



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav konstruování a částí strojů

**Návrh a úprava konstrukce forem pro výrobu
monocoque vozu FS.11**

**Design and modification of the design of molds
for monocoque production of formula FS.11**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2019

Jiří ZELENÝ

Studijní program: B2341 Strojírenství

Studijní obor: 3901R051 Konstruování podporované počítačem

Vedoucí práce: Ing. Bryksí Stunová Barbora Ph.D

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Zelený** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **461822**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav konstruování a částí strojů**
Studijní program: **Strojírenství**
Studijní obor: **Konstruování podporované počítačem**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh a úprava konstrukce forem pro výrobu monocoque vozu FS.11

Název bakalářské práce anglicky:

Design and modification of the design of molds for monocoque production of formula FS.11

Pokyny pro vypracování:

- 1) Soutěž Formula Student a její pravidla
- 2) Formy pro výrobu kompozitů - druhy, materiály, technologie výroby
- 3) Historie vývoje forem pro monocoque CTU CarTech
- 4) Návrh a úprava konstrukce forem pro monocoque
- 5) Výroba forem
- 6) Zhodnocení práce

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

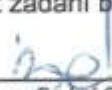
Ing. Barbora Bryksí Stunová, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS


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


Datum zadání bakalářské práce: **03.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **10.06.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **12.12.2019**


Ing. Barbora Bryksí Stunová, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


Ing. František Lopot, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
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.

30.4.2019

Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Návrh a úprava konstrukce forem pro výrobu monocoque vozu FS.11“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu zdrojů, jenž tvoří poslední kapitolu této práce.

V Praze dne 31. 7. 2019

Jiří Zelený

Poděkování:

Rád bych poděkoval Ing. Barboře Bryksí Stunové, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce, konzultace, jakož i cenné odborné rady při jejím zpracování. Dík patří též členům týmu CTU CarTech a zaměstnancům LA Composite.

Anotační záznam

Jméno autora: Jiří Zelený

Název bakalářské práce: Návrh a úprava konstrukce forem pro výrobu monocoque vozu FS.11

Název bakalářské práce
v anglickém jazyce: Design and modification of the design of molds for monocoque production of formula FS.11

Akademický rok: 2019

Studijní Program: B2341 Strojrenství

Ústav: 12 113 – Ústav konstruování a části strojů

Studijní obor: 3901R051 Konstruování podporované počítačem

Vedoucí práce: Ing. Bryksí Stunová Barbora Ph.D.

Rozsah práce: počet stran 60
počet obrázků 47
počet tabulek 1

Klíčová slova: Formy, Formula student, Kompozity, Monocoque

Key words: Molds, Formula Student, Composites, Monocoque

Abstrakt:

Cílem této bakalářské práce byl konstrukční návrh a výroba forem pro monocoque vozu FS.11 týmu CTU CarTech. Práce popisuje předchozí konstrukční řešení kompozitových forem pro monocoque v týmu CTU CarTech. Řeší konstrukční, materiálový a technologický návrh jak pro výrobu maket, tak vlastních forem. Po vyrobení forem pomocí kontaktní laminace z uhlíkové a skelné tkaniny a epoxidové pryskyřice byly vyhodnoceny a opraveny výrobní vady. Do opravených forem byl následně vylaminován monocoque, který byl použit při stavbě již soutěžícího vozu FS.11.

Abstract:

The aim of this thesis was to design and manufacture molds for the FS.11 team CTU CarTech vehicle monocoque. The thesis describes the previous design solution of composite molds for the monocoque of the CTU CarTech team. It's main focus is the constructional, material and technological design for production of both the scale model and the press molds. After the molding process, done by contact lamination of carbon, glass fiber and epoxy resin, all the manufacturing defects were fixed or cleaned off. These repaired molds, were later used to laminate the monocoque, which was to be used during the construction of the already competing vehicle FS.11.

Obsah

1. Úvod	8
1.1. Cíle práce	8
2. Formula Student	9
2.1. Formula Student historie	9
2.2. Pravidla Formula Student	10
2.3. CTU CarTech	13
3. Druhy forem pro kompozitní díly a jejich výroba	13
3.1. Rozdělení podle typu konstrukce na negativní a pozitivní formy	14
3.1.1. Negativní formy	14
3.1.2. Pozitivní formy – makety	14
3.2. Rozdělení forem podle materiálu	15
3.2.1. Kovové	15
3.2.2. Kompozitové	16
3.3. Ostatní	19
4. Kompozity	21
4.1. Výztuže	21
4.1.1. Typy produktů z vláken	21
4.1.2. Vláknové kompozity	22
4.2. Polymerní matrice	23
4.2.1. Termoplasty	23
4.2.2. Termosety	23
4.3. Doba zpracovatelnosti	23
4.4. Životnost	24
4.5. Doba gelovatění	24
4.6. Gelcoat	24
4.7. Plniče pórů	24
4.8. Separátory	24
5. Historie vývoje forem pro monocoque CTU CarTech	25
5.1. První generace forem na monocoque vozu FS.05 a FS.06	25
5.2. Druhá generace formy na monocoque vozu FS.07 a FS.08	28
5.3. Třetí generace formy na monocoque vozu FS.09 a FS.10	29
5.4. Čtvrtá generace forem na monocoque vozu FS.11	30
6. Návrh konstrukčního řešení forem na monocoque FS.11	31

6.1.	Návrh dílu	31
6.2.	Návrh forem - makety	32
6.3	Návrh negativních forem	34
7.	Výroba negativních forem	37
7.1.	Návrh technologie výroby forem.....	37
7.2.	Výroba forem.....	41
7.3.	Vady forem.....	50
8.	Závěr.....	56
9.	Použitá literatura	57
10.	Seznam obrázků	59

1. Úvod

Formula Student je studentská konstrukční soutěž, která má hlavní myšlenku připravit studenty na svou budoucí inženýrskou konstruktérskou praxi. V rámci soutěže mezi sebou soutěží studentské týmy, které navrhují a staví závodní formulový vůz. Vůz je stavěn tak, aby jeho výrobní cena byla co nejnižší, byl konstrukčně vyspělý, snadno opravitelný a s co nejlepšími jízdními vlastnostmi na technických tratích. Řeší se i sériová výroba tisíce kusů a marketingová strategie fiktivní společnosti. Tyto studentské týmy se každoročně setkávají na závodech a mají možnost mezi sebou porovnat znalosti a vyměnit si zkušenosti.

Tuto práci jsem si vybral z více důvodů. Hlavním motivem je, že jsem členem týmu CTU CarTech a pracuji ve skupině chassis, do které spadá právě návrh forem na monocoque. V tomto roce je laminován našim týmem nový monocoque. Výběr této práce pramenil také z toho, že jsme potřebovali nahradit stávající formy pro laminaci nového monocoque. V týmu CTU CarTech se zabývám kompozitními materiály a na každý nově navržený kompozitní díl musí být i nově navržené formy.

Na základě předchozích technologických řešení forem na monocoque bylo rozhodnuto použít technologii kontaktní laminace se závěrečnou temperací na potřebnou hodnotu T_g . Celá tato technologie byla volena s ohledem na technologii autoklávu, která bude použita pro výsledný produkt laminovaný ve formě. Hlavním přínosem práce má být nová konstrukční koncepce forem.

1.1. Cíle práce

Předmětem bakalářské práce je navrhnout formy na monocoque vozu FS.11 pro tým Formula Student. Představit soutěž Formula Student a její pravidla. Zmapovat formy pro výrobu kompozitů, jejich druhy, materiály a technologie výroby. Uvést historii vývoje forem na monocoque týmu CTU CarTech. Navržené formy vyrobit. Cílem celé práce je shrnutí poznatků a zvolených pracovních postupů pro další návrh a výrobu uhlíkových forem. Správně by měly být formy navrženy a vyrobeny tak, aby se do nich dalo laminovat a vyrobit v nich monocoque opakovaně.

2. Formula Student

2.1. Formula Student historie

Formula student/SAE je mezinárodní celosvětová studentská soutěž, kterou organizuje InSTITUTE Strojních Inženýrů (Institution of Mechanical Engineers – ImechE) společně se Společností Automobilových Inženýrů (Society of Automotive Engineers). Má začátky v 80. letech dvacátého století, konkrétně v roce 1981 v USA. Do Evropy se dostala o necelých 20 let později a to v roce 1998, kdy se konaly závody ve Veliké Británii. Od té doby se soutěž konala každoročně na konci akademického roku. Od roku 2013 se jeden závod koná i v České republice. Hlavní myšlenkou soutěže je umožnit studentům budoucím inženýrům vyzkoušet si řešení konkrétních problémů a tím propojit teorii s praxí. Soutěže je jedinečná v tom, se neřeší problémy jen z oblasti techniky, ale i marketingu a ekonomiky.



Obr. 1.: Oficiální logo Formula student/SEA [2]

V dnešní době se soutěže Formula Student v kategorii combustion, tedy se pohonem pomocí spalovacího motoru, účastní 620 týmů z celého světa. V kategorii electric, kde pohon zajišťuje elektrický motor, je nyní 170 soutěžních týmů. [1, 5]



Obr. 2.: Týmy na závodu Formula Student Germany rok 2018 [3]

2.2. Pravidla Formula Student

Cílem týmu je navrhnout a vyrobit malý závodní vůz formulového typu podle předem daných pravidel.

Soutěž se koná v těchto kategoriích:

- Vozidla se spalovacím motorem (CV).
- Elektrická vozidla (EV).
- Vozidla bez řidiče (mohou být jak se spalovacím motorem, tak i s elektrickým).

Soutěž začíná řadou technických kontrol, které jsou popsány v pravidlech a vůz je musí všechna splňovat, aby se mohl tým účastnit. Vůz smí být používán pouze po dobu jednoho roku, počítáno od prvního dne prvního závodu soutěže. Každý člen týmu musí být studentem starším 18 let. Na universitě smí být vždy pouze jeden tým z každé kategorie.

Soutěž je rozdělena do statických a dynamických disciplín, které budou zmíněny níže. Každá z disciplín je ohodnocena body, které se po sečtení všech mohou dostat až na hodnotu 1000.

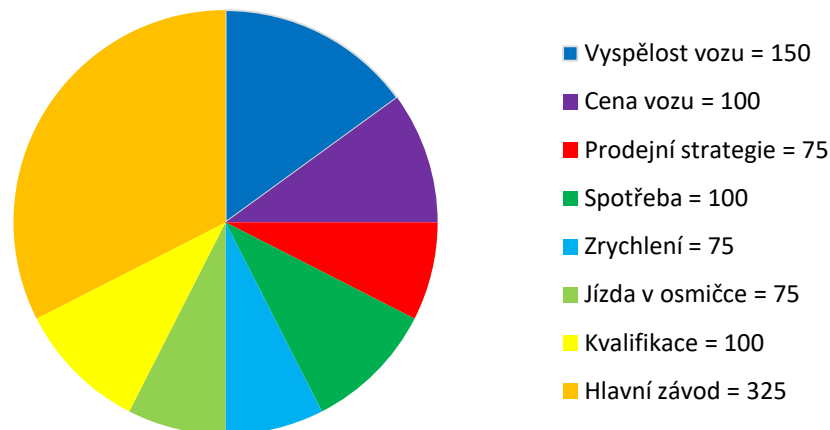
Statické disciplíny:

- Business Plan Presentation (Prodejní strategie).
- Cost and Manufacturing (Cena vozu).
- Engineering Design (Vyspělost vozu).

Dynamické disciplíny:

- Skid Pad (Jízda v osmičce).
- Acceleration (Zrychlení).
- Autocross (Kvalifikace).
- Endurance (Hlavní závod).
- Efficiency (Spotřeba).

Maximální počet udělených bodů



Obr. 3.: Bodové hodnocení disciplín Formula Student

Samotná technická pravidla jsou členěna do několika kapitol. Pravidla v jednotlivých kapitolách jsou vždy věnována danému tématu; jedná se o administrativní předpisy, obecné technické požadavky, požadavky na spalovací motory, elektrická vozidla, vozidla bez řidiče, technické prohlídky, statické disciplíny a dynamické disciplíny. Jde o soubor pravidel, které musí auto splňovat, aby se mohlo zúčastnit závodu. V posledních třech skupinách je následně popsán samotný průběh technické přejímky a závodu.

Pro navrhování jednotlivých součástí vozu jsou nejdůležitější technická pravidla, podle kterých je vytvořený návrh a řídíme se podle nich i při výrobě.

Ta jsou rozdělena do třinácti skupin podle tématu.

T - Obecné technické požadavky

T1 – Definice

Ustanovuje názvosloví základních skupin a jejich částí, jako například: Chassis, Primary structure. Definuje i některé materiály.

T2 – Obecné technické požadavky

Udává základní rozměry auta a jeho jednotlivých částí. Definuje jejich možné umístění na autě.

- T3 – Obecná konstrukce podvozku
Určuje jednotlivá konkrétní místa na podvozku, která musí splňovat rozměrové, tvarové a materiálové požadavky, které jsou striktně vyžadovány.
- T4 – Kokpit
Udává rozměry v kokpitu pro řidiče a určuje virtuálního řidiče, podle kterého se návrh řídí. Zabývá se také ochranou řidiče a bezpečnostními prvky.
- T5 – Zádržný systém řidiče
Definuje systém držení řidiče pásy, jejich umístění a materiály, které jsou přípustné.
- T6 – Brzdový systém
Popisuje veškerý systém, který zajišťuje brzdění auta včetně kritického brzdění a brzdového světla.
- T7 – Hnací ústrojí
Podává informace o přípustném druhu pohonné jednotky, chladicího systému a ochranných prvků.
- T8 – Aerodynamické zařízení
Předepisuje oblasti, kde se mohou, a naopak nemohou vyskytovat aero prvky a jaké zatížení musí vydržet.
- T9 – Systém stlačeného plynu a vysokotlaká hydraulika
Předepisuje možné použití stlačených kapalin a plynů ve funkčních částech.
- T10 – Spojovací materiály
Udává normy a parametry spojovacích materiálů použitých na autě.
- T11 – Elektrické komponenty
Popisuje nouzové vypínání auta a bezpečnost zapojení elektronických komponent, jako jsou vypínače, přepínače a baterie.
- T12 – Identifikace vozu
Věnuje se označení auta a jeho identifikaci pomocí startovního čísla a názvu university.
- T13 – Vybavení vozu a řidiče
Určuje jaké oblečení a helmu musí mít řidič a kde jsou umístěny body pro zvedání a tahání auta včetně umístění kamery a hasicího přístroje při manipulaci s autem.

Při návrhu tvaru monocoque byly hlavní body T3 a T4, které určovaly tvar a velikost návrhu, z kterého bylo vycházeno při navrhování samotných forem. [4]

2.3. CTU CarTech

CTU CarTech je tým studentské formule Fakulty strojní ČVUT v Praze, který se každoročně účastní již od roku 2009 závodů celosvětového projektu Formula Student. Tým je složen zhruba z 30 studentů bakalářského i magisterského studia. Tým spolupracuje se studenty ze ŠKODA AUTO Vysoká škola. Do této doby bylo postaveno 11 vozů, které se i účastnily závodů. Tým je strukturován do několika skupin, které mezi sebou spolupracují. Jednotlivé skupiny mají na starosti svojí oblast technického vývoje vozu. Každý ze členů týmu se účastní všech fází sezóny a těmi jsou konstrukční část, výrobní část, testování a závody.



Obr. 4.: Vůz týmu CTU CarTech FS.10 [5]

3. Druhy forem pro kompozitní díly a jejich výroba

Formy používané pro výrobu kompozitů mohou být vyrobené z různých materiálů pomocí různých technologií. Pro volbu konkrétních materiálů a technologií je nezbytně nutné zvážit několik obecných faktorů, a sice plánovaný počet vyrobených kusů, sériovost výroby, maximální výše nákladů na výrobu, požadované vlastnosti (zejména pokud jde o tuhost a hmotnost), rozměr, členitost a kvalita povrchu dílu. Bez vlivu na výběr technologie není ani typ konstrukce či teplota, které bude model nebo forma při výrobě vystavena.

3.1. Rozdělení podle typu konstrukce na negativní a pozitivní formy

3.1.1. Negativní formy

U negativních forem se většinou setkáme s konstrukcí dvou- a vícedílné formy. Používají se v případech, kdy nároky na vnitřní stěnu nejsou příliš velké nebo budou dále spojeny s jádrem. Naopak jejich výhodou jsou parametry vnějších stran. Povrch je pěkný, lesklý a hladký. Využívají se také na díly, které jsou svým tvarem tak náročné, že by se forma z dílu vyjmula velice obtížně.

3.1.2. Pozitivní formy – makety

Makety na tyto formy se dají vytvářet z různých materiálů, jako jsou plasty, kovy (dural, nerezová ocel, měď, ...), sádry, dřeva a další. Jedinou podmínkou je, aby maketa měla takový tvar, aby šla hotová skořepina vyjmout.

Pozitivní formy nebo také makety lze vytvořit z velkého množství různých druhů materiálu. Samotné pozitivní formy jsou rozděleny na:

- Dělená s jádry.
- Skládaná jádra.
- Ztracená jádra.

Dělená nebo skládaná jádra jsou vyráběna z kovových materiálů a polotovarů. U dělených jader se jedná o pozitivní jádra formy s odnímatelnými přírubami. Odnímatelné příruby slouží k umožnění vyjmutí jádra z dutin dílu. Skládaná jádra jsou svým tvarem složitější. Ve vnitřním prostoru jsou jádra dělena tak, aby po vytvrzení dílu bylo možné je z dutin vyjmout. Ztracená jádra jsou rozdělena na:

- Vytluokací.
- Vytavitelná.
- Vyplavitelná.

Mezi nejstarší způsoby patří vytluokací a vytavitelná jádra; to pramení z jejich původu ve slévárenství. U vytluokacích jader se používá sádra, jelikož je sádra výrazně křehčí a má menší pevnost než kompozitní materiál. Po vytvrzení materiálu se jádro může rozbít na menší kusy a odstranit z dutin. Samotná výroba sádrových jader probíhá odléváním do kompozitních forem ze skelné výztuže.

Vytavitelná jádra patří k nejstarším metodám. Jádra se vyrábí z eutektických solí, což jsou směsi solí s teplotou tavení 160 °C, 210 °C a 270 °C. V tuhé fázi mají vzhled a vlastnosti sádry. Pro jejich výrobu se používají kovové odlévací formy, kvůli vyšším tavicím teplotám.

Poslední metodou jsou vyplavitelná laminační jádra. Podle způsobu výroby rozdělené na obráběné, lisované, odlévané a 3D tisknuté.

Obráběná vyplavitelná jádra se vyrábí obráběním bloku materiálu daného jádra. Používá se především pro osově symetrické navíjecí trny, kdy se jádro obrábí na soustruhu. Jednou z dalších možností výroby je pasta, která se lisuje ve formách do potřebného tvaru. Další možností je jejich odlévání do forem. Po vylisování nebo odlití je potřeba jádro vysušit v horkovzdušné peci na teplotu okolo 135 °C. Tloušťka jádra má zásadní vliv na dobu sušení.

Jádra se dají vyrábět 3D tiskem. Používá se metoda FDM. Tiskne se z materiálu použitých pro vyplavitelný model. Povrch jader je potřeba po 3D tisku vyhladit broušením a poté nanést nátěr uzavírající formy. Před samotnou laminací kompozitu naseparovat. 3D tisknuté jádra mají maximální provozní teplotu 120 °C. Této technologii je dobré využívat pro materiály vytvrzované při pokojové teplotě nebo do 120 °C s možností dotvrzení po vyplavení jádra. Používá se pro výrobu malého počtu jader. [6]

3.2. Rozdělení forem podle materiálu

3.2.1. Kovové

Jedním z druhů forem jsou formy vyrobené z kovových materiálů. Kovové formy se používají zejména pro technologie lisování, navíjení a pultruzí.

- Výroba technologií obrábění

I když jsou formy touto metodou velice přesné, musí se funkční plochy brousit a tvarové části leštit. Kvůli požadované výchozí kvalitě povrchu výrobku se tvarová zápusťka leští. U zbytkového obrábění a broušení se jedná o náročnou a zdlouhavou operaci. Vždy záleží na požadavku konstruktéra, jak je vyžadována tvarová přesnost.

V průmyslu se pro obrábění forem používají následující technologie:

3D iMachinig vytvoří celý CNC program i s optimálními řeznými podmínkami pro hrubování, zbytkové hrubování a před-dokončování celého 3D dílu. Určí řezné podmínky i pro drsnosti, to vše v jedné operaci. Tato technologie dosahuje úspory času až 70 % v porovnání s jinými systémy.

3D HSM vysokorychlostní obrábění poskytuje nejlepší 3D dokončovací dráhu nástroje. Dosahuje tím nejlepší kvality obráběné plochy. Touto technologií jsou frézovány složité 3D díly, letecké díly, nástroje a dutiny.

Souosé 5osé frézování zajišťuje veliké množství nájezdů a příjezdů k materiálu. Kolize jsou omezeny díky řízeným osám nástroje. Má pokročilé ovládání naklopení nástroje. [7]



Obr. 5.: Kovové obráběné formy na laminaci[8]

- Výroba galvanoplasticky

U kovových forem se využívá i galvanoplastiky. Jedná se o technologie elektroformování geometrických tvarů, která je založená na principu elektrolýzy. Využívá elektrochemické vylučování kovových povlaků na primární model. Vytvářené vrstvy jsou od několika desítek mikrometrů po jednotky milimetrů. Tento proces může trvat i týdny.

Výroba probíhá z primárního snímatelného modelu. Tím vzniká přesný galvanoplastický otisk, který se použije jako forma. Touto metodou je možné vytvářet otisky opakovatelně s vysokou přesností v řádu nanometrů.

Touto technologií se dají produkovat výrobky různých kovů s různými fyzikálními vlastnostmi. Nejčastěji jsou použity měď a nikl nebo jejich kombinace. Pro povrch se dají definovat vlastnosti, jako je tvrdost, obrobiteľnosť, otěruvzdornost, snadná leštitelnost nebo tepelná vodivost povrchu či těla výrobku, což může být velikou výhodou, a to zejména u výroby kompozitních dílů. Formy nemají téměř žádné vnitřní pnutí, a tudíž vliv na jejich tvarovou deformaci. [9]

3.2.2. Kompozitové

Kompozitové formy se volí zejména kvůli svým specifickým vlastnostem. Těmi jsou prakticky nulová tepelná roztažnost, tvarová stálost, výborná leštitelnost a separovatelnost. Výhodou může být i nízká cena oproti formám ze slitin hliníku, ocelovým formám nebo jiným formám vyráběným standardním způsobem. Díky nízkým hmotnostem kompozitu je s nimi ulehčená manipulovatelnost a případná přeprava. Ovšem nutnou podmínkou při výrobě kompozitových forem je mít maketu, podle které se forma vyrobí. Kompozitové formy se volí pro technologii ručního kladení a injektážní technologie. Pokud se jedná o náročnější a laminátové formy, jsou nejčastěji použity skelné rohože a polyesterové pryskyřice. [10]



Obr. 6.: Formy na monocoque Catreham F1 [11]

Způsobů výroby kompozitních forem je mnoho, a proto jsou uvedeny jen ty nejpodstatnější pro tuto práci.

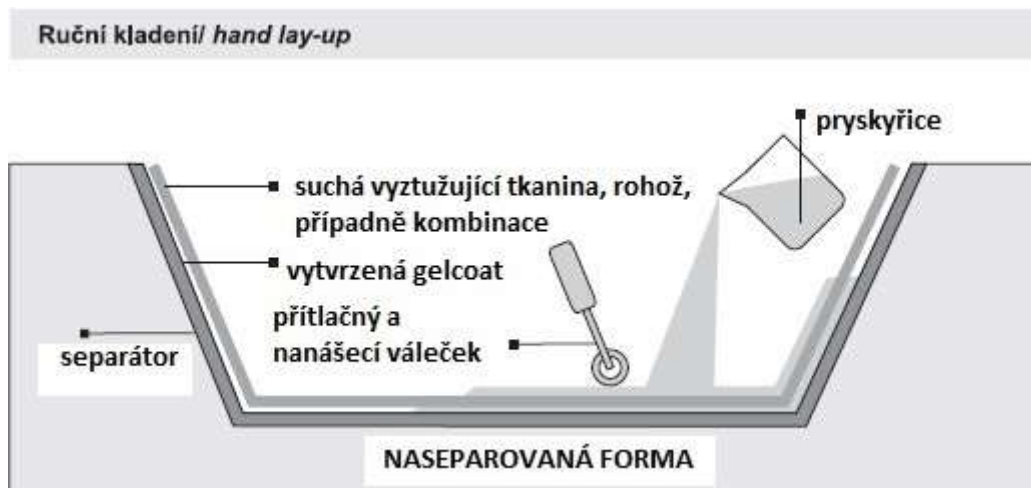
- Ruční kladení

Ruční kladení patří mezi otevřené technologie laminování. Ruční kladení je nejstarší, nejčastější a nejjednodušší technologie. Maketa se nejdříve naseparuje, poté se nanese gelcoat. V dalším kroku se kladou vrstvy výztuže, které se prosycují iniciovanou pryskyřicí štětcem nebo válečkem a přitom je vytlačen zbytek vzduchu tvořícího bubliny. Vytvrzení probíhá za pokojové teploty a atmosférického tlaku. U formovacích pryskyřic je nutné pro zvýšení teplotní odolnosti provést vytvrzování za zvýšené teploty při dodržení programu zvyšování teploty.

Používají se výztuže skleněné, uhlíkové, aramidové a další. Tkaniny mají různé gramáže, vazby a orientace.

Pryskyřice se používají nejčastěji polyesterové nebo epoxidové. V závislosti na době zpracování při výrobě, pevnostních charakteristikách, jakož i teplotní a chemické odolnosti je potřeba volit iniciátory nebo tužidla. Při volbě je třeba zohlednit na konečné použití výrobku, a sice zda je zapotřebí snížená hořlavost a nízké smrštění pro výrobu forem.

Technologie ručního kladení je určena zejména pro díly malé až velkorozměrové, od tvarově jednoduchých po výrazně tvarově složité. Je vhodná pro malé a střední série do 1000 kusů. Také je vhodná pro prototypovou výrobu, a to kvůli jejím nízkým nákladům, nenáročnosti a flexibilitě konstrukce. Při této technologii vzniká relativně malý objem odpadu. Nevýhodou je její veliká závislost na zkušenostech a schopnostech pracovníka. [10]



Obr. 7.: Technologie ručního kladení [10]

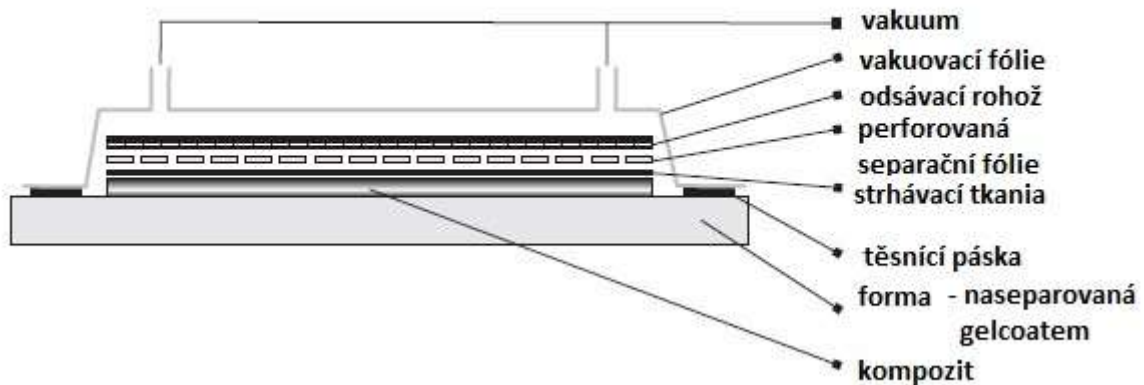
- VBM (Vacuum Bag Molding)

Jedná se o metodu, která v principu vylepšuje metodu ručního kladení v poslední fázi vytvrzování. Používá se pro díly, kde je potřeba zvýšit obsah výztuže. To se docílí tím, že se vysaje přebytečná pryskyřice pro zvýšení mechanických vlastností. Pro jejich zlepšení se využívá jader ve formě pěn či voštin. pro přtlak na formu se využívá vakuum rozvedené po celém dílu.

Prosycená výztuž se ručně klade na formu. Po poslední konstrukční vrstvě se klade vrstva strhávací tkaniny, jejímž účelem je usnadnění dalších operací. Po jejím odstranění se povrch nemusí zdršňovat ani odmašťovat; může se rovnou pokračovat v laminování. Na ní se pokládá perforovaná separační fólie a nakonec odsávací rohož, která nasaje přebytečnou pryskyřici a rozvede vakuum po celém dílu. Nakonec se celý díl zavakuuje pomocí vakuovací fólie a těsnící pásky.

Přivedené vakuum má podtlak od 0,3 do 0,9 bar. Dají se vyrábět i tvarově složitě díly. Vytvrzuje se při pokojové teplotě. Pokud jsou použity prepregy, musí se dosáhnout vytvrzovací teploty, což se používá pro malé až střední série. Technologie není finančně nákladná kromě vakuové pumpy. Výsledný výrobek je oboustranně hladký. Nevýhodou je veliký odpad, potřebná zkušená pracovní síla a pomalý proces laminace. [10]

Lisování pomocí vakuu/ vacuum bagging



Obr. 8.: Technologie VBM [10]

- Vytvrzování v autoklávu

Technologie vytvrzování v autoklávu je nejnákladnější a nejsložitější. Využívá se hlavně pro sériovou výrobu velkorozměrových dílů. Využívá vždy prepregy, které jsou vytvrzovány za zvýšených teplot. Vakuace probíhá stejně jako při technologii vakuového vaku.

Forma se umístí do vyhřátého autoklávu. Nejprve se přivede podtlak na díl zhruba 0,8 bar a následně se přivede přetlak 6 bar na díl. Touto metodou se obsah výztuže dostane přes 60 %.

Prepregy jsou kladeny buď ručně, nebo při velkosériové výrobě strojem. Technologie autoklávu se využívá zejména pro střední až velkou sérii výrobků. Využívá se pro nejnáročnější velkorozměrové struktury v leteckém, kosmickém a automobilovém závodním průmyslu. [10]

3.3. Ostatní

Pro modely menší a středně veliké se často používají jako formy pěnový polyester, dřeva, překližky, MDF desky, sádry, modelářské hlíny, balasty, polyuretanové desky, epoxidové bloky.

- Polyuretanové desky

Polyuretanové desky mají vynikající strukturu; povrch je hladký, ucelený a má jemnou strukturu povrchu. Díky své dobré zpracovatelnosti je vhodný pro přímé obrábění. Dobrá rozměrová stabilita má vysoké mechanické vlastnosti a stálou kvalitu. Používá se zejména na prepregovou výrobu a do vakuových forem. Jako zástupce bych uvedl RAKU-TOOL®. [12]



Obr. 9.: Formy na monocoque z materiálu RAKU-TOOL® [13]

- Umělé dřevo

Umělé dřevo je dobře obrobitelné, má dobrou stabilitu hran, nízký koeficient délkové roztažnosti a jemnou strukturu. Může mít i vysoké pevnostní hodnoty. [14]

- MDF desky

MDF desky jsou levným materiálem. Výroba probíhá lisováním z dřevěného prachu. Jsou dobře obrobitelné a mají jednorodou strukturu lisovaných vláken. Mají i poměrně vysokou hodnotu pevnosti v tahu. Jsou náchylné na vlhké prostředí, ve kterém bobtnají. [15]



Obr. 10.: Obrábění maket na formy [5]

4. Kompozity

Obecně pojem kompozit představuje kombinaci dvou nebo více odlišných částí spojených v jednu. Kompozitní materiály jsou materiály skládající se ze dvou nebo více odlišných materiálů jak mechanicky, tak i chemicky. Dohromady poskytují lepší mechanické vlastnosti než samotné oddělené složky. Na rozdíl od těchto složek je potřeba nahlížet na kompozit z hlediska makrostruktury, neboť většina materiálů z hlediska mikrostruktury by byly také kompozity.

Kompozitní materiály jsou složeny ze dvou složek, a to ze spojitě a nespojitě fáze. Nespojitou fází se rozumí materiál ve formě částic nebo vláken. Spojitou fází se rozumí matrice. Jako matrici berme pryskyřici, která má nízkou hustotu, je dobře zpracovatelná, odolná a stálá při působení širokého spektra prostředí a chemikálií. Ovšem velký nedostatek z hlediska konstrukčního použití je velmi malý modul pružnosti, nízká pevnost, křehkost a poměrně malá odolnost proti creepu. Nespojitou částí budou vlákna. Vlákna mají ty mechanické vlastnosti, které jsou potřeba. Těmi jsou tuhost a pevnost. Tato vlákna jsou ovšem velmi křehká a málo odolná vůči agresivnímu vnějšímu prostředí. Vlákna mají také tu nevýhodu, že je složité je udržet v uspořádaném tvaru tak, aby byl zachován jejich účel. Pakliže prostorově spojíme obě dvě složky tím, že vhodně umístíme vlákna (výztuž) do pryskyřice, vytvoříme novou entitu s vlastnostmi nedosažitelnými pro každou část zvlášť. [15, 16]

4.1. Výztuže

Vláknové kompozity s polymerní matricí využívají jako výztuž vlákna, která mají dálkové rozměry mnohem větší než je průřez. Vlákna pro dané aplikace kompozitu mohou být rozdělena na:

- Skleněná.
- Uhlíková.
- Polymerní.

Pevnost ve směru vláken je mnohem větší než pevnost stejného materiálu v celistvé formě. Z vláken se vyrábí různé typy produktů. Sdružením základních vláken vznikají prameny. Ty jsou následně zpracovávány do polotovarů.

4.1.1. Typy produktů z vláken

- Sekané prameny (chopped fibers)

Tyto prameny se používají pro lisovací a vstřikovací směsi a sekají se na potřebnou délku.

- Rovingy (tow)

Jedná se o prameny, které nejsou nějak zahnuty nebo jen velice málo (méně než 40 zákrutů/m). Dále se používají pro výrobu tažených profilů, navíjení a výrobu prepregů. Navíjí se rovingy s různým počtem vláken. Podle počtu vláken se označují 1K, 3K, 6K, 12K, 24K, 50K a další (číslo udává počet vláken v jenom rovingu). Udávají se také v tex. Tex je délková hustota a jednotkou je g/km. Udává kolik gramů má 1000m vláknového produktu.

- Rovingové tkaniny (fabrics)
Jsou tkané z rovingů. Používají se na kontaktní laminaci, laminaci pultruzi, navíjení a výrobu tkaninových prepregů. Důležitou charakteristikou těchto tkanin je takzvaná „gramáž“, která udává hmotnost g/m^2 a také označuje jemnost. Vyrábí se i v různých textilních vazbách, jako jsou kepr, plátno a atlas.
- Tkané pásy
Tkané pásy se vyrábí tkaním pásků. Touto technologií se dají vyrábět i hybridní tkaniny, které mají pásy s polymerními vlákny, tudíž jsou lehčí až o 20 %. Díky menšímu množství otvorů umožňují dosáhnout velkého objemového podílu vláken. Kvůli způsobu tkaní nejsou vlákna tolik zvlněna jako u běžných textilních vazeb. Vlákna ve svazku jsou rozprostřena. Vyrábí se jak v podobě pásu od 20-50mm, tak i ve formě tkaniny do 300-1500 mm. Pásy jsou na sebe navzájem kolmo uložené [0/90]. Vyrábí je společnost Oxen pod obchodním názvem TeXtrem®.
- Hybridní tkaniny
Kombinují v sobě více druhů vláken, jako například uhlíková + aramidová vlákna nebo uhlíková + skleněná vlákna.
- Prepregy (prepregs)
Neboli předimpregnovaná role nebo kotouče tvořené z rovingu nebo rohože napuštěné polotvrzenou rektoplastickou nebo termoplastickou maticí. Vyrábí se pramenové prepregy, kde jsou svazky nasycené maticí. Používají se především do dobrých polymerních kompozitů. Prepregy se sytí roztokem pryskyřice. Pro syčení se používají pryskyřice epoxidové, fenolické, kvanoesterové, bismaleimidové, benzoxazínové, ftalonitrilové, polychinoxalinové, polyimidové a další. Pryskyřice je ve stavu B, což znamená, že již vzniklo zesílení molekul, ale síť má zatím velmi malou hustotu, takže se zatím nachází ve stavu lepivého gelu. Prepregy se musí skladovat při nízkých teplotách kolem $-18\text{ }^\circ\text{C}$, kdy se stárnutí zpomaluje. Již při teplotách $20\text{ }^\circ\text{C}$ dochází k vytvrzování a hovoříme o tom, že prepreg stárne, a tím ztrácí svoji schopnost lepit a zvyšuje se riziko tvorby vzduchových polštářků mezi vrstvami pro kladení. Po vytažení z mrazících boxů se prepreg musí nechat vytemperovat z důvodu orosení povrchu a navlhnutí matrice a vláken. Také existují jednosměrné a vícevrstvé prepregy. [17]

4.1.2. Vlákňové kompozity

Jejich největší výhodou je jejich výborný poměr mezi vysokou pevností a tuhostí k hmotnosti. S tím se pojí možnost vyrobit materiál o potřebných mechanických vlastnostech v daných směrech.

Jednovrstvé kompozity

Jedná se o kompozity, které jsou tvořeny buď jednou vrstvou, nebo více vrstvami, ovšem každá vrstva má stejnou orientaci a vlastnosti, jako ostatní vrstvy.

- Dlouhovláknové (jednosměrně orientovaná vlákna, dvousměrně orientovaná vlákna)
Jednosměrně orientovaná vlákna tvoří jednosměrný kompozit označovaný jako lamina. Vlákna jsou položena jedním směrem a prosycena pryskyřicí, která tvoří

matrici. Vyznačují se vysokou pevností ve směru vlákna, ovšem malou pevností v kolmém směru na vlákna. Takto poskládaným tkaninám se říká jednosměrná tkanina.

Dvousměrně orientovaná vlákna se dávají, aby se předešlo nerovnoměrným vlastnostem kompozitu. Ty jsou tvořeny tkaninou v různých typech spletení.

- **Krátkovláknové**

U nahodile orientovaných kompozitů se používají sekaná vlákna orientovaná. Bývají použita na vstřikování do forem již smíchaná s maticí. Orientovaná vlákna se při laminaci používají, až když jsou spolu slabě spojena v rohož, na kterou se potom přivádí pryskyřice.

Vícevrstvé kompozity

- Lamináty – jedná se většinou o vícevrstevný kompozit z několika tenkých, stejně orientovaných jednosměrných vláknových kompozitů-lamin. Ovšem ve skladbě je vždy použit jen jeden typ materiálu, například uhlík.
- Hybridy – o nich mluvíme, když jsou jednotlivé rovingy z rozdílného materiálu (sklo-uhlík). [18]

4.2. Polymerní matrice

Polymerní matrice dělíme podle typu polymerních pryskyřic na dvě skupiny, a to na termosety a termoplasty.

4.2.1. Termoplasty

Mezi termoplasty se řadí polystyreny (PS), polypropylen (PP), polyetylén (PE), polykarbonát (PC), polyetylén tereftalát (PET) a další. Všechno jsou to tuhé látky a až za zvýšených teplot nad charakteristickou hodnotu pro jednotlivý polymer začnou měknout a téct. Zpátky do pevného stavu se dostanou až po ochlazení pod tuto teplotu.

4.2.2. Termosety

Mezi termoplasty se řadí epoxidy, nasycené polyestery, melaminy nebo feno formaldehydové pryskyřice. Obvykle se vyrábějí ve formě viskózních tekutin s konzistencí podobné řídkému medu. Vytvrzení nastává chemickou reakcí až po přidání katalyzátoru a iniciátoru. Proces vytvrzení probíhá buď samovolně při pokojové teplotě, nebo při zvýšených teplotách. Výsledný termoset je ovlivněn průběhem vytvrzování. Při vytvrzování vznikají chemické vazby mezi jednotlivými malými molekulami a tím vzniká třídímenzionální polymerní síť s rozdílnou hustotou. Makroskopický výrobek je jednou makromolekulou, což je ideální případ. Díky této vlastnosti zůstává termoset vytvrzený i po zahřátí, což pomáhá odolnosti proti creepu a vysokým teplotám. Termosety mají o 2-4 řády lepší viskozitu taveniny při zpracování než termoplasty, což přináší výhodu při smáčení tkanin a vytlačování bublin vzduchu. Naopak nevýhodou je následná křehkost a omezená recyklovatelnost. Z těchto důvodů se hojně používá termosetová matrice. [16]

4.3. Doba zpracovatelnosti

Doba zpracovatelnosti je definovaný čas, během kterého se viskozita smíšeného systému zdvojnásobí. Pokud je počáteční viskozita velmi nízká, pak je doba zpracovatelnosti definována jako doba potřebná pro zvýšení viskozity faktorem 4

nebo 5, nebo jiným definovaným číslem. Časový faktor udává, jak rychle se systém vytvrzuje, ovšem nemusí nutně udávat dobu, po kterou se smí pracovat s pryskyřicí; v tomto termínu musí být schopna použití k vytvoření produktu. Ovšem po uběhnutí této doby se může používat jako lepidlo, těsnící materiál nebo zapouzdřovací prostředek.

4.4. Životnost

Životnost definujeme jako dobu, po kterou můžeme pracovat se systémem, než dosáhne tak vysokého stavu viskozity, že se s ním nedá pořádně pracovat, aby se vyrobil přijatelný produkt. Životnost se stanovuje na základě provedených testů vytvrzování na systému, aby se určil přesný bod, kdy systém gelovatí a rychle roste jeho viskozita ke stavu gelu v konečném stavu vytvrzování. Tady bych rád uvedl příklad pro lepší pochopení. Pokud test vykazuje dobu gelovatění 30 minut, ale viskozita rychle roste mezi 25 a 30 minutami, životnost může být nastavena na 20 minut. Pokud test ukáže dobu gelovatění 30 minut, ale viskozita se výrazně zvýší mezi 15 minutami a 30 minutami, může být pracovní doba nastavena na 10 minut. Dodavatel pryskyřice určí životnost s rozumným bezpečnostním faktorem.

4.5. Doba gelovatění

Doba gelovatění je doba potřebná k tomu, aby směsný systém gelovatěl nebo se stal vysoce viskózním, že již nemůže být považován za zpracovatelný nebo schopný manipulace. Doba gelovatění je čas, kdy je tvorba polymeru ve svých raných fázích. V této době je polymer zasíten do té míry, že pokud je polymerní gelový stav narušen, pak bude mít konečný polymer vlastnosti, které nejsou žádoucí. Doba gelovatění může být měřena podle viskozity, dokud není bod, kdy viskozita je tak vysoká, že již není kapalná. [19]

4.6. Gelcoat

Jedná se o materiál, který se používá na viditelné povrchy kompozitních forem, u kterých se potřebuje dosáhnout hladkého povrchu. Po vytažení z formy nepotřebuje povrch žádné následné úpravy. Povrch se vytvoří přímo ve formě. U většiny gelcoatů je princip založen na nenasycené polyesterové nebo epoxidové pryskyřici. Velice často jsou pigmentované a obsahují stabilizátory proti degradaci způsobené UV zářením. Jsou do nich přimíchávány výztuže ve formě sekaných vláken pro zvýšení hodnot mechanických vlastností. Výztuže mohou být ze skleněných, uhlíkových nebo polymerních vláken.

4.7. Plniče pórů

Plnič pórů při formování slouží jako tmel pro kompozitové a kovové formy s problémem mikroporéznosti, malých povrchových škrábanců nebo nedokonalostí. Dodává vynikající základní vrstvu a zlepšuje uvolňovací schopnosti.

4.8. Separátory

Separátor má vynikající uvolňující vlastnosti a vysoký skluz. Separátory se nanášejí na povrch forem, aby bylo možné produkt uvolnit a vyjmout. Jedná se o polymer na bázi rozpouštědla a uvolňuje epoxidy polyesterové pryskyřice, termoplasty, pryž a většinu dalších formovacích polymerů. Separátory mohou být ve formě fólií, vosků nebo kapalin. [10]

5. Historie vývoje forem pro monocoque CTU CarTech

V týmu CTU CarTech se první monocoque a tedy i formy na něj dělaly na vůz s označením FS.05. Další nové formy byly navrhovány a vyráběny o dva roky později na vůz FS.07. Druhé formy vydržely opět dva roky a byly v nich vylaminovány zase dva monocoque pro FS.07 a FS.08. Rok poté byl opět měněn tvar monocoque a byly vyrobeny nové formy, v pořadí již třetí, na vozy FS.09 a FS.10. Tento rok (2019) byly navrženy zatím nejnovější a největší formy na vůz FS.11.

5.1. První generace forem na monocoque vozu FS.05 a FS.06

První generace forem na monocoque byly konstruovány na odlaminování dvou oddělených polovin ve vertikální rovině. U horní formy byl přidán přesazený lem pro konečné spojení dvou polovin monocoque a konečného slaminování obou polovin v jeden celek. Samotné formy byly tvořeny čtyřmi čtvrtinami, lemem, příložkou z oceli v přední části a inserty uvnitř forem, pro vznik funkčních otvorů, jako jsou manipulační díra v prostotu pedálů nebo horní otvor pro nastupování řidiče.

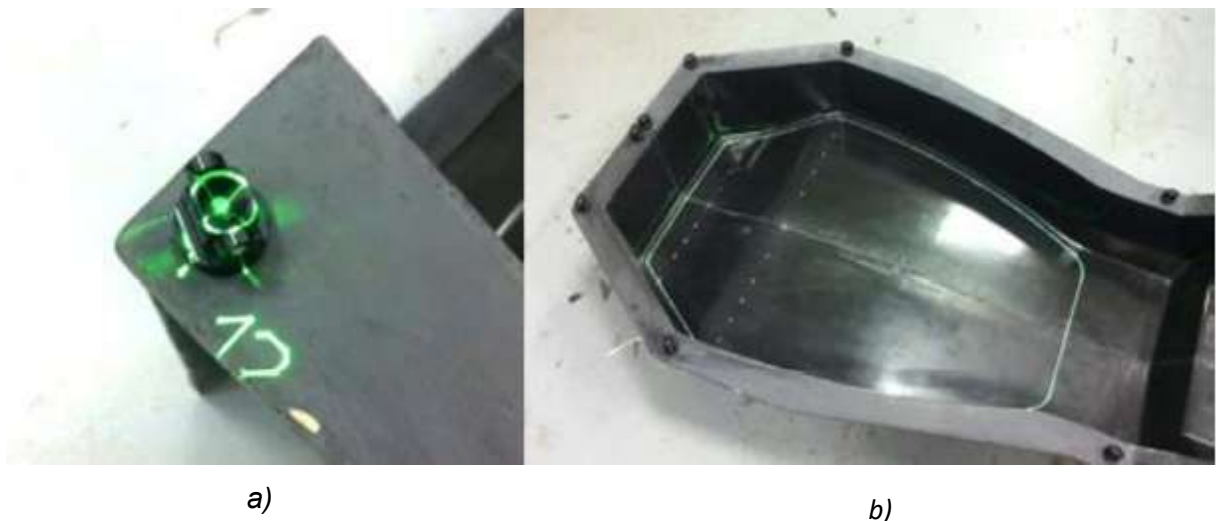
Z hlediska skladby byly zvoleny vrstvy [20]:

1. Skelná tkanina 195g/m², 3K, kepr
2. Uhlíková tkanina 280g/m², 3K, kepr
3. Uhlíková tkanina 280g/m², 3K, kepr
4. Uhlíková tkanina 650 g/m², 12K, kepr
5. Uhlíková tkanina 650 g/m², 12K, kepr
6. Uhlíková tkanina 650 g/m², 12K, kepr
7. Uhlíková tkanina 650 g/m², 12K, kepr
8. Uhlíková tkanina 650 g/m², 12K, kepr
9. Uhlíková tkanina 650 g/m², 12K, kepr
10. Uhlíková tkanina 650 g/m², 12K, kepr
11. Uhlíková tkanina 650 g/m², 12K, kepr
12. Uhlíková tkanina 650 g/m², 12K, kepr
13. Uhlíková tkanina 650 g/m², 12K, kepr
14. Uhlíková tkanina 280g/m², 3K, kepr
15. Uhlíková tkanina 280g/m², 3K, kepr



Obr. 11.: Horní polovina forem na monocoque FS.05 a FS.06 [20]

U těchto forem bylo přesné umístění insertů na požadované pozice řešeno otvory s trubkou na dělicích rovinách, do kterých byla usazena kalibrační zrcátka. Pomocí těchto zrcátek byla ustavena pozice forem a následně do nich byly promítnuty laserem obrysy daných insertů. Tím bylo dosaženo potřebné pozice pro laminaci monocoque. Tato metoda se dá použít pouze v případech, kdy jsou plochy pro laminaci přímo nasvititelné. U ploch s velkým sklonem může docházet k nepřesnostem.



a)

b)

Obr. 12.: a) Zaměřené kalibrační zrcátko, b) promítnutý obrys otvoru kokpitu [20]

Výhody toho konstrukčního řešení laminace forem na dvě poloviny je velmi dobrá pozice pro laminaci ke všem místům ve formě a s tím spojený pohodlný přístup. Další velkou výhodou je možnost práce ve větším počtu pracovníků a tím pádem

rychlejší postup pracovního procesu. Ovšem velikou nevýhodou je následné slaminování obou polovin k sobě, což přináší riziko chyby.

Tímto konstrukčním řešením se ztrácí výsledný torzní tuhost monocoque a výhoda kompozitu.



Obr. 13.: Formy monocoque vozu FS.05 a FS.06 v peci před dotvrzením [20]

5.2. Druhá generace formy na monocoque vozu FS.07 a FS.08

Druhá generace forem byla složena stejně jako ty první ze čtyř čtvrtin sklo-uhlíkového kompozitu, které zůstaly stejné. Vepředu byla opět ocelová přepážka a uvnitř inserty pro vytvoření otvorů na náhledné okénko a otvorů pro únik kapalin z monocoque. Změna a posun byly ve vytvoření otvoru pro řidiče, čímž byl získán pracovní otvor pro výrobu. Odpadlo vytváření složitého lemu, který tuto úlohu před tím zastával. Výroba dílu probíhala totožně až do části, kdy nastalo spojení obou částí forem. Právě pomocí vytvořeného otvoru bylo možné nejen slepení obou polovin dohromady, ale i následné přelaminování obou částí a využití vlastností kompozitu. Největší posun vpřed byl právě ve vytvoření otvoru v kokpitu a tím celé zjednodušení. Nevýhoda dvou kusů zůstala, ovšem zmenšila se slaminováním polovin.



Obr. 14.: Poloviny forem monocoque FS.07 a FS.08



Obr. 15.: Složené formy na monocoque FS.07 a FS.08

5.3. Třetí generace formy na monocoque vozu FS.09 a FS.10

U třetí generace forem nastal největší pokrok. Došlo ke změně technologie výroby a s tím spojený konstrukční návrh. Bylo upuštěno od laminace dvou polovin a následného spojení. Byla zvolena metoda jednoho kusu v celku a možnost plného využití vlastností kompozitu. Toto řešení neumožňuje používat principu kalibračních zrcátek, jelikož v uzavřené formě se nedají nasvítit obrysy insertů. Místo toho byl použit systém otvorů, do kterých byly vsunuty teflonové kolíky pro přesnou pozici insertu. Toto řešení přineslo možnost přesného umístování insertů a nástřihů prepregu. Výrazně byl ušetřen čas a byla získána přesnost výroby a s tím spojena úspora váhy. Výraznou nevýhodou byly pouze dva otvory na skládání nástřihů a jader. Tedy doba výroby byla prodloužena a manipulace s materiály byly zhoršeny zejména vepředu v místech u nohou řidiče.



Obr. 16.: Formy na monocoque FS.09 a FS.10



Obr. 17.: Stěna bez otvorů na kolíky FS.07 a FS.08



Obr. 18.: Stěna s otvory na kolíky FS.09 a FS.10

5.4. Čtvrtá generace forem na monocoque vozu FS.11

Čtvrtá generace forem byla obsahem praktické části práce. Největší odlišnosti od předchozích forem byly následující. Z vozu FS.11 byly odstraněny části trubkového rámu, které nahradil monocoque, což mělo za následek výrazné změnění tvaru a rozměrů. Tímto krokem byl celý monocoque prodloužen, vzadu byla přidána struktura na přichycení rámu a main hoopu, což je trubková konstrukce chránící řidiče při případném převrácení vozu. Přední část, kde byla pedálová soustava, se zvedla, takže podlaha již neleží v jedné rovině. Manipulační prostor na horní části byl odstraněn a dodělán až po odlaminování. Byl změněn i návrh lemu kolem kokpitu. Vepředu po stranách byly vytvořeny otvory na vahadla. Návrhem a výrobou těchto forem na monocoque se zabývají další kapitoly v experimentální části práce.

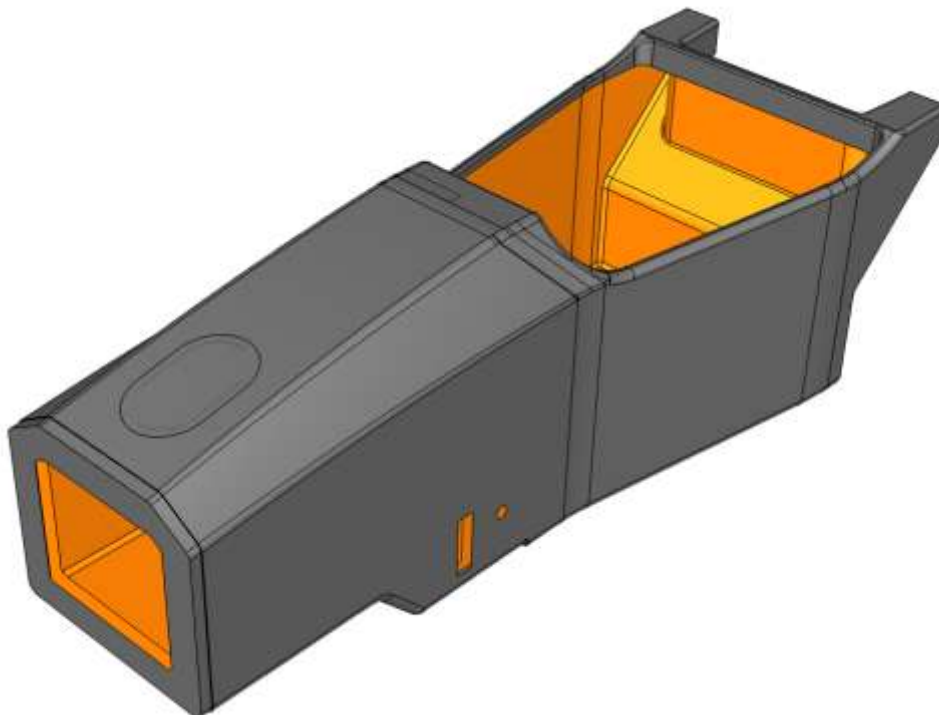
6. Návrh konstrukčního řešení forem na monocoque FS.11

Díl, na který byly navrhovány formy, byl monocoque pro vůz FS.11 týmu CTU CarTech. Jedná se o uhlíkovou skořepinu, která přenáší zatížení, které na ní při jízdě působí. Je to jeden z základních stavebních prvků vozu, kterému poskytuje prostor a úchytné body pro další součásti, například main hoop, trubkový rám, pedály, řízení nebo přední ramena. Veškeré návrhy byly vypracovány v programu CATIA V6. Již hotový díl je na obrázku č. 19.

Formy byly navrženy na prototypovou výrobu; je předpokládáno, že budou vyrobeny dva monocoque. Nejen s ohledem na tuto skutečnost byla vybrána technologie kontaktní laminace ručního kladení.

6.1. Návrh dílu

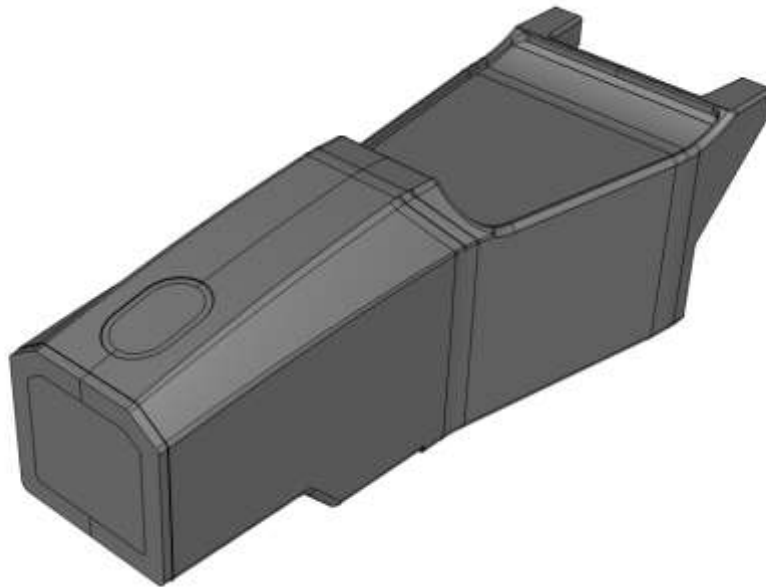
Návrh monocoque nebyl obsahem práce, neboť díl byl již navržen jinými členy týmu. Monocoque je 1875 mm dlouhý, 620 mm široký a 605 mm vysoký. Maximální tloušťka monocoque je 24 mm. Byly dány pozice i veškeré potřebné otvory, jako je otvor pro řidiče, řízení a nápravy. Monocoque je kompozitní hybridní laminát obsahující uhlíková a aramidová vlákna. Pro jádra byla zvolena hliníková voština z obou stran pokryta pryskyřicí pro lepší slepení jádra se skinem. K výrobě insertů do monocoque byl použit Ertalon 66 GF30. Technologie výroby byla zvolena laminace pomocí prepregů vytvrzovaných v autoklávu při 125 °C a přetlaku 3 baru po dobu 3 hodin.



Obr. 19.: Model monocoque FS.11

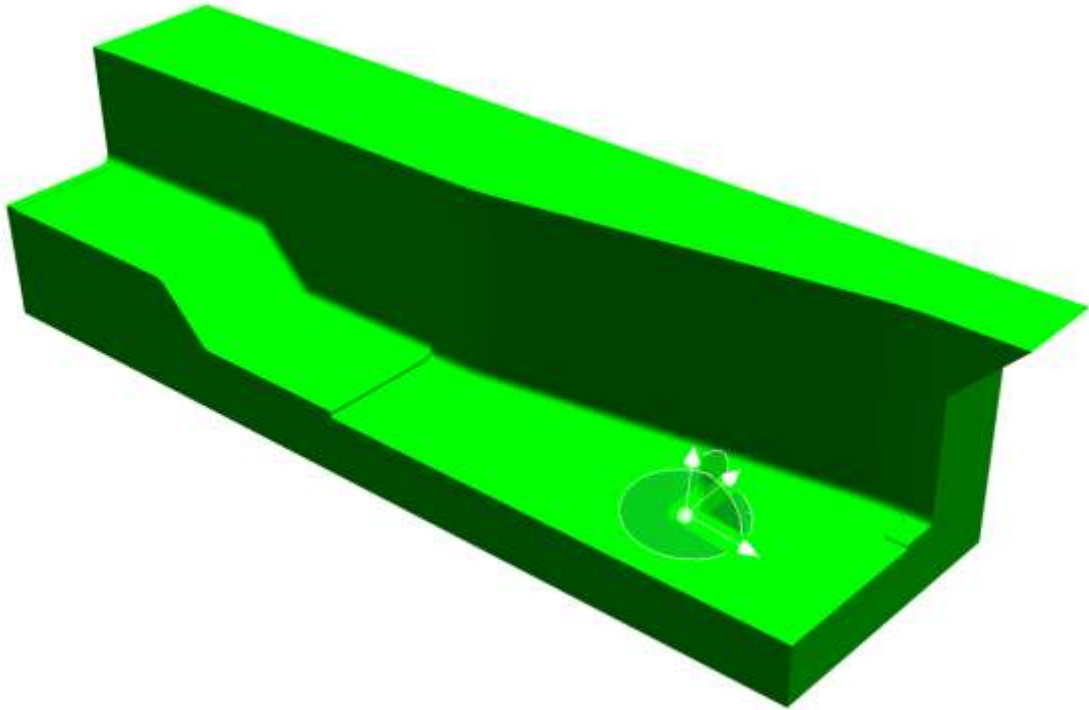
6.2. Návrh forem - makety

Model monocoque je jeden z nejdůležitějších článků výroby kompozitních forem. Je naprosto určující pro konečný tvar. Jelikož monocoque je tvarově složitý díl, zejména pokud jde o jeho zadní část, ke které je přidělaný main hoop a trubkový rám, musela být forma rozdělena na pět částí. Pro makety byl zvolen materiál umělé dřevo MDF ve formě slepených desek, který je dobře obrobitelný, nepotřebuje vydržet vysoké teploty ani velké namáhání a je cenově dostupný.

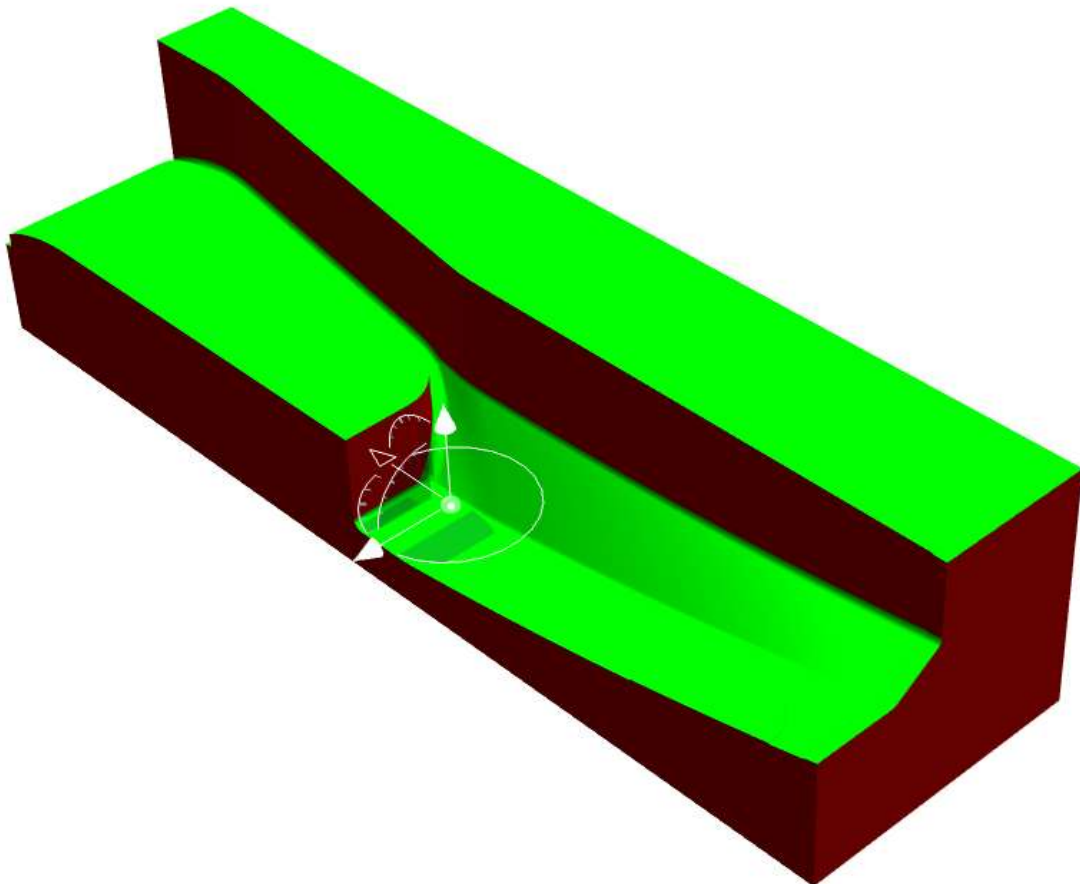


Obr. 20.: Maketa monocoque FS.11

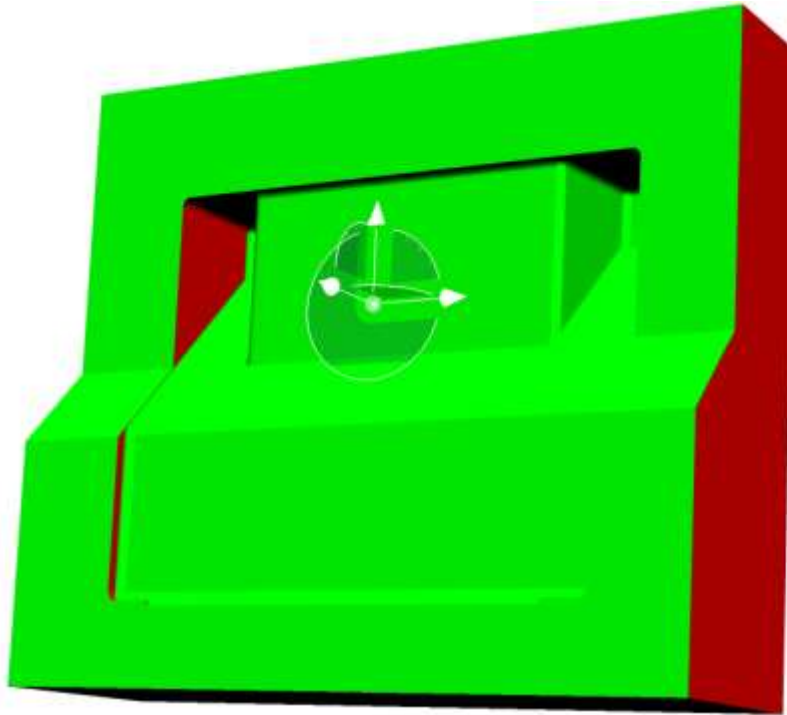
Návrh začal vytvořením makety dílu. Ta vypadala jako samotný monocoque, pouze všechny otvory musely být uzavřeny a z celého monocoque byl udělán jeden plný díl. Poté bylo určeno, kolik dílů bude forma mít. To záviselo na počtu dělicích rovin. V tomto případě vycházela forma z pěti kompozitových částí a jednoho plechu, který byl umístěn zepředu a vytváří jednu stranu formy. Po nalezení dělicích rovin byla maketa rozdělena na pět částí. Byla provedena kontrola jednotlivých kusů forem, zda je možné je oddělit od maket. Bylo důležité zjistit, zda rozdělením makety na části nebyl vytvořen tvarový zámek, který by zabránil oddělení. Jako kritérium pro vyjmutí formy byl zvolen úhel mezi silou, která je potřebná k vyndání maket, a plochou formy. Směr síly, která působí na formu a svírá s plochou formy dva a více stupňů (zelená barva), je brána jako dostačující, a tudíž je možné tuto plochu z formy vyjmout. Červené plochy toto kritérium nesplňují. Toto kritérium bylo splněno u obou spodních částí na všech plochách. U horních dvou částí formy neplatilo u všech ploch, ale bylo usouzeno, že forma půjde sejmout z maket. Forma na zadní část monocoque půjde sejmout tak, jak je vidět na obrázcích 21-23.



Obr. 21.: Pravá spodní část formy

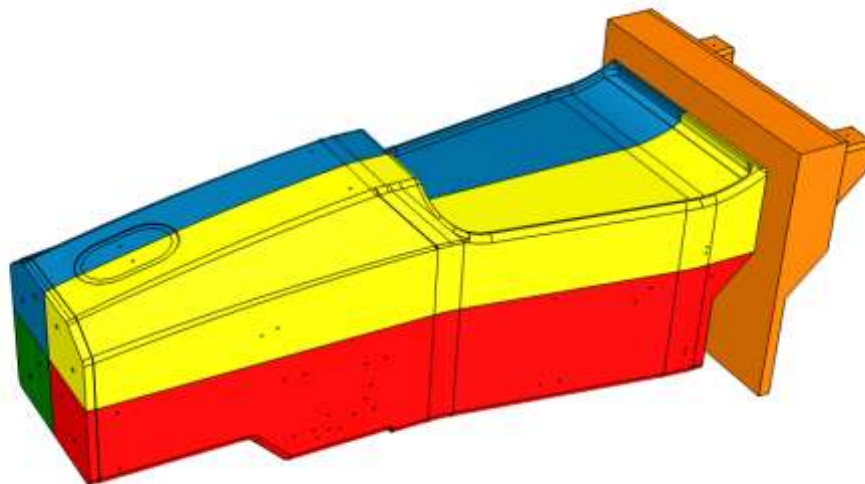


Obr. 22.: Pravá horní část formy



Obr. 23.: Zadní část formy

Na maketách byly navrženy válcové otvory pro vsunutí teflonových kolíků. Každý otvor udával polohu insertu, který má být vlamínován do monocoque. Další funkcí kolíků je udávání pozice pro nástřihy prepregu.

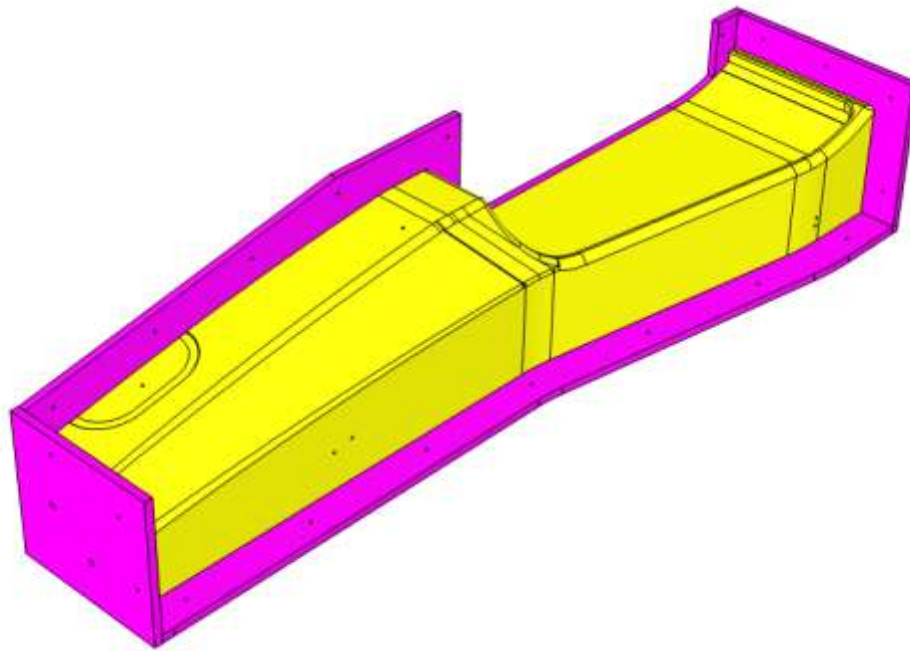


Obr. 24.: Makety na formy monocoque s pozicemi kolíků

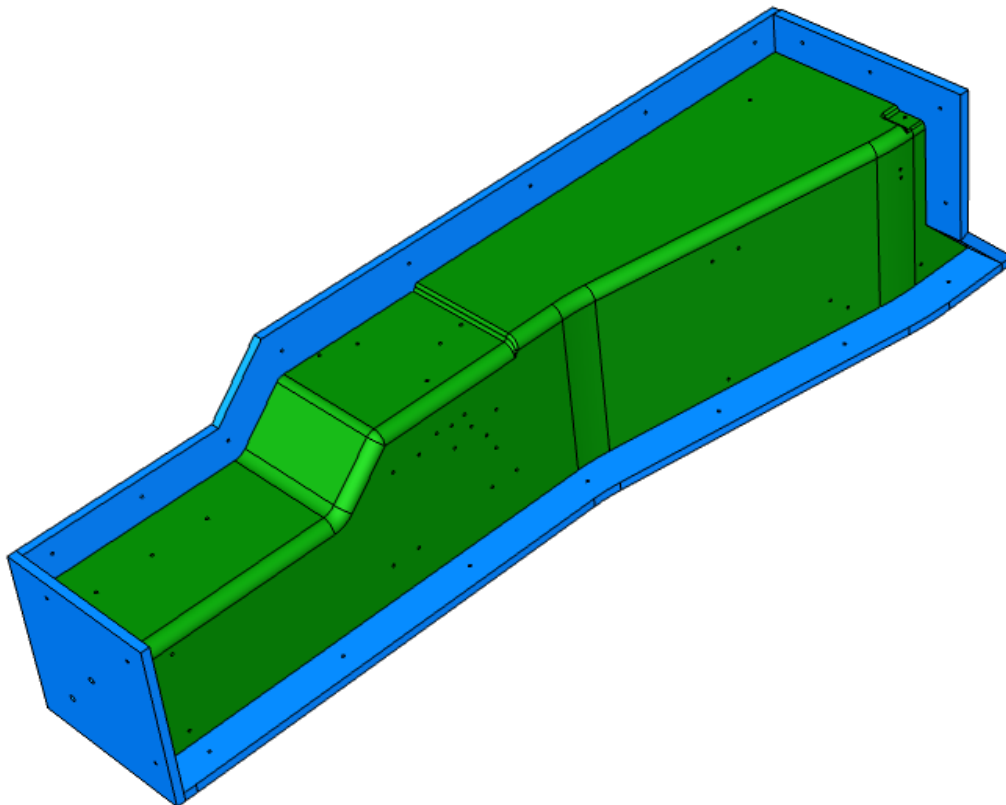
Makety byly vyrobeny dle výše uvedeného návrhu ve společnosti T-Design.

6.3 Návrh negativních forem

Po splnění podmínky, že kompozitové formy lze sejmout z maket, musely být vytvořeny dělicí roviny. Na každé ploše dělicích rovin jsou dva válcové otvory 20 mm hluboké a průměrem 10 mm, které určují přesnou polohu desky. Tyto plochy společně s plochou maket budou tvořit vnitřní plochy forem.

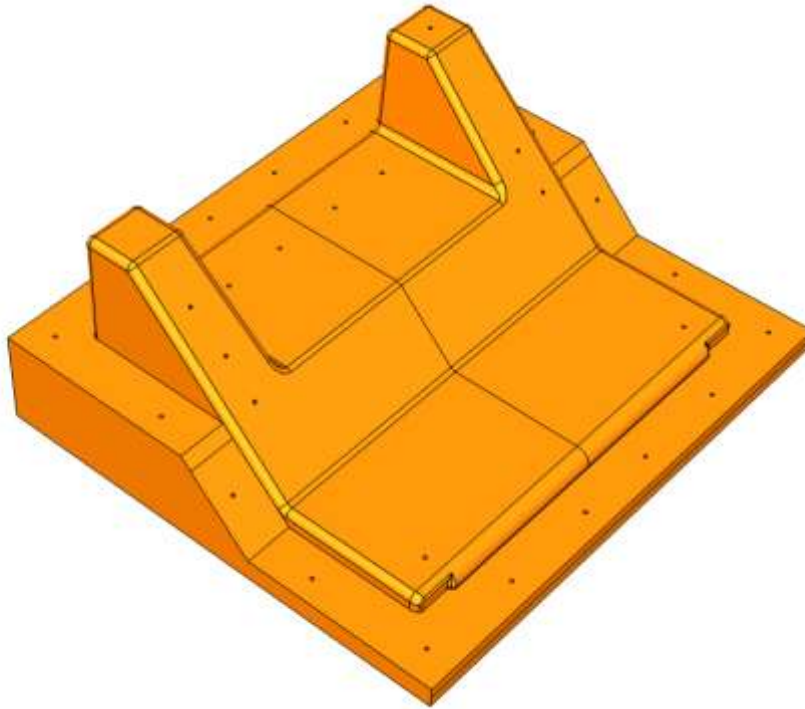


Obr. 25.: Levá horní maketa s dělicími plochami



Obr. 26.: Pravá spodní maketa s dělicími plochami

Již při obrábění zadní makety, která je na obrázku 27, byly vyrobeny plochy pro přírubu formy v dělicí rovině. Toto rozhodnutí bylo zvoleno na základě rozdílných úrovní dělicích ploch.



Obr. 27.: Zadní maketa s dělicími plochami

Na dělicích plochách budou vyvrtány otvory určené pro pozici šroubů, které budou držet formy pohromadě. Vzdálenosti byly voleny od 150 mm do 200 mm, aby zaručovaly po sesazení forem dohromady kontakt mezi jednotlivými dělicími plochami. Kompozitní formy budou kopírovat plochu maket a dělicích rovin.

7. Výroba negativních forem

Nejdříve bylo potřeba určit a navrhnout technologii výroby a následně zajistit potřebné části a materiály na výrobu

7.1. Návrh technologie výroby forem

Pro negativní formy byla zvolena technologie kontaktní laminace. Volba technologie byla provedena na základě charakteru výrobku, požadované tuhosti, finančních možností a počtu kusů, které budou vyráběny. Jedním z požadavků byla rozměrová přesnost, tudíž forma a vyráběný díl musel být ze stejného materiálu, aby tepelná roztažnost byla stejná jako monocoque. Jelikož forma bude vystavena velikému tlaku, je potřebná její tuhost. Tuhost celých forem zajišťuje mohutnost laminátu a šroubové spoje. Jako materiál do laminátu byla zvolena uhlíková výztuž s polymerní matricí. Pro výztuž byla zvolena uhlíková tkanina CCA 600 T2 12K v keprové vazbě. Pro vytvoření matrice byla použita epoxidová pryskyřice Biresin® CR132 FR s tvrdidlem Biresin® CH132-7. Tato pryskyřice je vhodná pro výrobu kompozitů vystavujících se vysokým teplotám do 150 °C a vysoce namáhaných. Je vhodná zejména pro ruční nanášení. Pryskyřice a tvrdidlo bylo mícháno v poměru 100:30 objemových dílů.

Bylo zapotřebí spočítat, kolik materiálu bude potřeba. Vycházelo se z plochy monocoque vozu FS.10. Ta měla 2,9 m² bez dělicích ploch. Na formy monocoque FS.10 bylo potřeba 60 m² 600 gramové uhlíkové tkaniny. Byl zvolen koeficient 1,3, který přepočítával plochu forem bez dělicích ploch na plochu forem s dělicími plochami. Po přepočtení vyšla plocha forem na FS.10 na 3,8 m². Nové formy na FS.11 měly plochu 4,4 m² i s dělicími plochami. Pomocí přímé úměry bylo vypočítáno, že bude potřeba 69 m² uhlíkové tkaniny. K tomu bylo koupeno 30 kg pryskyřice a 9,6 kg tvrdidla.

Technologický postup výroby negativních forem je uveden v následující tabulce.

Tabulka 1.: Technologický postup výroby uhlíkových forem

Č. O.	POPIS OPERACE	MATERIÁL
1.	Výroba maket na CNC stroji podle modelu	Blok z MDF desek – slepené 20mm desky
2.	Odmaštění	octite SF 7063
3.	Lakování - jedna vrstva (laminačních plochy)	Plnič pórů - Polykar plnič 2K PUR Tvrdidlo - Polykar tvrdidlo 60
4.	Broušení plniče pórů	Brusný papír – od P200 do P2000
5.	Odmaštění	Loctite SF 7063
6.	Lakování barevným lakem – jedna vrstva (laminačních ploch)	Dvousložkový akrylový lak – černý
7.	Broušení laku	Brusný papír – od P200 do P2000
8.	Leštění laku	Brusná pasta - 3M 50417 Fast Cut Plus
9.	Nasazení vyfrézovaných dělicích desek	Dřevotříska
10.	Oblepení rohů flešem	Fleš - Flashbreaker®

11.	Odmaštění	Loctite SF 7063
12.	Zaplnění pórů penetračním nátěrem lakovaných ploch (dvě vrstvy nanášené 30min po sobě a nechané 24h zaschnout)	Loctite Frekote B-15
13.	Separace laminovaných ploch (dvanáct vrstev nanášených po 5min a nechané 24h zaschnout)	Loctite Frekote 770-NC
14.	Vložení kolíků do otvorů	Teflonová tyč – PTFE 5mm
15.	Nanesení gelcoatu (dvě vrstvy)	TMSF 5001
16.	Položení rovingu do rádiů	Skelný roving 400 tex
17.	Položení kepu - jedna vrstva	Skelná tkanina AEROGLOSS 200g/m ² , kepr
18.	Prosycení pryskyřicí	Pryskyřice - Bresein CR132 FR Tvrdidlo – Bresein CH132-7
19.	Položení rovingu do rádiusů	Uhlíkový roving Tenax HTA40 F13 12K 800tex
20.	Položení kepu - jedna vrstva	Uhlíková tkanina KC 200g/m ² , 3K, kepr
21.	Prosycení pryskyřicí	Pryskyřice - Bresein CR132 FR Tvrdidlo – Bresein CH132-7
22.	Položení kepu - jedna vrstva	Uhlíková tkanina – CCA 600 T2 12K, kepr
23.	Prosycení pryskyřicí	Pryskyřice - Bresein CR132 FR Tvrdidlo – Bresein CH132-7
24.	Položení technologického materiálu – jedna vrstva odtrhové tkaniny	Odrhová tkanina - Econostitch® G
25.	Položení technologického materiálu – jedna separační vrstva	Separální vrstva - Wrightlon® 3900
26.	Položení technologického materiálu – jedna uvolňovací vrstva vaty	Vata - Airweave® N4
27.	Vakuování do pytle spojený těsnící páskou (12 hodiny nechat zavakuovaný pod tlakem 0,7 baru)	Vakuovací pytel – Wrightlon® 7400 Těsnící páska - AT-200Y
28.	Rozbalit díl a sundat technologický materiál	Vakuovací pytel – Wrightlon® 7400 Těsnící páska - AT-200Y Odrhová tkanina - Econostitch® G Separální vrstva - Wrightlon® 3900 Vata - Airweave® N4
29.	Prosycení pryskyřicí	Pryskyřice - Bresein CR132 FR Tvrdidlo – Bresein CH132-7
30.	Položení kepu - jedna vrstva	Uhlíková tkanina – CCA 600 T2 12K, kepr
31.	Prosycení pryskyřicí	Pryskyřice - Bresein CR132 FR

		Tvrdidlo – Bresein CH132-7
32.	Položení kepu - jedna vrstva	Uhlíková tkanina – CCA 600 T2 12K, kepr
33.	Prosycení pryskyřicí	Pryskyřice - Bresein CR132 FR Tvrdidlo – Bresein CH132-7
34.	Položení kepu - jedna vrstva	Uhlíková tkanina – CCA 600 T2 12K, kepr
35.	Prosycení pryskyřicí	Pryskyřice - Bresein CR132 FR Tvrdidlo – Bresein CH132-7
35.	Položení kepu - jedna vrstva	Uhlíková tkanina – CCA 600 T2 12K, kepr
36.	Prosycení pryskyřicí	Pryskyřice - Bresein CR132 FR Tvrdidlo – Bresein CH132-7
37.	Položení kepu - jedna vrstva	Uhlíková tkanina – CCA 600 T2 12K, kepr
38.	Položení technologického materiálu – jedna vrstva odtahové tkaniny	Odrhová tkanina - Econostitch® G
39.	Položení technologického materiálu – jedna separační vrstva	Separální vrstva - Wrightlon® 3900
40.	Položení technologického materiálu – jedna uvolňovací vrstva vaty	Vata - Airweave® N4
41.	Vakuování do pytle spojený těsnící páskou (12 hodiny nechat zavakuovaný pod tlakem 0,7 baru)	Vakuovací pytel – Wrightlon® 7400 Těsnící páska - AT-200Y
42.	Rozbalení dílu a sundání technologického materiálu	Vakuovací pytel – Wrightlon® 7400 Těsnící páska - AT-200Y Odrhová tkanina - Econostitch® G Separální vrstva - Wrightlon® 3900 Vata - Airweave® N4
43.	Prosycení pryskyřicí	Pryskyřice - Bresein CR132 FR Tvrdidlo – Bresein CH132-7
44.	Položení kepru - jedna vrstva	Uhlíková tkanina – CCA 600 T2 12K, kepr
45.	Prosycení pryskyřicí	Pryskyřice - Bresein CR132 FR Tvrdidlo – Bresein CH132-7
46.	Položení kepru - jedna vrstva	Uhlíková tkanina – CCA 600 T2 12K, kepr
47.	Prosycení pryskyřicí	Pryskyřice - Bresein CR132 FR Tvrdidlo – Bresein CH132-7
48.	Položení kepru - jedna vrstva	Uhlíková tkanina – CCA 600 T2 12K, kepr
49.	Prosycení pryskyřicí	Pryskyřice - Bresein CR132 FR Tvrdidlo – Bresein CH132-7
50.	Položení kepru - jedna vrstva	Uhlíková tkanina – CCA 600 T2 12K, kepr

51.	Položení technologického materiálu – jedna separační vrstva	Separací vrstva - Wrightlon® 3900
52.	Položení technologického materiálu – jedna uvolňovací vrstva vaty	Vata - Airweave® N4
53.	Vakuování do pytle spojený těsnicí páskou (12 hodiny nechat zavakuovaný pod tlakem 0,7 baru)	Vakuovací pytel – Wrightlon® 7400 Těsnicí páska - AT-200Y
54.	Rozbalení dílu a sundání technologického materiálu	Vakuovací pytel – Wrightlon® 7400 Těsnicí páska - AT-200Y Odtrhová tkanina - Econostitch® G Separací vrstva - Wrightlon® 3900 Vata - Airweave® N4
55.	Před-dotvrzení – 2 h při 60°C formy musí zůstat na maketě	
56.	Vytažení - sundání dělicích plocha a vytažení teflonových kolíku a sundání forem	
57.	Složení všech forem dohromady a dotvrzování v peci na vytvrzovací cyklus	

Bylo potřeba dosáhnout teploty skelného přechodu - T_g 135 °C. To kvůli tomu, že vyráběný monocoque ve formách bude vytvrzován na 125 °C. Parametry dotvrzení byly určeny:

- Rychlost ohřevu nesmí překročit 3 °C/min.
- Rychlost ohřevu nesmí být menší než 1 °C/min.
- Rychlost ochlazování nesmí být vyšší než 5 °C/min.
- Tolerance rozsahu $\pm 5^\circ\text{C}$.

7.2. Výroba forem

Po přivezení maket byly makety zbaveny nečistot z výroby a odmaštěny. Poté se na ně nanas plnič pórů. Po zaschnutí byl plnič broušen brusným papírem nejdříve P200 a pro hladký povrch P2000. Před nanesením černého laku byly formy opět odmaštěny a posléze nalakovány. Pro laminaci bylo potřeba zajistit co nejjemnější povrch, a tudíž byl použit brusný papír o zrnitosti P200. Tím byly nalakované plochy přebroušeny, což bylo následně zopakováno s papírem o hrubosti P2000. Veškeré broušení bylo prováděno za mokra. Nakonec, z důvodu co nejhladšího povrchu, byly vyleštěny makety leštící pastou a excentrickou bruskou.



Obr. 29.: Makety s naneseným plničem pórů Obr. 28.: Makety nalakované a naseparované

Poté byly na makety přivrtány dělicí desky. Přesná pozice dělicích desek byla zajištěna dvěma otvory na každé ploše i na každé dělicí desce. Do překrývajících se otvorů byl vložen čep a tím byla zajištěna správná pozice. Nakonec byly dělicí desky přichyceny vruty do maket. Po složení všech maket s dělicími deskami se na kraje dělicích desek nabily lišty pro určení konce forem. Všechny rohy a ostré hrany byly oblepeny Flashbreaker®, aby se při laminování snížilo riziko protrhnutí pytle a ztráty podtlaku.

Následovala příprava maket na laminaci. Po odmaštění maket byly na povrch nanaseny dvě vrstvy penetračního nátěru. Penetrační nátěr byl nanášen všude, kde bude laminováno, tj. jak na dělicí plochy, tak i na povrch maket a desek vymezující konec forem. Penetrační nátěr Loctite Frekote B-15 je plnič pórů, který utěsňuje póry a zlepšuje separaci. První vrstva byla nanasena podél delší strany forem vlněným hadříkem. Druhý nátěr byl nanasena kolmo na první směr 30 min po prvním. Obě vrstvy se nechaly zaschnout 24h. Jako druhý separační produkt byl použit Loctite Frekote 770-NC. Tento produkt slouží na separaci povrchů pro laminaci kompozitů. Bylo nanaseno dvanáct vrstev. První vrstva byla

nanesena podél delší stany opět na všech plochách. Druhá vrstva byla nanesena ve směru kolmo na první po 5 min. Tento postup byl opakován šestkrát. Aplikace byla provedena vlněným hadříkem. Do vyfrézovaných 5mm otvorů byly vloženy kolíky z teflonu. Teflon byl použit kvůli svým dobrým separačním vlastnostem.

Po důkladném zaschnutí se nanesly dvě vrstvy gelcoatu TMSF 5001. První vrstva byla nanesena štětcem. Druhá vrstva byla nanesena až poté, co první byla ve stavu lepivosti na dotek, ale gelcoat nezůstával na prstu při dotyku. Jednotlivé vrstvy byly naneseny na sebe ve dvou směrech kolmo na sebe, aby se docílilo dobrého pokrytí ploch. Na 1m² plochy makety bylo použito 100g gelcoatu.



Obr. 30.: Makety forem s naneseným gelcoatem

Ještě do lepidivého gelcoatu byly nanесeny čtyři skelné rovingy do všech rohů. Ty měly za úkol vyplnit a vyztužit hrany, které musí být ostré v místech dělicích rovin.



Obr. 31.: Vložené skelný rovingy v rozích maket

Formy byly laminovány na třikrát, tedy na tři procesy vakuování. Na první laminaci byly stanoveny tři vrstvy, aby tkaniny dobře kopírovaly maketu. Jako první vrstva byla dána jemná skelná tkanina 200gramová. Byla skládána pomocí proužků, které pokryly celý povrch. Vždy byly položeny tak, aby ležely pouze přes jeden rádius. To mělo zamezit pnutí vrstvy a dobré kopírování tvaru. Skelná tkanina byla zvolena kvůli lepší poddajnosti vláken než u uhlíku. Položená vrstva s rovingy byla prosycena pryskyřicí. Jako druhá vrstva byla položena vrstva uhlíkové tkaniny s gramáží 200 g/m². Tato jemnější tkanina byla zvolena kvůli potřebě dobrého kopírování tvarů a snížení vnitřního pnutí a smrštění, tedy i změně rozměru formy. Do rohů byly položeny rovingy z uhlíku, které měly stejný účel jako skelné. Následovalo opětovné prosycení pryskyřicí. Jako třetí vrstva byla položena uhlíková tkanina o hmotnosti 600 g/m², opět ve formě pruhů překrývající pouze přes jeden rádius. Prosycení proběhlo i u třetí vrstvy. K správné distribuci pryskyřice do tkaniny a celého laminátu byl použit štětec.

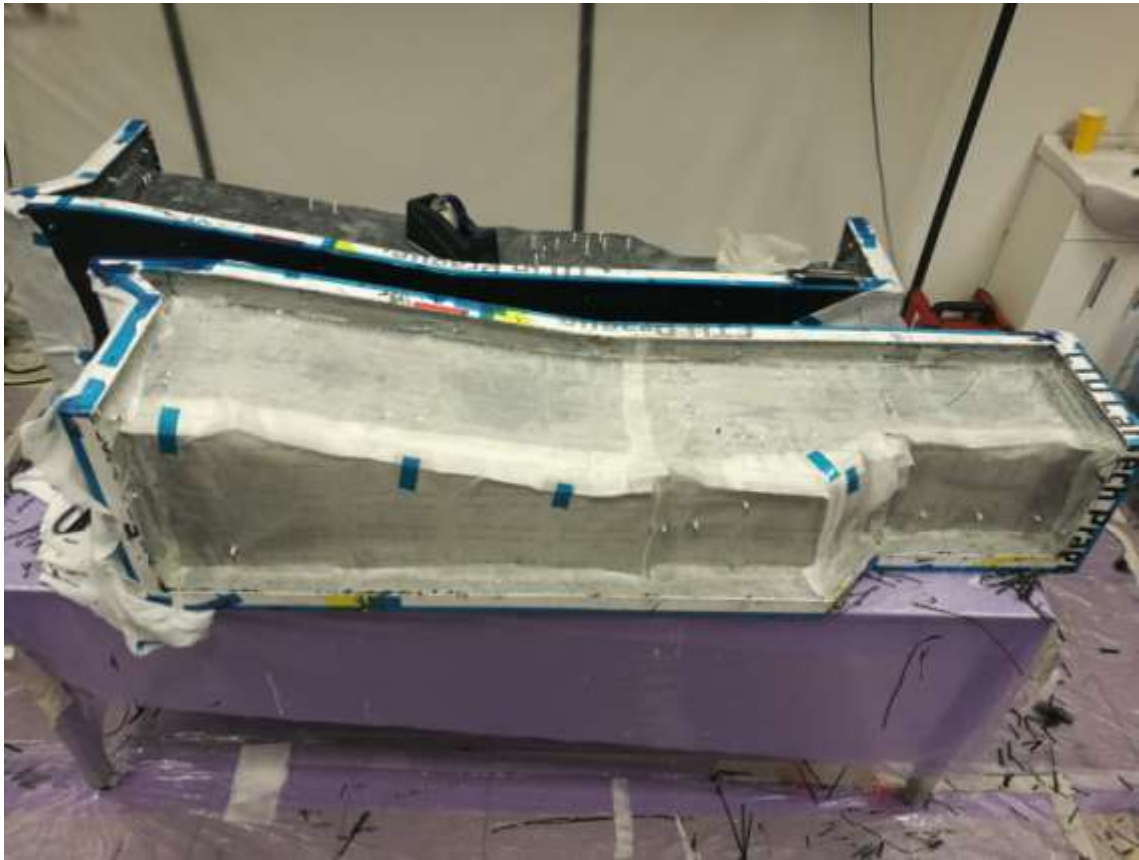


Obr. 32.: Vrstva uhlíkové tkaniny s gramáží 600g/m² prosycená pryskyřicí

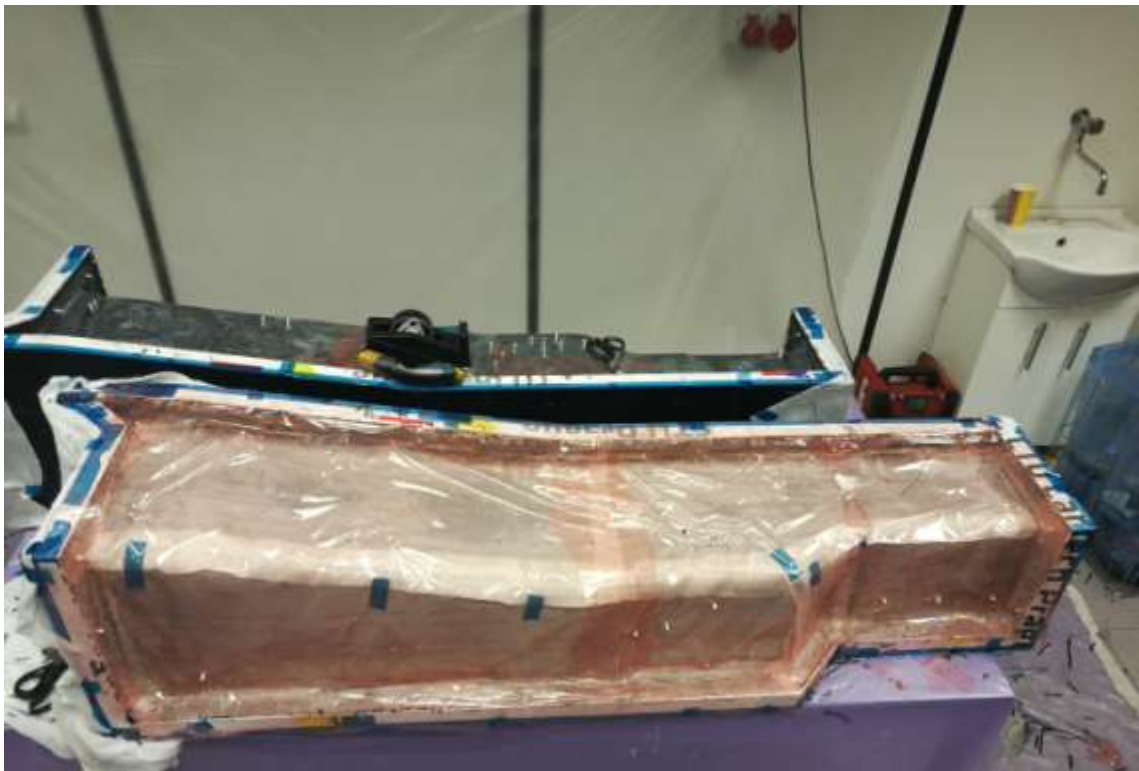
Po třech vrstvách byla položena odtrhová tkanina Econostitch[®] G, která měla za funkci zdrsnit povrch pro následnou laminaci dalších vrstev. Na ni byla položena perforovaná separační fólie Wrightlon[®] 3900, která zabraňuje spojení kompozitu a vaty a zároveň propouští přebytečnou pryskyřici do vaty. Obě vrstvy byly kladeny pouze přes jeden rádius kvůli správnému dotlačení kompozitu na maketu. Jako poslední přišla vrstva vaty Airweave[®] N4, která rozváděla vakuum po celém dílu a vsakovala přebytečnou pryskyřici. Pro vakuování byl použit vakuovací pytel Wrightlon[®] 7400 spojený těsnicí páskou AT-200Y. První laminace je nejdůležitější, musí se hlídat dostatečné prosycení tkanin pryskyřicí, aby nevznikala suchá místa, která by měla za následek delaminaci a možné znehodnocení forem. Na díl forem byl přiváděn podtlak 0,7 baru. Na celé laminování byl čas maximálně 4h, což byla doba zpracovatelnosti pryskyřice.

Po dvanácti hodinách formovací pryskyřice nezatvrdne jako běžná pryskyřice na laminování, ale pouze zatuhne. K plnému zatvrdnutí pryskyřice je potřeba před-dotvrzení a konečné dotvrzení. Po částečném zatuhnutí byla forma rozbalena, zbavena všech technologických materiálů a bylo přistoupeno k druhému cyklu laminace. V druhém cyklu bylo přidáno pět vrstev 600gramové uhlíkové tkaniny, pokaždé mezi jednotlivými vrstvami prosycených pryskyřicí. Na formu byly tkaniny kladeny stejně jako při prvním cyklu. I celý proces vakuování byl opakován se všemi technologickými vrstvami. Poslední cyklus proběhl po zatuhnutí pryskyřice z předchozího cyklu, tedy asi po 12 h. Po rozbalení forem z druhého cyklu byly formy připraveny na třetí, poslední cyklus. Třetí cyklus byl

totožný jako druhý, až na to, že byly položeny pouze čtyři vrstvy uhlíkové tkaniny. I vakuování formy proběhlo stejně.



Obr. 33.: Formy s položenou odtrhovou tkaninou



Obr. 34.: Formy s položenou perforovanou separační fólií



Obr. 35.: Zavakuované formy

Tímto způsobem bylo odlaminováno všech pět uhlíkových forem. Aby pryskyřice úplně dotvrdla, byly formy nechány před sundáním z maket 2 h při 60 °C v teple. Po sundání forem z maket a důkladném prohlédnutí byly zjištěny vady na hranách a povrchu. Vady byly následně opraveny. Opravě a vadám se věnuji v další kapitole. Pro získání plného zatvrdnutí a pevnosti byly formy dotvrzeny v peci.



Obr. 36.: Formy po zatvrdnutí

Zepředu formy byla umístěna deska z oceli S235JR o tloušťce 5 mm, která vytváří přední část formy. Je v ní vyříznutý otvor pro možnost přístupu při laminování zepředu.



Obr. 37.: Přední ocelová deska forem

Posledními částmi formy byly ertalonové inserty, které vytvářely otvory na řízení a podvozek. Inserty byly přidělány šrouby M5 k formě.

Ještě před samotným dotvrzením byly formy zbaveny přebytečného uhlíku a začištěny. Nakonec byl proveden postcuring neboli dotvrzení, kdy bylo všech pět kompozitových forem a ocelová deska sesazeny dohromady a pevně spojeny šrouby. V celé formě byly použity šrouby M5. Mezi jednotlivé díly formy byla dána separační fólie, která měla zabránit spečení forem dohromady. Tento proces dotvrzení probíhal podle grafu z protokolu o průběhu vytvrzovacího cyklu na obr. 39.



Obr. 38.: Formy umístěné v peci před dotvrzením

Z grafu na obr. 39 je vidět rychlý ohřev z 20 °C na 90 °C za 15 min a na této teplotě byla ponechána 180 min. Tento krok byl zvolen kvůli časové tísni. Bylo by lepší být delší dobu na vyšších teplotách. V druhém kroku byla teplota zvýšena z 90 °C na 120 °C za 10 min, kde se opět setrvalo 180 min. Poslední teplotní skok nahoru byl nejmenší, a to z důvodu blížíící se maximální teplotě skelného přechodu. Dosažení této teploty je nutné, aby se pryskyřice správně zesíťovala. Na teplotě 135°C formy zůstaly nejdéší dobu 380 min. Ochlazovací rychlost byla 2 °C/min.

**PROTOKOL PRACOVNÍHO PROCESU VYTVRZOVÁNÍ
TEPLOVZDUŠNA PEC P1**

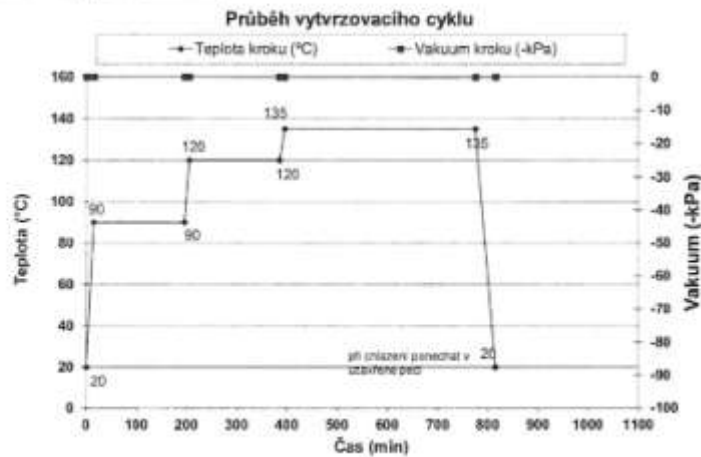
Označení dokumentu (Document Name): TN_LA_cyklus-pecP1-5.07

Revize (Revision): -



Označení souboru: TN_LA_cyklus-pecP1-5.07_Rev-

Typ cyklu :	P1-5.07
Číslo cyklu:	P1-



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Teplota(°C)	20	90	90	120	120	135	135	20								
Naměřeno(°C)																
Vakuum (-kPa)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Naměřeno (-kPa)																
Délka kroku (doporuč.) (min)		15	180	10	180	10	775	40								
Čas	10:30	10:45	13:45	13:55	16:55	17:05	2:00	3:00								

Pokyny:
 Rychlost ohřevu nesmí překročit hodnotu 3°C/min
 Rychlost ohřevu nesmí být menší než 1°C/min
 Rychlost ochlazení nesmí být větší než 5°C/min
 Tolerance rozsahu teploty ± 5°C
 Tolerance rozsahu vakua ± 5 kPa

datum:	
Jméno obsluhy:	
Podpis obsluhy:	
Počítka:	

Obr. 39.: Protokol vytvrzování forem v peci

Až po konečném vytvrzení se objevily na vnitřním povrchu forem různé vady ve formě bublinek nebo děr, které byly zapříčiněné špatně naneseným gelcoatem nebo laminací. Vadám bude věnovaná další kapitola.

7.3. Vady forem

Některé vady byly objeveny již během výroby forem a některé až po sundání forem z maket nebo po dotvrzení.

Již během laminace se vyskytly dvě vady, které spolu souvisely. Šlo o delaminaci a nedostatečné prosycení pryskyřicí. Postižená místa byla v rozích a hranách, kde se stýkala maketa a dělicí deska. Vada vznikla v důsledku špatně naskládaného technologického materiálu, zejména odtrhové tkaniny, která pnula v rohu. Tím došlo k nedotlačení vakuovací fólie na díl a vzniku delaminace. Tuto vadu ještě umocnilo nedostatečné prosycení tkaniny pryskyřicí. Na pohled byla vidět suchá vlákna a tkaniny. V prvním kroku byla provedena oprava, odstranění delaminované tkaniny. V druhém kroku byla prosycena suchá místa a dodána nová tkanina. Do rohů byly položeny uhlíkové rovingy. Dále byly položeny dvě vrstvy uhlíkové tkaniny na daná místa. První vrstva byla z 200 gramové tkaniny a druhá z 600 gramové tkaniny. Nakonec opravené místo bylo celé znovu prosyceno pryskyřicí. Tato vada byla objevena při prvním cyklu vakuování na spodních formách monocoque.



Obr. 40.: Delaminace vrstvy uhlíku na formách



Obr. 41.: Odstraněný kus delaminované uhlíkové tkaniny



Obr. 42.: Opravený kus formy novou uhlíkovou tkaninou prosycenou pryskyřicí

Další vada byla zjištěna až po sundání forem z maket. Šlo o špatně prosycené skelné rovingy a částečně i skelné tkaniny v rozích. Šlo o poměrně dlouhý úsek, kde rovingy nebyly dostatečně prosyceny. Tento problém byl na všech pěti uhlíkových formách.

Oprava byla provedena v třech krocích. V prvním kroku byly odstraněny všechny suché rovingy a skelná tkanina. V druhém kroku byly všechny rohy a hrany dolity gelcoatem. V posledním kroku se přebytečný gelcoat odstranil čepelí z odlamovacího nože. Tento postup byl použit na všech místech s touto vadou. Vada byla tímto postupem opravena na všech formách a všech místech.

Následek této poruchy a jeho oprava byla vidět při sesazení forem dohromady. Některé dělicí roviny měly mez sebou malou, maximálně 2mm mezeru. Při laminaci monocoque byly přes mezeru dány dva 20mm pruhy prepregu, čímž byla vada eliminována. Oba dva postupy oprav byly doporučeny a konzultovány se zaměstnanci firmy LA Composite.



Obr. 44.: Neprosycené rovingy na formách



Obr. 43.: Opracovaná forma připravena na opravu

Poslední typ vady byl zaznamenán po dotvrzení a vytáhnutí forem z pece. Jednalo se o malé bublinky, která byly prostoupeny gelcoatem napovrch.



Obr. 45.: Poničený gelcoat po vytažení z pece

Všechny poruchy se podařilo odstranit a připravit formy na laminaci. Následně byl monocoque vylaminován.

Monocoque, pro který byly formy navrhovány a vyrobeny, se podařilo odlaminovat a byl použit na vůz FS.11, kde splnil účel, pro který se vyráběl (viz obr. 46 a 47). Formy tím prokázaly svoji funkčnost a splnění účelu. Po prvním odlaminovém monocoque byly formy zachovány pro výrobu další generace monocoque, čímž byl splněn požadavek opakovatelnosti použití forem.



Obr. 46.: Monocoque vozu FS.11 po vyjmutí z forem



Obr. 47.: FS.11 [21]

8. Závěr

Předmětem této práce bylo navrhnout a upravit konstrukci forem pro výrobu monocoque vozu FS.11. Veškeré předem vytyčené cíle a úkoly byly provedeny a splněny. Informace a poznatky z této práce mohou sloužit jako zdroj informací při konstrukci a výrobě maket i kompozitních forem pro monocoque závodního vozu soutěže Formula student, jakož i dalších kompozitních výrobků.

Pro tuto bakalářskou práci byly vymezeny následující cíle. Vysvětlit pravidla soutěže Formula student a její stručnou historii. Objasnit způsoby technologie výroby forem pro kompozity, jejich druhy, materiály a technologie výroby. Shrnutí historii vývoje forem pro monocoque týmu CTU CarTech. Navrhnout a upravit konstrukci forem pro monocoque. A v poslední části pak formy vyrobit a provést jejich zhodnocení.

Co se týče soutěže Formula student a jejich pravidel, bylo popsáno, kdy a kde soutěž začínala, kdo ji zakládal a jak se rozšířila do celého světa. Bylo uvedeno, čím je unikátní, jaké jsou její cíle a příznivé dopady na odborný růst studentů.

Byly shrnuty nejdůležitější způsoby výroby forem pro kompozitní díly. Byly rozčleněny podle dvou kritérií a uvedeny jejich technologie výroby, materiály a vlastnosti. Bylo popsáno vhodnost jejich použití pro výrobu dílů z pohledu sériovosti, nároků na díl a typu kompozitu.

Ze zdokumentování forem bylo zjištěno, že ve vývoji návrhů od prvních forem na monocoque k čtvrtým formám monocoque vozu FS.11 byla změněna technologie výroby monocoque v důsledku spojení všech částí forem již před začátkem výroby. Vývoj druhých forem přinesl posun při slaminování dohromady. Největší posun byl z druhé generace na třetí generaci, kdy byl změněn způsob laminace a byl vytvořen systém pozic insertů a nástřihů, což mělo za následek zlepšení torzní tuhosti.

Výhodou nové konstrukce forem bylo zjednodušení tvaru a následné laminace, při které byl ušetřen čas. Návrh byl vypracován pro pět kompozitních forem, které vyhověly tvarové náročnosti monocoque. Byla použita technologie kontaktní laminace z důvodu jednoduché dostupnosti, nákladové dosažitelnosti a také s ohledem na technologie výroby monocoque. V průběhu návrhu i výroby se vyskytly překážky, které se podařilo vyřešit. Vady vzniklé při výrobě na formách byly opraveny laminací. Vady povrchu byly opraveny dodáním gelcoatu.

Monocoque, pro který byly formy navrhovány a vyrobeny, se podařilo odlaminovat a byl použit na vůz FS.11, kde splnil účel, pro který se vyráběl. Formy byly po prvním odlaminovém dílu zachovány pro výrobu další generace monocoque. Tím byl splněn požadavek opakovatelnosti použití forem.

9. Použitá literatura

- [1] **Institution of MECHANICAL ENGINEERS.** IMechE. *IMechE*. [Online] 1. Leden 2019. [Citace: 7. Červenec 2019.] Dostupné z: <https://www.imeche.org/events/formula-student/about-formula-student/history-of-formula-student>.
- [2] **EBaracus.** Home EBaracus. *Web EBaracus*. [Online] [Citace: 20. Červenec 2019.] Dostupné z: <http://www.ebaracus.com>.
- [3] **Formula Student Germany.** Formula Student Germany. *Facebook*. [Online] 9. Srpen 2019. [Citace: 10. Červenec 2019.] Dostupné z: <https://www.facebook.com/FSGeV/photos/a.493056594104904/1415874655156422/?type=3&theater>.
- [4] **Formula student Germany.** Formula Student Germany International Design Competition. *Formula Student*. [Online] 1. Leden 2019. [Citace: 13. Červenec 2019.] Dostupné z: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2019/rules/FS-Rules_2019_V1.1.pdf.
- [5] **CTU CarTech.** CTU CarTech. *Web CTU CarTech*. [Online] 1. Září 2009. [Citace: 27. Červenec 2019.] Dostupné z: <http://cartech.cvut.cz/>.
- [6] *Technologie výroby kompozitních vzduchovodů. Transfer.* Letňany : Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s., 2019. ISSN 1801-9315.
- [7] **SolidCAM.** Obrábění forem. *Web obrábění forem*. [Online] SolidCAM, 2018. [Citace: 27. Červenec 2019.] Dostupné z: <https://www.solidcam.com/cs/spolecnost/o-solidcamu/>.
- [8] **Bicycling Trade.** Inside Giant's C-Tech Carbon Fibre Factory. *Web Inside Giant's C-Tech Carbon Fibre Factory*. [Online] 23. Březen 2013. [Citace: 25. Červenec 2019.] Dostupné z: <https://www.bicyclingtrade.com.au/features/inside-giant-s-c-tech-carbon-fibre-factory>.
- [9] **Electroforming.** Electroforming. *Web Technologie*. [Online] Electroforming s.r.o, 2019. [Citace: 27. Červenec 2019.] Dostupné z: <http://www.electroforming.cz/cs/technologie>.
- [10] **CATERHAM F1.CO.UK.** Twitter. *CATERHAM F1.CO.UK*. [Online] 4. Říjen 2015. [Citace: 25. Červenec 2019.] Dostupné z: <https://twitter.com/kevts/status/650607398449729536?lang=cs>.
- [11] **Havel Composites.** Technologie jejich popis a schémata. *Havel Composites*. [Online] 30. Prosinec 2005. [Citace: 25. Červenec 2019.] Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20080621231015/http://www.havel->

composites.com/clanky/4-Technologie/76-Technologie-jejich-popis-a-schemata.html.

- [12] **Rampf**. Rampf discover the future. *Web Rampf discover the future*. [Online] [Citace: 27. Červenec 2019.] Dostupné z: http://www.tkmna.com/wcm/idc/groups/internet/documents/web_content/mdaw/mde5/~edisp/p_2373737.pdf.
- [13] **F1 News**. F News. *fnews.autoroad*. [Online] Web fnews.autoroad, 2019. [Citace: 26. Červenec 2019.] Dostupné z: <https://f1news.autoroad.cz/novinky/33585-novy-lotus-spatril-svelo-sveta-foto/fotogalerie-1/detail/2>.
- [14] **Ebalta**. Ebalta. *Ebalta řešení pro vás*. [Online] 2007. [Citace: 21. Červenec 2019.] Dostupné z: <http://www.ebalta.cz/cz/katalog-produktu/ebaboard-umele-drevo>.
- [15] **DDL**. DDL dřevospracující družstvo. *Web DDL dřevospracující družstvo*. [Online] [Citace: 25. Červenec 2019.] Dostupné z: <http://www.ddl.cz/produkty-a-sluzby/drevovlaknite-desky-mdf-luhopol.html>.
- [16] **Jnačář, Josef**. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [17] **Kořínek, Zdeněk**. Kompozity. <https://kompozity.webnode.cz/>. [Online] 2016. [Citace: 7. 5 2019.] https://drive.google.com/file/d/0B8vQSuH1vI_vV1I5RHg1SIFPNW8/view.
- [18] **Laš, Ladislav**. *Mechanika kompozitních materiálů*. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2008. ISBN 978-80-7043-689-9.
- [19] **Mereco**. Mereco. *Ask the doctor*. [Online] 2019. [Citace: 14. Červenec 2019.] Dostupné z: <http://www.mereco.com/resources/ask-the-doctor/why-is-the-sky-blue>.
- [20] **Zavadil, Filip**. ČVUT DSpace. *Web ČVUT DSpace*. [Online] 21. Červen 2013. [Citace: 10. Červenec 2019.] Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/19964>.
- [21] **CTU CarTech**. CTU CarTech. *Facebook*. [Online] 11. červenec 2019. [Citace: 30. červenec 2019.] Dostupné z: <https://www.facebook.com/ctucartech/photos/a.10152975209388639/10156351801843639/?type=3&theater>.

10. Seznam obrázků

Obr. 1.: Oficiální logo Formula student/SEA [2].....	9
Obr. 2.: Týmy na závodě Formula Student Germany rok 2018 [3]	10
Obr. 3.: Bodové hodnocení disciplín Formula Student	11
Obr. 4.: Vůz týmu CTU CarTech FS.10 [5].....	13
Obr. 5.: Kovové obráběné formy na laminaci[8]	15
Obr. 6.: Formy na monocoque Catreham F1 [11].....	16
Obr. 7.: Technologie ručního kladení [10]	17
Obr. 8.: Technologie VBM [10]	18
Obr. 9.: Formy na monocoque z materiálu RAKU-TOOL® [13].....	19
Obr. 10.: Obrábění maket na formy [5].....	20
Obr. 11.: Horní polovina forem na monocoque FS.05 a FS.06 [20].....	26
Obr. 12.: a) Zaměřené kalibrační zrcátko, b) promítnutý obrys otvoru kokpitu[20]	26
Obr. 13.: Formy monocoque vozu FS.05 a FS.06 v peci před dotvrzením [20]	27
Obr. 14.: Poloviny forem monocoque FS.07 a FS.08	28
Obr. 15.: Složené formy na monocoque FS.07 a FS.08	28
Obr. 16.: Formy na monocoque FS.09 a FS.10.....	29
Obr. 17.: Stěna bez otvorů na kolíky FS.07 a FS.08	30
Obr. 18.: Stěna s otvory na kolíky FS.09 a FS.10	30
Obr. 19.: Model monocoque FS.11	31
Obr. 20.: Maketa monocoque FS.11	32
Obr. 21.: Pravá spodní část formy	33
Obr. 22.: Pravá horní část formy	33
Obr. 23.: Zadní část formy	34
Obr. 24.: Makety na formy monocoque s pozicemi kolíků	34
Obr. 25.: Levá horní maketa s dělicími plochami.....	35
Obr. 26.: Pravá spodní maketa s dělicími plochami	35
Obr. 27.: Zadní maketa s dělicími plochami	36
Obr. 29.: <i>Makety nalakované a naseparované</i>	41
Obr. 28.: Makety s naneseným plničím pórem	41
Obr. 30.: Makety forem s naneseným gelcoatem	42
Obr. 31.: Vložené skelné rovingy v rozích maket.....	43
Obr. 32.: Vrstva uhlíkové tkaniny s gramáží 600g/m ² prosycená pryskyřicí	44
Obr. 33.: Formy s položenou odtrhovou tkaninou.....	45
Obr. 34.: Formy s položenou perforovanou separační fólií.....	45
Obr. 35.: Zavakuované formy	46
Obr. 36.: Formy po zatvrdnutí.....	46
Obr. 37.: Přední ocelová deska forem	47
Obr. 38.: Formy umístěné v peci před dotvrzením	48
Obr. 39.: Protokol vytvrzování forem v peci.....	49
Obr. 40.: Delaminace vrstvy uhlíku na formách	51
Obr. 41.: Odstraněný kus delaminované uhlíkové tkaniny	52
Obr. 42.: Opravený kus formy novou uhlíkovou tkaninou prosycenou pryskyřicí .	52
Obr. 43.: Opracovaná forma připravena na opravu	53

Obr. 44.: Neprosycené rovingy na formách	53
Obr. 45.: Poničený gelcoat po vytažení z pece	54
Obr. 46.: Monocoque vozu FS.11 po vyjmutí z forem	55
Obr. 47.: FS.11 [21].....	55