

Polimerni kompoziti za oplatu natjecateljskih motocikala

Petruša, Jelena

Undergraduate thesis / Završni rad

2016

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:235:720490>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-20**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Jelena Petruša

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Irena Žmak, dipl. ing.

Student:

Jelena Petruša

Zagreb, 2016.

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

Zahvaljujem mentoru doc. dr. sc. Ireni Žmak na ukazanom povjerenju, susretljivosti i pomoći oko izrade ovog završnog rada. Također, zahvaljujem se gospodinu Mladenu Putanecu iz poduzeća *Motoplastika MAC d.o.o.* koji mi je omogućio korištenje prostora, alata i materijala za izradu kompozitnih materijala. Zahvaljujem tehničkim suradnicima Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava Romanu Divjaku i Ivanu Martinku na pomoći izrade eksperimentalnog dijela ovog rada.

Konačno, zahvaljujem svojoj obitelji i prijateljima na razumijevanju i potpori koju su mi pružili tijekom studiranja.

Jelena Petruša



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Jelena Petruša** Mat. br.: 0035191096

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **POLIMERNI KOMPOZITI ZA OPLATU NATJECATELJSKIH MOTOCIKALA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **POLYMER COMPOSITES IN RACING MOTORCYCLE BODYWORK**

Opis zadatka:

Kompozitni materijali danas predstavljaju najmodernije materijale korištene u izradi dijelova suvremenih natjecateljskih motornih vozila. Kriteriji koji se postavljaju na dijelove natjecateljskih motocikala su izrazito visoki te materijali koji se koriste u izradi moraju biti vrhunskih svojstava i kvalitete. Također, značajan utjecaj na svojstva gotovih proizvoda ima tehnologija izrade. Ovisno o primijenjenoj metodi izrade, ali i vještini radnika, svojstva gotovih proizvoda mogu se drastično razlikovati.

U ovom završnom radu potrebno je:

- opisati materijale i tehnologije korištene u proizvodnji dijelova oplata natjecateljskih motocikala
- izraditi uzorke polimernih kompozitnih materijala koristeći različite materijale ojačala, različitih udjela i vrste prede te primijeniti tehnologije koje se najčešće koriste u izradi dijelova natjecateljskih motocikala
- iz dobivenih uzoraka izraditi ispitna tijela prema normi za ispitivanje mehaničkih svojstava vlaknima ojačanih polimernih kompozita
- na temelju rezultata ispitivanja donijeti zaključke o utjecaju materijala ojačala i tehnologije izrade na mehanička svojstva polimernih kompozita korištenih za dijelove oplata natjecateljskih motocikala.

Zadatak zadan:

25. studenog 2015.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Irena Žmak

Rok predaje rada:

- 1. rok: 25. veljače 2016.
- 2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.
- 3. rok: 17. rujna 2016.

Predviđeni datumi obrane:

- 1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 2016.
- 2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.
- 3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD.....	1
2. KOMPOZITNI MATERIJALI.....	2
2.1. Karakteristike kompozitnih materijala.....	2
2.2. Kompoziti s polimernom matricom ojačani vlaknima.....	4
3. PRIMJENA POLIMERNIH KOMPOZITA ZA IZRADU OPLATE NATJECATELJSKIH MOTOCIKALA	6
3.1. Materijali komponenata polimernih kompozita za izradu oplate natjecateljskih motocikala.....	9
3.1.1. Materijali matrice.....	9
3.1.2. Materijali vlakana	10
3.2. Tehnologije izrade polimernih kompozita za oplatu natjecateljskih motocikala.....	17
3.2.1. Dodirni postupak laminiranja – ručno polaganje.....	17
3.2.2. Oblikovanje u autoklavu	21
4. OPIS PREDVIĐENIH ISPITIVANJA.....	24
4.1. Opis statičko-vlačnog ispitivanja	24
4.2. Opis savojnog ispitivanja	25
4.3. Statistička obrada rezultata mjerenja	26
5. REZULTATI ISPITIVANJA MEHANIČKIH SVOJSTAVA VLAKNIMA OJAČANIH POLIMERNIH KOMPOZITA	28
5.1. Izrada kompozitnih materijala.....	28
5.2. Oprema za ispitivanje.....	30
5.3. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava	31
5.3.1. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja	31
5.3.2. Rezultati savojnog ispitivanja	38
6. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA	44
7. ZAKLJUČAK.....	45
LITERATURA.....	46
PRILOZI.....	48

POPIS SLIKA

Slika 1. Dijagram naprezanje – istežanje vlaknima ojačanog kompozita [1]	2
Slika 2. Usporedba osnovnih tipova kompozita: a) kompoziti s česticama, b) kompoziti s vlaknima, c) slojeviti kompoziti [1]	3
Slika 3. Različiti načini rasporeda vlaknastih ojačala: a) kontinuirana jednosmjerna vlakna, b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna, c) ortogonalno raspoređena vlakna, d) višesmjerno usmjerena vlakna [1]	5
Slika 4. Dijelovi oplate motocikla [8]	7
Slika 5. Model Yamaha R1 GMT94 2016 [9]	8
Slika 6. Umrežena poliesterska smola.....	9
Slika 7. Umrežena epoksidna smola.....	10
Slika 8. Staklena vlakna [12].....	11
Slika 9. Proizvodnja ugljičnih vlakana [1]	12
Slika 10. Ugljična vlakna [13].....	13
Slika 11. Aramidna vlakna [15]	14
Slika 12. Hibrid ugljik/aramid.....	14
Slika 13. Ugljična vlakna u obliku rovinga	15
Slika 14. Staklena vlakna u obliku mata	16
Slika 15. Prepreg od ugljičnih vlakana [17]	17
Slika 16. Dodirni postupak laminiranja: 1 – otvoreni kalup, 2 – odvajalo, 3 – gelna prevlaka, 4 – stakleno tkanje, 5 – hladno očvršćujuća smola, 6 – gotov proizvod; a – nanošenje odvajala, gelne prevlake, staklenog tkanja i smole, b – istiskivanje zraka između slojeva, c – odvajanje proizvoda od kalupa [18].....	18
Slika 17. Gelna prevlaka na kalupu stranice motocikla	19
Slika 18. Proizvodnja kućišta od staklenog ojačanja i epoksidne smole.....	20
Slika 19. Proizvodnja sjedišta motocikla od ugljičnog ojačanja i epoksidne smole	20
Slika 20. Stroj autoklav [19]	21
Slika 21. Shematski prikaz umreživanja u autoklavu [3]	22
Slika 22. Blatobran motocikla od ugljičnog preprega [20]	23
Slika 23. Izgled epruvete za statičko vlačno ispitivanje [22]	25
Slika 24. Epruveta za ispitivanje savojne čvrstoće.....	26
Slika 25. Shema ispitivanja savojne čvrstoće [23]	26
Slika 26. Pripremljena ploča za izradu kompozitnih materijala.....	28
Slika 27. Slojevi staklenih i ugljičnih ojačanja	29
Slika 28. Smolom natopljena staklena i ugljična ojačanja	29
Slika 29. Kidalica EU 40mod proizvođača WPM.....	30
Slika 30. Epruvete za ispitivanje mehaničkih svojstava.....	31
Slika 31. Statičko vlačno ispitivanje	32
Slika 32. Dijagram sila - produljenje za kompozit A – epruveta 1	34
Slika 33. Dijagram sila - produljenje za kompozit A – epruveta 2	35
Slika 34. Dijagram sila - produljenje za kompozit A – epruveta 3	35
Slika 35. Dijagram sila - produljenje za kompozit A – epruveta 4	35
Slika 36. Dijagram sila - produljenje za kompozit A – epruveta 5	36
Slika 37. Dijagram sila - produljenje za kompozit B – epruveta 1	36
Slika 38. Dijagram sila - produljenje za kompozit B – epruveta 2	36
Slika 39. Dijagram sila - produljenje za kompozit B – epruveta 3	37

Slika 40. Dijagram sila - produljenje za kompozit B – epruveta 4	37
Slika 41. Dijagram sila - produljenje za kompozit B – epruveta 5	37
Slika 42. Ispitivanje savojne čvrstoće	38
Slika 43. Dijagram sila – progib za kompozit A – epruveta 1	40
Slika 44. Dijagram sila – progib za kompozit A – epruveta 2	41
Slika 45. Dijagram sila – progib za kompozit A – epruveta 3	41
Slika 46. Dijagram sila – progib za kompozit A – epruveta 4	41
Slika 47. Dijagram sila – progib za kompozit A – epruveta 5	42
Slika 48. Dijagram sila – progib za kompozit B – epruveta 1	42
Slika 49. Dijagram sila – progib za kompozit B – epruveta 2	42
Slika 50. Dijagram sila – progib za kompozit B – epruveta 3	43
Slika 51. Dijagram sila – progib za kompozit B – epruveta 4	43
Slika 52. Dijagram sila – progib za kompozit B – epruveta 5	43

POPIS TABLICA

Tablica 1. Dimenzije epruvete za statičko vlačno ispitivanje [22].....	25
Tablica 2. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja kompozita A.....	33
Tablica 3. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja kompozita B.....	33
Tablica 4. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće kompozita A.....	39
Tablica 5. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće kompozita B.....	39
Tablica 6. Svojstva kompozitnih materijala.....	44

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	mm^2	površina početnog presjeka epruvete
b_1	mm	širina uskog dijela epruvete za statičko vlačno ispitivanje
F_{\max}	N	maksimalna sila
h	mm	debljina epruvete
k		broj stupnjeva slobode uzorka
L	mm	razmak između oslonaca epruvete za savojno ispitivanje
n		veličina uzorka
$R_{m,s}$	N/mm^2	savojna čvrstoća
$R_{m,vl.}$	N/mm^2	vlačna čvrstoća
s		nepristrana procjena standardne devijacije
t		varijabla Studentove t - razdiobe
\bar{x}		aritmetička sredina uzorka
α		stupanj značajnosti
μ		procijenjeno očekivanje osnovnog skupa
$\mu_{R_{m,s}}$	N/mm^2	intervalna procjena savojne čvrstoće
$\mu_{R_{m,vl.}}$	N/mm^2	intervalna procjena vlačne čvrstoće
$\sigma_{\bar{x}}$		standardna devijacija

SAŽETAK

Kompozitni materijali danas predstavljaju najmodernije materijale kao alternativa konvencionalnim konstrukcijskim materijalima. Posjeduju iznimno dobra mehanička svojstva kao što su visoka specifična čvrstoća i specifična krutost. Iz tog razloga sve se više koriste u područjima sporta, pa se od njih izrađuju oplata natjecateljskih motocikala. Kriteriji koji se postavljaju na materijal oplata iznimno su visoki pa materijali koji se koriste moraju imati najbolja svojstva.

U radu su opisani materijali i tehnologije korištene u proizvodnji dijelova oplata natjecateljskih motocikala. U eksperimentalnom dijelu rada izrađeni su ispitni uzorci polimernih kompozitnih materijala ojačanih različitim ojačanjima. Svrha ovog rada je upoznavanje tehnologija izrade suvremenih kompozitnih materijala i određivanje utjecaja različitih vrsta ojačanja na mehanička svojstva polimernih kompozita.

Ključne riječi: kompozitni materijali, polimerni kompoziti, staklena vlakna, ugljična vlakna, oplata natjecateljskih motocikala, mehanička svojstva

SUMMARY

Composite materials represent the current state of the art materials which serve as an alternative to conventional construction materials. They have great mechanical properties such as the high tensile strength and specific stiffness. Therefore, their application in different sports is increasing. This is also true for motorcycle racing where most of the bodyworks are made out of composite materials. Requirement levels are set high so the materials in use need to have the best possible properties.

In this thesis the materials and production techniques used in producing racing motorcycle bodyworks are presented. Within the experimental part of the thesis test samples reinforced with different kinds of reinforcement materials have been made. The purpose of the thesis is to study the composite materials production processes and to determine the influence of the applied reinforcement on the mechanical properties of the polymer composite materials.

Key words: composite materials, polymer composite, glass fibers, carbon fiber, racing motorcycles bodyworks, mechanical properties

1. UVOD

U posljednje vrijeme kompozitni materijali sve se više razvijaju i zamjenjuju konvencionalne materijale zbog potrebe za lakim i visokočvrstim konstrukcijama. Nastali spajanjem dva različita materijala, matrice i ojačala, omogućavaju "dimenzioniranje" svojstava, izradu vrlo složenih oblika otpornih na koroziju i dimenzijski stabilnih pri ekstremnim radnim uvjetima. Najveće prednost kompozitnih materijala su odličan odnos čvrstoće i gustoće (specifična čvrstoća), jednostavno održavanje i dulji vijek trajanja.

Kompozitni materijali imaju širok raspon primjene, pa se osim za primjenu u strojarstvu, građevinarstvu, brodogradnji, zrakoplovnoj i automobilskoj industriji sve više koriste u područjima sporta i razonode. Tako se proizvodi oprema za skijanje, bicikliranje, jedrenje, pa i oprema za utrke svjetskog prvenstva kao što su "Formula 1" i "MotoGP".

Ovim završnim radom prikazat će se korištenje polimernih kompozita za proizvodnju oplata natjecateljskih motocikala. Uloga oplata je zaštita dijelova motocikla uslijed opasnih sportskih uvjeta pa su zahtjevi na materijal oplata vrlo visoki. Polimerni kompoziti posjeduju izvrsnu kombinaciju svojstava, kao što su visoka specifična čvrstoća i specifična krutost, odlična dinamička izdržljivost i niska gustoća, te su kao takvi idealni za materijal oplata. Također, polimernim kompozitima može se smanjiti težina motocikla i time ostvariti manja potrošnja goriva.

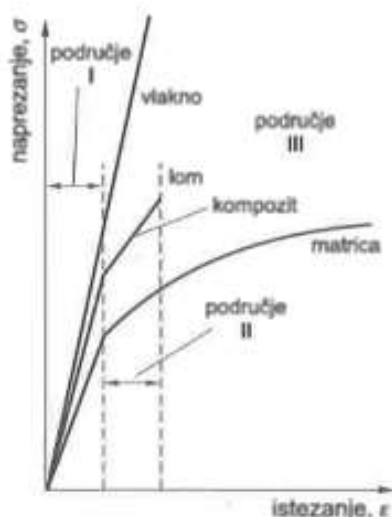
U prvom, teoretskom dijelu bit će opisani materijali i tehnologije korištene u proizvodnji oplata, dok će u drugom dijelu rada biti opisana izrada uzoraka za ispitivanje mehaničkih svojstava te analiza rezultata.

2. KOMPOZITNI MATERIJALI

2.1. Karakteristike kompozitnih materijala

Kompozitni materijali ili ukratko kompoziti proizvedeni su umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava s ciljem dobivanja materijala takvih svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe [1]. Ta su svojstva negdje između svojstava komponenti, obično u skladu sa zakonom miješanja. No, neka svojstva, posebice čvrstoća, mogu se znatno poboljšati u odnosu prema vrijednostima koje imaju pojedine komponente kompozitnoga materijala. Tako se kombinacijom volumnog udjela i položaja komponenti u kompozitu mogu stvarati materijali željenih, poboljšanih svojstava [2].

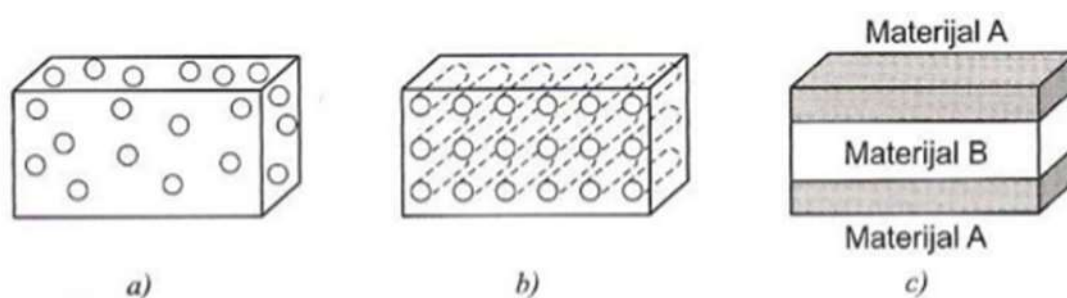
Na slici 1. prikazan je dijagram naprezanje-istezanje vlaknima ojačanog kompozita.



Slika 1. Dijagram naprezanje – istežanje vlaknima ojačanog kompozita [1]

U odnosu prema tradicionalnim materijalima kompoziti, a naročito polimerni kompoziti iskazuju brojne prednosti, kao što su otpornost na koroziju, mala gustoća i mala masa, povoljan odnos čvrstoće i gustoće (specifična čvrstoća), povoljan odnos modula elastičnosti i gustoće (specifična krutost), mogućnost proizvodnje dijelova složenog oblika, jednostavno i jeftino održavanje, dulji vijek trajanja, mogućnost "projektiranja" strukture i svojstava [3].

Umjetno proizvedeni kompoziti sastoje se od matrice i ojačala. Na temelju materijala matrice kompozite dijelimo na metalne, keramičke i polimerne kompozite. Ojačalo ima odlučujući utjecaj na mehanička svojstva čitavog kompozita pa tako prema vrsti ojačala razlikujemo kompozite s česticama, vlaknima ojačani kompoziti, slojeviti kompoziti i sendvič kompoziti (kompozitne sendvič konstrukcije). Slojeviti kompoziti i sendvič kompoziti pripadaju skupini strukturnih kompozita. Slika 2. prikazuje osnovne tipove kompozita prema obliku ojačala.



Slika 2. Usporedba osnovnih tipova kompozita: a) kompoziti s česticama, b) kompoziti s vlaknima, c) slojeviti kompoziti [1]

Ukupno ponašanje kompozita ovisi o [1]:

1. svojstvima matrice i ojačala,
2. veličini i rasporedu konstituenata,
3. volumnom udjelu konstituenata,
4. obliku konstituenata,
5. prirodi i jakosti veze između konstituenata.

Kompoziti imaju i nedostatke kao što su relativna krhkost, anizotropnost, visoki proizvodni troškovi kod velikih i složenih izradaka te problematičnost u vezi s tehnikama spajanja i konstrukcijskim oblikovanjem [4].

2.2. Kompoziti s polimernom matricom ojačani vlaknima

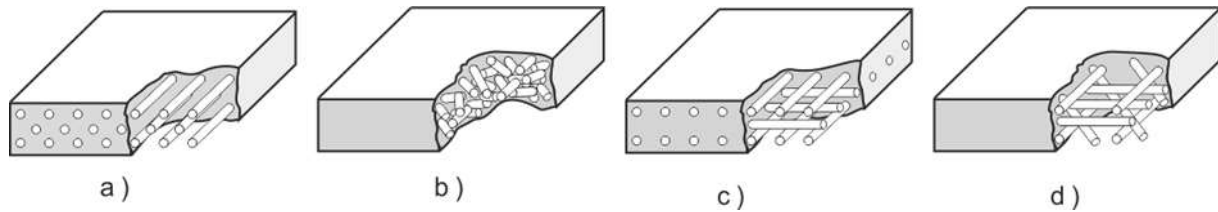
Kompoziti s polimernom matricom sastavljeni su od polimerne smole kao matrice s vlaknima kao komponentom za ojačavanje. Pojam smola u ovom se kontekstu koristi za obilježavanje polimera - tvari visoke molekularne mase koju treba ojačati [1].

Materijal matrice treba biti žilav, duktilan i čvrst. Uloga matrice je da povezuje vlakna te da ih drži u pravilnom položaju i orijentaciji. Matrica nosi samo mali dio izvana nametnutog naprezanja, a ostatak prenosi i raspoređuje na vlakna. Vrlo je važno da matrica ne smije kemijski reagirati s vlaknima i da mora dobro prijanjati uz vlakna. Također matrica mora zaštititi vlakna od okolnih utjecaja i oštećenja.

Vrste polimernih smola su duromerne i plastomerne smole. Najraširenije su poliesterske i epoksidne duromerne smole koje se upotrebljavaju u komercijalne i industrijske svrhe. Epoksidne smole imaju bolja mehanička svojstva, ali su znatno skuplje i često neprikladne za komercijalnu primjenu.

Vlakna se nazivaju i nosivi elementi kompozita jer osiguravaju visoku specifičnu čvrstoću, visoki specifični modul elastičnosti, žilavost te otpornost na trošenje. Vlakna moraju biti čvrsta, kruta, lagana te moraju imati visoko talište. Zbog toga se za vlakna preferiraju materijali visoke specifične čvrstoće i visoke specifične krutosti.

Najvažniji faktori kod konstruiranja vlaknima ojačanih kompozita su omjer duljine i promjera vlakana, volumni udio vlakana te usmjerenost vlakana. Kontinuirana vlakna daju bolja svojstva od diskontinuiranih vlakana, ali se često teško proizvode i ugrađuju u matricu. Veći volumni udio vlakana vodi do povećanja čvrstoće i krutosti kompozita. Gornja granica od oko 40 % određena je sposobnošću, odnosno mogućnošću da se vlakna okruže materijalom matrice [1]. Usmjerenost vlakana i način njihova slaganja bitno utječe na svojstva kompozitnog materijala. U slučaju kontinuiranih usmjerenih vlakana, mehanička svojstva kompozita su anizotropna tako da je čvrstoća najveća u smjeru vlakana, dok je u okomitom smjeru najmanja. Vlakna se zbog toga mogu polagati pod određenim kutovima čime se postižu jednoličnija svojstva kompozita. Na slici 3. prikazani su različiti načini usmjerenosti vlakana.



Slika 3. Različiti načini rasporeda vlaknastih ojačala: a) kontinuirana jednosmjerna vlakna, b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna, c) ortogonalno raspoređena vlakna, d) višesmjerno usmjerena vlakna [1]

Anizotropija nije uvijek nepoželjna jer se nosivost konstrukcije može bitno povećati projektiranjem takve strukture kompozita koja osigurava lokalno veću čvrstoću i krutost tamo gdje je to najpotrebnije [2].

Najčešće korištena vlakna za polimerne kompozite su staklena vlakna, ugljična vlakna i aramidna vlakna. Izbor vlakana temelji se na zahtjevima iz primjene (specifični modul, specifična čvrstoća, žilavost, radna temperatura).

3. PRIMJENA POLIMERNIH KOMPOZITA ZA IZRADU OPLATE NATJECATELJSKIH MOTOCIKALA

Auto-motorsport ili jednostavnije motosport, je skupina natjecateljskih događanja koja prije svega uključuju upotrebu motoriziranih vozila [5]. U svijetu postoji mnogo različitih oblika i grana motosporta. Podjele tipova motosporta mogu bit višestruke, prema različitim kriterijima: tip vozila (motocikl, automobil, kamion itd.), razini natjecanja (amaterski, profesionalni), tip automobila (otvoreni ili zatvoreni kotači) itd. Gotovo sva službena natjecanja su uključena u i regulirana od strane FIA-e (Fédération Internationale de l'Automobile) [5]. FIA je tijelo koje postavlja pravila natjecanja. Ta pravila mogu biti tehnička (vezana za vozilo), protokolarna, pravila ponašanja i mnoga druga. Od tih pravila najvažnijim se smatra tehnički pravilnik natjecanja koji sadrži određenu listu zahtjeva na konstrukciju vozila, ograničenja, preporuke i slično (primjerice, iznos sile koji konstrukcija mora izdržati pri udarcu). Pravila predstavljaju skup najvećih zahtjeva na dizajn i konstrukciju vozila.

Drugi veliki utjecaj na dizajn vozila je njihova svrha da budu što kompetitivniji na natjecanju. Ovisno o tipu natjecanja zahtjevi na vozila su različiti. Uglavnom, ti zahtjevi se mogu sabrati u temeljne tri grupe brzinu, izdržljivost i cijenu. Brzina podrazumijeva visoka dinamička svojstva vozila koja mu omogućavaju savladavanje dane staze u što kraćem vremenu. Izdržljivost podrazumijeva pouzdanost vozila tijekom natjecanja, primjerice postoje različiti zahtjevi za utrke izdržljivosti u trajanju od 24 sata do utrke ubrzanja koje traju nekoliko sekundi. Naravno, cijena je uvijek veliki faktor, pogotovo u doba racionalizacije motosporta gdje se postavljaju granični budžeti po natjecateljskoj ekipi i sezoni.

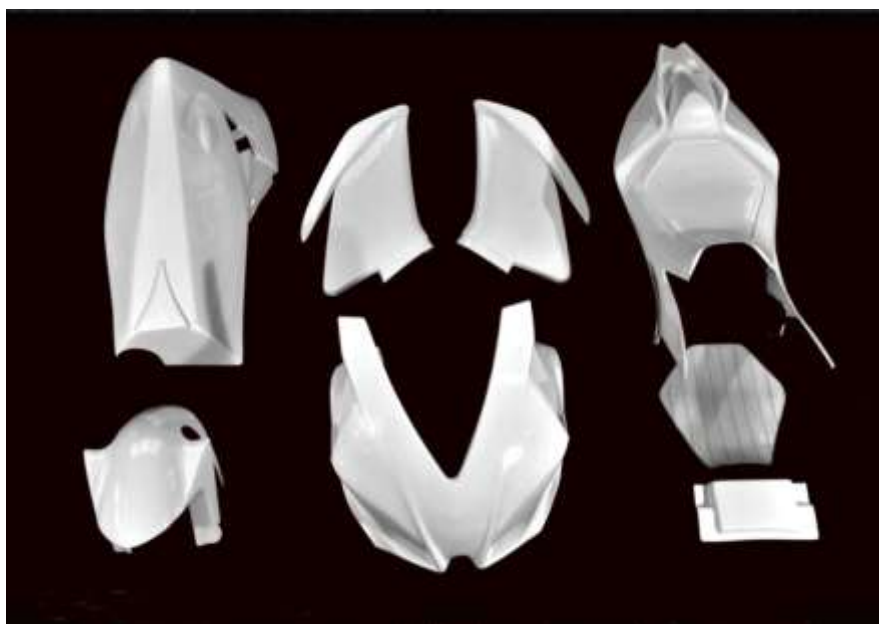
Danas, primjena kompozitnih polimernih materijala je veoma raširena u svijetu motosporta zahvaljujući mnogim pozitivnim svojstvima kompozitnih materijala. Upotreba kompozitnih materijala označava kompetitivnu prednost. Ugljična vlakna su, po prvi put, korištena u svrhu izrade šasije vozila na natjecanju Formule 1 1981. [6]. Ušteda na masi u odnosu na uobičajenu, čeličnu šasiju je bila značajna i na koncu donijela prevagu u natjecanju. Smanjenje mase je jedno od prioriteta konstruktora vozila. Smanjenjem mase omogućuju se mnogo bolja dinamička vozna svojstva vozila. Za pomicanje predmeta manje mase potrebna je manja sila. Nadalje, spuštanje težišta vozila pridonosi dinamičkim

svojstvima. Procijenjeno je da ušteda mase od 20 kg donosi 0.4 s po krugu tipične Grand Prix staze natjecanja F1 [7].

Upotreba kompozitnih materijala omogućila je uvođenje komponenti poput aerodinamičnih krilaca koji uvelike pridonose ponašanju vozila, pogotovo pri višim brzinama. Također, zbog visokih standarda sigurnosti u modernim natjecanjima, potrebne karakteristike komponenata poput apsorbirajućih udarnih zona traže upotrebu kompozitnih materijala koji to omogućavaju mnogo bolje od konvencionalnih materijala.

Danas postoji veliki naglasak na održivosti, ekonomičnosti, i smanjenju ispusnih emisija vozila. Smanjenjem mase ima pozitivne utjecaje na potrošnju goriva vozila te i time smanjenju cjelokupnih emisija vozila. Koncept održivost je veoma kompleksan jer je činjenica da se koriste materijali koji iziskuju mnogo energije u njihovoj proizvodnji, ali također se uzima u obzir prednost koju imaju ti materijali u vidu smanjenja emisija i sigurnosti.

Kada se koncentrira na primjenu kompozitnih materijala na motociklima moguće je primijetiti veliki broj komponenti izrađenih od tih materijala kao što su gornji i donji oklop, prednji i stražnji blatobran, sjedište, zaštita spremnika goriva, usisnici zraka, štitnik elektrotehnike, i mnogi drugi. Slika 4. prikazuje dijelove oplata motocikla.



Slika 4. Dijelovi oplata motocikla [8]

U proizvodnji dijelova najviše se koriste staklena vlakna, ugljična vlakna te hibrid ugljik/aramid vlakna. Staklena vlakna dolaze u obliku mata i rovinga, te se najviše koriste u kombinaciji s poliesterskom smolom. Ugljična vlakna koriste se isključivo kao roving u kombinaciji s epoksidnom smolom. Hibrid ugljik/aramid vlakna koristi se u posebnim slučajevima kada je potrebno dodatno ojačati neke dijelove proizvoda radi veće sigurnosti. Svaki se proizvod sastoji od više slojeva ojačanja različitih vrsta, tkanja i gramaže. Odabir ovisi o važnosti i funkciji kompozitnog proizvoda.

Na slici 5. prikazan je model Yamaha R1 GMT94 2016 čiji je kompozitni oklop proizvelo poduzeće *Motoplastika MAC d.o.o.*, Velika Gorica.



Slika 5. Model Yamaha R1 GMT94 2016 [9]

3.1. Materijali komponenata polimernih kompozita za izradu oplata natjecateljskih motocikala

3.1.1. Materijali matrice

Za proizvodnju oplata natjecateljskih motocikala najviše se koriste duromerne poliesterske i epoksidne smole.

Poliesterske smole imaju najširu primjenu od svih ostalih smola za materijal matrice. One su mješavina poliestera i monomera, najčešće stirena. Dodatak stirena (do 50 %) smanjuje viskoznost smole i olakšava primjenu. Stiren prvenstveno služi za povezivanje molekula poliestera i samim time očvršćuje materijal, bez nastajanja nusprodukata [10]. Poliesterske smole povisuju vlačnu i savojnu čvrstoću kompozitnih dijelova, te osiguravaju dobru kemijsku postojanost i otpornost na koroziju. Velika prednost poliesterskih smola je njihova niska cijena koja im omogućuje široku primjenu u komercijalne i industrijske svrhe. Najčešća ojačala za ove smole su staklena vlakna, što omogućuje odlična mehanička svojstva i prihvatljiv utjecaj na okoliš. Slika 6. prikazuje umreženu poliestersku smolu karakteristične smeđo-žute boje.



Slika 6. Umrežena poliesterska smola

Epoksidne smole imaju izvrsnu vlačnu čvrstoću i modul elastičnosti, kao i ostala mehanička svojstva. Postojane su na atmosferilije, agresivne medije i vodu. Dobro prijanjaju uz ojačavalo, što je važno za prijenos napreznja u kompozitnim materijalima. Epoksidne smole se pri očvršćivanju malo stežu, čime se minimiziraju zaostala napreznja u materijalu [10]. Također, one povisuju otpornost na umor materijala i imaju dobra električna svojstva. Time postaju

najvažnije smole za ojačavanje vlaknastih kompozita koji se primjenjuju ne samo u automobilske industriji, već i u brodogradnji i zrakoplovnoj industriji. Epoksidne smole se najčešće ojačavaju ugljičnim i aramidnim vlaknima te tako pružaju širok spektar mogućih mehaničkih svojstava. Slika 7. prikazuje umreženu epoksidnu smolu karakteristične plave boje.



Slika 7. Umrežena epoksidna smola

Zbog visoke cijene epoksidnih smola, u proizvodnji oplata natjecateljski motocikala koriste se poliesterske smole za one dijelove koji ne moraju imati visoka mehanička svojstva.

Smolama se prilikom izrade kompozita mora dodati umrežavalo i ubrzavalo. Umrežavalo se dodaje kako bi došlo do procesa umrežavanja makromolekula, a ubrzavalo kako bi se taj proces ubrzao.

3.1.2. Materijali vlakana

Prilikom proizvodnje oplata motocikala najviše se koriste ugljična i aramidna ojačanja koja zadovoljavaju visoke zahtjeve natjecanja. Također, koriste se i staklena ojačanja.

Staklenim vlaknima ojačan polimerni kompozit sastoji se od staklenih vlakana, kontinuiranih ili diskontinuiranih, koja se nalaze u polimernoj matrici [1].

Staklo je najpopularniji materijal koji se koristi kao ojačanje u proizvodnji suvremenih kompozita. Tome pridonosi njegova jednostavna i ekonomična proizvodnja. Najprije se sirovina stakla zagrijava te se u rastaljenom stanju dovodi u peć za izvlačenje vlakana. Rastaljeno staklo prolazi kroz nekoliko otvora kako bi se formirala pojedinačna vlakna koja

se potom režu na određenu dužinu ovisno o potrebi za kontinuiranim ili kraćim diskontinuiranim vlaknima. Tako proizvedena vlakna prije uporabe se apretiraju radi boljeg prijanjanja o polimernu matricu. Apretiranje je postupak kojim se poboljšavaju svojstva (npr. prionjivost) ili poljepšava izgled (npr. tkanini) [11].

Osnovne vrste staklenih vlakana koje se najviše koriste su E-staklo, S-staklo i C-staklo. E-staklo ima dobra izolacijska svojstva te dobar odnos cijene i mehaničkih svojstava. S-staklo se primjenjuje pri višim temperaturama, dok se C-staklo primjenjuje uz veće zahtjeve kemijske postojanosti. Ostale vrste stakla su A, D, R i M-stakla.

Prednosti kompozita sa staklenim vlaknima su niska cijena, visoka specifična čvrstoća, postojanost pri višim temperaturama i korozivskim opterećenjima, postojanost na starenje, dimenzijska stabilnost te dobra električna svojstva. Na slici 8. prikazana su staklena vlakna.

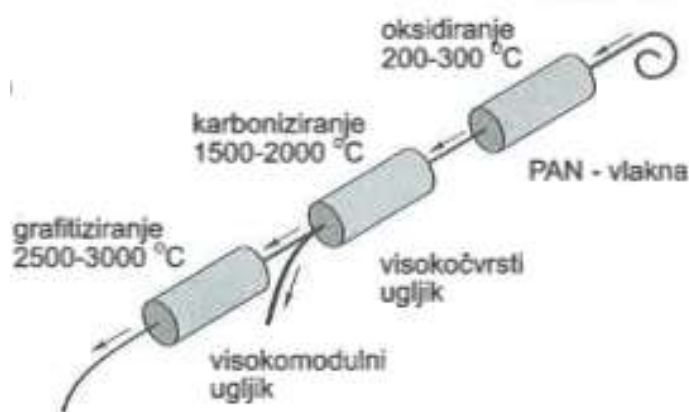


Slika 8. Staklena vlakna [12]

U proizvodnji oplata za natjecateljske motocikle staklena vlakna najviše se koriste za izradu onih dijelova koji tijekom natjecanja nisu izloženi velikim opterećenjima, kao što su to sjedište, blatobrani i zaštita za spremnik goriva. Ugljik je visokoučinkovit vlaknasti materijal koji se najčešće primjenjuje za ojačanje suvremenih kompozita s polimernom matricom [1].

Ugljična vlakna dobivaju se kontroliranom oksidacijom, karbonizacijom i grafitizacijom ugljikom bogatih organskih prethodnika koji su u vlaknastom obliku. Najčešći takav prethodnik je poliakrilonitril (PAN) koji daje najbolja svojstva vlaknima [10].

Karbonizacijom se stabilizirani PAN pirolizira u ugljična vlakna pri inertnoj atmosferi, a grafitizacijom se postižu veći sadržaji ugljika i izrazitija grafitna mikrostruktura. Podešavanjem parametara tijekom procesa grafitizacije dobivaju se ili vlakna visoke vlačne čvrstoće ili vlakna visokog modula elastičnosti. Nakon oblikovanja, vlakna se podvrgavaju površinskoj obradi kako bi se poboljšalo njihovo prijanjanje uz matricu. Ugljična vlakna se još mogu proizvoditi od katrana i celuloze. Slika 9. prikazuje proizvodnju ugljičnih vlakana od poliakrilonitrila.



Slika 9. Proizvodnja ugljičnih vlakana [1]

Prema čvrstoći i krutosti, ugljična vlakna se klasificiraju u sljedeće skupine: visokočvrsta vlakna, vlakna standardnog modula elastičnosti, vlakna srednjeg i prijelaznog modula elastičnosti, vlakna visokog modula elastičnosti i vlakna ultravisokog modula elastičnosti.

Ugljična vlakna imaju najveću specifičnu čvrstoću i najveću specifičnu krutost od svih vlaknastih materijala za ojačanje. Također imaju visoki vlačni modul i visoku čvrstoću koju zadržavaju pri povišenim temperaturama. Ugljična vlakna otporna su na vlagu i niz otapala, kiselina i lužina te imaju malu toplinsku rastezljivost. Slika 10. prikazuje ugljična vlakna.



Slika 10. Ugljična vlakna [13]

Na temelju mnogobrojnih dobrih svojstava ugljična vlakna su najkorištenija ojačala za automobilsku industriju. Relativno jeftina proizvodnja ugljičnih vlakna i kompozita odgovara na zahtjeve tržišta.

Kompoziti ojačani ugljičnim vlaknima imaju odličnu postojanost na koroziju, puzanje i umor materijala.

Aramidna vlakna su sintetski organski polimeri (aromatski poliamidi) proizvedeni pređenjem kontinuiranog vlakna iz kapljevite smjese [10]. Najvažnije karakteristike aramidnih vlakana su visoka vlačna čvrstoća, niska gustoća te karakteristična zlatno-žuta boja. Valja napomenuti da aramidna vlakna imaju najvišu uzdužnu vlačnu čvrstoću i najviši vlačni modul elastičnosti od svih ostalih polimernih vlaknastih materijala.

Proizvodnja aramidnih vlakana započinje ekstrudiranjem i pređenjem kontinuiranih vlakana. Kako se u proizvodnom procesu za otapanje aramida upotrebljava gotovo 100-postotna sulfatna kiselina, nakon ekstrudiranja nastavljaju se operacije pranja i neutralizacije vlakana te, ako je potrebno, dodatne obrade kojima se modificiraju određena svojstva vlakana [14].

Prva aramidna vlakna proizvedena su u američkoj kompaniji *DuPont* pod komercijalnim nazivom Kevlar. Na temelju vrijednosti modula elastičnosti razlikujemo: Kevlar 29 – visoka žilavost, Kevlar 49 – visoki modul elastičnosti i Kevlar 149 – vrlo visoki modul elastičnosti. Aramidna vlakna poznata su po svojoj krutosti i žilavosti, niskoj abrazivskoj trošivosti, otpornosti na udar i umor materijala. Zbog visokog udjela kristalaste strukture i anizotropnih svojstava aramidna vlakna pokazuju visoku otpornost puzanju [14].

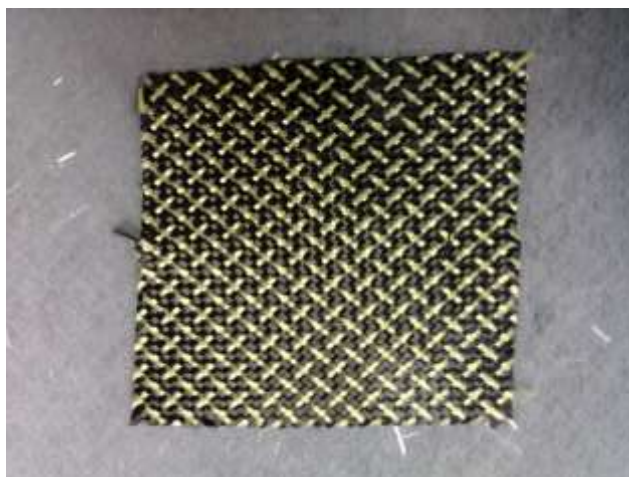
Također otporna su na zapaljenje te toplinski stabilna pri relativno visokim temperaturama. Glavni nedostatak aramidnih vlakana je relativno slaba adhezijska veza s matricom te je zbog toga njihova primjena u postupku ručne laminacije ograničena. Na slici 11. prikazana su aramidna vlakna.



Slika 11. Aramidna vlakna [15]

Aramidna vlakna jeftinija su od ugljičnih vlakana, ali nisu zadovoljavajuća zamjena u zahtjevnim primjenama zbog svoje niske tlačne čvrstoće. Zbog toga se aramidna vlakna kombiniraju s ugljičnim vlaknima, čime nastaje hibrid ugljik/aramid.

Hibridni kompoziti se dobivaju uporabom više vrsta vlakana u jedinstvenoj matrici čime se postižu optimalna svojstva. Aramidna vlakna imaju visoku žilavost i vlačnu čvrstoću dok ugljična vlakna imaju visoku tlačnu i vlačnu čvrstoću. Na taj se način dobiva kompozit veće čvrstoće i žilavosti, a niske gustoće. Glavni nedostatak ovakvog hibridnog kompozita je njegova visoka cijena. Slika 12. prikazuje hibrid ugljik/aramid.

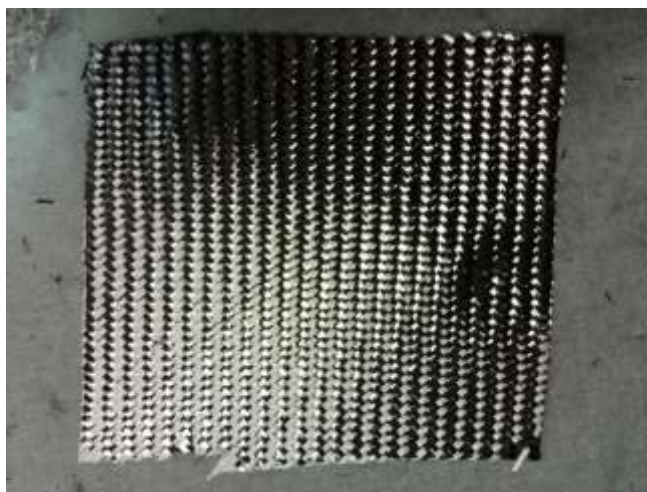


Slika 12. Hibrid ugljik/aramid

Hibrid ugljik/aramid puno se koristi pri proizvodnji oplata natjecateljskih motocikala. Takav hibrid koristi se za izradu onih dijelova kod kojih postoji opasnost da se prilikom udara raspadnu, pa se zbog prisutnosti aramidnih vlakana dijelovi ne razdvoje u potpunosti.

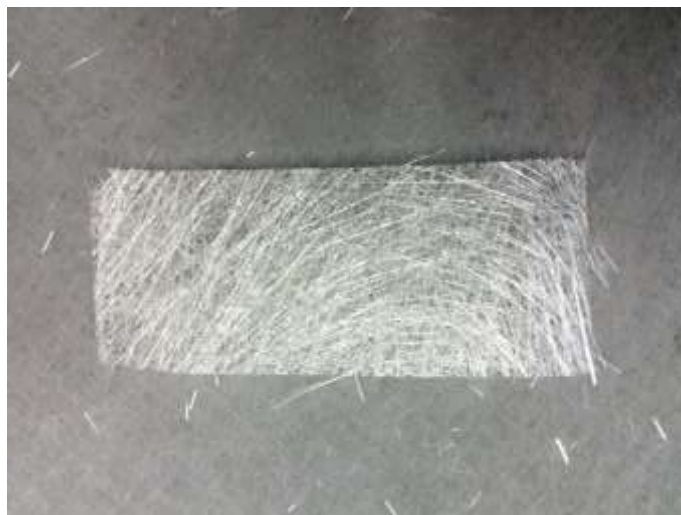
Vlakna za izradu kompozitnih dijelova oplata najčešće se koriste u obliku različitih tkanina, rovinga i mata. Tkanine se dobivaju tkanjem kontinuiranih staklenih, ugljičnih, aramidnih vlakana ili njihovom kombinacijom u svrhu dobivanja jednoslojnih ili višeslojnih tkanina. Mehanička svojstva kompozitnih dijelova možemo znatno poboljšati različitim načinima polaganja tkanina i vrstom tkanja. Pod tkanjem se podrazumijeva način prepletanja vlakana.

Roving je jednostavna ukrižena tkanina koja se sastoji od isprepletenih kontinuiranih vlakana. Ako su vlakna mrežasto postavljena u dva međusobno okomita smjera, tada ojačavaju konstrukciju u oba smjera, a novostvoreni kompozit ima ortotropna mehanička svojstva i zato su takva ojačanja osobito korisna ako ne znamo točan smjer djelovanja najvećega opterećenja [16]. Takav oblik tkanine olakšava i rukovanje jer se prilikom izrade vlakna drže zajedno i lako se mogu prilagoditi obliku kalupa. U obliku rovinga najviše se koriste ugljična i aramidna vlakna. Slika 13. prikazuje ugljična vlakna u obliku rovinga.



Slika 13. Ugljična vlakna u obliku rovinga

Ojačavanje vlaknima uporabom neprekinutih vlakana u nasumičnom rasporedu naziva se mat, a ojačavanja s nasumično usmjerenim kratkim vlaknima naziva se nasjeckani mat. Ta ojačavanja daju ista mehanička svojstva u svim smjerovima, tj. izotropna mehanička svojstva vlaknima ojačanim kompozitima [16]. Vlakna su povezana posebnim ljepilom otopljenim u matrici. Staklena vlakna najčešće se koriste upravo u obliku mata – slika 14.

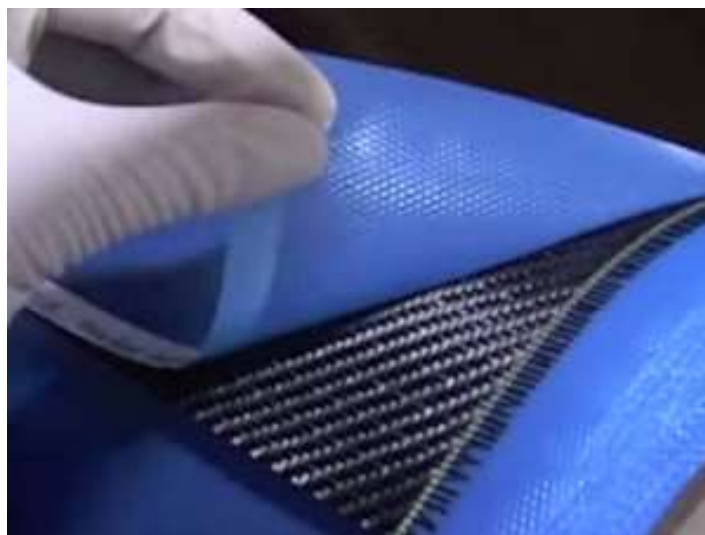


Slika 14. Staklena vlakna u obliku mata

Za izradu složenih oblika dijelova oplate koriste se tkanine različitih debljina. Svaka se tkanina razlikuje po gramaži, odnosno gustoći i količini pojedinih vlakana. Ako se dijelovi proizvode od više slojeva tkanina, prvi sloj je uvijek najtanji jer se može najbolje oblikovati i prilagoditi kalupu.

Posebno kontinuirano vlaknasto ojačalo koje se koristi za izradu dijelova procesom oblikovanja u autoklavu naziva se prepreg. Prepreg je tkanina impregnirana s djelomično otvrdnutom polimernom smolom. Prilikom natapanja slojeva tkanine ne smije doći do polimerizacije matrice. S obzirom da smola nije u potpuno krutom stanju prepreg je na dodir malo ljepljiv. Posebna pažnja posvećuje se skladištenju budući da smola otvrdnjava već pri sobnoj temperaturi, pa se prepreg čuva na temperaturi manjoj od 0 °C.

Za proizvodnju dijelova oplate motocikla najčešće se koriste preprezi od ugljičnih vlakana impregnirani epoksidnom smolom – slika 15.



Slika 15. Prepreg od ugljičnih vlakana [17]

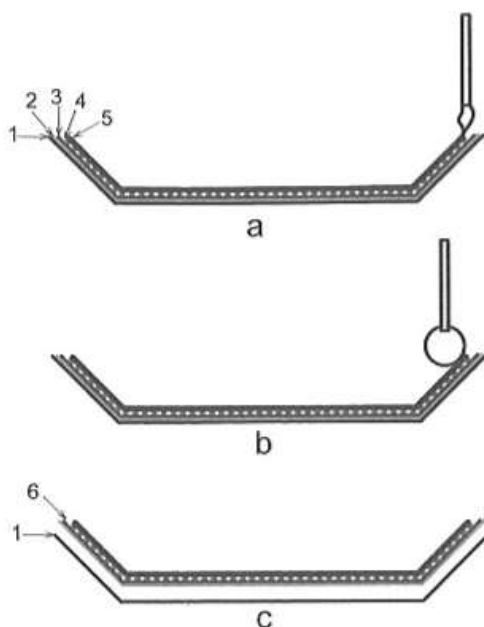
3.2. Tehnologije izrade polimernih kompozita za oplatu natjecateljskih motocikala

3.2.1. *Dodirni postupak laminiranja – ručno polaganje*

Dodirni postupak laminiranja je proizvodnja kompozitnih izradaka u otvorenim kalupima ručnim nanošenjem smole i vlakana. To je najstariji postupak, posebno prikladan za male proizvodne serije srednjih do vrlo velikih izradaka [11].

Postupak se može raščlaniti u pet faza: čišćenje, nanošenje gelne prevlake, nanošenje slojeva smole i vlakana, umreživanje i skidanje gotovog proizvoda s kalupa [3].

Kalupi se izrađuju od plastomernih kompozita ojačanim staklenim vlaknima. Njihova proizvodnja je jeftina te su pogodni za manje serije, ali se brzo troše. S obzirom da su dijelovi koji se proizvode složenih oblika, kalupi u kojima se izrađuju sastoje se od više dijelova. Ovisno o složenosti oblika proizvoda neki se kalupi spajaju na početku procesa, a neki tijekom izrade dijelova. Slika 16. prikazuje dodirni postupak laminiranja.



Slika 16. Dodirni postupak laminiranja: 1 – otvoreni kalup, 2 – odvajalo, 3 – gelna prevlaka, 4 – stakleno tkanje, 5 – hladno očvršćujuća smola, 6 – gotov proizvod; a – nanošenje odvajala, gelne prevlake, staklenog tkanja i smole, b – istiskivanje zraka između slojeva, c – odvajanje proizvoda od kalupa [18]

Priprema kalupa za proizvodnju započinje čišćenjem kalupne šupljine. Najprije se uklone ostaci smole i vlakana koji su ostali od prethodne izrade, a potom se nanosi vosak. Vosak štiti kalup od smole te služi za lakše odvajanje proizvoda od kalupa. Vrlo je bitno da se vosak nanese u što tanjem sloju i dobro ispolira.

Nakon toga se na kalup kistom nanosi gelna prevlaka. Ona je vanjski sloj proizvoda koji sadržava sve potrebne dodatke poput pigmenta, UV-stabilizatora i drugih, koji kroje željena svojstva površine proizvoda. Nanošenje prevlake vrlo je zahtjevan posao, koji traži iskustvo, znanje i koncentraciju izvođača. Prevlaka se mora u što kraćem roku nanijeti na kalup, ali pritom treba paziti da se nanosi u dovoljno debelom i ujednačenom sloju. Na slici 17. prikazana je nanesena gelna prevlaka na kalup stranice motocikla.



Slika 17. Gelna prevlaka na kalupu stranice motocikla

U proizvodnji se koriste staklena vlakna, ugljična vlakna te hibrid ugljik/aramid vlakna u obliku tkanine, mata ili rovinga. Proizvodi koji se izrađuju složenog su oblika pa kao takvi zahtijevaju puno truda i iskustva prilikom izrade krojeva po kojima će se izrađivati. Svaki proizvod ima po nekoliko krojeva, koji spojeni u jednu cjelinu daju izgled proizvoda kao da je izrađen od samo jednoga kroja. Kako ojačanja dolaze namotana na velikim rolama, u interesu je iskoristiti svaki dio tkanine pa treba pomno položiti sve krojeve da ostane što manje otpada. Bitno je još napomenuti da se roving tkanja režu pod 45 stupnjeva jer se tako olakšava njihovo ulaganje u kalup.

Nakon što se iskroje ojačanja i smoli doda umrežavalo i ubrzavalo proces ručnog polaganja može započeti. U kalup se polažu slojevi ojačanja i dobro se natapaju smolom. Smola se nanosi kistom, a svaki se sloj smole mora ručno razvaljati valjkom kako bi se smola što bolje impregnirala s vlaknima i kako bi se uklonio zrak zadržan između slojeva. Najviše se koriste poliesterske smole u kombinaciji sa staklenim ojačanjem (slika 18.) i epoksidne smole u kombinaciji s ugljičnim i ugljik/aramid ojačanjem (slika 19). Ugljična vlakna u rovingu više se drže zajedno i natopljena su epoksidnom smolom upravo koliko treba. Nema viška smole niti vlakana koja se izvlače iz tkanine te je tako omogućena lakša izrada proizvoda. Vlakna kod staklenog mata kraća su i usmjerena u više smjerova, te se lako odvajaju od tkanine i ostaju na kistu.



Slika 18. Proizvodnja kućišta od staklenog ojačanja i epoksidne smole



Slika 19. Proizvodnja sjedišta motocikla od ugljičnog ojačanja i epoksidne smole

Na nekim proizvodima završni sloj čini odvojiva tkanina, koja se na kraju proizvodnje skida. Jedan takav proizvod je sjedište za motocikle, gdje se uporabom odvojive tkanine postiže potrebna hrapavost površine za bolje prianjanje ljepljivosti i spužve.

Kalup se zatim odnosi u peć gdje se odvija umrežavanje na određenoj temperaturi. Vrijeme boravka kalupa u peći ovisi o veličini izratka.

Nakon vađenja gotovog izratka potrebno je napraviti završnu obradu proizvoda. Rezanjem se odstranjuje srh, a brušenjem se postiže fini glatki rub kako se korisnici ne bi ozlijedili prilikom korištenja proizvoda.

Dodirni postupak laminiranja je vrlo jednostavan postupak proizvodnje kompozitnih materijala. Njime možemo proizvoditi komplicirane oblike velikih dimenzija pomoću različitih materijala matrice i ojačanja, te tako postići izvrsna mehanička svojstva. Nedostatak postupka je dugotrajnost, male serije, gruba površina te veliki utjecaj vještine radnika na kvalitetu proizvoda.

3.2.2. Oblikovanje u autoklavu

Oblikovanje u autoklavu je proces tlačne proizvodnja dijelova pod tlakom i povišenom temperaturom. Plinovi kao što su dušik, ugljični monoksid ili njihove smjese sa zrakom u autoklavu se nalaze pod tlakom od maksimalno 15 MPa. Autoklavne komore se griju plinom ili električno do temperature maksimalno 700 °C [3]. Na slici 20. prikazan je uređaj autoklav.

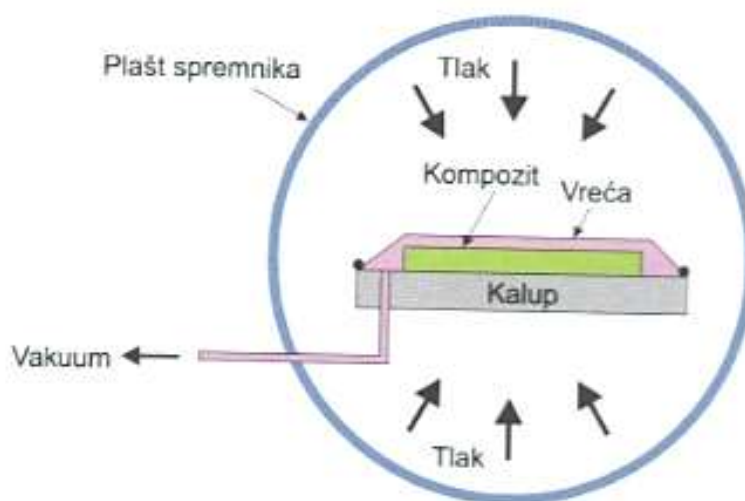


Slika 20. Stroj autoklav [19]

Kalupi za proizvodnju u autoklavu napravljeni su najčešće od aluminija kako bi izdržali radne uvjete, visoku temperaturu i tlak. Proces započinje premazivanjem kalupa odvajalom koje štiti kalup i omogućuje vađenje proizvoda iz kalupa. Potom se u kalup polažu posebne tkanine u obliku preprega. Proizvod se izrađuje od nekoliko slojeva preprega ovisno o željenim svojstvima i kompliciranosti oblika. Prepreg se reže po krojevima kako bi gotovi proizvod

izgledao kao da je napravljen od jednog komada tkanine. Nakon što su slojevi preprega položeni u kalup, slijedi njegovo stavljanje u vakuumske vreće kako bi se uklonio zrak zadržan između slojeva. Prije vakuumske vreće stavlja se posebna tkanina čija je uloga upijanje viška smole. Tako pripremljen kalup stavlja se u autoklav.

Preprezi umrežuju pri povišenom tlaku i temperaturi što omogućuje odgovarajuće istiskivanje viška smole iz slojeva i kraće vrijeme umrežavanja. Cijeli proces očvršćivanja traje oko 6 sati s time da se u prvom satu pri temperaturi od oko 125 °C i pod tlakom istiskuje smola, a zatim slijedi umreživanje pri oko 175 °C. Računalnim upravljanjem parametara mogu se postići željeni ciklusi umreživanja [3]. Slika 21. prikazuje shematski prikaz umreživanja u autoklavu.



Slika 21. Shematski prikaz umreživanja u autoklavu [3]

Proces završava vađenjem proizvoda iz autoklava i vakuumske vreće, te potrebnom završnom obradom. Slika 22. prikazuje blatobran motocikla napravljen od ugljičnog preprega.



Slika 22. Blatobran motocikla od ugljičnog preprega [20]

Ovim postupkom autoklavnog oblikovanja postiže se visoka kvaliteta i točnost dimenzija kompozitnih proizvoda. Vlakna su u potpunosti natopljena te nema praznina u proizvodu zbog uklonjenog zraka pomoću vakuuma. Upravo zbog toga moguće je postići izvrsna mehanička svojstva, visoku specifičnu čvrstoću i specifičnu krutost, što je iznimno važno za dijelove oplata sportskih motocikala. Proizvodnja zahtjeva široko znanje o kompozitnim materijalima i o upravljanju autoklavom.

Nedostaci postupka su potreba za održavanjem stalnog tlaka i temperature, neprikladnost za serijsku proizvodnju, ograničene dimenzije proizvoda koje ovise o veličini komore autoklava, niska proizvodnost, te visoka cijena kalupa i preprega.

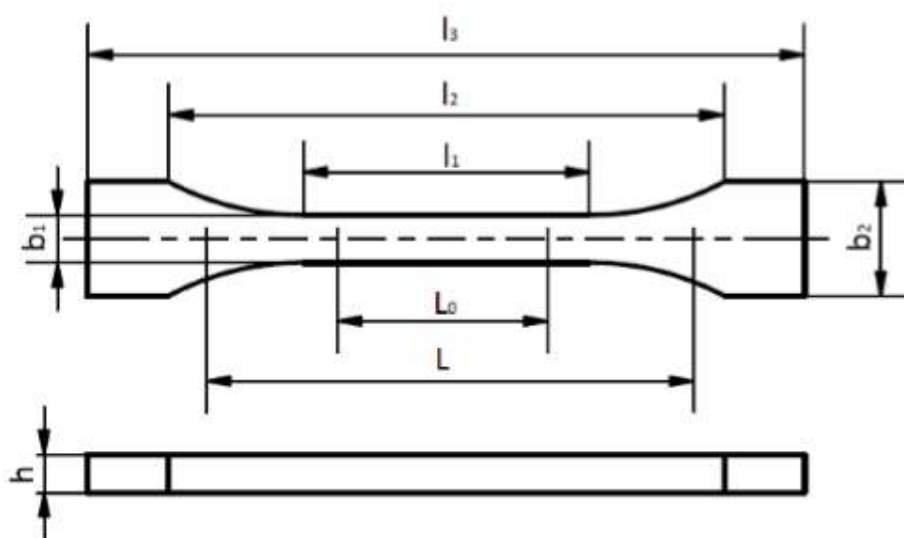
4. OPIS PREDVIĐENIH ISPITIVANJA

U realnim materijalima postoje unutarnje nepravilnosti poput raznih uključaka, dislokacija ili praznina koje znatno utječu na ponašanje materijala u eksploataciji. Stoga se mehanička svojstva materijala utvrđuju eksperimentalnim putem. Osnovna ispitivanja mehaničkih svojstva materijala koja se provode su ispitivanje vlačne čvrstoće, ispitivanje tlačne čvrstoće, ispitivanje savojne čvrstoće i ispitivanje tvrdoće. U ovom radu provedena su statičko-vlačna i savojna ispitivanja različitih kompozitnih materijala.

4.1. Opis statičko-vlačnog ispitivanja

Statičkim vlačnim ispitivanjem utvrđuje se elastično i plastično ponašanje materijala u uvjetima jednoosnog statičnog vlačnog naprezanja. Prirast sile pri statičkom vlačnom ispitivanju u jedinici vremena mora biti takav da prirast proizvedenog naprezanja bude do 10 N/mm^2 u sekundi. Za takvo sporo opterećivanje je najprikladniji hidraulični pogon kidalice. Tijekom ispitivanja se kontinuirano mjeri sila i produljenje epruvete te se grafički registrira dijagram sila – produljenje, te se kasnijim uvrštavanjem iznosa poprečnog presjeka epruvete generira dijagram naprezanje – istežanje, tj. " $\sigma - \epsilon$ " dijagram [21].

Ispitivanje vlačne čvrstoće polimernih kompozita provodi se prema normi ISO 527. Prvi dio norme, ISO 527-1:1996 propisuje opće principe, dok drugi dio ISO 527-2:1996 propisuje uvjete ispitivanja. Epruvete za ispitivanje dijele se na A – višenamjensko ispitivanje i B – strojna ispitna tijela. Dimenzije epruvete prikazane su na slici 23. i dane u tablici 1.



Slika 23. Izgled epruvete za statičko vlačno ispitivanje [22]

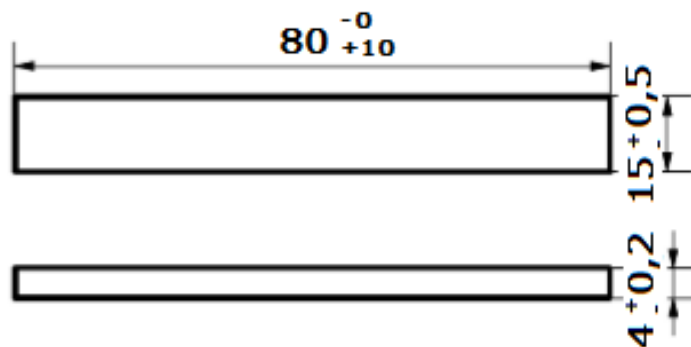
Tablica 1. Dimenzije epruvete za statičko vlačno ispitivanje [22]

Tip epruvete	Dimenzije (mm)	
	1A	1B
l_3 – ukupna duljina	≥ 150	
l_1 – duljina uskog paralelnog dijela	80 ± 2	$60 \pm 0,5$
r – polumjer	$20 \dots 25$	≥ 60
l_2 – udaljenost između proširenog paralelnog dijela	$104 \dots 113$	$106 \dots 120$
b_2 – širina pri kraju	$20 \pm 0,2$	
b_1 – širina uskog dijela	$10 \pm 0,2$	
h – debljina	$4 \pm 0,2$	
L_0 – početna mjerna duljina	$50 \pm 0,5$	
L – početna udaljenost između čeljusti	115 ± 1	$l_2 \pm 8$

4.2. Opis savojnog ispitivanja

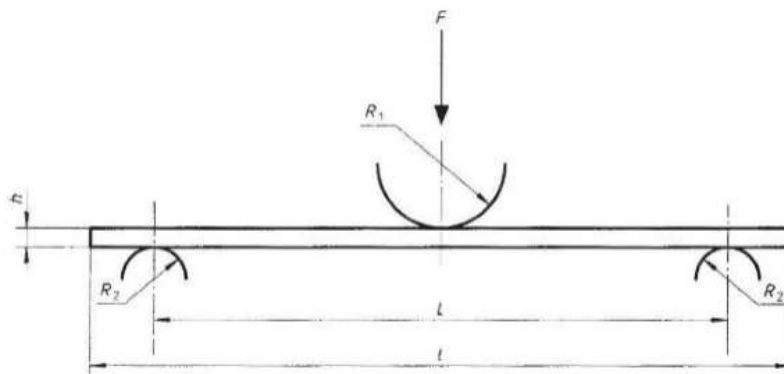
Savojno ispitivanje ili ispitivanje savojne čvrstoće polimernih kompozita provodi se na univerzalnoj kidalici prema normi ISO 14125. Epruvete se postavljaju na napravu za trotočkasto ispitivanje savojne čvrstoće te se povećava sila savijanja sve do pojave loma. Ispitivanjem se utvrđuje granično naprezanje pri kojem dolazi do loma ukoliko je materijal

opterećen na savijanje. Tijekom ispitivanja kontinuirano se mjeri sila i progib epruvete. Dimenzije epruveta propisuje norma i prikazane su na slici 24.



Slika 24. Epruveta za ispitivanje savojne čvrstoće

Na slici 25. prikazana je shema ispitivanja savojne čvrstoće.



Slika 25. Shema ispitivanja savojne čvrstoće [23]

4.3. Statistička obrada rezultata mjerenja

Na rezultatima ispitivanja mehaničkih svojstava vlaknima ojačanih polimernih kompozita određena je nepristrana procjena parametara osnovnog skupa na temelju teorije uzoraka. Korištena je Studentova t – razdioba s parametrom $k = n - 1$ za intervalnu procjenu očekivanja osnovnog skupa iz kojeg potječe uzorak zbog toga što se radi s malim brojem podataka ($n \leq 30$) mjerenja [24]. Intervalna procjena mehaničkih svojstava kompozitnih materijala uz interval vjerodostojnosti $1 - \alpha = 0,95$ izračunata je prema izrazu (1):

$$\bar{x} - t_{\left(k; \frac{\alpha}{2}\right)} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + t_{\left(k; 1 - \frac{\alpha}{2}\right)} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

gdje su:

\bar{x} – aritmetička sredina uzorka

t – varijabla Studentove t – razdiobe

k – broj stupnjeva slobode uzorka od n podataka

n – veličina uzorka

α – stupanj značajnosti

s – nepristrana procjena standardne devijacije

μ – procijenjeno očekivanje osnovnog skupa

5. REZULTATI ISPITIVANJA MEHANIČKIH SVOJSTAVA VLAKNIMA OJAČANIH POLIMERNIH KOMPOZITA

5.1. Izrada kompozitnih materijala

U svrhu ispitivanja mehaničkih svojstava vlaknima ojačanih polimernih kompozita izrađena su dva različita kompozitna materijala. Korištene su različite smole matrice, debljine i vrste ojačanja. Kompozitni materijali izrađeni su tehnologijom dodirnog postupka laminiranja. Na slici 26. prikazana je pripremljena ploča na kojoj su se izrađivali kompozitni materijali.



Slika 26. Pripremljena ploča za izradu kompozitnih materijala

Prvi kompozitni materijala – kompozit A izrađen je od poliesterske smole ojačane staklenim vlaknima. Kompozit se sastoji od deset slojeva staklenog rovinga različitih debljina. Debljina prva dva sloja je 0,2 mm, druga dva sloja 0,4 mm, te debljina petog sloja iznosi 1,2 mm. Idući slojevi slažu se obrnutim redom tako da zadnji sloj ima debljinu 0,2 mm. Ukupna masa staklenog ojačanja iznosi 471 g, a masa poliesterske smole iznosi 310 g. Stoga izračunati maseni udio ojačala iznosi 60,3 %.

Drugi kompozitni materijal – kompozit B izrađen je od epoksidne smole ojačane staklenim i ugljičnim vlaknima. Prvi sloj kompozita izrađen je od staklenog rovinga debljine 0,2 mm, drugi sloj je također stakleni roving, ali debljine 0,4 mm. Treći sloj čine ugljična vlakna u obliku rovinga debljine 0,6 mm. Idući sloj izrađen je od staklenog rovinga debljine

0,4 mm. Peti središnji sloj čine ugljična vlakna u obliku rovinga debljine 0,6 mm. Ostali slojevi slažu se obrnutim redom. Ukupna masa ojačanja iznosi 450 g, a masa epoksidne smole iznosi 380 g. Stoga izračunati maseni udio ojačala iznosi 54,2 %. Slika 27. prikazuje slojeve staklenih i ugljičnih ojačanja koji su korišteni u izradi kompozitnih materijala.



Slika 27. Slojevi staklenih i ugljičnih ojačanja

Slika 28. prikazuje smolom natopljena staklena i ugljična ojačanja.



Slika 28. Smolom natopljena staklena i ugljična ojačanja

5.2. Oprema za ispitivanje

Za potrebe ispitivanja mehaničkih svojstava vlaknima ojačnih polimernih kompozita korištena je oprema u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu.

Statičko vlačno ispitivanje i ispitivanje savojne čvrstoće provedeno je na univerzalnoj kidalici (slika 29.) sljedećih karakteristika:

Proizvođač: WPM, Njemačka

Vrsta: EU 40 mod

Nazivna sila: 400 kN

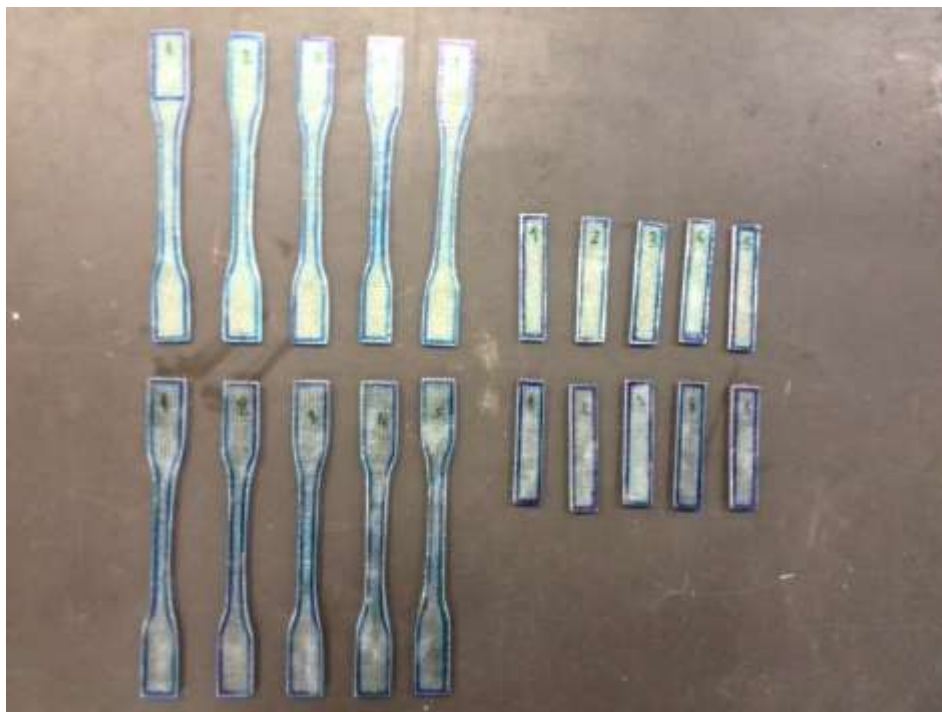
Razred točnosti: 1. klasa



Slika 29. Kidalica EU 40mod proizvođača WPM

5.3. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava

U svrhu ispitivanja mehaničkih svojstava vlaknima ojačanih polimernih kompozita pripremljene su epruvete za svako ispitivanje (slika 30.). Epruvete su izrezane prema važećim normama iz ploča debljina 4 mm.



Slika 30. Epruvete za ispitivanje mehaničkih svojstava

5.3.1. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja

Statičko vlačno ispitivanje provedeno je za svaki kompozitni materijal na 5 epruveta tipa 1A, prema normi ISO 527, čije su dimenzije ranije navedene u tablici 1. Brzina ispitivanja je bila 5 mm/min. Slika 31. prikazuje statičko vlačno ispitivanje.



Slika 31. Statičko vlačno ispitivanje

Dobiveni rezultati za kompozit A prikazani su u tablici 2., a dobiveni rezultati za kompozit B prikazani su u tablici 3.

Površina početnog presjeka epruvete iznosi:

$$A_0 = b_1 \cdot h, mm^2 \quad (2)$$

Vlačna čvrstoća jednaka je omjeru maksimalne sile F_{\max} i površine početnog presjeka A_0 :

$$R_{m,vl.} = \frac{F_{\max}}{A_0}, N / mm^2 \quad (3)$$

Tablica 2. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja kompozita A

Epruveta	Širina uskog dijela, b_1 [mm]	Debljina epruvete, h [mm]	Površina poprečnog presjeka, A_0 [mm ²]	Maksimalna sila, F_{\max} [kN]	Vlačna čvrstoća, $R_{m,vl.}$ [N/mm ²]
1	11,6	3,99	46,28	9,465	204,49
2	11,13	3,92	43,63	8,234	188,73
3	11,99	3,98	47,72	8,561	179,40
4	10,80	3,90	42,12	7,804	185,29
5	11,25	4,01	45,11	8,842	196,01
\bar{x}	11,35	3,96	44,97	8,58	190,78
$\sigma_{\bar{x}}$	0,46	0,05	2,19	0,63	9,74

Tablica 3. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja kompozita B

Epruveta	Širina uskog dijela, b_1 [mm]	Debljina epruvete, h [mm]	Površina poprečnog presjeka, A_0 [mm ²]	Maksimalna sila, F_{\max} [kN]	Vlačna čvrstoća, $R_{m,vl.}$ [N/mm ²]
1	11,23	5,01	56,26	9,848	175,04
2	11,03	4,89	53,94	11,092	205,66
3	11,12	5,02	55,82	11,685	209,32
4	12,10	4,83	58,44	10,670	182,56
5	11,28	4,78	53,92	11,991	222,40
\bar{x}	11,35	4,91	55,68	11,06	199,00
$\sigma_{\bar{x}}$	0,43	0,11	1,88	0,85	19,64

Za provedena ispitivanja određena je intervalna procjena vlačne čvrstoće kompozitnog materijala, $\mu_{Rm,vl.}$ uz interval vjerodostojnosti $1 - \alpha = 0,95$.

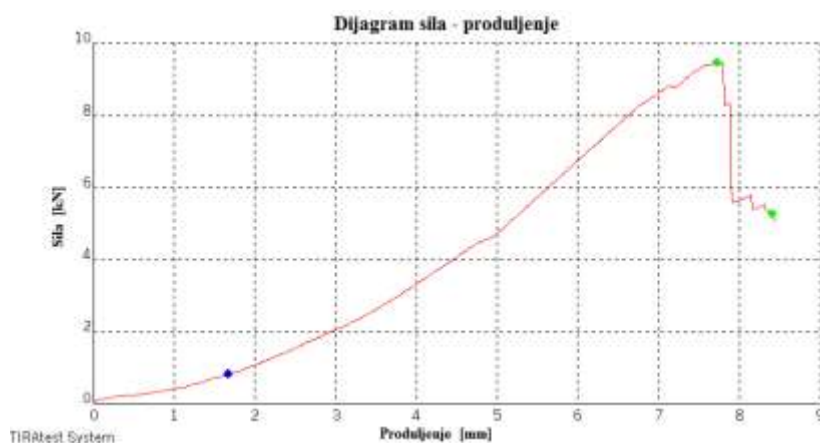
Za kompozit A iznos intervalne procjene vlačne čvrstoće kompozitnog materijala iznosi:

$$178,70 < \mu_{Rm,vl.,A} < 202,87 \text{ N/mm}^2 \quad (4)$$

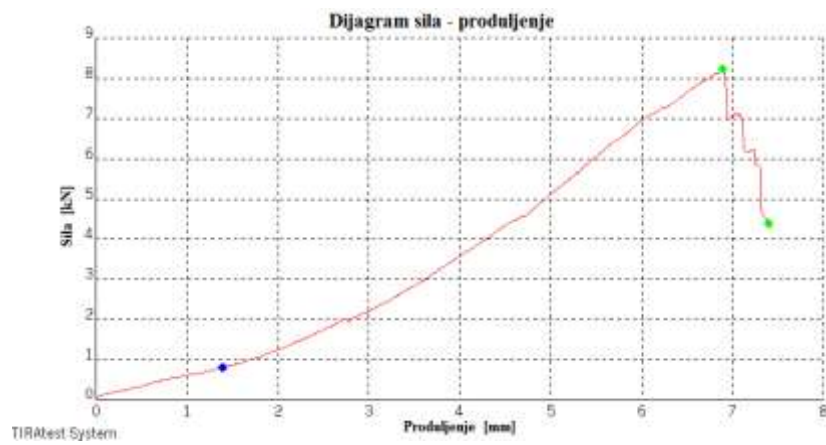
Za kompozit B iznos intervalne procjene vlačne čvrstoće kompozitnog materijala iznosi:

$$174,61 < \mu_{Rm,vl.,B} < 223,38 \text{ N/mm}^2 \quad (5)$$

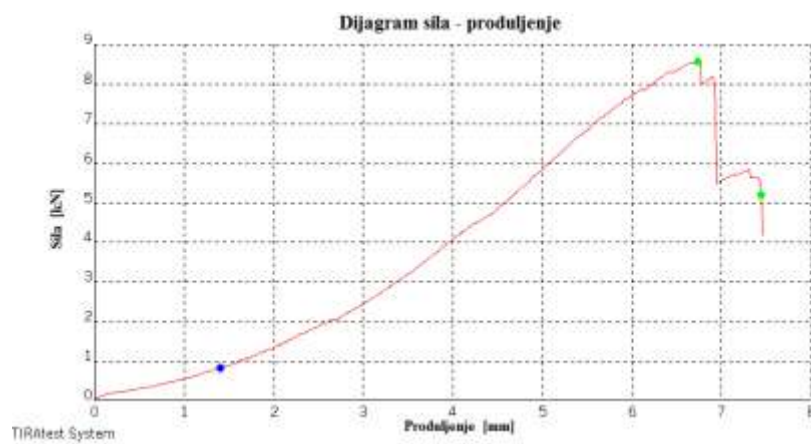
Za svaku ispitnu epruvetu izrađen je dijagram sila – produljenje koji je za kompozit A prikazan na slikama 32., 33., 34., 35. i 36., a za kompozit B na slikama 37., 38., 39., 40. i 41.



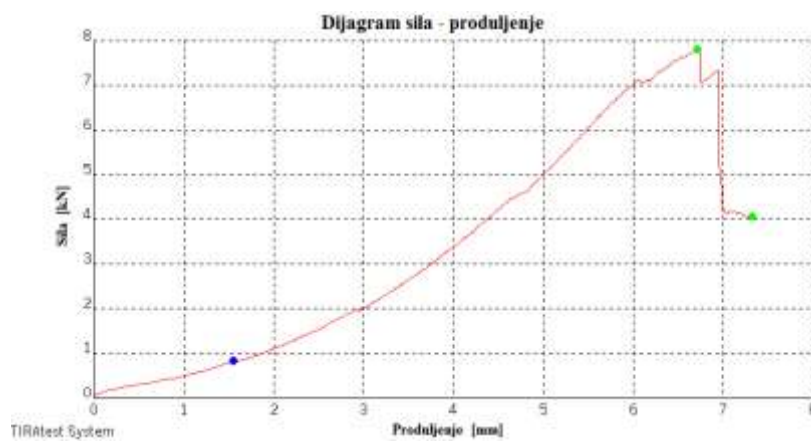
Slika 32. Dijagram sila - produljenje za kompozit A – epruveta 1



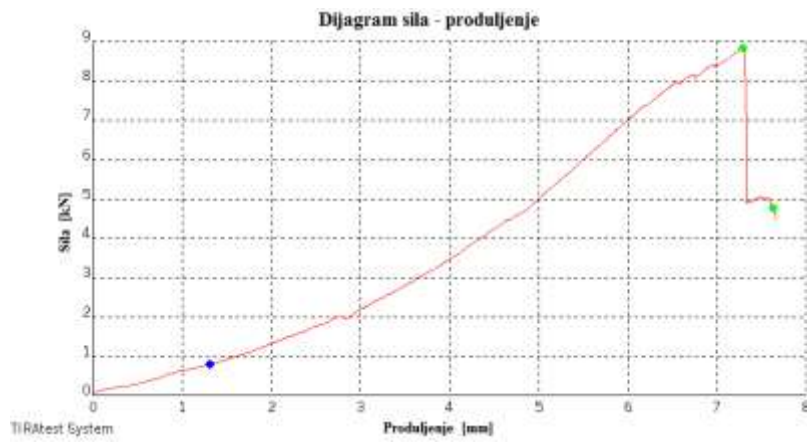
Slika 33. Dijagram sila - produljenje za kompozit A – epruveta 2



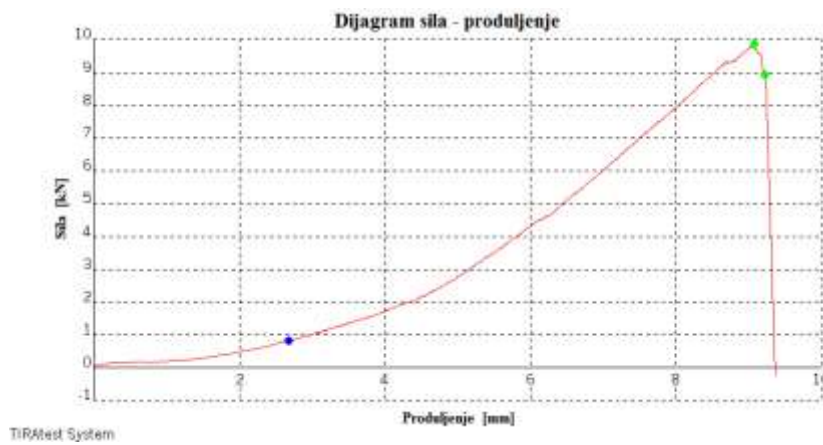
Slika 34. Dijagram sila - produljenje za kompozit A – epruveta 3



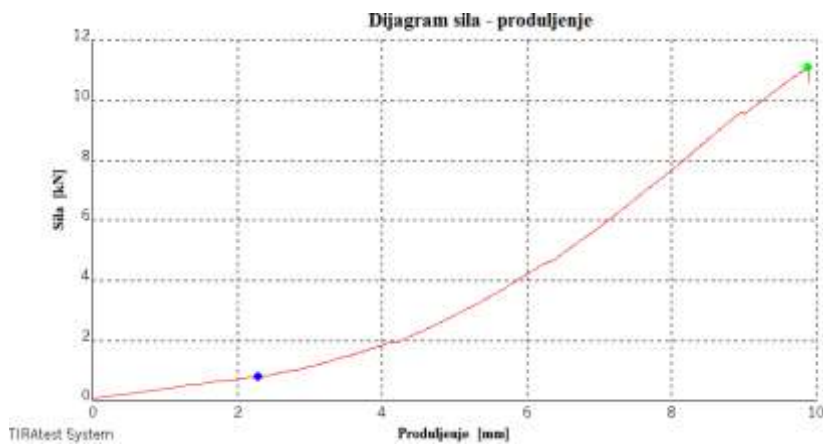
Slika 35. Dijagram sila - produljenje za kompozit A – epruveta 4



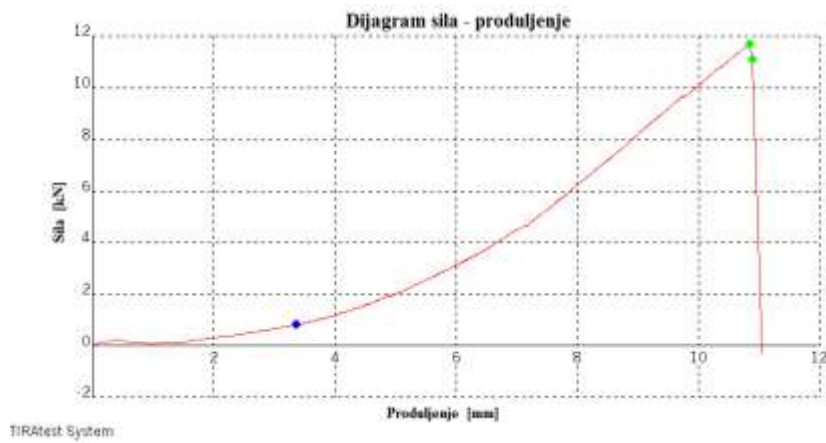
Slika 36. Dijagram sila - produljenje za kompozit A – epruveta 5



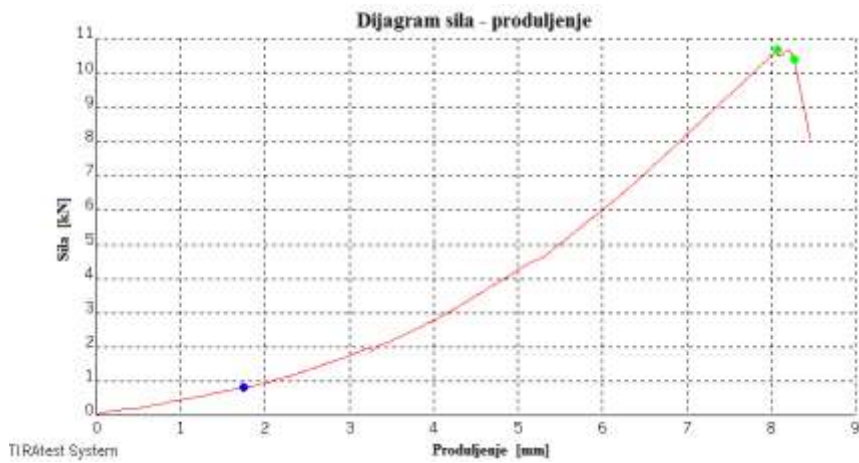
Slika 37. Dijagram sila - produljenje za kompozit B – epruveta 1



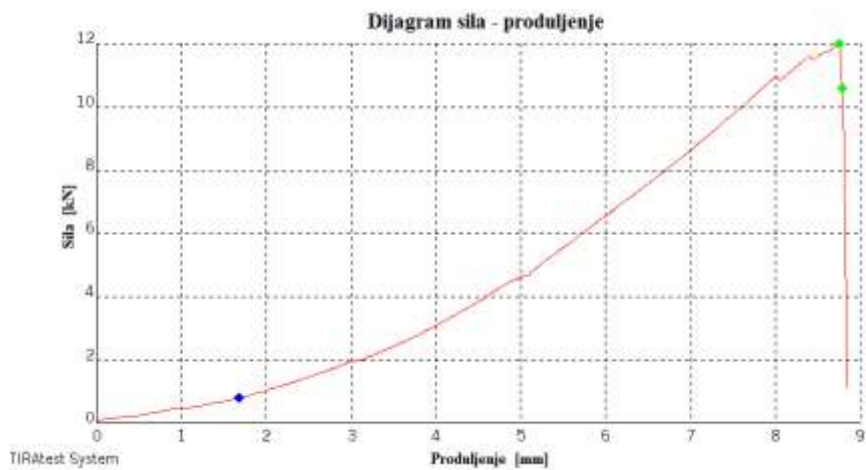
Slika 38. Dijagram sila - produljenje za kompozit B – epruveta 2



Slika 39. Dijagram sila - produljenje za kompozit B – epruveta 3



Slika 40. Dijagram sila - produljenje za kompozit B – epruveta 4



Slika 41. Dijagram sila - produljenje za kompozit B – epruveta 5

5.3.2. Rezultati savojnog ispitivanja

Savojno ispitivanje provedeno je za svaki kompozitni materijal na 5 epruveta, prema normi ISO 14125, čije su dimenzije ranije prikazane na slici 24. Brzina ispitivanja je bila 3 mm/min. Slika 42. prikazuje ispitivanje savojne čvrstoće.



Slika 42. Ispitivanje savojne čvrstoće

Dobiveni rezultati za kompozit A prikazani su u tablici 4., a dobiveni rezultati za kompozit B prikazani su u tablici 5.

Za vrijednost savojne čvrstoće $R_{m,s}$ vrijedi izraz:

$$R_{m,s} = \frac{3 \cdot F_{\max} \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}, N / mm^2 \quad (6)$$

gdje su:

F_{\max} - maksimalna sila,

L - razmak između oslonaca,

b - širina epruvete,

h - debljina epruvete.

Tablica 4. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće kompozita A

Epruveta	Širina epruvete, b [mm]	Debljina epruvete, h [mm]	Razmak između oslonaca, L [mm]	Maksimalna sila, F_{\max} [kN]	Savojna čvrstoća, $R_{m,s}$ [N/mm ²]
1	16,58	4,18	64	0,61	202,15
2	17,79	4,18	64	0,84	259,43
3	17,40	4,30	64	0,82	244,68
4	16,34	4,05	64	0,79	282,97
5	15,85	3,99	64	0,73	277,73
\bar{x}	16,79	4,14	64	0,76	253,39
$\sigma_{\bar{x}}$	0,79	0,12	0,0	0,09	32,42

Tablica 5. Rezultati ispitivanja savojne čvrstoće kompozita B

Epruveta	Širina epruvete, b [mm]	Debljina epruvete, h [mm]	Razmak između oslonca, L [mm]	Maksimalna sila, F_{\max} [kN]	Savojna čvrstoća, $R_{m,s}$ [N/mm ²]
1	17,93	4,75	64	1,162	275,75
2	18,01	4,90	64	1,248	277,06
3	19,23	4,70	64	1,267	286,33
4	17,88	4,91	64	1,160	258,34
5	17,76	4,68	64	1,137	280,61
\bar{x}	18,16	4,79	64	1,19	275,62
$\sigma_{\bar{x}}$	0,60	0,11	0,0	0,06	10,49

Za provedena ispitivanja određena je intervalna procjena savojne čvrstoće kompozitnog materijala, $\mu_{Rm,s}$ uz interval vjerodostojnosti $1 - \alpha = 0,95$.

Za kompozit A iznos intervalne procjene savojne čvrstoće kompozitnog materijala iznosi:

$$213,13 < \mu_{Rm,s,A} < 293,65 \text{ N/mm}^2 \quad (7)$$

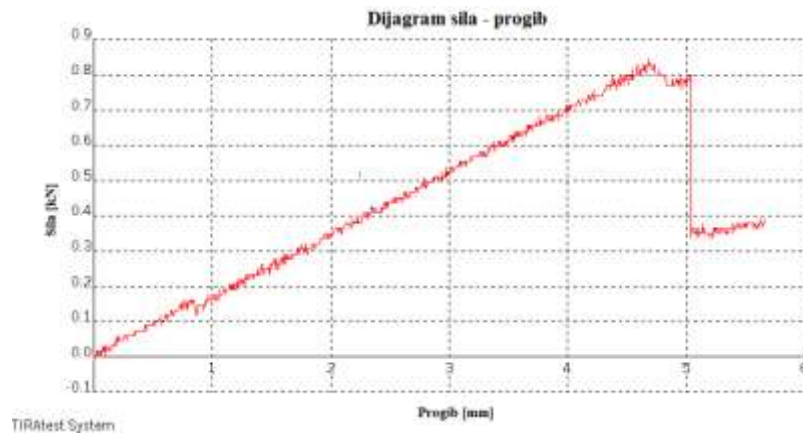
Za kompozit B iznos intervalne procjene savojne čvrstoće kompozitnog materijala iznosi:

$$262,60 < \mu_{Rm,s,B} < 288,64 \text{ N/mm}^2 \quad (8)$$

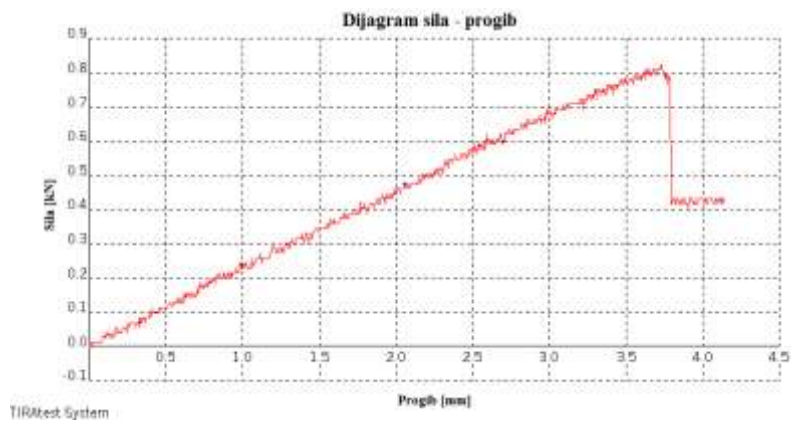
Za svaku ispitnu epruvetu izrađen je dijagram sila – progib koji je za kompozit A prikazan na slikama 43., 44., 45., 46. i 47., a za kompozit B na slikama 48., 49., 50., 51. i 52.



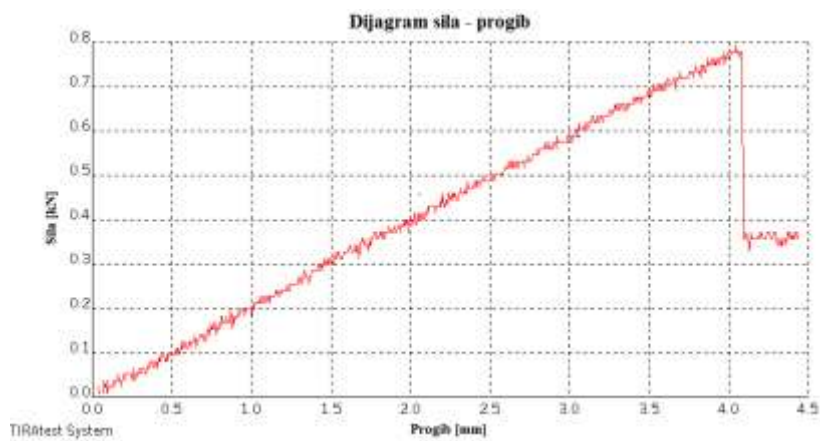
Slika 43. Dijagram sila – progib za kompozit A – epruveta 1



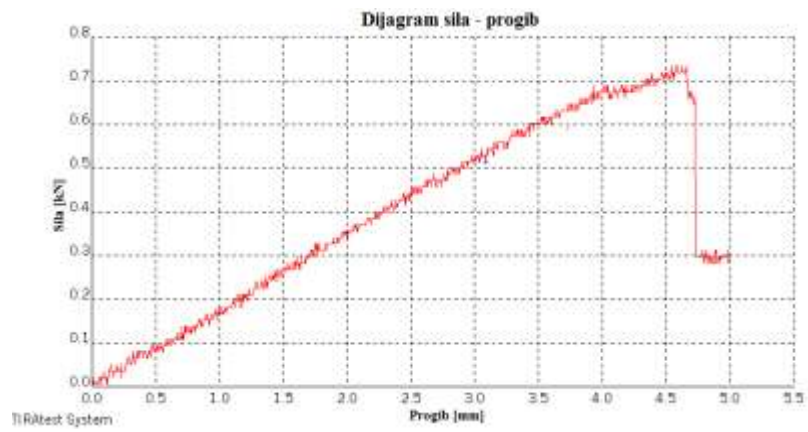
Slika 44. Dijagram sila – progib za kompozit A – epruveta 2



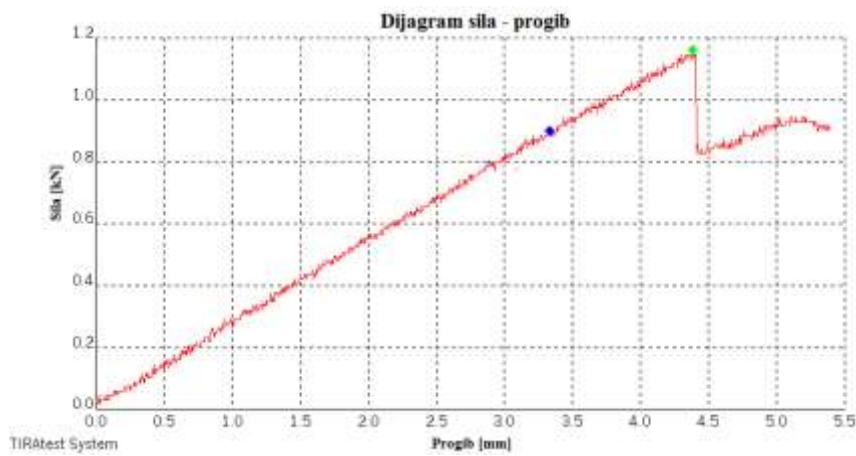
Slika 45. Dijagram sila – progib za kompozit A – epruveta 3



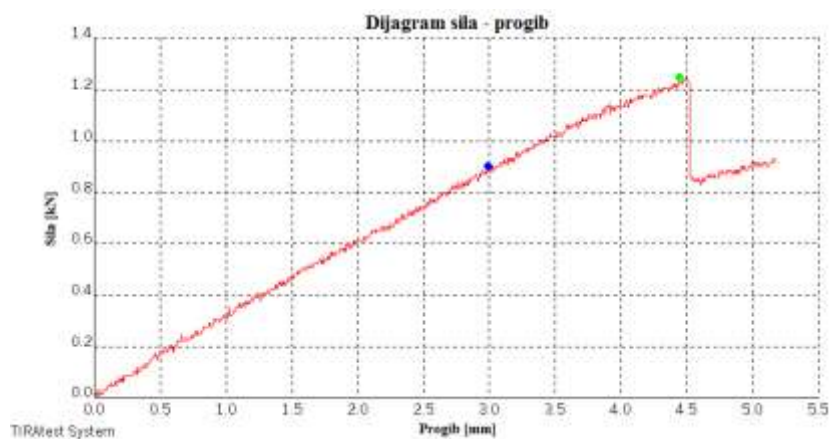
Slika 46. Dijagram sila – progib za kompozit A – epruveta 4



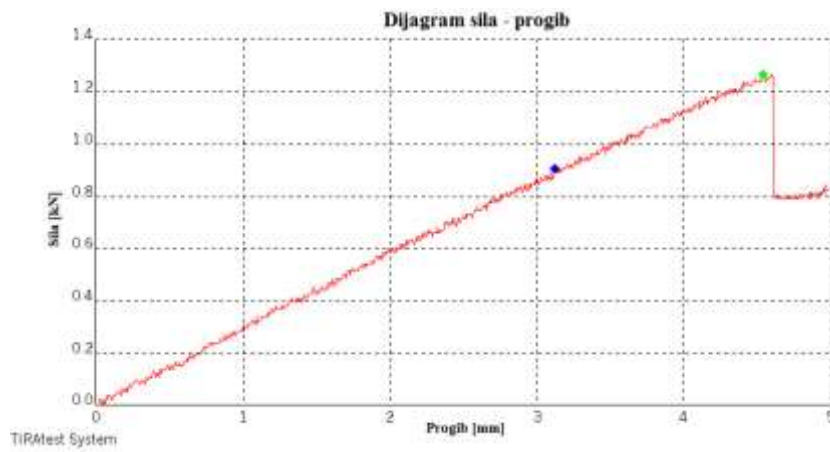
Slika 47. Dijagram sila – progib za kompozit A – epruveta 5



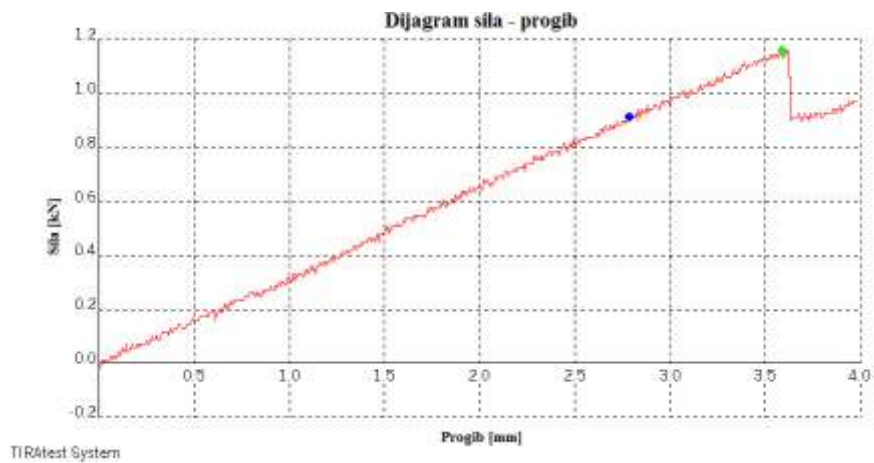
Slika 48. Dijagram sila – progib za kompozit B – epruveta 1



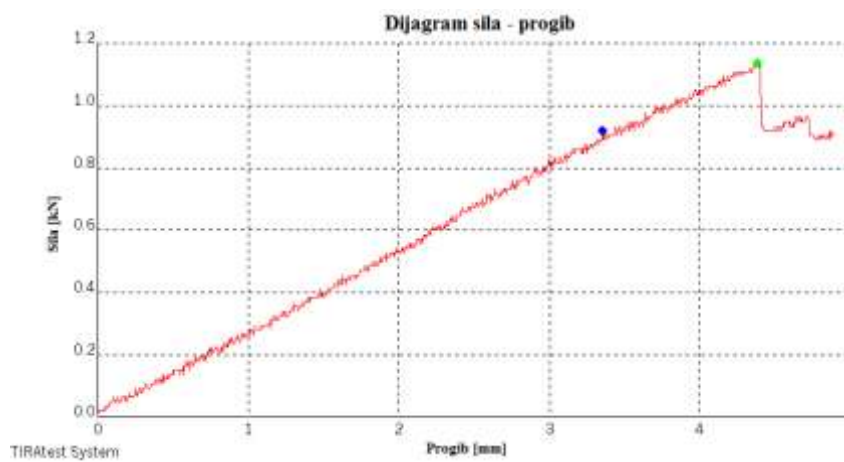
Slika 49. Dijagram sila – progib za kompozit B – epruveta 2



Slika 50. Dijagram sila – progib za kompozit B – epruveta 3



Slika 51. Dijagram sila – progib za kompozit B – epruveta 4



Slika 52. Dijagram sila – progib za kompozit B – epruveta 5

6. ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA

Nakon što su obavljena sva ispitivanja mehaničkih svojstava vlaknima ojačanih polimernih kompozita, dobiveni su rezultati sažeti u tablici 6.

Tablica 6. Svojstva kompozitnih materijala

Mehanička svojstva	Intervalna procjena, μ	Mjerna jedinica	Norma za ispitivanje
Vlačna čvrstoća, $R_{m,vl,A}$	$178,70 < \mu < 202,87$	N/mm ²	ISO 527
Vlačna čvrstoća, $R_{m,vl,B}$	$174,61 < \mu < 223,38$	N/mm ²	ISO 527
Savojna čvrstoća, $R_{m,s,A}$	$213,13 < \mu < 293,65$	N/mm ²	ISO 14125
Savojna čvrstoća, $R_{m,s,B}$	$262,60 < \mu < 288,64$	N/mm ²	ISO 14125

7. ZAKLJUČAK

Rezultati ispitivanja pokazali su da mehanička svojstva kompozitnog materijala ovise o vrsti ojačanja. Vlačna čvrstoća kompozita B veća je od vlačne čvrstoće kompozita A. Razlog tome su puno bolja mehanička svojstva ugljičnih vlakana od kojih su napravljeni neki od slojeva ojačanja kompozita B. S obzirom da je kompozit A ojačan samo staklenim vlaknima, koja imaju niže vrijednosti mehaničkih svojstava, ima nešto manju vrijednost vlačne čvrstoće u odnosu na kompozit B. Također, savojna čvrstoća kompozita B je veća od savojne čvrstoće kompozita A iz istih razloga.

Nakon ispitivanja vlačne čvrstoće kompozita A na prijelomnoj površini se može uočiti da sva staklena vlakna nisu dovoljno natopljena smolom. To nam ukazuje da svojstva kompozitnog materijala ovise i o tehnologiji izrade, odnosno o ljudskom faktoru. Kompozit A i kompozit B izrađeni su tehnologijom dodirnog postupka laminiranja, čiji je glavni nedostatak veliki utjecaj vještine radnika na kvalitetu proizvoda. To može loše utjecati na mehanička svojstva kompozitnog materijala, pa i čitave konstrukcije.

Razvoj polimernih kompozita svakim se danom sve više razvija i unapređuje, te se primjenjuje na različite grane industrije. Mogućnost izrade kompozitnih proizvoda točno određenih svojstava osigurava ovim materijalima sigurni napredak u budućnosti.

LITERATURA

- [1] Filetin T., Kovačiček F., Indof J.: Svojstva i primjena materijala, Zagreb 2011
- [2] Lončar A., Vojvodić D., Komar D.: Vlaknima ojačani polimeri - Prvi dio: Osnove i problematika izgradnje, Acta Stomatol Croat. 2006; 40: 72-82
- [3] Ćorić D., Filetin T.: Materijali u zrakoplovstvu, Zagreb 2012
- [4] Grupa autora: Materijali u strojarstvu -Tendencije razvoja i primjene-, Osijek 1993
- [5] Wikipedia, "Motorcycle racing", 2016
https://en.wikipedia.org/wiki/Motorcycle_racing zadnje posjećeno 6.2.2016.
- [6] Savage G. M., Metals and materials 7,10 617 (1991)
- [7] Savage GM, Composite Materials Technology in Formula 1 Motor Racing, 2008
- [8] Mac-moto.com, "Aprilia RSV V4 2014 | www.mac-moto.com", 2016
http://www.mac-moto.com/?page_id=418 zadnje posjećeno 6.2.2016.
- [9] Team GMT94, 2016 <http://www.gmt94.com/moto.html> zadnje posjećeno 6.2.2016.
- [10] Raos P., Šercer M.: Teorijske osnove proizvodnje polimernih tvorevina, Slavonski Brod/Zagreb, 2010
- [11] Čatić I.: Proizvodnja polimernih tvorevina, Zagreb 2006
- [12] Kelteks.hr, "Kelteks proizvodnja - distribucija | Program distribucije | Kelteks d.o.o. Karlovac", 2016 http://www.kelteks.hr/sadrzaj_graditeljstvo.php?gs=32&s=30 zadnje posjećeno 6.2.2016.
- [13] Kompozit-kemija.hr, "Kompozit kemija – epoksid, karbonska vlakna, kompoziti – KARBON–KARBONSKA VLAKNA", 2016 <http://kompozit-kemija.hr/portfolio-posts/karbonska-vlakna> zadnje posjećeno 6.2.2016.
- [14] Magdalenić Bujanić J., Bujanić B.: Aramidna vlakna, Polimeri 32(2012) 3 - 4: 130 – 134
- [15] Dupont.com, "Kevlar® Fiber | DuPont | DuPont USA", 2016
<http://www.dupont.com/products-and-services/fabrics-fibers-nonwovens/fibers/brands/kevlar/products/dupont-kevlar-fiber.html> zadnje posjećeno 6.2.2016.
- [16] Lončar A., Vojvodić D., Jerolimov V., Komar D., Žabarović D.: Vlaknima ojačani polimeri - Drugi dio: Utjecaj na mehanička svojstva, Acta Stomatol Croat. 2008; 42(1): 49-63

- [17] Fibre Glast, "Learning Center - About Prepregs", 2016
http://www.fibreglast.com/product/about-prepregs/Learning_Center zadnje posjećeno 6.2.2016.
- [18] Rogić A., Čatić I., Godec D.: Polimeri i polimerne tvorevine, Zagreb 2008.
- [19] Maroso Srl, LinkedIn, 2016 <https://www.linkedin.com/company/maroso-srl> zadnje posjećeno 6.2.2016.
- [20] Oya-carbon.sale.qualitytoyschina.com, "Carbon Fiber Front Fender for Ducati, High-quality 3K Twill/Plain Prepreg Fabric - oya-carbon", 2016 <http://oya-carbon.sale.qualitytoyschina.com/pz5d13818-carbon-fiber-front-fender-for-ducati-high-quality-3k-twill-plain-prepreg-fabric.html> zadnje posjećeno 20.2.2016.
- [21] Franz M.: Mehanička svojstva materijala, Zagreb 2005.
- [22] Kupres K., Kompozitni materijali proizvedeni od otpadnog papira, diplomski rad, FSB, Zagreb, 2015.
- [23] Norma ISO 14125-1998
- [24] Inženjerska statistika: Osnove teorije uzoraka, 2011
https://www.fsb.unizg.hr/atlantis/upload/newsboard/30_05_2012_15718_Osnove_teorije_uzoraka_2011.pdf zadnje posjećeno 20.2.2016.

PRILOZI

- I. CD-R disk
- II. Korištene norme
- III. Slike epruveta prije i nakon ispitivanja

II. Korištene norme

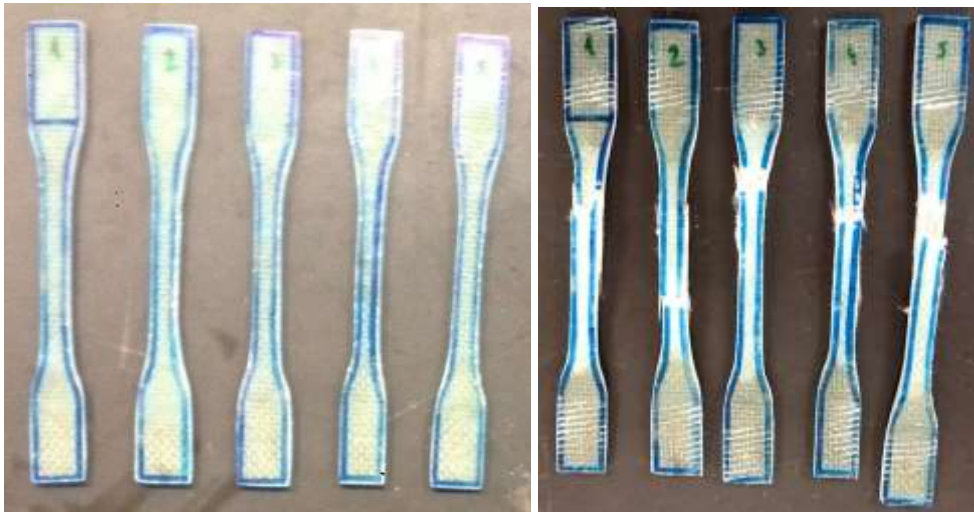
ISO 527 – ispitivanje vlačne čvrstoće polimera i polimernih kompozita

ISO 14125 – ispitivanje savojne čvrstoće polimera i polimernih kompozita

III. Slike epruveta prije i nakon ispitivanja

Statičko vlačno ispitivanje

Epruvete kompozita A prije i nakon ispitivanja:

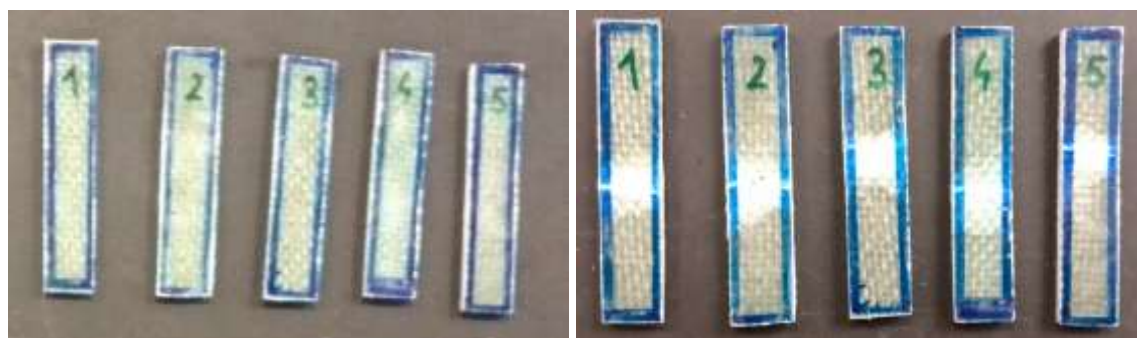


Epruvete kompozita B prije i nakon ispitivanja:



Svojno ispitivanje

Epruvete kompozita A prije i nakon ispitivanja:



Epruvete kompozita B prije i nakon ispitivanja:

