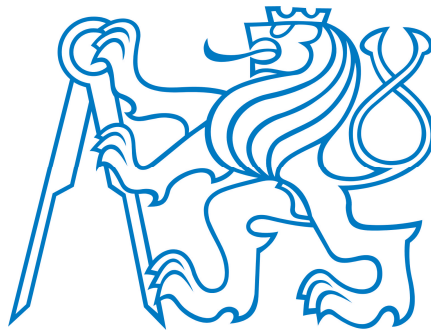


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta strojní – Ústav automobilů, spalovacích motorů
a kolejových vozidel**



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**OPTIMALIZACE NÁVRHU
A VÝROBY AEROPRVKŮ**

AEROPACKAGE DESIGN AND MANUFACTURING OPTIMIZATION

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Klier** Jméno: **Filip** Osobní číslo: **492462**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Optimalizace návrhu a výroby aeroprvků

Název bakalářské práce anglicky:

Aeropackage design and manufacturing optimization

Pokyny pro vypracování:

- 1) Proveďte rešerši k výrobě kompozitních materiálů a bezpečnosti práce s nimi.
- 2) Navrhněte bezpečnostní postupy pro práci s kompozitními materiály.
- 3) Zhodnoťte současný stav výroby kompozitů, včetně ekonomických hledisek.
- 4) Navrhněte optimalizované výrobní postupy kompozitních dílů, včetně dodržení bezpečnosti práce.

Seznam doporučené literatury:

Composite Materials: Design and Applications. Third Edition. USA: CRC Press, 2014. ISBN 9781466584877.
SMITH, Carroll. Tune to Win: The art and science of race car development and tuning. Fallbrook: Aero Publishers, 1978. ISBN 0-87938-071-3.
MILLIKEN, Douglas L. Race car vehicle dynamics: problems, answers and experiments. Warrendale: SAE International, c2003. ISBN 978-0768011272.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Lukáš Pacoň ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **19.10.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **11.01.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Lukáš Pacoň
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Oldřich Vítek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Anotační záznam

Jméno: Filip
Příjmení: Klier
Název práce v češtině: Optimalizace návrhu a výroby aeroprvků
Název práce v angličtině: Aeropackage Design and Manufacturing Optimization
Rozsah práce: 71 stran
52 obrázků
3 tabulky
Akademický rok: 2022/2023
Ústav: 12 120 Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel
Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství
Vedoucí práce: Ing. Lukáš Pacoň

Klíčová slova: Formula Student, aerodynamický balíček, kompozitní materiály

Key words: Formula Student, aerodynamic package, composite materials

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím literárních zdrojů a informací, které cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů.

Datum:

Podpis

Anotace

Tématem této bakalářské práce je optimalizace návrhu a výroby aerodynamických prvků na závodním monopostu Formula Student týmu CTU CarTech. V teoretické části práce se soustředím na možnosti volby materiálů pro tvorbu aeroprvků, bezpečnost práce s kompozitními materiály a možné konstrukce kompozitních aeroprvků. V praktické části tyto vědomosti využívám pro tvorbu optimalizovaného a odlehčeného přítláčného křídla.

Abstract

The topic of this bachelor's thesis is the design and manufacturing optimization of the aerodynamic parts on CTU CarTech's Formula Student racecar. At the theoretical section of my work, I am describing material possibilities for aerodynamics parts, work safety with composite materials and potential constructions of composite aerodynamic elements. At the practical section I will create a downforce producing racecar wing with optimized design based on all the previous knowledge.

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce Ing. Lukášovi Pacoňovi za vedení práce, cenné rady a připomínky při jejím zhotovení.

Dále bych rád poděkoval Ing. Lukášovi Krčkovi za jeho cenné rady v oblasti infuzního laminování.

Také děkuji Ing. Martinovi Ševčíkovi za pomoc při laminaci předního křídla na vůz FS.13 a komentáře k nedostatkům na této konstrukci.

Děkuji také mé rodině, která mi umožnila studovat na vysoké škole a v průběhu celého studia mě podporovala.

Děkuji týmu CTU CarTech za jedinečnou možnost účastnit se projektu, který mě každý den učí nových věcí.

Obsah

1	Úvod	9
2	Formula Student	10
2.1	Popis soutěže	10
2.2	Disciplíny a bodování	11
2.3	CTU CarTech	12
3	Význam aerodynamických prvků u závodních vozů	12
3.1	Pravidla aeroprvků soutěže Formula Student	13
3.2	Negativní vliv hmotnosti aeroprvků	14
3.3	Přesnost výroby a tuhost	15
4	Způsoby zhotovení aerodynamických dílů	16
4.1	Prvky ze slitiny hliníku	16
4.2	Prvky z kompozitních materiálů	17
4.2.1	Zhodnocení technologií zpracování kompozitních materiálů	20
5	Bezpečnost práce u kompozitních materiálů	21
5.0.1	Zdravotní rizika	21
5.0.2	Bezpečnostní pomůcky	23
6	Výztuže	24
6.1	Typy vazeb	25
7	Parametry kompozitních struktur	27
8	Sendvičové struktury	30
8.1	Tvrzené pěny	31
8.2	Voštiny	31
8.3	Vypěňovací systémy	32
8.4	Kompozitní výplně	34
9	Formy	35
9.1	Návrh forem	35
9.2	Materiály forem	39
9.3	Výroba formy z MDF	42
10	Zhodnocení původní konstrukce předního křídla	44
10.1	Hlavní profil	44
10.2	Vnější klapky	46
10.3	Vnitřní klapka	47
10.4	Vnitřní bočnice	47
10.5	Vnější bočnice	48
10.6	Technologické, konstrukční a provozní nedostatky	50
11	Návrh a zhotovení nové konstrukce předního křídla	52
11.1	Hlavní profily	53

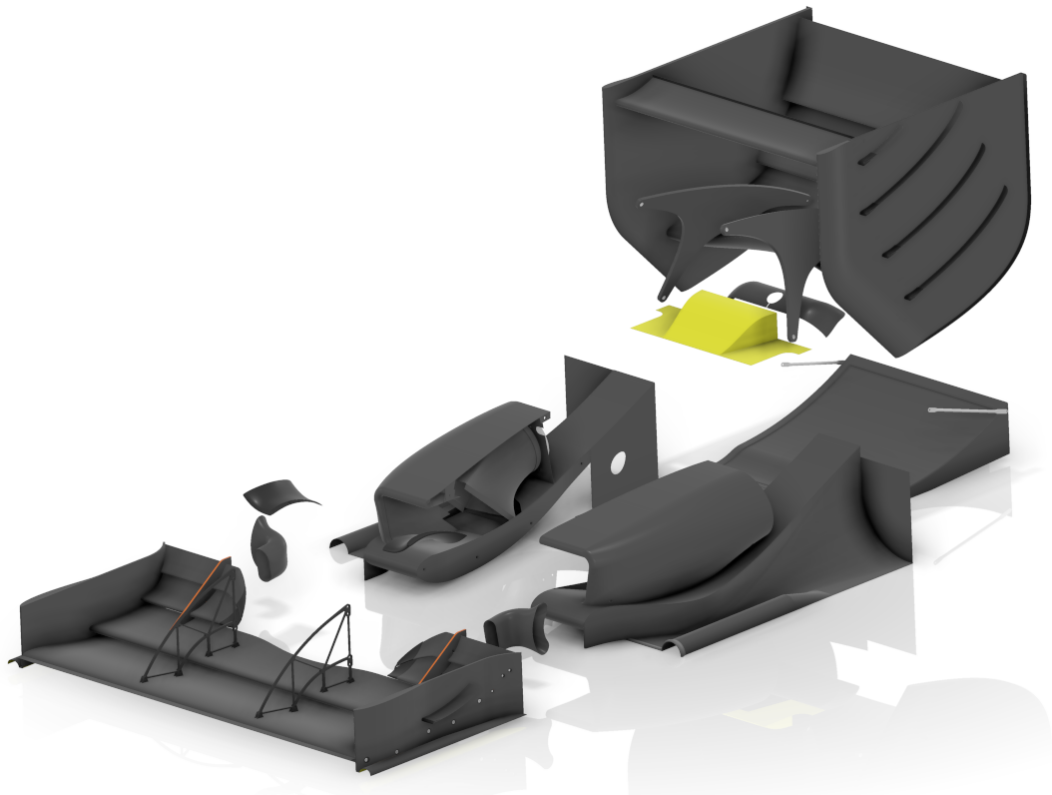
11.2 Vnější klapky	56
11.3 Vnitřní klapky	58
11.4 Vnitřní bočnice	58
11.5 Vnější bočnice	59
11.6 Zhodnocení konstrukčních, technologických a výrobních změn	61
12 Závěr	67
Seznam použité literatury a zdrojů	68
Seznam obrázků a tabulek	70
Seznam použitého SW	71

1 Úvod

Se zvyšující se komplexností soutěže Formula Student hraje aerodynamika vozu čím dál větší roli. Optimalizace proudění a zvyšování přítláčné síly není ovšem jediný faktor, který je u aerodynamických elementů důležitý. Kromě přesnosti výroby, která je klíčová pro správné fungování navržených dílů, hraje roli i hmotnost. Tratě soutěže Formula Student jsou navrženy na nízké rychlosti průjezdů zatáček. Hlavním důvodem je bezpečnost, která se u této soutěže nebere na lehkou váhu. Negativním faktorem aerodynamických prvků je nárůst hmotnosti vozidla, zvýšení pozice těžiště a zvětšení momentu setrvačnosti. Všechny tyto faktory jsou nežádoucí a vzhledem k povaze okruhů je často těžké si obhájit zvýšení přítláčné síly vůči nárůstu hmotnosti.

Cílem této práce je optimalizace aerodynamických prvků a zvýšení konkurenceschopnosti vozu skrze snížení hmotnosti, zvýšení tuhosti a přesnosti výroby aeroprvků.

Protože jsou při návrhu a výrobě vozidla Formula Student důležité i finanční náklady, zaměřím se při návrhu i na tuto stránku problému. Každý tým pracuje s určitým rozpočtem. Díky úspoře peněz v aerodynamice může týmový kapitán ušetřené finance přiřadit jiné skupině, která pomocí nich může navýšit potenciál vozu ještě více. Případně lze ušetřené finance použít na tvorbu komplexnějších aeroprvků.



Obr. 1: Aerodynamický balíček vozu FS.14

2 Formula Student

2.1 Popis soutěže

Formula Student je celosvětová soutěž, jejímž cílem je poskytnout studentům technicky zaměřených vysokých škol prostor pro přenesení teoretických znalostí získaných při studiu do praxe. Účelem každého týmu je navrhnout, vyrobit a obsluhovat závodní monopost formulového typu. Každý rok musí tým vyrobit nový vůz, který má alespoň nově zhotovené šasi s technickou změnou na jeho návrhu. [1]

Díky tomuto pravidlu funguje tento projekt v ročních cyklech. Od září do prosince tým pracuje na návrhu nového závodního vozu, nabírá nové členy do svých řad a jedná s partnery a sponzory. Do konce dubna probíhá výroba vozidla. Díly jsou vyráběny jak studenty, tak některé jsou zhotovené externě díky partnerům. Do konce června probíhá testovací fáze. Vůz je důkladně otestován tak, aby se odstranila většina návrhových a výrobních nedostatků. Zároveň v této fázi probíhá trénink pilotů. Červencem začíná období závodů. Týmy z celého světa se setkávají na prestižních tratích po celém světě, kde soutěží v disciplínách, které prověří znalosti týmu a rychlost vozu.

Dle oficiálních pravidel Formula Student Germany se soutěž rozděluje na dvě kategorie. První kategorií jsou vozy se spalovacím motorem a druhou monoposty s elektrickým pohonem. Formule z obou kategorií se zároveň mohou zúčastnit bezpilotního šampionátu, který má samostatné hodnocení.[1] Některé závody zároveň dovolují použití hybridních pohonů u monopostů se spalovacím motorem. Touto výjimkou jsou například závody v České republice nebo Rakousku.

2.2 Disciplíny a bodování

Každý závod se skládá celkem z osmi bodovaných disciplín. Každá má přidělený určitý maximální počet bodů. Podle úspěšnosti obdrží tým bodové ohodnocení. Na konci soutěže se body ze všech částí sečtou a vyhodnotí se nejúspěšnější týmy. Mezi disciplíny patří:

- Business Plan (Marketingový plán) - Účelem této disciplíny je prověřit schopnost týmu prodat svou formuli fiktivnímu kupci. 100 bodů.
- Cost and Manufacturing (Analýza nákladů a výroby) - Hodnotí se cena vozu a správná kalkulace jeho výrobní ceny v případné reálné sériové výrobě. 100 bodů.
- Engineering Design (Konstrukční návrh) - Porota hodnotí znalosti týmu a jejich aplikaci na vůz. Zároveň se hodnotí kvalita zpracování. 150 bodů.
- Skidpad (Jízda v osmičce) - Trať připomíná tvar osmičky. Měří se čas projetí pravé a levé kružnice. Tato disciplína je převážně zaměřena na hodnocení kvality podovzku. 50 bodů.
- Acceleration (Akcelerace) - Zrychlení vozidla z pevného startu na 75 metrů. Zařetí na výkon pohonné jednotky a schopnost přenosu trakce. 75 bodů.
- Autocross (Autokros) - Jízda proti času na úzké a technické závodní trati. Disciplína je zaměřená na celkový koncept vozu. 150 bodů.
- Endurance (Vytrvalostní závod) - Závod na 22km proti času. Trať je méně technická a rychlejší než autokros. Kromě celkových schopností vozu je důležitá i spolehlivost. 350 bodů.
- Efficiency (Spotřeba paliva) - Po dojetí vytrvalostního závodu se měří celková spotřeba paliva. Při návrhu vozu je proto potřeba dbát i na jeho spotřebu. 50 bodů. [1]

2.3 CTU CarTech

Tým Formula Student založený v roce 2008 a spadající pod České vysoké učení technické v Praze, Fakultu strojní. V roce 2022 připravuje již čtrnáctý monopost FS.14. Skládá se z necelých padesáti členů bakalářského a magisterského studia. Tým je rozdělen do šesti podskupin: aerodynamika, šasí, hnací ústrojí, elektronika, nápravy a vztahy s veřejností.



Obr. 2: FS.14

3 Význam aerodynamických prvků u závodních vozů

Optimalizace obtékání je čím dál důležitějším tématem ve všech odvětvích motorsportu. Příkladem tohoto trendu je MotoGP, kde v posledních letech dochází k velkým změnám ve tvarech karoserie za cílem snížení odporu a zvýšení přítláčné síly.

Motivací, proč aktivně řešit obtékání závodních vozů je několik. Jednou z nich je snížení odporu vozu, čímž dojde k navýšení maximální rychlosti, zrychlení a snížení spotřeby. Tento efekt se hojně využívá u prototypů určených pro vytrvalostní závody jako je například 24 hodin Le Mans nebo v poslední letech také u Rally Dakar. Dalším důvodem je zvýšení přítláčné síly. Při větším zatížení pneumatik dochází ke zlepšení stability vozu při vysoké rychlosti a zvýšení maximálního dosažitelného přetížení při průjezdu zatáčkou. Zároveň, při vyšší rychlosti dochází k poklesu světlé výšky vozu, což způsobí zvýšení negativního odklonu kol. Při kvalitní spolupráci mezi nápravami a aerodynamikou lze tento efekt využít, jako jednu z možností, k potlačení přechodu geometrie kol do pozitivního odklonu, což je u závodních vozů nežádoucí. Dalším důležitým problémem závodního vozu je chlazení.

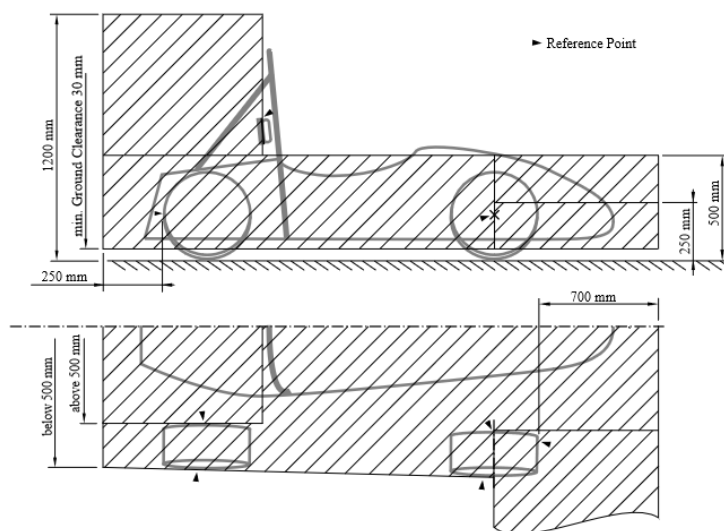
Při chytrém vedení proudění lze zlepšit průtok vzduchu chladičem a díky tomu snížit jeho potřebnou velikost, případná optimalizace může v určitých případech zlepšit celý balíček vozu. Optimalizace vedení chlazení se například v posledních letech ve Formuli 1 ukázala jako důležitý faktor při návrhu vítězného vozu.[2] [3]

Aerodynamický potenciál je větší u vozů, které dosahují vyšších rychlostí. Přítlaková i odporová síla se s rychlostí zvětšuje na čtverec. Jelikož ve Formuli Student dosahujeme na závodních tratích rychlosti maximálně 100 km/h je potřeba aerodynamické prvky navrhovat co nejrozměrnější a nejextrémnější. Odpor vzduchu dokážeme překonat výkonným motorem a rovné úseky tratí jsou dlouhé maximálně 80 metrů.[1] Z toho důvodu odpor hraje při návrhu minimální roli. Z týmových citlivostních analýz je patrné, že větší potenciál má nárůst přítlaku.

3.1 Pravidla aeroprvků soutěže Formula Student

Aerodynamické prvky vozu Formula Student musí být navrženy v rámci pravidel soutěže. Kromě rozměrových obálek, které omezují rozměry a zástavbu aeroprvků, obsahují pravidla i konstrukční limity:

- Všechny horizontální čelní hrany, které mohou přijít do kontaktu s chodcem musí mít minimální radius 5 mm a všechny vertikální 3 mm.
- Prvky jejichž plocha je alespoň 225cm^2 mohou být zatíženy silou 200 N na této ploše. Díl se nesmí deformovat více jak 10 mm ve směru působení síly.
- Každý aeroprvek může být zatížen silou 50 N v jakémkoliv směru, na libovolné ploše. Prvek se nesmí deformovat o více jak 25 mm ve směru působení síly. [1]



Obr. 3: Aerodynamické obálky vozu Formula Student [1]

Na základě těchto pravidel je potřeba navrhnout konstrukci aerodynamických dílů dostatečně tuhou a pevnou. Zároveň, jak bylo zmíněno v předchozím odstavci, aeroprvky vozu Formula Student jsou velmi rozměrné. Z těchto důvodů vzniká problém, kdy je potřeba zachovat minimální hmotnost jednotlivých prvků, aby nedocházelo k negativnímu ovlivnění jízdních vlastností vozu, ale zároveň je potřeba, aby splňovaly všechna pravidla a bezpečně přenášely aerodynamické síly na kontaktní plochu pneumatiky s vozovkou.

3.2 Negativní vliv hmotnosti aeroprvků

Při vývoji aerodynamiky je potřeba vždy kontrolovat, zda přidaná hmotnost nepřeváží benefit zvýšení přítlakové síly nebo snížení odporu. Mnoho profesionálních týmů pro tyto účely využívá simulace jízdy vozidla. Náš tým pro tyto účely používá zjednodušené řešení pomocí softwaru Microsoft Excel. I přes časté obhájení zvýšení přítlaku, vůči navýšení hmotnosti, je potřeba se na problematiku hmotnosti vozidla dívat širším měřítkem.

Pokud člen týmu stráví měsíc vývoje na odlehčení těhlice o sto gramů, je potřeba stejnou péčí věnovat aerodynamickým prvkům. Všechna malá odlehčení se postupně nasčítají a dokážou vytvořit velký rozdíl hmotnosti.

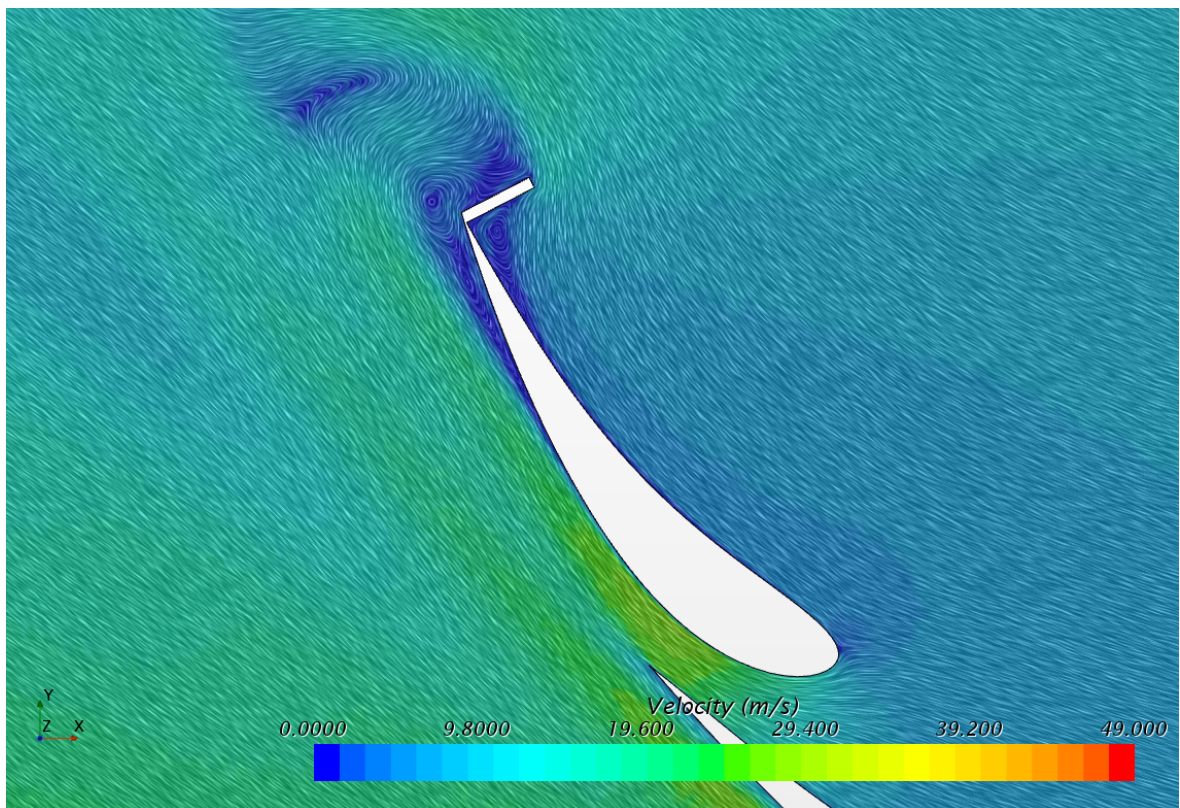
Většina aeroprvků se nachází daleko od středu otáčení vozu. Přední křídlo, které váží 3270 gramů (údaj pro vůz FS.13) je nejvzdálenější součástka na celém voze před přední nápravou. Z toho důvodu má velký vliv na celkový moment setrvačnosti vozu. Moment setrvačnosti je parametr, který je u vozu Formula Student velmi důležitý. Vzhledem k charakteru tratí je potřeba, aby vozy měnily směr jízdy co nejrychleji. U vozu s vysokým momentem setrvačnosti bude docházet ke změně směru jízdy pomaleji.

Zadní křídlo je součástka nejvýše položená a jeho hmotnost tak zdatně ovlivňuje výšku těžiště. Poloha těžiště vozu FS.13 se nachází 252 mm nad zemí. Hmotnost zadního křídla tohoto vozu je 3989 gramů. Pokud bychom optimalizovaným návrhem dokázali snížit hmotnost zadního křídla o 500 gramů, těžiště vozu by se snížilo o jeden milimetr. U optimalizovaného závodního vozu je těžké najít součástky, jejichž odlehčením bychom mohli snížit zdatně těžiště. Zadní křídlo má tento potenciál největší. Vysoké těžiště vozu zvyšuje množství přeneseného zatížení z kol vnitřních na vnější při průjezdu zatáčkou, zároveň dochází k zvětšení klopného momentu, což zvyšuje klopení šasí a je nutno kompenzovat tužším pružením. [2]

Odlehčením všech aerodynamických prvků dochází k snížení hmotnosti. Obecné snižování hmotnosti pomáhá zlepšit mnoho vlastností vozidla. Při stejném výkonu pohonné jednotky dosáhne vůz vyšší maximální akcelerace, při průjezdu zatáčkou dochází k navýšení maximálního možného bočního přetížení, potřebná brzdná síla bude nižší a prvky náprav mohou být dimenzované na nižší únosnost, což přispívá dalšímu odlehčování vozu. [2]

3.3 Přesnost výroby a tuhost

Aerodynamické díly jsou precizně navržené součásti. Jejich tvary mohou být navrženy pomocí CFD simulací nebo testováním ve větrných tunelech. Při malé změně tvaru nebo polohy oproti návrhu může dojít k odtržení proudění na profilu a tím k drastickému snížení přítláčné síly. Tento jev může být velmi nebezpečný. K odtržení může docházet například při průjezdu zatáčkou ve vysoké rychlosti, což způsobí ztrátu stability vozu a havárii. Z tohoto důvodu je důležité dbát na přesnost výroby a následnou tuhost prvků při působení aerodynamických sil. Protikladem tohoto pravidla jsou aeroelastické díly, které se využívají hlavně u vrcholového motorsportu. Tyto součásti jsou navrženy tak, aby při určité rychlosti nastala jejich deformace a došlo ke změně charakteru proudění. Ve většině případů je tato vlastnost využívána pro snížení odporové síly při vysokých rychlostech na rovině.



Obr. 4: Separace proudění od podtlakové strany povrchu klapky

4 Způsoby zhotovení aerodynamických dílů

4.1 Prvky ze slitiny hliníku

V dnešní době již spíše historické řešení. Na moderních závodních vozech se slitiny hliníku používají převážně na držáky aerodynamických dílů a drobné díly, které nelze vyrobit z kompozitních materiálů. Způsob zhotovení takových dílů je pomocí obrábění.

Před nástupem kompozitních materiálů byly přitlačná křídla zhotovena výhradně z hliníkových slitin. Vnitřní, nosná struktura křídla byla zhotovena z hliníkových žeber ve tvaru profilu, která k sobě byla spojena pomocí nosníků. Přes tvarová žebra se následně ohýbal tenký plech, který sloužil jako potah křídla. Následně byl pomocí nýtování spojený u odtokové hrany křídla do jednoho celku.

Menší aerodynamické části, jako například různé deflektory nebo kryty se vyráběly pomocí ohýbání nebo tváření a spojovány byly nýtováním, svařováním nebo šroubovými spoji.

Slitina hliníku průměrných vlastností (EN AW 6082 T6) má mez pevnosti v tahu 255 MPa, Youngův modul pružnosti v tahu 70 GPa a hustotu 2700 kg/m^3 . [4] Uhlíkový roving (IMS65 24K) má ve směru vláken mez pevnosti v tahu 6000 MPa, Youngův modul pružnosti v tahu 290 GPa a hustotu 1780 kg/m^3 . [5] Pokud k tomu započítáme i možnost vyrábět komplikovanější tvary, lze pochopit, proč jsou kompozitní materiály v motorsportu tak dominantní.

4.2 Prvky z kompozitních materiálů

V motorsport hojně využívaný materiál. Zejména kvůli jeho nízké hustotě, vysoké pevnosti a tuhosti. Kompozitní materiál se skládá z výztuže a matrice. Nejčastěji se používá výztuž z uhlíkových, aramidových nebo skelných vláken. Matrice je nejčastěji v podobě epoxidové pryskyřice. Proces výroby kompozitních materiálů se nazývá laminace. Pro výrobu potřebujeme negativ tvaru hotové součásti, na který budeme laminaci provádět. Negativ nazýváme formou. Kompozitní materiály se mohou zpracovávat mnoha způsoby. Mezi nejrozšířenější patří mokrá laminace, laminace pomocí infusního sycení epoxidem a laminace pomocí předsycené tkaniny.

Mokrá laminace je nejjednodušší způsob výroby kompozitů. Suchá tkanina se rozmístí do formy a následně se prosytí epoxidovou pryskyřicí obsahující tužidlo, které zajistí ztuhnutí pryskyřice při pokojové teplotě. Pro kvalitní dolehnutí materiálu do formy se využívá podtlaku. Prosycený materiál se od okolí oddělí separační fólií a celá forma se zabalí do vzduchotěsného pytle, ve kterém vytvoříme vakuum. Po uplynutí času vytvrzení můžeme díl odstranit z formy. Alternativně lze místo separační fólie použít strhávací tkaninu, která nám zajistí uniformní povrch součásti, perforovanou fólie, skrze kterou může pryskyřice volně protékat a speciální absorpční tkaninu, jejímž úkolem je při vakuu do sebe nasát přebytečný epoxid. Výsledný díl je následně lehčí, jelikož obsahuje ideální množství pryskyřice.



Obr. 5: Mokrú laminace

Laminace pomocí infuze se používá zejména pro rozměrnější díly. Mezi její výhody patří nulová časová tíseň. Na suchou tkaninu, kterou rozmístíme do formy aplikujeme strhávací látku a následně speciální síťku, která pomáhá s distribucí pryskyřice po celé ploše dílu. Po povrchu následně umístíme vstupy epoxidu, které jsou v podobě porézní hadičky. Takto připravenou formu vložíme do vzduchotěsného pytle. Pryskyřice je do dílu přivedena pomocí podtlaku, který vytvoříme a vyčkáme na kompletní nasycení součásti epoxidem. Po uplynutí času vytvrzení odstraníme díl z formy.



Obr. 6: Infuzní sycení

Laminace pomocí předsycených tkanin je nejvyspělejší metoda výroby kompozitních materiálů. Díky strojovému předsycení epoxidem je přesně kontrolováno optimální množství pryskyřice v kompozitu. Takto nasycená tkanina se musí skladovat v teplotách pod 0 °C, jelikož při vyšších teplotách dochází k degradaci pryskyřice. K úplnému vytvrzení epoxidu je potřeba teplot vyšších než pokojových. Tkanina rozmístěná na formě se stejně jako u předchozích technologií vloží do vzduchotěsného pytle a uvede do vakua. Takto připravená forma se umístí do pece. Po předepsané době dojde k úplnému vytvrzení epoxidu. Alternativně se může součástka zpracovávat ve speciální peci. Autokláv dokáže zvýšit tlak ve svém vnitřním objemu. Tím dojde k ještě lepšímu dolehnutí kompozitu na formu a k ještě lepšímu přenesení přebytečné pryskyřice do absorpční tkaniny.



Obr. 7: Laminace předsycenou tkaninou

4.2.1 Zhodnocení technologií zpracování kompozitních materiálů

Výběr vhodné technologie výroby kompozitních materiálů často závisí na mnoha faktorech. Mezi ty nejčastější patří finance, čas a požadovaná kvalita zpracování. V příložené tabulce naleznete porovnání technologií z pohledu týmu Formula Student. Všechny parametry jsou hodnocené od jedné do tří, kde jedna znázorňuje nejlepší variantu ze všech.

Technologie	Cena	Čas	Mechanické vlastnosti	Obtížnost
Mokrá laminace	1	2	3	2
Infuzní laminace	2	3	2	3
Předsycená tkanina	3	1	1	1

Tab. 1: Porovnání technologií zpracování kompozitních materiálů

Dle tabulky je mokrá laminace nejekonomičtější variantou. Potřebné vybavení ke zpracování kompozitů touto metodou je minimální a oproti infuzní laminaci dochází k menší spotřebě pryskyřice. Výroba pomocí předsycené tkaniny patří mezi nejdražší, jelikož cena materiálu tohoto typu je vysoká. Tato technologie má ovšem výhodu ve své rychlosti, jelikož není nutné při zpracování sytit tkaninu pryskyřicí. Zároveň mají zhotovené součásti nejlepší mechanické vlastnosti. Ve výsledném kompozitu je ideální množství výztuže a matrice a tudíž hustota, pevnost nebo modul pružnosti dosahují nejlepších hodnot. Metoda také nevyžaduje velmi zkušené pracovníky. Přednastráhanou tkaninu je pouze potřeba vkládat do formy dle výrobního postupu.

I přes ne tak dobré hodnocení je infuzní laminace nejvhodnější používanou technologií zpracování kompozitů aerodynamického balíčku v týmu CTU CarTech. Výhodou pro nás představuje možnost zpracovávat díly bez časové tísně a také kvalitní povrch součásti již po laminaci. Tuto technologii využíváme pro všechny rozměrné součásti jako jsou například podlahy a bočnice vozu.

5 Bezpečnost práce u kompozitních materiálů

Při zhotovení součástí z kompozitních materiálů je nutné dodržovat bezpečnostní pokyny pro snížení rizika úrazu a způsobení dlouhodobých zdravotních komplikací. Pro tento typ výroby lze uplatnit většinu doporučení, která platí i pro výrobu součástí konvenčními způsoby. V určitých ohledech je ovšem tento způsob výroby specifický a je tedy potřeba zavést dodatečná opatření pro eliminaci těchto bezpečnostních rizik.

5.0.1 Zdravotní rizika

Z hlediska zdravotních rizik rozdělím běžnou výrobu kompozitních materiálů do pěti částí. Příprava materiálů a forem, aplikace materiálů na formy, oddělování kompozitů od forem, broušení kompozitních materiálů a kompletování kompozitních součástí. Výroba pomocí předsycených tkanin představuje v některých ohledech menší bezpečnostní riziko než výroba pomocí kontaktní a infuzní laminace. Z toho důvodu budu věnovat tuto kapitulu pouze posledním dvou zmíněným způsobům výroby.

Při vytváření nástřihů kompozitních tkanin dochází k uvolňování jednotlivých vláken z vazby. Tyto vlákna jsou velmi malých rozměrů. Uhlíková vlákna mají průměr mezi 5 - 8 μm a díky jejich nízké hmotnosti dlouho poletují v prostoru a usazují se na oblečení a pokožku dělníka.[6] Samotná vlákna způsobují podráždění pokožky. K inhalaci vláken a usazení v plicích nedochází, jelikož jejich průměr je sice pod 10 μm , což je nejvyšší hranice vdechnutelných částic, ale jejich délka je několik milimetrů až centimetrů.[7] Další riziko představuje usazování částic na oblečení. Pokud pracovník nerozlišuje pracovní oblečení od osobního, může dojít ke kontaminaci domácího prostředí a následnému podráždění pokožky osob, které s kompozitními materiály nepřijdou do styku. U takto způsobené kožní reakce může být obtížné určit příčinu, jelikož daná osoba nepřichází s kompozitními materiály do kontaktu napřímo. Při separaci forem je nutné dodržovat bezpečnostní opatření udávané použitým produktem. Pokud se k separaci používají vosky, není potřeba dodržovat zvláštní bezpečnostní opatření. Při používání speciálních separačních produktů, jako je například Loctite Frekote 770 NC může dojít k podráždění kůže a očí, otravě při pozření, závratím a bolesti hlavy. Produkt je zároveň hořlavý.[8] Vždy je nutné dodržovat bezpečnostní list k danému produktu. Bezpečnostní riziko zároveň představuje i samotná pryskyřice. Při jejím rozmíchávání s tužidlem může dojít u pojiv s nižší viskozitou ke vniknutí kapiček do očí a následnému podráždění. Další bezpečnostní rizika každého produktu jsou udány v bezpečnostním listu.

Při aplikaci materiálů do formy jsou bezpečnostní rizika podobná jako u přípravy materiálů. U tkanin a pojiv platí stejné výstrahy. Pro přesné usazení výztuží do formy se často používají lepidla ve spreji. Časté vdechování těchto aerosolů může způsobit zdravotní komplikace. Opět je nutné dodržovat bezpečnostní list produktu.

Při oddělování finálního kompozitního materiálu z formy existuje riziko vniknutí pevných částic do očí. Dalším bezpečnostním rizikem je pořezání o ostrou hranu kompozitu. Neopracovaný kompozitní materiál je ostrý a vytváří hluboké kožní řezy. Drobné třísky jednoduše vnikají do odkrytých částí pokožky a do otevřených řezných ran.

Broušení kompozitů představuje hlavní riziko ve vdechování jemného prachu. Některé částičky broušeného kompozitního materiálu jsou menší než $10 \mu m$ a tudíž dochází k jejich inhalaci do plic, kde se následně usazují.[7] Zdravotní komplikace při vdechování uhlíkových, skelných a aramidových kompozitů nejsou na lidském organismu dostatečně prozkoumané. Existují studie, které se snaží vdechování částiček napodobit a vyhodnotit pomocí pokusů na laboratorních myších. *An Evaluation of the Toxicity of Carbon Fiber Composites for Lung Cells in Vitro and in Vivo* je jednou z takových prací. Autoři v práci provádějí pokusy, kde šest druhů částic uhlíkových a skelných kompozitů, menších než $10 \mu m$ aplikují na laboratorních myších. Tuto aplikaci provádí u prvního pokusu vpichem přímo do plic a u druhého přes kontaminování atmosféry, ve které se myši vyskytují. Kompozitní materiály porovnávají s křemenem a oxidem hlinitým. Al_2O_3 při vdechování nezpůsobuje zdravotní komplikace. Z výsledků vyplývá, že testované kompozitní materiály mají odezvu podobnou spíše Al_2O_3 , než křemenu. V žádných z testů nebyly hodnoty kompozitních materiálů horší, než hodnoty naměřené u křemenu.[9] Křemen prokazatelně způsobuje při dlouhodobém vystavení poškození plic, které může vyústit až v tvorbu rakovinotvorných buněk. Částičky křemenu pod $10 \mu m$ se vyskytují téměř u všech stavebních prací, jelikož je obsažený například ve štěrků, cihlách nebo betonu.[10] Vdechování prachu vzniklého při broušení kompozitních materiálů určité zdravotní riziko představuje. Hlavním důvodem, proč dbát na ochranu dýchacích cest, je i stále malé množství informací ohledně účinků na lidské plíce. Jemné částice při kontaktu s pokožkou způsobují její podráždění. I zde platí riziko přenosu materiálu do jiného prostředí pomocí kontaminovaného oděvu. Při řezání a broušení kompozitů platí obecná pravidla pro vykonávání těchto prací. Hrozí riziko pořezání, vniknutí třísky do očí, namotání na rotující část stroje pomocí volného kusu oděvu.

Při kompletování částí do hotových výrobků se často uplatňují lepené spoje. Zde je opět potřeba dodržovat nařízení udaná bezpečnostními listy daných látek. Většina lepidel a vypěňovacích systémů dráždí kůži a oči, způsobují nevolnost a závratě. Některé PUR pěny jsou karcinogenní.

5.0.2 Bezpečnostní pomůcky

Při práci s kompozitními materiály je potřeba používat různé druhy ochranných pomůcek, které zajistí bezpečnost dělníka. Zaměřím se převážně na obecně vhodné pomůcky a práce rozdělím do stejných skupin jako u zdravotních rizik. Při používání některých produktů jsou vyžadovány dodatečné a přísnější ochranné pomůcky. Vždy je nutné číst bezpečnostní list produktu.

Při přípravě materiálu a forem by dělník měl být vybavený vhodným pracovním oblečením, který jednoznačně rozlišuje od oblečení mimo laminační práce, případně vybavený ochrannou kombinézou. Proti nebezpečí vniknutí cizích látek do očí je nutné nosit pracovní brýle s vhodným bočním krytím. Brýle by měly splňovat normu ČSN EN 166. Jedná se o obecnou normu pro specifikaci ochranných brýlí.[11] Proti vniknutí poletavých vláken do dutiny nosní a ústní postačí dobře utěsněný respirátor FFP2.[12] Pro ochranu rukou je nutné používat nitrilové nebo latexové rukavice. Jako přídatná ochrana můžou být vhodné nepropustné, ochranné návleky na předloktí.

Pro samotnou laminaci platí stejná pravidla jako u přípravy materiálu. Je ovšem vhodné použít lepší ochranu rukou, jelikož při nánášení vrstev může často dojít k porušení rukavice. Použití tlustších, případně dvojitých rukavic může být vhodné opatření zejména pro pracovníky, kteří mají méně tolerantní pokožku vůči kontaktu s pryskyřicemi.

Při oddělování vytvrzené součásti z formy a odstraňování všech technologických vrstev je doporučeno použít pracovní rukavice s ochranou proti pořezání. Největší množství úrazů při tomto druhu práce je způsobeno právě pořezáním. Je nutné i nadále používat ochranné brýle a oblek. Při odstraňování dílu z formy může dojít k vniknutí částic materiálu do dutiny nosní a ústní. Z tohoto důvodu je ochrana obličeje vhodná.

Nejvíce bezpečnostně rizikovou je oprava dělení a broušení kompozitních materiálů. Při této operaci je potřeba dbát nejvíce na bezpečnost a používat nejkvalitnější ochranné pomůcky. Mezi největší rizika patří pořezání a nadměrná inhalace částic kompozitu. Při této práci je vhodné používat odsávací zařízení, které je schopno odstranit prach vzniklý při broušení z okolní atmosféry. Odsávací systémy se dodávají v mnoha podobách. Můžeme je rozdělit na zabudované a přenosné. Zabudované systémy mají často vývod mimo pracovní místnost, kde zachytávají částičky prachu a vypouštějí již čistý vzduch. Přenosné zařízení vypouštějí vzduch zpět do místnosti. Zabudované systémy mají zpravidla větší průtoky vzduchu a zahřívají pracovní prostor méně. Nutnou pomůckou je kvalitně utěsněná filtrační maska s certifikátem alespoň FFP2.[12] Dále utěsněné pracovní brýle. Prachová zrna jsou drobných rozměrů a brýle, pouze s bočním krytím neochrání pracovníka dostatečně. Alternativně lze použít celoobličejovou filtrační masku. Použití utěsněného pracovního obleku, který pokrývá veškeré části těla včetně hlavy je také doporučeno. Při práci dělník musí používat pracovní rukavice proti pořezání.

Pracovník u kompletování kompozitních sestav by měl být vybaven stejně jako u přípravy materiálů. Je vhodné používat brýle pro ochranu očí proti vniknutí cizích látek, latexové nebo nitrilové rukavice, vhodný respirátor podle bezpečnostního listu používaných látek, pracovní univerzální kombinézu, případně i ochranné návleky na předloktí.

6 Výztuže

V motorsportu mezi nejvíce využívané patří uhlíková, aramidová a skelná vlákna. V okrajových aplikacích lze používat i diolen. Jedná se o polymerová vlákna, která mají vysokou houževnatost a odolnost vůči abrazi. Jejich pevnost a modul pružnosti je velmi nízký. Tkaniny se také vyznačují nízkou cenou. Výztuž, která poměrně rychle stoupá na popularitě je lněné vlákno. Je to kvůli její nižší ekologické zátěži při výrobě vláken. V motorsportu se používá převážně kvůli propagaci ekologické cesty. Příkladem může být sedačka Formule 1 týmu McLaren pro rok 2022.[13] I přes nižší pevnost a modul pružnosti oproti uhlíkovým vláknům se používání tohoto materiálu neustále navyšuje. Jedná se o udržitelnější cestu kompozitních materiálů.

Skelná vlákna se používají převážně u nízkorozpočtového motorsportu. Vlákna jsou dostupná ve dvou variantách. Vlákna E a S. Varianta označená písmenem E je rozšířenější, zejména kvůli nižší ceně, ale mechanické vlastnosti má tento druh horší. Oproti uhlíkovým mají obecně skelná vlákna nižší pevnost a modul pružnosti. Výhodou skelných vláken u některých aplikacích je jejich vyšší tažnost. Další výhodou může být propustnost elektromagnetického vlnění. To je vhodné například u krytů pro různé přijímače a vysílače.

Aramidová vlákna mají vysokou houževnatost při poměrně vysoké pevnosti a modulu pružnosti. Z tohoto důvodu se používají například v neprůstřelných vestách, jelikož dokáží zachytit velké množství energie. Mezi další přednost patří dobrá odolnost vůči abrazi. V motorsport se používá převážně v náběžných hranách křidel, jako ochrana proti křehkému lomu křídla při dopadu kamínků nebo nárazu. Dále se používá u panelů vozů, které musí snášet vysoké namáhání od okolních jevů. Příkladem mohou být speciály pro Rally Dakar. Zde často dochází k nárazům vozu do skal, kamenů a hrubému zacházení. Aramidové tkaniny se často využívají i na hranách dílů, které mohou přijít do kontaktu s vozovkou. Při kontaktu s vozovkou dochází k opotřebení aramidové tkaniny méně, než u jiných typů vláken.

Uhlíková vlákna jsou mnoha druhů s různými mechanickými vlastnostmi. Podle kvality se liší jejich mez pevnosti a modul pružnosti v tahu. Vlákna vyrábí velké množství firem. Mezi ty nejznámější patří Toray, Tenax nebo Mitsubishi. Každá firma vyrábí uhlíkové vlákna podle svých technologických postupů a tudíž mají rozdílné mechanické vlastnosti. Téměř univerzálně nabízejí všechny firmy několik druhů vláken od nejběžnějších a nejdostupnějších až po speciální vysoce modulární a vysocepevnostní vlákna, která se používají převážně v leteckém a kosmickém průmyslu. Uhlíková vlákna se vyrábějí nejčastěji z polyakrylonitrilových vláken, která jsou opakovaným zahříváním přeměněna na vlákna uhlíková. Kvalita vstupního materiálu a technologické postupy určují, jaké budou mít výsledná vlákna parametry.[14] Uhlíkové tkaniny mají nejvyšší mez pevnosti a modul pružnosti ze všech typů výztuží. Mezi jejich hlavní nevýhody patří nízká tažnost a houževnatost.

Materiál	Mez pevnosti v tahu	Modul pružnosti v tahu	Tažnost	Hustota
Uhlíková vlákna	4900 MPa	230 GPa	2,1 %	1,8 g/cm ³
Aramidová vlákna	3650 MPa	124 GPa	2,5 %	1,44 g/cm ³
Skelná vlákna E	3400 MPa	72 GPa	4,7 %	2,54 g/cm ³
Skelná vlákna S	4600 MPa	89 GPa	5,2 %	2,53 g/cm ³
EN AW 6061-T6	310 MPa	68,9 GPa	17 %	2,7 g/cm ³
Ocel S235	465 MPa	210 GPa	22 %	7,8 g/cm ³

Tab. 2: Porovnání mechanických vlastností materiálů

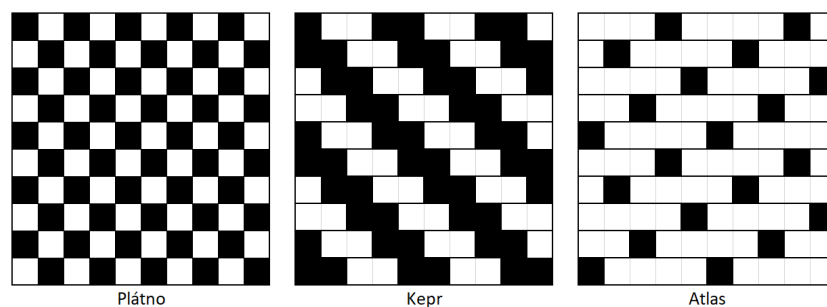
V příložené tabulce lze vidět porovnání mechanických vlastností jednotlivých výztuží s běžnými kovy. Jako zástupce uhlíkové výztuže jsem zvolil vlákno Toray T700S. Jedná se o vlákno s dobrým poměrem dostupnosti, ceny a mechanických vlastností. Zvolená aramidová vlákna jsou Kevlar 49[15][16][17].

6.1 Typy vazeb

Jednotlivá vlákna výztuže se spojují do rovingů, což je velký počet kontinuálních vláken, které se namotávají na cívku. Počet vláken v jednom prameni je standardizovaný. Mezi nejpoužívanější patří 3000 a 6000. Z těchto rovingů se následně vytváří jednotlivé tkaniny, které můžeme dělit na rozprostřené a pletené. U rozprostřených tkanin se jednotlivé prameny zplošťují a rozširují do tenké vrstvy vedle sebe. Výsledná látka se skládá z vláken, které jsou orientovaná v jednom směru. Tyto vlákna se k sobě fixují pomocí lehkého nánosů lepidla nebo prošíváním nejčastěji pomocí tenkého skelného vlákna. Tato tkanina má výborné mechanické vlastnosti ve směru vláken, ovšem ve směru kolmém jsou užitečné mechanické vlastnosti tkaniny nulové a v kompozitu tedy můžeme v tomto směru počítat pouze s mechanickými vlastnostmi pryskyřice. Abychom odstranili tuto nevýhodu, je možné vrstvit jednosměrné tkaniny na sebe pod určitými úhly.

Takové tkaniny se nazývají multiaxiální. Mezi nejčastější uspořádání patří 0° a 90° . Takový kompozit má stejné mechanické vlastnosti jak v podélném, tak příčném směru. Dále můžeme vytvářet kombinace i pod 45° . Taková tkanina má ještě homogennější mechanické vlastnosti. Multiaxiální tkaniny se spolu opět spojují pomocí tenké vrstvy lepidla nebo prošitím. Nevýhodou rozprostřených tkanin je jejich obtížná aplikace na tvarově složitější formy. Roviny se často zplošťují i pouze do tenkých pásků, které se používají jako výztuže do kompozitních struktur v místech, kde je potřeba přidat tuhost nebo pevnost v určitém směru.

Pletené tkaniny se vyrábějí přímo z hotových rovingů na tkalcovském stavu. Mezi hlavní výhody tkanin patří jejich univerzálnost a dobré mechanické vlastnosti v různých směrech působení sil. Mezi hlavní nevýhodou patří jejich nižší absolutní mechanické vlastnosti proti rozprostřeným tkaninám. Každý pramen vazby je propletený s dalšími prameny, což způsobuje jejich průhyb, který negativně ovlivňuje mechanické vlastnosti kompozitu. Kompozitní součásti z pletených tkaniny mají často drsný povrch s neprosycenými místy. To je způsobeno špatným zatečením pryskyřice do všech dutin kompozitu. Nejčastěji se používají tři druhy vazeb. Plátno, jehož výhodou je nízká rozpadavost a tvarová stálost. Mezi nevýhody patří špatné přizpůsobení změnám tvarů ve více směrech. Příkladem může být laminace polokoule. Díky vysoké tvarové stálosti tkanina na povrch polokoule nepřilne. Nevýhodou je také největší průhyb vláken ze všech vazeb. Další vazbou je keprová, která je nejpoužívanější. Její hlavní předností je dobré přizpůsobení tvarům formy při dobré tvarové stálosti. Oproti plátnu má menší průhyb vláken. Třetí nejpoužívanější vazbou je atlas. Tato tkanina má výborné tvarovací vlastnosti, ale velmi nízkou tvarovou stálost. Prameny mají malý průhyb.

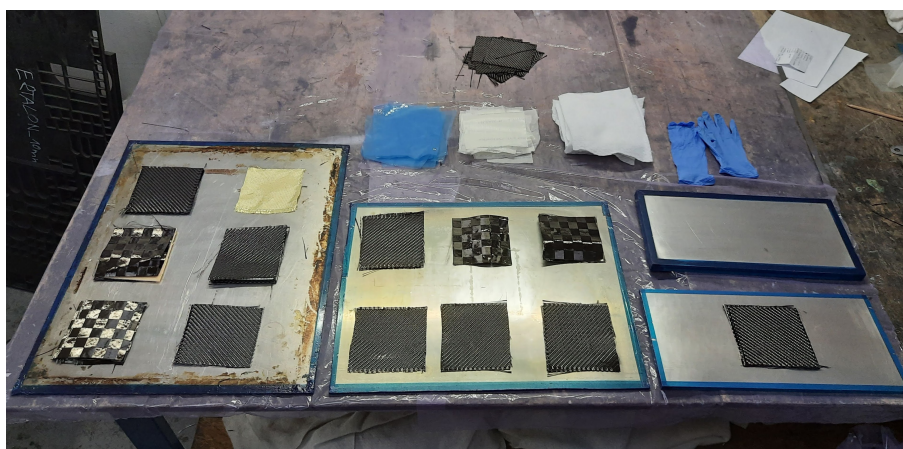


Obr. 8: Schéma vazeb

Na vzestupu v popularitě jsou pletené tkaniny s rozprostřenými vlákny. Jedná se o tkaniny, které se vyrábějí z tenkých pásků místo rovingů. Zhotovují se ve stejných vazbách jako tkaniny běžné. Mezi jejich hlavní výhody patří vyšší mechanické vlastnosti, jelikož průhyb vláken je minimální, nízké množství dutin na povrchu kompozitu a výběr tkanin s nižšími gramážemi. Nevýhodou těchto tkanin je horší tvarovatelnost a vyšší rozpadavost než u rovingů, vyšší cena a horší dostupnost.

7 Parametry kompozitních struktur

Při sestavování víceprvkových kompozitních sestav, jako jsou například přítláčná křídla je potřeba znát přesné tloušťky používaných kompozitních skladeb. Při vytváření CAD modelu je potřeba přesně definovat mezery pro lepidlo a rozměry žebér a jader. Žebra mají ve většině případů stejnou konturu jako samotný profil křídla, ale jsou menší o odsazení tloušťky potahu a mezeru pro lepidlo. Bez těchto přesně definovaných mezer by došlo k protisku žebra na povrch potahu křídla, což by způsobilo deformaci tvaru přítláčného elementu. Mezera pro lepidlo je stanovena dle předchozích zkušeností týmu na hodnotu 0,2mm. Při této hodnotě dochází k rovnoměrné adhezi lepidla ke všem částem lepených ploch a nevzniká žádná tvarová deformace součástí. Pro zjištění přesných tloušťek materiálů jsem vytvořil třináct vzorků různých kompozitních skladeb, které používáme na výrobu aerodynamických prvků. Všechny vzorky byly zhotovené kontaktní metodou. Typy vazeb byly použity pouze dva. První je pletená tkanina s rozprostřenými vlákny ve vazbě plátno o plošné hustotě 80 g/m^2 (v tabulce označována jako tkanina A). Druhou je pletená tkanina ve vazbě kepr o plošné hustotě 200 g/m^2 (v tabulce označována jako tkanina B). Tyto materiály jsem zvolil z důvodu jejich univerzálnosti a zkušenostmi s jejich zpracováním. Aerodynamický balíček vozu FS.14 je zhotoven výhradně z těchto materiálů. Všechny vzorky byly následně upraveny do formátu 10x10cm a kromě tloušťky jsem zjišťoval i jejich hmotnost na m^2 , poměr výztuže vůči matici a hustotu skladby. Při laminaci většiny vzorků byla použita strhávací tkanina, perforovaná tkanina a sací tkanina o plošné hustotě 300 g/m^2 . Technologické materiály byly použity pro všechny vzorky identické. Vzorky se laminovaly na separovaný plech ze slitiny hliníku o dobré kvalitě povrchu. Vyjímkou je vzorek číslo pět, který byl z obou stran opatřen plechem ze slitiny hliníku místo technologických materiálů. Všechny vzorky byly vytvrzovány při podtlaku -0,84 bar. Vzorky číslo deset až třináct byly umístěné do autoklávu, který byl následně na celou dobu tuhnutí pryskyřice natlakován na 3 bary. I tyto vzorky byly uvedeny do podtlaku -0,84 bar.



Obr. 9: Vzorky připravené na laminaci

Skladba	Tloušťka [mm]	Plošná hustota [g/m^2]	Výztuž : Matrice	Hustota [kg/m^3]
1. 1xB	0,30	311,6	64 : 36	1039
2. 2xB	0,50	607,3	66 : 34	1191
3. 3xB	0,70	898,2	67 : 33	1265
4. 4xB	0,90	1177,0	68 : 32	1293
5. 4xB	0,77	1142,2	70 : 30	1483
6. 1xA	0,18	146,6	55 : 45	815
7. 2xA	0,28	262,3	61 : 39	937
8. 4xA	0,46	491,8	65 : 35	1069
9. A+B	0,38	426,4	66 : 34	1122
10. A+B	0,38	394,8	71 : 29	1039
11. 2xB	0,50	572,3	70 : 30	1122
12. 3xB	0,70	836,6	72 : 28	1178
13. 4xB	0,90	1118,9	71 : 29	1230

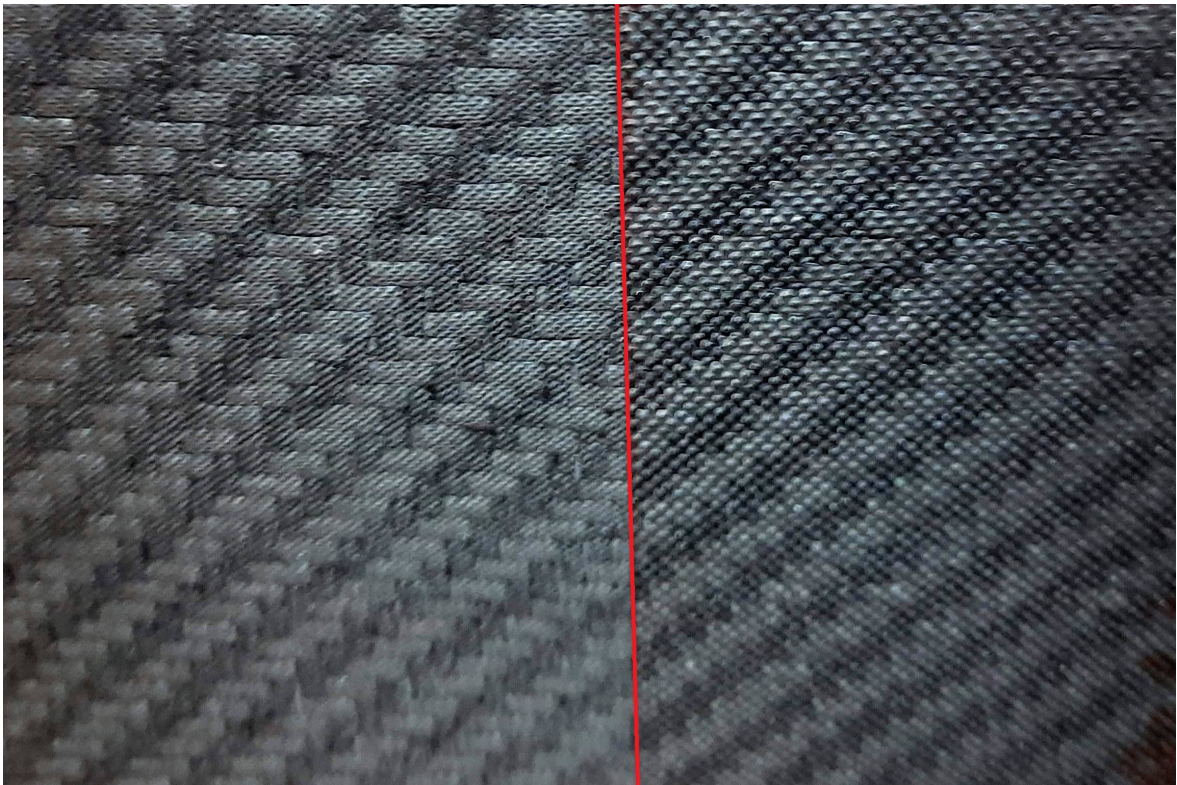
Tab. 3: Porovnání skladeb kompozitních materiálů

Z výsledků lze vidět, že tloušťka u skladeb s jednou vrstvou je vždy větší, než přírůstek dalších vrstev. U tkaniny typu B lze vidět, že vzorek číslo 1 má tloušťku 0,3mm, vzorek číslo 2 0,5mm a vzorek číslo 3 má tloušťku 0,7mm. Tato nelineárnost na začátku vrstvení je nejpravděpodobněji způsobena tím, že textura od strhávací tkaniny přidává kompozitnímu materiálu určitou tloušťku. U tkaniny B je to 0,1mm. Samotná tloušťka každé vrstvy kompozitu je 0,2mm. Výsledky tkaniny A jsou méně lineární, lze z nich ale vyčíst, že tloušťka každé vrstvy je přibližně 0,1mm a tloušťka textury strhávací tkaniny je přibližně 0,08mm. Pro přesnější výsledky by bylo vhodné dané vzorky vylaminovat v několika dalších šaržích a porovnat. Zajímavý výsledek lze pozorovat u vzorku číslo pět. Tento vzorek byl laminován z obou stran na plech ze slitiny hliníku. Tloušťka je o 0,13mm menší, než u vzorku čtyři se strhávací tkaninou. To by nasvědčovalo tomu, že chybějící textura ze strhávací tkaniny přidává u ostatních vzorků 0,1mm. Zbylé 0,03mm mohou být zapříčiněné lisováním kompozitu mezi deskami. Mohlo dojít k lehkému zploštění vláken. Zajímavé je také porovnání se vzorky z autoklávu. Přidaný tlak nezmění tloušťku výsledné vrstvy.

Plošná hustota skladeb roste degresivně s množstvím vrstev. Tato vlastnost by mohla být způsobena vzájemným tvarovým zamykáním vláken jednotlivých vrstev do sebe a tím menší spotřebou pryskyřice. Tuto možnost podporuje i fakt, že poměr výztuže v kompozitu roste s počtem vrstev. Pro určení příčiny by bylo potřeba udělat více šarží vzorků a provést další testy. Všechny vzorky mají vyšší podíl výztuže než matrice. U kontaktní laminace se obecně udává, že nejlepší poměr, kterého se dá dosáhnout je 50:50. Cílem je, aby v kompozitu byl vždy co největší podíl výztuže, jelikož ta dodává součásti její pevnost a tuhost. Důvodem, proč vzorky mají tak výborné poměry může být i skutečnost, že se jedná o nejvhodnější tvar pro provedení kvalitní laminace.

U tvarově sloužitějších dílů může dojít k hromadění pryskyřice v hranách a tím navýšení podílu pojiva v součásti. Výsledky, kterých jsem u vzorků dosáhl jsou velmi idealizované. Při laminaci potahů přitlačných křídel není nemožné dosáhnout podobných výsledků, jelikož se jedná o součásti tvarově nenáročné. U součásti jako jsou například bočnice, bude mít matrice vyšší zastoupení kvůli vyšší tvarové komplexnosti.

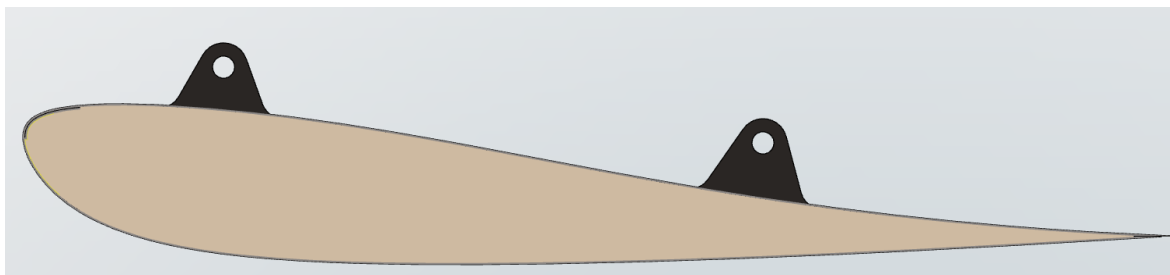
Kompozity, které byly vytvrzené v autoklávu mají stejnou tloušťku, ale nižší plošnou hustotu. To je způsobeno menším množstvím pryskyřice v materiálu. Tento fakt by znamenal, že vlákna jsou hůře prosycená nebo že je v kompozitu větší množství dutin. po bližším přezkoumání povrchu je patrné, že kompozity z autoklávu mají na straně strhávací tkaniny hrubší texturu. Povrch více kopíruje tvar vláken. U vzorků, která byly pouze v podtlaku je povrch vylitý pryskyřicí, rovný a bez hrbolů. Domnívám se, že právě v tomto místě dochází k úspoře pryskyřice. Na přiložené fotografii lze pozorovat rozdíl. Vzorek z autoklávu se nachází na levé straně.



Obr. 10: Porovnání textur strhávací tkaniny

8 Sendvičové struktury

V kompozitních materiálech často používáme struktury, které nám dovolí zvětšit průřez kompozitu a tím navýšit průřezový modul. Díky tomu mohou součásti být tužší a přenášet vyšší ohybové a kroučící momenty. Pokud to zástavba dovolí, je vždy vhodné využít sendvičových struktur. Alternativní metodou pro zvýšení tuhosti jsou lemy a prolisy. I tento způsob lze využívat u kompozitních materiálů. Nevýhodou proti sendvičovým strukturám je ale ovlivnění tvaru povrchu, což v mnoha aplikacích je nežádoucí. Přítlačná křídla se laminují jako tenké potahy. Jedná se o skořápku, která kopíruje vnější tvar křídla. Tyto potahy (nejčastěji dva) se následně lepí za náběžné a odtokové hrany dohromady tak, aby tvořily kontinuální konturu. Křídlo má velký průřezový modul a tudíž by potahy měly být schopné přenášet velké kroučící a ohybové momenty. Při zatížení křídla dojde ovšem k jeho okamžitému zborcení. Vnitřní objem potahu je nutné vyztužit strukturou, která při zatížení udrží potahy ve stejné vzdálenosti. K tvorbě sendvičových struktur můžeme použít několika druhů výplní. Ve všech případech se jedná o materiály, které mají nižší hustotu, než kompozitní obal. Díky tomu jsou sendvičové struktury výhodné v aplikacích, kde je potřeba aplikovat lehké a tuhé řešení. Mezi hlavní druhy výplní patří tvrzené pěny, voštiny, vypěňovací systémy a kompozitní výplně.



Obr. 11: Křídlo s jádrem z tvrzené pěny

8.1 Tvrzené pěny

Jedná se o pěnové bloky a desky, které se upravují do požadovaných tvarů aby sloužili jako výplň v kompozitním sendviči. Kromě řezání je možné tyto materiály i frézovat do požadovaných tvarů výplní. Lze je tedy využít i jako výplň do aerodynamických křídel. Některé pěny je možné i po nahřátí tvarovat. Tvrzené pěny se dodávají v mnoha různých tvarech a mechanických vlastnostech. Nejčastěji se vyrábějí z akrylátové nebo PVC pěny. Některé druhy pěn mají vysokou tepelnou odolnost a je možné je tedy využívat při laminaci dílů z předsycené tkaniny. Výhodou pěn je schopnost laminovat kompozitní součásti na jeden cyklus. Pěnu můžeme do kompozitu přímo zalaminovat a není potřeba ji mezi potahy až následně vlepovat jako je to u jiných typů výplní. Lze používat i extrudovaný nebo expandovaný polystyren. Ten najde uplatnění u aplikací, kde hraje nevyšší roli hmotnost. Výhodou polystyrenů je nízká pořizovací cena a možnost řezat tvary jader pomocí hrochého drátu. Konstruktér se ovšem musí spokojit s horšími mechanickými vlastnostmi sendviče. Zejména potom malou odolností vůči otlacení. Polystyrenová jádra jsou velmi oblíbená například u modelářů. Jde o velmi univerzální druh jádra, který se prodává v širokém množství variant, aby pokryl potřeby většiny zákazníků.

8.2 Voštiny

Jádru v podobě pláštěv, které se umísťují mezi dva kompozitní potahy. Oproti ostatním druhům jader mají velmi nízkou hustotu. Nejčastěji vyráběné z aramidu a slitiny hliníku. Voštiny je možné do kompozitu přímo zalaminovat, ovšem dojde k protlačení tkaniny do oček voštiny a zaplnění dutin voštiny pryskyřicí. Takový postup není ideální. Pro zajištění dobrých vlastností je vhodné voštinu vždy lepit mezi dva vylaminované potahy dílu. Tento druh jádra není možné použít tam, kde se mění průřez, například u aerodynamického křídla. Voštiny se dodávají v podobě desek a není možná je spolehlivě frézovat. Výhodou voštin je jejich dobrá tvárnost a tedy je možné voštiny jednoduše vkládat do součástí, která mají určitou křivost. Problématické může být i lepení voštin. Je potřeba použít lepidlo, které má dobrou adhezi mezi voštinou a kompozitem. Nejvhodnější jsou lepidla, která dokáží vyzlínat mezi voštinou a potahem.

8.3 Vypěňovací systémy

Nejčastěji dvousložkové nebo tříložkové kapaliny, které po smíchání začnou expandovat, vypěňovat a následně tuhnout. Vypěňovací systémy mohou být i v podobě fólií, které začnou expandovat a tuhnout po zahřátí. Tento druh se používá u dílů vyráběných z předsycené tkaniny. Mezi nejběžnější druhy patří polyurethanové a epoxidové vypěňovací systémy. Obecně mají polyuretanové pěny nižší hustotu a rychlejší reakci. Epoxidové pěny jsou díky pomalejší reakci univerzálnější a lze je používat k lepení jader z tvrzené pěny k potahům. Díky zvětšení objemu vyplní všechny nepřesnosti a dotlačí potah křídla na povrch formy.

Polyurethanovou pěnu PUR 2K 45 od firmy Havel composites s.r.o jsem zvolil jako vhodnou možnost pro tvorbu jader aerodynamických křidel. Její hlavní předností je nízká hustota $45\text{kg}/\text{m}^3$ a vysoká odolnost proti otlacení. Hlavní nevýhodou tohoto řešení je vysoká reakční rychlost. Od začátku míchání směsi, až po úplné ztuhnutí, trvá reakce přibližně čtyři minuty. Zvolený pracovní postup tvorby křídla začíná laminací částí potahu křídla. Tyto potahy se následně ve formách slepí dohromady i s koncovými žebry, do kterých jsou vlepené vložky se závity pro následnou montáž křídla na vůz. Koncová žebra jsou opatřena dostatečně velkým otvorem pro lití vypěňovacího systému. Po vyexpandování a vytvrzení je potřeba pěnu nechat stárnout po dobu dvou dnů. Na základě mých testů byla v tomto časovém rozmezí pozorována velká změna odolnosti vůči otlacení pěny a zvýšení houževnatosti. Po uplynutí tohoto času je možné hotové křídlo odstranit z forem. Na vzorcích pěny jsem provedl několik testů. Při zahřívání pěny po dobu pěti hodin proudem vzduchu o teplotě 80°C nedošlo ke změně tvaru formy, snížení odolnosti vůči otlacení, ani žádným vizuálním vadám. Po aplikaci acetonu nedošlo ke ztrátě mechanických vlastností pěny ani změně objemu. Vytvrzením pěny na již ztuhlé pěně lze vytvořit strukturu dvou pěn, které jsou od sebe viditelně oddělené, ale jejich adheze je podobná vlastnostem pěny osamoceně. Z tohoto testu vyplývá, že je možné vrstvit pěny na sebe, pokud nám nevádí horší estetická stránka. Vypěňový systém je zároveň dobře brouditelný. Z cvičných licích pokusů jsem zjistil, že pro přesné vyplnění objemu křídla je vhodné namíchat o 10% více směsi. K této celkové hodnotě je potřeba ještě přidat 20 gramů směsi, což představuje usazené množství v kelímku. Tuto hodnotu jsem stanovil na základě průměrné hodnoty usazeniny všech testovacích pokusů. Takové množství směsi dokáže spolehlivě zajistit kvalitní vypěnění objemu, bez velkého množství dutin. Hlavní nevýhodou této metody je rychlost reakce a tudíž špatné ovládní umístění vypěňovacího systému v objemu křídla. Na základě pokusů jsem zvolil jako nejvhodnější metodu aplikace pěny do profilu, lití pod úhlem. Při správně zvoleném úhlu a načasování dojde k rovnoměrnému rozprostření směsi v křídle, což zajistí homogenní tvorbu tuhé pěny bez dutin. Zjišťování těchto hodnot je časově náročné, jelikož se liší podle potřebné licí délky a objemu. Pro klapku zadního křídla vozu FS.14, jejíž délka je 780mm, byl zvolen vhodný úhel 35° , při čase míchání složek 40 sekund a licí době 36 sekund.

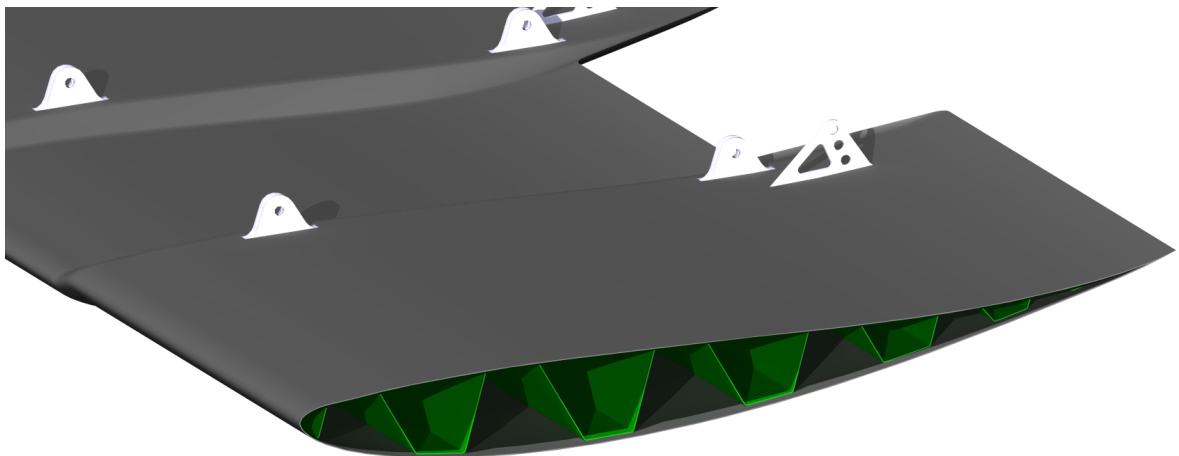
Při dodržení těchto hodnot jsem byl schopný dosáhnout kvalitního vypěnění klapky zadního křídla bez dutin. Stanovené parametry ovšem ovlivňuje i okolní teplota a typ povrchu, po kterém je směs lita. Tření mezi povrchem a vypěňovacím systémem ovlivňuje kvalitu odlití. Prvotní testy jsem prováděl na dřevěných deskách s hrubým povrchem. Na tomto povrchu jsem ideální lící úhel naměřil o 5° vyšší, než u povrchu vytvořeného strhávací tkaninou na kompozitu. Vzhledem k časové náročnosti a složité opakovatelnosti byla tato metoda tvorby jader aerodynamických křídel zamítnuta. Alternativně by bylo možné vypěňovací systém dopravovat a rozmísťovat do křídla pomocí porézní hadičky. Směs by hadičkou proudila při zvýšeném tlaku a došlo by k rovnoměrnějšímu rozmístění látky. Hadička by následně zůstala uvnitř jádra. Pro úspěšnou implementaci této metody by bylo potřeba vytvořit několik zkušebních lití a pokusů.



Obr. 12: Měření ideálního úhlu lití

8.4 Kompozitní výplně

Nejčastěji v podobě vlnovců a nosníků. Tento typ jádra se využívá často jako výztuha aerodynamických profilů. Kompozitní jádro se lepí k částem potahu a zajišťuje, aby při zatížení křídla nedošlo ke zborcení potahů. Pokud je kompozitní výplň dobře navržena, může mít při stejných vlastnostech jako předešlé typy jader, mnohem menší hmotnost. Nejčastěji se vyrábějí z uhlíkových vláken. Kompozitní výztuhy mohou být různých provedení, záleží na aplikaci a požadovaných vlastnostech. Pro výztuhu křídel předešlých vozů týmu CTU CarTech se používaly vlnovce, které kopírovaly konturu křídla. Tento vlnovec byl následně vlepen mezi potahy. Mezi hlavní nevýhody těchto jader patří vyšší cena, jelikož je potřeba pro laminaci jádra využít formy a možná deformace povrchu. Typické křídlo Formula Student je velmi lehké, jelikož nepřenáší velké zatížení. Přítlačná síla na předním křídle při 120 km/h je 1026 N. Hmotnost se šetří hlavně v oblasti potahu. Typický potah vozu CTU CarTech má tloušťku pouze 0,38mm. Pokud přilepíme k potahu tento vlnovec, který neslouží jako celoplošná opora, jsou na přítlačném křídle měkká a zdeformovaná místa. Takové přítlačné křídlo bude fungovat nepředvídatelně a jeho výkonnost bude snížena. Kompozitní výplně je vhodné tedy používat zejména tam, kde jsou tloušťky potahů větší a potah má určité množství tuhosti. Takto zkonstruované křídlo by ovšem pro aplikaci Formula Student bylo příliš těžké.



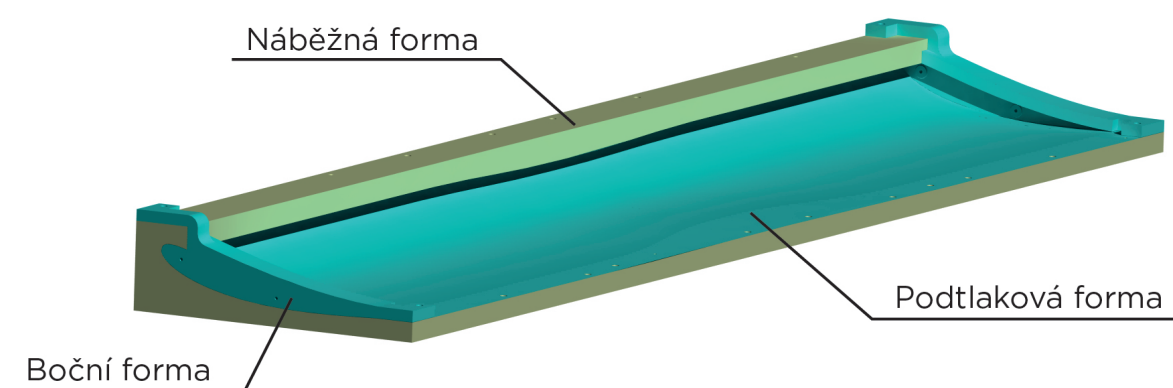
Obr. 13: Kompozitní výplň předního křídla vozu FS.13

9 Formy

Formy mají tvar negativu součásti a jsou důležitou součástí laminačního procesu. Správným technologickým návrhem formy a výběrem materiálu, můžeme zpřesnit a zrychlit výrobu kompozitních součástek a snížit podíl výrobků v neshodě. Existuje spousta způsobů, jak zhotovit formy. Kromě frézování bloků materiálu do požadovaného tvaru formy, lze vyrobit také pozitiv součásti a ten následně zaformovat pomocí formovacího materiálu. Výsledkem je forma z kompozitního materiálu, která má dobré mechanické vlastnosti. Na tvorbu pozitivu můžeme použít levnější materiál, jelikož nebude používán opakovaně. Lze také zaformovat již hotový výrobek a tím zreplikovat již vyrobený díl. Já se budu v této kapitole zabývat technologií přímé tvorby negativů pro přitlačné křídlo.

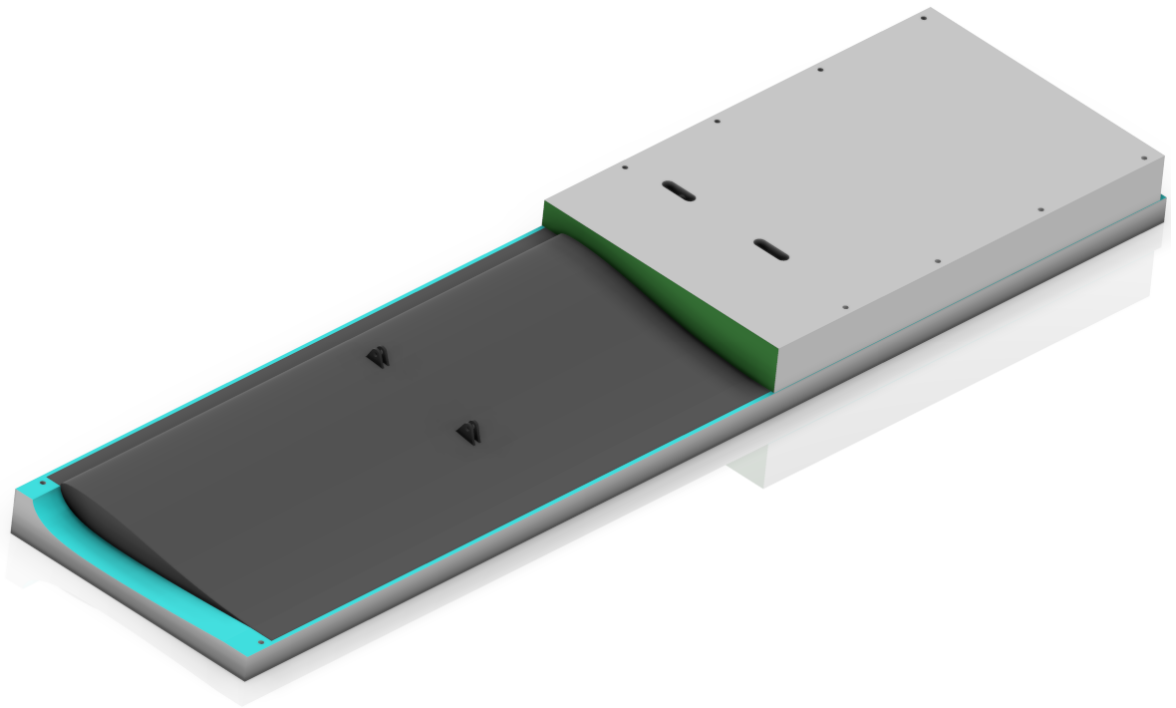
9.1 Návrh forem

Správně navržená forma musí dokonale kopírovat tvar profilu křídla. Negativy pro výrobu přitlačných elementů se nejčastěji skládají ze tří až pěti forem. Jedná se o formy na tvorbu potahu přetlakové strany křídla, podtlakové strany křídla a formu náběžné hrany křídla. Forma náběžné hrany se nejčastěji připevňuje k negativu podtlakové strany křídla a potah se laminuje jako jejich celek. K vylaminované náběžné hraně se následně lepí přetlakový potah křídla. U odtokové hrany křídla se potahy k sobě lepí na tupo za vylaminový přesah, který se po vytužení lepidla zařízne. Alternativně lze při laminaci použít i boční formy, kterými si na podtlakovém potahu vylaminujeme boky křídla, přes které se prvek připevňuje k dalším částem vozu. Použití této metody urychlí výrobu a sníží hmotnost křídla, jelikož není potřeba k vylaminovanému potahu lepit koncové žebra.



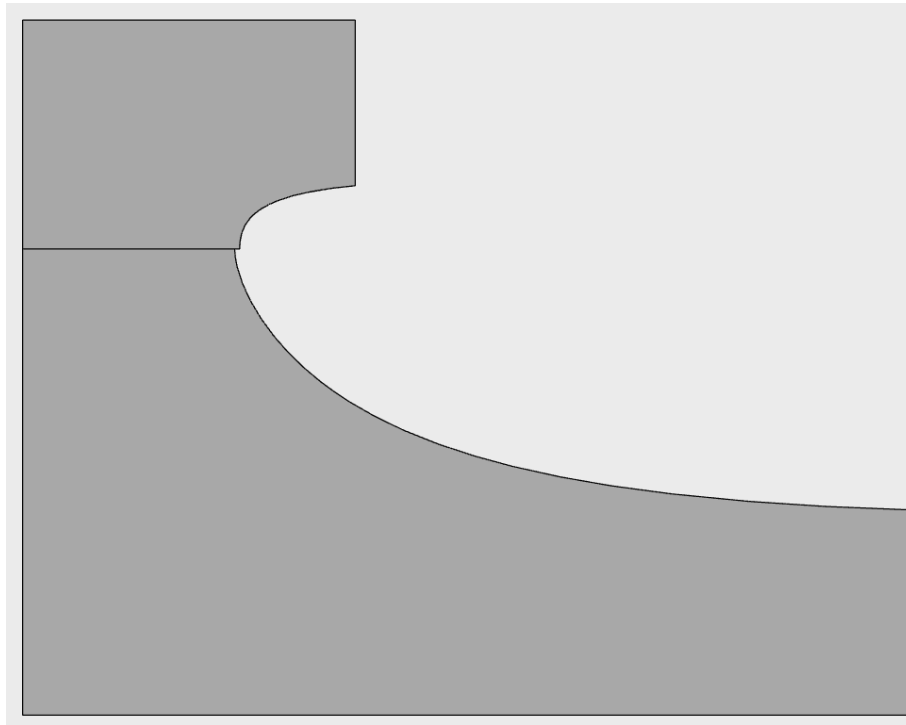
Obr. 14: Sestava podtlakové, náběžné a bočních forem

Vyrobené potahy následně vložíme do negativů, bez formy náběžné hrany a lepení probíhá usazením forem na sebe. Tím docílíme přesného tvaru lepeného křídla. Při tomto procesu se do křídla vlepují i žebra a jádra.



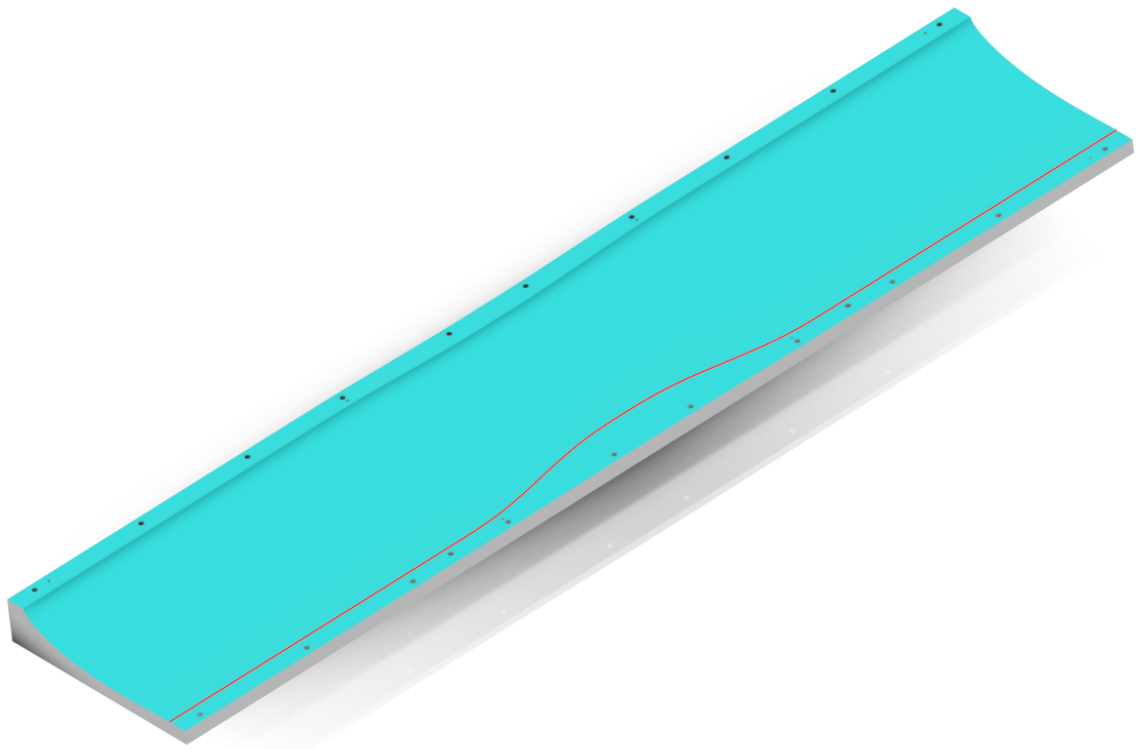
Obr. 15: Řez sestavou lepení křídla

Forma pro tvorbu náběžné hrany musí být odsazena o tloušťku potahu a mezeru pro lepidlo, aby při lepení potah přetlakové strany dosedl na své správné místo. Tloušťka potahu zvolené skladby pro vůz FS.14 je 0,4mm a zvolená mezeru pro lepidlo 0,2mm. Náběžná hrana je tedy odsazena o 0,6mm.



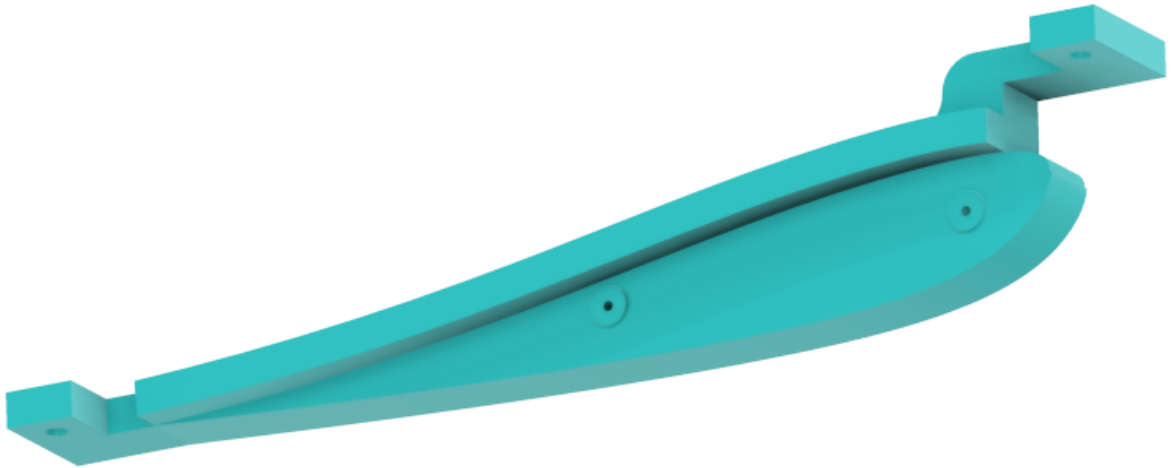
Obr. 16: Odsazení náběžné formy od podtlakové

Každá forma musí mít u náběžné a odtokové hrany díry pro sešroubování forem dohromady. Tyto díry se využívají jak u lepení křídla, tak pro montáž formy náběžné hrany. Dále je vhodné na formy umístit i díry pro kolíky, pomocí kterých středíme formy na sebe a zajistíme tak jejich přesnou, návrhovou pozici. Za odtokovou hranu křídla je vhodné umístit alespoň dvě díry, které se při laminaci protlačí do potahu a pomocí nich následně vystředíme potah přesně na formě tak, aby lepení proběhlo ve správné pozici. Tyto díry jsou umístěné až za odtokovou hranou, takže po slepení křídla dojde k jejich odstranění. Pro správné určení délky křídla je vhodné na formu umístit ořezovou hranu. Jedná se o tenkou, vyfrézovanou drážku, které je v místě odtokové hrany. Tato drážka se po laminaci protiskne v kompozitu a lze podle ní následně přesně zabrousit odtokovou hranu. Některé klapky přítláčného křídla jsou uchycené k vozu přes žebra umístěné v prostoru křídla. Aby při lepení nedošlo ke kolizi žebra s formou, je potřeba do formy vyfrézovat drážky.



Obr. 17: Podtlaková forma se zvýrazněnou ořezovou hranou

Boky křídla jsou k dalším částem auta připevněné pomocí nýtovacích matic a šroubů. Boční formy tedy obsahují díry pro kolíčky, které se do forem umístí před laminací a tudíž má v sobě hotový kompozit již připravené díry. Tyto díry se následně zvětšují na požadovaný průměr. Nýtovací matice je potřeba zapustit, aby součásti vždy dosedaly svými plochami. Z toho důvodu je kolem díry na formě vymodelovaný výstupek, který po laminaci vytvoří v boku křídla zapuštění.



Obr. 18: Boční forma

9.2 Materiály forem

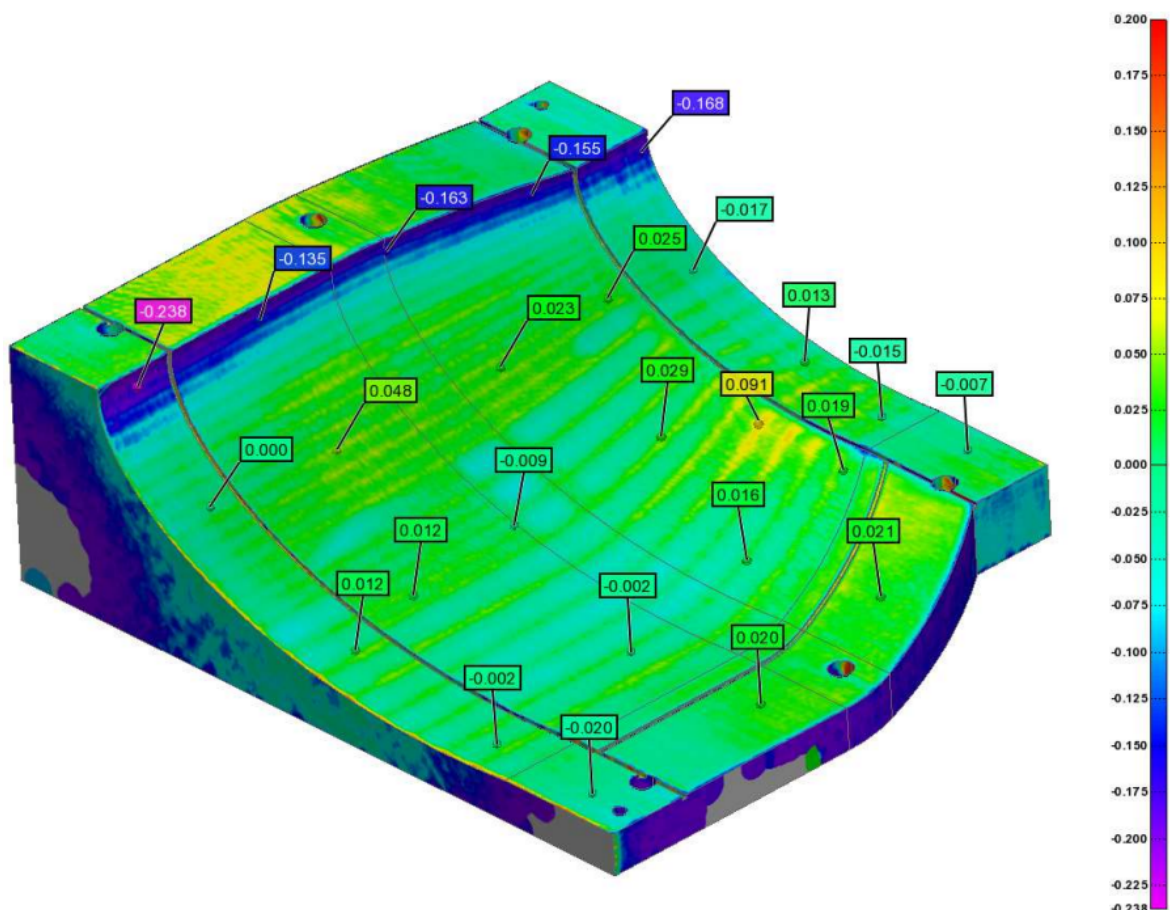
Materiál volíme dle požadovaných vlastností formy. Mezi hlavní rozhodovací parametry patří cena materiálu, teplotní odolnost a roztažnost materiálu, odolnost vůči opotřebením, hmotnost a obrobitelnost. Konstruktor vybírá materiál podle technologie zpracování, počtu kusů, kvality a přesnosti kompozitních součástí. V sériové výrobě se nejčastěji používají formy ze slitiny hliníku a ocelové plechové ohybky. Mezi jejich hlavní výhody patří možnost vyrábět velké série bez opotřebením forem a hlavní nevýhodou je vysoká pořizovací cena a hmotnost. Další možností jsou materiály z umělých hmot, nejčastěji polyuretanové bloky. Mezi jejich hlavní přednosti patří výborná obrobitelnost a nižší pořizovací náklady než u kovových forem. Materiály se dodávají v mnoha provedení s různými vlastnostmi. Od nejlevnějších materiálů, které mají nízkou teplotní odolnost a nízkou odolnost vůči opotřebením, až materiály, které dokáží v mnoha ohledech nahradit kovové formy. Zajímavou variantou jsou i polotvrdé dřevovláknité desky, neboli MDF. Jejich hlavní předností je nízká cena. Obrobitelnost materiálu je dobrá, ale dochází k tvorbě velkého množství drobného prachu, který se usazuje na strojích. Materiál absorbuje vlhkost, což způsobuje kroucení forem.

Tomu se dá zabránit, pokud formy bezprostředně po obrábění nasytíme pryskyřicí. Dojde tak k uzavření povrchu a vlhkost již nemůže vnikat do materiálu. Formy z MDF lze použít i na laminaci z předsycených tkanin a to i v autoklávu. Z provedených testů jsem zjistil, že po cyklu v autoklávu dojde k deformacím formy, v nejvíce ovlivněném místě o 0,5mm. Pokud formu použijeme pouze na jednu nebo dvě laminace, mohou být výsledky dostatečné. Při programu o nižší teplotě a tlaku by deformace formy mohly být ještě nižší. Testovaný cyklus měl maximální teplotu 120°C a tlak 6 bar. Mezi hlavní nevýhody forem z dřevovláknitých desek patří jejich vysoká míra opotřebení a nehomogenost materiálu. Desky se vyrábějí pomocí lisování směsi materiálu, což způsobí, že povrch polotovaru je velmi tvrdý, ale jádro je měkké a drolivé. Vlastnosti formy tedy závisí na tom, v jaké hloubce desky jsou nejdůležitější části vyfrézované. Pro účely aerodynamického balíčku týmu CTU CarTech je tento materiál nejvhodnější, vzhledem k jeho nízké pořizovací ceně. Vysoká míra opotřebení pro týmové účely není problémová, protože vývoj aerodynamických dílů probíhá každoročně a v průměru každá forma je použita třikrát, než je nahrazena novou, vylepšenou verzí.



Obr. 19: MDF formy nasycené pryskyřicí

Zajímavou variantou jsou i formy vyrobené pomocí 3D tisku z plastu. Jedná se o cenově dostupné formy, které je možné převést od návrhu po vyrobený produkt v krátkém čase. Použití plastových forem je vhodné pro menší kompozitní součásti. Při nutnosti spojovat více výtisků dohromady dochází ke ztrátě přesnosti a snižuje se také rychlostní výhoda této metody. Dle pokusů, které jsem s tištěnými formami provedl jsem jako nejlepší materiál zvolil PLA. Mezi jeho přednosti patří nízká pořizovací cena, nízká deformace způsobena chlazením formy při tisku, a jednoduchost tisku. Hlavní nevýhodou je nízká teplotní odolnost a obtížné broušení materiálu. Formu je vhodné vyrábět vždy tak, aby plocha, na kterou budeme provádět laminaci byla tisknuta v ose Z. Tím zajistíme lepší kvalitu povrchu a následná úprava plochy je jednodušší. Funkční plochu vytištěné formy je potřeba rozbrousit smirkovým papírem od zrnitosti 240, až po 7000 a následně rozleštit. Broušení je nutné provádět na mokrou, jinak dojde k natavování formy. Takto upravená forma je připravena k laminaci. Přesnost 3D tištěných forem je výborná. S pomocí 3D skenu jsem na formách naměřil maximální odchylku -0,24mm.



Obr. 20: Rozměrová přesnost 3D tištěné formy

9.3 Výroba formy z MDF

Polotvrdé dřevovláknité desky jsou dostupné v maximální tloušťce 28mm. Často pro tvorbu formy je potřeba polotovaru o tloušťce větší, takže se desky vrství a lepí pomocí univerzálního lepidla na dřevo. Při tuhnutí lepidla je potřeba vytvořit tlak mezi deskami, aby došlo ke spojení desek v celé ploše. Připravený polotovar je následně obroben pomocí CNC frézky. Neprodleně po obrábění je potřeba formu nasýtit pryskyřicí. Čím dříve dojde k sycení, tím více snížíme šanci negativu se zderfomvoat. Sycení se provádí nanášením pryskyřice pomocí štětců. Po určité vrstvě dojde k přesycení materiálu a pryskyřice přestane být absorbována. Cílem je rozetřít vrstvu rovnoměrně tak, aby nikde nevznikaly přesycená místa. Po vytvrzení pryskyřice má forma tvrdý, snadno brouditelný obal. Na povrchu jsou viditelné dráhy nástroje a vystouplá vlákna materiálu. Povrch je nutné zarovnat pomocí smirkového papíru zrnitosti 240. Tuto operaci je vhodné provádět ručně, jelikož při strojovém broušení by mohlo dojít k roztavení pryskyřice a znehodnocení povrchu formy. Dalším krokem je odstranění zbylých nepřesností na povrchu pomocí aplikace plniče. Pro nejlepší výsledek je vhodné použít dvousložkový plnič, aplikovaný pneumatickou lakovací pistolí. Počet vrstev závisí na velikosti nerovností povrchu. Po každé aplikaci je potřeba plnič broudit pomocí smirkového papíru, do té doby, než je povrch hladký a bez nerovností. Následně se forma lakuje barvou. Pro dobrý výsledek je vhodné použít akrylovou barvu na automobily. Tento typ barvy je dobře dostupný, má vysokou tvrdost, odolnost vůči teplotám a je dobře leštitelný. Barvu je vhodné nanést ve velké vrstvě, jelikož následně dojde k jejímu broušení pro vyrovnání všech nerovností a odstranění kontaminovaných míst. Pokud se formy lakují v profesionálním lakovacím boxu, je možné další kroky zjednodušit, jelikož nedojde ke kontaminaci povrchu. Ne vždy má tým přístup k profesionálnímu lakovacímu prostoru, takže je potřeba nedostatky opravit broušením.

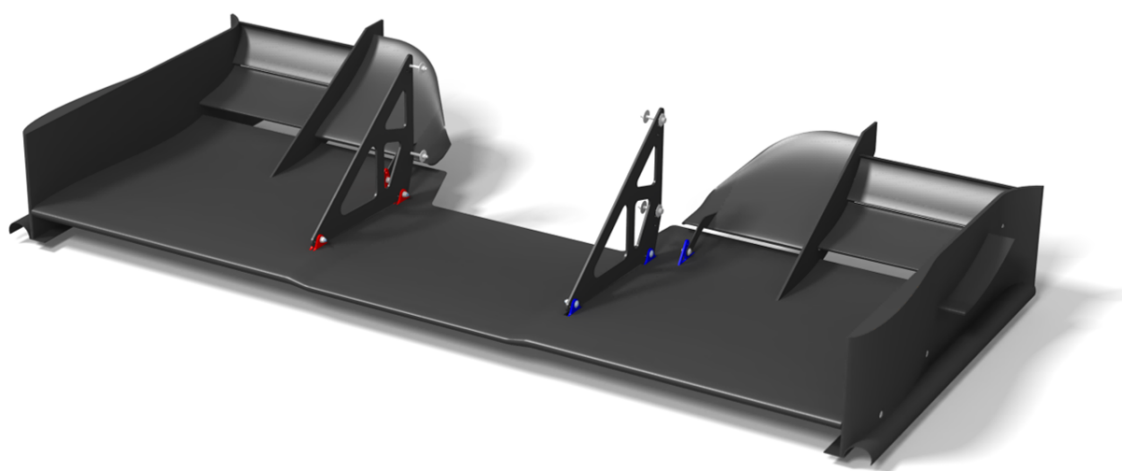
Aby došlo k odstranění i těch největších kontaminací, je vhodné začít smirkovým papírem o zrnitosti 400 a pokračovat postupně až po zrnitost 7000. Při broušení je vhodné používat vodu, aby došlo k vyplavování broušeného materiálu ze smirkového papíru. Broušení je možné provádět i strojově, je ovšem potřeba používat značnou vrstvu vody a nízké otáčky. Po dokončení broušení je potřeba povrch vyleštit. Kvalita povrchu formy přímo ovlivňuje kvalitu povrchu kompozitní součásti. Leštění provádíme pomocí speciálních leštících past a molitanového kotouče na excentrické brusce. Takto upravená forma je připravena na laminaci. Při broušení a leštění je potřeba postupovat pomalu a metodicky, aby nedošlo k probroušení barvy.



Obr. 21: Forma s probroušenou barvou

10 Zhodnocení původní konstrukce předního křídla

Přední přitlačné křídlo vozu FS.13 se skládá z hlavního profilu, ke kterému jsou všechny ostatní části křídla připevněny a přes který je celé křídlo přimontováno k šasi vozu. Zároveň produkuje největší aerodynamické síly. Vnější kaskáda křídla je složena z dalších dvou klapek, které jsou s hlavním profilem spojeny pomocí vnější a vnitřní bočnice. Vnitřní kaskáda se skládá pouze z jedné klapky, která je k hlavnímu profilu připevněna pomocí vnitřní bočnice a přenastavitelného držáku. Křídlo splňuje všechny pravidla soutěže Formula Student a váží 3270 gramů.



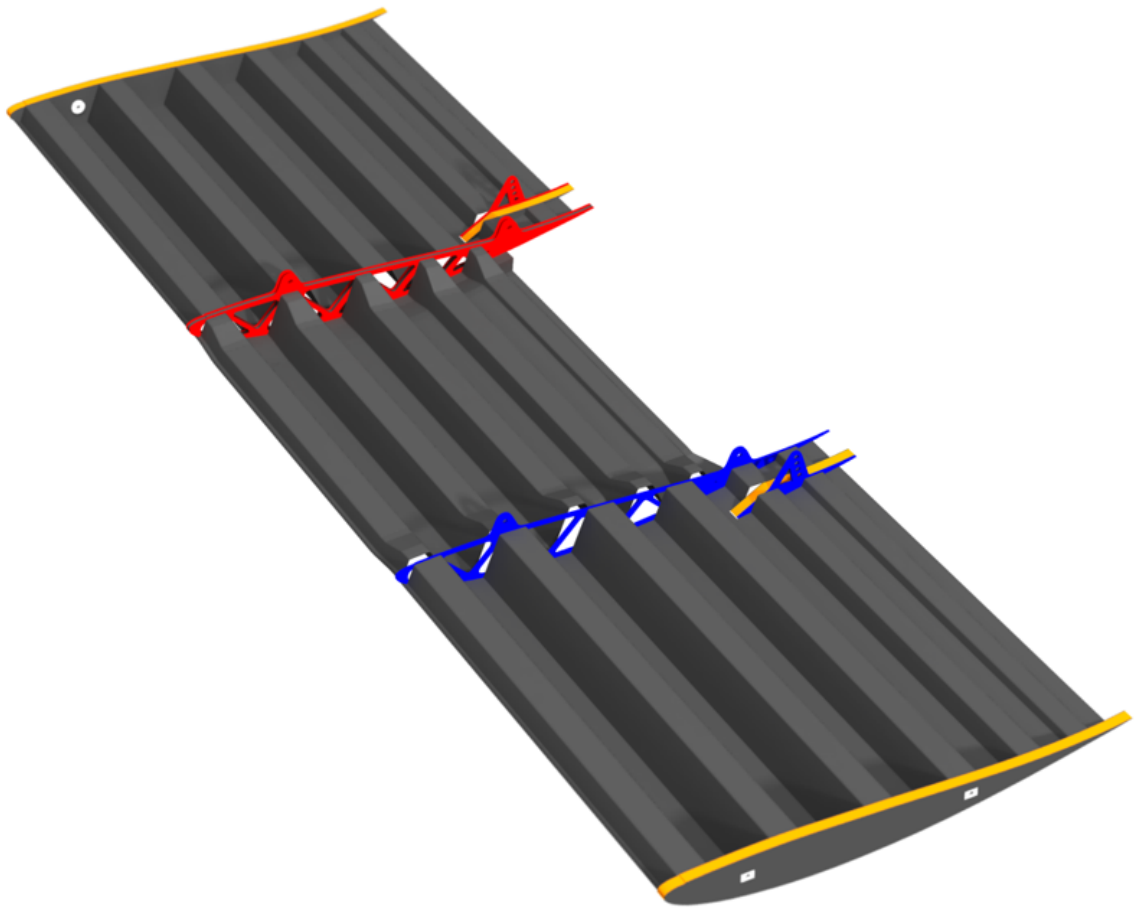
Obr. 22: Model předního přitlačného křídla vozu FS.13

10.1 Hlavní profil

Hlavní profil se skládá z podtlakové a přetlakového potahu, se skladbou z jedné vrstvy pletené tkaniny s rozprostřenými vlákny ve vazbě plátno o plošné hustotě 80 g/m^2 a jedné vrstvy pletené tkaniny ve vazbě kepr o plošné hustotě 200 g/m^2 . Do náběžné hrany je zalaminována jedna vrstva aramidové tkaniny o plošné hustotě 160 g/m^2 , vazby plátno. Ta se přidává do hlavního profilu kvůli zvýšení houževnatosti a snížení rizika lomu křídla při kontaktu s kuželkou.

Jako jádro jsou použity kompozitní vlnovce, vylaminové ze dvou vrstev pletené tkaniny ve vazbě kepr o plošné hustotě 200 g/m^2 . Boční žebra, která se používají k montáži vnější bočnice jsou vyrobena ze sendvičové struktury skládající se ze dvou vrstev pletené tkaniny ve vazbě kepr o plošné hustotě 200 g/m^2 na obou stranách a tvrzené pěny o tloušťce 10mm. Finální tvar je vyřezán pomocí vodního paprsku z odlaminovaného polotovaru.

Do žeber jsou vlepené hliníkové vložky s osazením pro následnou montáž bočnice. Křídlo se k držákům a následně šasi přiděluje pomocí prostředních montážních žeber. Opět se jedná o sendvičovou strukturu, která je složena ze slitiny hliníku a uhlíku. 3,5mm uhlíková deska je vlepena mezi dvě žebra ze slitiny hliníku EN AW 7075 o tloušťce 3mm. Pomocné žebro pro přenastavitelný držák je slepeno ze stejné sendvičové struktury jako vnější žebro a části ze slitiny hliníku EN AW 7075 o tloušťce 3mm. Sendvičová část je zde umístěna pouze kvůli zvětšení plochy pro lepení.

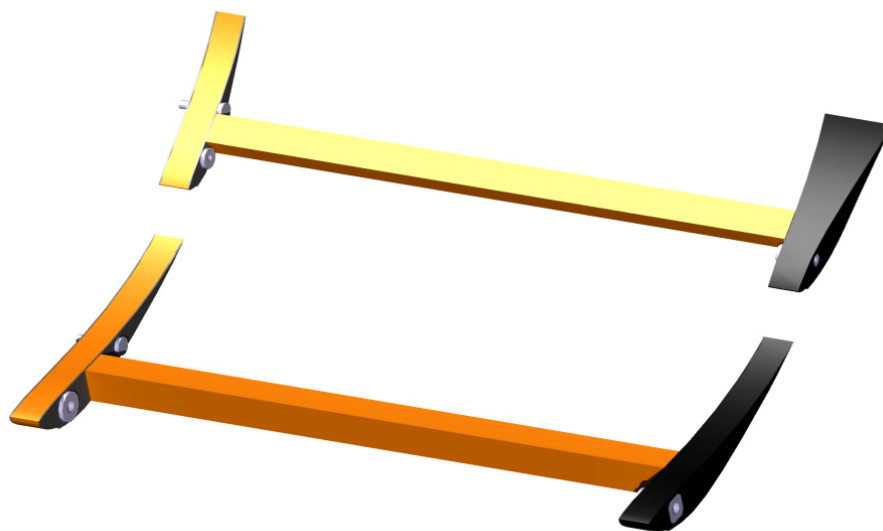


Obr. 23: Vnitřní skladba hlavního profilu vozu FS.13

Po přípravě všech potřebných součástí se k potahu podtlakové strany ve formě přilepí přes přípravky všechny žebra. Přípravky se fixují jak k žebřům, tak k formě a zajišťují přesnou pozici žeber při lepení. Následně se k podtlakovému potahu přilepí i zakrácené vlnovce. Poslední částí je zakrytí pomocí přetlakového potahu. Aby potah dobře přilnul k vlnovcům, probíhá lepení pouze s formou podtlakové strany a celý hlavní profil se uvede do malého podtlaku. To zajistí rovnoměrný tlak na potahu a jeho přilnutí k vlnovcům. Posledním krokem je zakrácení odtokové hrany a zabroušení náběžné hrany.

10.2 Vnější klapky

Obě klapky vnější kaskády se vyrábějí indenticky. Potahy se laminují stejným způsobem jako u hlavního profilu. Skladba potahů je též totožná. Do náběžných hran klapek není zalaminovaná aramidová tkanina, jelikož nejsou v přímém kontaktu s případnou kůželkou nebo jiným objektem. Jako jádro klapek se používá tenký nosník z tvrzené pěny, který se lepí k potahům a žebřům. Vnitřní žebra klapek jsou vytvořena ze stejné sendvičové struktury jako vnější žebra u hlavního profilu. Opět jsou vyřezána do správného tvaru pomocí vodního paprsku a disponují vlepenými vložkami ze slitiny hliníku. Jedna vložka vždy slouží jako závit pro šroub a druhé je v podobě středícího kolíku. Vnější žebra jsou vytištěna na 3D tiskárně z PETG plastu. Důvodem je jejich složitý tvar, který by vodním paprskem nebylo možné vyrobít. Alternativně by bylo možné žebra vyfrézovat, to by ovšem bylo příliš drahé a časově náročné. Vzhledem k nízkým zatížením je 3D tisk vhodnou metodou. I tyto žebra obsahují vložky pro následné přišroubování k vnější bočnici.



Obr. 24: Vnitřní skladba vnějších klapek vozu FS.13

Podtlakové potahy se umístí do forem a dle zaříznutí konců potahu se napozicují žebra. Po zatuhnutí lepidla se mezi žebra přilepí nosník z tvrzené pěny. Následně se na klapky napozicuje přetlakový potah a zatíží se tak, aby se v celé své ploše dotýkal nosníku, žeber, náběžné hrany a odtokové hrany. Po vytuhnutí lepidla se na druhou klapku v kaskádě nalepí Gurneyho klapka, která je vylaminována ze dvou vrstev pletené tkaniny ve vazbě kepr o plošné hustotě 200 g/m^2 .

10.3 Vnitřní klapka

Potahy se laminují stejně jako u klapky vnější kaskády. Vnější žebro je vytvořené ze stejné sendvičové struktury jako vnější žebra hlavního profilu. Do žebra se opět lepí vložka pro následné přišroubování klapky ve vnitřní bočnici. Vnitřní žebro je tištěné na 3D tiskárně z materiálu PETG kvůli komplikovanému tvaru, který není možné vyřezat vodním paprskem. K vnitřnímu žebro je přilepený uhlíkový držák, pomocí kterého se klapka šroubuje k hlavnímu profilu. Tento držák je vyrobený z 2mm uhlíkové desky pomocí vodního paprsku. Vnitřní žebro i držák obsahují díry pro kolíky, pomocí kterých se následně pozicuje konec klapky, který se nelaminuje spolu s potahy, jelikož vyrábět drobné díly mokrou laminací je náročné a bylo by obtížné dodržet vysokou kvalitu. Z toho důvodu je konec vytištěn na 3D tiskárně z materiálu PETG, nasazen na kolíky a přilepen k uhlíkovému držáku.



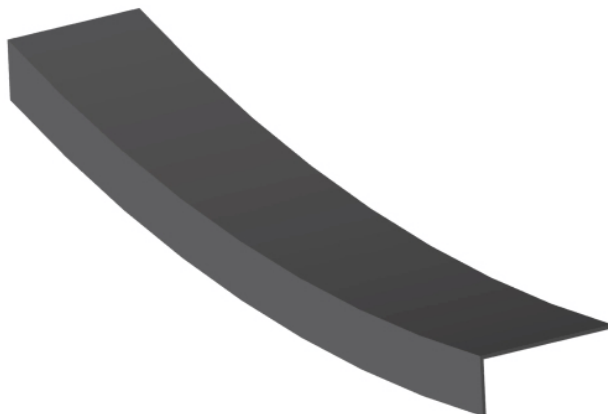
Obr. 25: Vnitřní skladba vnitřní klapky vozu FS.13

10.4 Vnitřní bočnice

Laminuje se jako sendvičová struktura z jedné vrstvy pletené tkaniny s rozprostřenými vlákny ve vazbě plátno o plošné hustotě 80 g/m^2 a jedné vrstvy pletené tkaniny ve vazbě kepr o plošné hustotě 200 g/m^2 , mezi kterými je jádro z tvrzené pěny. Forma, v podobě plechu ze slitiny hliníku má díry pro středící kolíčky, na které se při laminaci usazují vložky. Tyto vložky se následně používají pro napozicování a upevnění klapky pomocí šroubů a kolíčků. Jelikož žádná z vložek neobsahuje závit, jsou vytištěné na 3D tiskárně z PETG plastu. Díky tomu mají vložky nízkou hmotnost a dostatečnou pevnost.

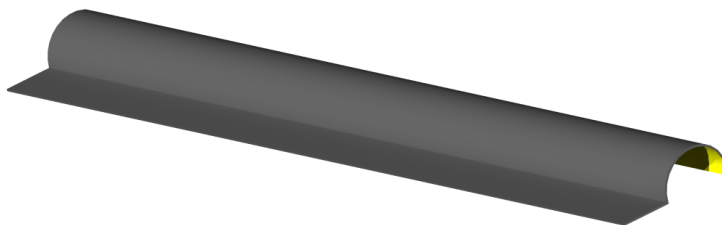
10.5 Vnější bočnice

Vnější bočnice se laminuje ve třech dílech, které se následně lepí k sobě. Horizontální zahnutá deska se laminuje na 3D tištěnou formu ze čtyř vrstev pletené tkaniny ve vazbě kepr o plošné hustotě 200 g/m^2 . Jedna strana desky je hladká a kopíruje povrch formy, druhá má texturu strhávací tkaniny.



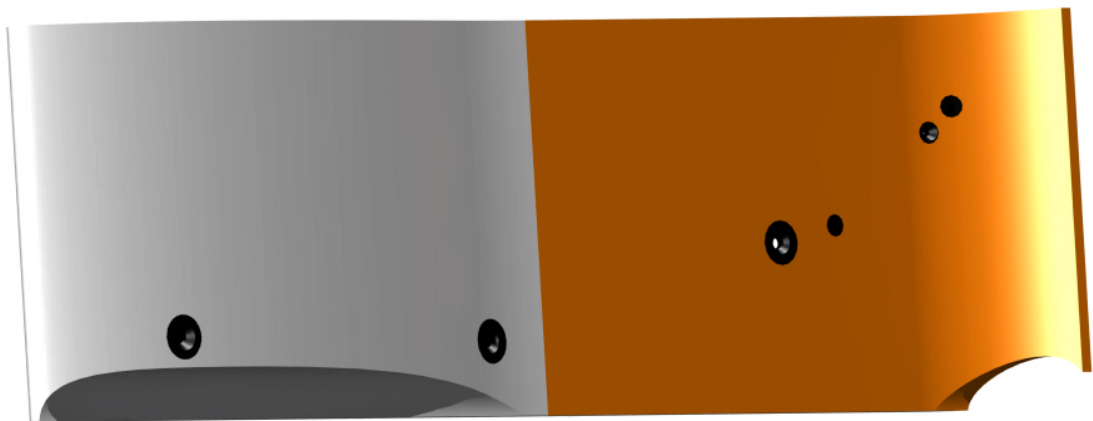
Obr. 26: Horizontální zahnutá deska vozu FS.13

Vírový tunel se také laminuje na 3D tištěnou formu ze tří vrstev pletené tkaniny ve vazbě kepr o plošné hustotě 200 g/m^2 a jedné vrstvy aramidové tkaniny ve vazbě plátno o plošné hustotě 160 g/m^2 , která se laminuje jako první vrstva, tudíž nejbliže k vozovce. Aramidové tkanina se na tento díl dává z důvodu odolnosti proti otěru, při kontaktu bočnice s vozovkou, jelikož se jedná o nejnižší bod předního křídla. Povrch je identický, jako u horizontální boční desky.



Obr. 27: Vírový tunel vozu FS.13

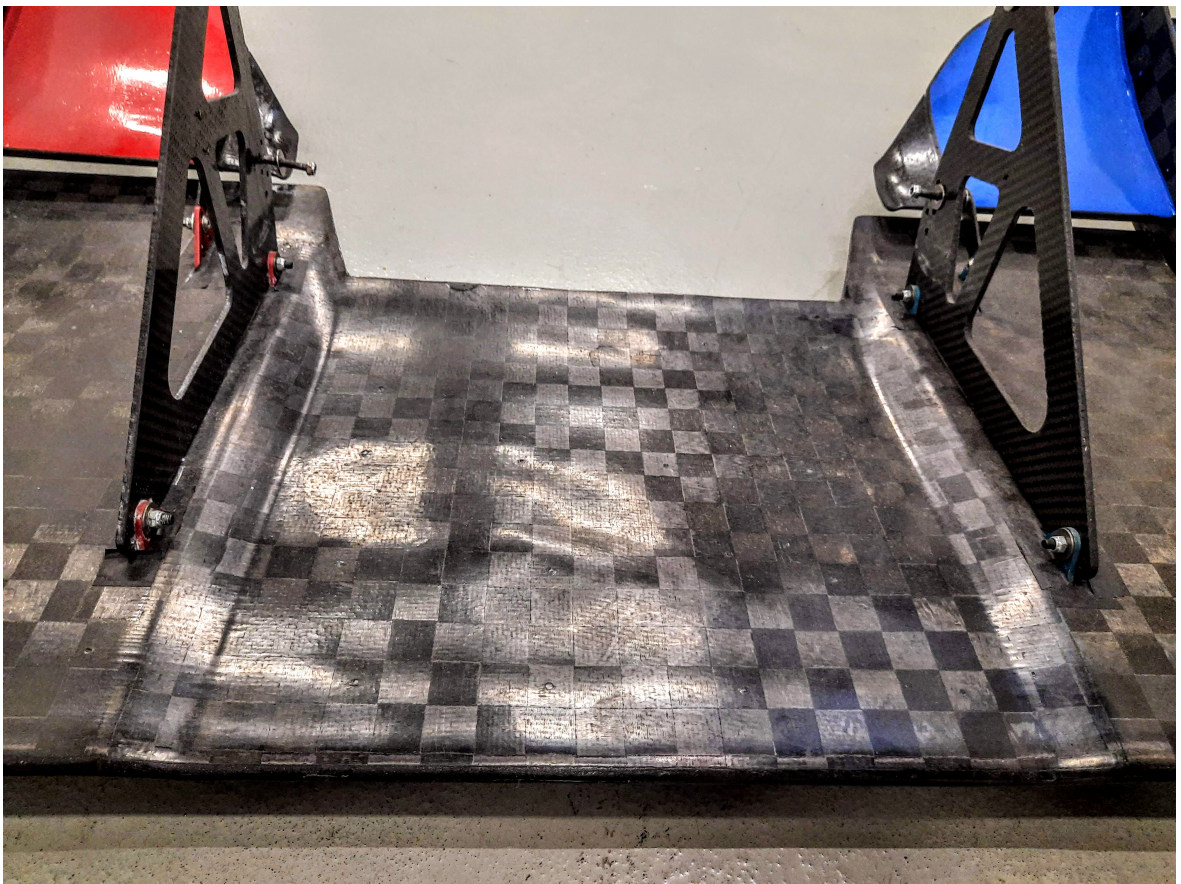
Tělo bočnice se laminuje opět jako sendvičová struktura na kovovou formu s 3D tištěnými příložkami pro náběžnou a odtokovou hranu. Potah je tvořen z jedné vrstvy pletené tkaniny s rozprostřenými vlákny ve vazbě plátno o plošné hustotě 80 g/m^2 a jedné vrstvy pletené tkaniny ve vazbě kepr o plošné hustotě 200 g/m^2 . Přední, tvarová část bočnice má jádro z expandovaného polystyrenu vyřezaného horkým drátem a zadní, zahnutá část má jádro z tvrzené pěny. Vložky, pro umístění šroubů jsou ve formě při laminaci pozicované pomocí kolíků a jsou vyrobené na 3D tiskárně z PETG plastu. Žádná vložka neobsahuje závit, tudíž se tento materiál osvědčil jako vhodný. Tělo bočnice se laminuje v jednom kuse a aby bylo dosaženo lesklého povrchu na všech částech, používá se separační, neperforovaná fólie. Následně se horizontální zahnutá deska lepí k tělu bočnice pomocí papírové šablony a vírový tunel se na bočnici lepí podle vybroušeného prostoru, který se vyrábí pomocí brousící šablony.



Obr. 28: Vnitřní skladba vnější bočnice vozu FS.13

10.6 Technologické, konstrukční a provozní nedostatky

Takto vyrobené přední přítlačné křídlo má nedostatky a problémy, na které se ve své práci snažím poukázat a při konstrukci nového přítlačného křídla najít jejich řešení. Kompozitní jádro hlavního profilu způsobuje deformaci potahu, jelikož části profilu nejsou jádrem fixované. Při rázovém namáhání křídla, ať už při jízdě nebo při nedbalosti dochází k delaminaci jádra od potahu. Lepidlo není mezi jádrem a potahem rovnoměrně rozložené. V porovnání s jinými druhy je kompozitní jádro příliš těžké a drahé na výrobu, jelikož je potřeba laminační formy.



Obr. 29: Deformace potahu hlavního profilu vozu FS.13

Při lepení přetlakového potahu bez podpory formy dochází k jeho nepřesnému napozicování u náběžné a odtokové hrany, což je potřeba následně opravit pomocí broušení a vyplňování spár lepidlem. Odtoková hrana hlavního profilu nemá ořezovou hranu, takže přesné zabroušení je obtížné.



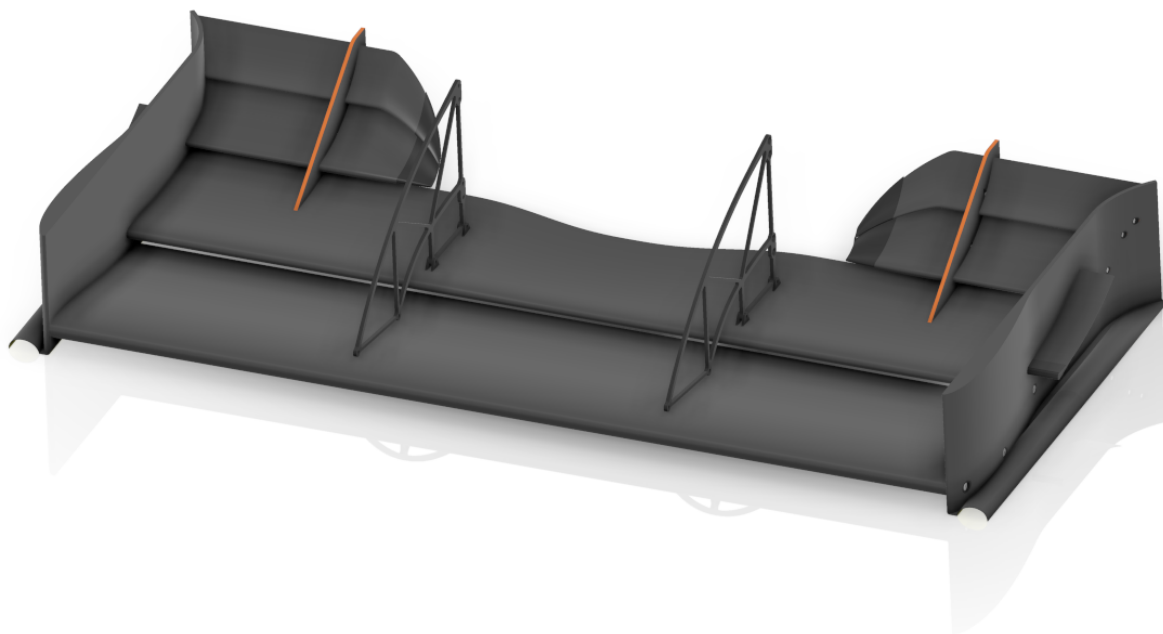
Obr. 30: Opravená náběžná hrana hlavního profilu vozu FS.13

Vnější i vnitřní klapky mají špatnou podporu od jádra. Při zatížení potahu mimo umístění jádra dochází k velké deformaci. Při jízdě může rozdíl tlaku na klapce deformovat tvar a ovlivňovat výkonnost křídla. Kvůli absenci přípravku pro pozicování žeber mají klapky velké šířkové odchylky a jejich montáž do sestavy je obtížná a nepřesná. Zároveň dochází ke křivému nalepení žeber, což vytváří mezery mezi klapkami a bočnicemi. Přetlakové potahy se lepí ke zbytku klapky bez forem a pro vytvoření tlaku v místech spoju se využívá závaží a upínek. Tím dochází k nepřesnému napozicování potahu a jeho deformaci. Náběžná hrana je nepřesná, je potřeba ji vyplnit a brousit do požadovaného tvaru. Klapky nemají dané ořezové hrany, takže přesné zabroušení je obtížné. Vnitřní klapka má malé množství kontaktních bodů s vnitřní bočnicí, takže dochází k jejímu odlehnutí od bočnice u odtokové hrany.

Nejnižší bod vnější bočnice je málo chráněný proti otěru a v průběhu sezóny docházelo k probroušení bočnice, kterou bylo potřeba často opravovat. Vybroušená díra pro umístění vírového tunelu je nepřesná a pozice tunelu neodpovídala návrhu. Hrubý povrch horizontální zahnuté desky není z aerodynamického hlediska optimální.

11 Návrh a zhotovení nové konstrukce předního křídla

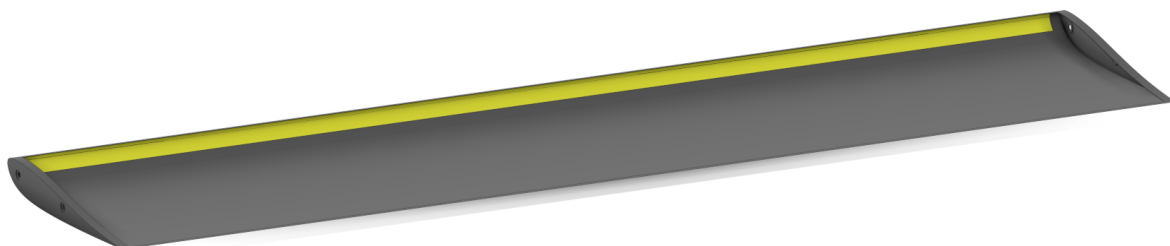
Přední přitlačné křídlo vozu FS.14 je nové koncepce. Místo jednoho hlavního profilu disponuje dvěma, jejich konstrukce je identická, ale tvar odlišný. Vnitřní kaskáda se skládá ze dvou klapek. Důvodem změny je zvýšení efektivity křídla ve všech jízdních stavech, snížení rizika odtržení a snížení odporu. Křídlo se k šasi upevňuje pomocí držáků, které jsou uchycené k hlavním profilům. I u tohoto konceptu hlavní profily generují největší množství přitlačné síly. Vnější klapky kaskády jsou přidělané k hlavním profilům skrze vnitřní bočnici, která je přilepena k druhému hlavnímu profilu a vnější bočnici, přes kterou jsou profily přišroubované. Vnitřní kaskáda je uchycena pouze k vnitřní bočnici. I přes komplikovanější a rozměrnější tvar nového křídla je hmotnost 3250 gramů, což je o 20 gramů méně, než u křídla vozu FS.13. Křídlo splňuje všechny pravidla soutěže Formula Student.



Obr. 31: Model předního přitlačného křídla vozu FS.14

11.1 Hlavní profily

Hlavní profily se skládají z podtlakového a přetlakového potahu, se skladbou z jedné vrstvy pletené tkaniny s rozprostřenými vlákny ve vazbě plátno o plošné hustotě 80 g/m^2 a jedné vrstvy pletené tkaniny ve vazbě kepr o plošné hustotě 200 g/m^2 . Do náběžné hrany prvního hlavního profilu je zalaminována jedna vrstva aramidové tkaniny o plošné hustotě 160 g/m^2 , vazby plátno.



Obr. 32: Model podtlakového potahu hlavního profilu vozu FS.14

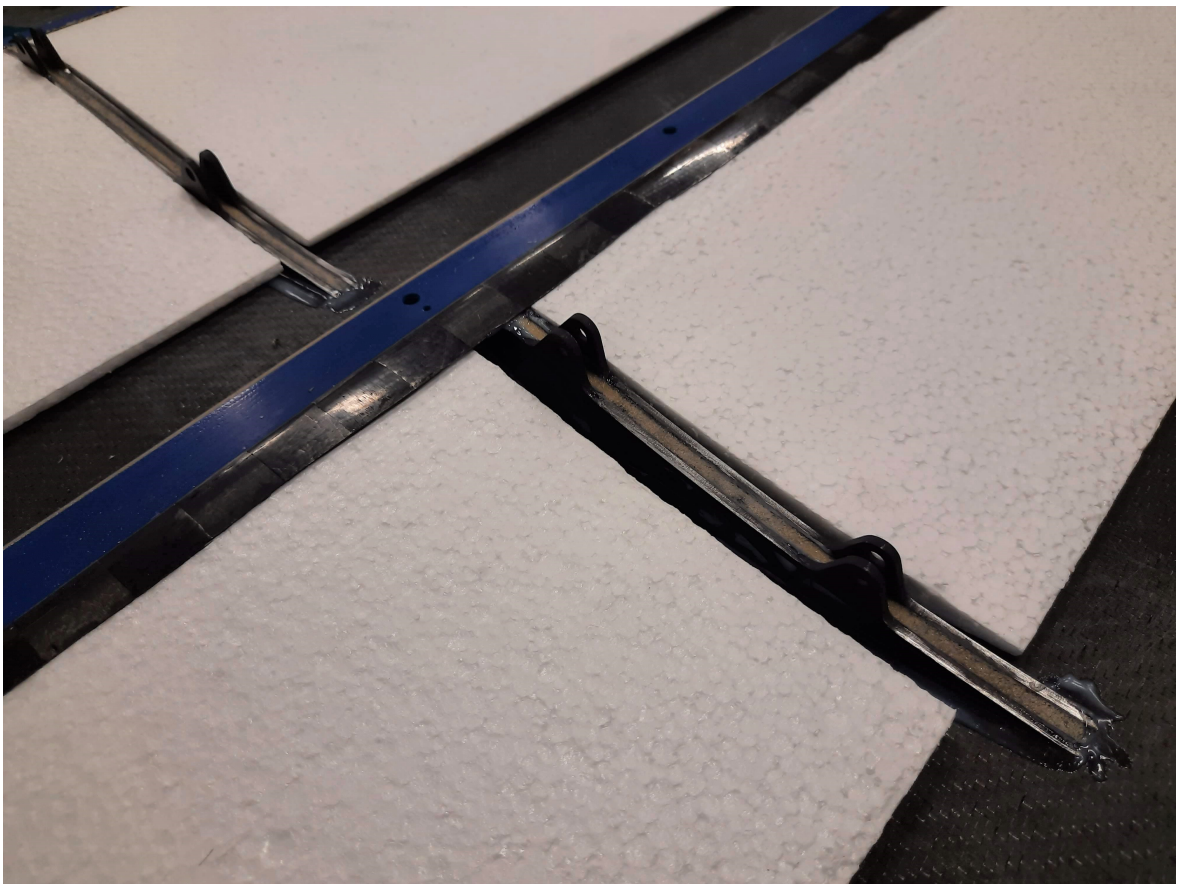
Vzhledem ke zmiňovaným problémům s kompozitními jádry používám u nového křídla jádra z expandovaného polystyrenu o hustotě 20 g/m^3 . Jádro se vyřezává do tvaru křídla pomocí horkého drátu a následně je k potahům lepeno epoxidovým vypěňovacím systémem, který při tuhnutí nabyde na svém objemu a vytvoří tvrdou bariéru mezi potahem a polystyrenem. Tento typ jádra je levnější, lehčí, vytváří podporu v celé ploše potahu a jeho výroba je jednoduchá a rychlá. Pro křídlo vozu FS.13 je hmotnost kompozitního vlnovce pro vnější část křídla 159 gramů a hmotnost expandovaného polystyrenu, pro stejný úsek křídla 109 gramů.



Obr. 33: Vzorek epoxidového vypěňovacího systému

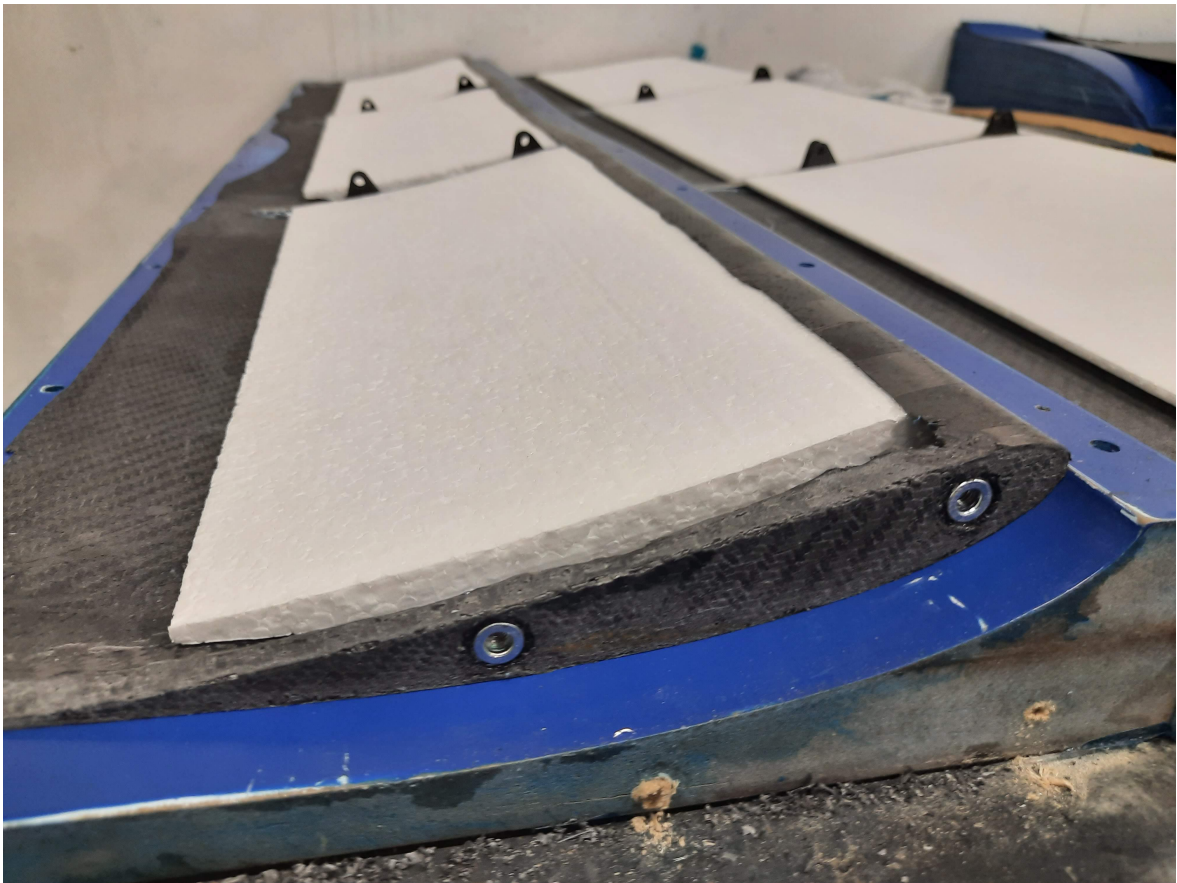
Boční žebra, přes která se přidělvává vnější bočnice jsou nahrazena vylaminovanými bočními částmi, které jsou součástí podtlakového potahu, spolu s náběžnou hranou. Skládají se ze čtyř vrstev pletené tkaniny ve vazbě kepr o plošné hustotě 200 g/m^2 a obsahují nýtovací matice, pomocí kterých se upevňuje bočnice. Výhodou této varianty je vyšší tuhost spodního potahu, jelikož je kompozit tvarově složitější. Odstranění procesu lepení vnějších žeber zrychlí výrobu profilu, sníží počet potřebných přípravků a sníží hmotnost, jelikož vylaminové bočnice jsou lehčí, než bočnice sendvičové. Není potřeba lepidla a tvrzené pěny.

Křídlo se k držákům a následně šasí přidělvává pomocí prostředních montážních žeber, která se vyskytují na obou hlavních profilech. Je to sendvičová struktura, která je podobná verzi na voze FS.13. Je složena ze slitiny hliníku, uhlíku a tvrzené pěny. Mezi žebra ze slitiny hliníku EN AW 7075 je vlepený sendvič skládající se z 4mm tvrzené pěny, která je z obou stran podpořena dvěma vrstvami pletené tkaniny ve vazbě kepr o plošné hustotě 200 g/m^2 .



Obr. 34: Detail vlepených montážních žeber do potahu

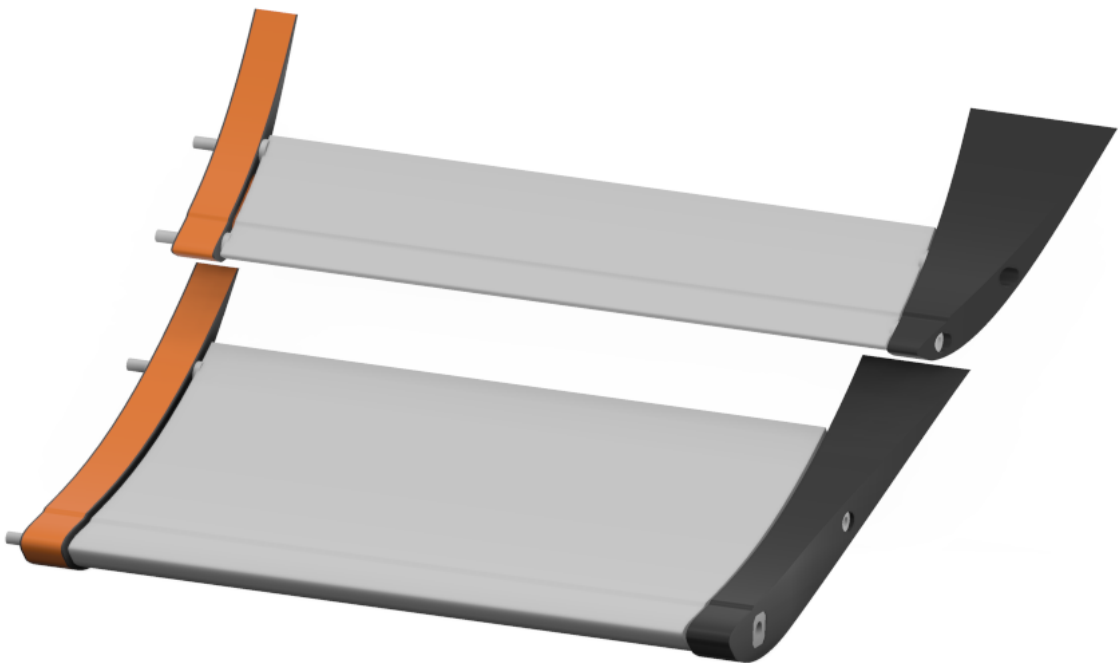
Kompletování hlavních profilů začíná umístěním potahů do svých forem, bez formy na náběžnou hranu a božních forem. Přesná pozice potahů je definována pomocí vylaminovaných prohlubní za odtokovou hranou. Do podtlakového potahu se následně přilepí montážní žebra, která jsou pozicována od vnějších boků pomocí přípravku. Expandovaný polystyren se natře vrstvou epoxidového vypěňovacího systému a umístí se do podtlakového potahu. Na boky, žebra, náběžnou a odtokovou hranu se aplikuje lepidlo a následně se formy spojí, čímž dojde ke kontaktu všech částí potahů. Formy je potřeba i sešroubovat, jelikož vypěňovací systém při zvětšování objemu vytváří tlak, který by mohl formy oddělit. Tento tlak je vhodný, jelikož nám dotlačí všechny části potahu k povrchu formy, což zvýší přesnost křídla. Díky pomalé reakční době epoxidového vypěňovacího systému není na dělníka v průběhu lepení kladen žádný nátlak. Po vytuhnutí všech složek, dojde k rozebrání forem a následnému dokončení křídla broušením. Je potřeba zabrousit odtokovou hranu podle ořezové drážky a dobrousit přesah na náběžné hraně.



Obr. 35: Připravená sestava k lepení přetlakového potahu

11.2 Vnější klapky

Obě klapky vnější kaskády se vyrábějí indenticky. Potahy se laminují stejným způsobem jako u hlavního profilu. Skladba potahů je totožná, bez aramidové tkaniny. Jako jádro opět používám expandovaný polystyren s epoxidovým vypěňovacím systémem. Vnější, tvarové žebro je 3D tištěné z PETG plastu a obsahuje vložky ze slitiny hliníku pro uchycení klapky k vnější bočnici a vnitřní žebro je vyrobené ze sendvičové struktury skládající se ze dvou vrstev pletené tkaniny ve vazbě kepr o plošné hustotě 200 g/m^2 na obou stranách a tvrzené pěny o tloušťce 10mm. Finální tvar je vyřezán pomocí vodního paprsku z odlaminovaného polotovaru. Opět se používají vložky ze slitiny hliníku pro pozicování klapky na vnitřní bočnici. Způsob sestavy klapky je totožný s hlavními profily, pro pozicování žebrování se používá 3D tištěný přípravek.



Obr. 36: Vnitřní skladba vnějších klapky vozu FS.14

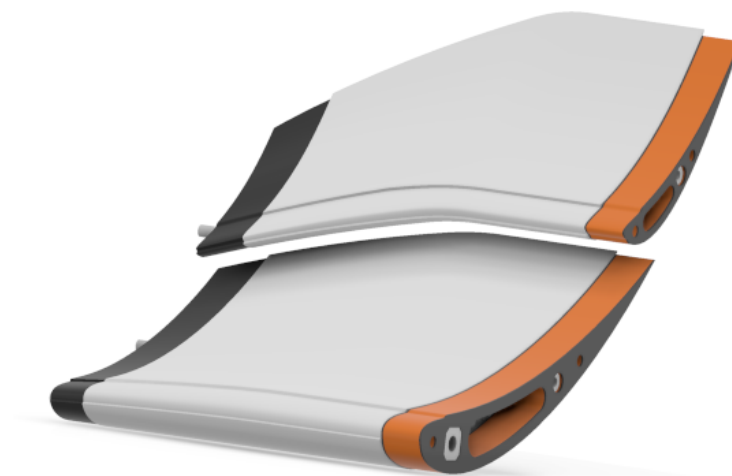
Vyrobené klapky se následně pomocí kolíků usadí do přípravku, který vymeze jejich správnou mezeru a přesdsazení. Klapky se následně slepí dohromady pomocí destičky vyrobené ze čtyř vrstev pletené tkaniny ve vazbě kepr o plošné hustotě 200 g/m^2 . Tento krok zajistí přesnou pozici klappek vůči sobě a zvýší kvalitu přesnosti montáže křídla. Po vytužení lepidla se na druhou klapku v kaskádě nalepí Gurneyho klapka, která je vylaminována ze dvou vrstev pletené tkaniny ve vazbě kepr o plošné hustotě 200 g/m^2 .



Obr. 37: Klapky usazené v pozicovacím přípravku, bez spojovací destičky

11.3 Vnitřní klapky

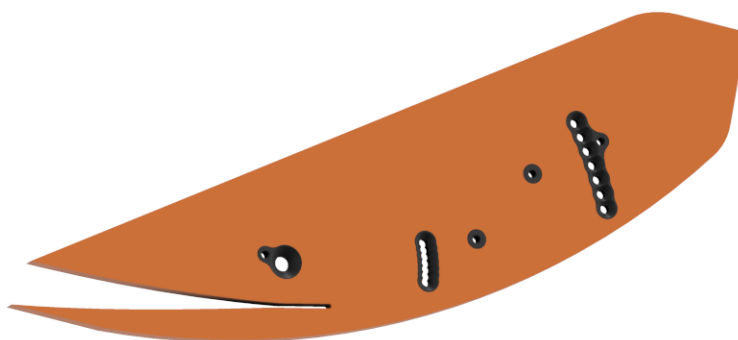
Klapky se skládají z kompozitního těla a plastového konce. Kompozitní tělo se vyrábí a kompletuje stejným způsobem jako u klapek vnějších. Vnitřní žebro je 3D tištěné z materiálu PETG a vnější je vyrobeno ze stejného sendvičového materiálu jako vnitřní žebra u klapek vnějších. K vnitřnímu žebro se přes kolíky pozicuje plastový konec, který je tištěný na 3D tiskárně z materiálu PETG. Obě klapky se usazují do pozicovacího přípravku a spojují se dohromady kompozitní destičku stejným způsobem, jako u vnějších klapek. Plastové konce se k sobě také fixují pomocí menších kompozitních destiček. Vnitřní klapky jsou spojeny se zbytkem přítlačného křídla pouze pomocí vnitřní bočnice.



Obr. 38: Vnitřní skladba vnitřních klapek vozu FS.14

11.4 Vnitřní bočnice

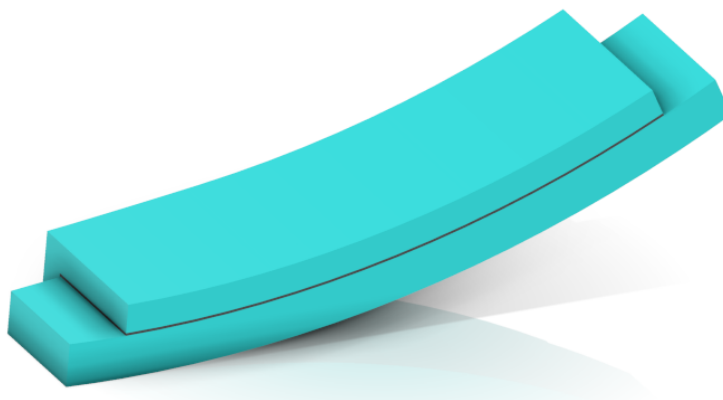
Laminuje se stejným způsobem a ze stejných materiálů jako u vozu FS.13. Tento díl je dostatečně tuhý, lehký a spolehlivý.



Obr. 39: Model vnitřní bočnice bez uhlíkového potahu

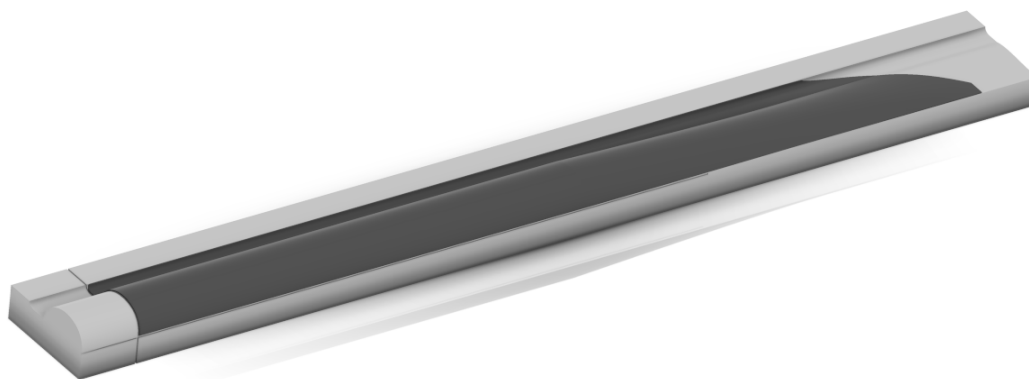
11.5 Vnější bočnice

Skládá se ze stejných třech částí jako vnější bočnice vozu FS.13. Horizontální zahnutá deska se laminuje na 3D tištěné formy. Ty obklopí čtyři vrstvy pletené tkaniny ve vazbě kepr o plošné hustotě 200 g/m^2 z obou stran a při uvedení forem do podtlaku dojde k lisování materiálu a extrakci přebytečné pryskyřice. Hotová deska má lesklý a hladký povrch z obou stran.



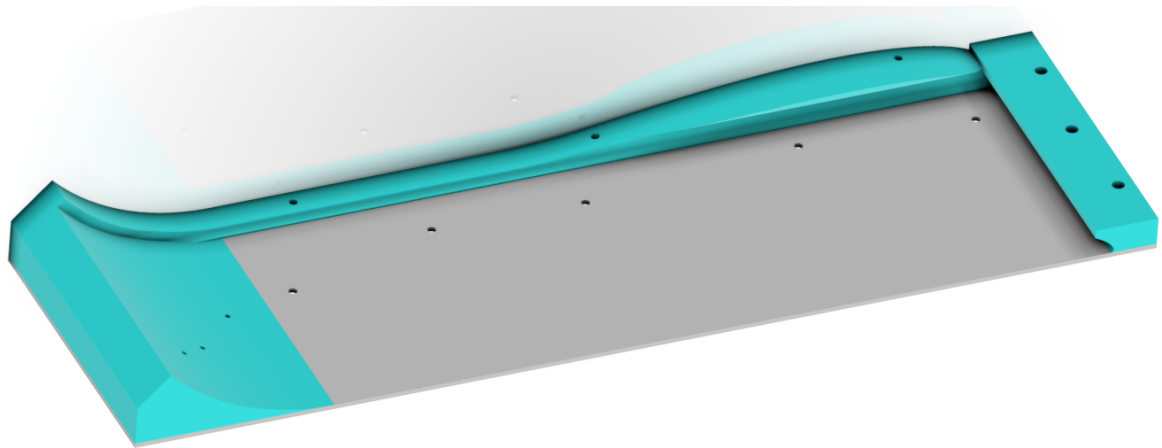
Obr. 40: Sestava forem a lisovaného kompozitu horizontální zahnuté desky vozu FS.14

Vírový tunel se laminuje na 3D tištěné formy, skladba je stejná jako u tunelu vozu FS.13. Do přední hrany se po laminaci umístí a přilepí titanový plech o tloušťce 0,7 mm. Ten slouží jako dodatečná ochrana bočnice proti abrazi od vozovky.



Obr. 41: Sestava formy a modelu vírového tunelu vozu FS.14

Tělo bočnice se opět laminuje stejným způsobem z identických materiálů a skladeb. Forma, která se skládá z kovového plechu, náběžné a odtokové části, je doplněna formou, která tvaruje místo pro lepení vírového tunelu. Tato část obsahuje pouze jednu vrstvu pletené tkaniny ve vazbě kepr o plošné hustotě 200 g/m^2 a eliminuje tak operaci broušení bočnice pro umístění tunelu. Po lamianci všech částí se vírový tunel nalepí do připraveného místa na těle bočnice a podle papírové šablony se na bok bočnice nalepí horizontální zahnutá deska.



Obr. 42: Sestava forem pro laminaci těla vnější bočnice vozu FS.14

11.6 Zhodnocení konstrukčních, technologických a výrobních změn

Hlavní profily lepené ve formách mají přesnější pozice potahů a není potřeba brousit a opravovat náběžnou hranu. Jádro je lehčí a dostatečně tuhé. Epoxidový vypěňovací systém vyplní všechny dutiny a vytvoří tvrdou vrstvu, která odděluje potah od expandovaného polystyrenu. Nedochozí k deformacím a delaminacím potahu.



Obr. 43: Přední přitlačné křídlo vozu FS.14

Mezi montážním žebrem a expandovaným polystyrenem došlo k tvorbě dutiny, způsobené špatnou aplikací vypěňovacího systému. To mělo za následek tvorbu praskliny na přetlakovém potahu. Přední křídlo i s tímto defektem bylo schopné bez problémů dokončit celou závodní sezónu. Při výrobě je potřeba dbát více na inspekci a hledání dutin.



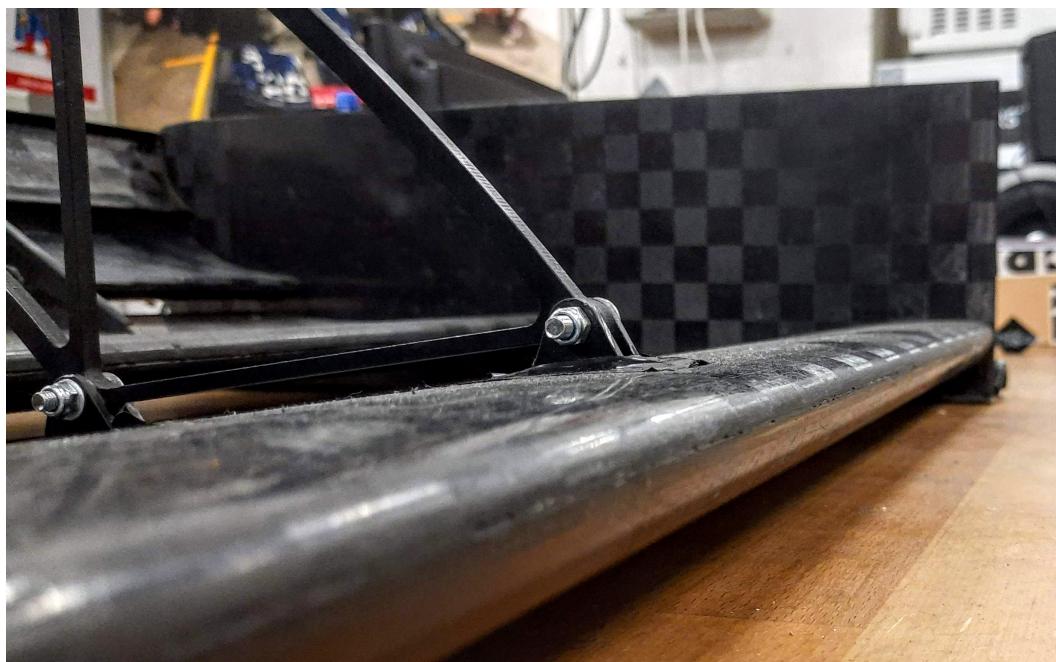
Obr. 44: Prasklina na hlavním profilu

Vylaminované boky profilů s nýtovacími maticemi splňovaly svou funkci bezproblémově celou sezónu. Odtoková hrana je přesně zabroušena, podle ořezové hrany. Díky lepení vnějších i vnitřních klapek ve formách, došlo k výraznému navýšení přesnosti.



Obr. 45: Montáž předního přitlačného křídla na vůz

Náběžná hrana již nemusí být broušena a opravována, stačí zabrousit vylaminovaný přesah.



Obr. 46: Detail náběžné hrany hlavního profilu

Pozice žebek jsou přesnější, než u křídla vozu FS.13, díky použití pozicovacích přípravků. Klapky mají vyšší tuhost vzhledem k použití stejného jádra jako u hlavních profilů, ale zvýšila se jejich hmotnost. Použitím skladby o nižší plošné hustotě by bylo možné tuto negativní vlastnost na příštím voze odstranit.



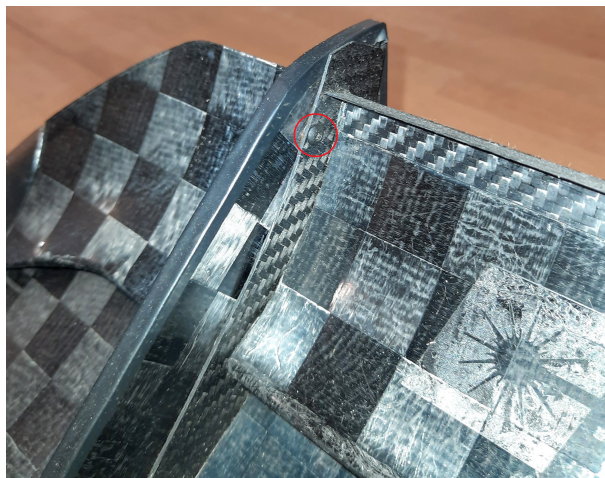
Obr. 47: Detail kontaktu klapek a vnější bočnice

Spojení klapek v přípravcích odstranilo problémy s konstantní mezerou a předsazením, které byly přítomné na předchozím voze. Spojovací desky přidávají přednímu křídlu hmotnost. Při konstrukci přitlačného křídla na další sezónu lze snížit plošnou hustotu skladby, jelikož desky jsou zbytečně moc tuhé.



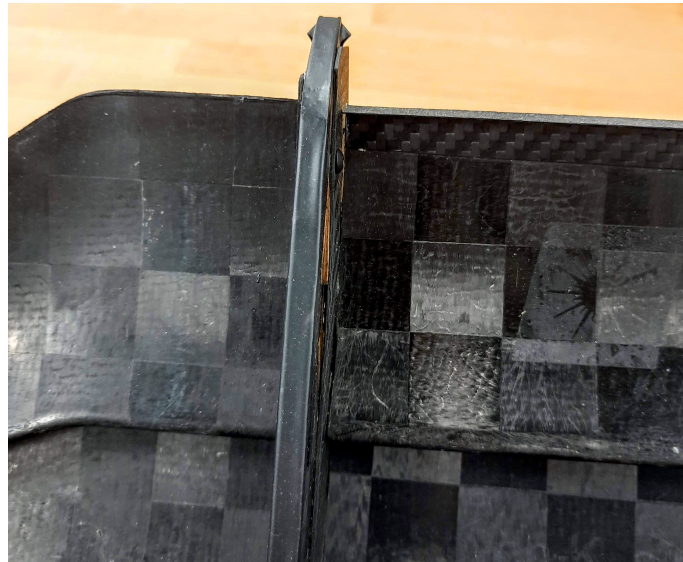
Obr. 48: Detail spojovací desky v kontaktu s vnitřní bočnicí

Odstranění dodatečného uchycení vnitřních klapek bylo chybné rozhodnutí. I přes tři dobře umístěné montážní body na vnitřní bočnici dochází k vysokým oscilacím klapek za jízdy a nekonstantní mezeře a předsazení vůči hlavnímu profilu. Vnější klapky jsou šroubované pouze k vnější bočnici. Ve vnitřní bočnici jsou vsazené pouze kolíky, pro zajištění správné pozice. Absence tlaku mezi vnitřní bočnicí a klapkami vytváří mezi součástmi mezery. V průběhu sezóny jsem tuto část modifikoval přidáním šroubového spoje mezi klapkami a bočnicí.



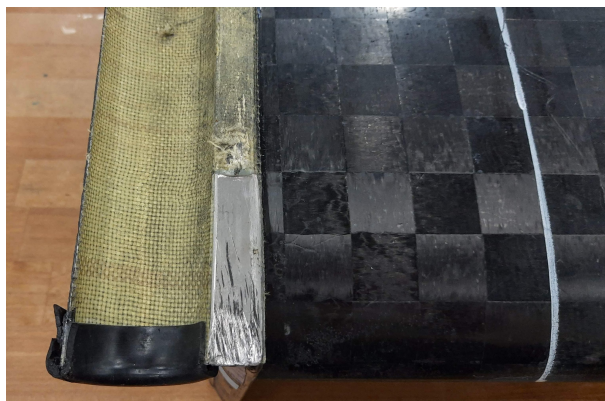
Obr. 49: Dodatečný montážní bod

Vnitřní bočnice je při lepení k hlavnímu profilu pozicována pouze přes vnější klapky. To se ukázalo jako nedostatečné řešení, jelikož došlo k nepřesnému napozicování a následným komplikacím při montáži klapky. Při zhotovení předního křídla pro další vůz je potřeba vytvořit lepicí přípravek, který vnitřní bočnici ustaví do správné pozice. Absence aramidové tkaniny v náběžné hraně vnější bočnice způsobila prasknutí potahu při kontaktu s kůželkou. Do další sezóny je potřeba tuto skladbu upravit a dodat do náběžné hrany aramidovou tkaninu.



Obr. 50: Mezera mezi vnější klapkou a vnitřní bočnicí

Titanový plech na přední hraně vírového tunelu ochránil bočnici před abrazí, i přes časté kontakty předního křídla s vozovkou, v průběhu celé sezóny. Vnější část vírového tunelu byla i přes tuto dodatečnou ochranu lehce ponížena, z důvodu její větší vzdálenosti od středu vozidla. Možným řešením tohoto problému by mohlo být vybavit i tuto hranu titanovou výztuhou.



Obr. 51: Detail opotřebení titanového plechu

Materiál 3D tištěných konců vnitřních klapek je křehký a v průběhu sezóny došlo k poničení odtokových hran při kontaktu s kamením. Při výrobě následujícího vozu bude vhodné použít houževnatý materiál.



Obr. 52: Detail poničené odtokové hrany

12 Závěr

Cílem této práce bylo vytvořit rešerši ke zpracování kompozitních materiálů, zhodnotit zdravotní rizika při výrobě kompozitních součástek a navrhnout bezpečnostní postupy. Součástí práce je analýza konstrukce předního přítláčného křídla, návrh nové konstrukce, její následná výroba a zhodnocení.

Pro zjištění přesných tloušťek používaných kompozitních skladeb jsem vytvořil 13 vzorků. Tyto vzorky se lišily materiálem, počtem vrstev a technologií zpracování. Z výsledků vyplývá linearita ve změně tloušťky. Zjistil jsem, že každá další vrstva pletené tkaniny ve vazbě kepr o plošné hustotě 200 g/m^2 přidá kompozitu 0,2 mm na tloušťce a pletená tkanina s rozprostřenými vlákny ve vazbě plátno o plošné hustotě 80 g/m^2 přidá přibližně 0,08 mm. Zajímavé je také porovnání se vzorky z autoklávu, které mají menší hustotu, což je nejspíše spojené se změnou tvaru povrchu na straně strhávací tkaniny. Dále jsem ve své práci zkoumal vhodné materiály pro tvorbu jader a zabýval se konstrukčními úpravami forem, pro snažší laminaci a kompletaci dílů.

Na základě získané praxe a rešerše jsem vypsál možné zdravotní rizika při zpracování kompozitních materiálů. Detailněji jsem se zabýval následky spojenými s nadměrnou inhalací kompozitních materiálů. Pro všechny procesy spojené se zpracováním kompozitních materiálů jsem navrhl vhodné bezpečnostní pomůcky.

Výrobou a testováním původní konstrukce předního přítláčného křídla jsem analyzoval výrobní, tuhostní, finanční a rozměrové nedostatky provedení. Na základě těchto vstupů jsem navrhl upravenou konstrukci, která odstraňuje všechny chyby. Nové přední přítláčné křídlo používá levnější jádra, které zároveň vylepšují tuhost profilů. Implementuji konstrukčně upravené formy, jež urychlují výrobu a zvyšují přesnost výrobku. Výrazně navyšují i počet přípravků, které pomáhají se správným pozicováním dílů při lepení, upravuji pracovní postup montáže. S novou konstrukcí se ovšem objevilo i několik nových komplikací, které jsem popsal v poslední kapitole práce. I přes zvýšení komplexnosti křídla způsobené novým aerodynamickým tvarem, je hmotnost křídla vozu FS.14 pouze 3250 gramů, což je o 20 gramů méně, než předchozí verze. Křídlo zároveň splňuje všechny pravidla soutěže Formula Student a v průběhu sezóny bylo extenzivně testováno, bez jakéhokoliv selhání.

Seznam použité literatury a zdrojů

- [1] Formula Student Rules 2022. *Formula Student Germany*. [online]. 2022 [cit. 2022-03-11]. URL: www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2022/rules/FS-Rules_2022_v1.0.pdf.
- [2] SEWARD Derek. *Race Car Design*. London: PALGRAVE, 2014. ISBN: 978-1-137-03014-6.
- [3] KATZ Joseph. *Race Car Aerodynamics: Designing for Speed*. Revised 2nd edition. Cambridge: Bentley Publishers, 2006. ISBN: 978-1-137-03014-6.
- [4] 6082 - T6 T651 Plate. *Aalco Metals*. [online]. Wednesbury: Aalco Metals, c2022 [cit. 2022-04-02]. URL: www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy_6082-T6-T651_148.ashx.
- [5] Tenax IMS65 E23 24K. *Composite Oracle*. [online]. Handewitt: Composite Oracle, c2022 [cit. 2022-04-02]. URL: www.composite-oracle.com/fibers.asp?ID=243&fibertype=&sponsors.
- [6] How carbon fibre is made. *PFH Private University of Applied Sciences*. [online]. Göttingen: PFH Private Hochschule, c2022 [cit. 2022-04-13]. URL: www.pfh-university.com/blog/how-carbon-fibre-made.
- [7] Particle Pollution. *American Lung Association*. [online]. Chicago: American Lung Association, 2022 [cit. 2022-04-26]. URL: www.lung.org/clean-air/outdoors/what-makes-air-unhealthy/particle-pollution.
- [8] LOCTITE FREKOTE 770-NC. *Henkel*. [online]. 2019 [cit. 2022-04-26]. URL: <https://webaps.ellsworth.com/edl/Actions/GetLibraryFile.aspx?document=12789&language=en>.
- [9] MARTIN Thomas R, MEYER Stephen W, and LUCHTEL Daniel R. *An evaluation of the toxicity of carbon fiber composites for lung cells in vitro and in vivo*. *Environmental research*, 1989, 49.2: 246-261.
- [10] Quartz dust – a silent and overlooked hazard. *Safety and Health Practitioner*. [online]. London: Safety and Health Practitioner, 2015 [cit. 2022-04-28]. URL: www.shponline.co.uk/workplace-illness/quartz-dust-silent-overlooked-hazard/.
- [11] ČSN EN 166. *Osobní prostředky k ochraně očí - Základní ustanovení*. Praha: Český normalizační institut, 2002.
- [12] The meaning of FFP protection classes. *Uvex*. [online]. Farnham: Uvex, c2022 [cit. 2022-05-03]. URL: www.uvex-safety.co.uk/en/meaning-of-ffp-protection-classes/.
- [13] Revealed: How McLaren is pioneering the use of sustainable composites in F1. *McLaren Racing*. [online]. Woking: McLaren Technology Centre, 2020 [cit. 2022-05-03]. URL: www.mclaren.com/news/revealed-how-mclaren-is-pioneering-the-use-of-sustainable-composites-in-f1.

- 2022-05-06]. URL: www.mclaren.com/racing/sustainability/natural-fibre-sustainable-composite-racing-seat/.
- [14] How is Carbon Fiber Made? *Zoltek*. [online]. Bridgeton: Zoltek, c2022 [cit. 2022-05-07]. URL: www.zoltek.com/carbon-fiber/how-is-carbon-fiber-made/.
- [15] Carbon fiber properties. *Gernitex*. [online]. Gernitex, c2022 [cit. 2022-05-09]. URL: www.gernitex.com/resources/carbon-fiber-properties/.
- [16] E-Glass and S-Glass. *JPS Composite Materials*. [online]. Anderson: JPS Composite Materials, c2021 [cit. 2022-05-09]. URL: www.jpscm.com/products/e-glass-s-glass/.
- [17] Recent Development of Flax Fibres and Their Reinforced Composites Based on Different Polymeric Matrices. *National Library of Medicine*. [online]. 2013 [cit. 2022-05-09]. URL: www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5452774/.

Seznam obrázků a tabulek

Seznam obrázků

Obrázek 1	Aerodynamický balíček vozu FS.14	9
Obrázek 2	FS.14	12
Obrázek 3	Aerodynamické obálky vozu Formula Student [1]	13
Obrázek 4	Separace proudění od podtlakové strany povrchu klapky	15
Obrázek 5	Mokrý laminace	17
Obrázek 6	Infuzní sycení	18
Obrázek 7	Laminace předsycenou tkaninou	19
Obrázek 8	Schéma vazeb	26
Obrázek 9	Vzorky připravené na laminaci	27
Obrázek 10	Porovnání textur strhávací tkaniny	29
Obrázek 11	Křídlo s jádrem z tvrzené pěny	30
Obrázek 12	Měření ideálního úhlu lití	33
Obrázek 13	Kompozitní výplň předního křídla vozu FS.13	34
Obrázek 14	Sestava podtlakové, náběžné a bočních forem	35
Obrázek 15	Řez sestavou lepení křídla	36
Obrázek 16	Odsazení náběžné formy od podtlakové	37
Obrázek 17	Podtlaková forma se zvýrazněnou ořezovou hranou	38
Obrázek 18	Boční forma	39
Obrázek 19	MDF formy nasycené pryskyřicí	40
Obrázek 20	Rozměrová přesnost 3D tištěné formy	41
Obrázek 21	Forma s probroušenou barvou	43
Obrázek 22	Model předního přitlačného křídla vozu FS.13	44
Obrázek 23	Vnitřní skladba hlavního profilu vozu FS.13	45
Obrázek 24	Vnitřní skladba vnějších klapky vozu FS.13	46
Obrázek 25	Vnitřní skladba vnitřní klapky vozu FS.13	47
Obrázek 26	Horizontální zahnutá deska vozu FS.13	48
Obrázek 27	Vírový tunel vozu FS.13	48
Obrázek 28	Vnitřní skladba vnější bočnice vozu FS.13	49
Obrázek 29	Deformace potahu hlavního profilu vozu FS.13	50
Obrázek 30	Opravená náběžná hrana hlavního profilu vozu FS.13	51
Obrázek 31	Model předního přitlačného křídla vozu FS.14	52
Obrázek 32	Model podtlakového potahu hlavního profilu vozu FS.14	53
Obrázek 33	Vzorek epoxidového vypěňovacího systému	53
Obrázek 34	Detail vlepených montážních žeber do potahu	54
Obrázek 35	Připravená sestava k lepení přetlakového potahu	55

Obrázek 36	Vnitřní skladba vnějších klapků vozu FS.14	56
Obrázek 37	Klapky usazené v pozicovacím přípravku, bez spojovací destičky . . .	57
Obrázek 38	Vnitřní skladba vnitřních klapků vozu FS.14	58
Obrázek 39	Model vnitřní bočnice bez uhlíkového potahu	58
Obrázek 40	Sestava forem a lisovaného kompozitu horizontální zahnuté desky vozu FS.14	59
Obrázek 41	Sestava formy a modelu vírového tunelu vozu FS.14	59
Obrázek 42	Sestava forem pro laminaci těla vnější bočnice vozu FS.14	60
Obrázek 43	Přední přitlačné křídlo vozu FS.14	61
Obrázek 44	Prasklina na hlavním profilu	61
Obrázek 45	Montáž předního přitlačného křídla na vůz	62
Obrázek 46	Detail náběžné hrany hlavního profilu	62
Obrázek 47	Detail kontaktu klapků a vnější bočnice	63
Obrázek 48	Detail spojovací desky v kontaktu s vnitřní bočnicí	64
Obrázek 49	Dodatečný montážní bod	64
Obrázek 50	Mezera mezi vnější klapkou a vnitřní bočnicí	65
Obrázek 51	Detail opotřebení titanového plechu	65
Obrázek 52	Detail poničené odtokové hrany	66

Seznam tabulek

Tabulka 1	Porovnání technologií zpracování kompozitních materiálů	20
Tabulka 2	Porovnání mechanických vlastností materiálů	25
Tabulka 3	Porovnání skladeb kompozitních materiálů	28

Seznam použitého SW

- Texmaker
- MiKTeX (L^AT_EX)
- Catia V5
- Catia 3DExperience
- Simcenter Star - CCM+