vezivna vlakna. Nakon određene vrijednosti progiba, vezivna vlakna popuste i svo opterećenje nose površine dok ne dođe do rasteznog pucanja početnog sloja ploče. Kao primjer je uzeto ispitno tijelo S-3-2 gdje se vidi trenutak popuštanja vezivnih vlakana i rastezno pucanje vlakana na dnu ispitnog tijela (slika 5.14).

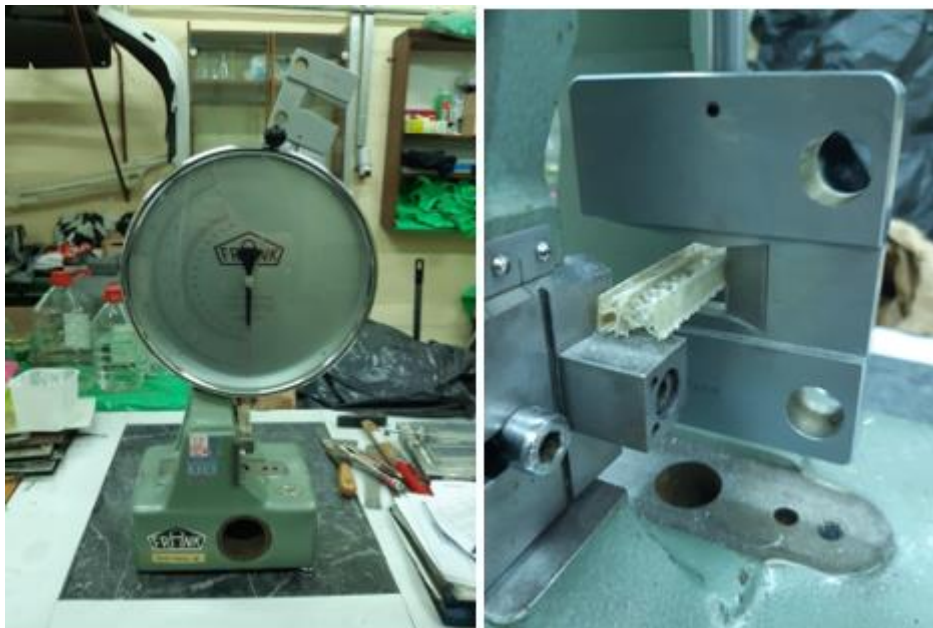


Slika 5.14. Savijanje ispitnog tijela S-3-2: a) početak ispitivanja, b) popuštanje vezivnih vlakana, c) rastezno pucanje vlakana na dnu ispitnog tijela

5.3.3. Ispitivanje žilavosti

Ispitivanje žilavosti po Charpyu se ispituje prema normi HRN EN ISO 179-1:2010.

Uređaj za ispitivanje žilavosti po Charpyu omogućuje mjerenje na 3 skale i odabran je bat od maksimalnih 40 kpcm odnosno 4 J. Razmak oslonaca na uređaju je definiran normom i iznosi $L = 62_{-0,0}^{+0,5}$ mm. Ispitivanje je provedeno tako da bat udari u hrapavu stranu ispitnih tijela (slika 5.15).



Slika 5.15. Uređaj za ispitivanje žilavosti po Charpyu

Žilavost po Charpyu se određuje prema izrazu: [62]

$$a_{cU} = \frac{E_c}{h \cdot b} \cdot 10^3 \quad (2)$$

Gdje je:

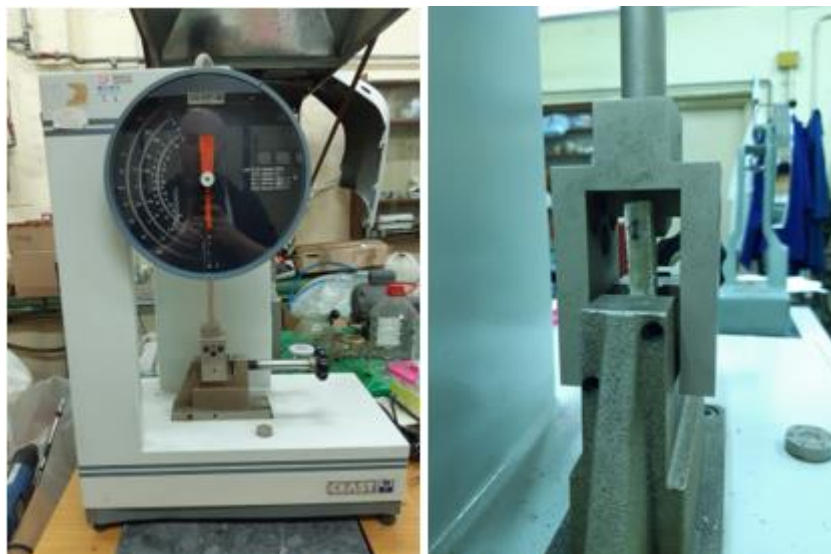
a_{cU}	kJ/m^2	žilavost po Charpyu bez zareza
E_c	J	apsorbirana energija kod udara
h	mm	debljina ispitnog tijela
b	mm	širina ispitnog tijela.

Kako bi se provjerilo je li mjerno područje uređaja dovoljno veliko da zabilježi apsorbiranu energiju kod udara, uzeto je po jedno ispitno tijelo od svake skupine. Ispitna tijela iz ploča 1 i 3 su ušla u mjerno područje, dok ispitna tijela iz ploča 4 i 5 nisu ušla u mjerno područje. Zbog krive procjene, sva ispitna tijela iz ploče 2 su ispitivana na ovom uređaju što se kasnije

pokazalo kao kriva odluka jer nisu ušla u mjerno područje. Iz tog razloga, ostatak ispitnih tijela iz ploče 4 i 5 su ispitivana na uređaju za ispitivanje žilavosti po Izodu.

Ispitivanje žilavosti po Izodu se ispituje prema normi HRN EN ISO 180:2010. Prema normi ispitna tijela su jednakih dimenzija kao i prema normi za ispitivanje žilavosti prema Charpyu. Oznaka žilavosti po Izodu je a_{IU} i izraz za izračunavanje žilavosti je jednak izrazu po Charpyu. [63]

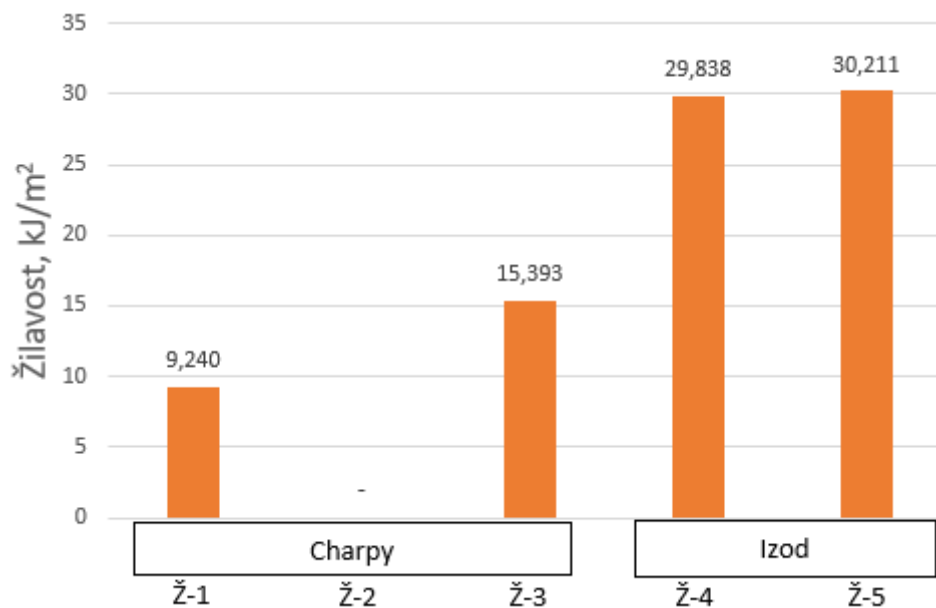
Uređaj za ispitivanje žilavosti po Izodu omogućuje mjerenje na 5 skala i odabran je bat od 7,5 J. Ispitivanje je provedeno tako da bat udara u hrapavu stranu ispitnih tijela (slika 5.16).



Slika 5.16. Uređaj za ispitivanje žilavosti po Izodu

Prilikom ispitivanja, ispitno tijelo Ž-5-2 je prilikom udara bata izletjelo iz oslonca jer nije bilo dovoljno stegnuto i zbog toga je ispitivanje ovog ispitnog tijela odbačeno.

Ni jedno ispitno tijelo nije puklo na završnoj površini, nego je puklo na vezivnim vlaknima *Parabeam* tkanina. Rezultati ispitivanja i izračunata žilavost se nalaze u prilogu u tablici 8.4, a na slici 5.17 su prikazane srednje vrijednosti žilavosti ispitnih tijela iz pojedinih skupina.



Slika 5.17. Srednje vrijednosti žilavosti po Charpyu i Izodu

Na kraju ispitivanja ustanovljeno je da ima puno odbačenih rezultata i malo podataka koje bi bili dovoljni da se donese zaključak te je stoga odlučeno da će se ispitivanje ponoviti s novim uzorcima prema Izodu.

U prilogu u tablici 8.5 su navedene dimenzije ispitnih tijela za ponovljeno ispitivanje žilavosti po Izodu.

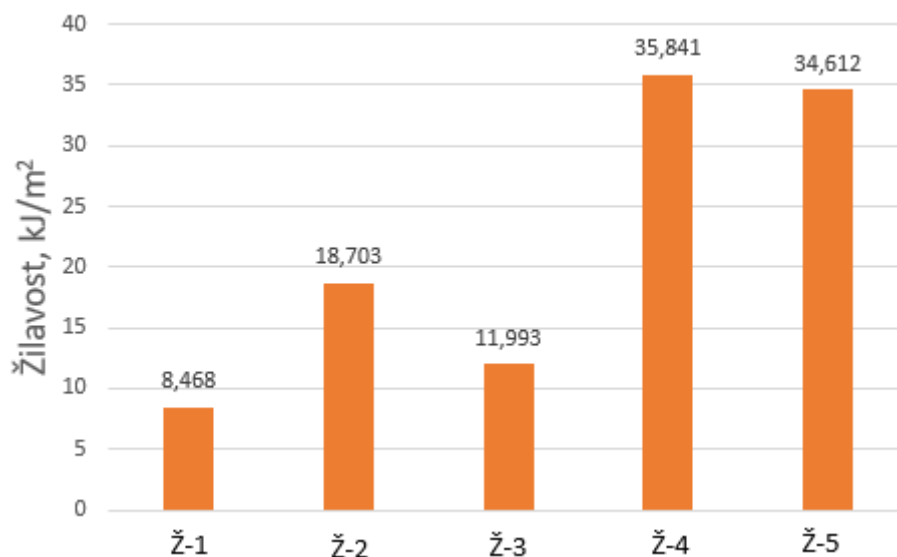
Pri ispitivanju upotrebljeni su batovi od 7,5 J i 25 J, gdje je razlika u mjernom području i u preciznosti mjerne skale.

Sva ispitna tijela su pukla na vezivnim vlaknima *Parabeam* tkanine, a neka tijela su, pogotovo pri ispitivanju batom od 25 J, pukla na završnoj površini (slika 5.18).



Slika 5.18. Ispitni tijelo Ž-5-3 nakon ispitivanja žilavosti

Rezultati ispitivanja i izračunata žilavost prema Izodu u ponovljenom ispitivanju se nalaze u prilogu u tablici 8.6, a na slici 5.19 su prikazane srednje vrijednosti žilavosti ispitnih tijela iz pojedinih skupina.



Slika 5.19. Srednje vrijednosti žilavosti po Izodu u ponovljenom ispitivanju

Iz navedenog dijagrama i tablice 8.6 vidljivo je da najbolje rezultate postižu ispitna tijela iz ploča 4 i 5, zbog toga što imaju najmanje šupljina i najveći broj površina i dodatno ploča 5 ima na vanjskim površinama sloj staklene tkanine koja povisuje žilavost.

5.4. Rasprava

Za ispitivanje rasteznih svojstava ne može se primjeniti način ispitivanja prema normi te je potrebno istražiti druge metode. Na temelju rezultata savojnih svojstava i žilavosti, najviši modul savitljivosti i žilavost imaju ispitna tijela iz ploča 4 i 5 jer imaju najmanje šupljina i najveći broj površina (vanjske površine i spojne površine). Dijeljenjem modula savitljivosti s gustoćom dobije se specifični modul savitljivosti, i rezultati dobiveni u tablici 5.4 pokazuju da ploča 4 ima najbolja svojstva s obzirom na gustoću.

Usporedbom rezultata savojnih svojstava i žilavosti ispitnih tijela iz ploča 2 i 3, koja imaju jednak raspored *Parabeam* tkanina (12 mm *Parabeam* – 5 mm *Parabeam*), pokazuju kako ispitna tijela iz ploče 2 imaju više vrijednosti modula savitljivosti i žilavosti zbog toga što na vanjskim stranama imaju sloj staklene tkanine, dok ispitna tijela iz ploče 3 koja imaju sloj staklenog mata. Stakleni mat se u nekim slučajevima odlijepio od *Parabeam* tkanine odnosno došlo je do delaminacije prilikom priprema ispitnih tijela, dok je staklena tkanina pokazala bolje prijanjanje.

Tablica 5.4. Usporedba rezultata ispitivanja kompozitnih ploča

Kompozitna ploča	Ploča 1	Ploča 2	Ploča 3	Ploča 4	Ploča 5
Modul savitljivosti E_f , N/mm ²	7,02724	22,2007	11,6377	38,7108	30,8126
Žilavost a_{IU} , kJ/m ²	8,468	18,703	11,993	35,841	34,612
Gustoća ρ , kg/m ³	240,58	418,54	308,68	328,26	427,71
Specifični modul savitljivosti E_f/ρ , $\times 10^6$ m ² /s ²	29,21	53,04	37,70	117,93	72,04

6. ZAKLJUČAK

Kompozitni materijali se danas nalaze gotovo u svim granama industrije zbog svojih prednosti nad konvencionalnim konstrukcijskim materijalima kao što su čelik ili aluminij. Te prednosti su dobra mehanička svojstva uz malu masu, antikorozivnost, jednostavnost izrade i održavanja proizvoda od kompozita.

3D tkanine predstavljaju dodatni korak u razvoju kompozita. Primjenom 3D tkanina znatno se olakšava i skraćuje postupak ručnog laminiranja. *Parabeam* 3D staklene tkanine dodatno smanjuju masu kompozita zbog svoje šuplje strukture te su pogodne za izradu dijelova i konstrukcija za automobilsku, zrakoplovnu, vojnu i građevinsku industriju.

U transportnoj industriji trendovi razvoja se zasnivaju na sve većoj primjeni novih materijala. Kompozitni materijali se više primjenjuju kako bi se smanjila masa vozila, smanjila potrošnja goriva i spriječila korozija. Kako se kompozitni materijali sve više upotrebljavaju, očekuje se da će im se cijena sniziti i tako biti dostupnija i za jeftinija vozila kako i za skuplja.

Cilj diplomskog rada je bio ispitati mogućnosti prerade i mehanička svojstva kompozitnih tvorevina izrađenih od *Parabeam* 3D staklenih tkanina u kombinacijama sa staklenim tkaninama i matom. Rezultati su pokazali kako kompozitne tvorevine od *Parabeam* tkanina rađene u kombinaciji sa staklenim tkaninama imaju bolja mehanička svojstva od kompozita rađenih sa staklenim matom i da kompoziti koji imaju manje šupljina i veći broj površina zbog toga što se primjenjuju tanje *Parabeam* tkanine, pokazuju bolja mehanička svojstva.

7. LITERATURA

1. <https://www.mar-bal.com/language/en/applications/history-of-composites/>, 05.02.2021.
2. <https://www.thoughtco.com/history-of-composites-820404>, 05.02.2021.
3. <https://smicomposites.com/then-now-a-brief-history-of-composites-materials/>, 05.02.2021.
4. Chung D. D. L., Composite Materials Science and Applications, Second Edition, Buffalo, Springer, 2010.
5. <https://www.fibre2fashion.com/industry-article/4503/classification-and-applications-of-textile-composite-materials-part-1>, 06.02.2021.
6. Dawoud M. M., Saleh H. M., Introductory Chapter: Background on Composite Materials, In: Characterizations of Some Composite Materials, IntechOpen, 2019.
7. https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1369657197-0-materijaliiikompoziti2013.pdf, 06.02.2021.
8. Filetin T., Kovačević F., Indof J., Svojstva i primjena materijala, Zagreb, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2019.
9. <https://www.materials.unsw.edu.au/study-us/high-school-students-and-teachers/online-tutorials/composites>, 08.09.2021.
10. Grilec K., Materijali cestovnih vozila – nastavni materijali, Zagreb, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2017.
11. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9843>, 08.09.2021.
12. <https://matmatch.com/learn/material/ceramic-matrix-composites>, 08.09.2021.
13. Mallick P. K., Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design, CRC Press, 2008. 619.
14. Ćorić D., Filetin T., Materijali u zrakoplovstvu, Zagreb, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2012.
15. <https://www.princeton.edu/~ota/disk2/1988/8801/880106.PDF>, 08.09.2021.
16. Ngo T-D., Introduction to Composite Materials, In: Composite and Nanocomposite Materials - From Knowledge to Industrial Applications, IntechOpen, 2020.
17. Thomas S., Joseph K., Malhotra K., Goda K., Sreekala M. S., Part One Introduction to Polymer Composites, Vol. 1, Polymer Composites

18. Filetin T., Pregled razvoja i primjene suvremenih materijala, Zagreb, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, 2000.
19. <https://www.pinterest.com/pin/323274079475539610/?d=t&mt=login>, 11.02.2021.
20. <https://www.fabheads.in/blogs/the-age-of-composite-materials-history-classification-applications/>, 08.09.2021.
21. <http://stroyinform.ru/voprosi-otveti/raznoe/shlifovalnye-krugi-pravilnyy-vybor/>, 12.02.2021.
22. Rajak D. K., Pagar D. D., Menezes P. L., Linul E., Fiber-reinforced polymer composites: Manufacturing, properties, and applications, Vol. 11, Polymers, MDPI AG, 2019.
23. https://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/05287G_Sample_Chapter.pdf, 08.09.2021.
24. <https://in.bgu.ac.il/engn/mater/Documents/LaboratoryBriefings/4/Materials%20Science%20and%20Engineering%20introduction%20Chapter%2015%20Composites%207th%20ed.pdf> 08.10.2021.
25. <https://netcomposites.com/guide/reinforcements/woven-fabrics/>, 08.10.2021.
26. https://hr.wikipedia.org/wiki/Stakleno_vlakno, 15.02.2021.
27. <https://www.njuskalo.hr/nauticka-oprema/ugljicna-vlakna-oglas-2381004>, 15.02.2021.
28. <http://ba.cnweavingmachine.com/info/aramid-kevlar-cloth-weaving-machine-31281716.html>, 15.02.2021.
29. <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/aramid-fiber>, 08.10.2021.
30. Mišura I., Izrada kompozitne tvorevine postupkom LRTM, Diplomski rad, Zagreb, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2015.
31. Nijssen R. P. L., Composite Materials: An Introduction, VKCN, 2015.
32. [https://metalurji.mu.edu.tr/Icerik/metalurji.mu.edu.tr/Sayfa/Composite%20Materials10\(3\).pdf](https://metalurji.mu.edu.tr/Icerik/metalurji.mu.edu.tr/Sayfa/Composite%20Materials10(3).pdf), 03.04.2021.
33. <https://www.slideshare.net/SethuRam2/vacuum-bag-molding>, 03.04.2021.
34. <https://www.basaltft.com/app/lay.htm>, 03.04.2021.
35. <https://glassfibre.ie/wp-content/uploads/2017/02/Hand-Lay-Up.pdf>, 03.04.2021.
36. <https://www.dofrp.com/hand-lay-frp-process/>, 03.04.2021.

37. <https://www.carbonfibercustom.com/hand-lay-up-process-for-composite-materials/>, 03.04.2021.
38. Pilipović A., Prerada kompozitnih tvorevina - nastavni materijal, Zagreb, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2021.
39. https://www.vacmobiles.com/resin_infusion.html, 08.04.2021.
40. <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/resin-transfer-molding>, 08.10.2021.
41. El-Dessouky H. M., Saleh M. N., 3D Woven Composites: From Weaving to Manufacturing, In: Recent Developments in the Field of Carbon Fibers, InTech, 2018.
42. <https://www.topweaving.com.cn/product/Double-wall-tank.html>, 08.04.2021.
43. <https://www.svijetmetraze.hr/blog-post/sve-o-materijalu-tkanina>, 08.04.2021.
44. <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/21/3594/htm>, 08.04.2021.
45. <https://www.textileworld.com/textile-world/nonwovens-technical-textiles/2019/04/benefits-of-3-d-woven-composite-fabrics/>, 08.04.2021.
46. <https://parabeam.com/>, 13.04.2021.
47. <https://static1.squarespace.com/static/5eda856b6492f872f02e3a69/t/5fb9fb1460ed88028bc9eff9/1606023957149/11.21AR++Sandwich+Panels+in+Transportation.pdf>, 13.04.2021.
48. Tehnički informativni list Parabeam 3D staklenih tkanina
49. Fernandes A. A., Ferreira A., Neves P. C. Intro SIXTH FRAMEWORK PROGRAMME Sustainable Surface Transport LITEBUS MODULAR LIGHTWEIGHT SANDWICH BUS CONCEPT, 2006.
50. https://www.moldedfiberglass.com/wp-content/uploads/2020/01/pdf_Mass_Reduction_With_Value_Engineered_Composites_2018.pdf, 25.10.2021.
51. Neves P., Fernandes A. A., Ferreira A., Marques A. T., Correia N., Almada-Lobo B., Use of Composite Materials in Public Service Vehicles
52. <https://exelcomposites.com/composite-solutions/composites-in-transportation/bus-and-coach-profiles/>, 25.10.2021.
53. <http://compositesmanufacturingmagazine.com/2020/05/composites-power-efficiency-in-electric-buses/>, 25.10.2021.

54. <https://www.compositesworld.com/articles/composites-give-shape-to-new-passenger-bus>, 25.10.2021.
55. <https://www.sustainable-bus.com/news/composite-materials-and-small-batteries-dancer-the-lithuanian-e-bus-developed-from-scratch/>, 25.10.2021.
56. [https://cs.wikipedia.org/wiki/Trolejbusy_%C5%A0koda#/media/Soubor:Brno,_%C5%BDerot%C3%ADnovo_n%C3%A1m.,_%C5%A0koda_14Tr_%C4%8D._3194_\(01\).jpg](https://cs.wikipedia.org/wiki/Trolejbusy_%C5%A0koda#/media/Soubor:Brno,_%C5%BDerot%C3%ADnovo_n%C3%A1m.,_%C5%A0koda_14Tr_%C4%8D._3194_(01).jpg), 25.10.2021.
57. <https://www.lamilux.com/composites/branches/commercial-vehicle-industry.html>, 25.10.2021.
58. <https://www.sustainable-bus.com/electric-bus/karsan-electric-bus-e-jest-split-croatia/>, 25.10.2021.
59. <https://www.bhbus.ba/2021/09/22/u-split-stigao-elektricni-mini-bus-karsan-jest-electric/>, 25.10.2021.
60. HRN EN ISO 527-4:2008 Plastika - Određivanje rasteznih svojstava - 4. dio: Uvjeti ispitivanja izotropnih i ortotropnih plastičnih kompozita ojačanih vlaknima (eng. *Plastics - Determination of tensile properties - Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites*)
61. HRN EN ISO 14125:2005 Plastični kompoziti ojačani vlaknima - Određivanje savojnih svojstava (eng. *Fibre –reinforced plastic composites – Determination of flexural properties*)
62. HRN EN ISO 179-1:2010 Plastika - Određivanje žilavosti po Charpyju (eng. *Plastics - Determination of Charpy impact properties*)
63. HRN EN ISO 180:2020 Plastika - Određivanje savojne žilavosti prema Izodu (eng. *Plastics - Determination of Izod impact strength*)

8. PRILOZI

Tablica 8.1. Dimenzije ispitnih tijela za određivanje rasteznih svojstava

Ispitno tijelo	Širina b , mm			Srednja vrijednost \bar{x} , mm	Stand. devijacija S , mm	Debljina h , mm			Srednja vrijednost \bar{x} , mm	Stand. devijacija S , mm
R-1-1	24,5	25,7	26,8	25,67	1,15	19,6	19,7	19,2	19,50	0,26
R-1-2	24,9	24,8	24,3	24,67	0,32	18,7	19,2	19	18,97	0,25
R-1-3	25,7	25,9	27	26,20	0,70	19,7	19,5	19	19,40	0,36
R-1-4	25,5	25,5	25,4	25,47	0,06	19,6	19,3	18,8	19,23	0,40
				25,50	0,56				19,28	0,32
R-2-1	24,3	25	26	25,10	0,85	17,6	18,7	17,9	18,07	0,57
R-2-2	24,2	25	26,8	25,33	1,33	17,5	18,9	18,1	18,17	0,70
R-2-3	26,4	25,3	25,5	25,73	0,59	18,1	19	18	18,37	0,55
R-2-4	25,2	24,9	24,4	24,83	0,40	18,3	19,2	18,1	18,53	0,59
				25,25	0,79				18,28	0,60
R-3-1	25,9	26	26,9	26,27	0,55	17,7	19,5	19,1	18,77	0,95
R-3-2	26	25,7	25,3	25,67	0,35	17,9	19,7	19,1	18,90	0,92
R-3-3	25,8	25,8	25,9	25,83	0,06	18,1	19,7	19,4	19,07	0,85
R-3-4	25,7	26,4	26,8	26,30	0,56	18	19,6	19,1	18,90	0,82
				26,02	0,38				18,91	0,88
R-4-1	26,7	26,3	25,2	26,07	0,78	20	20,6	21,2	20,60	0,60
R-4-2	24,4	26,1	26,6	25,70	1,15	20,8	20,2	19	20,00	0,92
R-4-3	25,5	25,7	27,2	26,13	0,93	18,7	18,5	18,8	18,67	0,15
R-4-4	25,9	24,7	24,6	25,07	0,72	21,5	20,2	19,8	20,50	0,89
				25,74	0,90				19,94	0,64
R-5-1	25,9	25,8	26,4	26,03	0,32	19,7	19,6	17,1	18,80	1,47
R-5-2	26,3	25,8	26,1	26,07	0,25	20,2	20,4	17,9	19,50	1,39
R-5-3	26,4	26,3	25,9	26,20	0,26	19,7	19,2	17	18,63	1,44
R-5-4	24,5	25,7	26,6	25,60	1,05	20,2	20,3	18,1	19,53	1,24
				25,98	0,47				19,12	1,39

Tablica 8.2. Dimenzije ispitnih tijela za određivanje savojnih svojstava

Ispitno tijelo	Širina b , mm			Srednja vrijednost \bar{x} , mm	Stand. devijacija S , mm	Debljina h , mm			Srednja vrijednost \bar{x} , mm	Stand. devijacija S , mm
S-1-1	16,4	16	15,6	16,00	0,40	18,6	18,9	18	18,50	0,46
S-1-2	15,9	15,5	15,4	15,60	0,26	19	19	19,4	19,13	0,23
S-1-3	15,9	16,2	16,7	16,27	0,40	18,8	19,1	19,7	19,20	0,46
S-1-4	16,1	16,3	16,7	16,37	0,31	18,4	18,4	18,5	18,43	0,06
				16,06	0,34				18,82	0,30
S-2-1	15,5	15,7	16	15,73	0,25	18,1	18,4	18,6	18,37	0,25
S-2-2	17,1	17,1	17,2	17,13	0,06	18,4	17,8	17,3	17,83	0,55
S-2-3	16	15,9	15,7	15,87	0,15	18,1	18,4	18,8	18,43	0,35
S-2-4	16,6	16,7	17,1	16,80	0,26	17,3	17,9	18,7	17,97	0,70
				16,38	0,18				18,15	0,46
S-3-1	17,1	17,5	18	17,53	0,45	16	16,2	17,1	16,43	0,59
S-3-2	17,8	18	18	17,93	0,12	19,2	19	18,7	18,97	0,25
S-3-3	17,1	17	16,6	16,90	0,26	16,8	16,7	17,1	16,87	0,21
S-3-4	18,8	18,9	19,2	18,97	0,21	19,1	18,7	18,5	18,77	0,31
				17,83	0,26				17,76	0,34
S-4-1	18,2	17	16,4	17,20	0,92	21	21,2	21,4	21,20	0,20
S-4-2	16,5	15,9	16,1	16,17	0,31	21	21,4	21,4	21,27	0,23
S-4-3	16,8	17	17,1	16,97	0,15	21,2	21,2	21	21,13	0,12
S-4-4	16,9	17,2	17,4	17,17	0,25	20,2	20,7	20,8	20,57	0,32
				16,88	0,41				21,04	0,22
S-5-1	18	17,7	17,5	17,73	0,25	18,4	18,2	19	18,53	0,42
S-5-2	16,6	16,8	17	16,80	0,20	19,4	18,9	18,4	18,90	0,50
S-5-3	16,9	16,6	16,6	16,70	0,17	19,5	19,5	19,1	19,37	0,23
S-5-4	17,2	17,1	17	17,10	0,10	19,3	19,3	18,9	19,17	0,23
				17,08	0,18				18,99	0,34

Tablica 8.3. Dimenzije ispitnih tijela za određivanje žilavosti po Charpyu

Ispitno tijelo	Širina b , mm			Srednja vrijednost \bar{x} , mm	Stand. devijacija S , mm	Debljina h , mm			Srednja vrijednost \bar{x} , mm	Stand. devijacija S , mm
Ž-1-1	10,8	10,5	10,6	10,63	0,15	18,6	18,5	18,5	18,53	0,06
Ž-1-2	10,5	10,3	10,3	10,37	0,12	18,3	17,7	17,9	17,97	0,31
Ž-1-3	9,7	9,8	9,8	9,77	0,06	16,6	16,3	16,3	16,40	0,17
Ž-1-4	8	7,9	7,9	7,93	0,06	19	18,9	18,8	18,90	0,10
				9,68	0,10				17,95	0,16
Ž-2-1	10,1	10,5	10,6	10,40	0,26	18	18,5	18,1	18,20	0,26
Ž-2-2	10,2	9,9	9,7	9,93	0,25	17,4	17,3	16,7	17,13	0,38
Ž-2-3	10,3	11,4	11,8	11,17	0,78	18,7	19,2	18,6	18,83	0,32
				10,50	0,43				18,06	0,32
Ž-3-1	8,2	8,6	9,1	8,63	0,45	17	17,3	17,2	17,17	0,15
Ž-3-2	10,1	10,3	10,6	10,33	0,25	19,1	19	18,1	18,73	0,55
Ž-3-3	10,9	10,3	10,7	10,63	0,31	18,2	17,9	18,1	18,07	0,15
Ž-3-4	10,3	10,4	10,5	10,40	0,10	18,8	18,8	18,2	18,60	0,35
				10,00	0,28				18,14	0,30
Ž-4-1	11,8	12	11,3	11,70	0,36	21,4	20,5	20,2	20,70	0,62
Ž-4-2	10,6	10,5	9,7	10,27	0,49	21,1	21	20,3	20,80	0,44
Ž-4-3	9,8	10,2	10,4	10,13	0,31	20,4	20,6	21,3	20,77	0,47
				10,70	0,39				20,76	0,51
Ž-5-1	11,4	11,2	11,6	11,40	0,20	19,7	19,1	18	18,93	0,86
Ž-5-2	10,4	10,6	10,9	10,63	0,25	20,4	20,2	19,1	19,90	0,70
Ž-5-3	10,9	10,7	10,5	10,70	0,20	20	19,6	18,7	19,43	0,67
Ž-5-4	10,3	10,5	10,5	10,43	0,12	19,1	19,9	20,2	19,73	0,57
				10,79	0,19				19,50	0,70

Tablica 8.4. Rezultati ispitivanja i izračunata žilavost

	Ispitno tijelo	Debljina h , mm	Širina b , mm	Apsorbirana energija kod udara E_c		Žilavost a_{cU}/a_{iU} , kJ/m ²
				kpcm	J	
Charpy	Ž-1-1	18,53	10,63	19	1,9	9,646
	Ž-1-2	17,79	10,37	16,5	1,65	8,944
	Ž-1-3	16,40	9,77	15	1,5	9,362
	Ž-1-4	18,90	7,93	13,5	1,4	9,007
	Sred. vrij. \bar{x}	17,91	9,68	16	1,6	9,240
	Stand. dev. S	1,10	1,22	2,35	0,235	0,327
	Ž-2-1	18,2	10,4	37,5	3,75	19,812
	Ž-2-2	17,13	9,93	39,5	3,95	23,222
	Ž-2-3	18,83	11,17	39,5	3,95	18,780
	Sred. vrij. \bar{x}	18,05	10,5	38,83	3,88	20,604
	Stand. dev. S	0,86	0,63	1,15	0,115	2,324
	Ž-3-1	17,17	8,63	16	1,6	10,798
	Ž-3-2	18,73	10,33	28,5	2,85	14,730
	Ž-3-3	18,07	10,63	32	3,2	16,659
	Ž-3-4	18,6	10,4	37,5	3,75	19,386
	Sred. vrij. \bar{x}	18,14	10	28,5	2,85	15,393
Stand. dev. S	0,71	0,92	9,12	0,912	3,610	
Izod				J		
	Ž-4-1	20,70	11,70	-	-	-
	Ž-4-2	20,80	10,27	6,25		29,258
	Ž-4-3	20,77	10,13	6,4		30,418
	Sred. vrij. \bar{x}	20,76	10,7	6,33		29,838
	Stand. dev. S	0,05	0,87	0,11		0,820
	Ž-5-1	18,93	11,40	-	-	-
	Ž-5-2	19,90	10,63	5		23,637
	Ž-5-3	19,43	10,70	6,5		31,265
	Ž-5-4	19,73	10,43	6		29,157
	Sred. vrij. \bar{x}	19,5	10,79	6,25		30,211
Stand. dev. S	0,43	0,42	0,35		1,491	

Tablica 8.5. Dimenzije ispitnih tijela za određivanje žilavosti po Izodu u ponovljenom ispitivanju

Ispitno tijelo	Širina b, mm			Srednja vrijednost \bar{x}	Stand. devijacija S	Debljina h, mm			Srednja vrijednost \bar{x}	Stand. devijacija S
Ž-1-1	10,1	10,1	10,3	10,17	0,12	18,9	18,5	19,2	18,87	0,35
Ž-1-2	10,9	10,6	10	10,50	0,46	19,9	19,2	18,5	19,20	0,70
Ž-1-3	10,1	9,9	9,9	9,97	0,12	18,6	18,9	19,3	18,93	0,35
Ž-1-4	10,3	9,7	9,7	9,90	0,35	18,2	18,8	19,4	18,80	0,60
Ž-1-5	9,7	9,9	10	9,87	0,15	19,3	18,7	18,7	18,90	0,35
Ž-1-6	11,1	11,2	11,1	11,13	0,06	19,5	19,3	18,9	19,23	0,31
				10,26	0,21				18,99	0,44
Ž-2-1	11,5	11,3	11,6	11,47	0,15	19,3	19,2	19,2	19,23	0,06
Ž-2-2	13,1	12,4	12	12,50	0,56	17,8	18,5	18,5	18,27	0,40
Ž-2-3	10,8	11,1	11,2	11,03	0,21	18,3	17,8	18,1	18,07	0,25
Ž-2-4	10,1	10,4	10,6	10,37	0,25	18,3	18,4	18,9	18,53	0,32
Ž-2-5	11,7	11,1	10,9	11,23	0,42	18,2	17,6	18,1	17,97	0,32
				11,32	0,32				18,41	0,27
Ž-3-1	11,1	11,4	11,6	11,37	0,25	19,6	19,6	19,5	19,57	0,06
Ž-3-2	9,5	10	10,1	9,87	0,32	19,1	18,4	17,6	18,37	0,75
Ž-3-3	10,4	9,9	9,8	10,03	0,32	19,5	19,5	19,2	19,40	0,17
Ž-3-4	10,5	10,9	11,5	10,97	0,50	19,3	18,4	17,9	18,53	0,71
Ž-3-5	12,4	11,7	11,2	11,77	0,60	19,3	19,3	19,2	19,27	0,06
Ž-3-6	11,5	11,1	11,1	11,23	0,23	18,7	18,6	18,5	18,60	0,10
				10,87	0,37				18,96	0,31
Ž-4-1	11,6	11,8	11,2	11,53	0,31	21,4	21,5	21,3	21,40	0,10
Ž-4-2	11,4	11,5	11,2	11,37	0,15	21,2	20,3	19,5	20,33	0,85
Ž-4-3	11,7	11,3	11,4	11,47	0,21	19,7	19,3	19,6	19,53	0,21
Ž-4-4	10,3	10,1	10,3	10,23	0,12	19,9	19,7	19,9	19,83	0,12
Ž-4-5	10,3	10,1	10,2	10,20	0,10	21,3	20,3	19,8	20,47	0,76
Ž-4-6	9,6	10	9,8	9,80	0,20	21,7	21,7	21,6	21,67	0,06
				10,77	0,18				20,54	0,35
Ž-5-1	11,9	11,3	11,7	11,63	0,31	19,8	21,3	20,3	20,47	0,76
Ž-5-2	10,2	9,9	9,9	10,00	0,17	20,4	20,1	19,9	20,13	0,25
Ž-5-3	10,4	10,1	10,5	10,33	0,21	19,3	18,9	18,1	18,77	0,61
Ž-5-4	11,3	11,1	11,4	11,27	0,15	20,1	20	19,4	19,83	0,38
Ž-5-5	10,8	10,9	10,6	10,77	0,15	19,3	18,8	18,2	18,77	0,55
Ž-5-6	10,6	10,3	10,5	10,47	0,15	20,3	20,2	19,6	20,03	0,38
				10,74	0,19				19,67	0,49

Tablica 8.6. Rezultati ispitivanja i izračunata žilavost u ponovljenom ispitivanju

7,5 J	Ispitno tijelo	Debljina h , mm	Širina b , mm	Apsorbirana energija kod udara E_c , J	Žilavost a_{iU} , kJ/m ²
	Ž-1-1	18,87	10,17	1,7	8,863
	Ž-1-2	19,20	10,50	1,7	8,433
	Ž-1-3	18,93	9,97	1,75	9,274
	Ž-1-4	18,80	9,90	1,25	6,716
	Ž-1-5	18,90	9,87	1,7	9,116
	Ž-1-6	19,23	11,13	1,8	8,406
	Srednja vrijednost \bar{x}	18,99	10,26	1,65	8,468
	Stand. devijacija S	0,18	0,49	0,2	0,927
	Ž-2-1	19,23	11,47	4,2	19,044
	Ž-2-2	18,27	12,50	4,1	17,956
	Ž-2-3 *	18,07	11,03	3,25	16,304
	Ž-2-4	18,53	10,37	3,6	18,737
	Ž-2-5	17,97	11,23	3,85	19,076
	Srednja vrijednost \bar{x}	18,41	11,32	3,94	18,703
	Stand. devijacija S	0,51	0,78	0,27	0,521
	Ž-3-1	19,57	11,37	3,3	14,838
	Ž-3-2	18,37	9,87	2,25	12,416
	Ž-3-3	19,40	10,03	2,95	15,156
	Ž-3-4	18,53	10,97	2,3	11,316
Ž-3-5	19,27	11,77	1,8	7,940	
Ž-3-6 **	18,60	11,23	2,15	10,290	
Srednja vrijednost \bar{x}	18,96	10,87	2,46	11,993	
Stand. devijacija S	0,51	0,76	0,56	2,759	

* odbačeno zbog odstupanja od ostalih vrijednosti

** delaminacija staklenog mata prilikom pripreme ispitnog tijela

Tablica 8.6. Rezultati ispitivanja i izračunata žilavost u ponovljenom ispitivanju – nastavak

7,5 J	Ispitno tijelo	Debljina h , mm	Širina b , mm	Apsorbirana energija kod udara E_c , J	Žilavost a_{iU} , kJ/m ²
		Ž-4-1 *	21,40	11,53	6,6
	Ž-4-2	20,33	11,37	7,05	30,503
25 J	Ž-4-3	19,53	11,47	8,6	38,396
	Ž-4-4	19,83	10,23	8,7	42,865
	Ž-4-5	20,47	10,20	7	33,531
	Ž-4-6	21,67	9,80	7,2	33,909
	Srednja vrijednost \bar{x}	20,54	10,77	7,71	35,841
	Stand. devijacija S	0,84	0,77	0,86	4,833
	Ž-5-1	20,47	11,63	9,3	39,060
	Ž-5-2	20,13	10,00	7,9	39,238
	Ž-5-3	18,77	10,33	7,9	40,738
	Ž-5-4	19,83	11,27	6,1	27,298
	Ž-5-5	18,77	10,77	5,4	26,725
	Ž-5-6 *	20,03	10,47	4,4	20,984
	Srednja vrijednost \bar{x}	19,67	10,74	7,32	34,612
	Stand. devijacija S	0,73	0,61	1,56	6,971

* odbačeno zbog odstupanja od ostalih vrijednosti