

# Prerada kompozitne šasije Formula student

---

Levatić, Matija

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:105965>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-19**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **Diplomski rad**

**Matija Levatić**

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# Diplomski rad

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Ana Pilipović

Student:

Matija Levatić

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se profesoricu Ani Pilipović na vodstvu i pomoći oko ostvarivanja ovog rada. Nadalje, zahvaljujem se FSB Racing Teamu koji mi je ovo sve omogućio, ekipi iz šasije što su mi uljepšavali dane, a najviše svojoj obitelji koja me tokom cijelog studija podržavala i bodrila.

Matija Levatić



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:	602-14/22-6/1
Ur. broj:	15-1703-22-

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MATIJA LEVATIĆ**

Mat. br.: 9996001881

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Prerada kompozitne šasije Formule student**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Processing of composite chassis of Formula student**

Opis zadatka:

Formula student je međunarodno studentsko natjecanje koje ima za glavni cilj kroz razvoj i proizvodnju trkaćeg bolidi jednosjeda i sudjelovanje na natjecanjima omogućiti studentima da steknu što više znanja i iskustva u cijelom procesu životnog vijeka nekog proizvoda kako bi im to iskustvo nakon završetka studija pomoglo u svakodnevnom radu.

Vozilo Formule student sastoji se od pogonskog sklopa, šasije i karoserije. U zadnje vrijeme cijela konstrukcija šasije izrađuje se od kompozitnih polimernih materijala, najčešće duromerima ojačanih s ugljičnim vlaknima.

U teorijskom dijelu radu je potrebno objasniti pravila vezana uz natjecanje Formule student, opisati materijale koji se primjenjuju za izradu šasije (kompozitni polimerni materijali, sendvič konstrukcije) te opisati postupak izrade. Posebnu pažnju potrebno je posvetiti umetcima koji služe za prijenos sila kroz sendvič konstrukcije na šasiju. U eksperimentalnom dijelu radu potrebno je kroz cijeli tok izrade šasije opisati primjenjene materijale, postupak izrade kalupa i same prerade te navesti prednosti i nedostatke izabranoga.

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

Zadatak zadan:  
5. svibnja 2022.

Rok predaje rada:  
7. srpnja 2022.

Predvideni datum obrane:  
18. srpnja do 22. srpnja 2022.

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

Predsjednica Povjerenstva:  
*Diserka Runje*  
prof. dr. sc. Diserka Runje

## SADRŽAJ

1.	UVOD .....	1
1.1	Formula student .....	1
1.2	Šasija bolida za natjecanje <i>Formula student</i> .....	2
1.3	Tipovi opterećenja na šasiji .....	5
1.3.1	Globalna opterećenja .....	5
1.3.2	Lokalna opterećenja .....	8
2	Opći zahtjevi kod konstrukcije šasije .....	12
2.1	Zahtjevi za dijelove primarne strukture .....	12
2.1.1	Minimalni zahtjevi materijala .....	16
2.2	Alternativni materijali .....	18
2.2.1	Ispitivanje laminata .....	19
2.3	Kokpit i vozač .....	20
3	Kompozitni materijali i kompozitne sendvič konstrukcije .....	23
3.1	Kompozitni materijali .....	23
3.2	Kompozitne sendvič konstrukcije .....	34
4	Postupci izrade kompozita ojačanih vlaknima .....	41
4.1	Mokro laminiranje .....	41
4.2	Podtlačno ulijevanje smole .....	42
4.3	Postupak podtlačnog oblikovanja vrećom u autoklavu .....	43
5	Umeci .....	46
5.1	Opterećenja umetaka .....	46
5.2	Podjela umetaka .....	48
5.2.1	Grupa A: Lijepljenje tijekom proizvodnje sendviča .....	49
5.2.2	Grupa B: Spajanje sa sendvič strukturom primjenom duromerne smole (potting i ekvivalentni postupci) .....	50

5.2.3	Gupa C: Mehaničko stezanje ili uvrtanje u postojeći sendvič .....	50
5.3	Metode spajanja umetka s jezgrom .....	51
5.3.1	Ubrizgavanje .....	52
5.4	Nosivost umetka .....	52
5.5	Parametri projektiranja umetka .....	53
6	Postupak prerade kompozitne monocoque šasije .....	55
6.1	Kalupi za proizvodnju kompozitnih dijelova .....	55
6.1.1	Odabir postupka izrade i materijala kalupa .....	58
6.1.2	Konstrukcija kalupa .....	59
6.2	Postupak prerade predoblika za proizvodnju negativnih kalupa .....	63
6.2.1	Priprema sirovca .....	64
6.2.2	Strojna obrada kalupa .....	68
6.2.3	Priprema predoblika za proizvodnju kalupa za postupak prerade negativnih kalupa 71	
6.2.4	Priprema površine predoblika za proizvodnju kalupa .....	73
6.3	Postupak prerade negativnih kalupa .....	81
6.4	Izrada <i>monocoque</i> šasije .....	96
6.4.1	Priprema redoslijeda slaganja i krojeva za izradu šasije .....	96
6.4.2	Izrada vanjske ljuske šasije .....	99
6.4.3	Postavljanje prednjeg obruča i umetaka .....	101
6.4.4	Postavljanje jezgre i spajanje jezgre i umetaka .....	102
6.4.5	Izrada unutarnje ljuske šasije i završetak postupka proizvodnje .....	106
7	Zaključak .....	107
8	Literatura .....	109

## POPIS SLIKA

Slika 1.1. Formula student Germany, 2013. [1] .....	1
Slika 1.2. Struktura tradicionalnog vozila [3] .....	2
Slika 1.3. Komponente modernog sustava šasije [3] .....	3
Slika 1.4. Funkcionalni model šasije [4] .....	4
Slika 1.5. Deformacija kod torzijskog opterećenja šasije [5].....	6
Slika 1.6. Deformacija kod vertikalnog savijanja šasije [5].....	6
Slika 1.7. Deformacija kod poprečnog savijanja [5] .....	7
Slika 1.8. Deformacija kod horizontalnog smicanja [5].....	7
Slika 1.9. Prikaz koordinatnog sustava vozila [6] .....	9
Slika 1.10. Primjer valjanja vozila [7].....	10
Slika 1.11. Centar valjanja i pripadajuće vrijednosti [8].....	10
Slika 2.1. Dijelovi primarne strukture šasije [4] .....	12
Slika 2.2. Triangulacija u čvorovima dijelova šasije (lijevo pravilno, desno pogrešno) [2].....	13
Slika 2.3. Zahtjevi za laminiranje prednjeg obruča u monocoque (lijevo pravilno, desno pogrešno) [2] .....	14
Slika 2.4. Zahtjevi za prihvate glavnog i prednjeg obruča te položaja volana [2] .....	14
Slika 2.5. Bočna udarna struktura [2].....	15
Slika 2.6. Bočna udarna zona kod kompozitne šasije [2].....	16
Slika 2.7. Površinski omotač [2] .....	16
Slika 2.8. Predložak za otvor kokpita (lijevo) i unutarnji presjek kokpita (desno) [2] .....	21
Slika 2.9. Smještaj šablone vozača [2] .....	22
Slika 3.1. Različite vrste tkanja [9] .....	30
Slika 3.2. Svojstva dvosmjernih i jednosmjernih tkanja [10] .....	31
Slika 3.3. Kvazi izotropni način polaganja materijala [10].....	31
Slika 3.4. Jednosmjerni materijali i tkanja [10] .....	32
Slika 3.5. Najčešća tkanja [10].....	33
Slika 3.6. Netkani materijali (prošiveni) [10] .....	34
Slika 3.7. Presjek sendvič konstrukcije [10] .....	35
Slika 3.8. Vrste jezgre: (a) šesterokutno saće, (b) zvonasta jezgra (flexicore), (c) previše proširena jezgra [10] .....	39
Slika 4.1. Mokro polaganje [9].....	42
Slika 4.2. Podtlačno ulijevanje [14] .....	43
Slika 4.3. Autoklav [15] .....	43



Slika 4.4. Postupak podtlačnog oblikovanja u autoklavu [16].....	44
Slika 5.1. Vrste opterećenja umetaka [18] .....	47
Slika 5.2. Standardni oblik umetka [18].....	50
Slika 5.3. Relevantne veličine kod proračuna nosivosti umetka [18] .....	53
Slika 5.4. Osnovni aspekti konstrukcije, analize i ispitivanja umetaka [18].....	54
Slika 6.1. Pozitivni (lijevo) i Negativni (desno) kalup [19] .....	56
Slika 6.2. Kutovi nagiba kalupa [19].....	57
Slika 6.3. Razdjelna linija kalupa [19] .....	57
Slika 6.4. Konstrukcija kalupa: razdjelne ravnine.....	59
Slika 6.5. Kutovi površine kalupa u odnosu na smjer vađenja gornjeg predoblika za proizvodnju kalupa .....	60
Slika 6.6. Kutovi površine kalupa u odnosu na smjer vađenja donjeg predoblika za proizvodnju kalupa .....	60
Slika 6.7. Konstrukcija donjeg kalupa .....	61
Slika 6.8. Ispitni uzorci nakon ispitivanja: a) vatrootporno adhezivno sredstvo, b) vodootporno adhezivno sredstvo, c) adhezivno sredstvo za drvo .....	62
Slika 6.9. Ispitak s vatrootpornim ljepilom .....	62
Slika 6.10. Ispitak s poliuretanskom pjenom kao ljepilom .....	63
Slika 6.11. Krojevi kalupa na primjeru donjeg kalupa.....	64
Slika 6.12. Obradni stroj za rezanje drva .....	65
Slika 6.13. Sirovci tijekom rezanja na stolu obradnog stroja.....	65
Slika 6.14. Premazivanje ploča smolom pomoću mazalice za ljepilo .....	66
Slika 6.15. Sirovci pod hidrauličnom prešom .....	67
Slika 6.16. Lijepljenje donjeg kalupa iz dva komada pomoću stega .....	68
Slika 6.17. Premazivanje dna kalupa epoksidnom smolom.....	69
Slika 6.18. Fina obrada kalupa na peteroosnom obradnom centru .....	70
Slika 6.19. Gornji i donji kalup nakon strojne obrade .....	70
Slika 6.20. Donji prednji poklopac s provrtima za pozicioniranje dijelova predoblika za izradu kalupa, provrtima za vijke i umetnutim zaticima za pozicioniranje .....	71
Slika 6.21. Montaža donjeg prednjeg poklopca: pozicioniranje poklopca zaticima (lijevo), stezanje vijaka (desno) .....	72
Slika 6.22. Namještanje gornje prirubnice u utor na kalupu .....	72
Slika 6.23. Površina donjeg kalupa nakon strojne obrade.....	73
Slika 6.24. Kalup nakon nanošenja auto kita .....	74

Slika 6.25 Kalup tijekom brušenja auto kita .....	74
Slika 6.26. Srh nastao tijekom strojne obrade kalupa .....	75
Slika 6.27. Uklanjanje srha i popravci polumjera na kalupu .....	75
Slika 6.28. Provjera ravnosti površina: primjer neravne površine .....	76
Slika 6.29. Pozicioniranje šablone za bušenje provrta .....	77
Slika 6.30. Nanošenje temeljnog premaza na površinu prednjeg kalupa.....	78
Slika 6.31, Površina predoblika za proizvodnju kalupa nakon brušenja temeljnog premaza .....	79
Slika 6.32. Kalup nakon završnog brušenja .....	79
Slika 6.33. Zatici umetnuti u predoblik za proizvodnju kalupa .....	81
Slika 6.34. Polaganje prvog sloja preprega na kalup .....	82
Slika 6.35. Poravnavanje krojeva preprega nakon polaganja.....	83
Slika 6.36. Postavljanje folije za odvajanje na poluproizvod .....	84
Slika 6.37. Postavljanje tkanine za upijanje viška smole u unutrašnjost kalupa.....	85
Slika 6.38. Kalup nakon postavljanja tkanine za upijanje viška smole.....	86
Slika 6.39. Vreća spremna za postavljanje.....	86
Slika 6.40. Zatvaranje vreće oko metalnog okvira.....	87
Slika 6.41. Smola u ventilu zbog pogrešne pozicije ventila na kalupu .....	88
Slika 6.42. Postupak izvlačenja zraka iz poluproizvoda .....	89
Slika 6.43. Polaganje niti na oštre bridove kalupa .....	90
Slika 6.44. Stavljanje proizvoda u autoklav .....	91
Slika 6.45. Skidanje potrošnih materijala s proizvoda nakon prerade .....	92
Slika 6.46. Naprava za vađenje zatika iz kalupa .....	93
Slika 6.47. Skidanje prednjeg poklopca s predoblika za proizvodnju kalupa.....	93
Slika 6.48. Odvajanje kalupa pomoću čekića .....	94
Slika 6.49. Odvajanje kalupa 2.....	94
Slika 6.50. Pozicioniranje kalupa .....	95
Slika 6.51. ispitivanje ispitnog tijela savijanjem u tri točke.....	96
Slika 6.52. Rezultati ispitivanja ispitnog tijela savijanjem u tri točke .....	97
Slika 6.53. Raspored redosljedna slaganja po površini šasije.....	97
Slika 6.54. Podešavanje vreće unutar kalupa kod spajanja polovica prve šasije .....	100
Slika 6.55. Površina proizvedena bez odvojive tkanine (gore) i s odvojivom tkaninom (dolje)	101
Slika 6.56. Izrada predložaka za rezanje saća .....	103
Slika 6.57. Saće postavljene na mjesto u polovicu kalupa.....	104
Slika 6.58. Postavljanje adhezivnog filma na vanjsku ljusku polovice šasije.....	104

---

Slika 6.59. Spajanje jezgre i umetaka nanošenjem paste medicinskom injekcijom kod izrade ispitnih tijela za smično i savojno ispitivanje.....	105
Slika 6.60. Šasija spremna za sklapanje bolida.....	106

## POPIS TABLICA

Tablica 2.1. Minimalni zahtjevi materijala [2].....	17
Tablica 3.1. Usporedba duromera i plastomera [10].....	25
Tablica 5.1. Sustav umetaka - definicija [18].....	46
Tablica 5.2. Doprinos dijelova sendvič strukture na nosivost umetka [18].....	47
Tablica 5.3. Tipovi umetaka [18] .....	48
Tablica 5.4. Metode spajanja umetka s jezgrom [18] .....	51
Tablica 6.1. Raspored slaganja preprega i saća po vanjskim površinama šasije prema slici 6.52 98	

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Mjerna jedinica</b>	<b>Opis oznake</b>
$EI$	N/m	Fleksijska krutost
$b_p$	m	Efektivni polumjer spajanja
$b_R$	m	Stvarni polumjer spajanja
$E$	Pa	Modul elastičnosti
EI	N/m	Fleksijska krutost
$h_p$	m	Visina spajanja
$R_e$	Pa	Granica tečenja
$R_m$	Pa	Vlačna čvrstoća

**POPIS KRATICA**

<b>Kratika</b>	<b>Opis</b>
Al	Aluminij
BMC	Vlaknasti prepreg (eng. <i>bulk moulding compound</i> )
CFRP	Polimer ojačan ugljičnim vlaknima (eng. <i>Carbon fibre reinforced polimer</i> )
FRP	Polimer ojačana vlaknima (eng. <i>fibre reinforced polimer</i> )
GMT	plastomer ojačan staklenim matom (eng. <i>glass mat thermoplastics</i> )
PMI	Polimetakrilamid
SAE	Udruženje američkih inženjera (eng. <i>Society of American engineers</i> )
SES	Tablica strukturalne ekvivalentnosti (eng. <i>structural equivalence spreadsheet</i> )
SMC	Osmoljeni list (eng. <i>sheet Moulding Compound</i> )
St	Čelik
Ti	Titan

## SAŽETAK

U teorijskom dijelu rada opisana su pravila natjecanja *Formula student* povezana s konstrukcijom i proizvodnjom šasije, dan je opis materijala koji se primjenjuju za izradu *monocoque* šasije, opisani su postupci izrade šasije te primjena umetaka u šasiji.

U eksperimentalnom dijelu rada opisan je cijeli proces izrade šasije i kalupa za šasiju, svi primijenjeni materijali te su navedeni prednosti i nedostaci primijenjenih postupaka i korištenih materijala.

Ključne riječi: *Formula student*, *monocoque* šasija, polimeri ojačani ugljičnim vlaknima, sendvič konstrukcije

**SUMMARY**

The theoretical part of the paper describes the rules of the Formula student competition related to the construction and production of the chassis, gives a description of the materials used to make a monocoque chassis, describes the procedures for making a chassis and the use of inserts in the chassis.

The experimental part of the paper describes the whole process of making the chassis and mold for the chassis, all applied materials and list of advantages and disadvantages of applied manufacturing processes and used materials.

Key words: Formula student, monocoque chassis, CFRP – carbon fibre reinforced polymer , sandwich structures



## 1. UVOD

### 1.1 Formula student

*Formula student* je internacionalno studentsko natjecanje koje se održava svake godine u državama diljem svijeta. Glavni cilj ovih natjecanja je kroz razvoj i proizvodnju trkaćeg bolida jednosjeda i sudjelovanje na natjecanjima omogućiti studentima da steknu što više znanja i iskustva u cijelom procesu životnog vijeka nekog proizvoda kako bi im to iskustvo nakon završetka studija pomoglo u svakodnevnom radu. U ovim se natjecanjima nastoji regulirati pravila na način da jedan tim može istim vozilom u jednoj godini sudjelovati na više natjecanja uz što manje promjena. [1]

Prva natjecanja započela su u Sjedinjenim američkim državama u organizaciji Društva automobilske inženjerstva (SAE) 1980. godine. Ovo natjecanje počelo se održavati u Europi, u Njemačkoj od 2005. godine (slika 1.1) i od tada se proširilo i na mnoge druge države diljem Europe. [2]



Slika 1.1. *Formula student* Germany, 2013. [1]

Svako natjecanje ima pravilnik, niz pravila čija svrha je osigurati sigurnost za sve sudionike natjecanja za vrijeme natjecanja i pridržavanje dobre inženjerske prakse. Samo natjecanje sastoji

se od dva dijela: statičkih i dinamičkih događaja. Statički događaji sastoje se od prezentacije poslovnog plana (eng. *business plan presentation*), prezentacije znanja s područja proizvodnih procesa i troškova proizvodnje (eng. *cost and manufacturing event*) te prezentacije samog koncepta vozila (eng. *engineering design event*). Dinamički događaji sastoje se od 4 discipline: skidpad, ubrzanje, autokros te izdržljivost i efikasnost. [2] Na svakom natjecanju prije sudjelovanja na dinamičkim događajima svako vozilo mora obavezno proći inspekcijski pregled propisan pravilnikom i inspekcijskim listama.

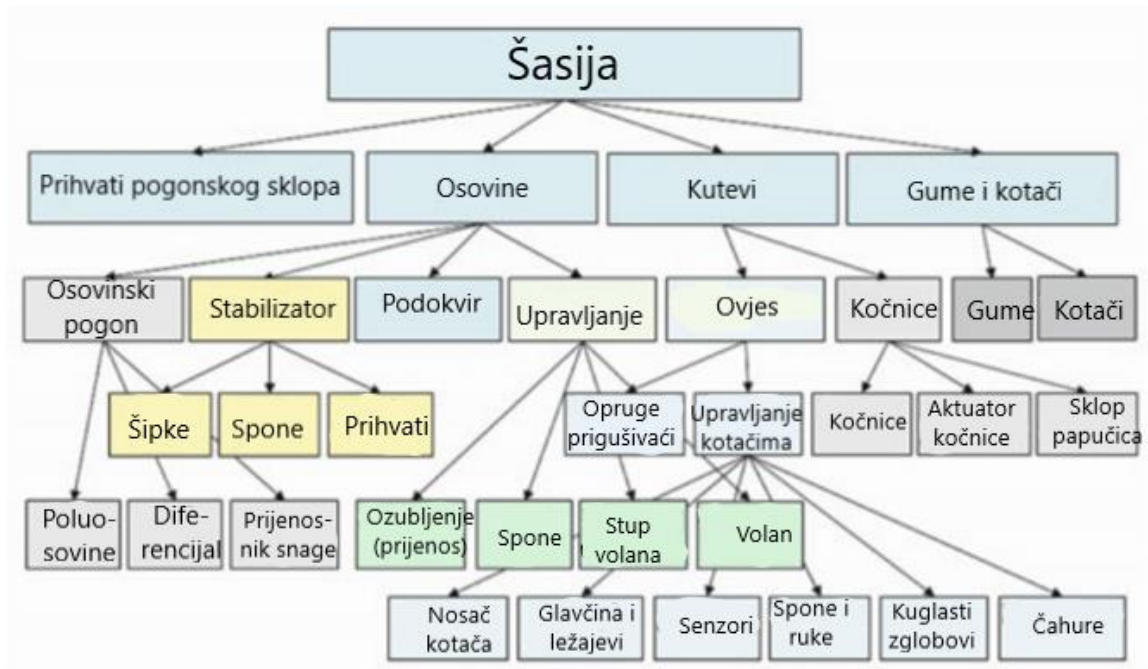
## 1.2 Šasija bolida za natjecanje *Formula student*

Vozilo se tradicionalno dijeli na tri osnovna sklopa, a to su pogonski sklop, šasija, ovjes i karoserija vozila. Pogonski sklop sadrži elemente koji pokreću vozilo, karoserija pruža prostor za ljude i teret, a šasija i ovjes omogućuju vožnju vozilom, okretanje i zaustavljanje. Suvremena vozila integriraju karoseriju i šasiju u strukturu poznatu kao unibody ili monocoque. [3] Rezultat ove integracije je da sve komponente potrebne za transport nisu uključene u šasiju. Neka sportska i terenska vozila i dalje se izrađuju na tradicionalan način u kojem je šasija u potpunosti odvojena i neovisna o karoseriji vozila. Struktura takvog tradicionalnog vozila prikazana je na slici 1.2. [3]



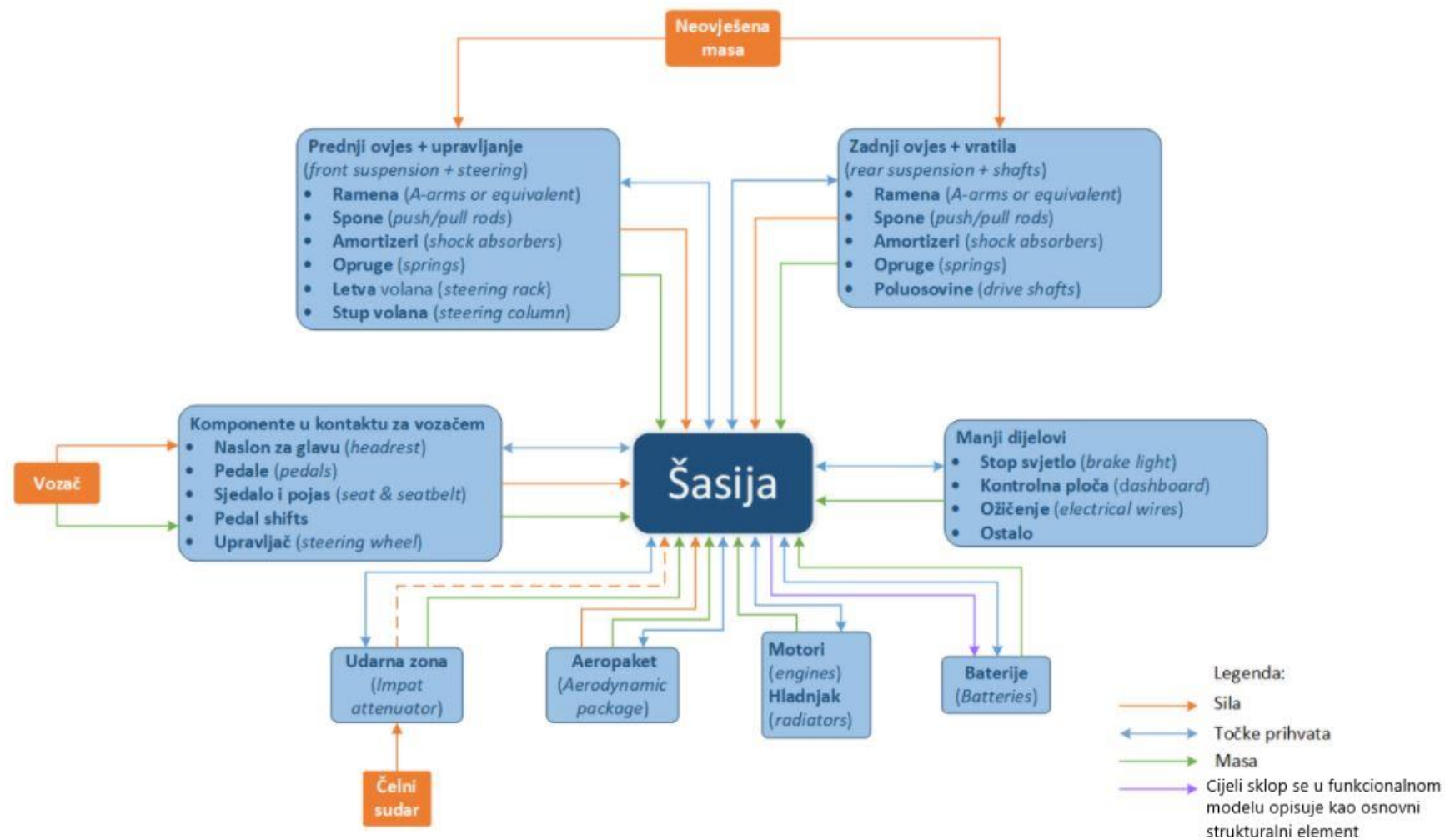
Slika 1.2. Struktura tradicionalnog vozila [3]

Godine 1906. Karl Blau je opisao šasiju na sljedeći način: „Šasija se sastoji od kotača vagona i visećeg čeličnog okvira, koji nosi motor i sav pribor neophodan za redovan rad.” [3], Uz karoseriju i pogonski sklop, šasija i ovjes glavne su komponente automobila i zajedno se sastoje od dijelova koji su nabrojani na slici 1.3 u nastavku. Ove komponente vozila predstavljaju približno 20 % ukupne težine i 15 % ukupnih troškova proizvodnje standardnog vozila srednje veličine. [3]



Slika 1.3. Komponente modernog sustava šasije [3]

Šasija je nosivi dio motornog vozila na koju se pričvršćuju svi ostali dijelovi vozila. Kako bi se što jasnije prikazala funkcija i povezanost cijele šasije s ostatkom bolida, dan je pregled u obliku funkcionalnog modela šasije (slika 1.4). Unutar funkcionalnog modela, dani su i engleski ekvivalenti pojmova. [4]



Slika 1.4. Funkcionalni model šasije [4]

### 1.3 Tipovi opterećenja na šasiji

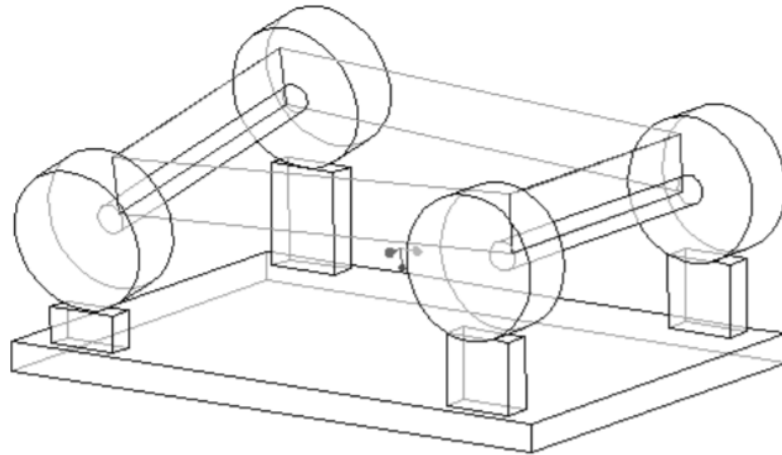
Šasija i ovjes djeluju kao sučelje između vozila i kolnika i omogućuju sve funkcije potrebne za upravljanje vozilom: primjenom zakretnog momenta na površinu ceste (svladavanje otpora kotrljanja, ubrzanje), kočenje, rad papučice kvačila i gasa, upravljanje, opruge i prigušivanje. Zato je pri konstruiranju šasije važno znati na koje sve sile je šasija opterećena, njihovu lokaciju, iznos, ponašanje i slično. [5] Također je bitno razlikovati te sile za različite tipove vožnje: ubrzavanje, usporavanje, skretanje u zavoj i slično. Tako će se u nastavku teksta objasniti najvažniji pojmovi vezanih za ovu temu.

#### 1.3.1 Globalna opterećenja

Bitno je razlikovati dva osnovna tipa opterećenja; globalno – koje utječe na kompletnu šasiju, i lokalno – koje se fokusira na određene dijelove kao što su različite točke ugradnje i umeci. Globalna opterećenja se dijele na četiri osnovna pojma: torzijska krutost, vertikalno savijanje, poprečno savijanje i horizontalno smicanje. [5]

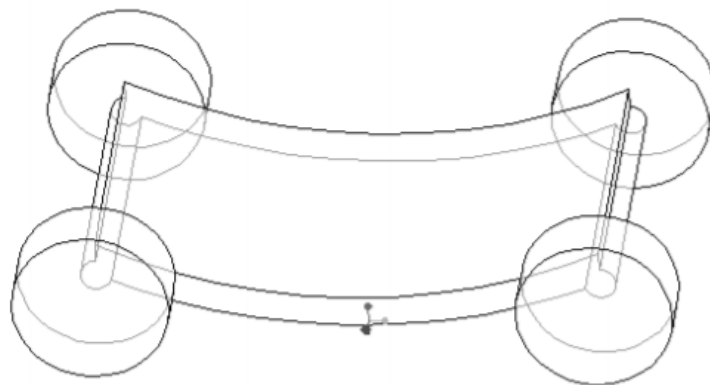
Torzijska krutost je najvažniji pojam, kada govorimo o konstrukciji šasije. Opterećenja (težina) torzijskog karaktera na bolidu imaju tendenciju zakrenuti jedan kraj šasiju u smjeru koji se opire upravljanju bolida.

Torzijska opterećenja se pojavljuju u različitim situacijama. Najčešći oblik torzijskog opterećenja je primjer kada jedan kotač naiđe na prepreku na cesti, a ostala tri kotača ostaju na svojoj pravocrtnoj putanji. Ta pojava stvara moment na šasiji. Ona je ujedno i standardni način za mjerenje torzijske krutosti šasije u računalnim simulacijama, ali i u stvarnosti (slika 1.5). Otpor torzijske deformacije je izražen u  $\text{Nm}/^\circ$ . [5]



Slika 1.5. Deformacija kod torzijskog opterećenja šasije [5]

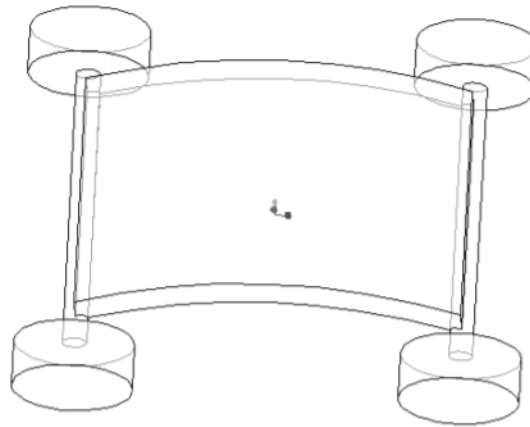
Vertikalno savijanje znači da šasija ima tendenciju poniranja tijekom ubrzavanja ili usporavanja. Tijekom velikog ubrzavanja, šasija ima oblik koji je prikazan na slici 1.6. Ovo se događa zbog momenta koji daje motor i koji djeluje kao protuteža ravnoteži pojednostavljenog sustava. Dodatno objašnjenje bi bilo da tijekom ubrzanja, prednji dio auta se želi uzdići, što ima za posljedicu „poniranja“ središnjeg dijela šasije. Suprotno se događa pri kočenju – stražnji, masivniji dio formule se iznenada zaustavlja i želi se svojom inercijom približiti središtu, i onda dolazi do poniranja sredine šasije. [5]



Slika 1.6. Deformacija kod vertikalnog savijanja šasije [5]

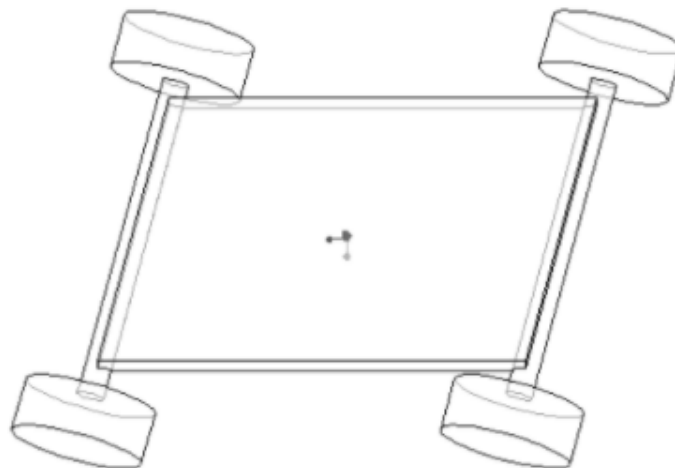
Poprečno savijanje je tipična pojava koja nastupa uslijed pojava centrifugalnih sila koje se pojavljuju za vrijeme skretanja vozila unutar zavoja. Te bočne sile nastoje „izbaciti“ vozilo sa svog puta skretanja. Za vrijeme skretanja, gume prate svoju zacrtanu rutu, pri čemu se pojavljuje

moment koji prenosi dio opterećenja sa unutarnjih na vanjske gume. Prijenos opterećenja ne rezultira samo savijanjem šasije (slika 1.7), nego i na prevrtanje bolida. [5]



Slika 1.7. Deformacija kod poprečnog savijanja [5]

Horizontalno smicanje se tipično pojavljuje kada jedna strana vozila ima bolje trenje od druge. U tom slučaju lijeva i desna strana vozila ne trpi jednake horizontalne sile, što uzrokuje deformiranje šasije u obliku paralelograma (slika 1.8). Ovo se tipično događa pri naglom kočenju, kada jedan kotač zablokira i prokliže, dok se ostala tri nastavljaju kotrljati. Uspoređujući ovu pojavu s vertikalnim savijanjem i torzijskom krutosti, može se zaključiti da je zanemariva za proračun šasije. [5]



Slika 1.8. Deformacija kod horizontalnog smicanja [5]

### 1.3.2 Lokalna opterećenja

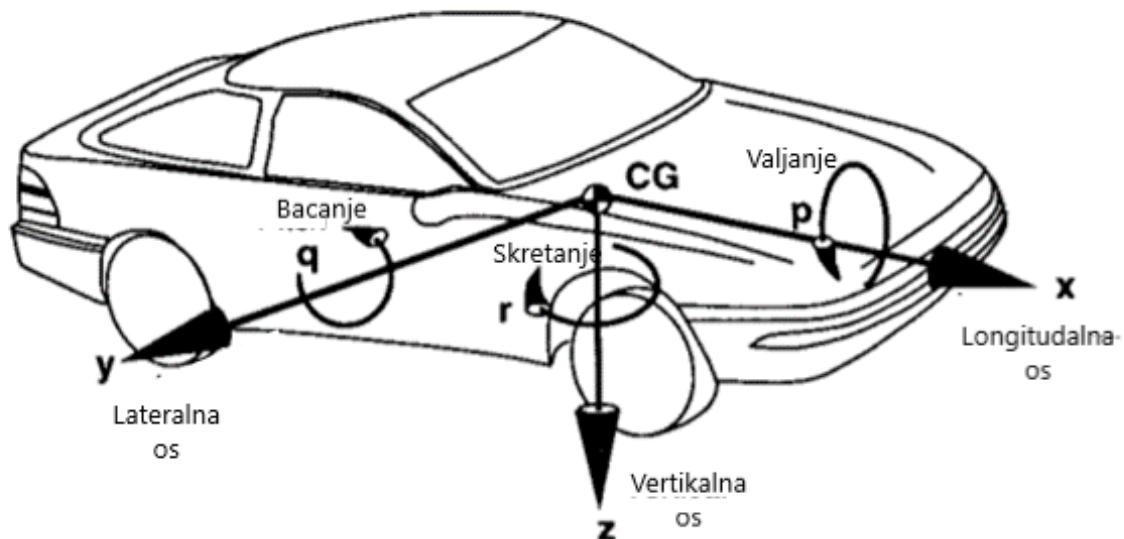
Šasija također apsorbira opterećenja koja dolaze od ovjesa, motora i drugih dijelova auta. Važno je konstruirati šasiju na način da se efikasno iskoristi apsorpcija opterećenja. Pozicioniranje prihvata na dijelove šasije koji su krući od ostatka ponekad može biti vrlo komplicirano. Na primjer, ponekad se može dogoditi da se pozicionira prihvat na sredini ramena, što stvara jako veliki moment savijanja. Iako bi ovaj potez loše utjecao na performanse šasije, on bi ujedno mogao biti i kompromis koji je nužan ako se uzme u obzir sve ostale parametre vezane za proizvodnju šasije. [4]

Prijenosi opterećenja tvore kompleksni pojam koji definira performanse trkaćeg automobila u smislu kontakata između gume i podloge te balansiranja automobila. Motor nikada u potpunosti ne može prenijeti sav svoj moment do kotača, zbog relativno velikog faktora trenja između pneumatika i podloge (i ostalih manje bitnih gubitaka). Uvijek se teži maksimalnom kontaktu između i podloge kako bi se poboljšalo upravljanje vozilom. [4]

Primjer: Ako se uzme kamen koji je povezan na oprugu i vrti se u krug i ako se uzastopno povećava brzina rotacije – ili stopa centrifugalnog ubrzanja – prije ili kasnije će sila u opruzi nadmašiti čvrstoću opruge, što će rezultirati puknućem opruge i izletavanjem kamena u smjeru tangente na opisani krug. Ako se primjeni ista opruga, ali lakši kamen, postići će se viša brzina prije nego što opruga pukne. U ovom slučaju, kamen predstavlja trkači automobil, a opruga silu skretanja sva 4 kotača. Možemo se ili smanjiti masa vozila kako bi se brže skretalo ili povećati samu silu skretanja koju pneumatici mogu podnijeti. Ovo se postiže analizom prijenosa opterećenja na šasiji i ovjesu. [4]

Motorno vozilo sastoji se od mnogih komponenti raspoređenih u njegovoj unutrašnjosti. Ipak, za mnoge elementarnije analize sve komponente se kreću zajedno. Na primjer, pri kočenju cijelo vozilo usporava kao jedinica. Stoga se može prikazati kao jedna masa koja se nalazi u svom težištu, ima odgovarajuću masu i inercijske karakteristike. Za ubrzavanje, kočenje i većinu analiza okretanja jedna je masa dovoljna. [6] Za prikaz jedne mase, vozilo se tretira kao koncentracija mase smještena u svom težištu kako je prikazano na slici 1.9. Postoje tri tipa prijenosa opterećenja koja utječu na sveukupne performanse vozila: uzdužno, poprečno i dijagonalno i prikazani su na slici 1.9. [6]





Slika 1.9. Prikaz koordinatnog sustava vozila [6]

Uzdužni prijenos opterećenja se pojavljuje u uzdužnoj ravnini auta za vrijeme ubrzanja ili usporavanja. Tijekom ubrzanja, težina auta se „pomiče“ unazad, pritom prenoseći više sile na zadnje pneumatike što za posljedicu ostvaruje više prijanjanja. Suprotno se događa pri kočenju kada se opterećenje prenosi prema prednjem dijelu vozila. Mnogo konstrukcijskih aspekata dolazi u razmatranje, kao što su težište vozila, međuosovinski razmak kotača, koji utječu na uzdužni prijenos opterećenja. Veliki iznosi prijenosa uzdužnih sila je štetan jer rasterećivanje bilo kojih kotača može potencijalno smanjiti trenje između kotača i podloge. Zato je određivanje minimalno potrebnog iznosa prijanjanja potrebno kako bi se ostvarilo optimalno upravljanje vozilom te povećalo ubrzanje i smanjilo vrijeme kočenja. [7]

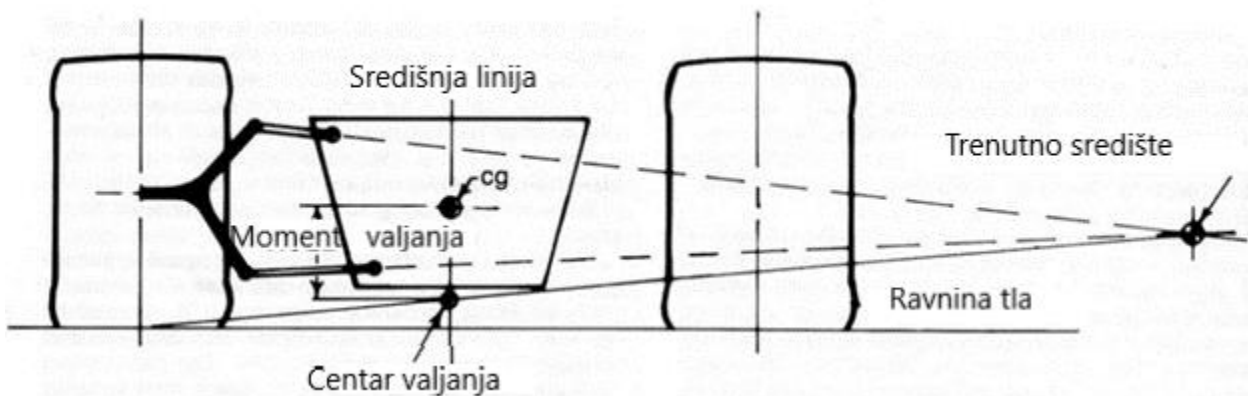
Bočna sila se pojavljuje uslijed centrifugalne sile za vrijeme skretanja. Ona „premješta“ težinu vozila s jedne strane na drugu. Centrifugalna sila nastoji vozilo izbaciti sa svog zamišljenog puta skretanja, dok joj se bočne sile suprotstavljaju. [6]

Primjer: zamislite vozilo koje skreće ulijevo. Centrifugalne sile su „postavljene“ gledajući od centra gravitacije prema van, prema desnoj strani vozila, opruge na desnoj strani su tlačno, a na lijevoj rastezno opterećene, što rezultira valjanjem. Valjanje vozila je pojava koja rezultira nagnjanjem jedne strane vozila u drugu, prilikom skretanja. Pojava je prikazana na slici 1.10, a ostali bitni pojmovi što se tiče valjanja (nije detaljno objašnjeno jer je pojam srodniji ovjesu nego šasiji) su prikazani na slici 1.11. [7]



Slika 1.10. Primjer valjanja vozila [7]

U ekstremnim uvjetima, pneumatik lijeve strane može izgubiti kontakt s podlogom zbog velikog iznosa centrifugalne sile. Ta je pojava obično posljedica previše mekih opruga ili njihovog nepostojanja. Pojava gubljenja kontakta između pneumatika i podloge jednog ili više pneumatika na vozilu se smatra opasnom i nepoželjnom i uvijek bi se trebala izbjegavati, jer zbog toga dolazi do prevrtanja vozila i potencijalne ozljede vozača. [7]



Slika 1.11. Centar valjanja i pripadajuće vrijednosti [8]

Prilikom konstruiranja vozila, trebalo bi posebnu pažnju posvetiti pozicioniranju težišta. Naravno, jako puno faktora utječe na njezin smještaj, i ne može se direktno odrediti; ono je posljedica svih ostalih sustava unutar bolida. No gdje god se pojavi izbor koji bi rezultirao višem ili nižem težištu, trebalo bi se ciljati na ono niže. Na taj način se snižava prijenos bočnih opterećenja. [8]

Dijagonalni prijenos opterećenja je najčešći i nažalost najkompliciraniji oblik prijenosa opterećenja, što se tiče analize. Ono je kombinacija bočnih i uzdužnih sila, npr. kada vozilo u isto

vrijeme skreće i ubrzava (ili usporava). Iznos sile prenesene u dijagonalnom smjeru ovisi o torzijskoj krutosti šasije, oprugama, međuosovinskom razmaku i tragu kotača. [8]

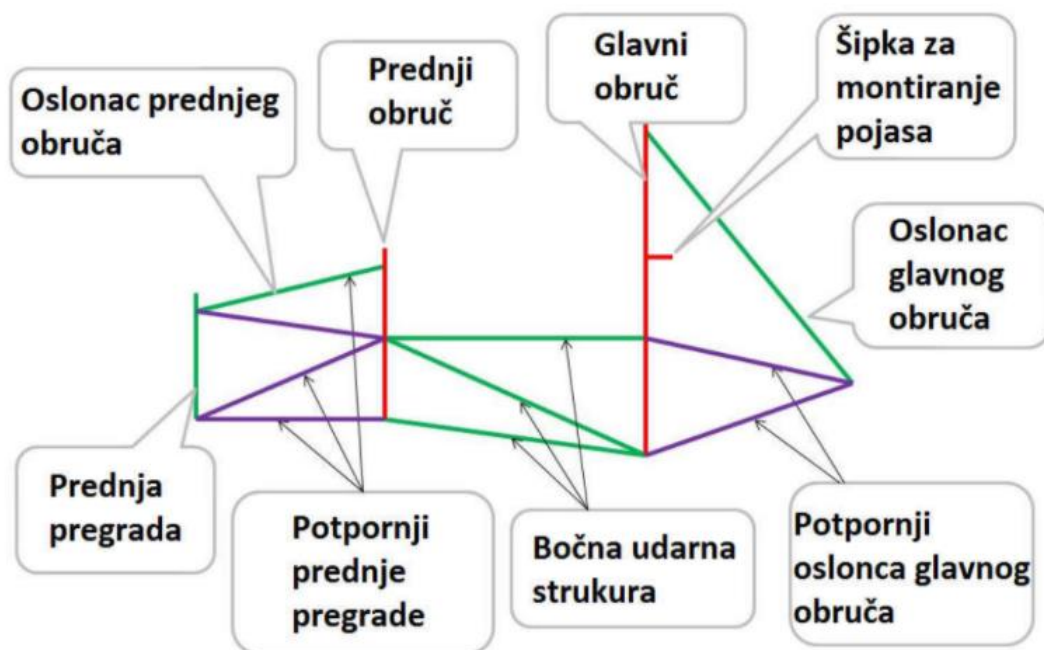
## 2 Opći zahtjevi kod konstrukcije šasije

Kod konstrukcije šasije za *Formulu student* potrebno je zadovoljiti osnovne zahtjeve koji su dani Pravilnikom natjecanja. U nastavku su dana najvažnija pravila vezana uz konstrukciju šasije. [2]

### 2.1 Zahtjevi za dijelove primarne strukture

Primarna struktura (slika 2.1.) sastoji se od sljedećih komponenti:

- glavni obruč
- prednji obruč
- oslonci i potpornji
- bočna udarna struktura
- prednja pregrada
- potpora prednje pregrade.



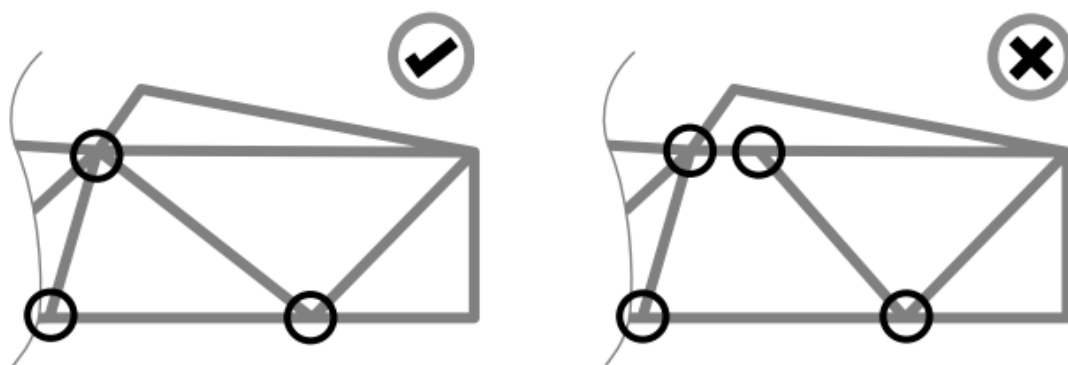
Slika 2.1. Dijelovi primarne strukture šasije [4]

Prema pravilniku [2], šasija je proizvedeni strukturni sklop koji podupire sve funkcionalne dijelove vozila, a može biti jedna metalna zavarena struktura, nekoliko metalnih zavarenih struktura ili kombinacija kompozitne i metalne zavarene strukture. Ako je šasija izrađena od metalnih cijevi nazivamo ju cijevna šasija, a ako se sastoji od kompozitnih materijala tada se ona naziva

*monocoque* šasijom. Dijelom šasije smatra se jedan od najmanjih reprezentativnih komada neodrezane cjevaste ili ekvivalentne strukture. [2]

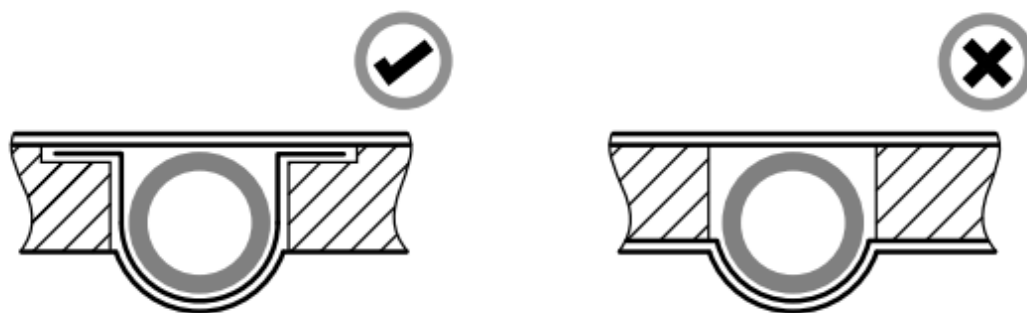
Glavni obruč je cijevni okvir smješten uz ili odmah iza torza vozača. Mora biti napravljen od jednog komada neodrezane, zatvorene sekcije cijevi. U bočnom pogledu na glavni obruč iznad njegove spojne točke s bočnom udarnom strukturom, nagib mora biti manji od  $10^\circ$  u odnosu na vertikalnu. U bočnom pogledu sva mjesta savijanja na glavnom obruču iznad spojne točke s primarnom strukturom moraju biti ojačana sa čvorištem oslonca glavnog obruča cijevima koje zadovoljavaju zahtjeve oslonca glavnog obruča. U bočnom pogledu, svaki dio niži od točke spajanja s bočnom udarnom strukturom mora biti ili nagnut naprijed ili ne više od  $10^\circ$  prema nazad. [2]

Prednji obruč je cijevni okvir smješten iznad nogu vozača koji mora biti izgrađen od kontinuiranog i zatvorenog presjeka. Ako je prednji obruč napravljen od više komada, mora biti poduprt triangulacijom u čvorištima ili ekvivalentnom konstrukcijom (slika 2.2.). U bočnom pogledu niti jedan dio prednjeg obruča ne smije biti nagnut za više od  $20^\circ$  od vertikale. Kada je prednji obruč zavarena konstrukcija napravljena od nekoliko aluminijskih profila, mora se razmotriti ekvivalentna čvrstoća popuštanja kao u zavarenim uvjetima ili se mora dokazati da je pravilno toplinski obrađeno i popušteno. Tim mora predočiti dovoljnu dokumentaciju kako bi dokazao da je izveden pravilan proces toplinske obrade. [2]



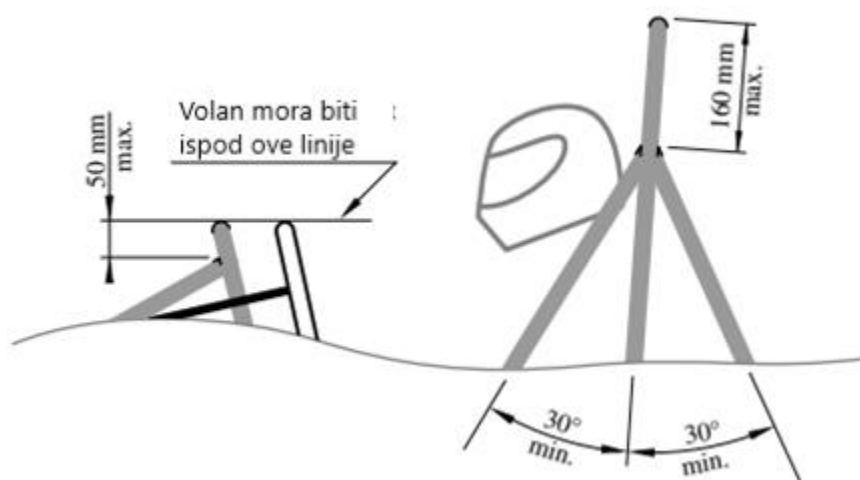
Slika 2.2. Triangulacija u čvorovima dijelova šasije (lijevo pravilno, desno pogrešno) [2]

Potpuno laminiranje prednjeg obruča u *monocoque* je dozvoljeno, ali spoj mora biti ekvivalentan spoju s 4 prihvatima prema Pravilniku i mora biti prikazan u Tablici strukturalne ekvivalentnosti (SES - *Structural equivalency spreadsheet*) i izveden prema slici 2.3. Laminat koji zatvara prednji obruč mora se preklapati najmanje 25 mm sa svake strane, te mora imati isti raspored slojeva kao i laminat na koji se spaja. [2]



Slika 2.3. Zahtjevi za laminiranje prednjeg obruča u *monocoque* (lijevo pravilno, desno pogrešno) [2]

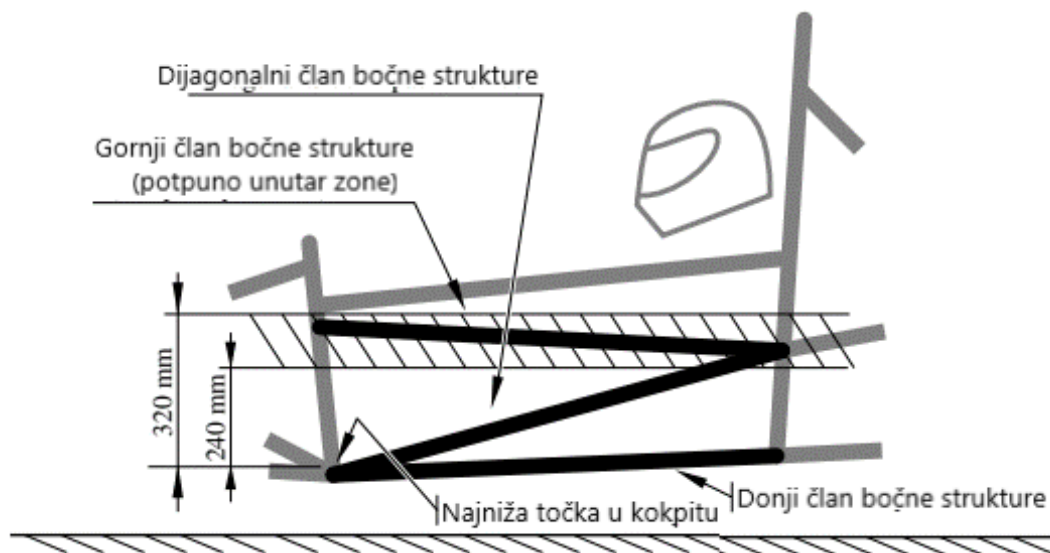
Oslonci obruča su strukture koje povezuju obruče s potpornjima. [4] Potpornji oslonaca obruča su strukture koje povezuju glavni obruč s osloncem glavnog obruča. U pogledu sa strane glavni obruč i oslonci glavnog obruča ne smiju ležati na istoj strani okomite linije koja se poklapa s vrhom glavnog obruča. Oslonci glavnog obruča moraju biti pričvršćeni na glavni obruč ne niže od 160 mm ispod najgornje površine glavnog obruča. Uključeni kut koji čine glavni obruč i oslonci glavnog obruča mora biti najmanje  $30^\circ$ . Ako je bilo koji predmet koji se proteže izvan primarne strukture pričvršćen na glavni obruč, potrebno je dodatno učvršćivanje kako bi se spriječila opterećenja savijanja u situaciji prevrtanja. Oslonci glavnog obruča moraju biti ravni. Prednji obruč pričvršćuje se sa svake strane prednjeg obruča, kao i konstrukcija ispred vozačevih stopala. Najmanje dvije cijevi bez ikakvih zavoja moraju biti ravne u bočnom pogledu na okvir. Konstrukcija prednjeg obruča mora biti pričvršćena ne niže od 50 mm ispod najvišeg vrha površine prednjeg obruča, (slika 2.4). Ako je prednji obruč nagnut više od  $10^\circ$  prema stražnjoj strani, potrebni su dodatni nosači koji se protežu prema natrag. [2]



Slika 2.4. Zahtjevi za prihvate glavnog i prednjeg obruča te položaja volana [2]

Prednja pregrada je struktura koja definira prednju ravninu šasije i osigurava sigurnost vozačevih nogu. Udarana zona (eng. *impact attenuator*) je deformabilna "naprava" koja apsorbira energiju, a nalazi se s prednje strane prednje pregrade [2]. Svaki alternativni materijal koji se upotrebljava za prednju pregradu mora imati površinsku posmičnu čvrstoću ekvivalentnu čeličnoj ploči debljine 1,5 mm. Ako je prednja pregrada dio kompozitne strukture i modelirana je kao "L" oblik, savojna krutost prednje pregrade oko vertikalne i bočne osi moraju biti jednake čeličnoj cijevi koja ispunjava zahtjeve za prednju pregradu. Duljina presjeka okomita na pregradu može biti najviše 25 mm mjereno od krajnje stražnje strane pregrade. [2]

Prednja pregrada mora biti oslonjena na prednji obruč s najmanje tri postavljene cijevi sa svake strane. Ako je oslonac prednje pregrade dio kompozitne strukture, mora imati ekvivalent savojne krutosti kao zbroj savojnih krutosti šest osnovnih čeličnih cijevi koje zamjenjuje. Bočna udarna struktura mora se sastojati od najmanje tri čelične cijevi sa svake strane kokpita (slika 2.5). [2]

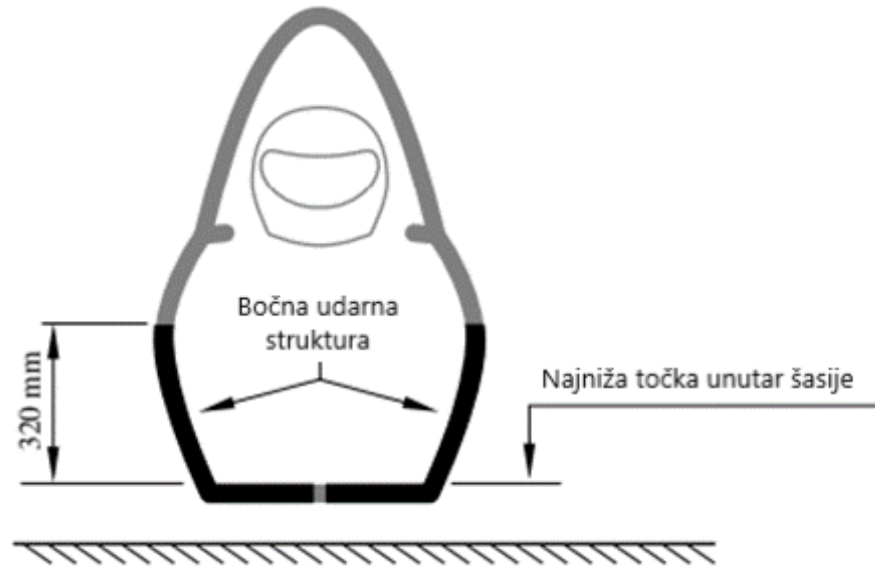


Slika 2.5. Bočna udarna struktura [2]

Ako je bočna udarna struktura dio kompozitne strukture, potrebno je sljedeće: [2]

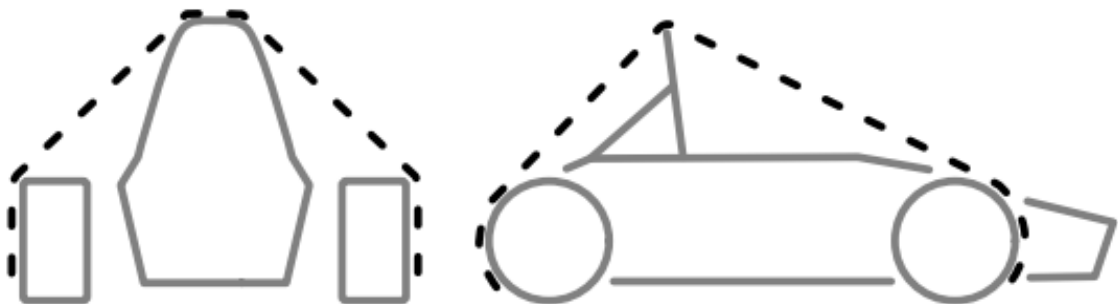
- Područje koje je uzdužno ispred glavnog obruča i iza prednjeg obruča i okomito od donje površine šasije do 320 mm iznad najniže unutarnje točke šasije, između prednjeg i glavnog obruča mora imati savojnu krutost jednaku zbroju savojnih krutosti tri osnovne čelične cijevi koje zamjenjuje (vidi sliku 2.6).
- Vertikalna bočna konstrukcija mora imati savojnu krutost ekvivalentnu krutosti dvije osnovne čelične cijevi, a polovice vodoravnog poda moraju imati savojnu krutost ekvivalentnu krutosti jedne osnovne čelične cijevi.

- Vertikalna struktura bočnog udara mora imati apsorbiranu energiju ekvivalentnu energiji dvije osnovne čelične cijevi.
- Posmična čvrstoća mora biti najmanje 7,5 kN.



Slika 2.6. Bočna udarna zona kod kompozitne šasije [2]

Površina zaštite od prevrtanja je omotač primarne strukture i svih dodatnih struktura pričvršćenih na primarnu strukturu koje zadovoljavaju minimalni zahtjev definiran u tablici 2.1 ili njegov ekvivalent. Površinski omotač je površina zaštite od prevrtanja i volumen definiran vrhom glavnog obruča i vanjskim rubovima četiri pneumatika (slika 2.7).



Slika 2.7. Površinski omotač [2]

### 2.1.1 Minimalni zahtjevi materijala

Tablica u nastavku prikazuje minimalne zahtjeve za dijelove primarne strukture šasije koja se izrađuje od čeličnih cijevi.



Čelične cijevi moraju biti proizvedene od nelegiranog ugljičnog čelika i sadržavati najviše 0,3 % ugljika, 1,7 % mangana i 0,6 % bilo kojih drugih legiranih elemenata. Sve ostale vrste čelika smatraju se alternativnim materijalima te ih je potrebno dodatno testirati kao što je opisano u nastavku [2].

Tablica 2.1. Minimalni zahtjevi materijala [2]

Predmet ili primjena	Minimalna debljina stijenke	Minimalna površina presjeka	Minimalni moment inercije
Glavni i prednji obruč Šipka za pričvršćivanje ramenog pojasa	2,0 mm	175 mm <sup>2</sup>	11320 mm <sup>4</sup>
Bočna udarna struktura Prednja pregrada Oslonci glavnog obruča Prihvat za pojas vozača	1,2 mm	119 mm <sup>2</sup>	8509 mm <sup>4</sup>
Potpornji prednje pregrade Potpurnji oslonaca glavnog obruča	1,2 mm	91 mm <sup>2</sup>	6695 mm <sup>4</sup>

Svojstva čelika koja se koriste u SES-u moraju biti: [2]

#### Izračun čvrstoće za nezavarene neprekidne materijale:

- Jangov modul:  $E = 200 \text{ GPa}$
- Granica tečenja:  $R_e = 305 \text{ MPa}$
- Vlačna čvrstoća:  $R_m = 365 \text{ MPa}$

#### Izračun čvrstoće zavarenih spojeva:

- Granica tečenja:  $R_e = 180 \text{ MPa}$
- Vlačna čvrstoća:  $R_m = 300 \text{ MPa}$

Svaka cijev s debljinom stijenke manjom od 1,2 mm ili minimalnim momentom tromosti manjim od 6695 mm<sup>4</sup> smatra se ne strukturalnom i zanemarit će se pri određivanju usklađenosti s bilo kojim pravilom vezanim za strukturu vozila. Oblik zavarenih šavova ne smije se ni na koji način mehanički mijenjati [2].

## 2.2 Alternativni materijali

Alternativni materijali mogu se primijeniti za sve dijelove primarne strukture i kućišta baterije sa sljedećim iznimkama: [2]

- Glavni obruč i oslonci glavnog obruča moraju biti čelični.
- Prednji obruč mora biti metalan.
- Svi zavareni dijelovi primarne konstrukcije moraju biti čelični.
- Prednji obruč može biti aluminijska zavarena konstrukcija.

Ako se u primarnoj strukturi ili kućištu baterije primjenjuju bilo koji drugi materijali osim čeličnih cijevi, potrebno je fizičko ispitivanje kako bi se pokazala ekvivalentnost minimalnim svojstvima materijala propisanim za čelik (tablica 2.1).

Ako se upotrebljava legirani čelik moraju se uključiti ispitivanja i dokumentacija u SES-u kako bi se pokazala strukturna ekvivalentnost. To može uključivati, ali nije ograničeno na: [2]

- račune i tehničke listove s podacima o upotrijebljenim materijalima za cijevi
- dokumentaciju o postupcima zavarivanja i dodatnim materijalima primijenjenim kod zavarivanja
- dokumentaciju o toplinskim obradama
- ispitivanja koja pokazuju odgovarajuću čvrstoću i rasteznu prekidnu čvrstoću u zavarenom stanju.

Ako se kompozitne strukture primjenjuju u primarnoj strukturi ili kućištu baterije, savojnu krutost (EI) te ploče mora se izračunati pomoću alata i jednažbi u SES-u. Stvarna geometrija i zakrivljenost ploče mogu se uzeti u obzir za oslonac glavnog obruča, oslonac prednjeg obruča, potpornu konstrukciju prednje pregrade, prihvat ramenog pojasa i zaštitnu strukturu kućišta baterije. Za sva ostala područja savojna krutost se mora izračunati kao savojna krutost ravne ploče oko njezine neutralne osi. Ova ploča mora imati isti sastav kao struktura koja se primjenjuje u primarnoj strukturi ili kućištu baterije [2].

Ako se kompozitni materijali primjenjuju u primarnoj strukturi ili kućištu baterije, SES mora uključivati: [2]

- vrste materijala
- težine tkanina
- vrste smole
- orijentacije vlakana

- brojeve slojeva
- materijale jezgre
- tehnike polaganja
- podatke ispitivanja savijanjem u tri točke i smičnog ispitivanja.

Za bilo koji laminat u primarnoj strukturi ili kućištu baterije, maksimalna težina paralelnih vlakana, u odnosu na masu svih vlakana u laminatu, iznosi 50 %. Sva vlakna položena unutar bilo koje orijentacije  $\pm 10^\circ$  se računaju kao paralelna u ovom slučaju. Gdje god su potrebne podloške, one moraju biti u potpunosti poduprte strukturom uz koju su vezane. Profil vanjskog opsega može imati neke ravne dijelove, ali ne i konkavne dijelove. Podloge ne smiju imati nikakve izreze unutar svog vanjskog opsega osim rupa za vijke. [2]

### **2.2.1 Ispitivanje laminata**

Ako se kompozitni materijali koriste za bilo koji dio primarne strukture ili kućište baterije mora se:

- Izraditi reprezentativnu ispitnu ploču dimenzija točno 275 mm  $\times$  500 mm koja ima istu strukturu, laminat i način izrade kao i za odgovarajući dio primarne strukture predstavljene kao ravna ploča. Stranice ispitne ploče ne smiju biti laminat (materijal jezgre mora biti vidljiv).
- Izvesti test savijanja u 3 točke na ovoj ploči. Podaci iz ovih ispitivanja i slike ispitnih tijela i testnih postavki moraju biti uključeni u SES-u. Na slikama se mora prepoznati: udaljenost između oslonaca, dimenzije aplikatora opterećenja i oznaka ispitnog tijela. Rezultati testiranja se moraju koristiti za izvođenje svojstava čvrstoće i krutosti koja se upotrebljavaju u SES jednađbi za sve laminate (ploče). [2]

Reprezentativne ispitne ploče za dijelove kućišta baterije mogu biti manji dimenzija pod uvjetom da je debljina jezgre ploče 5 mm ili tanja. Ova reprezentativna ispitna ploča tada mora imati dimenzije 150 mm  $\times$  275 mm. U tom slučaju, udaljenost između dva oslonca ispitne ploče mora biti na najmanje 200 mm, a aplikator opterećenja mora imati polumjer od najmanje 5 mm. [2]

Ako ploča predstavlja bočnu udarnu strukturu mora se dokazati da ima barem ista svojstva kao dvije čelične cijevi koje ispunjavaju zahtjeve za cijevi strukture bočne udarne strukture za modul izvijanja, granicu popuštanja i apsorbiranu energiju. [2]

Kompozitne strukture s različitim debljinama jezgre, ali inače identične konstrukcije, mogu imati svojstva materijala izvedena iz jedne ispitne ploče. Ploča s debljim jezgra se mora ispitati i

struktura koja ima svojstva izvedenog materijala ne smije imati jezgru debljine manje od 66 % od debljine ispitane ploče. [2]

Ispitna tijela se moraju predložiti na tehničkom pregledu. Sva ispitna tijela moraju biti označena oznakama koje se ne mogu ukloniti (trajni marker ili gravura, ali bez naljepnice) i moraju sadržavati sljedeće informacije: akronim laminirane strukture i datum ispitivanja. [2]

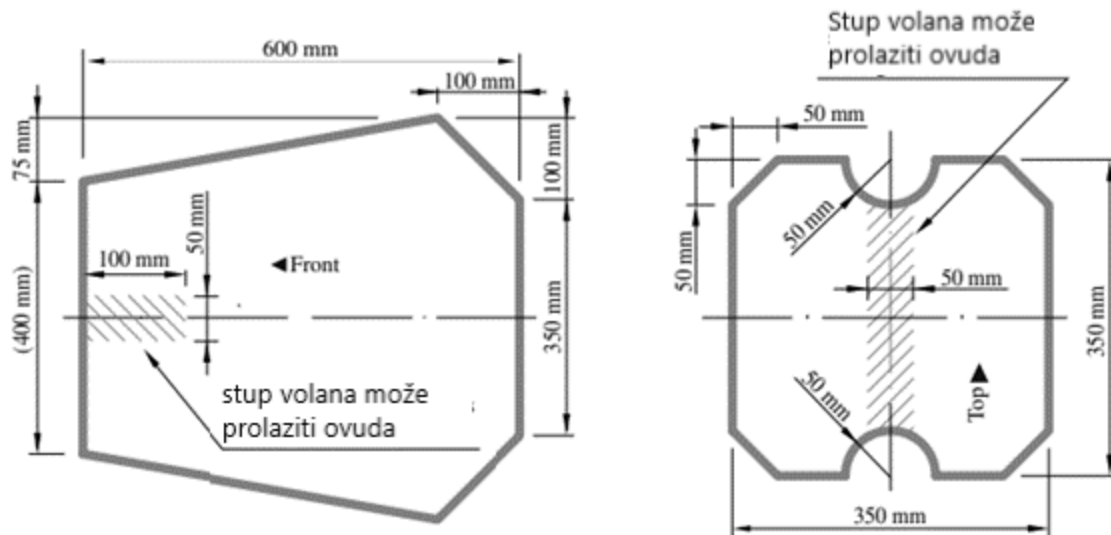
Udaljenost između dva oslonca ispitne ploče mora biti najmanje 400 mm. Aplikator opterećenja koji se primjenjuje za ispitivanje bilo koje ploče ili cijevi mora biti metalan i imati polumjer od 50 mm. Uređaj za nanošenje opterećenja mora nadvisiti ispitno tijelo kako bi spriječio opterećenje ruba. Između aplikatora opterećenja i ispitnog tijela ne smije biti materijala. [2]

Moraju se izvršiti ispitivanja površinskog smicanja kojima se mjeri sila potrebna za guranje ili povlačenje plosnatog aplikatora sile promjera 25 mm kroz u ispitak ravnog laminata. Ispitak mora biti najmanje 100 mm × 100 mm. Debljine jezgre i kore moraju biti identične onima koje se upotrebljavaju u stvarnoj primarnoj strukturi i biti proizvedeni primjenom istih materijala i procesa. Ispitno učvršćenje mora poduprijeti cijeli ispitak, osim otvora od 32 mm koji je poravnat koaksijalno s aplikatorom sile. Uzorak se ne smije stegnuti za ispitno učvršćenje. [2]

### **2.3 Kokpit i vozač**

Veličina otvora u kokpitu mora biti dovoljna da predložak prikazan na lijevoj strani slike 2.8 prođe okomito od otvora kokpita do ispod gornjeg bočnog udarnog člana kada se drži vodoravno. Šablona se može pomicati naprijed i nazad. Ako struktura bočnog udara nije izrađena od cijevi, predložak mora proći do 320 mm iznad najniže unutarnje točke šasije između prednjeg i glavnog obruča. Upravljač, sjedalo i sve obloge mogu se ukloniti kako bi predložak stao. Bilo koji drugi dijelovi se smiju uklanjati samo ako su integrirani s upravljačem. [2]

Kokpit mora osigurati slobodan unutarnji presjek dovoljan za predložak prikazan desno na slici 2.8 da prijeđe od otvora kokpita do točke 100 mm iza prednje strane krajnje stražnje papučice u neaktivnom položaju. Predložak se može pomicati prema gore i prema dolje. Podesive pedale moraju biti u krajnjem prednjem položaju. Volan i sve obloge koje se mogu ukloniti bez upotrebe alata dok vozač sjedi u vozilu mogu se ukloniti kako bi predložak stao. Vozačeva stopala i noge moraju biti u potpunosti sadržane unutar primarne strukture kada vozač sjedi normalno i vozačeve noge dodiruju pedale. Pri pogledu sa strane ili sprijeda bilo koji dio stopala ili nogu vozača ne smije se protezati iznad ili izvan ove strukture. [2]



Slika 2.8. Predložak za otvor kokpita (lijevo) i unutarnji presjek kokpita (desno) [2]

Devedeset pet postotni muškarac je zamišljena osoba koja je statistički gledano veća po građi od devedeset pet posto cijele populacije muškaraca, a njene dimenzije su propisane pravilnikom. Kad sjedi normalno i vezan je vozačevim sigurnosnim sustavom, kaciga 95 postotnog muškarca i svih vozača tima mora (sliku 2.9): [2]

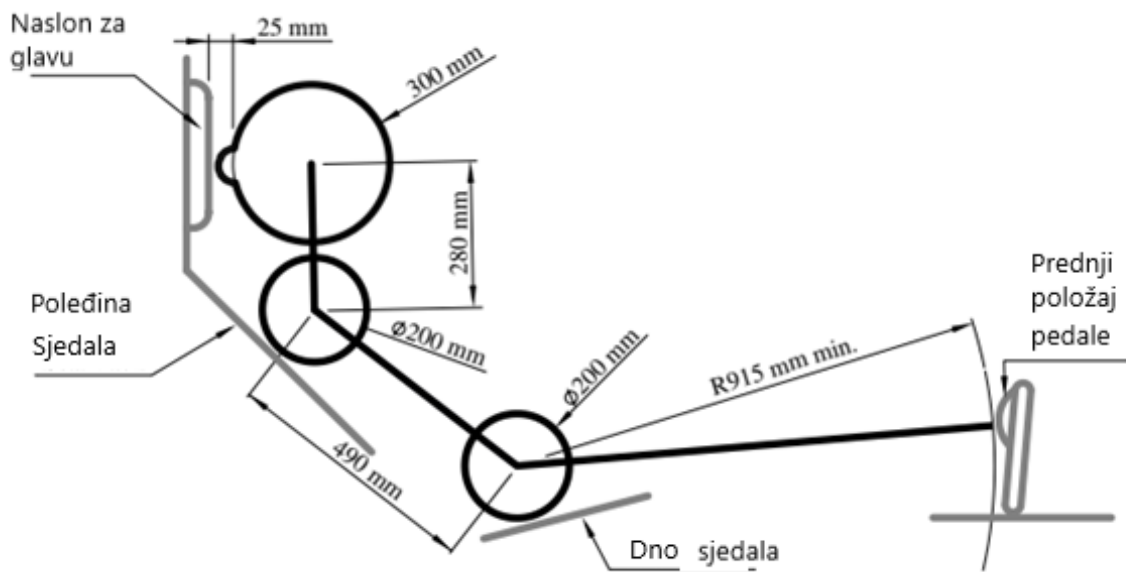
- biti najmanje 50 mm udaljena od ravne crte povučene od vrha glavnog obruča do vrha prednjeg obruča
- biti najmanje 50 mm udaljeni od ravne crte povučene od vrha glavnog dijela obruča do donjeg kraja oslonaca glavnog obruča ako se oslonci protežu prema natrag.
- ne smije biti dalje od stražnje površine glavnog obruča ako se oslonci glavnog obruča protežu prema naprijed.

Devedeset pet postotni muškarac predstavljen je dvodimenzionalnom figurom koja se sastoji od dva kruga promjera 200 mm (jedan predstavlja bokove i stražnjicu, a jedan predstavlja ramena) i jedan krug od 300 mm (koji predstavlja glavu s kacigom). Dva kruga od 200 mm povezana su ravnom linijom od 490 mm. Kružnica promjera 300 mm je spojena ravnom linijom veličine 280 mm s gornjim krugom od 200 mm. [2]

Šablona vozača se mora postaviti u vozilo na sljedeći način (slika 2.9):[2]

- Sjedalo podešeno u krajnji stražnji položaj.
- Pedale su namještene u krajnji prednji položaj.
- Donji krug od 200 mm postavljen na dno sjedala. Udaljenost između središta kruga i krajnje stražnje površine za aktiviranje pedala moraju biti najmanje 915 mm.

- Srednji krug postavljen na naslon sjedala.
- Gornji krug od 300 mm smješten 25 mm od naslona za glavu.



Slika 2.9. Smještaj šablone vozača [2]

### 3 Kompozitni materijali i kompozitne sendvič konstrukcije

#### 3.1 Kompozitni materijali

Kompoziti postoje u prirodi. Komad drveta je kompozit, s dugim celuloznim vlaknima koja zajedno drže tvar koja se zove lignin. Kompozitni materijali nastaju kombinacijom dva ili više materijala koji imaju sasvim različita svojstva, a ne otapaju se niti se spajaju jedno u drugo. Materijali u kompozitu zajedno kompozitu daju jedinstvena svojstva. Ljudi primjenjuju kompozitne materijale tisućama godina u različitim područjima. Prve upotrebe kompozita datiraju iz 1500. godine prije Krista, kada su rani Egipćani i mezopotamski doseljenici upotrebljavali mješavinu blata i slame za stvaranje jakih i izdržljivih zgrada. Kombinacija blata i slame u bloku opeke daje mu snažno svojstvo protiv stiskanja, trganja ili savijanja. Slama je nastavila pružati pojačanje drevnim kompozitnim proizvodima, uključujući keramiku i čamce. 1200. godine nove ere, Mongoli su izumili prvi kompozitni luk upotrebljavajući kombinaciju "životinjskog ljepila", kosti i drva. Mašne su bile pritisnute i omotane brezovom korom. Kompozitni mongolski lukovi pomogli su Džingis Khanu osigurati vojnu dominaciju. Zbog svojih prednosti kao što su istovremena mala masa i čvrstoća, mnogi od najvećih napredaka u kompozitima bili su rezultat ratnih potreba. Tijekom Drugog svjetskog rata, razvijeni su mnogi kompozitni materijali i započela je proizvodnja kompozitnih tvorevina. [9]

Razvoj i potreba za kompozitnim materijalima rezultiraju industrijom polimera ojačanih vlaknima (eng. *fibre reinforced polymer - FRP*). Do 1945. više od 3 milijuna kilograma staklenih vlakana upotrijebljeno je za razne proizvode, prvenstveno za vojnu primjenu. Kompozitni materijali su nastavili rasti nakon rata i brzo su rasli tijekom pedesetih godina prošlog stoljeća. Inovatori kompozita su ambiciozno pokušavali uvesti kompozite na druga tržišta kao što su zrakoplovstvo, građevinarstvo i transport. Ubrzo su postale poznate prednosti kompozita ojačanih vlaknima, posebice njihova postojanost na koroziju. Prvi kompozitni trup komercijalnog broda predstavljen je 1946. godine. Karoserija automobila izrađena od kompozita proizvedena je i ispitana 1947. godine. Razvoj automobilske industrije doveo je do nekoliko novih metoda oblikovanja kao što je osmoljeni list SMC (eng. *Sheet Moulding Compound*) i vlaknasti prepreg BMC (eng. *Bulk Moulding Compound*). Ove dvije tehnike su se pojavile kao dominantan način oblikovanja za automobilsku i druge industrije. [9] Početkom pedesetih godina razvijeni su novi proizvodni postupci kao što je namotavanje niti, pultrudiranje i podtlačno oblikovanje vrećom. Godine 1961. patentirana su prva ugljična vlakna, a nekoliko godina kasnije postala su komercijalno dostupna. U sedamdesetim godinama industrija kompozita počela je sazrijevati. Tijekom tog razdoblja razvijene su bolje smole i poboljšana ojačavajuća vlakna za primjenu u proizvodnji kompozita. Automobilsko tržište nadmašilo je pomorsko, a poziciju zadržava i danas. Tijekom kasnih

sedamdesetih i ranih osamdesetih, kompoziti su se počeli prvi primjenjivati u infrastrukturnim aplikacijama u Aziji i Europi. Prvi potpuno kompozitni pješački most postavljen je u Aberfeldyju u Škotskoj 1990-ih. U ovom razdoblju, prvi most od kompozitnog vlaknima ojačanog armiranog betona izgrađen je u McKinleyvilleu, West Virginia, a prva paluba mosta za vozila koja se u potpunosti sastoji od kompozita izgrađena je u Russellu, Kansas. Kompoziti i danas nalaze primjenu, te se poboljšavaju vlakana i smole nano materijalima. Nanotehnologija se u komercijalnim proizvodima počela primjenjivati početkom ovog stoljeća. Vlaknaste ugljične nano cijevi mogu se primjenjivati kao kompozitna armatura u polimerima za poboljšanje mehaničkih, toplinskih i električnih svojstava proizvoda. [9]

Danas se kompozitna industrija još uvijek razvija, s velikim fokusom na obnovljive izvore energije. Lopatice vjetroagregata neprestano pomiču granice veličine i zahtijevaju napredne kompozitne materijale. Na primjer, moguće je prilagoditi kompozit na temelju zahtjeva, čineći kompozitnu tvorevinu vrlo čvrstu u jednom smjeru, ali slabiju u drugom smjeru gdje čvrstoća nije tako važna. Moguće je odabrati svojstva kao što su postojanost na toplinu, kemikalije i vremenske uvjete odabirom odgovarajućeg materijala za matricu. U novije vrijeme, sve veća ekološka svijest i svijest o potrebi za održivim razvojem podiže interes za primjenom prirodnih vlakana kao ojačanja u kompozitima za zamjenu sintetičkih vlakana. [9]

Općenito, kompozit se sastoji od tri komponente: matrice kao kontinuirane faze; ojačavala kao diskontinuirane ili raspršene faze, uključujući vlakna i čestice; i finog međufaznog područja, također poznato kao sučelje. [9] Vlakno je primarni element kompozita koji nosi opterećenje materijala. Kompozitni materijal je sam po sebi čvrst i krut samo u smjeru vlakana. Jednosmjerni kompoziti imaju prevladavajuća mehanička svojstva u jednom smjeru, odnosno anizotropni su. To znači da imaju mehanička i/ili fizička svojstva koja variraju ovisno o smjeru u odnosu na prirodnu referencu osi svojstvene materijalu. Komponente izrađene od kompozita ojačanih vlaknima mogu se projektirati tako da orijentacija vlakana rezultira optimalnim mehaničkim svojstvima, ali mogu se samo približiti pravoj izotropnoj prirodi metala, kao što su aluminij i titan. Matrica podupire vlakna i povezuje ih zajedno u kompozitni materijal. Matrica prenosi sva primijenjena opterećenja na vlakna, drži vlakna u njihovom položaju i odabranoj orijentaciji, daje kompozitu postojanost na okoliš, i određuje maksimalnu radnu temperaturu kompozita. [10]

Pažljivim odabirom matrice, ojačavala i proizvodnog procesa koji ih spaja, moguće je prilagoditi svojstva koja zadovoljavaju specifične zahtjeve. Bilo koji materijal može poslužiti kao materijal za matricu. Međutim, kao matrica se uglavnom upotrebljavaju keramika, metali i polimeri. U stvarnosti, većina matrica koje postoje na tržištu kompozita su polimeri. Postoje različite



polimerne matrice koje se mogu primijeniti u kompozitnim materijalima a dijelimo ih na plastomere i duromere. Među kompozitima s polimernom matricom, prevladavaju kompoziti s duromernim matricama. Duromeri i plastomeri međusobno imaju vrlo različita svojstva i primjenu. [9]

Duromeri su materijali koji prolaze kemijsku reakciju i umrežuju i prelaze iz kapljevite u krutu tvar. U svom nestvrđnutom obliku, materijal ima male i nepovezane molekule poznate kao monomeri. Dodatak drugih materijala kao što su umrežavala, katalizatori i/ili prisutnost topline ili nekog drugog utjecaja pokrenuti će kemijsku reakciju ili reakciju očvršćivanja. Tijekom ovog procesa molekule se poprečno povezuju i tvore znatno duže molekularne lance, što uzrokuje očvršćivanje materijala. Promjena u ovo stanje je trajna i nepovratna. Nakon toga, izloženost visokoj temperaturi nakon očvršćivanja će uzrokovati razgradnju materijala, a ne taljenje. [10]

Plastomerni materijali mogu se više puta omekšati povišenjem temperature i očvršnuti sniženjem temperatura. Brzina prerade je primarna prednost plastomernih materijala. [10] Kada se plastomerima doda dovoljno topline da se postigne temperatura iznad točke taljenja, oni se tale, ukapljuju ili omekšavaju dovoljno da se mogu preraditi. Kada se izvor topline ukloni i temperatura plastomera padne ispod točke taljenja, oni se ponovno vrte u kruto fizičko stanje. Ovaj proces se može ponavljati. [9] Međutim, materijal može biti sve više podložan degradaciji u svom rastaljenom stanju, pa postoji praktično ograničenje broja puta da se ova ponovna prerada može obaviti prije nego se svojstva materijala počinju smanjivati. Mnogi plastomeri su adicijskog tipa, pa mogu imati vrlo duge molekularne lance i vrlo visoke molekularne mase. [10]

Općenito, duromeri postoje već dugo vremena i imaju važno mjesto na tržištu, često imaju niže troškove sirovina i omogućuju lako vlaženje armaturnog vlakna i lako oblikovanje dijelova složenih geometrija. Drugim riječima, duromere je često lakše obraditi od plastomera. Plastomeri su obično čvršći ili manje krhki od duromera. Mogu imati bolju kemijsku postojanost, ne trebaju hlađenje kao što to često rade nestvrđnuti duromerni materijali (prepreg materijali) i mogu se lakše reciklirati i popraviti. [10]

Tablica 3.1 predstavlja pojednostavljenu usporedbu između duromera i plastomera i daje kratku usporedbu njihovih prednosti i nedostataka.

Tablica 3.1. Usporedba duromera i plastomera [10]

Duromeri	Plastomeri
----------	------------

<b>Prerada</b>	Sadrži monomere koji se međusobno povezuju tijekom procesa umrežavanja formirajući nepovratnu kemijsku vezu. Proces umrežavanja eliminira rizik taljenja proizvoda kada je izložen toplini, što duromere čini idealnima za primjenu pri visokim temperaturama kao što su elektronika i kućanski uređaji.	Granulat omekša zagrijavanjem i postaje više kapljeviti kako se dodatno zagrijava. Ova karakteristika omogućuje preoblikovanje i recikliranje plastomera bez negativnog utjecaja na svojstva.
<b>Značajke i prednosti</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Postoji više duromernih smola koje nude različite prednosti u performansama</li> <li>• Značajno poboljšavaju mehanička svojstva materijala, pružaju povećanu kemijsku i toplinsku postojanost te integritet strukture</li> <li>• Često se primjenjuju za brtvljenje proizvoda zbog njihove otpornosti na deformaciju</li> <li>• Ne mogu se reciklirati</li> <li>• Ne mogu se rastopiti i ne tale se ako se zagriju</li> <li>• Lako navlaži armaturna vlakna i punila</li> <li>• Postojaniji pri visokim temperaturama od plastomera</li> <li>• Vrlo fleksibilan dizajn</li> <li>• Mogućnosti izrade debelih i tankih stijenki</li> <li>• Izvrstan estetski izgled</li> <li>• Visoka razina dimenzijske stabilnosti</li> <li>• Teža završna obrada površine</li> <li>• Financijski isplativ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Postoji više plastomera koji nude različite prednosti u performansama</li> <li>• Imaju visoku čvrstoću, niže stezanje i laku savitljivost. Ovisno o vrsti, plastomeri mogu poslužiti za primjene kao što su plastične vrećice ili mehanički dijelovi visokog opterećenja</li> <li>• Mogu se reciklirati</li> <li>• Mogu se rastopiti ako se zagriju</li> <li>• Sposobnost preoblikovanja</li> <li>• Teže navlaži armaturu vlakna i punila</li> <li>• Visoka otpornost na udarce</li> <li>• Postojani na kemikalije</li> <li>• Tvrda kristalna ili gumena površina</li> <li>• Estetski vrhunske završne obrade</li> <li>• Ekološki prihvatljiva proizvodnja</li> <li>• Općenito, skuplji od duromera</li> </ul>

U nastavku će biti opisane samo najčešće primjenjivane duromerne smole u kompozitima.

Duromerne smole su najraznovrsnije i najšire primijenjene od svih materijala koje je napravio čovjek. Lako se lijevaju ili oblikuju u bilo koji oblik, kompatibilne su s većinom drugih materijala i lako očvršćuju (toplinom ili katalizatorom) u netopivu krutinu. Duromerne smole su također izvrsna ljepila i vezivna sredstva. [10]

Poliesterske smole su relativno jeftine i imaju brz proces umreživanja. Poliesteri ojačani vlaknima mogu se obraditi mnogim postupcima. Uobičajeni postupci obrade uključuju odgovarajući metalni kalup, mokro polaganje, injekcijsko prešanje, namotavanje niti, pultrudiranje i autoklav. [10]

Izgled, svojstva rukovanja i karakteristike umreživanja vinil esterskih smola iste su kao i kod konvencionalnih poliesterskih smola. Postojanost na koroziju i mehanička svojstva vinil esterskih kompozita su bolja u odnosu na standardne kompozite od poliesterske smole. [10]

Fenol-formaldehidne smole prvo su se proizvodile ranih devedesetih godina za primjenu na komercijalnom tržištu. Urea-formaldehid i melamin-formaldehid pojavili su se dvadesetih i tridesetih godina prošlog stoljeća kao jeftinija alternativa za primjenu pri nižim temperaturama. Fenolne smole se upotrebljavaju za unutarnje komponente zbog njihove niske zapaljivosti i slabog nastajanja dima tijekom procesa. [10]

Epoksidne smole su termoreaktivne smole koje se mogu polimerizirati i dostupne su u različitim viskoznostima od hlapljivog do krutog. Epoksidne smole se široko koriste za preprege i kao strukturalna ljepila. Prednosti epoksidnih smola su visoka čvrstoća i modul elastičnosti, niske razine hlapljivih tvari, izvrsno prijanjanje, nisko skupljanje, dobra kemijska postojanost i jednostavnost prerade. Njihovi glavni nedostaci su krhkost i smanjenje svojstava u prisutnosti vlage. Očvršćivanje epoksida je sporije od poliesterske smole. Tehnike prerade uključuju kalupljenje u autoklavu, namatanje niti, prešanje, podtlačno oblikovanje vrećom, podtlačno ulijevanje i pultrudiranje. Temperature očvršćivanja mijenjaju se od sobne do približno 180 °C. Najčešći raspon temperatura očvršćivanja je između 120 °C i 180 °C. [10]

Poliimidi su izvrsni u primjeni pri visokim temperaturama gdje do izražaja dolaze njihova toplinska postojanost, oksidacijska stabilnost, niski koeficijent toplinskog širenja i postojanost na otapala. Poliimidi zahtijevaju visoke temperature očvršćivanja, obično veće od 290 °C. Posljedično, nije moguća primjena klasičnih vreća pa čelični alati postaju nužni. [10]

Bismaleimidna smola je postojana pri izuzetno visokim temperaturama i primjenjuje se za visoke temperaturne materijale. Ove smole su dostupne kao ljepilo i vlakna. Bismaleimidne smole imaju

višu temperaturnu sposobnost i višu žilavost od epoksidnih smola, a pružaju izvrsne performanse pri okolnim i povišenim temperaturama. Obrada bismaleimidnih smola je slična onoj za epoksidne smole. Bismaleimidne smole su prikladne za standardnu preradu u autoklavu, ubrizgavanje, podtlačno ulijevanje i SMC. [10]

Termoreaktivne smole primjenjuju kemijsku reakciju za očvršćivanje. Postoje tri faze očvršćivanja, koje se nazivaju A, B i C.

- Faza A: Komponente smole (osnovni materijal i umreživalo) su pomiješani ali kemijska reakcija nije počela. Smola je u A fazi tijekom postupka nanošenja na vlakna.
- B faza: Komponente smole su pomiješane i započela je kemijska reakcija. Materijal je zgusnut i ljepljiv. Smole u preprezima nalaze se u B fazi. Kako bi se spriječilo daljnje očvršćivanje smole prepreg se stavlja u zamrzivač pri niskim temperaturama (ovisno o smoli koja se primjenjuje u prepregu). U smrznutom stanju, smola u prepregu ostaje u B fazi. Očvršćivanje počinje kada se materijal ukloni iz zamrzivača i ponovno zagrije.
- C faza: Smola je potpuno umrežila. Neke smole umrežuju pri sobnoj temperaturi a drugima je potreban ciklus umrežavanja pri povišenoj temperaturi kako bi potpuno umrežile. [10]

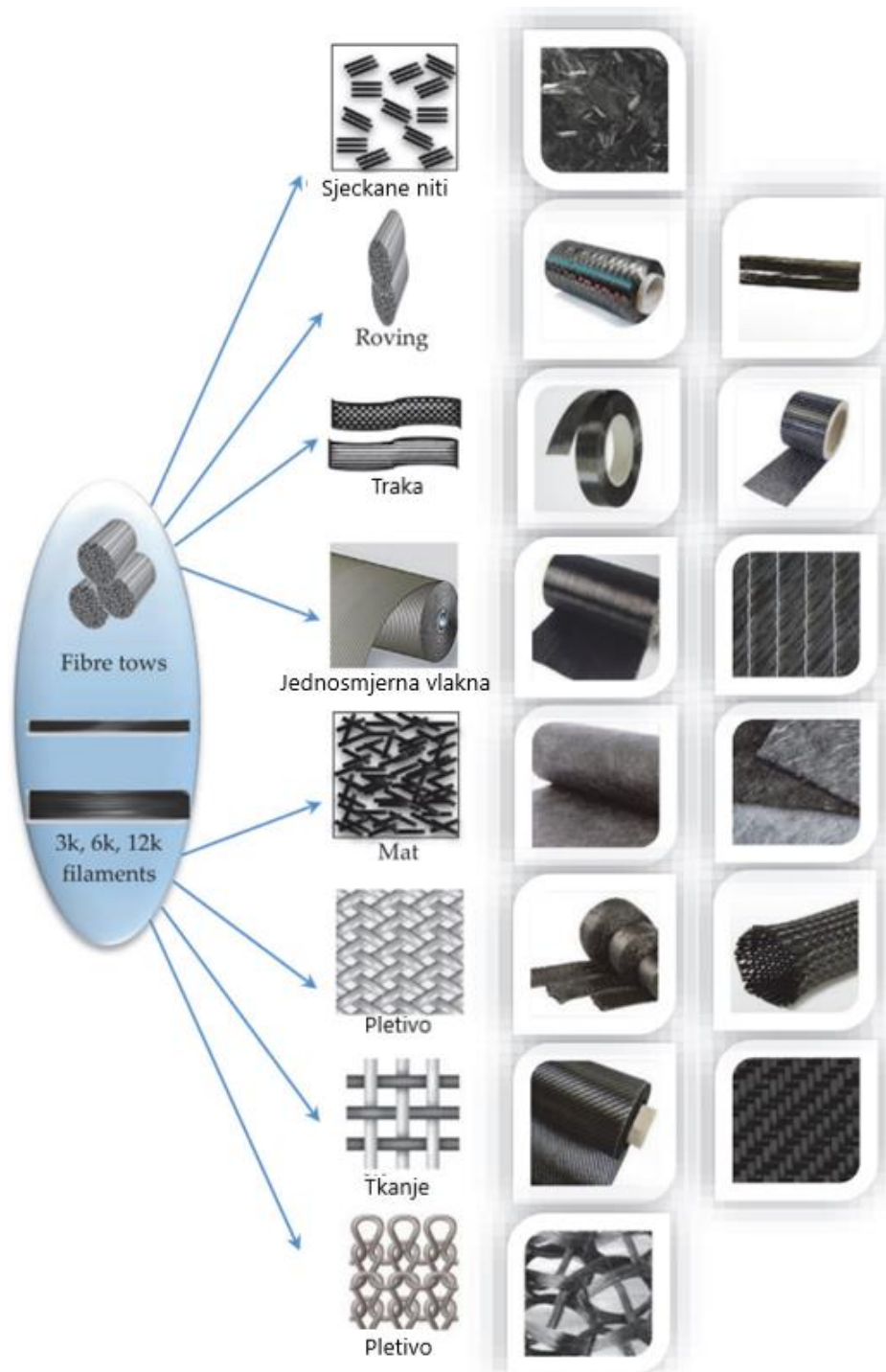
Prepreg se sastoji od kombinacije matrice i vlakana za ojačavanje. Dostupan je u jednosmjernom obliku (sva vlakna posložena u jednom smjeru) i obliku tkanine (vlakna u nekoliko smjerova). Smola više nije u fazi niske viskoznosti, nego u B fazi umreživanja radi lakšeg rukovanja prepregom. U obliku preprega dostupni su slijedeći proizvodi: jednosmjerne trake, tkane tkanine, roving, i sjeckani mat. Prepreg mora biti čuvan u zamrzivaču na temperaturi ispod 0 °C kako bi se usporio proces umreživanja. Prepreg umrežuje pri povišenoj temperaturi u autoklavu, pećnici ili u toplinskim pokrivačima. Obično se kupuju i pohranjuju na roli u zatvorenoj plastičnoj vrećici kako bi se izbjegla kontaminacija preprega vlagom. [10]

Strukturna svojstva, kao što su krutost, stabilnost dimenzija i čvrstoća kompozitnog laminata, ovise o slijedu slaganja slojeva. Slijed slaganja opisuje raspodjelu orijentacija slojeva kroz debljinu laminata. Kako se broj slojeva s odabranim usmjerenjima povećava, moguće je više načina slaganja. [10]

Čvrstoća i krutosti kompozitne strukture također ovise o orijentacijskom slijedu slojeva. Praktični raspon čvrstoće i krutosti ugljičnih vlakana proteže se od vrijednosti tako niske kao one koje pruža polimer ojačan staklenim vlaknima do visoke kao one koje osigurava titan. Ovaj raspon vrijednosti je određen orijentacijom slojeva prema primijenjenom opterećenju. Dio može zahtijevati slojeve

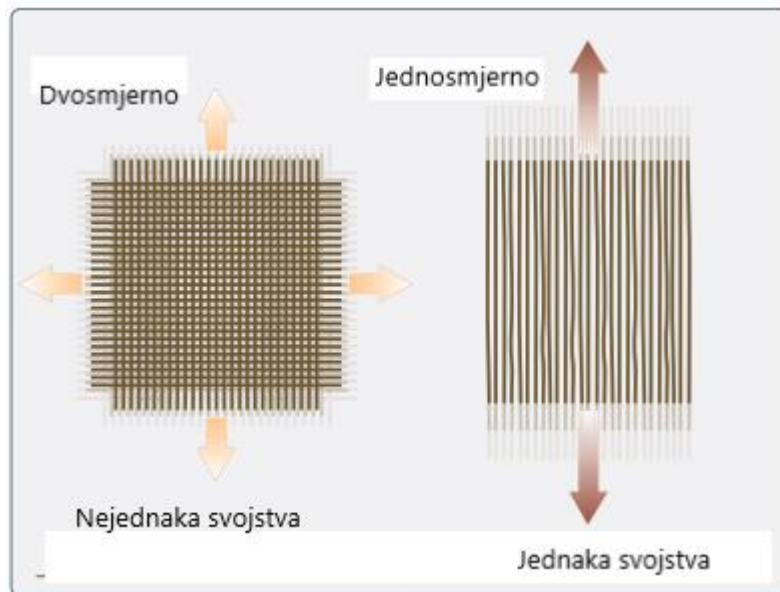
od  $0^\circ$  zbog aksijalnih opterećenja, slojeve od  $\pm 45^\circ$  zbog posmičnih opterećenja, a slojeve od  $90^\circ$  zbog bočnih opterećenja. Budući da su zahtjevi za projektiranjem čvrstoće funkcija smjera primijenjenog opterećenja, orijentacije slojeva i slijed slojeva moraju biti ispravni. Kod popravka je važno zamijeniti svaki oštećeni sloj sa slojem istog materijala i orijentacije. [10]

Vlakna su sve više zamijenila dijelove koji su prije bili izrađeni od čelika. Vlakna u kompozitnim materijalima pojavljuju se u različitim oblicima i mjerilima kao što je prikazano na slici 3.1.



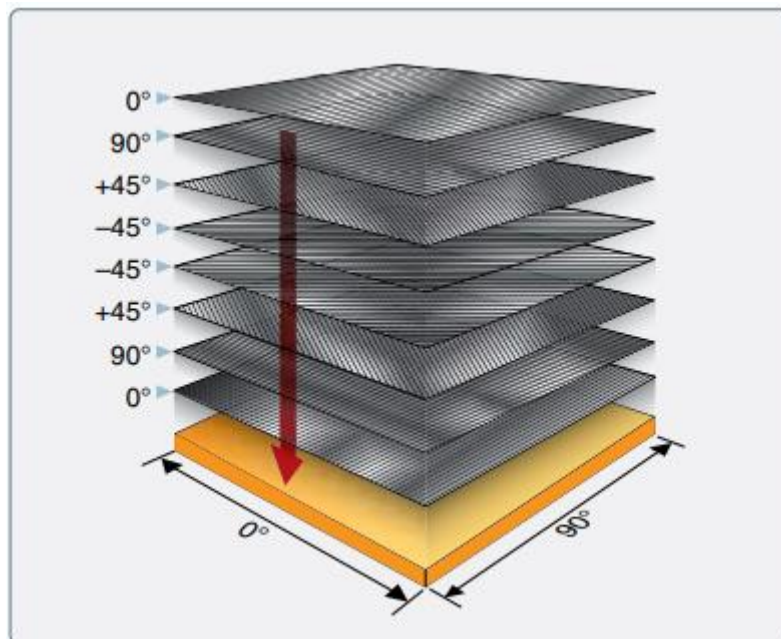
Slika 3.1. Različite vrste tkanja [9]

Vlakna u jednosmjernom materijalu idu u jednom smjeru, a čvrstoća i krutost postoje samo u smjeru vlakana. Vlakna u dvosmjernom materijalu idu u dva smjera i obično su zamaknuta za  $90^\circ$  jedan od drugoga. Ovakvi dvosmjerni materijali imaju čvrstoću u oba smjera, ali ne nužno istu čvrstoću (slika 3.2). [10]



Slika 3.2. Svojstva dvosmjernih i jednosmjernih tkanja [10]

Slojevi kvazi izotropnog polaganja naslagani su u nizu  $0^\circ$ ,  $-45^\circ$ ,  $45^\circ$  i  $90^\circ$  ili u nizu od  $0^\circ$ ,  $-60^\circ$  i  $60^\circ$  (slika 3.3). Ove vrste orijentacije sloja simuliraju svojstva izotropnog materijala.

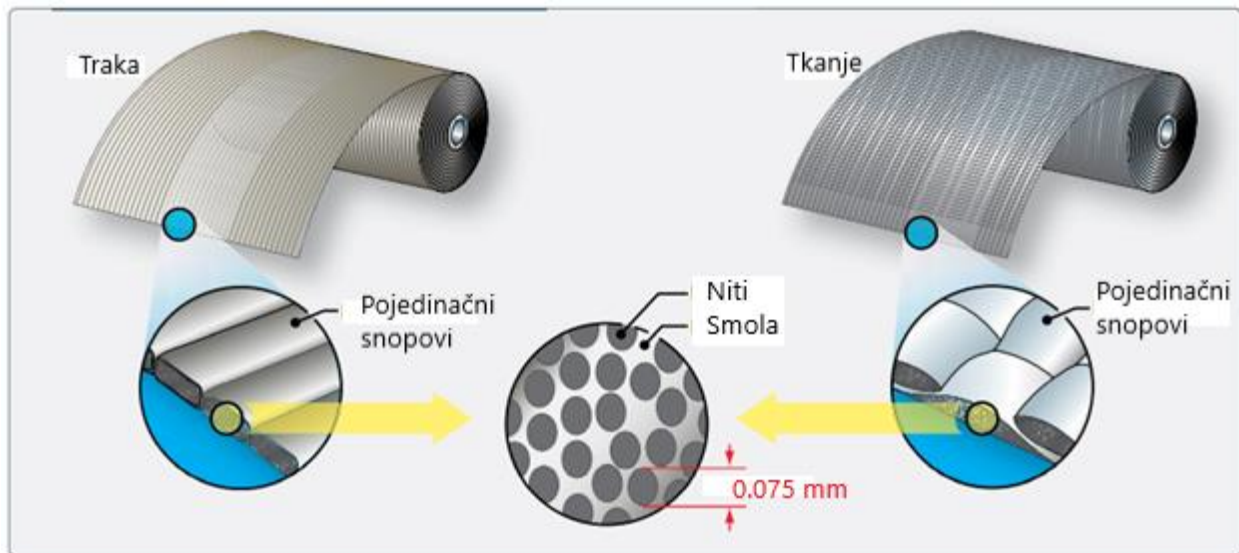


Slika 3.3. Kvazi izotropni način polaganja materijala [10]

Roving je jedna grupa vlakana, sva vlakna su istog smjera i nisu pletena. Ugljični rovinzi obično se identificiraju kao 3K, 6K ili 12K, gdje K označava 1000 vlakana. [10]

Jednosmjerne prepreg trake bile su standard u zrakoplovnoj industriji dugi niz godina, a vlakna su se obično impregnirala duromernim smolama. Najčešća metoda proizvodnje je provlačenje suhih

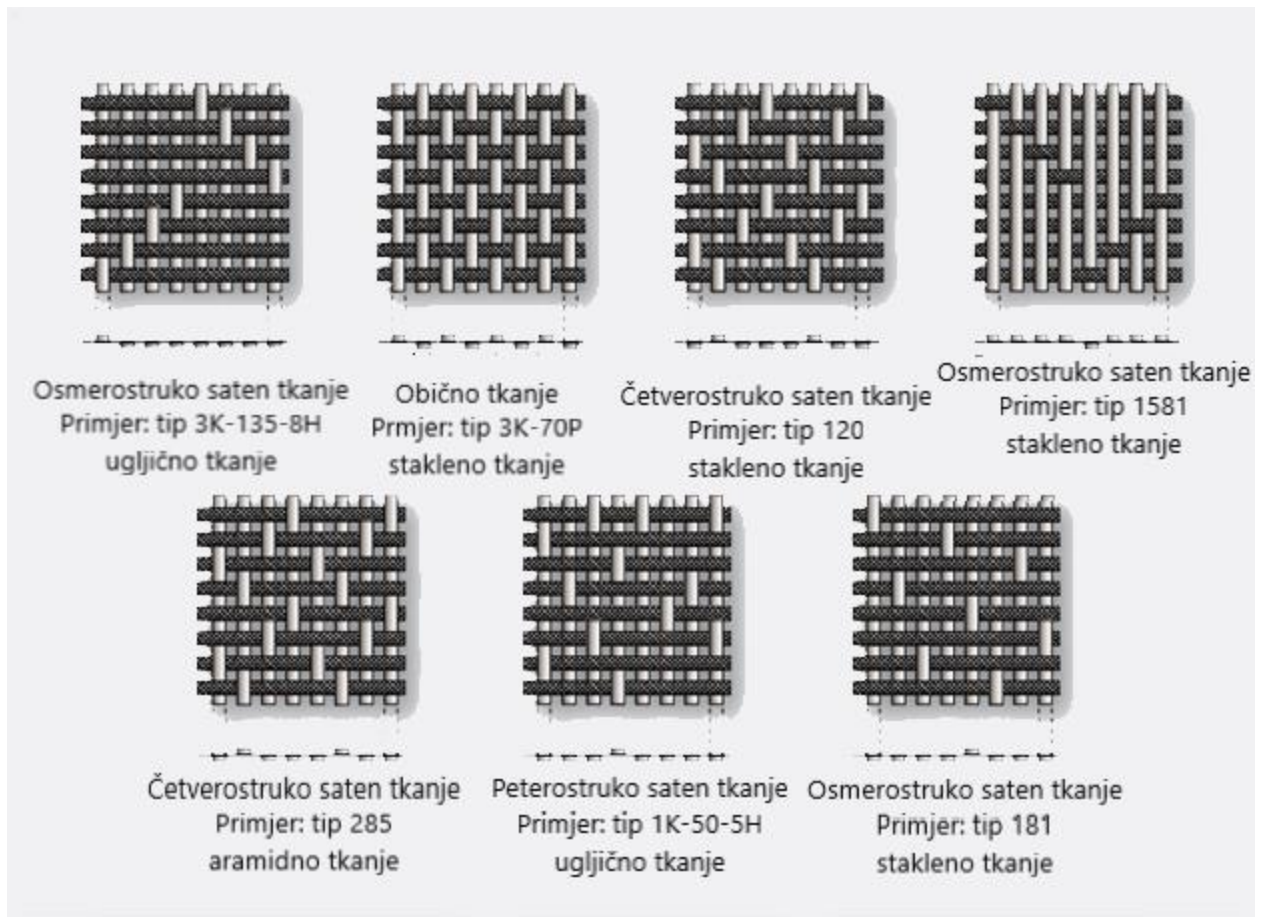
niti koje su poredane u istom pravcu kroz stroj za impregnaciju gdje se vruća otopina smole kombinira s nitima uz pomoć topline i pritiska (slika 3.4). Proizvedene trake imaju visoku čvrstoću u smjeru vlakana i praktički nema čvrstoće okomito na vlakna. Vlakna se drže na mjestu uz pomoć smole. Trake imaju višu čvrstoću od tkanja. [10]



Slika 3.4. Jednosmjerni materijali i tkanja [10]

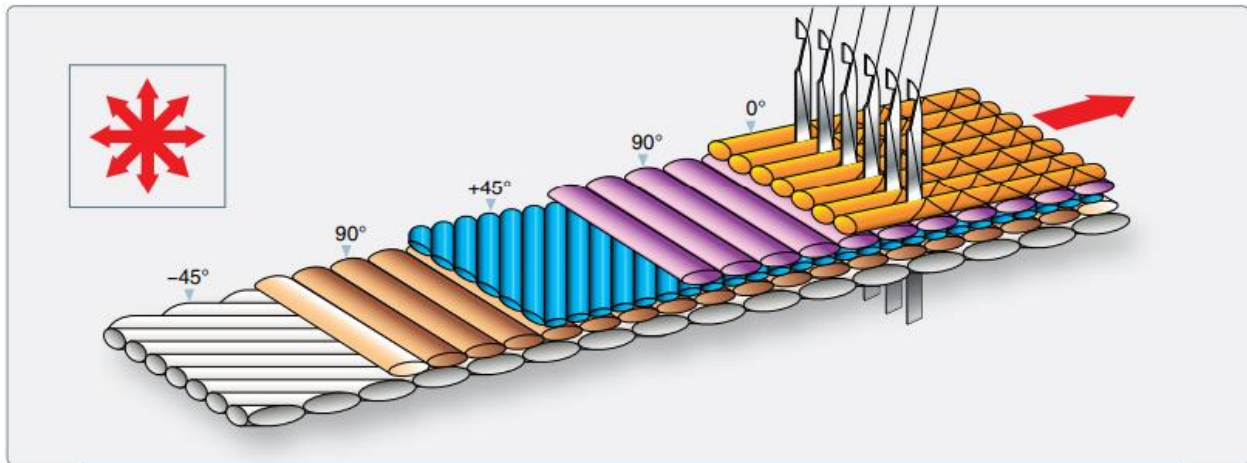
Većina konstrukcija od tkanine nudi veću fleksibilnost kod polaganja složenih oblika od jednosmjerne trake. Čvrsto tkane tkanine obično su izbor za uštedu na masi, minimiziranje veličine šupljina smole i održavanje orijentacije vlakana tijekom procesa izrade. Pletene strukturne tkanine obično se izrađuju s nitima ili pređama koje se međusobno isprepliću tijekom postupka tkanja (slika 3.5). Češći stilovi tkanina su obični ili satenski. Kod običnog tkanja (eng. *plain weave*) vlakna se naizmjenično izmjenjuju preko, a zatim ispod svake niti u suprotnom smjeru. S uobičajenim satenskim tkanjem (eng. *satın weave*) snopovi vlakana prelaze i u uzdužnom i u poprečnom smjeru i rjeđe mijenjaju položaj iznad/ispod. Ova satenska tkanja imaju manje nabora i lakše se deformiraju nego obično tkanje. Kod običnog tkanja i većine satenskih tkanja je jednak broj snopova u oba smjera. Keper tkanje (eng. *twill weave*) karakteriziraju dijagonalna rebra ili linija kepera na površini tkanine. Svaka pređa prelazi preko najmanje dva uzastopna snopa. Na primjer, 3K obična tkanja često imaju dodatnu oznaku kao što je 12 x 12, što znači da postoji dvanaest snopova vlakana po inču u svakom smjeru. Ova oznaka brojanja može se mijenjati kako bi se povećala ili smanjila težina tkanine.





Slika 3.5. Najčešća tkanja [10]

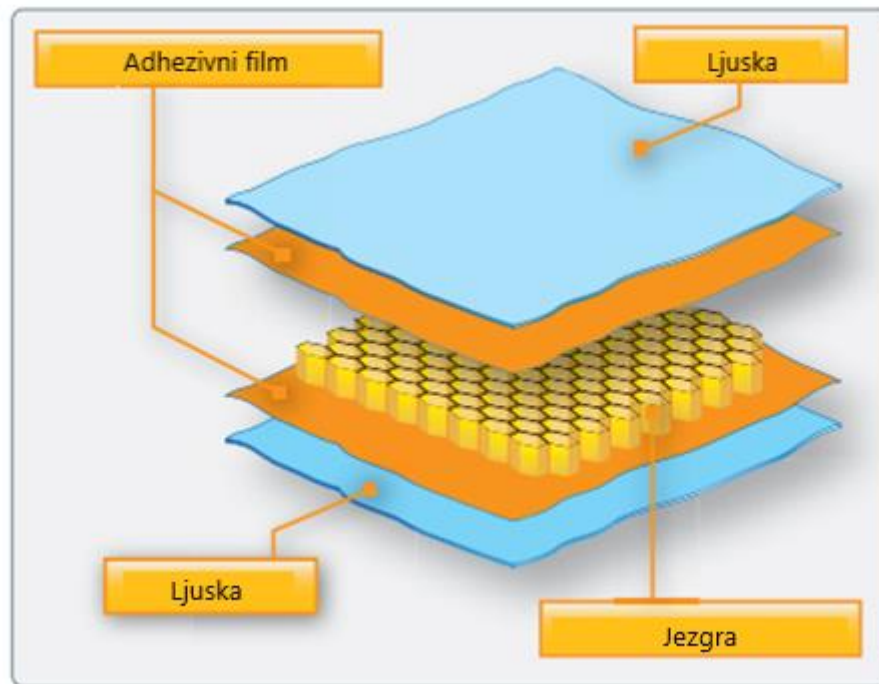
Pletene ili prošivene tkanine (slika 3.6) mogu ponuditi mnoge od mehaničkih prednosti jednosmjernih traka. Postavljanje vlakana može biti ravno ili jednosmjerno bez pletenja iznad pa ispod tkane tkanine. Vlakna se drže na mjestu šivanjem s finom pređom ili nitima nakon što se unaprijed odaberu usmjerenja jednog ili više suhih slojeva. Ove vrste tkanina nude širok raspon višeslojnih orijentacija. Iako možda ima dodane težine ili gubitka nekog konačnog ojačanja svojstva vlakana, mogu se realizirati neki dobici svojstava interlaminarnog smicanja i žilavosti. Uobičajene pređe za šivanje su poliester, aramid ili plastomer. [10]



Slika 3.6. Netkani materijali (prošiveni) [10]

### 3.2 Kompozitne sendvič konstrukcije

Koncept sendvič strukture uključuje kombiniranje dvije tanke i krute ljuske s debelom i relativno slabom jezgrom povezane najčešće adhezivnim filmom (slika 3.7). Spajajući jezgru između dvije ljuske dobiva se struktura superiorne krutosti i male težine. Kako jezgra često ima iznimna izolacijska svojstva, cijela sendvič struktura može se dalje karakterizirati izvrsnom toplinskom izolacijom i akustičnim prigušenjem na određenim frekvencijama. Sendvič strukture se primjenjuju u širokom rasponu primjene, kao što su automobili, rashladni transportni kontejneri, čamci za razonodu i komercijalna plovila, zrakoplovi, građevinske ploče itd. Materijali za ljuske u uobičajenoj upotrebi uključuju limove i vlaknima ojačane polimere, dok su uobičajeni materijali jezgre drvo balsa, saće i ekspanzirane polimerne pjene. Ovi materijali i kombinacije materijala imaju svoje tržište i jednu ili više prednosti kao što su niska cijena, visoka mehanička i toplinska svojstva, toplinska i zvučna izolacija, postojanost na gorenje, niska emisija dima, usklađenost, jednostavnost izrade, lakoća oblikovanja itd. Dok se koncept sendviča primjenjuje za različite primjene, tehnike koje se primjenjuju za proizvodnju komponenti obično su malobrojne i obično uključuju veliki stupanj ručnog rada. [10]



Slika 3.7. Presjek sendvič konstrukcije [10]

U nastavku je dan kratak pregled materijala i procesa koji se upotrebljavaju za proizvodnju sendvič konstrukcija, a mogli bi imati primjenu kod proizvodnje *monocoque* šasije.

Materijali koji se upotrebljavaju za proizvodnju ljuske sendvič konstrukcija mogu se podijeliti na vlaknima ojačane polimerne kompozite i druge materijale. [11] Polimerni kompoziti jedinstveni su kao materijali za ljuske po tome što se pod određenim uvjetima mogu laminirati izravno na jezgru. Ljuske se također mogu proizvesti u jednom koraku i zatim spojiti na jezgru u drugom koraku procesa proizvodnje. [10] Što se tiče polimera ojačanih vlaknima, svi sastavni dijelovi materijala koji se obično upotrebljavaju u primjenama kompozita također se upotrebljavaju kao sendvič materijali za ljuske. Ojačanja tako uključuju sve vrste stakla, ugljika i aramida, a slično se upotrebljavaju gotovo sve vrste polimera i duromera. Kad performanse tako nalažu, prethodno impregnirana jednosmjerna ili tkana armatura (prepreg) upotrebljava se za dobivanje ljuski visokih performansi i/ili da steknu neku proizvodnu prednost. Preprezi se obično sastoje od epoksidne matrice ojačane staklenim ili ugljičnim vlaknima. Kada su kompozitne ljuske izravno laminirane na jezgru u pomorskoj i transportnoj industriji, dominiraju staklena ojačanja u obliku nasumičnih prostirki, tkanina i njihove kombinacije, dok se kao matrice u takvim primjenama obično upotrebljavaju nezasićene poliesteri, a ponekad i vinil esteri. Kada se u zrakoplovnoj industriji ljuske laminiraju izravno na jezgru u pravilu se upotrebljavaju epoksidni preprezi ojačani s ugljičnim vlaknima. Međutim, i naprednije tvorevine u pomorskoj i transportnoj industriji obično upotrebljavaju različite vrste preprega u sve većem stupnju. Naravno, sve vrste kompozitnih ljuski

mogu biti unaprijed proizvedene u bilo kojem konvencionalnom procesu proizvodnje kompozita, što znači da se sve kombinacije materijala mogu primijeniti kao materijal za ljuske. [11]

Ljuske se mogu lako unaprijed proizvesti upotrebom smjese za kalupljenje u izravnom prešanju. Ove smjese za kalupljenje uključuju osmoljeni list (SMC), vlaknasti prepreg (BMC) i plastomer ojačan staklenim matom (GMT). SMC i BMC su spojevi na bazi duromera, obično nezasićenih poliestera, dok je GMT na bazi plastomera, obično polipropilena. U većini slučajeva, sve te smjese za oblikovanje su ojačane s diskontinuiranim i nasumično orijentiranim staklenim vlaknima. [11]

Ne kompozitni materijali za ljuske uvijek se proizvode u jednom koraku, a u drugom se vežu na jezgru. Uobičajeni primjeri uključuju drveni furnir, lim i neojačane polimere, iako ovo potonje rijetko rezultira strukturno sposobnom sendvič komponentom. Daleko najviše upotrebljavani materijal za ljuske u ovoj kategoriji je metalni lim, koji nudi dobra svojstva uz razumnu cijenu ali s većom masom. Primjene uključuju hladene transportne kontejnere i konstrukcijske elemente. [11]

Materijal koji je prvi korišten kao jezgra u sendvič konstrukcijama je drvo balsa, koje se još uvijek primjenjuje u nekim primjenama, iako alternativni materijali jezgre imaju tendenciju zamijeniti balsa u sve većem broju primjena. Najčešći materijali jezgre koji se primjenjuju u svim primjenama osim u zrakoplovstvu su ekspanzirane polimerne pjene. Gotovo svaki polimer može se ekspanzirati, ali oni koji se najčešće upotrebljavaju kod sendvič konstrukcija su poliuretani, polistireni, poli(vinil-klorid), poli(metakrilimid), poli(eter)imid i polifenoli. Poliuretanska pjena se može nanijeti na licu mjesta između ljuski i stoga se ne treba prethodno izliti u blokove. Takav način proizvodnje eliminira potrebu za formiranjem ili strojnom obradom složene geometrije jezgre. [11]

Iako se neke jezgre visokih performansi primjenjuju u zrakoplovstvu, jezgre u obliku saća jasno dominiraju nad alternativnim materijalima. Za izradu saća može se primijeniti nekoliko materijala: limovi, polimeri ojačani vlaknima, neojačani polimeri i folije. Najčešće jezgre u obliku saća temelje se na folijama od aluminijske i aramidnih vlakana umočenih u fenolnu smolu, pri čemu potonji ima trgovačko ime Nomex. [11]

Pjene su obično teže nego saće i nisu toliko čvrste. Razne pjene mogu se primijeniti kao temeljni materijal uključujući: [10]

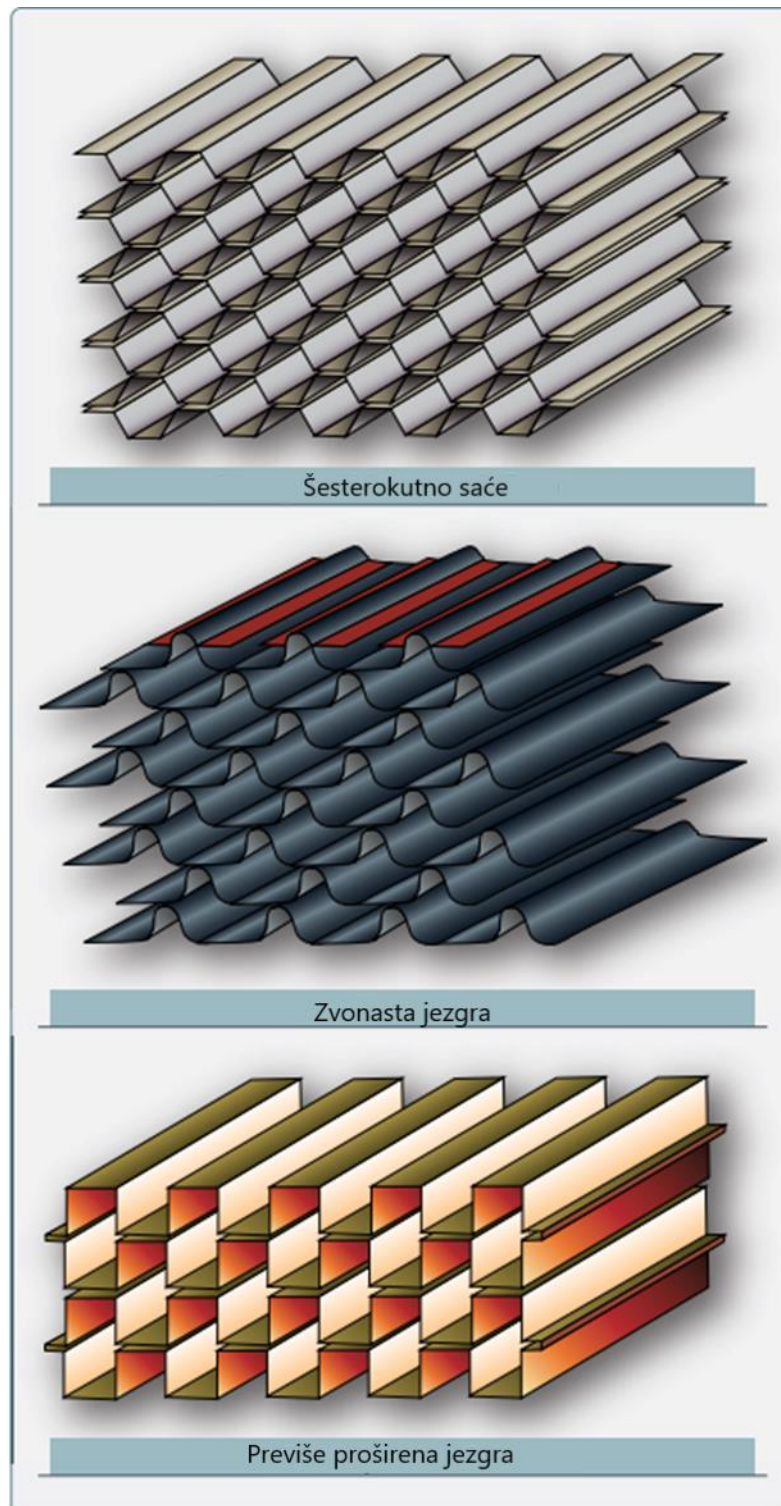
- polistiren (poznatiji kao stiropor) - kvalitetni stiropor sa čvrsto zatvorenom strukturom ćelija i nema praznina između ćelija, visoka tlačna čvrstoća i dobra postojanost na prodiranje vode, može se rezati vrućom žicom za izradu oblika aeroprofila
- fenoli - vrlo dobra vatrootporna svojstva i može imaju vrlo malu gustoću, ali relativno niska mehanička Svojstva
- poliuretani - primjenjuje se za izradu trupa, krila vrhovi i drugi zakrivljeni dijelovi malih zrakoplova, relativno jeftin, postojan na gorivo i kompatibilan s većinom ljepila, ne primjenjuje se rezanje vrućom žicom, lako se oblikuje velikim nožem i opremom za brušenje
- polipropilen - primjenjuje se za izradu oblika aeroprofila, može biti izrezati vrućom žicom, kompatibilan s većinom ljepila i epoksidnom smolom, nije za upotrebu s poliesterskim smolama, otapa se u gorivima i otapalima
- poli(vinil-klorid) (*Divynycell*, *Klegecell*, i *Airex*) - zatvorena ćelija srednje do visoke gustoće pjena s visokom pritiskom čvrstoćom, izdržljivošću i izvrsna postojanost na vatru, može se formirati u složene oblike pomoću podtlaka i savijati se pomoću topline, kompatibilan s poliestrom, vinil esterom i epoksidnim smolama
- polimetakrilimid (*Rohacell*) - pjena zatvorenih stanica primjenjuje se za laganu sendvič konstrukciju, izvrsno mehanička svojstva, visoka dimenzijska stabilnost pod toplinom, dobra postojanost na otapala, skuplja od drugih vrsta pjena, ali ima bolja mehanička svojstva.

Svaki materijal saća pruža određena svojstva i ima specifične prednosti: [10]

- kraft papir - relativno niske čvrstoće, dobra izolacija svojstva, dostupan je u velikim količinama i ima nisku cijenu
- plastomeri - dobra izolacijska svojstva, dobra apsorpcija i/ili preusmjerenje energije, glatke stijenke ćelija, postojanost na vlagu i kemikalije, ekološki su prihvatljivi, estetski ugodni, i imaju relativno nisku cijenu.
- Aluminijski - najbolji omjer čvrstoće i mase i apsorbirane energije, ima dobra svojstva prijenosa topline, elektromagnetska zaštitna svojstva, ima glatke i tanke stijenke ćelija, može se obrađivati i ima relativno nisku cijenu.
- Čelik - dobra svojstva prijenosa topline, elektromagnetska zaštitna svojstva i postojanost na toplinu.
- specijalni metali (titan) - relativno visok omjer čvrstoće i mase, dobra svojstva prijenosa topline, kemijska postojanost i postojanost na toplinu i na vrlo visoke temperature

- aramidni papir - postojan na vatru, ne podržava gorenje, dobra izolacijska svojstva, niska dielektrična svojstva, i dobra oblikovljivost
- staklena tkanja - prilagodljiva svojstva smicanja pomoću rasporeda slaganja (eng. *Layup*), niska dielektrična svojstva, dobra izolacijska svojstva i dobra oblikovljivost
- ugljik - dobra dimenzijska stabilnost i zadržavanje svojstava pri visokim temperaturama, visoka krutost, vrlo nizak koeficijent toplinske širljivosti, toplinska vodljivost može se prilagoditi, relativno visok modul smicanja, i vrlo skup
- keramika - postojana na toplinu pri vrlo visokim temperaturama, dobra izolacijska svojstva, dostupna je u vrlo malim veličinama ćelija i vrlo skupa.

Oblik ćelija saćastih jezgri je obično šesterokutni. Ćelije se izrađuju spajanjem naslaganih listova na posebnim lokacijama. Naslagani listovi se proširuju i oblikuju šesterokute. Prepolovljena šesterokutna jezgra ima još jedan list materijala koji prolazi preko svakog šesterokuta. Prepolovljena šesterokutna jezgra je tvrđa i jača od šesterokutne jezgre. Previše proširena jezgra izrađuje se širenjem listova više nego što je potrebno za izradu šesterokuta. Stanice prekomjerno proširene jezgre su pravokutne. Previše proširena jezgra je fleksibilna okomito na smjer razvlačenja jezgre i primjenjuje se u panelima s jednostavnim krivuljama. Zvonasta jezgra (eng. *Flexicore*) ima zakrivljene stanične stijenke koje ju čine fleksibilnom u svim smjerovima. Zvonasta jezgra se primjenjuje u pločama sa složenim krivuljama. [10] Vrste saćaste jezgre prikazane su na slici 3.8.



Slika 3.8. Vrste jezgre: (a) šesterokutno saće, (b) zvonasta jezgra (*flexicore*), (c) previše proširena jezgra [10]

Jezgra saća dostupna je s različitim veličinama ćelija. Male veličine pružaju bolju podršku za sendvič ljuske. Saće je također dostupno u različitim gustoćama. Jezgra veće gustoće je jača i čvršća od jezgre manje gustoće.

Strukturna ljepila općenito se isporučuju u obliku tankih filmova na papiru za odvajanje i pohranjuju se u rashlađenim uvjetima ( $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  ili  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Ljepila u obliku filma su dostupna zbog primjene visokotemperaturnih aromatičnih amina ili katalitičkih sredstva za stvrđivanje sa širokim rasponom sredstva za fleksibilnost i učvršćivanje. Često se primjenjuju epoksidna ljepila ojačana gumom. [10]

Adhezivni materijali u obliku folija su često ojačani vlaknima koja služe za poboljšanje rukovanja folijama prije očvršćivanja, kontrolu protoka ljepila tijekom lijepljenja i pomoć pri kontroli debljine adhezivnog sloja. Vlakna se mogu ugraditi kao prostirke od kratkih vlakana nasumične orijentacije ili kao tkana tkanina. Uobičajena vlakna su poliesteri, poliamidi i staklo. Ljepila koja sadrže tkaninu mogu imati blago degradirana svojstva zbog upijanja vode. Mat nije tako učinkovit za kontrolu debljine filma kao tkana tkanina jer se neograničena vlakna pomiču tijekom vezivanja. Pređe se ne pomiču i stoga se često upotrebljavaju. [10]



## 4 Postupci izrade kompozita ojačanih vlaknima

Prvi korak kod proizvodnje kompozita je spajanje komponenti kompozita - diskontinuirane faze i kontinuirane faze. U većini slučajeva, kontinuirana faza je polimer. Neki primjeri diskontinuirane faze su staklena vlakna ili ugljična vlakna, koja mogu biti tkana, pletena, prošivena ili spojena zajedno da tvore tkaninu ili pletivo. Način slaganja (eng. *Layup*) je pojam koji najčešće opisuje ovaj proces. Ručno laminiranje i naštrcavanje su dvije najčešće vrste polaganja. Ručno laminiranje dalje se klasificira na suho i mokro polaganje. Tijekom suhog polaganja, suha tkanina se postavlja jedna preko druge kako bi se formirao slojeviti snop. Kontinuirana faza, smola, ubrizgava se kroz ovaj snop. [12]

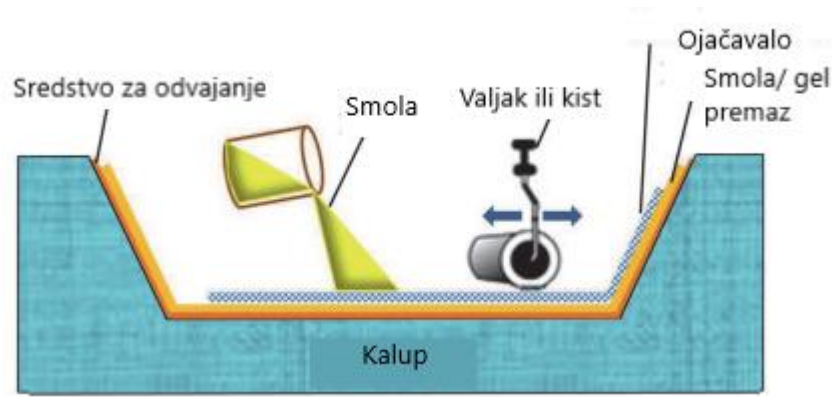
U nastavku će biti opisani samo neki od postupaka koji će se primijeniti u eksperimentalnom dijelu rada.

### 4.1 Mokro laminiranje

Mokro laminiranje je jedno od najstarijih, ali još uvijek najčešće korištenih metoda za proizvodnju sendvič komponenti s kompozitnim plohamama. Metoda je vrlo fleksibilna ali je radno intenzivna i stoga je najprikladnija za male proizvodne serije posebno velikih struktura.

Mokro polaganje laminata može se izvesti bilo ručnim polaganjem vlakana ili naštrcavanjem. Proces ručnog polaganja primjenjuje jednostrani kalup, pozitivni ili negativni, koji se obrađuje s odvajalom koje omogućuje naknadno skidanje proizvoda s površine kalupa (eng. *Release agent*). Gelna prevlaka nanosi se izravno na kalup i dopušteno gelira prije početka laminiranja. Smola za gelnu prevlaku obično je visoke kvalitete i ima dobru postojanost na okoliš, čime se omogućuje korištenje jeftinije smole niže kvalitete unutar stvarnog laminata. Gelna prevlaka također proizvodi glatku, kozmetički privlačnu površinu koja skriva ojačanu strukturu, koja inače može biti vidljiva na kompozitnoj površini. [11]

Odgovarajuća količina smole se nanosi i raspoređuje na vrh kalupa, nakon čega se postavlja suha ojačanja, obično u obliku prostirke i tkanine na vrhu (slika 4.1). Smola se utiskuje u ojačavalo (prema gore, kroz vlakna) s ručnim valjkom, koji također zbija laminat i obrađuje praznine. Nakon jednog ojačanja, ako je sloj na zadovoljavajući način impregniran i zbijen, korak impregnacije se ponavlja do željenog broja slojeva ojačavala ili željene debljine laminata. Proces mokrog polaganja se često završava završnim premazom koji je po funkciji i sastavu sličan gelnoj prevlaci. [11]



Slika 4.1. Mokro polaganje [9]

## 4.2 Podtlačno ulijevanje smole

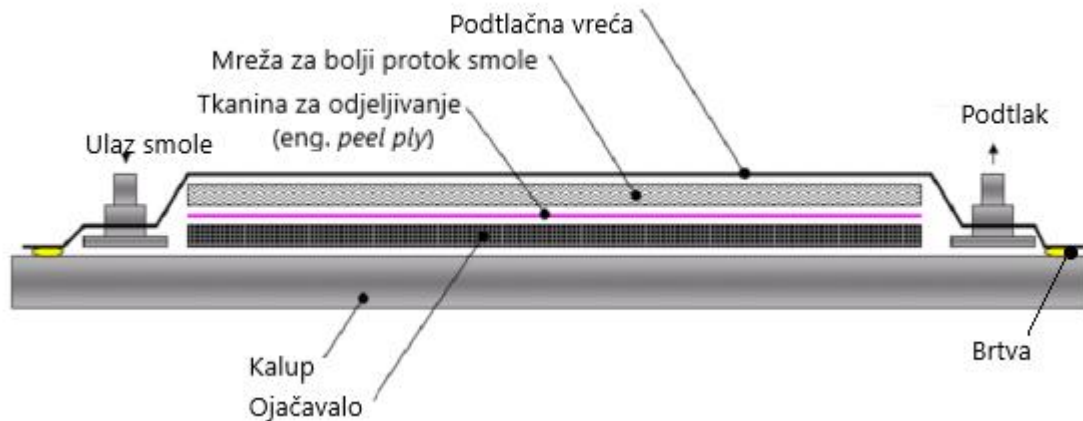
Uz sve veću potražnju za bržom proizvodnjom, počeli su se primjenjivati alternativni postupci proizvodnje za zamjenu ručnog laminiranja, a proizvođači su se poticali da automatiziraju te procese gdje god je to moguće. [13]

Proces podtlačnog ulijevanja (eng. *Vacuum infusion process*) (slika 4.2) koristi podtlak za provođenje smole kroz laminat. Suhi materijali se polažu u kalup i postiže se podtlak prije unošenja smole. Nakon što se postigne potpuni podtlak, smola se ubrizga u laminat putem pažljivo postavljenih cijevi. [14] Poboljšanje u odnosu na metodu mokrog polaganja je korištenje podtlačne vreće i drugih materijala za odvajanje viška smole iz laminata. Podtlačno ulijevanje uvelike poboljšava omjer vlakana i smole te rezultira jačim i lakšim proizvodom. [13]

Postupak podtlačnog ulijevanja nudi bolji omjer vlakana i smole od postupka podtlačnog oblikovanja vrećom. Tipično ručno laminiranje obično rezultira s viškom smole od preko 100 % težine tkanine. Sama smola je vrlo krhka, pa će svaki višak zapravo oslabiti proizvod. Podtlačno oblikovanje vrećom može značajno smanjiti ovaj broj, međutim, to još uvijek nije idealno i može dovesti do dodatnih problema. [13]

Kod podtlačnog ulijevanja podtlak se postiže dok su materijali još suhi. Od tog trenutka, smola se unosi u laminat pomoću podtlaka. Umjesto da počne sa suviškom i izvlačenjem smole, proces podtlačnog ulijevanja počinje bez smole i vuče smolu u proizvod. U idealnom slučaju, svaki višak smole koji se unese na kraju će biti isisan u podtlačni vod. Kao rezultat, unosi se samo minimalna količina smole. To smanjuje masu, povišuje čvrstoću i poboljšava svojstva vlakana i smole. Dijelovi izrađeni pomoću postupka podtlačnog ulijevanja mogu imati udjele smole približne onima koje imaju preprezi. Zbog prirode postupka podtlačnog ulijevanja, upotreba smole postaje vrlo predvidljiva. Čak i pri proizvodnji veće količine proizvoda, količina upotrijebljene smole bit

će slična u svakom od proizvoda. To rezultira manjom potrošnjom smole, i što je još važnije, manjim gubitkom novca. [13]



Slika 4.2. Podtlačno ulijevanje [14]

### 4.3 Postupak podtlačnog oblikovanja vrećom u autoklavu

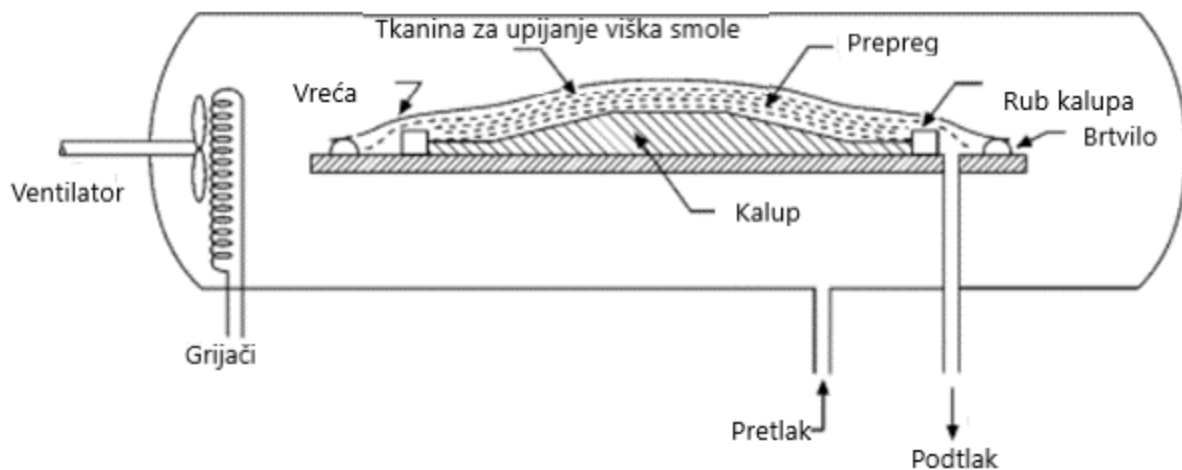
Postupak podtlačnog oblikovanja vrećom u autoklavu odnosi se na metodu umreživanja kompozitnog laminata zapečaćenog u vreći pod pritiskom i temperaturom koja nastaje zagrijavanjem plina u autoklavu (slika 4.3). [15]



Slika 4.3. Autoklav [15]

Postupak podtlačnog oblikovanja u autoklavu (slika 4.4) vrlo je sličan postupku podtlačnog oblikovanja, s nekoliko promjena. Toplinu i tlak, koji su potrebni preprezima tijekom faze očvršćivanja, osigurava stroj koji se zove autoklav. Ovaj postupak uključuje čvrsto slaganje preprega u kalup slijedeći određeni slijed. Sredstvo koje omogućuje naknadno skidanje proizvoda s površine kalupa (odvajalo) nanosi se kako bi se izbjeglo lijepljenje između proizvoda i površine kalupa. Osim toga, ovaj postupak omogućuje primjenu jezgri i umetaka. Zatim slijedi pakiranje

proizvoda i kalupa u vreću kako bi se uklonio sav zarobljeni zrak između slojeva. Nakon toga, cijeli sklop se premješta u autoklav, gdje se primjenjuju toplina i pritisak kako bi se omogućila ravnomjerna i učinkovita raspodjela matrice, kao i dobro prijanjanje na međufaznu površinu ili vezanje matrice vlakana u određenom vremenskom intervalu. Ova faza se zove umreživanje. Kompozitna komponenta nakon hlađenja sklopa uklanja se iz kalupa nakon što se ukloni vreća i ostali potrošni materijali. [15] Optimizacija primjene pretlaka i podtlaka spriječit će pojavu suhih laminata (kada se pritisak primjenjuje prerano i smola niske viskoznosti se istiskuje) i poroznih laminata (pritisak primijenjen prekasno kod visokoviskoznih očvrsljih smola). Mogu se proizvesti dosljedni proizvodi visoke kvalitete, ali je proces spor i skup. Tipični sustavi uključuju preprege s epoksidnom smolom i ugljičnim vlaknima i preprege s epoksidnom smolom i staklenim vlaknima za računalne i zrakoplovne aplikacije. [16]



Slika 4.4. Postupak podtlačnog oblikovanja u autoklavu [16]

Postupak podtlačnog oblikovanja vrećom pomoću autoklava obuhvaća sljedeće prednosti: [15]

- bolje prijanjanje među slojevima
- dobra kontrola vlakana i smole
- pravilno i dovoljno vlaženje vlakana
- visoki stupanj ujednačenosti u skrućivanju komponenti
- podržava visoku volumnu frakciju vlakana u kompozitnoj komponenti
- odsutnost šupljina u završnoj komponenti zbog prednosti postupka pakiranja u podtlačnu vreću
- postiže se bolja međufazna veza s umecima i jezgrama
- primjena u proizvodnji dijelova s visokim omjerom čvrstoće i težine.

Zbog spomenute prednosti procesa oblikovanja u autoklavu za proizvodnju polimernih kompozita ojačanih vlaknima, ovaj proces se naširoko primjenjuje za proizvodnju brojnih inženjerskih dijelova uglavnom od strane zrakoplovnih, pomorskih i vojnih tvrtki. Ovi proizvodi uključuju, ali nisu ograničeni na komponente zrakoplova, vojne, pomorske i svemirske letjelice, kao i projekte. [15]

Postupak podtlačnog oblikovanja vrećom pomoću autoklava ima nekoliko sljedećih nedostataka: [15]

- niska stopa proizvodnje
- ograničenje veličine kompozitne komponente, što ovisi o veličini autoklava
- uključivanje kvalificirane radne snage
- skupa tehnika za obradu kompozita.

S obzirom da upotreba kompozita brzo raste u području zrakoplovstva i ostalim granama, potrebno je poboljšati učinkovitost proizvodnje. Budući da je metoda podtlačnog oblikovanja u autoklavu dugotrajan postupak u više koraka, nedavno je uspostavljen cjelobrojni model programiranja za rješavanje problema rasporeda autoklava. Druga takva studija uključivala je oblikovanje polimernih kompozitnih materijala za smanjenje vremena proizvodnje i ručnog rada, potrošnje energije i energetske učinkovitosti opreme za autoklav. [17]

## 5 Umeci

Umetak je dio odvojivog sustava koji omogućuje međusobno povezivanje sendvič strukture s jezgrom. Umetak je veza između sendvič konstrukcija i drugih strukturnih dijelova, npr. okvira, profila, nosača i montažne opreme kao što su. kutije, napojni vodovi, kabelski kanali. Sustav umetaka se sastoji od uklonjivog i fiksnog strukturnog elementa. Dio koji se može ukloniti je vijak ili drugi element s navojem prilagođen dijelu nalik matici. Umetak je često povezan sa saćastom jezgrom primjenom adheziva, obično dvodijelni sustav epoksidne smole. [18]

Sustav umetaka sastoji se od tri glavne komponente: umetka, sendvič strukture i materijala za spajanje umetka sa sendvič konstrukcijom.

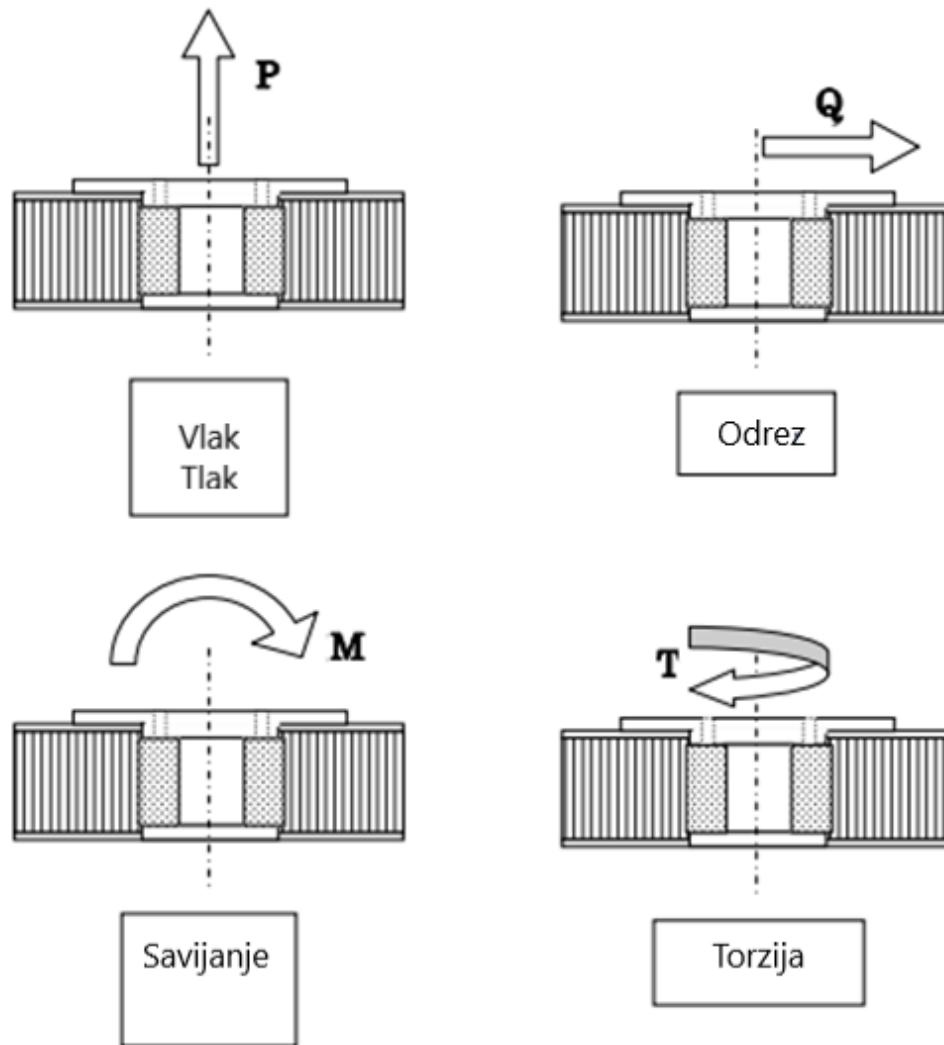
Stavke koje čine sustav umetaka dane su u tablici 5.1.

Tablica 5.1. Sustav umetaka - definicija [18]

<b>Sustav umetka</b>	<b>Umetak</b>	Muški navojni element
		Ženski navojni element (fiksni ili zamjenjiv)
	<b>Metoda spajanja</b>	Mehaničko spajanje ili spajanje vijcima (ne preporuča se)
		Spajanje smolom istovremeno tijekom proizvodnje sendvič konstrukcije ili ugradnja u postojeću konstrukciju ( <i>potting</i> ili sličnom metodom)
	<b>Sendvič konstrukcija</b>	Ljuska
		Vezna komponenta (adhezivni film)
		Jezgra

### 5.1 Opterećenja umetaka

Osnovni tipovi opterećenja umetaka prikazani su na slici 5.1.



Slika 5.1. Vrste opterećenja umetaka [18]

Doprinos dijelova sendvič konstrukcije na nosivost umetka prikazana je u tablici 5.2.

Tablica 5.2. Doprinos dijelova sendvič strukture na nosivost umetka [18]

Vrsta opterećenja	Doprinos dijelova sendvič konstrukcije na nosivost opterećenja		
	Jezgra	Ljuska	Jezgra/ spoj jezgre
Rastezno opterećenje	visok	srednji	vrlo nizak (*)
Pritezno opterećenje	visok	srednji	Nizak
Smik	nizak	visok	vrlo nizak (*)
Savijanje	visok	srednji	Nizak
Torzija	visok	nizak	Nizak

Bilješka (\*): Doprinos u slučaju primjene nemetalnih ljuski treba ponovno razmotriti.


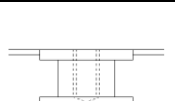
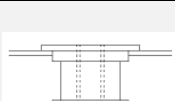
Svojstva ljuski određena su svojstvima primijenjenih materijala npr. metala ili kompozita. Savojna krutost ljuski utječe na nosivost umetka kod prijenosa rasteznih i priteznih opterećenja. Kod smičnih opterećenja u ravnini na izotropnim ljuskama, granica popuštanja prednje ljuske relevantna je za sposobnost opterećenja umetka. Način kvara je pritežno izvijanje prednje ljuske. Anizotropna ljuska kod smicanja u ravnini, npr. kompozitna struktura ojačana ugljičnim vlaknima, može puknuti na različite načine. Modul smicanja jezgre utječe na način na koji se opterećenje koje se prenosi kroz umetak raspoređuje između ljuski i jezgre. Što je veća krutost jezgre, manji je doprinos opterećenja ljuski. [18]

## 5.2 Podjela umetaka

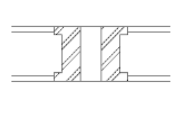
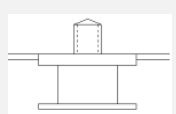
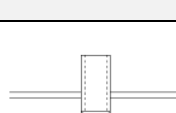

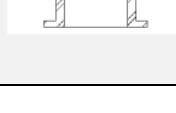
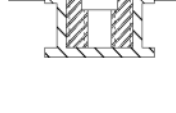


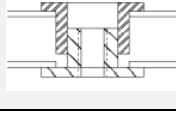
Postoje tri vrste umetaka koje se razlikuju po načinu integracije u sendvič strukturu sa saćastom jezgrom (tablica 5.3.):

- grupa A za lijepljenje tijekom proizvodnje sendviča
- grupa B za postojeći sendvič koji primjenjuje duromernu smolu:
  - uobičajeni postupak spajanja standardnih umetaka (*potting*)
  - ekvivalentni postupak lijepljenja za nestandardne umetke
- grupa C za mehaničko stezanje ili uvrtnje u postojeći sendvič.

Tablica 5.3. Tipovi umetaka [18]

Oblik	Promjer (mm)	Materijal	Način spajanja	Osiguranje prijenosa momenta	Osiguranje od odvrtnja	Mogućnost zamjene matice	Komentar
<b>Grupa A: Lijepljenje tijekom proizvodnje sendviča</b>							
	17 do 30	Al	Potpuno povezano punilom za jezgru	Bez ili pravokutni oblik	Adhezivno sredstvo	Ne	Bušenje rupe nakon spajanja umetka. Samo za male visine jezgre
<b>Grupa B: Spajanje sa sendvič strukturom primjenom duromerne smole (<i>potting</i> ili ekvivalentni postupci)</b>							
	11 do 22	Al (St) (Ti)	Djelomično ili potpuno spajanje ( <i>potting</i> )	Oblikom umetka	Deformacija navoja	Ne	Najčešći oblik
	11 do 22	Al (St) (Ti)	Djelomično ili potpuno spajanje ( <i>potting</i> )	Oblikom umetka	Deformacija navoja	Ne	Rijetko se primjenjuje



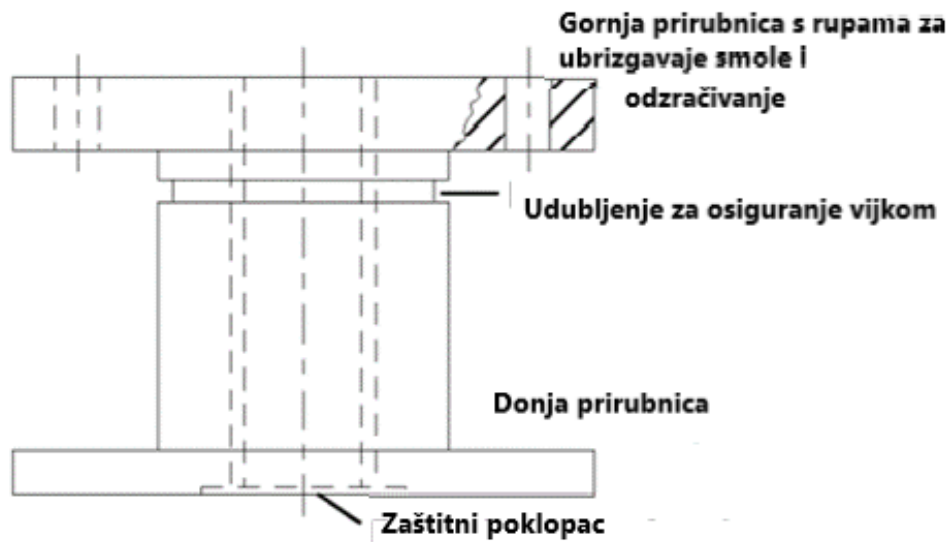
	11 do 14	Al	Potpuno spajanje (potting)	Oblikom umetka	Adhezivno sredstvo	Ne	Dostupno s navojem i bez navoja
	6 do 14	St Ti	Djelomično ili potpuno spajanje (potting)	Oblikom umetka	Adhezivno sredstvo	Ne	Rijetko se primjenjuje
	3 do 6	St Ti	Djelomično ili potpuno spajanje (potting)	Oblikom umetka	Adhezivno sredstvo	Ne	Samo za vrlo niska opterećenja, rijetko se primjenjuje
	19 do 70	Al	Djelomično ili potpuno spajanje (potting)	Oblikom umetka	Adhezivno sredstvo	Ne	Za visoka opterećenja
	19 do 25	Al: umetak St: matica	Djelomično ili potpuno spajanje (potting)	Oblikom umetka	Deformacija navoja	Da	Produženi i teški tip za primjenu plutajućih matica
	7 do 20	CFRP/ Al	Ugljična cijev povezana s jezgrom	-	Adhezivno sredstvo	Ne	Umetak od cijevi s ugljičnim vlaknima
	-	-	-	-	-	-	-
<b>Grupa C: Mehaničko stezanje ili uvrtnje u postojeći sendvič</b>							
	14 do 22	Al (St) (Ti)	-	Spajanje adhezivom	Deformacija navoja	Ne	Niska sila izvlačenja ako nije povezan s jezgrom.
	14 do 22	Al (St) (Ti)	-	Spajanje adhezivom	-	Ne	-

### 5.2.1 Grupa A: Lijepljenje tijekom proizvodnje sendviča

Ovi umeci primjenjuju se samo za razmjerno tanke sendvič konstrukcije, odnosno male debljine jezgre te se primjenjuje samo ako ne postoje specifični zahtjevi za osiguranje. Poprilično je teško pozicionirati umetke točno u poziciju za potrebe povezivanja. Iz tog razloga umetak ima veliki promjer kako bi se omogućilo naknadno bušenje rupe i rezanje navoja, a ostavlja se između 3 mm i 6 mm za grešku kod pozicioniranja.

### 5.2.2 Grupa B: Spajanje sa sendvič strukturom primjenom duromerne smole (potting i ekvivalentni postupci)

Najvažnija skupina su umeci zaliveni epoksidnom smolom. Umetak koji se ugrađuje spajanjem sa saćastom jezgrom sendvič strukture, ima osnovni oblik kako je prikazano na slici 5.2.



Slika 5.2. Standardni oblik umetka [18]

Standardni oblik umetka je šuplje cilindrično tijelo s prirubnicama na krajevima. Diskovi i prirubnice osiguravaju vezu oblikom sa smolom i sprječavaju prijenos primijenjenih opterećenja samo posmičnim silama prianjanja između smole i umetka. Gornja prirubnica ima probušene dvije rupe, jedna za ubrizgavanje smole kod spajanja umetka i jezgre te jedna za odzračivanje. Cilindrični presjek i donja prirubnica imaju rebrastu površinu ili je donja prirubnica zaravnata na suprotnim stranama. Obje izvedbe povećavaju prijenos posmičnog opterećenja kada je umetak izložen torziji. Tanka kružna ploča u donjoj prirubnici štiti navoj od kontaminacije smolom tijekom ugradnje. Udubljenje u gornjem dijelu cilindričnog tijela omogućuje deformaciju navoja pritiskom kako bi se spriječilo odvrtnje vijka. [18]

### 5.2.3 Gupa C: Mehaničko stezanje ili uvrtanje u postojeći sendvič

Mehanički pričvršćeni umeci imaju značajne nedostatke: [18]

- niska nosivost jer nema izravne veze sa jezgrom sendvič konstrukcije
- individualno prilagođena veličina za svaku visinu jezgre
- prijenos momenta moguć samo lijepljenim spojem.

### 5.3 Metode spajanja umetka s jezgrom

Četiri različite metode spajanja umetka s jezgrom (eng. *potting*) opisane su u tablici 5.4.

Tablica 5.4. Metode spajanja umetka s jezgrom [18]

Metoda spajanja	Uređaj	Razina spajanja	Očekivano popunjavanje	Komentari
Lijevanje	Lijevak	Potpuno	Vrlo dobro	Izvediva metoda, ali nije praktična. Rezervoar smole je potreban iznad svakog umetka do potpunog umreživanja zbog skupljanja smole.
		Djelomično	Loše	Više se ne primjenjuje. Ploče se moraju okrenuti prije umrežavanja.
Ubrizgavanje	Patrone s komprimiranim zrakom	Potpuno Djelomično	Dobro (*) Dobro	Vrlo ekonomična metoda kada se radi veći broj umetaka.
	Ručno nanošenje medicinskim injekcijama	Potpuno Djelomično	Dobro (*) Dobro	Uobičajeno za manji broj umetaka odnosno za popravke. Ubrizgavanje omogućuje rukovanje sa sendvič strukturom neposredno nakon spajanja.
Pjenom	Bez korištenja uređaja	Potpuno	Dobro	Obično kada se umeci spajaju tijekom postupka proizvodnje sendvič strukture.
Nanošenje paste	Špahtla	Potpuno Djelomično	Loše	Ne preporučuje se za standardni postupak spajanja to jest kod popunjavanja ćelija saćaste jezgre.

Bilješka (\*): 100 % popunjavanje nije moguće jer mala količina zraka uvijek ostaje zarobljena na vrhu ćelije jezgre.

### 5.3.1 Ubrizgavanje

Ubrizgavanje je najčešće primijenjena metoda spajanja umetaka s jezgrom zbog prednosti kada se radi veći broj umetaka. Dostupan je veliki izbor veličina, oblika i dimenzija jer su umeci razvijeni odvojeno u raznim zemljama od strane različitih tvrtki. Proizvodi se mogu grupirati kao: [18]

- komercijalno dostupni, standardizirani
- dizajnirani i proizvedeni za određenu primjenu, nestandardni
- na temelju standardnog dizajna umetaka, gdje su dimenzije ili primijenjeni materijali različiti
- novi dizajn umetka npr. umeci proizvedeni od polimera ojačanih ugljičnim vlaknima.

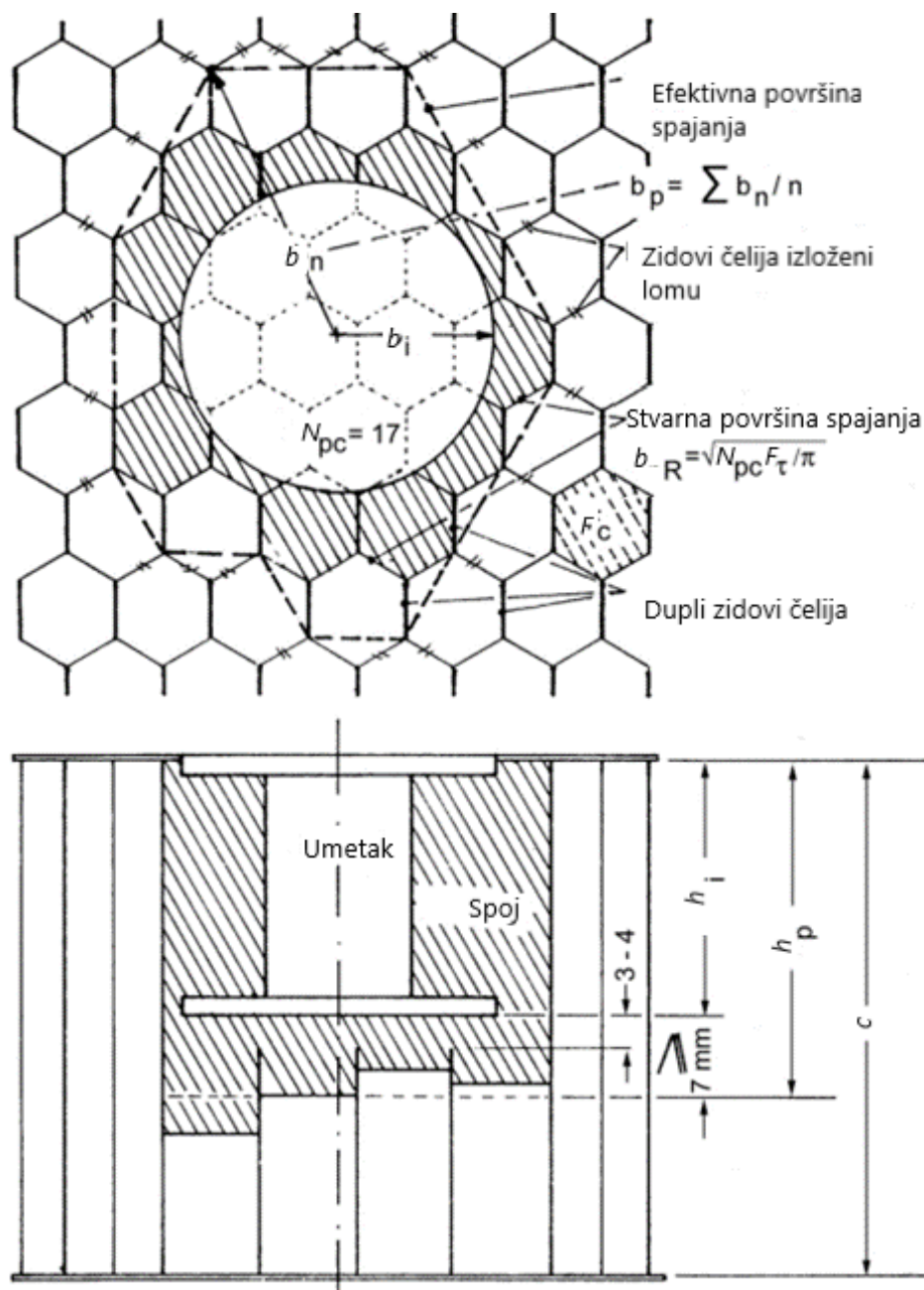
Većina standardnih komercijalno dostupnih umetaka izrađena je od određenih vrsta metala ili njihove kombinacije, a to su: [18]

- legure aluminijske
- legure titana
- čelici (ugljični čelici, nehrđajuće legure).

Nestandardni umeci mogu biti izrađeni od istih ili različitih vrsta metala ili, u novije vrijeme, od kompozita ojačanih ugljičnim vlaknima. Obično su umeci izrađeni od aluminijske legure AlCuMg<sub>2</sub> (DIN), toplinski su obrađeni i prirodno ili umjetno starenj. Titanska legura TiAl6V4 (toplinski obrađena i starena) upotrebljava se za primjene u kojima je potrebna poboljšana čvrstoća ili su potrebna posebna svojstva osiguranja. Ponekad se upotrebljava čelik npr. ugljični čelik u toplinski obrađenom stanju i kaljeni vodom. Umetci izrađeni od ugljičnog čelika uvijek su presvučeni kadmijem. Ugljični čelici zamjenjuju se nehrđajućim čelicima npr. 1.4305 prema DIN 17007. [18]

### 5.4 Nosivost umetka

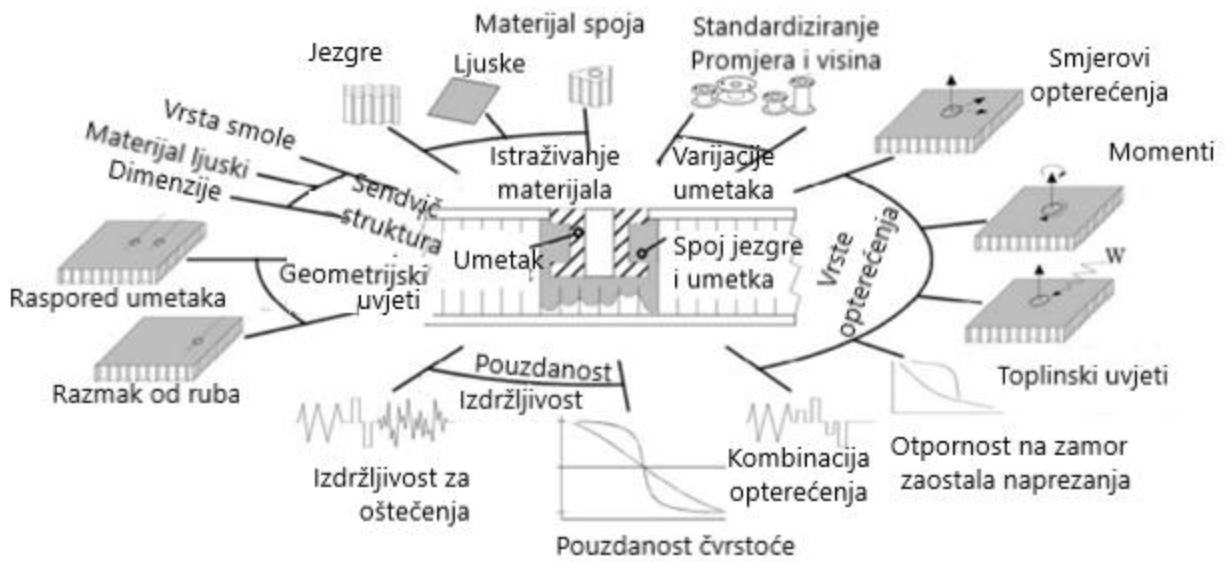
Za razliku od dimenzija umetka, dimenzije spajanja umetka i jezgre (eng. *potting*) imaju odlučujući utjecaj na nosivost umetka. Relevantne dimenzije, prikazane na slici 5.3., su: efektivni polumjer spajanja  $b_p$ , stvarni polumjer spajanja  $b_R$  i visina spajanja,  $h_p$ .



Slika 5.3. Relevantne veličine kod proračuna nosivosti umetka [18]

### 5.5 Parametri projektiranja umetka

Konstruktori koji odluče primijeniti umetke suočavaju se s velikim brojem opcija i nestandardiziranih parametara koje je potrebno razmotriti a odnose se na geometriju, materijal, opterećenja, načini kvara i posebna ograničenja. Neki od parametara su već dostupni npr. globalna krutost, toplinska stabilnost ili aspekti stabilnosti i funkcionalnosti. Spoj umetka se konstruira za postojeću konstrukciju, ali konstruktor ima mogućnost napraviti lokalne promjene globalne strukture kako bi se dobio bolji spoj pomoću umetka. Slika 5.4 ilustrira različite alternative dizajna i parametara.



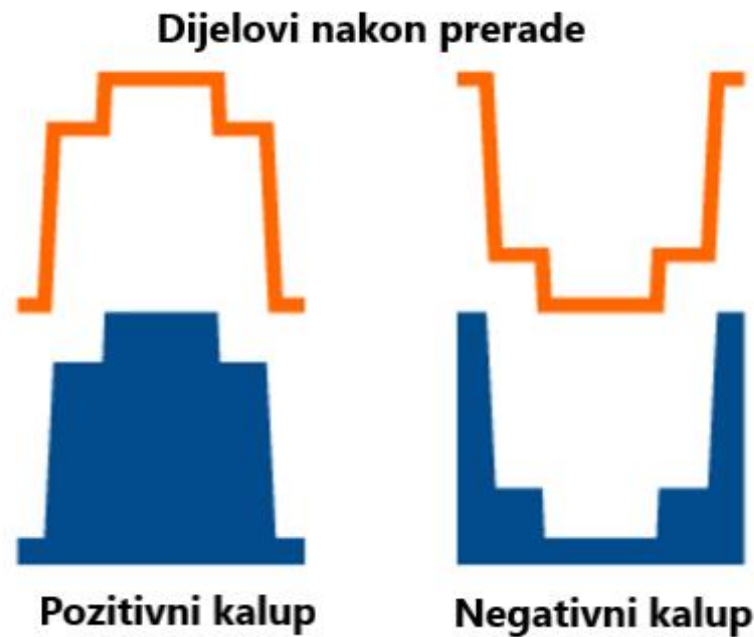
Slika 5.4. Osnovni aspekti konstrukcije, analize i ispitivanja umetaka [18]

## 6 Postupak prerade kompozitne monocoque šasije

### 6.1 Kalupi za proizvodnju kompozitnih dijelova

U nastavku su opisani osnovni pojmovi vezani za proizvodnju kalupa, te je obrazložen proces odabira materijala i procesa za proizvodnju kalupa.

Pozitivni i negativni kalupi su dvije osnovne vrste oblika, ali daju značajno različite gotove dijelove (slika 6.1). Najbrža i najjeftinija metoda je primjena pozitivnog kalupa odnosno žiga (eng. *positive mold*). Ovaj kalup oponaša konačni oblik proizvoda, a proizvod se oblikuje preko vanjske površine kalupa. Ova vrsta kalupa brža je za izradu, ali će svaki proizvedeni dio imati grubu vanjsku teksturu koja treba zahtjevnu naknadnu doradu. Proizvodu će se povećati vanjske dimenzije tijekom postupka izrade. Obično je to nepoželjno, osim ako se kalup namjerno malo smanji u iščekivanju ovog rasta. Pozitiv kalupi se primjenjuju kada se proizvodi 5 do 10 dijelova i ne smiju se primijeniti kada je potrebna estetski savršena završna obrada. Negativni kalupi odnosno matrica (eng. *negative mold*) općenito su skuplji, ali nude brojne prednosti za srednje do velike serije proizvodnje i za primjene koje zahtijevaju kozmetički savršenu završnu obradu. Vrijeme završne obrade je značajno smanjeno jer svaki dio izlazi s glatkom vanjskom površinom. Negativni kalupi također su pogodni za upotrebu s materijalima jezgre jer je vanjska površina uvijek glatka bez obzira na to koliko je jezgra nedosljedno primijenjena unutar dijela. Ako se proizvodi više od 10 dijelova koji trebaju glatku završnu obradu, tada primjenjuju negativni kalupi. Kalupi se ponekad izrađuju korištenjem i pozitivnog i negativnog oblika. Ovi kalupi izvrsni su za proizvodnju preciznih dijelova. [19]



Slika 6.1. Pozitivni (lijevo) i Negativni (desno) kalup [19]

Prilikom odabira materijala za izradu kalupa i načina izrade, treba uzeti u obzir trajanje proizvodnog ciklusa i željenu kvalitetu završne obrade na proizvodu. Vrijeme i materijali uloženi u kalup na početku u konačnici će utjecati na to koliko dijelova se može izraditi i na kvalitetu izrađenih dijelova. Treba razmotriti modifikacije kalupa specifične za tehniku kako bi se pomoglo u postupcima izrade. Kod izrade složenih kalupa od više dijelova koji zahtijevaju precizno poravnanje potrebno je postavljanje čahura duž prirubnice i razmotriti kako će se kalup držati dok je u upotrebi. Još jedna kritična stavka koju treba uzeti u obzir je kompatibilnost materijala u pogledu toplinskog širenja. Toplinsko širenje je sklonost tvari da promijeni oblik, površinu i volumen kao odgovor na promjenu temperature. Kada se smola stvrdnjava, stvara se toplina (egzotermna reakcija), koja uzrokuje širenje materijala do određenog stupnja. Staklena i ugljična vlakna imaju različitu termalnu rastezljivost, što treba uzeti u obzir kod odabira materijala. Precizni dijelovi i veće komponente od ugljičnih vlakana trebaju se izraditi pomoću kalupa od ugljičnih vlakana, što će spriječiti mogućnost deformacije u konačnom proizvodu. [19]

Način na koji se proizvod vadi iz kalupa (i naknadni dijelovi iz kalupa) također će utjecati na cjelokupni dizajn i konstrukciju kalupa. Prvi čimbenik koji treba uzeti u obzir je kut nagiba kalupa, odnosno kut stranica kalupa u odnosu na njegovo dno (slika 6.2). Kalup s nulnim nagibom ima ravne stranice koje su okomite na dno. Na kalupu s pozitivnim nagibom stranice su uže pri vrhu nego na dnu kalupa što omogućuje lakše vađenje proizvoda iz kalupa. Stranice kalupa s negativnim nagibom su šire na vrhu nego na dnu kalupa. Iz očitih razloga, dijelove je gotovo nemoguće izvaditi iz kalupa s negativnim nagibom. Oblici koji se moraju oblikovati s negativnim nagibom



moraju se izraditi u višedijelnim kalupima. Svaki komad kalupa ima pozitivan nagib za jednostavno odvajanje, ali svi se spajaju zajedno tvoreći negativnu šupljinu kalupa. [19]



Slika 6.2. Kutovi nagiba kalupa [19]

Ravnina u kojoj se dijelovi kalupa spajaju naziva se razdjelna ravnina (slika 6.3). Ovo je zamišljena crta koja dijeli negativni kut nagiba kalupa na dva pozitivna kuta. Kalupi se mogu izraditi s onoliko razdjelnih linija koliko je potrebno za potpuno odvajanje kalupa. Ravnina se obično kreće duž najvišeg ili najšireg vrha kalupa. [19]



Slika 6.3. Razdjelna linija kalupa [19]

Za kalupe se dosta često primjenjuje drvo kao što je medijapan ili iveral. Medijapan ili iveral je naziv za drvena vlakna pomiješana sa smolom i prešana u obliku ploča u velikim zagrijanim prešama. Postoji mnogo varijanti s različitim smolama i različitim gustoćama. Medijapan je gušći od većine šperploča i prilično je težak. Jedan od glavnih čimbenika je da kao proizvod od drveta ima vode. Za male kalupe medijapan može biti izvrsna, ekonomična i brza opcija za izradu alata. Za veće alate često je dobra opcija, ali postoje stvari koje treba razmotriti i na koje treba pripaziti. Medijapan je dobar za kalupe za proizvodnju dijelova od preprega koji ne moraju biti lijepi ili iznimno geometrijski točni, ali je moguće uz puno dodatne obrade. Medijapan se može primijeniti

kao kalup sve dok je pakiran u vreću i ne zagrijava se iznad 95 °C, iako može podnijeti i više temperature. Do stezanja dolazi pri primijeni kada se grije, a najizraženije u smjeru lijepljenja ploča. Za visoke sirovce to će rezultirati mjerljivim skaliranjem dijela, a ako vlaga izađe iz medijapana tijekom prerade, on može popucati. Kalupi od medijapana ne mogu izdržati puno ciklusa prerade u autoklavu. [20]

### **6.1.1 Odabir postupka izrade i materijala kalupa**

Izrada kalupa za *monocoque* šasiju sastoji se od izrade pozitivnog i negativnog kalupa. Negativni kalupa je odabran kao kalup u kojem će se laminirati *monocoque* kako bi vanjska površina bila lijepa i dimenzijski točna.

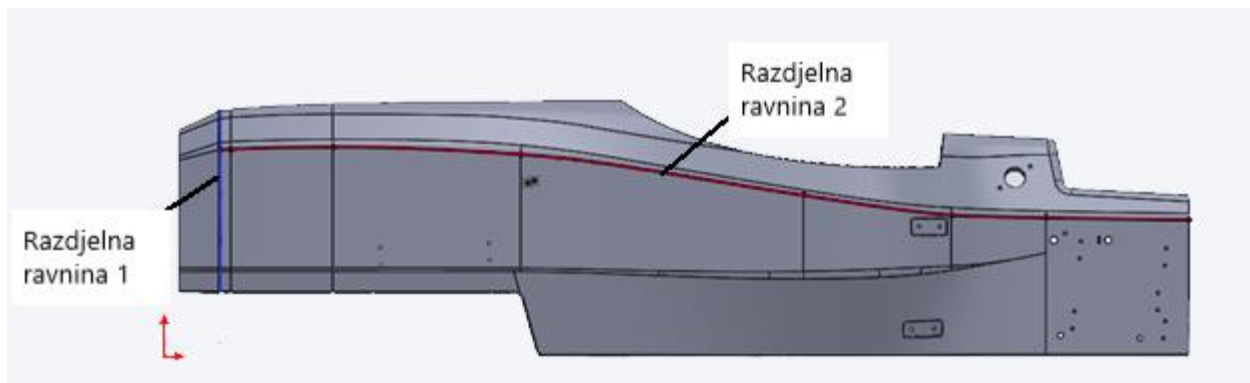
Za materijal negativnog kalupa odabran je prepreg za proizvodnju kalupa (eng. *tooling prepreg*) s ugljičnim vlaknima. *Tooling prepreg* smanjuje potrebnu temperaturu za preradu kalupa što smanjuje toplinske deformacije i doprinosi većoj točnosti zbog primjene ugljičnih vlakana. Kod postupka ručnog laminiranja teško je kontrolirati količinu smole, a time i svojstva, što u konačnici može dovesti do neželjenog pucanja kalupa tijekom prerade. Nadalje, kod ovog postupka može doći i do nesavršenosti na površini koje je kasnije teško ispraviti. Negativni kalup može se proizvesti i postupkom podtlačnog ulijevanja, ali kod ovog postupka je potrebno puno predznanja i iskustva kako bi se osiguralo da smola dođe do svih dijelova kalupa zbog relativno složene geometrije kalupa.

Za izradu negativnog dijela kalupa od preprega potreban je predoblik za izradu negativnog kalupa. Pri odabiru materijala za predoblik razmatrane su poliuretanske (tržišni naziv *necuron*) i medijapan ploče. Poliuretanske ploče koje mogu izdržati temperaturu prerade u autoklavu, koja je potrebna za postupak prerade preprega za kalupe, višestruko su skuplje od medijapan ploča. Medijapan ploče imaju i duplo manji koeficijent toplinskog rastezanja od poliuretanskih ploča. S obzirom na to da se medijapan može jednokratno primijeniti za preradu u autoklavu i da je financijski dostupniji, odabran je za materijal kalupa.

Ako je potrebno proizvesti više proizvoda iste geometrije može do 20 puta primijeniti negativni kalup. Postoji i mogućnost modularne izrade kalupa, pa se tako za sljedeću šasiju mogu iskoristiti dijelovi kalupa kod kojih se ne mijenja vanjska površina šasije u slučaju manjih promjena u geometriji šasije. Time se dugoročno postiže modularnost te se smanjuje cijena prerade šasije u budućnosti.

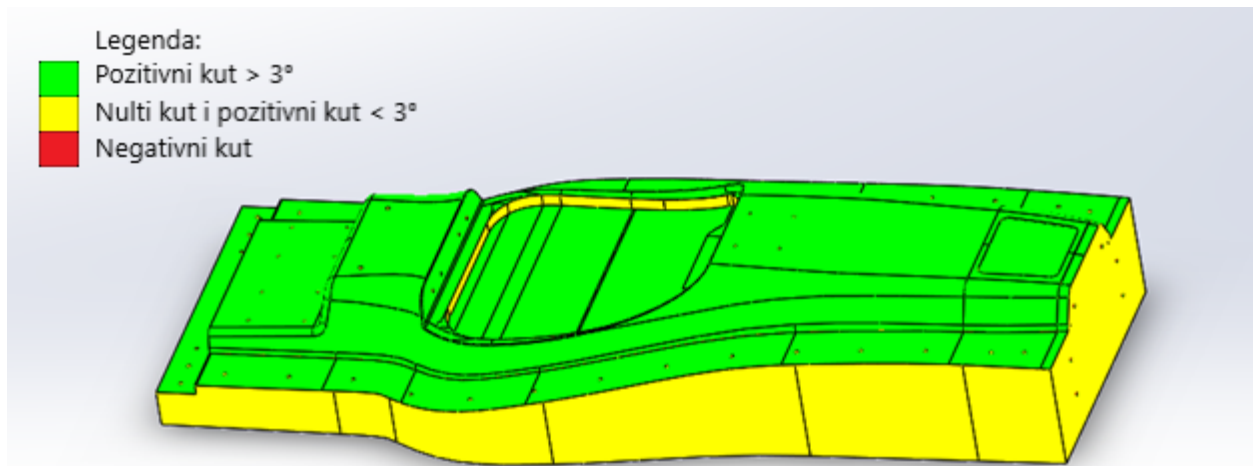
### 6.1.2 Konstrukcija kalupa

Kalup je podijeljen na četiri dijela kako bi se omogućilo što jednostavnije vađenje proizvoda iz kalupa. Na slici 6.4 prikazane su dvije razdjelne ravnine koje dijele kalup na prednji kalup te gornji i donji kalup. Razdjelna ravnina 1 prednjeg kalupa je odabrana prema slici 6.4 kako bi se izbjegle paralelne stranice na suprotnim krajevima istog dijela kalupa jer bi to moglo dovesti do zaglavljenja kod vađenja proizvoda iz kalupa.



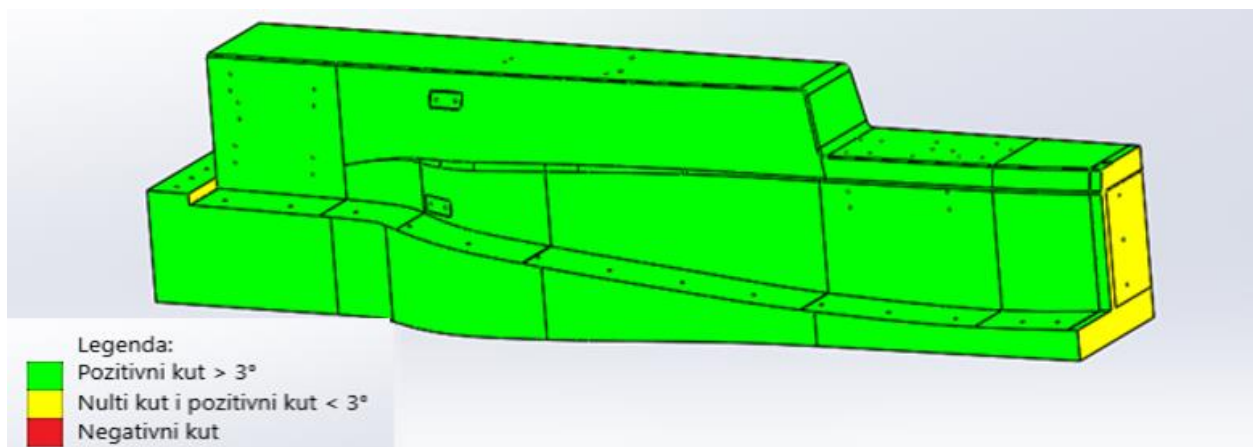
Slika 6.4. Konstrukcija kalupa: razdjelne ravnine

Negativni prednji kalup je tako konstruiran da se u njemu može proizvesti dio potreban za testiranje udarne zone, a kasnije se taj isti kalup primjenjuje za proizvodnju *monocoque* šasije. Ostatak kalupa podijeljen je na gornji i donji dio pomoću razdjelne ravnine 2 (slika 6.4) koja prolazi kroz najširi dio šasije po visini šasije. Ovakvom podjelom kalupa gornja polovica ima pozitivan nagib ili nulti nagib u odnosu na smjer vađenja proizvoda iz kalupa po cijeloj površini kalupa, što je vidljivo na slici 6.5. Za provjeru kutova nagiba koristi se opcija za analizu kutova nagiba u odnosu na smjer kalupa u programu Solidworks. Pozitivni kutovi na površinama prikazani su zeleno, negativni crveno, a nulti kutovi žuto. U opcijama programa postavljena je tolerancija od 3° pa su svi kutovi između 0° i 3° prikazani žutom bojom.



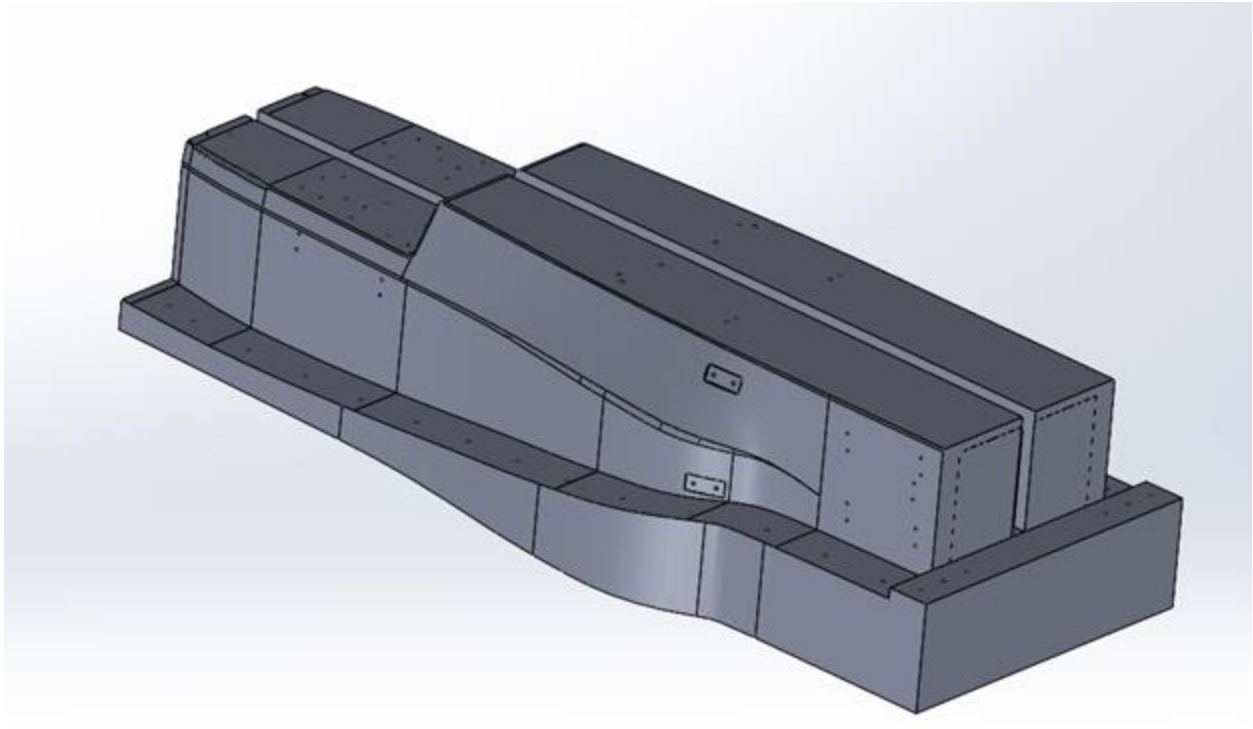
Slika 6.5. Kutovi površine kalupa u odnosu na smjer vađenja gornjeg predoblika za proizvodnju kalupa

Donji negativni kalup zbog složene geometrije nije moguće izvaditi iz predoblika za izradu negativnog kalupa u komadu, pa je podijeljen na lijevu i desnu polovicu kako bi se omogućilo vađenje proizvoda iz kalupa (slika 6.6).



Slika 6.6. Kutovi površine kalupa u odnosu na smjer vađenja donjeg predoblika za proizvodnju kalupa

Predoblik za proizvodnju donjeg kalupa osmišljen je tako da se u jednom komadu izrađuju lijevi i desni predoblik za proizvodnju kalupa. Na taj način se smanjuje broj predoblika za proizvodnju kalupa koji se strojno obrađuju i olakšava se kasnije rukovanje kalupima i zatvaranje vreće oko istih. Kako bi se kalupi mogli međusobno spojiti, između lijeve i desne polovice ostavljen je utor u koji se kasnije dodaje prirubnica na kojoj se nalaze rupe za pozicioniranje polovica kalupa (slika 6.7).



Slika 6.7. Konstrukcija donjeg kalupa

Potrebno je odabrati adhezivno sredstvo kojim će se zalijepiti ploče. Prema prethodnom iskustvu i literaturi [20] kao najbolje lijepilo pokazala se epoksidna smola, unatoč njenoj relativno visokoj cijeni. Najvažnije svojstvo koje se traži od adhezivnog sredstva u ovoj primjeni je da bude postojano i stabilno pri radnoj temperaturi na kojoj se izrađuju kalupi. Za ovu primjenu ispitana su još četiri adhezivna sredstva koja su jeftinija od epoksidne smole: vatrootporno adhezivno sredstvo, voodootporno adhezivno sredstvo, adhezivno sredstvo za drvo i poliuretanska pjena. Tri ploče, koje su se kasnije primijenile za izradu kalupa zalijepljene su različitim adhezivnim sredstvima, zagrijane su pri radnoj temperaturi kalupa od 80 °C i držane pri toj temperaturi 15 sati. Ispitak koji je lijepljen s vatrootpornim adhezivnim sredstvom (slika 6.8 a) proširio se na lijepljenim spojevima za 1,32 mm jer je lijepljeni spoj popustio (slika 6.9). Uzorak lijepljen sa voodootpornim adhezivnim sredstvom za drvo (slika 6.8. b) ispucao je na sredini medijapan ploče gdje je ona najlošijih svojstava zbog postupka proizvodnje ploče (prešanje piljevine pod tlakom i visokom temperaturom). Ispitak lijepljen s adhezivnim sredstvom za drvo (slika 6.8. c) popucao je na presjeku između površinskog i središnjeg dijela medijapan ploče. Na ovom dijelu presjeka se vidi razlika u boji medijapan ploče, što govori da je riječ o velikoj razlici u svojstvima između ta dva dijela ploče. Četvrti uzorak lijepljen s poliuretanskom pjenom popucao je na samom lijepljenom spoju i na presjeku medijapan ploče, a na jednom mjestu se čak u potpunosti odlomio (slika 6.10 dolje desno).



Slika 6.8. Ispitni uzorci nakon ispitivanja: a) vatrootporno adhezivno sredstvo, b) vodootporno adhezivno sredstvo, c) adhezivno sredstvo za drvo



Slika 6.9. Ispitak s vatrootpornim ljepilom

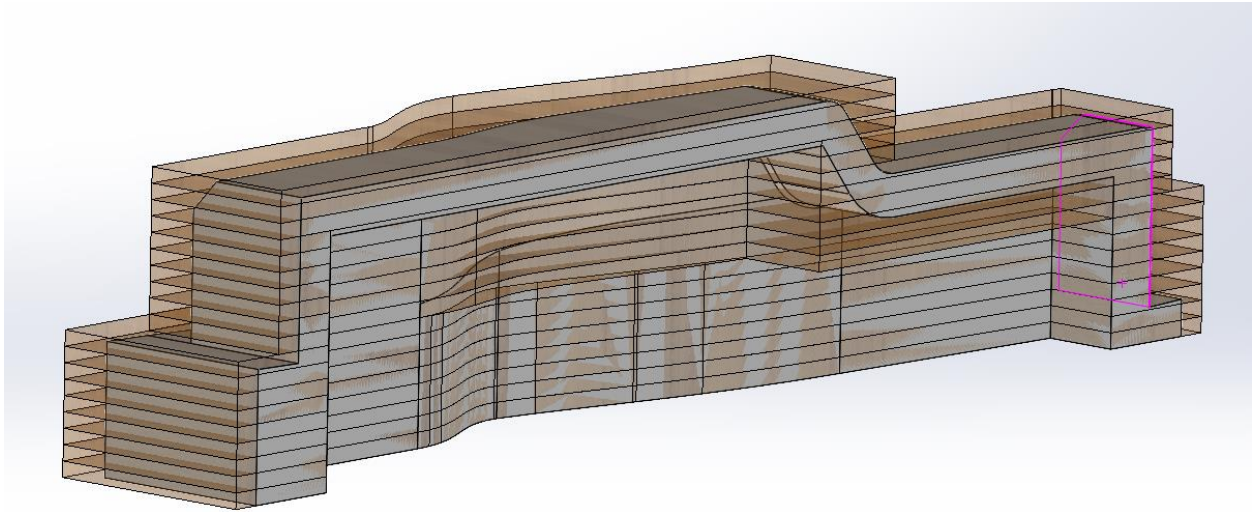


Slika 6.10. Ispitak s poliuretanskom pjenom kao ljepljom

Kontrolni ispitni uzorak lijepljen s epoksidnom smolom jedini nije popucao tijekom provedbe ispitivanja. Zato je epoksidna smola odabrana kao adhezivno sredstvo za lijepljenje kalupa.

## 6.2 Postupak prerade predoblika za proizvodnju negativnih kalupa

Sirovci za glodanje predoblika za izradu kalupa proizvedeni su lijepljenjem medijapan ploča debljine 40 mm i pripremljeni na način da se slojevi mogu rezati s troosnim strojem. Model predoblika za proizvodnju kalupa podijeljen je na visine od 40 mm i svaki kraj je proširen za 50 mm prema van kako bi se osiguralo dovoljno dodatka za obradu. Svaki kraj je izrezan iznutra na način da se dobije debljina stijenke kalupa između 50 mm i 100 mm nakon strojne obrade, a da unutrašnja šupljina predoblika za proizvodnju kalupa bude što jednostavnije geometrije. Unutarnja šupljina radi se kako bi se smanjila debljina predoblika za izradu kalupa jer se tako smanjuje potrebno vrijeme progrijavanja što značajno smanjuje trajanje postupka prerade negativnog kalupa u autoklavu, ali i osigurava bolju dimenzijsku točnost zbog bolje raspodjele temperature kroz dijelove kalupa tijekom postupka prerade u pećima. Raspored slojeva za rezanje krojeva predoblika za proizvodnju kalupa prikazan je na slici 6.11 u nastavku na presjeku donjeg kalupa.



Slika 6.11. Krojevi kalupa na primjeru donjeg kalupa

### 6.2.1 Priprema sirovca

Prije lijepljenja ploča potrebno je izrezati ploče prema prethodno izrađenom planu rezanja. Ploče su rezane na petoosnom stroju (*Rover B* proizvođača *Biesse*) kako bi se lakše i preciznije izrezale konture ploča, a posebice unutarnje konture jer se one ne obrađuju naknadno kako bi se smanjio broj stezanja izratka na stroju, vrijeme obrade, a s time i sama cijena obrade na petoosmom obradnom stroju. Postupak rezanja ploča na stroju prikazan je na slikama 6.12 i 6.13.





Slika 6.12. Obradni stroj za rezanje drva



Slika 6.13. Sirovci tijekom rezanja na stolu obradnog stroja

Nakon rezanja, ploče je potrebno očistiti od prašine i premazati adhezivnim sredstvom. Za ovu primjenu upotrijebila se epoksidna smola EC 157 i sporo umreživalo za smolu W 152 XLR u masenom omjeru miješanja 100 : 30. Ova smola prvenstveno se primjenjuje u postupku podtlačnog ulijevanja, no za izradu predoblika za proizvodnju izabrana je kako bi se osiguralo što bolje upijanje smole u ploče zbog kasnije lakše obrade. Pri sobnoj temperaturi otvoreno vrijeme ove kombinacije smole i umreživala je oko 2,5 h, što daje dovoljno vremena za pripremu ploča prije stezanja. Nakon prvog mazanja smole, ploče vrlo brzo upiju svu smolu, te ih je potrebno premazati smolom više puta. Na ovaj način se osigurava sloj lijepila na pločama prije samog spajanja dvije ploče zbog boljeg spoja između ploča i boljeg prodiranje smole u medijapan ploču jer to olakšava postupak obrade i smanjuje vjerojatnost neravnina i pukotina na spoju koji mogu nastati tijekom strojne obrade. Ploče su premazane smolom četiri puta jer su nakon četvrtog mazanja ploče prestale upijati smolu. Smola se nanosila na ploče pomoću mazalice za lijepilo (slik 6.14). Ploče su premazane ljepilom samo sa jedne strane prije spajanja jer se tako izbjegavaju mjehurići zraka tijekom polaganja jedne ploče na drugu koji mogu ostati zarobljeni ako su obje ploče premazane smolom. [20] Iz istog razloga se ploče ne polažu paralelno jedna na drugu, već se polože na jednom kraju, a onda se polagano spuštaju prema drugoj strani. Ploče je potrebno spustiti jednu na drugu što preciznije ili nakon spuštanja ploče što prije posložiti ploče na točnu poziciju jer ih je nakon samo par sekundi nemoguće ručno pomaknuti jednu u odnosu na drugu.



Slika 6.14. Premazivanje ploča smolom pomoću mazalice za lijepilo

Nakon što su sve ploče posložene jedna na drugu, izradak se stavlja pod hidrauličku prešu pri tlaku bez grijanja u trajanju od 24 h kako bi se osigurao što bolji lijepljeni spoj između ploča (slika

6.15). Svi dijelovi predoblika za proizvodnju kalupa su u to vrijeme pod prešom, te s obzirom da su izradci različitih visina dodani su komadi medijapan ploče kako bi se osiguralo da su svi jednakih visina. Također treba paziti da se izradci ili komadi ploča stave na sva mjesta na preši gdje su cilindri da se izbjegne izvijanje ploča stroja i da se postigne što ravnomjerniji pritisak. Ispod izradaka i između izradaka i ostalih komada ploča potrebno je staviti zaštitnu foliju kako višak smole kod prešanja ne bi iscurio po stroju ili zalijepio izratke i dodane komade ploča.



Slika 6.15. Sirovci pod hidrauličnom prešom

Izradak za donji kalup je previsok da bi stao u prešu, pa se zato proizveo od dva dijela po visini. Dijelovi su naknadno spojeni na isti način kao što je prethodno opisano, ali su umjesto preše stegnuti velikim stegama (slika 6.16).



Slika 6.16. Lijepljenje donjeg kalupa iz dva komada pomoću stega

### **6.2.2 Strojna obrada kalupa**

Prije stezanja na stroj i strojne obrade, sirovci su okrenuti, te su premazani istom smolom s donje strane na prethodno opisan način (slika 6.17). Razlog premazivanja kalupa je da se on u potpunosti zatvori kako bi se spriječio izlazak vlage iz medijapana tijekom prerade u pećima jer to može dovesti do pucanja predoblika za proizvodnju kalupa. Drugi je razlog kako bi se barem djelomično zatvorile pore u medijapanu jer je on porozan. Ovaj postupak radi se prije obrade jer je gornja strana kalupa još uvijek ravna, što omogućuje jednostavnije okretanje sirovaca, a time i jednostavnije nanošenje smole.



Slika 6.17. Premazivanje dna kalupa epoksidnom smolom

Slijedi stezanje izradaka na stroj i strojna obrada na petosnom obradnom centru (*Mirror BM* proizvođača *Uniteam*) (slika 6.18). Strojna obrada sastoji se od grube obrade kod koje se ostavlja dodatak za finu obradu i fine obrade. Kod fine obrade se obrađuje s vrlo malim posmacima ako je to moguće jer se tako smanjuju neravnine na površinama i smanjuje količina naknadne obrade kalupa. Nakon fine obrade bušene su i rupe za pozicioniranje pinova za umetke.



Slika 6.18. Fina obrada kalupa na petrosnom obradnom centru

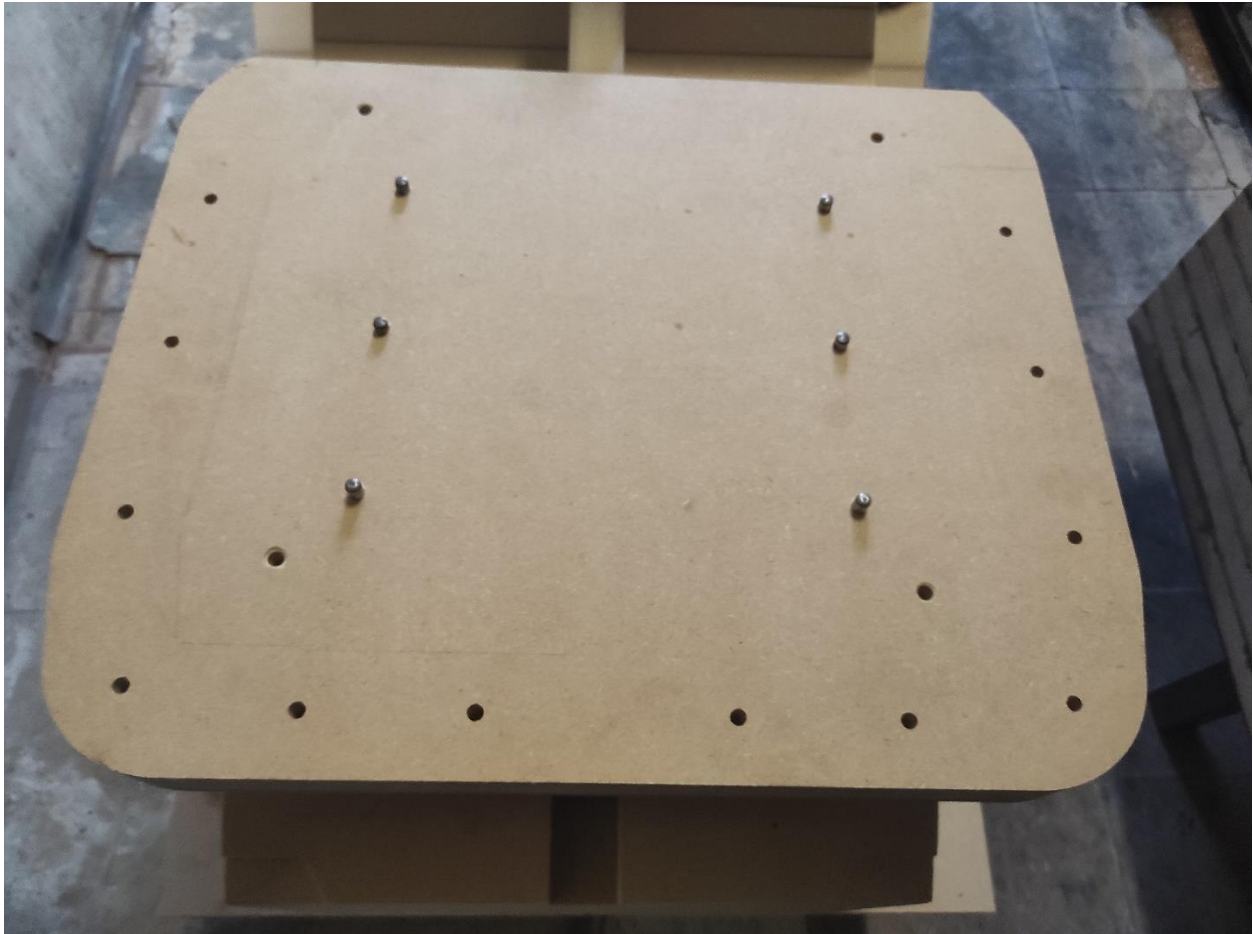
Kalupi nakon strojne obrade prikazan su na slici 6.19.



Slika 6.19. Gornji i donji kalup nakon strojne obrade

### 6.2.3 Priprema predoblika za proizvodnju kalupa za postupak prerade negativnih kalupa

Prije zaštite površina kalupa potrebno je na gornji kalup montirati prednju ploču, a na donji kalup prednju ploču i gornju prirubnicu. Poklopci i prirubnica služe kako bi se na njoj mogle proizvesti prirubnice koje prate razdjelne ravnine kalupa i omogućuju spajanje i pozicioniranje dijelova kalupa. Poklopci na sebi imaju unaprijed izbušene provrte koje služe za pozicioniranje gornjeg i donjeg dijela predoblika za proizvodnju kalupa s prednjim dijelom predoblika za proizvodnju kalupa. Na sebi imaju i provrte za zatike kako bi se mogli pozicionirati na mjesto (slika 6.20).



Slika 6.20. Donji prednji poklopac s provrtima za pozicioniranje dijelova predoblika za izradu kalupa, provrtima za vijke i umetnutim zaticima za pozicioniranje

Prvo se pomoću zatika poklopci pozicioniraju na predoblik za proizvodnju kalupa (slika 6.21 lijevo), a zatim se vijcima pričvrste na predoblik za proizvodnju kalupa (slika 6.21 desno). Poklopac se na ovaj način kasnije može skinuti, što olakšava odvajanje negativnog kalupa nakon prerade u autoklavu.



Slika 6.21. Montaža donjeg prednjeg poklopca: pozicioniranje poklopca zaticima (lijevo), stezanje vijaka (desno)

Gornja prirubnica donjeg kalupa ima unaprijed izbušene rupe koje služe za kasnije spajanje lijevog i desnog donjeg predoblika za proizvodnju kalupa. Prirubnicu i udubinu u donjem predobliku za proizvodnju kalupa treba po potrebi malo prilagoditi kako bi prirubnica sjela na mjesto (slika 6.22), a kasnije se lijepi na mjesto pomoću epoksidne smole EC 157 i sporog umreživala W 152 XLR u masenom omjeru miješanja 100 : 30.



Slika 6.22. Namještanje gornje prirubnice u utor na kalupu



Nakon strojne obrade kalupa potrebno je i ostale vanjske površine kalupa zaštititi epoksidnom smolom kao što je prethodno opisano. Osim zatvaranja površine predoblika za proizvodnju kalupa ovime se postiže i popunjavanje pora na površini predoblika za proizvodnju kalupa u srednjem dijelu medijapan ploče što je vidljivo na slici 6.23. Na ovaj način dobije se površina koju je puno lakše brusiti.



Slika 6.23. Površina donjeg kalupa nakon strojne obrade

#### **6.2.4 Priprema površine predoblika za proizvodnju kalupa**

Cijelu površinu predoblika za proizvodnju kalupa potrebno je brusiti brusnim papirom gradacije 120, a zatim gradacije 240. Nakon početnog brušenja na površini kalupa mjestimično su ostale vidljive rupice i neravnine koje je potrebno popuniti auto kitom. Za ovu potrebu upotrijebljen je dvokomponentni auto kit Glasurit 839-55. Postupak nanošenja i brušenja auto kita prikazan je na slikama 6.24 i 6.25. Nakon popravaka površine sve površine se bruse do gradacije 800 kako bi se omogućilo što bolje kasnije nanošenje temeljnog premaza.



Slika 6.24. Kalup nakon nanošenja auto kita



Slika 6.25 Kalup tijekom brušenja auto kita

Osim popravaka površine na predoblicima za proizvodnju kalupa je potrebno ukloniti i srhove koji su nastali tijekom postupka strojne obrade (slika 6.26) i popraviti sve polumjere oko prirubnica da se dobije što manji polumjer. Ovdje je potrebno posvetiti puno pažnje kako se na površini ne bi

stvorile udubine koje mogu onemogućiti vađenje proizvoda iz predoblika za proizvodnju kalupa nakon prerade u autoklavu. Za ovu potrebu primjenjuju se brusni papiri različitih gradacija i male rašpe za brušenje (slika 6.27).



Slika 6.26. Srh nastao tijekom strojne obrade kalupa



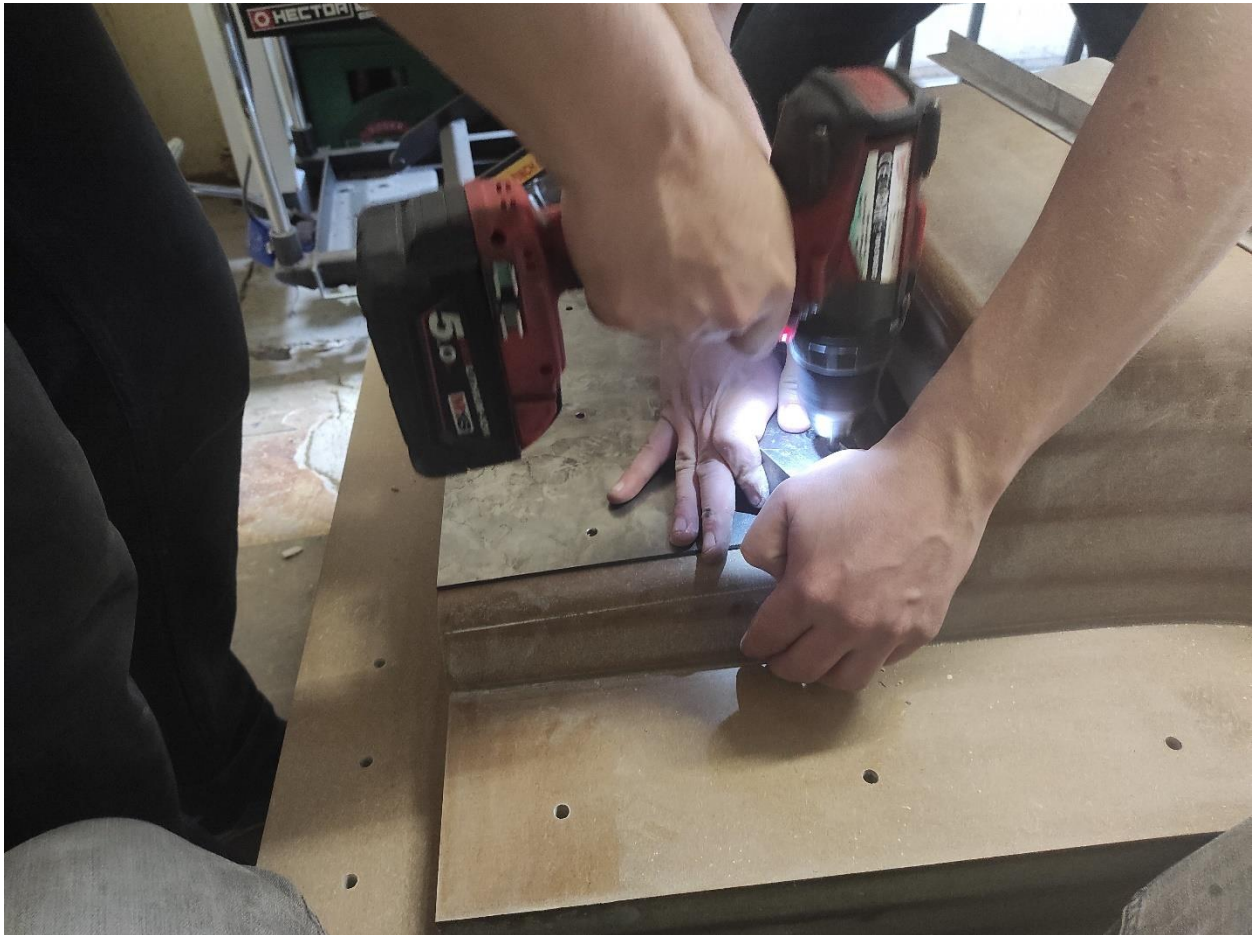
Slika 6.27. Uklanjanje srha i popravci polumjera na kalupu

Nakon što su sve površine pobrušene do gradacije 800 potrebno je ravnalom i kutnikom provjeriti ravnost svih površina i postoje li na nekom mjestu udubine ili izbočine koje je potrebno popraviti. U ovom trenutku je najlakše detektirati i popraviti ovakvu vrstu nedostataka. Ravan predmet prisloni se na površinu, a s druge strane se postavi izvor svjetlosti kako bi se lakše uočile neravnine na površini. Neravnine mogu nastati kao posljedica strojne obrade ili zbog nepažnje tijekom postupka brušenja predoblika za proizvodnju kalupa. Primjer provjere jedne neravne površine prikazan je na slici 6.28. Ovakvu površinu potrebo je detaljno provjeriti i otkriti o kojem se nedostatku radi. Ako je riječ o izbočinama na površini, potrebno ih je pažljivo brusiti i izravnati kako se oko izbočine ne bi stvorile nove udubine jer se zbog lijepljenih spojeva dijelovi oko spojeva puno teže bruse od sredine ploča. Ako je riječ o udubinama ili kombinaciji udubina i izbočina, kao na slici 6.28, potrebno je površinu popraviti auto kitom, a zatim ju pažljivo brusiti kako bi se popravile sve udubine i izbočine.



Slika 6.28. Provjera ravnosti površina: primjer neravne površine

Neki od provrta na predoblicima za proizvodnju kalupa bilo je potrebno izbušiti na potrebnu dubinu, kako bi u njih bilo moguće umetnuti zatici za pozicioniranje čahura. Vodenim mlazom su izrezane šablone za pozicioniranje i bušenje provrta. Prvo je svaku od šablona bilo potrebno točno pozicionirati te izbušiti dva nasuprotna provrta s kojima se pozicionira šablona. Kako bi se osiguralo bušenje rupa okomito primjenjuje se posebna naprava (slika 6.29). Nakon što se pozicionira šablona, pomoću nje jer potrebno izbušiti ostatak provrta.



Slika 6.29. Pozicioniranje šablone za bušenje provrta

Nakon pripreme svih površina i bušenja provrta potrebno je obrisati kalup od prašine i dobro ga očistiti od svih nečistoća. Za ovu primjenu može se primijeniti razrjeđivač, izopropilni alkohol ili neko drugo sredstvo za čišćenje na bazi alkohola. Nakon čišćenja kalupa potrebno je pripremiti prostoriju za nanošenje temeljnog premaza, sve očistiti od prašine kako tijekom nanošenja ona ne bi padala po površini kalupa i tako uništila sloj premaza, te zaštititi sve u blizini mjesta gdje će se nanositi temeljni premaz. Na površinu kalupa nanosi se tanki sloj temeljnog premaza Glasurit 285-270, koji je prije nanošenja potrebno pomiješati s ubrzivačem Glasurit 929-58 i razrjeđivačem Glasurit 352-30 u volumnom omjeru 100 : 20 : 20. Ovaj temeljni premaz epoksidne baze primjenjuje se jer se lako brusi nakon nanošenja i dobro podnosi povišene temperature kod prerade

u autoklavu. Premaz se nanosi pomoću kompresora i pištolja za boju (slika 6.30). Prije nanošenja premaza na sam kalup važno je dobro namjestiti pritisak i protok na pištolju za što bolje rezultate prilikom nanošenja premaza. U suprotnom se mjestimično može pojaviti nesavršenost na premazu koja se naziva narančina kora, ali ju je vrlo jednostavno ukloniti pažljivim brušenjem. Nakon otprilike pola sata, kada se na površini počnu vidjeti male točkice, potrebno je nanijeti još jedan tanki sloj premaza i ostaviti ga 16 h kako bi u potpunosti umrežio.



Slika 6.30. Nanošenje temeljnog premaza na površinu prednjeg kalupa

Nakon umrežavanja temeljnog premaza potrebno je ponovno brusiti predoblik za proizvodnju kalup. Na predobliku za proizvodnju kalupu su pronađene još neke nepravilnosti nakon brušenja pa je odlučeno da će se brusiti sve nepravilnosti i izbočine koje se mogu popraviti na temeljnom premazu (slika 6.31), a nakon toga je još jednom ponovljen postupak nanošenja temeljnog premaza.



Slika 6.31, Površina predoblika za proizvodnju kalupa nakon brušenja temeljnog premaza  
Nakon drugog nanošenja temeljnog premaza na gornji i donji predoblik za proizvodnju kalupa potrebno je ponovo brusiti sve površine kako bi se skinula „narančina kora“ nastala tijekom postupka nanošenja temeljnog premaza na nekim dijelovima predoblika za proizvodnju kalupa. Odlučeno je da će se gornji i donji kalup brusiti do gradacije brusnog papira 1500 kako bi se postigla što bolja kvaliteta površine, a time smanjio udio posla i potreba za brušenjem na negativnom kalupu i na završnom proizvodu. Izgled predoblika za proizvodnju kalupa nakon završnog brušenja prikazan je na slici 6.32.



Slika 6.32. Kalup nakon završnog brušenja

Gornji i donji predoblik za proizvodnju kalup se prije nastavka postupka treba pričvrstiti vijcima na metalne okvire koji dolaze oko rupe ispod predoblika za proizvodnju kalupa. Ovi okviri služe da bi olakšali rad na predobliku za proizvodnju kalupima, prevoženje predoblika za proizvodnju kalupa viličarom ali i omogućavaju zatvaranje cijelog predoblika za proizvodnju kalupa u vreću prilikom proizvodnje i prerade negativnog kalupa. Predoblik za proizvodnju kalupa je potrebno ponovno dobro očistiti od prašine i na površinu predoblika za proizvodnju kalupa nanijeti sredstvo za popunjavanje pora na predobliku za proizvodnju kalupa (eng. *sealer*). Zadaća ovog sredstva je da popuni male pore koje su nevidljive ljudskom oku, a u njih može ući smola i tako onemogućiti odvajanje predoblika za proizvodnju kalupa. Za ovu svrhu upotrijebilo se sredstvo Chemlease 15 sealer EZ, koji ujedno ima svojstva voska, što znači da je pogodan i za popunjavanje nešto većih udubina i neravnina. Sredstvo je potrebno kružnim pokretima čistom krpom nanijeti na predoblik za proizvodnju kalupa. Ako se sredstvo odmah nakon nanošenja počne pjeniti, odnosno s površine predoblika za proizvodnju kalupa počnu izlaziti mali mjehurići, to je znak da je nanoseno previše sredstva na jedno mjesto. Nakon nanošenja na jednom djelu predoblika za proizvodnju kalupa potrebno je pričekati da sredstvo počne vidljivo hlapiti s površine, što se može jasno vidjeti. U tom trenutku potrebno je drugom čistom krpom pažljivo i temeljito kružnim pokretima polirati taj dio površine. Sredstvo za popunjavanje pora je prije prvog korištenja predoblika za proizvodnju kalupa potrebno nanijeti tri puta, a između dva nanošenja obvezno pričekati barem 15 min. Nakon trećeg nanošenja potrebno je pričekati 30 minuta i tada se može krenuti s nanošenjem odvajala. Kao odvajalo za ovu primjenu primjenjuje se Chemlease PMR-90 EZ, a nanosi se na predoblike za proizvodnju kalupa također po tri puta prethodno opisanim postupkom i s 15 minuta razmaka između dva nanošenja. Odmah nakon nanošenja trećeg sloja sredstva za odvajanje potrebno je predoblik za proizvodnju kalupa staviti na povišenu temperaturu prije nego se može prvi put primijeniti. Predoblik za proizvodnju kalupa se treba lagano zagrijati (preporuka za predoblike za proizvodnju kalupa od medijapan ploča je brzina dizanja temperature 2 - 3 min/°C) pri radnoj temperaturi (temperatura na kojoj će se primijeniti tijekom prerade kalupa) i ostaviti da stoji pri toj temperaturi barem 1 h, a zatim polagano ohladiti. Ovo se radi kako bi se osiguralo da su svi materijali na predobliku za proizvodnju kalupa sposobni izdržati radnu temperaturu kalupa te sukladno tehničkom listu odvajala. Ovo je mjera sigurnosti jer u slučaju da nešto nije bilo po plan propasti će samo predoblik za proizvodnju kalupa i/ili materijali nanoseni na njega, a ne i sav materijal za kasniji proizvod koji je puno skuplji. Nakon što se predoblik za proizvodnju kalupa ohladi potrebno je prema uputama nanijeti još jedan sloj sredstva za odvajanje, te je predoblik za proizvodnju kalup odmah spreman za proizvodnju kalupa.



### 6.3 Postupak prerade negativnih kalupa

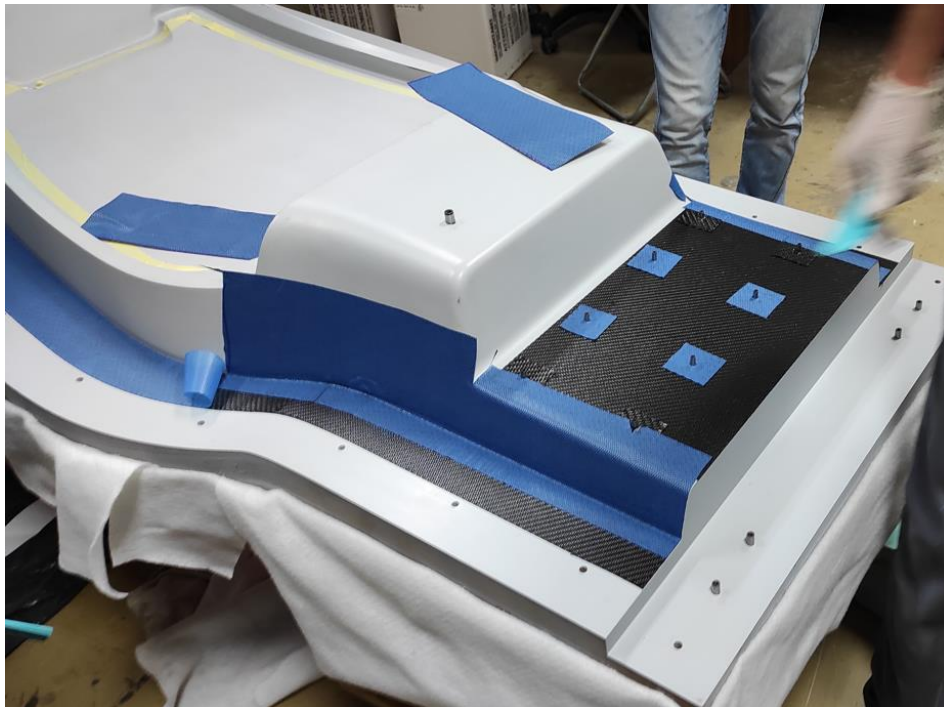
Na samom početku proizvodnje negativnih kalupa potrebno je postaviti sve zaticke na mjesto. Zatici služe da bi se u negativne kalupe na te pozicije mogle ubaciti čahure koje će se kasnije prerađivati u pećima zajedno s kalupom i ostati u njemu na željenoj poziciji. Kod proizvodnje samog proizvoda ove čahure mogu služiti ili za pozicioniranje dijelova kalupa ako se nalaze na prirubnicama kalupa ili za pozicioniranje umetaka ako se nalaze na funkcionalnim površinama proizvoda (slika 6.33).



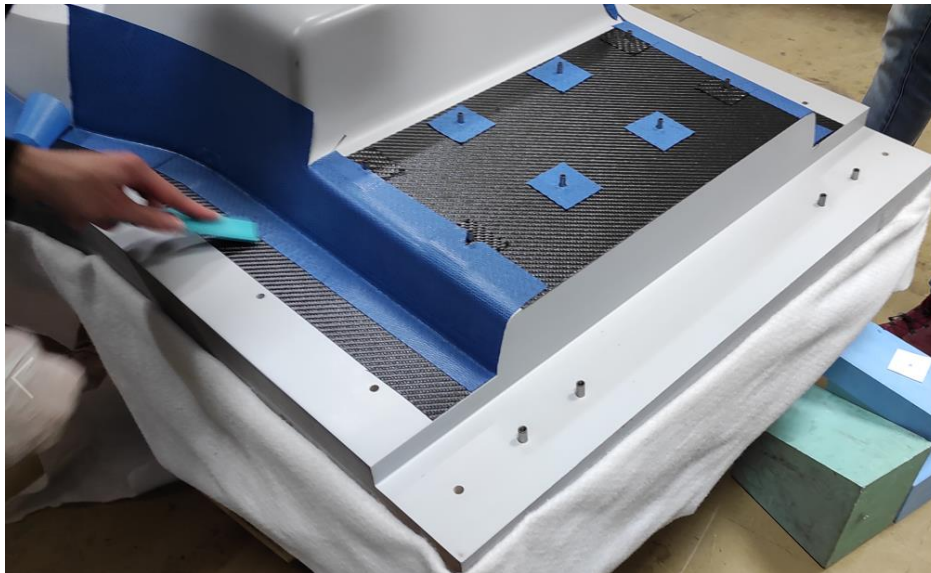
Slika 6.33. Zatici umetnuti u predoblik za proizvodnju kalupa

Za izradu kalupa primijenjen je prepreg za proizvodnju kalupa LTC400 tvrtke *SHD composites* ojačan ugljičnim vlaknima. Način slaganja je deset slojeva, od kojih vanjski slojevi imaju manju gustoću od unutarnjih. Prednost preprega manje gustoće je njihova lakša oblikovljivost i prilagodljivost složenijim geometrijama, a preprezi više gustoće u sredini se upotrebljavaju kako bi se dobila potrebna mehanička svojstva kalupa uz što manji broj slojeva, što uvelike skraćuje trajanje postupka polaganja preprega na površinu kalupa. Ova vrsta preprega se primjenjuje jer ima vijek trajanja smole od 30 dana pri 20 °C, ali i zato jer je relativno jednostavno rukovati s ovim prepregom tijekom polaganja.

Prvo je potrebno na kalup postaviti prvi sloj preprega. Prepreg se pakira na način da s obje strane ima zaštitnu foliju. S jedne strane folije ima više smole nego s druge i preporučuje se stranu bogatiju smolom uvijek okretati prema kalupu. Za svaki sloj kalupa rađeni su krojevi, što u slučaju kalupa nije potrebno, ali osigurava lakše rukovanje kod polaganja i bolja svojstva kalupa kod prerade u pećima. Svaki kroj je prvo potrebno odrezati što se može raditi ručno nožem ili škarama, ili strojem za rezanje preprega. Nakon što se izrežu krojevi, jedan po jedan se polažu na kalup na način da im se skinu donja folija i da se polako s jednog kraja na drugi polažu na kalup uz pažljivo pritiskanje preprega na kalup (slika 6.34). Nakon toga je potrebno popraviti sve nepravilnosti i po potrebi različitim alatima dobro utisnuti tkanje na sva zaobljenja i osigurati da nigdje nema velikih mjehura zraka nastalih zbog nepravilnog polaganja preprega (slika 6.35). Nakon toga je potrebno skinuti i drugu foliju s komada preprega i nastaviti postupak dok se u potpunosti ne postavi cijeli prvi sloj.

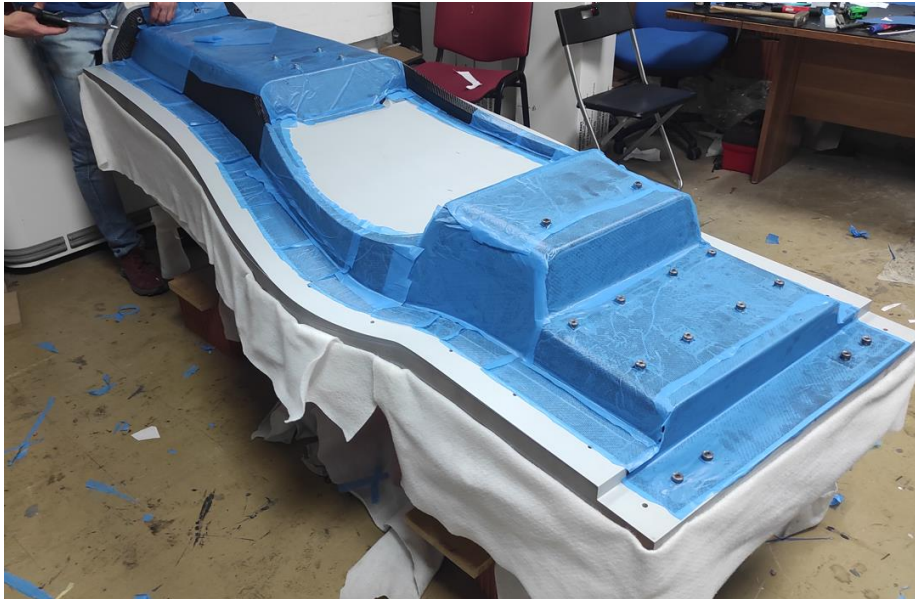


Slika 6.34. Polaganje prvog sloja preprega na kalup



Slika 6.35. Poravnavanje krojeva preprega nakon polaganja

Nakon polaganja prvog sloja potrebno je zatvoriti poluproizvod u podtlačnu vreću i postići podtlak na barem 0,5 h prije nego se može nastaviti s daljnjim postavljanjem slojeva. Ovaj postupak radi se kako bi se iz poluproizvoda izvukao sav zrak i kako bi donji sloj savršeno popunio sve dijelove kalupa, posebice na kutovima između dvije površine, što uvelike doprinosi kvaliteti kalupa nakon prerade u pećima. Preporuča se ovaj postupak ponoviti nakon svakog trećeg sloja kalupa za najbolji rezultat. Prije nego se proizvod zatvori u vreću potrebno je na cijelu površinu negativnih kalupa (na sav prepreg) postaviti foliju za odvajanje (eng. *release film*) s malim preklopom u odnosu na prepreg, dovoljno je svega nekoliko milimetara. Ova folija omogućava puno lakše skidanje vreće i ostalih potrošnih materijala s proizvoda nakon prerade, a u ovom slučaju onemogućava da se tkanina za upijanje viška smole (eng. *breather*) ne zalijepi za prepreg. Iako se tako zove, glavna funkcija tkanine za upijanje viška smole kod rada s preprezima nije upijanje viška smole, već se primjenjuje zbog svoje poroznosti, što omogućuje da se tijekom ostvarivanja podtlaka sav zrak između proizvoda i vreće i iz proizvoda može izvući kroz ventil. Da nema ove tkanine nakon povlačenja zraka na dijelovima vreće bi ostali zarobljeni mjehuri zraka što bi nepovoljno utjecalo na kvalitetu i estetski izgled proizvoda. Postavljanje folije za odvajanje prikazano je na slici 6.36. Prije postavljanja folije na prvi sloj kalupa postavljaju se čahure na prepreg, kako bi se što bolje primile za donju površinu kalupa. Svi ostali slojevi postavljaju se oko ovih čahura i između slojeva se stavljaju mali kvadratići s provrtima kako bi do kraja postavljanja čahure cijelom visinom bile zatvorene u kalup. Tijekom postupka prerade u pećima će smola zapuniti utor na čahuri i tako omogućiti da čahure za pozicioniranje postanu neodvojiv dio kalupa.



Slika 6.36. Postavljanje folije za odvajanje na poluproizvod

Nakon postavljanja folije za odvajanje potrebno je cijelu površinu kalupa obložiti tkaninom za upijanje viška smole. Osim već navedenih funkcija, tkanina služi i da se zaštite svi oštri bridovi i mjesta na kojima bi vreća mogla puknuti tijekom podtlaka ili prerade u pećima. Na takvim mjestima kao što su bridovi, kutovi kalupa, čahure, vijci ili zatici, preporuča se stavljanje barem duplog sloja tkanine kako bi se smanjila mogućnost pucanja vreće. Važno je napomenuti da se tkanina mora postaviti na vanjsku i unutarnju stranu kalupa, kako je prikazano na slici 6.37. Potrebno je paziti da tkanina ne ostane napeta na jednom dijelu proizvoda, a posebice ne oko bridova, jer bi mogla dovesti do zarobljenog zraka između vreće i proizvoda. Također treba paziti da na svim dijelovima kalupa ima barem jedan sloj tkanine prije nego se krene zatvarati vreća. Na mjestima na kojima tkanina ne može stajati preporučuje se primjena adheziva u spreju. Kalup spreman za postavljanje vreće prikazan je na slici 6.38.



Slika 6.37. Postavljanje tkanine za upijanje viška smole u unutrašnjost kalupa



Slika 6.38. Kalup nakon postavljanja tkanine za upijanje viška smole

Prije postavljanja vreće potrebno je dobro očistiti okvir koji se vidi na slici 6.37 od nečistoća i masnoća kako bi se brtvilo u obliku trake moglo primiti za okvir. Nakon toga potrebno je vreću odrezati na mjeru. Prilikom određivanja dimenzija vreće potrebno je uzeti u obzir i sve neravnine na proizvodu i ostaviti dovoljno vreće kako ni na jednom dijelu kalupa ne bi bilo manjka vreće. Oko vreće potrebno je postaviti brtvilo u traci. Brtvilo ima zaštitnu foliju s obje strane i namotano je na kolut radi lakšeg rukovanja. S jedne strane je potrebno skinuti zaštitu i polako postavljati brtvilo pazeći da nigdje ne dođe do nabora vreće ispod brtvila jer će na tom mjestu vreća puštati. Donja vreća spremna za postavljanje na kalup prikazana je na slici 6.39.



Slika 6.39. Vreća spremna za postavljanje

Kako bi se cijeli kalup zatvorio u vreću potrebno je izraditi dvije vreće. Jedna vreća s unutarnje strane okvira koja ulazi u rupu ispod kalupa i druga vreća koja se zatvara s vanjske strane okvira i ide oko proizvoda (slika 6.40). Kalup se zatvara na ovaj način jer je medijapan porozan pa se nikad ne bi postigao savršen podtlak bez zatvaranja cijelog pozitiv kalupa u vreću. Pri zatvaranju vreće potrebno je paziti da se dobro pritisne brtvilo kako ne bi puštalo i da vreća nigdje nije previše napeta i razvučena oko brtvila zbog nepažnje kod zatvaranja vreće. Na nekim mjestima se vreća zatvara na samu vreću a ne na okvir zato jer vreća mora biti duža od samog okvira kako bi mogla popuniti sve oblike oko kalupa. Dio vreće koji visi s okvira naziva se uho. Položaj i veličinu uha potrebno je dobro unaprijed isplanirati kako bi višak vreće ostao baš na onom mjestu gdje je potreban jer se tako ubrzava postupak zatvaranja vreće. Na dužim stranicama kalupa dobro je uha stavljati paralelno na ista mjesta i istih veličina jer se tako izbjegava poprečno napinjanje vreće i olakšava postizanje podtlaka bez puknuća vreće.



Slika 6.40. Zatvaranje vreće oko metalnog okvira

Prije potpunog zatvaranja vreće potrebno je postaviti ventile kroz koje se izvlači zrak iz proizvoda kod postizanja podtlaka. Potrebno je odabrati mjesto na koje se stavlja ventil. Uvijek je dobro paziti da ventil nije na samom proizvodu ili u neposrednoj blizini proizvoda. U suprotnom će na

proizvodu ostati otisak ventila ili kod prerade u peći može doći do curenja smole u ventilu ili crijeva za postizanje podtlaka (slika 6.41.). Na velike kalupe postavljena su po tri ventila, dva na nasuprotne strane gornje vreće kalupa, a treći na donju vreću kalupa. Donji dio ventila postavi se ispod vreće na mjesto na koje se želi postaviti ventil, a ispod njega je potrebno staviti bar četiri sloja tkanine za upijanje viška smole kako bi se olakšalo povlačenje zraka iz proizvoda. Na sredini donjeg dijela ventila potrebno je napraviti malenu rupicu na vreći i u nju postaviti gornji dio ventila. Ventil je potrebno stegnuti, ali najbolje ne do kraja kako se ne bi nagužvala vreća oko ventila jer tada na tom mjestu može propuštati zrak.



Slika 6.41. Smola u ventilu zbog pogrešne pozicije ventila na kalupu

Nakon što se obje vreće do kraja zatvore na okvir, potrebno je izvući zrak iz vreće i postići podtlak. Unutar kalupa često ostane zarobljena velika količina zraka pa se preporuča većinu zraka izvući iz kalupa pomoću industrijskog usisavača. Najbolje je ostaviti jedno uho na vreći otvoreno na vrhu uha, u njega ugurati cijev od usisavača i uključiti ga. Na ovaj način se vreća može vrlo lako namjestiti i prije nego se počinje postizati podtlak, jer je vrlo teško namještati vreću kad je ona zatvorena bez pomicanja ostalih potrošnih materijala ispod vreće. Kada se većina zraka izvukla usisavačem, a vreća je namještena, može se izvući crijevo usisavača, zatvoriti zadnje uho i krenuti



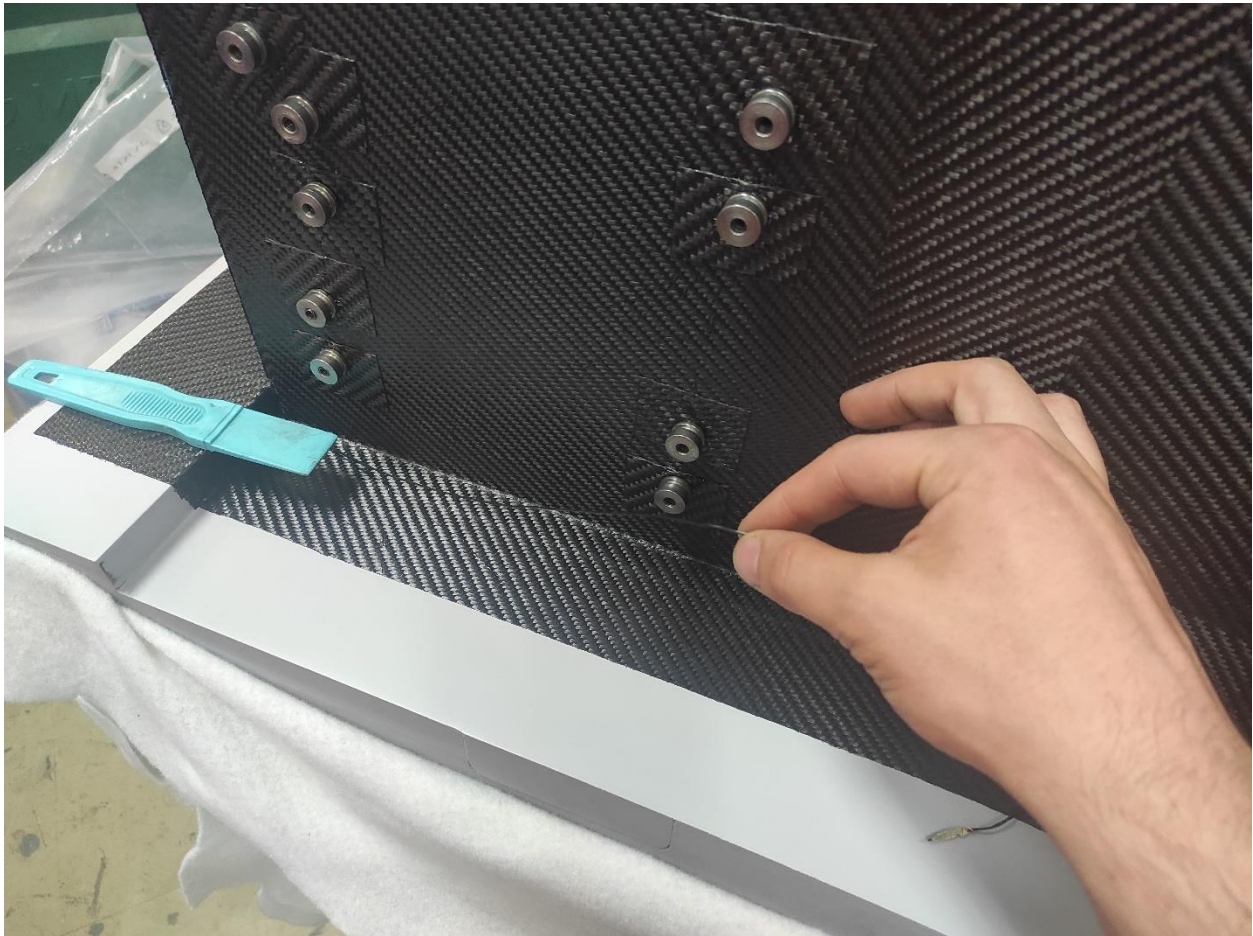
s izvlačenjem zraka. Potrebno je vreću namjestiti tako da nigdje nema mjehura zraka. Oko čahura i rubova kalupa proizvod neće biti dobro pritisnut te može ostati zarobljen zrak u kalupu nakon prerade u pećima što utječe na svojstva kalupa ali i na izgled površine kalupa. Prilikom postavljanja vreće treba obratiti posebnu pozornost jer na takvim mjestima zbog pretlaka može doći do puknuća vreće. Kada se vreća postavi treba pričekati da pumpa izvuče sav zrak zarobljen u medijapanu što može potrajati skoro 1 h za ovako velike kalupe. Proizvod je nakon postizanja podtlaka potrebno ostaviti barem 20 do 30 minuta kako bi se sav zrak izvukao iz preprega (slika 6.42).



Slika 6.42. Postupak izvlačenja zraka iz poluproizvoda

Nakon otvaranja vreće i skidanja svih potrošnih materijala može se nastaviti s polaganjem preprega na kalup. Prije početka potrebno je iz preprega izvući pojedinačne niti. Svaka nit se pričvrsti na bušilicu i zavrti kako bi se dobila čvršća nit. Takve niti polažu se uz sve bridove kako je prikazano na slici 6.43. Ove niti se kasnije prekriju ostalim slojevima, a njihova funkcija je da prvi sloj preprega koji se nalazi uz oštre bridove što bolje pritisnu u udubinu u kalupu. Tako se nakon pečenja dobiju puno oštrij i kvalitetniji bridovi negativnih kalupa koje nije potrebno

naknadno obrađivati. Umjesto pojedinačnih niti mogu se primijeniti i tanke trakice do 5 mm debljine koje se također namotaju na bušilicu.



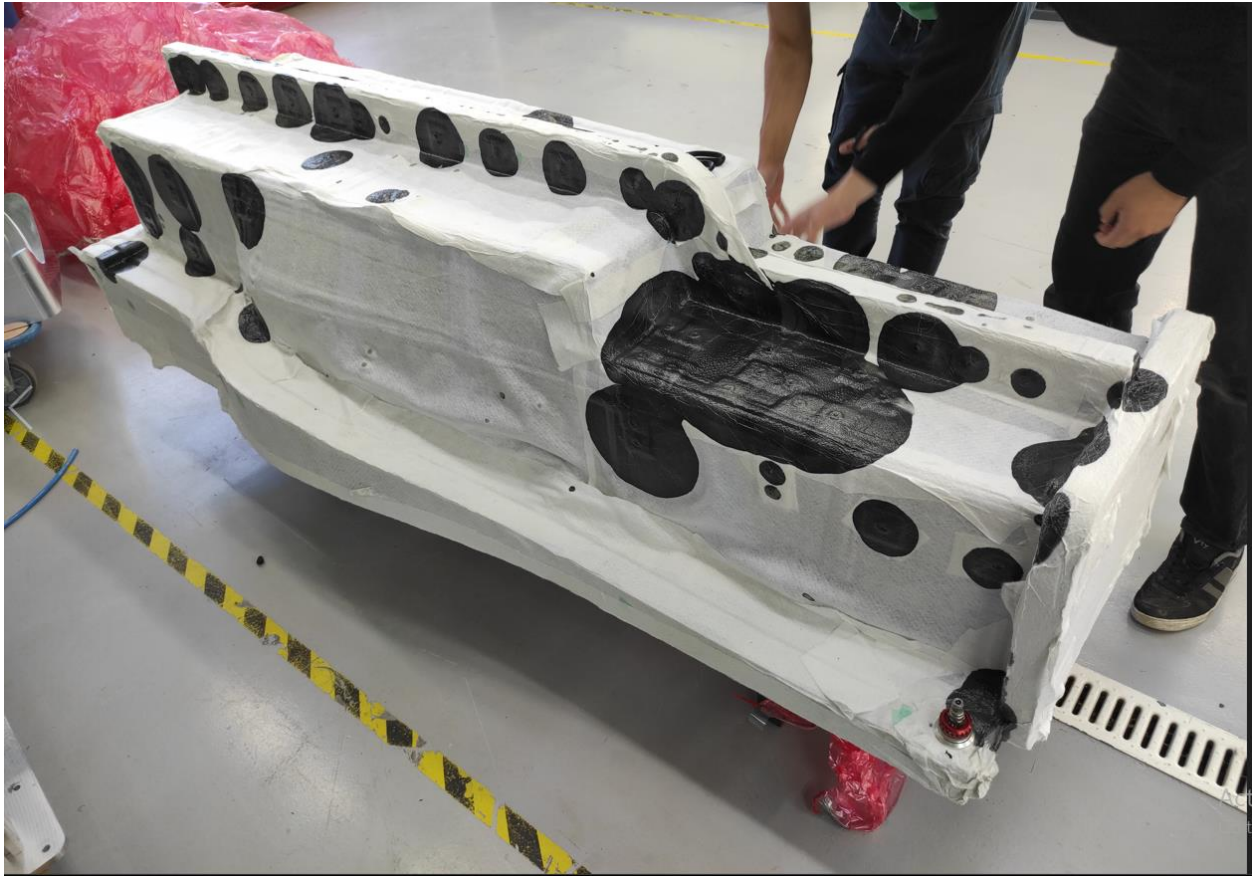
Slika 6.43. Polaganje niti na oštre bridove kalupa

Nakon polaganja niti postavljaju se ostali slojevi, a nakon četvrtog i sedmog sloja ponovno se proizvod zatvara u vreću i postiže se podtlak kako je već prethodno opisano. Nakon polaganja desetog sloja kalupa proizvod se na već opisan način zatvara u vreću te je tada spreman za postupak prerade autoklavu. Stavljanje proizvoda u autoklav prikazano je na slici 6.44.



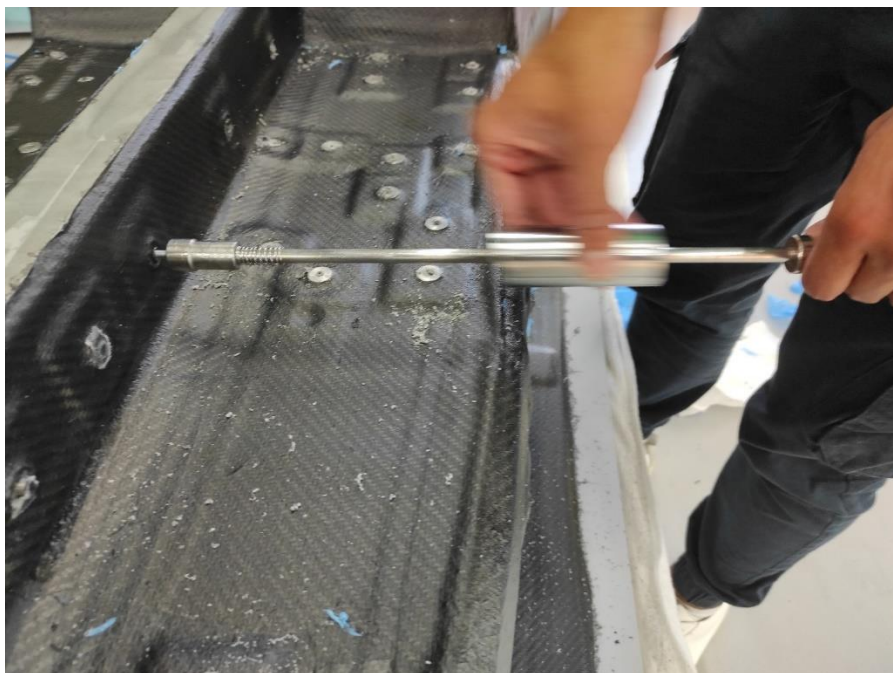
Slika 6.44. Stavljanje proizvoda u autoklav

Nakon stavljanja u autoklav prvo se radi test vreće. Na 90 sekundi se zaustavi rad pumpe na svim ventilima i zabilježi se najviši pad tlaka u tom vremenskom roku. Ako je pad tlaka viši od 0,02 bara potrebno je pronaći mjesta na kojima vreća pušta i popraviti ju. Kada vreća prođe test može se krenuti sa postupkom prerade. U prvoj fazi se u autoklavu polako diže pretlak do vrijednosti od sedam bara. To je vrijednost pretlaka na kojoj se najčešće prerađuju proizvodi od preprega. Pretlak omogućuje da se smola tijekom prerade, kada postane viskozna, što bolje rasporedi po svim dijelovima kalupa i tako postigne što kvalitetniji proizvod. U drugoj fazi postupka prerade diže se temperatura do vrijednosti od 70 °C, a diže se za 2 °C svake min. Nakon dizanja temperature kalup se drži na ovoj temperaturi ukupno 20 h. Prema tehničkom listu materijala potrebno je 12 h da smola u potpunosti umreži pri 70 °C. Proizvod se ostavlja 20 h kako bi se dalo vremena glomaznom kalupu od medijapana da se progrije. Tijekom cijelog postupka prerade svakih 10 min radi se proba vreće na svakom od ventila zasebno. Ako tijekom 90 sekundi testa neki ventil ima pad tlaka više od 0,02 bara, on će se prestati testirati i ostaviti će se da pumpa cijelo vreme radi na tom ventilu. To može ponekad biti problem ako ima više proizvoda ili ako vreća jako pušta jer je kapacitet pumpe ograničen. Tako i tijekom stalnog rada pumpe može doći do pada potlaka unutar vreće što će loše utjecati na kvalitetu proizvoda. Nakon prerade i hlađenja proizvoda on se može izvaditi iz autoklava. Nakon otvaranja proizvoda (slika 6.45) potrebno je odvojiti negativni kalup od predoblika za proizvoda.



Slika 6.45. Skidanje potrošnih materijala s proizvoda nakon prerade

Prije odvajanja proizvoda potrebno je skinuti sve zatike. Neki od navoja na zaticima bili su puni smole pa ih je potrebno prethodno očistiti. Kako bi se spriječilo da u navoje uđe smola preporučuje se da se slijedeći put u njih stave kratki vijci koji će se izvaditi prije vađenja zatika. Za vađenje zatika može se primijeniti naprava prikazana na slici 6.46. Vrh naprave zavrne se u zatik i nakon toga se cilindričnim dijelom na napravi udara u stražnju stranu naprave. Ovako zatik polako izlazi iz čahure.



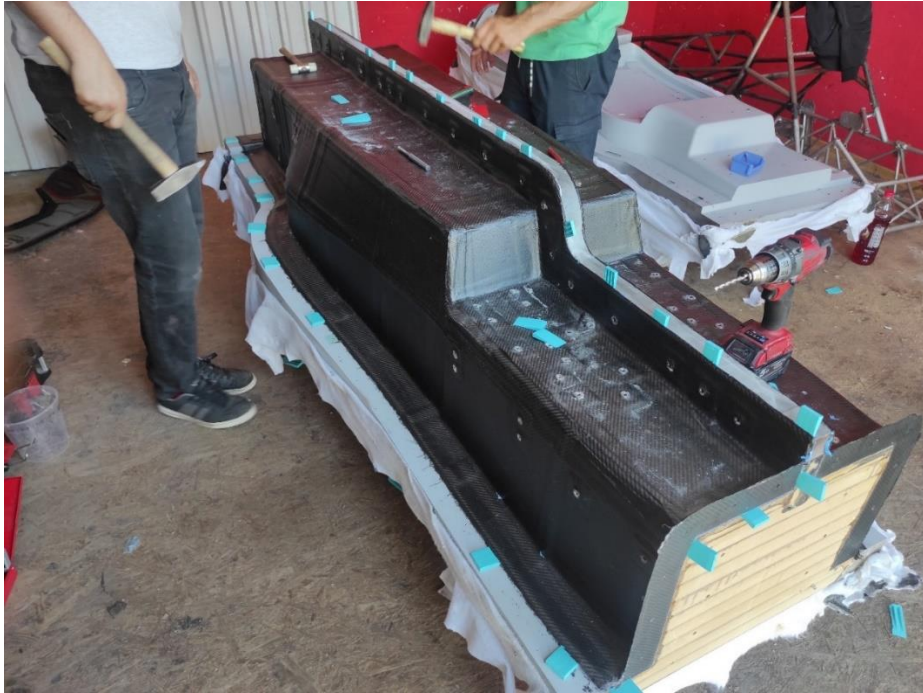
Slika 6.46. Naprava za vađenje zatika iz kalupa

Nakon vađenja zatika iz kalupa može se skinuti poklopac na prednjem dijelu kalupa kako bi se olakšalo vađenje negativnih kalupa (slika 6.47).



Slika 6.47. Skidanje prednjeg poklopca s predoblika za proizvodnju kalupa

Nakon skidanja poklopca može se skinuti i negativni kalup. Po rubovima kalupa mogu se postaviti plastični klinovi koji se polako nabijaju čekićem u kalup kao što je vidljivo na slikama 6.48. i 6.49. Na velikim pregibima kalupa i oko polumjera preporuča se lagano udaranje čekićem kako bi kalup popustio. Nakon što se kalup u potpunosti odvoji od pozitivnog kalupa potrebno ga je lagano skinuti pazeći da se ne ošteti.



Slika 6.48. Odvajanje kalupa pomoću čekića



Slika 6.49. Odvajanje kalupa 2

Nakon odvajanja kalupa potrebno ih je međusobno pozicionirati i spojiti vijcima. Postupak pozicioniranja kalupa prikazan je na slici 6.50.



Slika 6.50. Pozicioniranje kalupa

Nakon pozicioniranja kalupa potrebno je površine prirubnica premazati odvajalom prema uputama. Između prirubnica se kod ponovnog sklapanja postavlja folija za odvajanje kako se kod prerade dijelovi kalupa ne bi međusobno zalijepili. Kako bi kalupi imali svojstva koja garantira proizvođač preprega potrebno ih je naknadno preraditi (eng. *post cure*). Prema tehničkom listu proizvoda potrebno ga je zagrijati dva sata na 200 °C ali u stvarnosti on se peče na temperaturi 5 °C većoj od njegove radne temperature na kojoj se prerađuje proizvod. Preporuča se dizati temperaturu 0,3 °C/h. Nakon naknadne prerade kalupa potrebno je obrezati sve oštre bridove na rubovima kalupa. Kalup se rastavlja te ga je potrebno očistiti i premazati sredstvom za popunjavanje pora i odvajalom kako je već opisano kod postupka prerade pozitivnih kalupa. Nakon još jedne naknadne prerade kalupa treba ga ponovno premazati sredstvom za odvajanje i spreman je za proizvodnju *monocoque* šasije.

## 6.4 Izrada *monocoque* šasije

U nastavku je opisan postupak koji će se primijeniti za proizvodnju druge *monocoque* šasije FSB Racing Team-a. Tim je u prošlosti proizveo samo jednu šasiju. U nastavku je dana usporedba između postupaka koji su se primijenili za izradu prve šasije i onih koji će se primijeniti za izradu druge. Kako nova šasija nije do kraja proizvedena biti će dodane slike izrade prve šasije kako bi se lakše objasnili postupci proizvodnje nove šasije i neke razlike u postupku proizvodnje prve i druge šasije.

### 6.4.1 Priprema redoslijeda slaganja i krojeva za izradu šasije

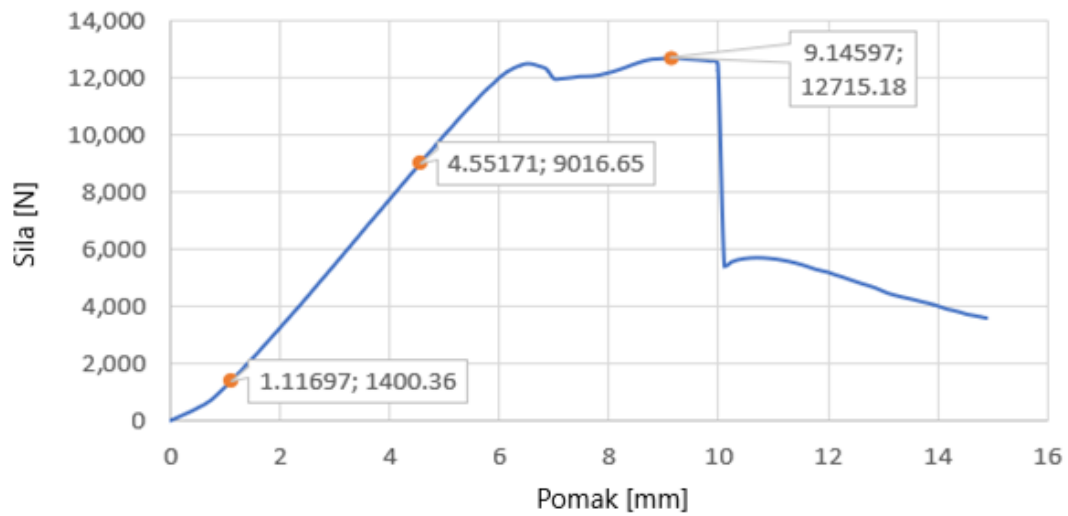
Prije početka izrade šasije potrebno je odrediti način slaganja preprega po dijelovima šasija kako bi se postigla što manja masa cijele šasije uz optimalnu torzijsku krutost šasije. Za sve redoslijede slaganja koji se primjenjuju na šasiji kao i za umetke pojaseva vozača potrebno je izraditi ispitna tijela i testirati ih na smična i savojna svojstva kao što je opisano u drugom poglavlju ovog rada pod 2.2.1. Ispitivanje ispitnog tijela savijanjem u tri točke prikazano je na slici 6.51, a rezultati ispitivanja na slici 6.52.



Slika 6.51. ispitivanje ispitnog tijela savijanjem u tri točke



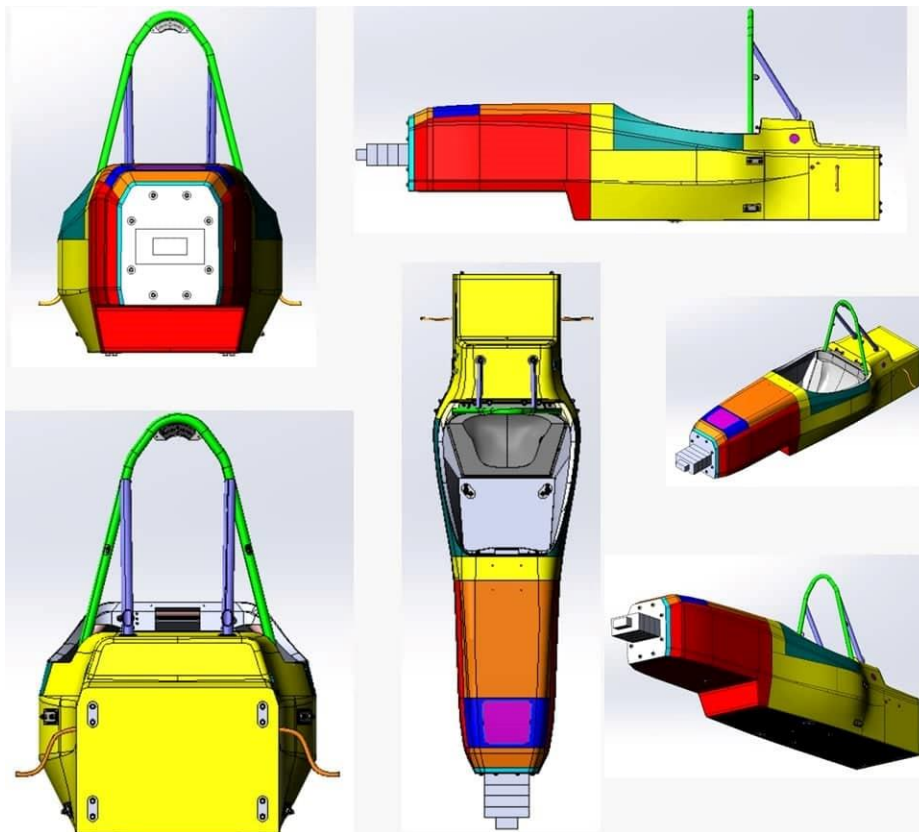
## Vertikalna bočna udarna struktura- savijanje u 3 točke



i

Slika 6.52. Rezultati ispitivanja ispitnog tijela savijanjem u tri točke

Nakon testiranja i simulacija u programu *Abaqus* odabrani su redoslijedi slaganja preprega za pojedine dijelove šasijske kako je prikazano na slici 6.53. Redoslijed slaganja za svaki dio prikazan je u tablici 6.1.



Slika 6.53. Raspored redoslijeda slaganja po površini šasijske

Tablica 6.1. Raspored slaganja preprega i saća po vanjskim površinama šasije prema slici 6.52

Struktura	Redoslijed slaganja vanjske ljuske	Debljina vanjske ljuske [mm]	Materijal jezgre	Debljina jezgre [mm]	Redoslijed slaganja unutarnje ljuske	Debljina unutarnje ljuske [mm]
Potporna struktura prihvata glavnog obruča	1) 245 / 0°, 2) 245 / 45°, 3) 283 / 0°, 4) 405 / 0°	1,43	Aluminijsko saće 4,5 - 1/8 20 mm	20,0	1) 245 / 45°, 2) 283 / 0°, 3) 283 / 0°	0,84
Potporna struktura prednjeg obruča	1) 245 / 0°, 2) 245 / 45°, 3) 405 / 0°	1,14	Aluminijsko saće 4,5 - 1/8 20 mm	20,0	1) 283 / 0°, 2) 283 / 0°	0,62
Prednja pregrada	1) 245 / 0°, 2) 450 UD / 0°, 3) 405 / 45°, 4) 450 UD / 0°, 5) 283 / 0°, 6) 405 / 45°, 7) 405 / 45°	2,91	Rohacell SL 200 20 mm	20,0	1) 405 / 45°, 2) 283 / 0°, 3) 450 UD / 0°, 4) 405 / 45°, 5) 450 UD / 0°, 6) 245 / 0°	2,62
Potporna struktura prednje pregrade	1) 245 / 0°, 2) 245 / 45°, 3) 405 / 0°	1,14	Aluminijsko saće 4,5 - 1/8 20 mm	20,0	1) 283 / 0°, 2) 283 / 0°	0,62
Vertikalna površina bočne udarne strukture	1) 245 / 0°, 2) 245 / 45°, 3) 283 / 0° 4) 405 / 45°	1,43	Aluminijsko saće 4,5 - 1/8 20 mm	20,0	1) 245 / 45°, 2) 283 / 0°, 3) 283 / 0°	0,84
Horizontalna površina bočne udarne strukture	1) 245 / 0°, 2) 450 UD / 15°, 3) 450 UD / -15°	1,60	Aluminijsko saće 4,5 - 1/8 15 mm	15,0	1) 450 UD / 15°, 2) 450 UD / -15°, 3) 283 / 0°	1,25
Gornji prihvati pojaseva za vozače	1) 245 / 0°, 2) 283 / 0°, 3) 405 / 45°	1,43	Aluminijsko saće 4,5 - 1/8 20 mm	20,0	1) 245 / 45°, 2) 283 / 0°, 3) 283 / 0°	0,84

Vrste preperega korištene za *monocoque* šasiju su:

- MTM 71 - 36 % - 12KT100GB40D - 5H - 283 g/m<sup>2</sup> - 1000, oznaka u tablici 283
- MTM 57 - 40 % - 3KFT300B40B - 2x2T - 245g/m<sup>2</sup> - 1250, oznaka u tablici 245
- MTM 58B - 38 % - 6KHS - 2x2T - 405 g/m<sup>2</sup> - 1250, oznaka u tablici 405
- VTM 264 - 37 % - 24KT700SC - 450 g/m<sup>2</sup> - 130, oznaka u tablici 450
- ZPREG 264FRB - 42% - 3KHS - 2x2T - 199 g/m<sup>2</sup> - 1250, ne primjenjuje se u samoj šasiji već za dijelove koji imaju zahtjeve na vatrootpornost.

Broj nakon oznake korištenog preprega u tablici govori o orijentaciji vlakana u tom sloju. Prema tablici tako potporna struktura prednje pregrade u vanjskoj ljusci ima tri sloja. Prva dva sloja su od preprega MTM 57 - 40 % -3KFT300B40B - 2x2T – 245 g/m<sup>2</sup>, prvi sloj orijentacije od 0° a

drugi orijentacije  $45^\circ$ , a treći sloj je prepreg MTM 58B - 38 % - 6KHS - 2x2T - 405 g/m<sup>2</sup> – 1250 orijentacije  $0^\circ$ .

Nakon odabira redoslijeda slaganja potrebno je odrediti krojeve i redoslijed polaganja krojeva u šasiju. Krojevi su rađeni uz pomoć programa *Altair*. Nakon određivanja krojeva potrebno je na stroju za rezanje preprega odrezati predloške za rezanje krojeva i provjeriti sve krojeve i preklope krojeva unutar kalupa i po potrebi prepraviti krojeve i plan polaganja krojeva u kalup. Prije polaganja krojeva prepreg se može rezati ili pomoću stroja za rezanje preprega ili ručno pomoću predložaka unaprijed odrezanih na stroju.

#### **6.4.2 Izrada vanjske ljuske šasije**

Odlučeno je da će se cijela šasija proizvesti u jednom komadu. U postupku proizvodnje koji se prije upotrebljavao proizvedene su dvije polovice šasije (lijeva i desna) koje su kasnije spajane u jedan komad. Na ovaj način proizvede se spoj dvije polovice koji je koncentrador naprezanja i njegov spoj s ostatkom šasije mora imati bolja svojstva od ostatka šasije kako tokom primjene ne bi došlo do loma šasije na spoju. Nadalje, spoj je u prošlosti tima izrađen ručnim polaganjem tkanine i zatvaranjem u vreću, a ne prepregom. Izračunato je da je zbog ovakvog načina izrade u spoju dodano skoro 2,5 kilograma mase više nego preradom preprega u autoklavu. S druge strane, ovakav način izrade šasije je puno zahtjevniji jer je cijelu šasiju potrebno izraditi unutar uskog kalupa što zahtjeva puno više vremena kod polaganja preprega i jezgri te ograničava broj ljudi koji istovremeno mogu raditi na šasiji. Ukupno trajanje cijelog postupka ne bi se trebalo znatno promijeniti jer se iz postupka izbacuje kasnije spajanje polovica šasije.

Prije polaganja preprega potrebno je u spojenom kalupu nanijeti namotana vlakna preprega po svim neravninama na spojevima kalupa kako bi se dobio što ljepši prijelaz na šasiji i da se izbjegne ulaženje smole ili preprega u veće neravnine na spoju kalupa.

Prepreg se polaže u kalup kao što se postavljao za proizvodnju kalupa, te je potrebno postići podtlak na bar pola sata na isti način kao i kod proizvodnje kalupa. Za razliku od kalupa, kod proizvodnje šasije jedna se vreća prevlači unutar šasije a druga oko šasije te se spoje na obje strane. Kako bi se unutar kalupa lakše posložila vreća može se kod kokpita razrezati obje vreće u obliku slova x te međusobno spojiti obje vreće na tom mjestu jednu za drugu s brtvilom u traci. Ovo omogućuje da se jedna osoba može zavući u šasiju kroz kokpit i tako posložiti vreću kao što je prikazano na slici 6.54.



Slika 6.54. Podešavanje vreće unutar kalupa kod spajanja polovica prve šasije

Nakon prvog sloja potrebno je posložiti ostale slojeve vanjske ljuske u kalup, zatvoriti vreću na isti način i ispeći proizvod u autoklavu prema podacima iz tehničkog lista preprega. Jedina razlika u odnosu na sva ostala zatvaranja vreće je da se prije folije za odvajanje treba postaviti odvojiva tkanina (eng. *peel ply*). Ova tkanina se mora postaviti na prepreg što preciznije kako ne bi došlo do stvaranja nabora. Ova tkanina će na proizvodu ostaviti hrapavu površinu koja omogućuje

kasnije lako lijepljenje ostalih komponenti na površinu. Razlika površina proizvedenih sa i bez odvojive tkanine prikazana je na slici 6.55.



Slika 6.55. Površina proizvedena bez odvojive tkanine (gore) i s odvojjivom tkaninom (dolje)

#### **6.4.3 Postavljanje prednjeg obruča i umetaka**

Nakon prerade vanjske ljuske potrebno je u kalup postaviti umetke i prednji obruč, postaviti slojeve preprega oko prednjeg obruča i ponovno preraditi u peći poluproizvod u autoklavu. Između umetaka i vanjske ljuske može se staviti adhezivni film ili se umeci mogu zalijepiti pomoću epoksidne paste. Pasta se dobije tako da se epoksidna smola EC 152 pomiješa s umreživalom željene brzine (spori, srednje brzi ili brzi) u omjeru 100 : 30 i dobro izmiješa. U ovu smjesu je potrebno dodati staklo u obliku malih mjehurića u volumnom omjeru 1 : 1 i ponovno dobro izmiješati. Dobivena smjesa namaže se na svaki umetak, umetak se pozicionira na zatike koji su prethodno umetnuti u čahure na kalupu a višak smole potrebno je očistiti vlažnom krpom. Ako nakon umreživanja oko umetka ostane smole preporuča se da se ona odstrani brušenjem električnim alatima. Preporuča se korištenje sporog ubrzivača i zatvaranje cijelog kalupa u vreću

odmah nakon postavljanja umetaka kako bi se izbjeglo korištenje stega i tako ubrzao postupak prihvaćanja umetaka za vanjsku ljusku.

Prednji obroč je potrebno pozicionirati na mjesto i na njega postaviti prepreg. Odlučeno je da će se obroč prihvatiti u šasiju na ovaj način jer se tako dobije najmanji volumen prednjeg obruča i izbjegava se potreba za prihvaćanjem obruča na šasiju dodatnim elementima (prihvati, vijci, matice i podloške). Ostale stvari koje su važne za prihvaćanje prednjeg obruča na ovaj način opisane su prethodno u poglavlju 2.1 i na slici 2.3.

Nakon postavljanja umetaka i prednjeg obruča potrebno je zatvoriti cijeli proizvod u vreću i preraditi u autoklavu prema tehničkom listu preprega kako bi prepreg oko obruča potpuno umrežio. Nakon prerade preporuča se izvaditi proizvod po prvi put iz kalupa. Zbog manje krutosti proizvoda lakšega je izvaditi iz kalupa nego nakon proizvodnje unutarnje ljuske proizvoda. Ako se sada uspije izvući proizvod iz kalupa, proizvod će se dati izvući iz kalupa i nakon proizvodnje unutarnje ljuske.

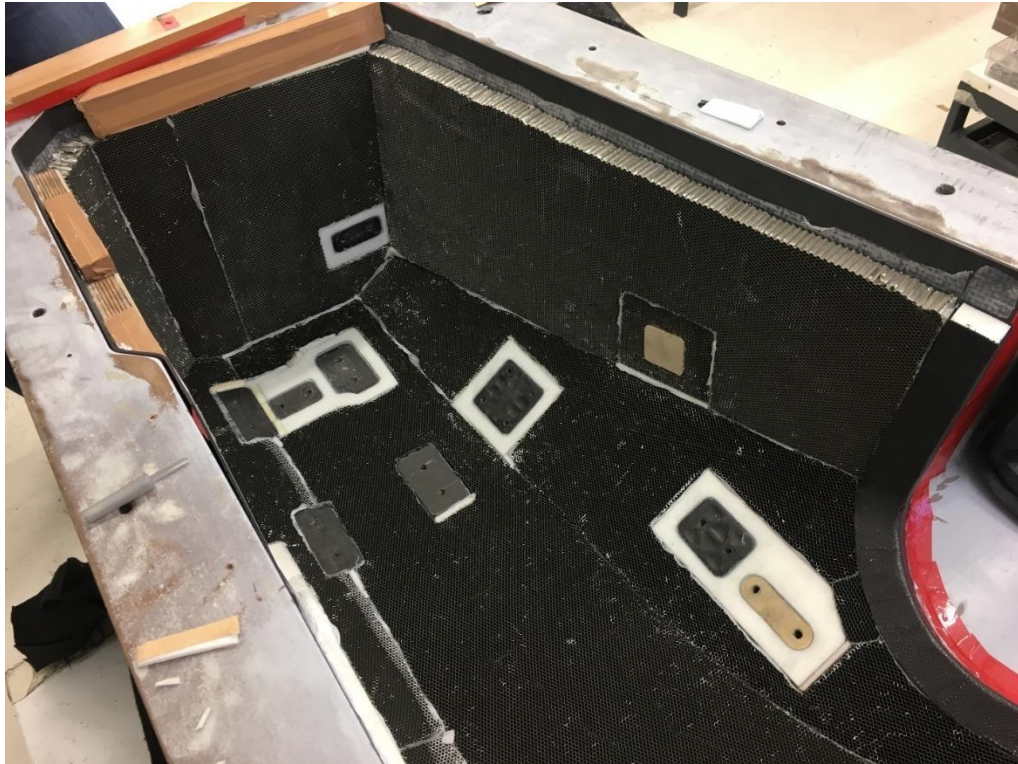
#### **6.4.4 Postavljanje jezgre i spajanje jezgre i umetaka**

Nakon prerade prednjeg obruča potrebno je postaviti jezgru. Na većinu površina postavlja se aluminijska sačasta jezgra, a na mjesta gdje to zbog geometrije površine nije moguće postavlja se jezgra od polimetakrilimida (PMI) trgovačkog naziva *Rohacell*. Za postavljanje saća najlakše je izraditi papirnate predloške pomoću kojih se kasnije mogu skalpelom rezati saće. Na predlošku je potrebno označiti pozicije umetaka unutar šasije i središta polumjera na rubnim površinama do kojih će ići taj komad saća i odrezati predloške škarama ili skalpelom. Postupak izrade predložaka prikazan je na slici 6.56.



Slika 6.56. Izrada predložaka za rezanje saća

Ako saća ne sjeda na mjesto ili strši na rubovima nakon umetanja potrebno ih je prilagoditi. Nakon što komad saće sjedne na mjesto potrebno je izraditi kutove na rubovima, tako da kut na svakom rubu saće bude jednak polovici kuta između površine na kojoj je saća i susjedne površine. Samo tako se može osigurati da susjedne saće sjednu savršeno jedna uz drugu bez rupe između njih i bez razlike u visini dvije susjedne saće. Kut na ravnim bridovima može se postići obodnom pilom, a na kosim bridovima ručnom brusilicom. Izgled unutrašnjosti šasije nakon postavljanja jezgri prikazan je na slici 6.57. na primjeru proizvodnje prošle šasije koja se radila od dvije polovice.



Slika 6.57. Saće postavljene na mjesto u polovicu kalupa

Prije proizvodnje unutarnje ljuske šasije potrebno je osigurati spoj umetaka s donjom ljuskom i okolnim saćama. Potrebno je iz kalupa izvaditi sve ljuske, a na vanjsku ljusku ispod saća postaviti adhezivni film kao što je prikazano na slici 6.58 na primjeru proizvodnje prve šasije.



Slika 6.58. Postavljanje adhezivnog filma na vanjsku ljusku polovice šasije



Na prethodnoj slici 6.57 može se vidjeti da su svi polumjeri šasije dodatno obloženi slojem preprega s jednosmjernim vlaknima, kako bi se što više ojačala šasija i time povećala torzijska krutost šasije. Provedene simulacije pokazale su da šasija ima željenu torzijsku krutost i bez ovih dodataka, pa se oni na drugoj šasiji neće dodati.

Prije polaganja unutarnje ljuske na drugoj će se šasiji ojačati spoj između umetaka i saća ručnim nanošenjem smole medicinskim injekcijama. Za ovaj postupak potrebno je ponovno izraditi pastu prema uputama iz poglavlja 6.4.3. Kada se izradi pasta potrebno je polako u malim količinama dodavati u pastu pamučna vlakna. Ako se doda previše pasta se neće moći injekcijom ubaciti u ćelije na saćama. Ako pasta bude prerijetka brzo će iscuriti iz ćelija a posebice na umecima koji će u šasiji biti okrenuti bočno ili obratno tijekom postupka spajanja jezgre i umetaka. Pastu je pomoću medicinske injekcije potrebno nanijeti u saće, pričekati da se slegne i ponoviti postupak sve dok se ne popuni cijela visina okolnih saća (slika 6.59). Za najbolje rezultate spajanja umetaka s jezgrom potrebno je do kraja ispuniti pastom prostor između ćelija i umetka te prvi red ćelija oko umetka.



Slika 6.59. Spajanje jezgre i umetaka nanošenjem paste medicinskom injekcijom kod izrade ispitnih tijela za smično i savojno ispitivanje

#### 6.4.5 Izrada unutarnje ljuske šasije i završetak postupka proizvodnje

Postupak polaganja slojeva unutarnje ljuske i prerade vanjske ljuske detaljno je opisan u poglavlju 6.4.2. Nakon prerade u pećima unutarnje ljuske potrebno je izvaditi proizvod iz kalupa te u šasiju dodati sve kompozitne dijelove koji još nisu dodani kao što je prirubnica za prihvat sjedala i zaštite za vozača. Kada se u šasiju zalijepe svi kompozitni dijelovi preporuča se naknadna prerada u peći kako bi se postigla garantirana svojstva od strane proizvođača. Nakon prerade potrebno je oko kokpita obrezati rupe za glavni obruč, zaštititi *Monocoupe* gdje je to potrebno aluminijskom ljepljivom trakom i u sklopu zavariti prednji obruč. Glavni obruč prve šasije ide oko šasije i prihvaćen je s vanjske strane. Na drugoj šasiji on se prihvaća iznutra kako bi ukupna masa sklopa glavnog obruča bila što manja. Nakon zavarivanja glavnog obruča šasiju je potrebno polirati, lakirati i obojati u željene boje nakon čega je spremna za sklapanje ostalih sklopova bolida na šasiju. Prva proizvedena šasija spremna za sklapanje prikazana je na slici 6.60.



Slika 6.60. Šasija spremna za sklapanje bolida

## 7 Zaključak

U radu je opisan postupak proizvodnje *monocoque* šasije za natjecanja *Formula student* koju su proizveli članovi FSB Racing Teama. Ovo je druga *monocoque* šasija koju proizvodi ovaj tim. Kod proizvodnje nove šasije naglasak je bio na smanjenju mase šasije i smanjenju dimenzija šasije te postizanju što kompaktnijeg pakiranja svih sklopova bolida. Sklop motora i reduktor premješteni su iz šasije u sklop kotača. Prednji obruč prihvaća se unutar šasije a ne izvan kao kod prve *monocoque* šasije. Prednji dio šasije je sužen kako bi udarna zona mogla biti što manja. Ovo su samo neke promjene na razini cijelog bolida koje omogućuju smanjenje dimenzija šasije.

Postupak izrade šasije je izmijenjen time što se druga šasija proizvodi iz jednog komada, a ne iz polovica kao kod prve šasije. Na ovaj način uvelike se smanjila masa *monocoque* šasije, otežao se postupak polaganja ljuski i jezgri u šasiju, ali se smanjilo ukupno trajanje postupka proizvodnje izbacivanjem postupka spajanja dviju polovica.

Došlo je do promjena i kod materijala umetaka. Kod prve šasije umeci su proizvedeni od šperploče od breze, a opterećeniji umeci su proizvedeni glodanjem aluminija. Za novu šasiju neki manji umeci se izrađuju od šperploče, a veći se rade od epoksidne smole ojačane ugljičnim vlaknima. Za umetke se proizvodi kompozitna ploča određene debljine od preprega. Nakon prerade u peći umeci se režu vodenim mlazom. Još jedna promjena kod umetaka je spajanje umetaka s jezgrom ubrizgavanjem epoksidne paste medicinskim injekcijama. Kombinacijom novog materijala i postupka spajanja umetaka postižu se manje potrebne dimenzije umetaka za ista opterećenja i manja masa od mase umetaka od šperploče kod većih umetaka.

Kod prve *monocoque* šasije proizvodio se samo negativni kalup od medijapana u kojem su se izradile polovice kalupa. Za novu šasiju proizvedeni su pozitivni kalupi od medijapana u kojima se proizvode negativni kalupi od epoksidne smole ojačane ugljičnim vlaknima. Na ovaj način se smanjuju toplinska naprezanja kod prerade u pećima negativnog kalupa i kod prerade samog proizvoda. Prerada negativnog kalupa se zbog odabira drugog materijala kalupa izrađuje na nižoj temperaturi što uzrokuje manje deformacije kalupa kod prerade u pećima. Kod proizvodnje proizvoda kalup i proizvod su istog materijala i imaju isti koeficijent toplinskog rastezanja pa ne dolazi do visokih deformacija i zaostalih naprezanja. Na ovaj način dobiva se veća točnost završnog proizvoda i pozicije umetaka i rupa za prihvaćanje drugih komponenti na bolid.

Novi postupak proizvodnje kalupa je puno skuplji, ali ima i prednost postizanja modularnosti. Iskorištena je prilika da se poboljša i nauči novi postupak proizvodnje kalupa s novim materijalima i od više dijelova. Plan razvoja za buduće bolide je postići temeljni koncept bolida i svih

pod sustava koji se neće za slijedeće bolide mijenjati iz temelja. Cilj je da svi koncepti pod sustava budu što sličniji i da se mijenjaju na način da ne zahtijevaju opsežne promjene drugih pod sustava. Krajnji cilj je u godinu dana moći provesti razvoj, konstrukciju, proizvodnju i testiranje novog bolida prije natjecanja. Svake godine je za natjecanja potrebno proizvesti novu šasiju za auto. Kako bi se ubrzali razvoj i proizvodnja šasije može se iskoristiti način proizvodnje šasije opisan u ovom radu. Kalupe za šasiju treba proizvesti od što više dijelova kalupa. Kod razvoja nove šasije može se ostaviti ista vanjska geometrija na što više dijelova šasije, a promijeniti samo one dijelove koji se moraju promijeniti zbog nekog drugog sklopa bolida. Tako će se smanjiti veličina kalupa koji se trebaju proizvesti i količina dorade, a time se smanjuju ukupna cijena proizvodnje šasije i vrijeme potrebno za proizvodnju kalupa.

## 8 Literatura

- [1] Summer of racing Formula student Germany, <https://www.global-formula-racing.com/en/summer-of-racing-formula-student-germany>, 10. svibnja 2021.
- [2] Formula student Germany - rulebook  
[https://www.formulastudent.de/fileadmin/user\\_upload/all/2022/rules/FS-Rules\\_2022\\_v0.9.pdf](https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2022/rules/FS-Rules_2022_v0.9.pdf), 10. svibnja 2021.
- [3] Heiβing, B., Ersoy M.: Chassis handbook: fundamentals, driving dynamics, components, mechatronics, perspectives, Berlin 2011.
- [4] FSB Racing team - izvještaji (2016. – 2021.), 15. svibnja 2021.
- [5] Riley W. B., Albert, G. R. analysis and testing of a Formula SAE car chassis, Cornell university, SAE technical paper series 2002-01-3300
- [6] Gillespie T. D.: Fundamentals of vehicle dynamics, Society of Automotive Engineers, 1992.
- [7] Explained: Weight vs body roll (part 1), <https://www.beyondseattime.com/weight-transfer-vs-body-roll-part-1/>, 19.8.2021.
- [8] Carroll Smith, "Tune To Win", Aero Publisher, Inc, 1978, ISBN 0-87938-071-3
- [9] Ngo T. D.: Composite and Nanocomposite Materials- From Knowledge to Industrial Applications, IntechOpen, London 2020.
- [10] Chapter 7: Advanced Composite Material – FAA magazine (Federal aviation administration), <https://issuu.com/contact.magazine/docs/acm>, 1.6.2022.
- [11] Karlsson K. F., Tomas B. Astrom: Manufacturing and applications of structural sandwich components, Department of Aeronautics Structures, Royal Institute of Technology, Stockholm 1995.
- [12] Baking Composites: Layup and Curing, <http://allthingsbiomaterials.org/archives/204>, 1. lipnja 2022.
- [13] Vacuum infusion guide, [https://www.fibreglast.com/product/vacuum-infusion-Guide/Learning\\_Center](https://www.fibreglast.com/product/vacuum-infusion-Guide/Learning_Center), 2. lipnja 2022.

- [14] Abdurohman K., Siahaan M.: Effect of mesh-peel ply variation on mechanical properties of E-glas composite by infusion vacuum method, Journal of Physics: Conference Series 1005 012009
- [15] Dhakal H. N., Ismail S. O.: Sustainable Composites for Lightweight Applications, 1005 012009
- [16] Halley P. J.: Thermosets: structure, properties and applications, Woodhead Publishing, New Delhi, 2012.
- [17] Gupta M., Burela G. R.: Advances and applications of biofiber-based polymer composites, Advances in Bio-Based Fiber, 2022.
- [18] Insert design handbook, ESA Requirements and Standards Division, Noordwijk 2011.
- [19] Mold construction guide,  
[https://www.fibreglast.com/product/mold-construction/Learning\\_Center](https://www.fibreglast.com/product/mold-construction/Learning_Center), 13.6.2022.
- [20] How to use MDF for composite tooling,  
<https://explorecomposites.com/articles/tooling/using-mdf-for-composites-tooling/?fbclid=IwAR1uglscSd8JdTUtoTyUPYYT4B78JcA5PzNmfWV5WaSDNRPSORckf0nBikU>, 13.6.2022.