

Vývoj a konstrukce uhlíkových ráfků pro automobilový průmysl

Bc. Petr Novotný

Diplomová práce
2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr Novotný**

Osobní číslo: **T14519**

Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Vývoj a konstrukce uhlíkových ráfků pro automobilový průmysl**

Zásady pro vypracování:

1. I. Literární rešerše
2. Uhlík jako materiál pro automobilový průmysl
3. Rozdělení a volba vytvrzovacích přípravků-forem pro výrobu kompozitních součástí
4. Přehled typů ráfků používaných v současnosti v automobilním průmyslu
5. Přehled technologií vhodných pro vytvrzování kompozitů s ohledem na danou aplikaci
6. II. Experimentální část
7. Konstrukce ráfku pro zadanou aplikaci
8. Konstrukce vytvrzovacího přípravku-formy
9. Technologický postup výroby uhlíkového ráfku včetně technologických podmínek vytvrzování
10. Formulace závěru

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího práce

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Milan Žaludek, Ph.D.
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

8. ledna 2016

Termín odevzdání diplomové práce:

13. května 2016

Ve Zlíně dne 26. ledna 2016



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno:Novotný Petr.....

Obor:KTZ.....

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně1. 3. 2016.....


.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevýdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpirá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problematikou automobilových ráfků z uhlíkových vláken, které jsou, v současnosti, z větší části vyráběny ze slitin hliníku. Dále je snaha nahradit tyto ráfky kompozitem z důvodu snížení hmotnosti a tím i snížení spotřeby paliva. Následuje návrh, materiálové složení a konstrukce ráfku spolu s konstrukcí formy na příslušný ráfek.

Praktická část obsahuje návrh a konstrukci formy na automobilový ráfek z uhlíkových vláken. Dále se věnuje postupem zaformování uhlíkového vlákna do formy. Jsou zde vyčteny a popsány jednotlivé komponenty pro výrobu příslušného ráfku. Na závěr je zmínka o případné možnosti jejich testování na příslušných testovacích strojích nebo přímo na testovacím voze. K tomu lze případně vytvořit průmyslový vzor.

Klíčová slova: karbon, ráfek, forma, kompozit, prepreg

ABSTRACT

This diploma thesis deals with automobile rims of carbon fiber, which are, at present, largely made of aluminum alloy. Furthermore, the effort to replace these composite wheels to reduce weight and thus reduce fuel consumption. Following the proposal, material composition and structure of the rim, together with the design of the mold at the respective rim.

Practical part includes design and construction of mold for automotive rim carbon fiber. It also deals with the procedure molded into carbon fiber into the mold. There are counted, and described the individual components to manufacture the rim. In conclusion, there is a mention of any possibility of testing on the respective test machines or directly on the test vehicle. This can possibly create a industry design.

Keywords: Carbon, rim, shape, composites, prepreg

Poděkování, motto a čestné prohlášení, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická, nahraná do IS/STAG jsou totožné ve znění:

Zde bych chtěl poděkovat vedoucímu své diplomové práce Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D. za prospěšné odborné rady, pozornost, vedení a strávený čas, který se mnou strávil při vypracovávání diplomové práce. Následně bych chtěl poděkovat firmě Geniczech – M s.r.o. a MARO Engineering s.r.o., která poskytla strojní vybavení, nástroje a mimo toho i cenné odborné rady.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

| | |
|---|-----------|
| ÚVOD | 11 |
| I. TEORETICKÁ ČÁST | 12 |
| 1 ÚVOD DO KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ | 13 |
| 1.1 SLOŽENÍ KOMPOZITU | 15 |
| 1.2 ROZDĚLENÍ VÝZTUŽNÝCH MATERIÁLŮ..... | 15 |
| 1.2.1 Tkaniny | 16 |
| 1.2.2 Netkané materiály | 17 |
| 1.3 DRUHY MATRICE | 17 |
| 1.3.1 Epoxidové pryskyřice..... | 18 |
| 1.3.2 Polyesterové pryskyřice | 18 |
| 1.3.3 Další druhy matrice | 18 |
| 1.4 POMOCNÉ PROSTŘEDKY PRO FORMOVÁNÍ | 18 |
| 1.4.1 Separátory | 19 |
| 1.4.2 Gelcoaty | 19 |
| 1.4.3 Voštiny | 19 |
| 2 UHLÍK JAKO MATERIÁL PRO AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL | 20 |
| 2.1 UHLÍKOVÉ VLÁKNO..... | 20 |
| 2.1.1 Surovina pro výrobu uhlíkového vlákna | 21 |
| 2.1.2 Postup výroby uhlíkového vlákna..... | 22 |
| 2.1.3 Hlavní druhy uhlíkových vláken | 23 |
| 2.1.4 Další druhy uhlíkových vláken | 24 |
| 2.1.5 Uhlíková vlákna budoucnosti..... | 24 |
| 2.2 VLASTNOSTI UHLÍKOVÝCH VLÁKEN | 24 |
| 2.2.1 Výhody a nevýhody uhlíkových vláken..... | 25 |
| 2.2.2 Charakteristika uhlíkového vlákna a kompozitu..... | 26 |
| 2.3 POUŽITÍ UHLÍKOVÉHO VLÁKNA | 27 |
| 3 PŘEHLED TECHNOLOGIÍ PRO VÝROBU KOMPOZITŮ | 29 |
| 3.1 RUČNÍ LAMINOVÁNÍ | 29 |
| 3.2 RTM | 31 |
| 3.2.1 Modifikace RTM..... | 32 |
| 3.3 SMC | 33 |
| 3.3.1 Modifikace SMC | 34 |
| 3.4 NAVÍJENÍ..... | 35 |
| 4 FORMY PRO VÝROBU KOMPOZITNÍCH SOUČÁSTÍ | 37 |
| 4.1 ROZDĚLENÍ FOREM NA KOMPOZITY | 37 |
| 4.2 KOMPOZITNÍ FORMY | 37 |
| 4.3 KOVOVÉ FORMY | 40 |
| 4.4 OSTATNÍ MATERIÁLY FOREM NA KOMPOZITY | 41 |
| 5 PŘEHLED TYPŮ DISKŮ A RÁFKŮ V AUTOMOBILISMU | 42 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 5.1 | ROZDĚLENÍ DISKŮ | 42 |
| 5.2 | TYPY RÁFKŮ..... | 43 |
| 5.3 | DRUHY KOL..... | 43 |
| 5.3.1 | Diskové kolo | 43 |
| 5.3.2 | Hvězdicové kolo..... | 45 |
| 5.3.3 | Drátové kolo..... | 46 |
| 5.3.4 | Paprskové kolo | 46 |
| 5.4 | POROVNÁNÍ PAPERKOVÝCH KOL S DISKOVÝMI Z LEHKÝCH KOVŮ | 48 |
| 6 | SHRnutí TEORETICKÉ A CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI PRÁCE | 49 |
| II. | PRAKTICKÁ ČÁST | 50 |
| 7 | ÚVOD DO PRAKTICKÉ ČÁSTI DIPLOMOVÉ PRÁCE..... | 51 |
| 8 | POPIS PROGRAMŮ PRO TVORBU DISKU A FORMY..... | 52 |
| 8.1 | CATIA V5..... | 52 |
| 8.1.1 | Hlavní oblasti využití programu CATIA V5 | 52 |
| 8.2 | SOLIDCAM..... | 53 |
| 8.2.1 | Hlavní uplatnění programu SolidCAM..... | 53 |
| 9 | KONSTRUKCE DISKU PRO STUDENT FORMULI..... | 54 |
| 9.1 | ZADÁNÍ | 54 |
| 9.2 | POŽADAVKY..... | 55 |
| 9.3 | MODELOVÁNÍ DISKU | 56 |
| 9.4 | MODELOVÁNÍ JADER A DOKONČENÍ DISKU | 62 |
| 10 | KONSTRUKCE VYTVRZOVACÍHO PŘÍPRAVKU - FORMY..... | 68 |
| 10.1 | KONCEPT..... | 68 |
| 10.2 | DĚLÍCÍ ROVINA..... | 68 |
| 10.3 | OZNAČENÍ TVÁRNICE A TVÁRNÍKU | 69 |
| 10.4 | MODELOVÁNÍ FORMY..... | 69 |
| 10.4.1 | Tvárnice..... | 69 |
| 10.4.2 | Tvárník | 71 |
| 10.4.3 | Smrštění..... | 74 |
| 10.5 | ZAFORMOVÁNÍ | 74 |
| 11 | TECHNOLOGIE VÝROBY JADER A UHLÍKOVÉHO DISKU | 76 |
| 11.1 | VÝROBA HLINÍKOVÉHO KROUŽKU..... | 76 |
| 11.2 | VÝROBA PAPERKOVÉHO JÁDRA | 77 |
| 11.2.1 | Technologie CNC obrábění..... | 77 |
| 11.2.2 | Technologie 3D tisku | 77 |
| 11.3 | VÝROBA UHLÍKOVÉHO DISKU..... | 79 |
| 11.3.1 | Pomůcky, formovací prostředky a strojní vybavení | 79 |
| 11.3.2 | Výpočet potřebného množství uhlíkového prepregu a jeho ceny | 80 |
| 11.3.3 | Druh a popis vlastností zvoleného uhlíkového prepregu | 81 |
| 11.3.4 | Technologické podmínky vytvrzování..... | 81 |
| 11.3.5 | Technologický postup výroby uhlíkového disku | 82 |
| | ZÁVĚR | 84 |
| | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY..... | 86 |

| | |
|--|-----------|
| SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK..... | 90 |
| SEZNAM OBRÁZKŮ | 92 |
| SEZNAM TABULEK..... | 95 |
| SEZNAM PŘÍLOH..... | 96 |

ÚVOD

Karbon neboli uhlík je součástí kompozitního materiálu, což je v podstatě materiál, který je tvořen z několika různých materiálů využívajících jejich příznivé vlastnosti. Karbon se používá ve formě vláken, tkaných nebo netkaných rohoží a pro snadnou aplikaci se hojně využívá ve formě prepregu, což je rohož předsycená epoxidovou pryskyřicí. Nevýhodou této formy je jeho skladování, protože se musí skladovat při předepsaných podmínkách jako je tlak a hlavně teplota, aby nedošlo k samovolnému vytvrzování.

Důvod použití tohoto kompozitního materiálu je jeho vysoká pevnost, tvrdost, ale především je velice lehký a proto je snaha nahrazovat konvenční materiály tímto materiálem. Toho se nejvíce, v dnešní době, využívá v automobilovém průmyslu pro úsporu hmotnosti a tím pádem i snížení spotřeby paliva a získání lepších jízdních vlastností. Toto platí zatím jen u sportovních automobilů a v motosportu, poněvadž je to velice nákladná záležitost.

Zpracování takového materiálu není vůbec jednoduché, protože vyžaduje vcelku speciální vybavení a různé pracovní pomůcky. Dále je také důležité vhodně zvolit technologii zpracování tohoto materiálu v tomto případě je využít princip vakua, což bude vysvětleno dále. Musí se také dbát na daný technologický postup, aby se vyvarovalo případným neshodným výrobkům.

Tato práce se především věnuje nahrazením klasického ocelového nebo hliníkového ráfku ráfkem z karbonových vláken spolu s epoxidovou pryskyřicí.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ÚVOD DO KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

Pod pojmem kompozitní materiály neboli kompozity si lze představit *heterogenní materiál* složený ze dvou nebo více fází. Tyto fáze se navzájem hodně liší svými chemickými, fyzikálními ale hlavně mechanickými vlastnostmi. Nejčastěji je jedna fáze v kompozitním materiálu spojitá a ta se nazývá *matrice*. Fázi, která je nespojitá, se označuje jako *výztuž*. Ve srovnání s matricí má výztuž výrazně lepší mechanické vlastnosti, jako je modul pružnosti, pevnost, tvrdost, a jiné. Hlavním cílem vyztužování je zlepšení uvedených vlastností. Obecně lze říct, že kompozitní materiál je materiál s velmi vysokou pevností při malé hmotnosti.

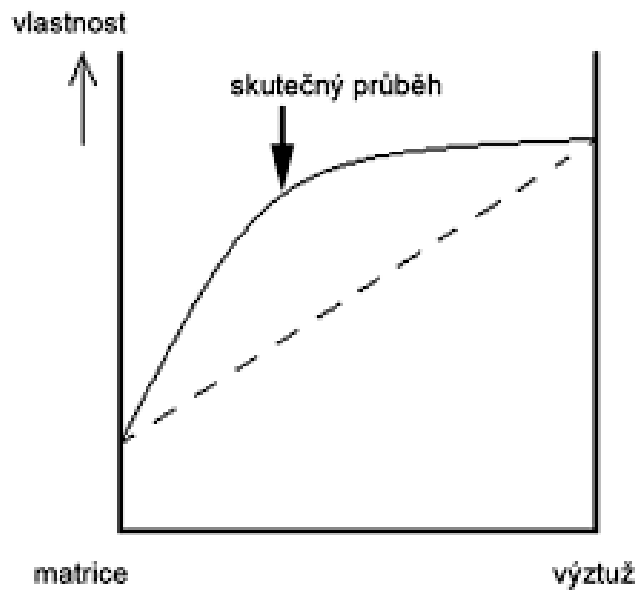
Nejznámějším přírodním kompozitem, na bázi uhlíku, je bezprostředně dřevo složené z celulózových vláken uložených v ligninu.



Obr. 1. Laminární kompozit – dřevěná překližka [1]

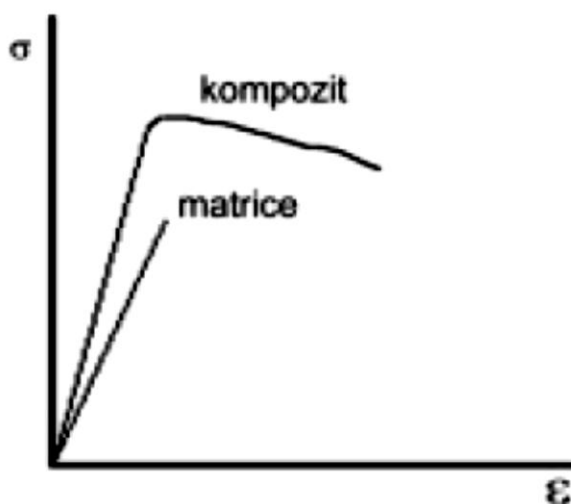
Pro kompozitní materiály syntetického původu je charakteristické, že se vyrábějí *mechanickým mísením nebo spojováním jednotlivých složek*, což je odlišný postup například od slitin, které jsou také heterogenní. U slitin avšak jednotlivé fáze vznikají fázovými přeměnami, například při tuhnutí a tudíž jsou blízko termodynamické rovnováhy.

Pro kompozity je charakteristický tzv. *synergismus*, což je v podstatě to, že vlastnosti tohoto materiálu jsou lepší, než které by odpovídaly pouhému poměrnému sečtení vlastností jednotlivých složek, které je zobrazeno na obrázku 2. Samotná existence synergismu je velmi důležitá, protože vede k získávání materiálů, které jsou kvalitativně zcela nových vlastností. [2]



Obr. 2. Synergické chování kompozitu [2]

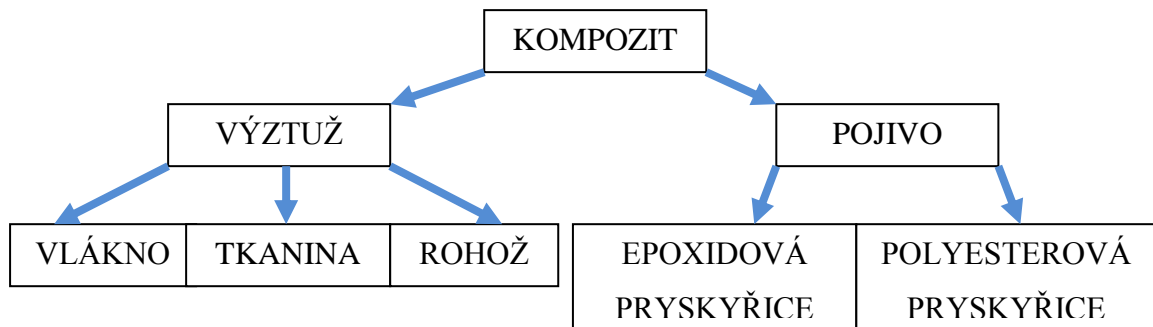
Typický příklad synergického chování je kompozit, který je složený z křehké matrice vyztužená křehkými vlákny. I když jsou matrice a výztuž ve formě vláken samostatně křehké, výsledný kompozit vykazuje určitou míru houževnatosti, což znamená odolnost proti náhlému křehkému porušení. Dále pak kvalita rozhraní mezi matricí a výztuží má zásadní vliv na vlastnosti výsledného kompozitu. Na ukázkou jsou na obrázku 3 porovnány tahové diagramy křehké matrice a stejné matrice vyztužené vysoce pevnými, jenže křehkými vlákny. [2]



Obr. 3. Tahové křivky křehké matrice a kompozitu [2]

1.1 Složení kompozitu

Kompozit je složen z několika částí. Kde hlavní část tvoří nosný prvek, který je spojen určitým pojivem. Dále kompozit mimo jiné obsahuje pomocné prvky, jako je například povrchová vrstva a jiné.



Obr. 4. Základní složení kompozitního materiálu [2]

Nosný prvek neboli výztuž, tvoří hlavní část mechanických vlastností výsledného kompozitu. V dnešní době se využívají textilie, kde vlákna jsou tvořena:

- skelnými vlákny – používají se například pro trupy lodí
- aramidovými vlákny – použití je na neprůstřelné vesty a helmy
- uhlíkovými vlákny – využití převážně v automobilovém a leteckém průmyslu
- hybridní vlákna – kombinace například aramidových a uhlíkových vláken

Dále velmi záleží na způsobu tkaní jednotlivých vrstev. A proto se rozlišuje:

- vlákno
- tkanina
- rohož [2]

1.2 Rozdělení výztužných materiálů

Kromě rozdělení výztužného materiálu podle toho z čeho je vyrobeno jeho vlákno, lze tento materiál rozdělit podle konstrukce samotné výztuže, tím se myslí uspořádání do jednotlivých vláken, pramenců ve tkaninách, nebo netkaných rohoží. Jednotlivé typy se dělí na:

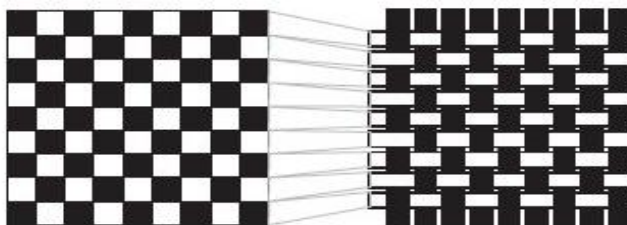
- tkaniny
- netkané materiály [2]

1.2.1 Tkaniny

Tkaniny tvoří pramence vláken, které jsou vzájemně protkaný vláknem stejného nebo jiného druhu materiálu. Způsob protkání těchto tkanin výrazně ovlivňuje výsledné mechanické vlastnosti hotového výrobku. Nejdůležitějším rozlišovacím znakem při výběru tkaniny, pokud nebereme v potaz materiál tkaniny, je hmotnost na jeden metr čtvereční a jeho způsob protkání. U hmotnosti lze říci, že čím menší hmotnost na jeden metr čtvereční, tím je tkanina jemnější.

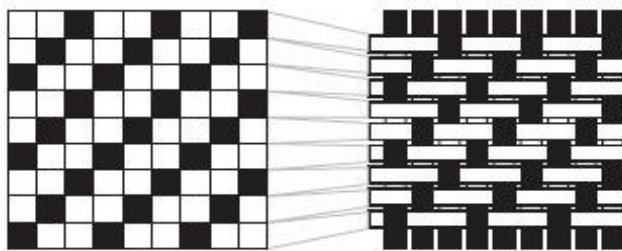
Způsob, kterým je tkanina protkána se nazývá vazba. Základní dělení vazeb je na:

- **Jednosměrná vazba:** Jde o pramence, které jsou položeny jen jedním směrem a jsou, po určité vzdálenosti, prošity nejčastěji polyamidovou nití. Využívají se tam, kde je hlavní potřeba pevnost jen v jednom směru. Výborně snáší kombinace namáhání na tah-tlak ve směru vláken, ale naopak přímo nesnáší jakékoliv namáhání příčné na vlákna.
- **Tkanina s plátňovou vazbou:** Tento druh tkaniny je nejrozšířenější a používá se většinou na díly vyráběné laminováním. Velká nevýhoda je, že nelze ji použít na tvarově složité díly, protože se při kladení může zvltnit. [2]



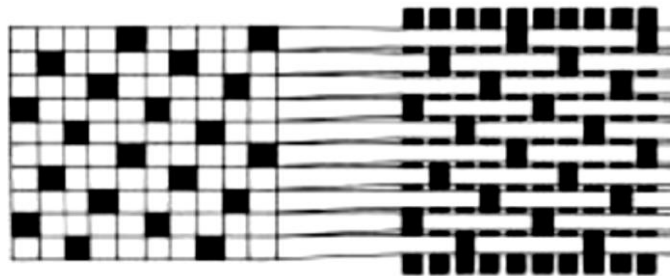
Obr. 5. Schéma tkaniny s plátňovou vazbou [3]

- **Tkanina s Keprovou vazbou:** Tkanina s touto vazbou se používá na složité a velmi složité díly, než tkanina s plátňovou vazbou, protože dovoluje svou konstrukcí určitý posun vláken po sobě. Lze ji poznat podle toho, že je vytvářena soustavou šikmých souběžných řádků, jdoucích na povrchu tkaniny. [2]



Obr. 6. Schéma tkaniny s keprovou vazbou [3]

- **Tkanina se saténovou vazbou:** Použití této tkaniny je ojedinělé a lze s ní vytvořit i velmi složité díly, díky většímu posunu vláken, než u tkaniny s keprovou vazbou. Tato vazba se označuje i jako atlasová. [2]



Obr. 7. Schéma tkaniny se saténovou vazbou [2]

- **Ostatní tkaniny:** Samozřejmě se vyskytuje a používá velké množství různých tkanin, které mohou být jednoúčelové, jako jsou například tkaniny punčochové, které se používají na výrobu trubek a dutých profilů. Dále to jsou tkaniny multiaxial a podobně. [2]

1.2.2 Netkané materiály

Netkané materiály nemají téměř žádné uspořádání nebo jen jeden směr a dělí se na:

- **Rowing:** Je to pramenec vláken, který se používá na zpevnění některých míst výrobku. Není protkán a dodává se v podobě cívek. Může se volit podle tloušťky jednotlivých vláken v pramenci.
- **Netkaná rohož:** Tento materiál se používá, když je potřeba dosáhnout větší tloušťky materiálu na jedno nanesení. Velkou výhodou je nižší cena než u tkaniny. Velmi vhodnou aplikací jsou rozměrné díly, jako jsou různé kontejnery, nádoby a kryty.

1.3 Druhy matrice

Matrice neboli pojivo tvoří spolu s výztuží kompaktní celek, který se nazývá kompozit. Jako pojivo se nejčastěji používá tekutá látka, která po daném technologickém zpracování se stane pevnou. Ztuhnutím se zafixuje poloha jednotlivých vláken výztuže. Pojivo bývá většinou nejslabším článkem kompozitu, a proto je snaha o to, aby obsah pojiva byl co nejmenší. Jenže se nesmí překročit určitý poměr, kdy pojivo bude v tak malém množství, že nebude spojovat jednotlivé vlákna. Nejpoužívanějšími pojivy jsou epoxidové a polyesterové pryskyřice. Dnes se ale začínají objevovat nová pojiva na bázi fenolových a sili-

konových pryskyřic, které mají velmi dobré vlastnosti. Převážně fenolové pryskyřice se používají jako pojivo u prepregu, kde se aktivují tlakem a teplotou. [2]

1.3.1 Epoxidové pryskyřice

Jde především o dvousložkové reaktoplastické látky, kde jedna složka je hlavní a druhá vedlejší ve formě tužidla. Obvyklý hmotnostní poměr mísení je 2:1. Na jeden typ hlavní složky existuje několik druhů tužidel. Doba zpracování je závislá na typu tužidla a hlavní složky a bývá od 30 minut do 10 hodin. Doba vytvrzení se pohybuje od 1 hodiny až do 24 hodin. Údaje o vytvrzení se udávají při pokojové teplotě, protože je lze měnit zvýšením teploty. Teplota zpracování se nesmí překračovat, poněvadž vzniká velké vnitřní pnutí, které má za následek snížení celkové pevnosti výrobku. Epoxidové pryskyřice mají větší pevnost a při zpracování jsou zdravotně nezávadné, tudíž odpadá nepohodlná práce v dýchací masce. Vybrané druhy jsou přímo certifikovány pro kontakt s potravinami, anebo pitnou vodou. Některé typy mají zase certifikaci pro letecký průmysl. Jejich nevýhodou je vysoká cena. [2]

1.3.2 Polyesterové pryskyřice

Jsou to taktéž dvousložkové reaktoplastické látky. Jedná se o polyesterovou složku pryskyřice, která určuje převážnou část vlastností, a dále o složku vytvrzovací. Tvrdidlem zde bývají různé druhy peroxidu. Tento druh pryskyřice má obecně nižší pevnost, než epoxid. Jejich výhodou je ale podstatně nižší cena a lze je velmi dobře obarvovat. Nevýhodou je, že při zpracování velmi zapáchá, u velkých dílců dochází k mírné deformaci tvaru po odformování. [2]

1.3.3 Další druhy matrice

Mezi další druhy lze zařadit i nepolymerní matrice na bázi keramiky nebo kovu s nízkou teplotou tání než výztuž jako je například hliník, cín a jiné. Mezi ty polymerní patří také termoplastická pojiva nebo pojiva na bázi elastomerů jako je například kaučuk, který se nachází v pláštích pneumatik.

1.4 Pomocné prostředky pro formování

Tyto prostředky a látky umožňují snazší zaformování výztuže do samotné formy a následně ulehčují odformování hotového výrobku. Dále pak mohou upravovat povrch a barvu vzhledové plochy, hmotnost a následnou tuhost výrobku.

1.4.1 Separátory

Separátory jsou látky, které pomáhají ke snadnému oddělení hotového výrobku od formy. Jedná se o velmi tenký film, který se nanese na formu před začátkem kladení výztuže. Lze jej nanášet štětcem, válečkem anebo pomocí stříkací pistole. V dnešní době se používají separátory na několika bázích. Jde především o vosky, které se aplikují v tuhé formě. Po určité době, kdy proběhne zaschnutí, se vyleští. Výsledný povrch je velmi kvalitní, příprava je však velmi náročná v podobě nanášení a leštění vosku a mnohdy trvá déle, než samotné laminování. Dalšími separátory jsou vosky rozpuštěné v alkoholu. Jde o nanesení vrstvičky roztoku podobně jako v předešlém případě a vyčkání, než alkohol vyprchá. Poté se může nanášet laminát. Nevýhodou je méně kvalitní povrch, ale výhoda spočívá v uspořádní času na leštění. Největší novinkou jsou polyetylenové fólie, na kterých je pomocí nanotechnologie vytvořena vrstva, která simuluje efekt lotosového květu, na kterém se neudrží žádná tekutina. Tyto fólie se používají pro výrobu rovných dílů anebo desek. [2]

1.4.2 Gelcoaty

Tyto hmoty jsou převážně na bázi polyesteru, epoxidu nebo silikonu a používají se jako povrchové vrstvy ke zlepšení vzhledových vlastností. Většinou se dodávají jako dvousložkové, s poměrem mísení 19:1. Někdy se přidává třetí složka a tím je barvivo. K formování se používají gelcoaty s vysokou tvrdostí. Jejich velkou nevýhodou je, že pokud se povrch poškodí, nelze jej jednoduše opravit. Tyto gelcoaty se totiž nedají leštit a pokud je poškozená forma tak je poznat na výrobku opravené místo. [2]

1.4.3 Voštiny

Je-li potřeba velká tloušťka výrobku s nízkou hmotností o vysoké tuhosti, lze použít tento druh prvku s názvem voština. Nejjednodušší je deska z pěnového polystyrénu, která má z každé strany nanesenou tkaninu. Používá se u rovných a rozměrných dílů. Dalšími materiály jsou různé rohože na bázi polyuretanu. Nejmodernějšími prvky jsou voštiny z aramidu a hliníku. Jedná se o materiály velmi pevné a lehké. Aramidové voštiny se objevují například v ráfku silničního kola, kde pomocí voštiny je vytvořena tloušťka stěny 3 mm, z obou stran pokryta vrstvou uhlíkové tkaniny. Pevnost ve směru vláken uhlíku je velmi vysoká. Nevýhodou je, že tento sendvičový materiál nesnese bodové tlakové zatížení v příčném směru. [2]

2 UHLÍK JAKO MATERIÁL PRO AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL

Uhlík jako chemický prvek tvoří základní stavební kámen všech převážně organických sloučenin, což jsou v podstatě živé organismy na naší planetě. Chemická značka tohoto prvku je C pocházející z latinského slova Carboneum. Uhlík se může samozřejmě objevovat i v anorganických sloučeninách jako je například karbid železa, který je obsažen v oceli. Obsah uhlíku v oceli určuje například její mechanické vlastnosti a určuje druh možného tepelného zpracování. Organické sloučeniny uhlíku jsou důležitým základem světové energetiky ve formě fosilních paliv, jako je ropa, uhlí a zemní plyn. Tyto zdroje slouží pro výrobu elektrické a tepelné energie. Zpracování ropy je nebytně důležité pro výrobu pohonných hmot do spalovacích motorů, které jsou obsaženy v železniční, lodní, letecké a převážně automobilové dopravě. Produkty, které pocházejí z chemického průmyslu a jsou na bázi uhlíku, což jsou v podstatě plastické hmoty, nátěrové hmoty, léčiva a hlavně umělá vlákna, kterým se věnuje velká část pozornosti v této práci, tvoří součást našeho každodenního života. Budoucnost je věnována uhlíkovým vláknům, ze kterých se vyrábějí různé komponenty převážně pro automobilový průmysl díky své nízké hmotnosti a mechanickým vlastnostem. [4]

2.1 Uhlíkové vlákno

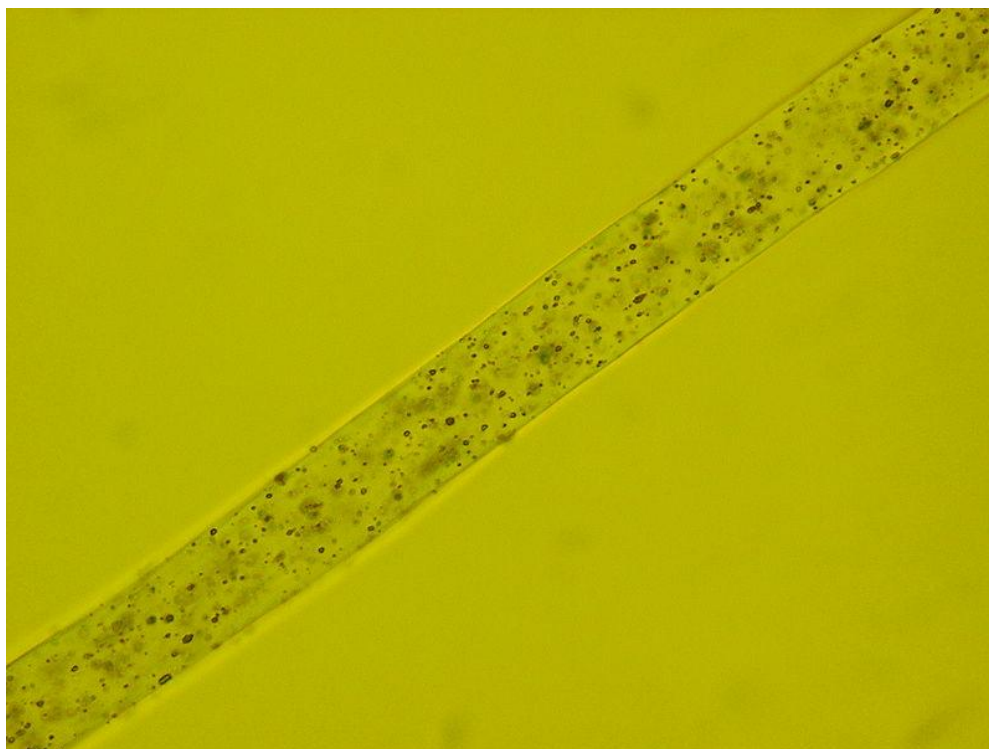
Uhlíkové vlákno neboli karbonové vlákno z anglického slova carbon fiber je název pro materiál obsahující uhlík v různých modifikacích. Zde se jedná především o dlouhý a tenký pramen vláken o průměru 5 až 8 μm složeného převážně z atomů uhlíku (přibližně 90%, zbytek tvoří dusík kyslík a vodík), které dohromady tvoří mikroskopické krystaly, které formují samotné vlákno a jsou převážně orientovány paralelně k podélné ose vlákna. Toto uspořádání způsobuje to, že vlákno vzhledem ke své tloušťce je velmi pevné. [4]



Obr. 8. Nalevo řez uhlíkovým vláknem a napravo cívka s tímto vláknem [5], [6]

2.1.1 Surovina pro výrobu uhlíkového vlákna

- První, průmyslově vyráběná, uhlíková vlákna se objevily v roce 1957, které byly z viskózy. Ta však měla výtěžnost pouhých cca 25 %. Nyní se tato vlákna vyrábí jen v Rusku a Bělorusku.
- Další surovinou pro výrobu uhlíkového vlákna je polyakrylnitrilové (PAN) vlákno, kde výtěžnost je přibližně 90 % uhlíkových vláken z celkové světové produkce, která byla v roce 2009 přibližně 45 000 tun. Průmyslová výroba byla započata v roce 1971 v Japonsku.
- Počátky výroby uhlíkových vláken ze smol, jak izotropních tak i mezofázových je označován rok 1976. Vyráběné množství, respektive podíl na celosvětové produkci není ve statistikách příliš viditelný. Hlavně výrobky z mezofázových smol se vyznačují podstatně vyšší tepelnou vodivostí a vyšším modulem pružnosti.
- V 90. letech minulého století se experimentovalo s výrobou uhlíkových vláken z fenol-aldehydových prekurzorů. Výrobky z této suroviny se vyznačovaly lepší adhezí k pryskyřicovým matricím především v kompozitech. Jejich průmyslová výroba se příliš nerozšířila z cenových a zdravotních důvodů při výrobě. [4]



Obr. 9. Polyakrylnitrilové vlákno pro výrobu uhlíkového vlákna [4]

2.1.2 Postup výroby uhlíkového vlákna

1. **Příprava prekurzoru** – to znamená úpravu výchozího materiálu neboli suroviny buď tavným zvlákňováním, nebo zvlákňováním z roztoku. Struktura tohoto prekurzoru ovlivní výslednou strukturu a pevnost uhlíkových vláken. Vlákno je dále pak dlouženo na požadovanou jemnost.
2. **Stabilizace** – před následnou karbonizací je třeba, aby z dlouhých uhlíkových vláken vznikla teplotně stabilní struktura. Provádí se na vzduchu zahříváním na poměrně nízké teploty 200 – 450 °C po dobu 20 – 30 minut. To způsobuje, že vlákno se nasytí kyslíkovými molekulami ze vzduchu a dojde tak k reorganizaci atomové struktury vlákna. Při stabilizaci vzniká ve vlákně také vlastní teplo, které musí být kontrolováno, aby se zabránilo přehřátí vlákna. V praxi se používá k tažení vlákna řada vyhřívaných komor nebo vlákno prochází přes vyhřívané válce a sypké materiály, které odnímají přebytečné teplo.
3. **Karbonizace** – je to převod prekurzoru na uhlíkové vlákno. Provádí se v inertní atmosféře a to nejčastěji v atmosféře bohaté na dusík, při teplotách, které bývají mezi 1 000 a 2 000 °C. Bez přístupu kyslíku se vlákno nemůže vznítit. Místo toho způsobí vysoká teplota rozkmitání atomů ve vlákně tak, že většina neuhlíkových atomů je odstraněna. Výsledné vlákno obsahuje okolo 85 – 95 % uhlíku.
4. **Grafitizace** – není nutná, ale pokud se provede, vznikají tak zvaná grafitová vlákna. Provádí se v inertní atmosféře, při teplotě přibližně mezi 2 400 a 3 000 °C. Dojde tak ke zvýšení obsahu uhlíku na cca 99 % možná více. Vzniká také uspořádaná vrstevnatá struktura.
5. **Povrchová úprava** – ta se provádí, protože povrch uhlíkového vlákna dobře neváže epoxidy a další látky používané jako matrice nebo plniva v kompozitních materiálech. S ohledem na to se povrch vlákna mírně oxiduje. Přidání kyslíkových atomů na povrch umožňuje lepší přilnavost dalších látek a zdrsnění povrchu pro lepší mechanické spojení s těmito látkami. Oxidace může být dosaženo přístupem plynů, jako je vzduch, oxid uhličitý anebo ozon případně ponořením do různých kapalin jako chlornanu sodného nebo kyseliny dusičné. Vlákno může být také pokryto ochrannou vrstvou proti poškození při dalším zpracování. [4]

2.1.3 Hlavní druhy uhlíkových vláken

Uhlíková vlákna se dělí jednak podle jejich prekurzoru, ale lze je také rozdělit podle jejich mechanických vlastností.

a) Vlákna s nízkými mechanickými vlastnostmi

Tyto uhlíková vlákna s nízkými mechanickými vlastnostmi jsou charakterizována nižší pevností v tahu, menší než 1 000 MPa a s modulem pružnosti v tahu, který je nižší než 100 000 MPa. Bývají vyráběny ve formě vláken, ale i také jako textilie a plstě, které slouží především jako tepelná izolace, elektromagnetické stínění a k výrobě levných předmětů, málokdy jako výztuž do betonu. Pokud se obecně mluví o uhlíkových vláknech, myslí se vlákna s označením jako uhlíková vlákna s vysokými vlastnostmi.

b) Vlákna s vysokými mechanickými vlastnostmi

Pro tyto uhlíková vlákna je charakteristické, že pevnost v tahu je 3500 – 7000 MPa a modul pružnosti je 230 000 – 930 000 MPa. Převážně sem patří vlákna na bázi polyakrylonitrilu (PAN), vlákna z mezofázových smol a vlákna s charakterem whiskerů, což je v podstatě monokrystalické vlákno s vysokým poměrem délky k tloušťce (VGCF - Vapor Grown Carbon Fibers), ty se získávají z plynné fáze. Dále se vlákna v této kategorii člení:

- Vysoko-pevnostní vlákna (HT Fibers – High Tensile Fibers) – jejich standardní modul pružnosti v tahu bývá 230 000 – 300 000 MPa a pevnost v tahu 3 000 – 4 000 MPa, přičemž novější vlákna se stejným modulem vykazují mnohem vyšší pevnosti, až 7 000 MPa.
- Středo-modulová vlákna (IM Fibers – Intermediate Modulus Fibers) – tato vlákna mají modul pružnosti vyšší než 290 000 MPa a pevnost vyšší než 4 000 MPa.
- Vysoko-modulová vlákna (HM Fibers – High Modulus Fibers) – obvykle mají pevnost v tahu okolo 2 400 – 4 000 MPa a modul pružnosti nad 400 000 MPa.
- Super vysoko-modulová vlákna (UHM Fibers – Ultrahigh Modulus Fibers) – tyto vlákna dosahují stejné pevnosti v tahu jako vysoko-modulová vlákna, jenže hodnota modulu pružnosti přesahuje 550 000 MPa. Jejich cena tomu odpovídá.

Vysoké pevnosti je dosaženo u vláken, které jsou na bázi polyakrylonitridu (PAN), zatímco vysokého modulu se dosahuje především u vláken vyráběných z mezofázových smol. [7]

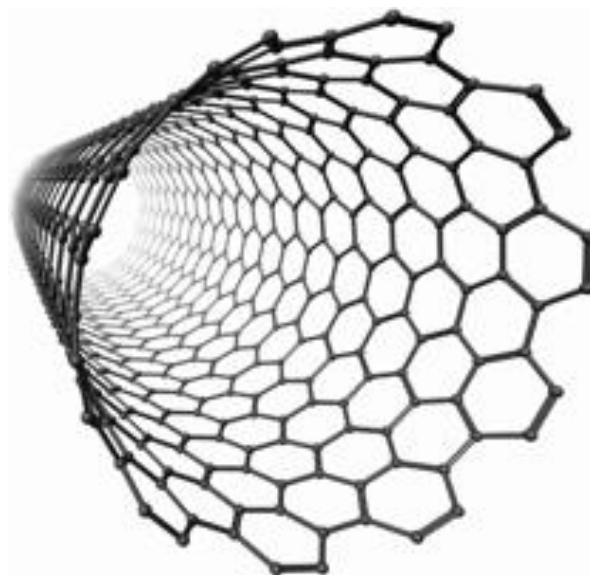
2.1.4 Další druhy uhlíkových vláken

Jako další druhy uhlíkových vláken lze zařadit:

- dutá uhlíková vlákna
- diskontinuální vlákna porušená tahem (SBCF – Stretch-Broken Carbon Fiber)
- mletá uhlíková vlákna
- recyklovaná uhlíková vlákna [4]

2.1.5 Uhlíková vlákna budoucnosti

Sem lze zařadit například nanovlákna o průměru 0,2 μm s pevností až 7 000 MPa vyráběná technologií tak zvaného růstu v páře (Vapor-Grown Carbon Fibers). Dále jsou to nanotrubičky o délce do 5 mm vytvořené zatím jen v laboratorních podmínkách a ze kterých se (údajně) dají vyrábět příze s tažnou pevností až 150 000 MPa. [4]



Obr. 10. Struktura uhlíkové nanotrubičky [8]

2.2 Vlastnosti uhlíkových vláken

Průměrná hustota ρ uhlíkových vláken je okolo 1750 kg/m^3 a jejich jemnost neboli velikost d (průměr) je 5 – 10 μm . Od jiných druhů vláken se liší zejména:

- výrazně menším modulem pružnosti v kolmém směru k ose vlákna
- křehkostí – tažnost je menší než např. u skleněných vláken
- v kolmém směru má vyšší koeficient tepelné roztažnosti než sklo
- v podélném směru mají uhlíková vlákna malý elektrický odpor [4]

Tab. 1. Mechanické vlastnosti některých druhů uhlíkových a skleněných vláken [4]

| Vlákno/prekurzor | Pevnost v tahu | Modul pružnosti | Tažnost | Výrobce |
|-----------------------------------|----------------|-----------------|---------|------------------------|
| | [MPa] | [MPa] | [%] | |
| karbonizované z PAN (95 % uhlíku) | 5 500 | 250 000 | 1,9 | Toray, Japonsko (1997) |
| grafitované z PAN (99 % uhlíku) | 4 400 | 377 000 | 1,2 | Toray, Japonsko |
| mezofázová smola (99% uhlíku) | 3 800 | 900 000 | 0,4 | Mitsubishi, Japonsko |
| viskóza (99% uhlíku) | 1 200 | 100 000 | 0,5 | Sohim, Bělorusko |
| nanovlákno 0,2 μm | 7 000 | 600 000 | 0,5 | Applied Science, USA |
| S-sklo | 4 500 | 85 000 | 5,7 | Agy, USA |

Jako další vlastnosti lze považovat, že ty to vlákna mají desetinásobnou tuhost a poloviční hustotu oproti skleněným. Pevnost je nižší než u skla nebo aramidu nicméně mají vynikající tepelné vlastnosti, pokud jsou chráněna před oxidací. Využití až do teploty 1 000 °C a při ochraně před oxidací jsou využitelné až do 2 000 °C. Dále se vyznačují minimální teplotní roztažností a smrštitivostí. Do teploty 1 000 °C jsou chemicky inertní na rozdíl od skelných vláken. Vyznačují se velkou odolností proti únavě a jsou elektricky vodivá. Nejlevnější stojí dvojnásobek oproti skelným a ty nejkvalitnější až stonásobek. [9]

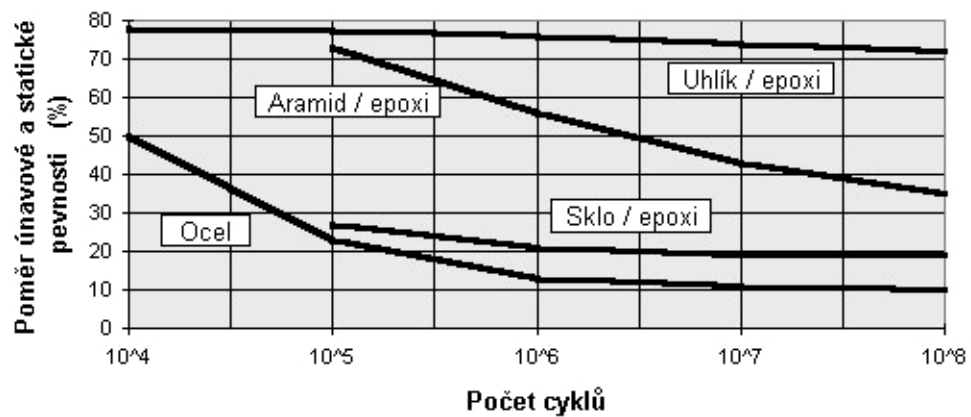
2.2.1 Výhody a nevýhody uhlíkových vláken

Za výhody uhlíkových vláken lze označit:

- nízká hmotnost
- vysoká pevnost
- vynikající absorpční vlastnosti rázů
- vysoká životnost
- velmi příznivá únavová charakteristika

Nevýhody uhlíkových vláken jsou:

- vysoká cena díky nákladné výrobě
- dodržení bezpečnosti při zpracování kde vzniká odpad ve formě třísek
- problém s recyklací [10]



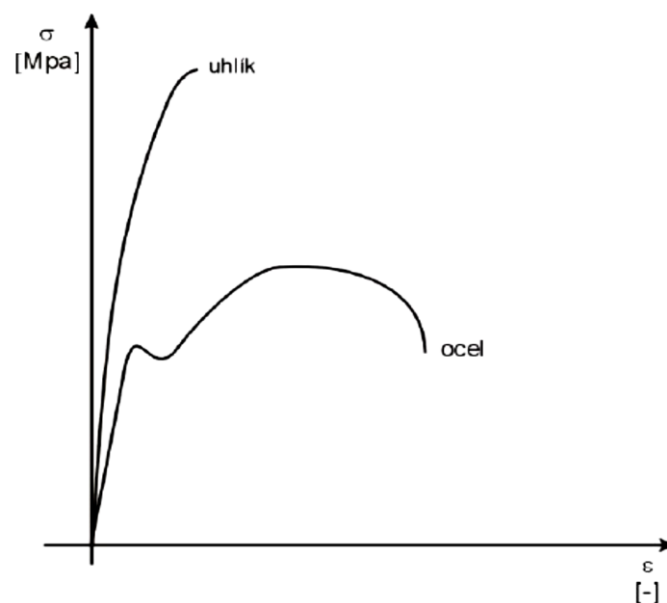
Obr. 11. Únavové chování různých druhů kompozitů [10]

2.2.2 Charakteristika uhlíkového vlákna a kompozitu

Uvádí se, že pokud se vyrobí součást z průměrné oceli a tu stejnou součást z kompozitu s uhlíkovými vlákny, tak kompozitová snese desetkrát větší zatížení, než ocelová.

Uhlíková vlákna lze dostat v různých velikostech, které se určují v tisících (K) vláken a to jako 1K, 3K, 6K, 12K, 24K, 50K a další. Tato vlákna jsou tkané do tkaniny různými vzory. Dále se nejčastěji používá tzv. UD (unidirectional) jednosměrné vlákno.

Výhodou vláken s vyšším modulem je méně materiálu pro dosažení stejné tuhosti a tedy lehčí konstrukce. Dosažení vyšší tuhosti lze dosáhnout zmenšením průměru vlákna, ale oproti tomu se musí zvýšit jeho hustota v prameni. Cena uhlíkových vláken se pohybuje od 20 až do 1000 euro za kilogram. [10]



Obr. 12. Tahová charakteristika oceli a kompozitu [2]

2.3 Použití uhlíkového vlákna

Uhlíková vlákna se používají výhradně pro technické účely a naprostá většina z nich se uplatňuje jako výztuž kompozitů. Podíl výztuže obnáší maximálně 80 procent váhy kompozitu, uhlík se přidává ve formě mletých vláken, sekaných pramenů, rovingů, rohoží, tkanin.

Hlavní využití těchto vláken je v automobilovém průmyslu, kde se vyrábí převážně díly karosérie, jako jsou blatníky, kapoty, střechy a jiné. V dnešní době lze vidět i automobily vyrobené kompletně vyrobené z kompozitu na bázi uhlíku jako je například BMW i3 a sportovní BMW i8.



Obr. 13. Automobil BMW i8 vyroben z uhlíkového kompozitu [11]

Nyní se uhlíkový kompozit používá i na konstrukční součásti jak osobních sportovních aut tak i na supersportovní vozy. Takovým konstrukčním a důležitým dílem je například disk kola neboli ráfek, který se běžně vyrábí z oceli a hliníku. Dále jsou to ramena zavěšení kol a jiné prvky. Ve formuli 1 jsou všechny tyto prvky vyrobené z uhlíkového kompozitu, kvůli úspoře hmotnosti a tím snížení spotřeby paliva, kromě motoru a převodovky. Celá karosérie neboli tzv. monokok formule 1, ale i sportovních a supersportovních aut je také z tohoto druhu kompozitu. V poslední řadě se dá použít na součásti v interiéru těchto vozů, jako jsou panely výplní dveří, palubní desky, sedadla, lišty a na jiné interiérové prvky.



Obr. 14. Karbonový automobilový ráfek [12]

Dalším využití je v leteckém a kosmickém průmyslu. V leteckém průmyslu jsou to kryty proudových motorů, vrtule a křídla malých sportovních letadel tzv. ultralehkých, ale i jejich celé trupy jsou vyrobeny z tohoto kompozitu. V kosmickém průmyslu jde hlavně o celá těla raket a trupů palivových nádrží. V neposlední řadě jsou uhlíkové kompozity použity i na součástky na satelity, družice ale i na sondy, které letěly například na Mars.

Nicméně toto nejsou jediné odvětví, kde se tento kompozit využít. Další oblasti jsou například zdravotnictví, cyklistika, sportovní pomůcky, pažby zbraní ve zbrojním průmyslu, trupy lodí a jiné.



Obr. 15. Karbonové sjezdové lyže [13]

3 PŘEHLED TECHNOLOGIÍ PRO VÝROBU KOMPOZITŮ

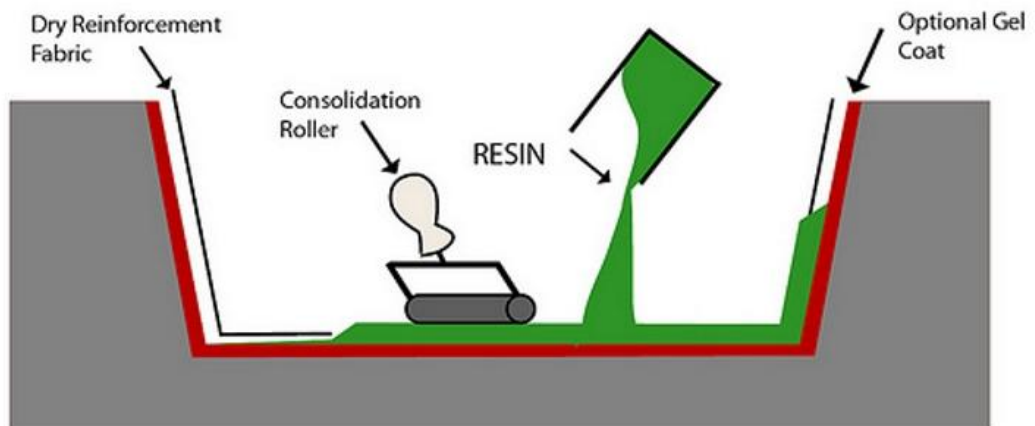
Technologií pro cílenou výrobu kompozitů je široká škála. Technologické postupy uvedené v této kapitole se nejčastěji používají pro přípravu polymerních kompozitů, které se využívají v automobilovém průmyslu. Hlavně se jedná o matrice, které jsou tvořeny nenasycenými polyesterovými a epoxidovými pryskyřicemi, vyztužené skelným či uhlíkovým vláknem. Dále jsou popsány jednotlivé technologie výroby kompozitů, které se používají v automobilovém průmyslu.

3.1 Ruční laminování

Ruční laminování je nejstarší a nejjednodušší výrobní postup kompozitních materiálů, který je vhodný zejména pro kusové a malé série, prototypy automobilů a hlavně na velkoplošné díly jako jsou například lodě nebo větrné elektrárny. Kvalita povrchu vyrobeného dílce je dobrá pouze z jedné strany při použití jednodílné formy. Výrobní proces je možné rozdělit do čtyř hlavních částí, a sice na přípravu formy, což je nanesení separátoru a gel-coatu, pokládání vláken, sycení matricí a vytvrzení.

Výroba formy je časově nejnáročnější a při komplikovaných konstrukcích může být technologicky složitá. Do připravené formy se pokládá vyztužující tkanina, která je předem splétaná podle požadavku na celkový výrobek, spolu se sycením pryskyřicí. Pokládaná vyztuž může mít podobu jak výše zmíněné tkaniny, tak i rohože. Matrice se nanáší štětcem, válečkem anebo stěrkou. V průběhu nanášení dochází k sycení tkaniny, kdy do sebe vlákna nasáknou až polovinu matrice. Po prosycení se celá plocha pečlivě stlačí válečkováním nebo přiložením druhého dílu formy. V tomto kroku hrozí vznik vzduchových bublin. Jejich přítomnost se následně v laminátu negativně projevuje ve snížení mechanických vlastností. Pro úplné odstranění bublin z kompozitu se využívá speciálního válečku složeného z malých disků nebo bezpečnější je varianta použití autoklávu, kde je provedeno vakuování dílu tím, že je vysát veškerý vzduch, vzniká podtlak a dochází k poměrně dokonalému vzájemnému přitlačení vrstev. Posledním krokem je vytvrzování, které může probíhat za pokojových nebo zvýšených teplot, což závisí na typu použité matrice. Dobu vytvrzování pryskyřice tzv. geltime lze zkrátit použitím urychlovače.

Tato technologie vyžaduje určité ochranné vybavení pro pracovníka z důvodu odpařujících se a aplikovaných pryskyřic. Patří sem ochranné rukavice, oděv, rouška, brýle, obuv a ochrana hlavy. [14], [15]



Obr. 16. Schéma principu ručního laminování [16]

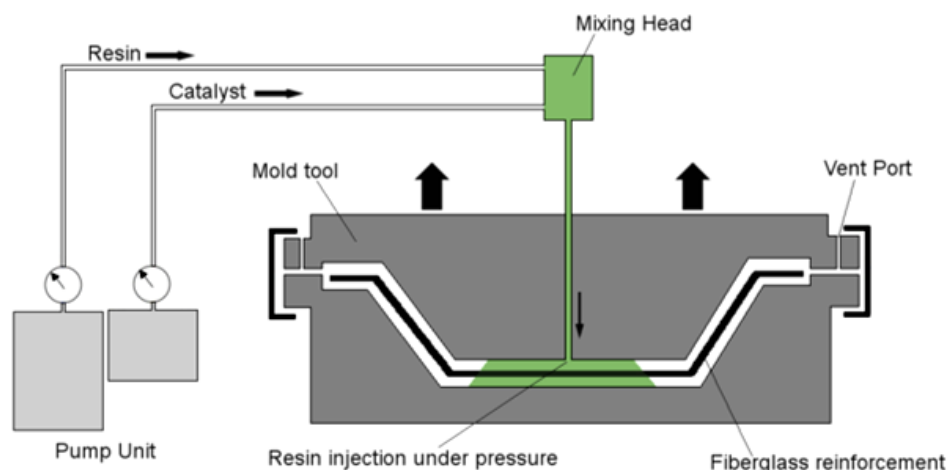
Výhody ručního laminování jsou především její jednoduchost výroby, minimální náklady na nástroje, neomezená škála tvarů a velikostí. Jedna z hlavních nevýhod je velké množství velmi těžko recyklovatelného odpadu. Další nevýhodou je dlouhý výrobní čas. Dále pak kvalita výrobku, do velké míry, závisí na zkušenostech pracovníků. Jak už bylo řečeno, nejčastější využití této metody je v lodním, energetickém, leteckém a automobilovém průmyslu.



Obr. 17. Příklad ručního laminování střechy na Lamborghini [17]

3.2 RTM

RTM (Resin Transfer Molding) je metodou výroby kompozitních materiálů většinou v automobilovém průmyslu. Jedná se o reakční technologii vstřikování pryskyřice do uzavřené formy, u které se při použití epoxidové nebo polyesterové pryskyřice do okolního prostoru neuvolňuje rozpouštědlo. Pryskyřice a katalyzátor se pomocí nízkotlakých čerpadel dopravují do směšovací hlavy bezprostředně před injektáží směsi do formy. Výhodou RTM je, že oba povrchy dílu jsou hladké a rozměry dílu jsou relativně přesné. Podíl vyztužujících vláken a tedy i mechanické vlastnosti dílu je obvykle menší než při kladení jednosměrných prepregů, při navíjení anebo při pultruzi. Jako výztuž se používají tkaniny nebo rohože. RTM lze rozdělit do dvou fází. V první fázi se vyrobí tzv. preform neboli předlisek. V druhé fázi dojde k zastříknutí předlisku pryskyřicí, který byl umístěn do formy. Tvarový předlisek vzniká buď přímo pomocí některé textilní technologie nebo je vyroben tvarováním rovinného textilního přístřihu. Schéma RTM ukazuje obrázek 18.



Obr. 18. Schéma technologie RTM [19]

Tlak pryskyřice je cca 0,7 MPa. Doba vytvrzení je cca 15 minut. Záleží na struktuře předlisku, jeho tloušťce, velikosti a tvaru výrobku, druhu pryskyřice atd. Po uzavření formy a vstříknutí pryskyřice, která se pohybuje skrz výztuž respektive předlisek umístěný v dutině formy. Vzduch, který je uvnitř dutiny, je vytlačován postupujícím čelem pryskyřice. Aby mohl vzduch uniknout, jsou ve formě odvětrávací ventily, které jsou umístěny v nejvyšších bodech dutiny formy nebo v prostorách dutiny, které jsou plněny jako poslední. Když je dutina zcela vyplněna pryskyřicí, jsou ventily a vtoky pryskyřice uzavřeny. Po vytvrzení, které probíhá při teplotě okolí za pomoci tvrdidla nebo pomoci ohřevu, je výrobek po otevření formy z dutiny formy vyjmut. Sériovost je 300 – 5 000 ks. [14], [15], [18]

3.2.1 Modifikace RTM

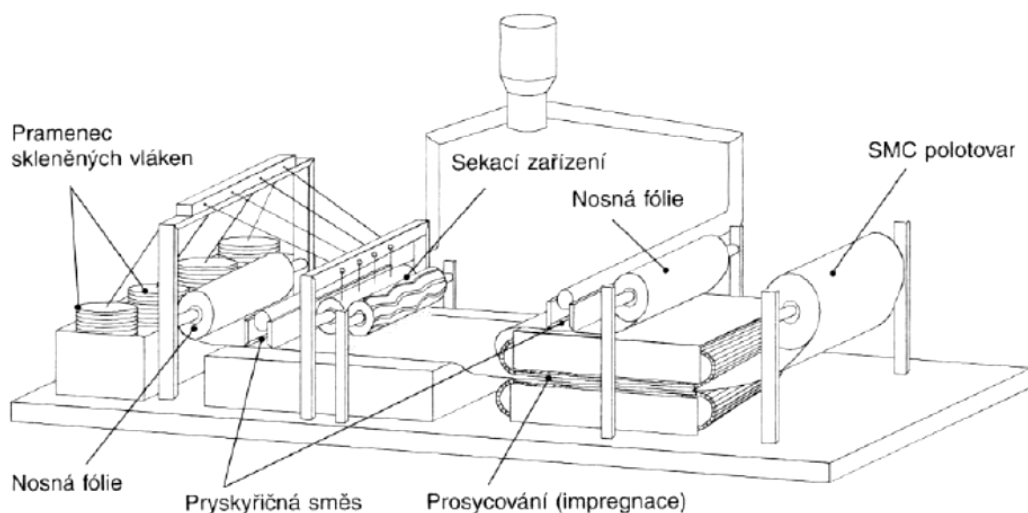
- **LRTM (Light Resin Transfer Molding)** – Kromě RTM existuje taky LRTM, které nevyžaduje při vstřikování, tak vysoké tlaky pryskyřice. Tlak se pohybuje v rozmezí 0,1 až 0,3 MPa, což dovoluje měně tuhé a lehčí formy. Pryskyřice je nasávána podtlakem. Pro menší série výrobků stačí jedna forma, naopak pro větší série je potřeba větší počet forem. Jde o výrobní postup, kdy jedna polovina formy je nahrazena fólií a funkci plnicího tlaku přebírá atmosférický tlak. Nutností pro správný průběh procesu je vytvoření podtlaku v dutině formy pomocí odsávacích ventilů umístěných na okrajích výrobku. Plnění pryskyřicí probíhá nejčastěji ve středu dílu.
- **SQRTM (Some Qualified Resin Transfer Molding)** – Jedná se o uzavřenou metodu, která kombinuje zpracování prepregu a technologii RTM. U této technologie se pro vytvrzení nepoužívá autokláv, ale kvalita výrobků je na vysoké úrovni. SQRTM se odlišuje od běžného RTM především tím, že se nepoužívají suché polotovary neboli preformy, ale používají se zde prepregy. Tyto prepregy jsou kladeny do formy, poté se forma uzavře a do formy se vstříkne malé množství pryskyřice. Hlavní je přesné umístění vtokových ústí, tak aby vakuum bylo v celé dutině formy konstantní. Pryskyřice není určena k prosycení prepregu, ale jen udržuje je stabilní hydrostatický tlak. Dále také zajistí, aby ve formě nezůstávali vzduchové kapsy nebo těkavé látky. U většiny výrobků téměř nedochází k vadám díky použití prepregu. Technologie se používala při výrobě střech vrtulníků Sikorsky.
- **VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding)** – U této modifikace dochází ke vstříknutí pryskyřice o malé viskozitě spolu s reaktivním činidlem, což teče do dvoudílné formy, ve které je předtvarovaná výztuž neboli preform. Tok pryskyřice je vyvolán jak vstříknutím, tak podtlakem. Běžnější je použití jednodílné formy. Druhá strana formy je tvořena fólií, filmem nebo vakem. Název VARTM bývá často používán i pro infuzní technologie, kdy k toku pryskyřice dochází jen díky podtlaku. Proces také nevyžaduje autokláv. Jedná se o vakuovou pomoc při technologii RTM a LRTM. Obvykle se používá u forem, které jsou složité a mají místa, kde mohla špatně zatékat pryskyřice. Proto se po obvodu nebo středu vytvoří vakuum, které nasává pryskyřici. Díky této technologii je menší šance, že budou vznikat suchá místa nebo bubliny, taktéž dojde k odsátí přebytečné pryskyřice a tím se zvýší obsah vlákna ve výrobku. Technologie je velmi rozšířená díky úspoře času při výrobě, a proto se používá především v lodním průmyslu a také v automobilovém.

- **HSRTM (Hight Speed Resin Transfer Molding)** – Nejčastější použití tohoto typu technologie RTM je v automobilovém průmyslu, proto je nutné, aby byla pryskyřice co nejrychleji vytvrditelná, aby se výrobek mohl během krátké doby vyndat z dutiny formy. Pryskyřice, pro tento typ plnění, jsou tak vysoce reaktivní, že se požaduje, aby při konci plnění byla pryskyřice už pomalu vytvrzena. Řešení je navrženo tak, aby se katalyzátor vyvíjel v průběhu času plnění a aby poslední kapky pryskyřice obsahovali více katalyzátoru než ty na začátku. Pryskyřice se smíchává s katalyzátorem těsně před vstupem do formy a tím je spuštěn proces vytvrzování až přímo ve formě. Je nutné, aby čas vytvrzení pryskyřice byl co nejpřesněji spočítán. Forma je zde plně vyhřívána a to většinou pomocí elektrických topných těles. U technologie HSRTM je velmi důležité mít své parametry pro nastavení procesu vzhledem k tomu, že je velice těžké zde určit vstřikování do formy a čas vytvrzení. [14], [15], [18]

3.3 SMC

SMC je zkratka z anglického výrazu Sheet Molding Compound, což je technologie kombinující matrici složenou z 12 až 15 složek, kde základem je nenasycená polyesterová pryskyřice a plnivo, s výztuží tvořenou vlákny ze skleněných nebo uhlíkových vláken. Matrice je při zpracovatelském procesu v podobě tekutiny plastického charakteru, která se nanáší na nosnou fólii, což je zobrazeno na obrázku 18. Vlákná jsou sekány na délku 25 až 50 mm, které následně padají na nosnou fólii a procházejí prosycovací zónou, kde dojde k dokonalému spojení obou směsí. Takto vzniklý SMC polotovar neboli prepreg se navíjí do rolí o hmotnosti cca 300 až 400 kg, pro automobilový průmysl to bývají balíky až 1000 kg těžké a nechávají se 1 až 7 dní dozrát. Výsledkem je dobře zpracovatelný polotovar, který se dále zpracovává na hydraulických lisech. Tento SMC polotovar lze dále rozdělit podle určené struktury vláken. Mezi značnou výhodou této technologie patří jak nízká výrobní, tak i cenová náročnost. Mimo jiné povrchy součástí, které jsou vyrobeny touto technologií, dosahují vysokých kvalit a jsou tak velmi často využívány na části karoserií u osobních, sportovních a závodních vozů.

Skládování takto vyrobených polotovarů je obtížné z důvodu samovolného vytvrzení matrice při běžných podmínkách. Tudiž by se měly skladovat při snížených podmínkách a hlavně při nižší teplotě než je nula stupňů celsia. [15], [20]



Obr. 19. Schéma výroby SMC polotovaru [20]

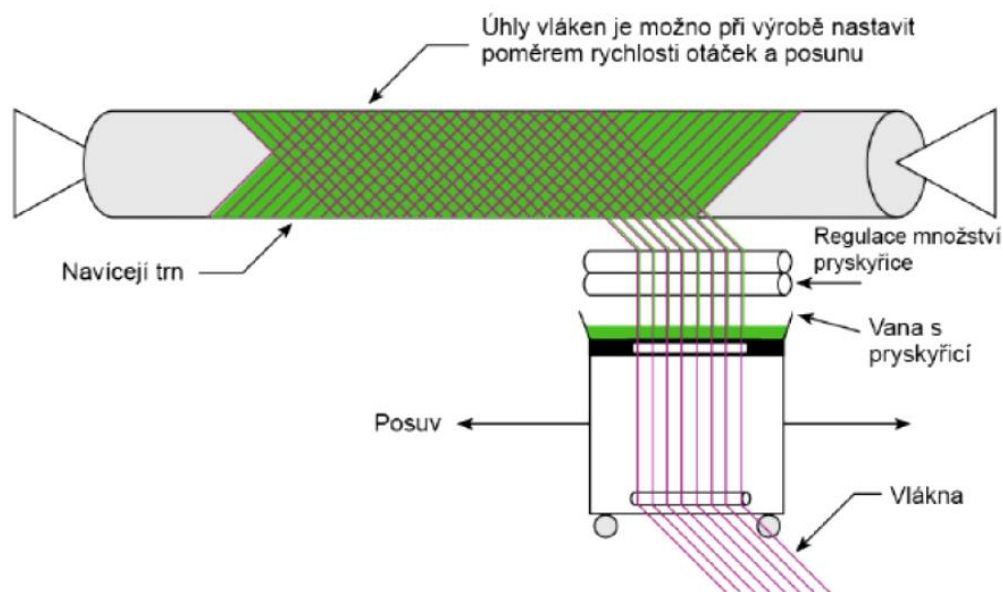
3.3.1 Modifikace SMC

- **SMC-R (Sheet Molding Compound Random)** – tato modifikace znamená to, že vlákna jsou náhodně uložena, krátká a nasekaná skleněná nebo uhlíková anebo jejich směs. Tento typ zpracování je nejjednodušší, nejlevnější a také nejčastěji využíván.
- **SMC-C (Sheet Molding Compound Continuous)** – zde jsou vlákna náhodně uložena, krátká a nasekaná spolu s jednosměrně uloženými skleněnými, aramidovými nebo uhlíkovými prameny. Dále mohou existovat jejich kombinace.
- **SMC-D (Sheet Molding Compound Directed)** – tenhle druh technologie SMC má náhodně uložena, krátká a nasekaná vlákna spolu s částí sekaných vláken, která jsou orientovaná a uložena o délce 75 až 200 mm. Tento typ struktury se převážně aplikuje na konstrukční prvky, které jsou nosné.

Na stejném principu funguje i technologie výroby prepregů, kde místo krátké sekané výztuže z vláken, která je náhodně orientována, je přesně definovaná výztuž ve formě tkaniny s plátňovou, keprovou nebo saténovou vazbou. Tento druh polotovaru se pro výrobu kompozitů využívá na ráfky pneumatik, částí karosérií jako je střecha, dveře a jiné. Důvodem je jednoduchý a časově výhodný zpracovatelský proces. Čas na prosycení pryskyřicí je zde delší, protože struktura výztuže je uspořádanější a hustější. Skladování by mělo být podle doporučených podmínek od dodavatele. [15], [20]

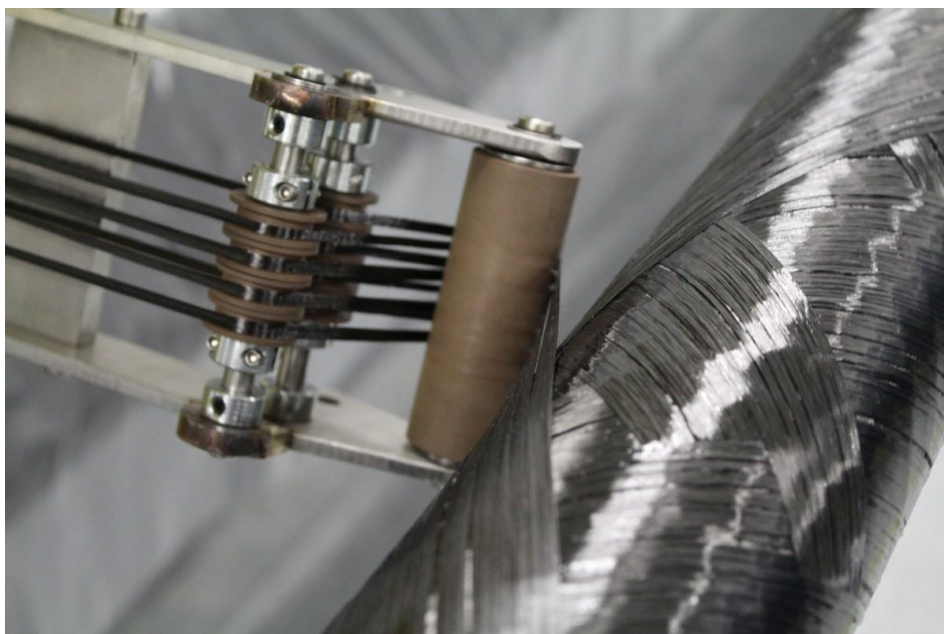
3.4 Navíjení

Jedná se o kontinuální proces, při kterém se v drtivé většině vyrábějí duté součásti. Samotný proces spočívá v navíjení výztuže ve tvaru vláken neboli rovingu na formu, která rotuje. Forma má tvar budoucího výrobku zmenšená o tloušťku jeho stěny a má funguje jako trn. Může mít kruhový, ale i nekruhový tvar. Předtím než je roving navinut prochází buď vanou s pryskyřicí, nebo se pohybuje na pěnovém kotouči, který se brodí v pryskyřici anebo se navine suché a pryskyřice se aplikuje až po navinutí štětcem, válečkem nebo stříkací pistolí. Suché navíjení probíhá po vrstvách, aby byl zaručen poměr výztuže a matrice. Množství pryskyřice je dosahováno průchodem namočeného vlákna šterbinou, která přebytečnou pryskyřici odstraní a udává vhodné tahové přepětí v navíjeném rovingu. Dále roving prochází okem a poté na příslušnou formu. Snímání výrobku z trnu usnadňují příslušné úkopy. U navíjení dochází ke kombinaci rotačního pohybu formy a posuvného pohybu vlákna. Lze to přirovnat k soustruhu. Velkou výhodou je, že lze tvořit součásti, které mají konkrétní vlastnosti díky možnosti nastavení úhlu šroubovice, který roving vytváří při navíjení a jejich orientaci a uspořádáním. Samotný úhel se mění rychlostí posuvu vlákna. Pokud se vyrábí součásti s otevřenou dutinou tak trn lze vyjmout, ale pokud je uzavřena tak jádro se stává součástí výrobku. Mezi další výhody patří vysoká produktivita a výborné mechanické vlastnosti. Mezi nevýhody lze zařadit vysokou pořizovací cenu výrobního zařízení. [14], [15], [18]



Obr. 20. Schéma technologie navíjení [15]

Tuto technologii lze vcelku dobře automatizovat pro vysokou produktivitu. Technologie se používá pro výrobu trubek, kolen a dalšího potrubního systému. Často se využívá i na výrobu sportovního vybavení, jako jsou lyžařské hůlky, rybářské pruty a golfové hole. Výsledné produkty navíjení jsou dutá tělesa, nádrže a trubky. Obrovské využití je v kosmickém a hlavně leteckém průmyslu a to na výrobu listů rotorů helikoptér a výrobu nosů letadel z uhlíkových vláken. V automobilovém průmyslu se touto technologií vyrábějí převážně hnací kardanové hřídele pro sportovní a upravené osobní vozy. Takový hřídel je až sedmkrát lehčí než ocelový a má příznivější chování na krut díky své struktuře. [14], [15], [18]



Obr. 21. Výroba uhlíkového kardanového hřídele [21]



Obr. 22. Uhlíkový kardanový hřídel [22]

4 FORMY PRO VÝROBU KOMPOZITNÍCH SOUČÁSTÍ

Základem pro výrobu v podstatě všech kompozitních součástí je forma, ve které se finální výrobky teprve vyrábějí. Formy je možné vytvořit mnoha způsoby a z mnoha různých materiálů dle individuálních požadavků, které jsou na konkrétní formy kladeny. Mezi tyto požadavky lze zařadit:

- velikost, složitost a členitost geometrie formy
- přesnost a kvalita povrchu
- cenová dostupnost
- požadovaná trvanlivost vzhledem k počtu vyrobených kusů
- nízká hmotnost z důvodu manipulace
- rozměrová stálost při zpracovatelských teplotách okolo 80 °C
- mobilní provedení

Formy lze vyrobit s různými povrchy, jako je hladký s vysokou lesklostí, lesklý, matný, polomatný, strukturovaný, aj. Je dobré ještě vědět, že pro výrobu kompozitní formy je potřeba nejprve nějaký tvarový vzor neboli model, ze kterého se teprve forma snímá. [23], [24]

4.1 Rozdělení forem na kompozity

Formy jako takové lze rozdělit dle konstrukce na:

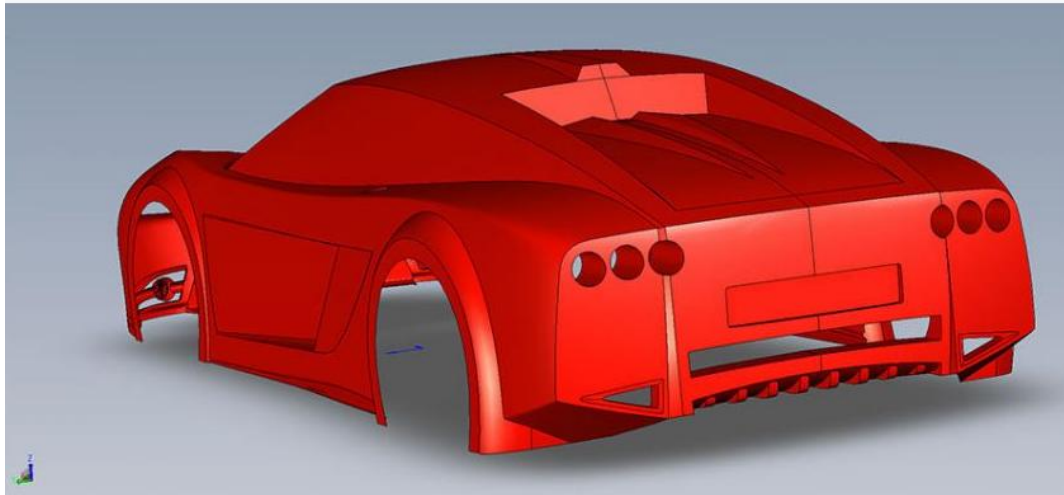
- Jednodílné
- Dvoudílné

Dále je lze rozdělit podle toho, z jakého materiálu jsou vyrobeny:

- Kompozitní
- Kovové
- Ostatní materiály [24]

4.2 Kompozitní formy

Výroba těchto druhů forem se dělí do tří základních fází. V první fázi se začíná konstrukcí a modelováním samotného výrobku ve 3D CAD softwarech jako je například Catia. Zde probíhá vývoj z hlediska mechanického namáhání a aplikují se konstrukční prvky pro zaformování a odformování budoucí součásti.



Obr. 23. Virtuální model karoserie vozu [25]

Ve druhé fázi se na základě virtuálního modelu vytvoří, pomocí obvykle pětiosého CNC stroje a programu, skutečný model v měřítku 1:1 zvětšený o hodnotu smrštění jak materiálu formy, tak i materiálu výrobku. To zaručí velmi přesné geometrické tvary a rozměry. Jako materiál skutečného modelu se používají tzv. MDF desky neboli desky z umělého dřeva. Dále je to přírodní dřevo, polystyren, a jiné levné dobře obrobitelné plasty a materiály. Pokud se použijí polotovary ve formě desek, tak se musejí nejdříve k sobě přilepit lepidlem nejčastěji na bázi polyuretanu. Po vytvrdnutí se může přejít k samotnému obrábění. Případné kosmetické vady se mohou vytmelit a přebrousit. [25]



Obr. 24. Obrobený skutečný model z MDF desek [25]

V poslední třetí fázi dochází k samotné výrobě kompozitní formy. K výrobě se často používá skelné vlákno ve formě sekaných vláken spolu s pryskyřicí, protože jsou cenově nejdostupnější. Forma se tvoří metodou laminování, kde se nejprve nanese separátor pro lepší sejmutí formy. Poté se nanese vrstva, která zaručí kvalitu a životnost funkční plochy formy a pak se aplikuje skelné vlákno spolu s pryskyřicí. Po vytvrzení se forma sejme z modelu a mohou se začít vyrábět kompozitní výrobky pomocí této formy. Mezi další postupy výroby forem lze zařadit také navíjení. Forma může být jako jeden celek, to se využívá u menších součástí anebo může být dělená z důvodu lepšího zaformování a kvůli snadnější manipulaci a skladování. Toho se využívá u větších forem například pro výrobu listů rotorů větrných elektráren. Samozřejmě lze vytvořit formu pomocí jen CNC stroje a programu, ale tento postup je zdlouhavý a ekonomicky náročný protože by se muselo použít větší množství materiálu a také větší obráběcí stroj. Samotnou formu může tvořit i skutečný model.



Obr. 25. Hotová kompozitní forma [25]

Tyto formy jsou cenově nejdostupnější a zároveň v drtivé většině případů naprosto dostačující. Jsou ovšem vyrobené ze speciálních formových materiálů, které zajišťují téměř nulovou smrštitivost při výrobě formy, její tvarovou stálost, výbornou leštitelnost, separovatelnost, dlouhou životnost atd. Obrovskou výhodou forem na této bázi je především zmíněná cena, která je o několik řádů nižší než ceny např. hliníkových forem, ocelových forem nebo jiných forem vyráběných standardním způsobem. Další neméně důležitou výhodou kompozitních forem je jejich hmotnost, která je opět několikanásobně nižší než u standardně vyráběných forem, takže je výrazně usnadněna manipulace s nimi a jejich přeprava.



Obr. 26. Hotová kompozitní karosérie vozu [25]

4.3 Kovové formy

Tento druh forem slouží především pro výrobu pohledových dílů, které jsou vyráběny ve velkých sériích. Nejčastěji používaným materiálem je hliník díky své velmi dobré leštitelnosti a dobré obrobiteľnosti. Dalším kovovým materiálem na výrobu forem je ocel, jejíž předností je použití při vysokých teplotách a tlacích. Této výhody se využívá hlavně při výrobě kompozitů, kde matici tvoří keramické pojivo a výztuž tvoří uhlíkové částice, které tuto vysokou teplotu a tlak snesou. Ocelové formy se hlavně používají na výrobu brzdových kotoučů do automobilů, které jsou právě na bázi uhlíkové výztuže a keramické matrice. Tyto kotouče mají uplatnění hlavně ve sportovních vozech a formuli 1 a díky své vysoké ceně. Do ceny kotouče se samozřejmě promítá i cena za samotnou formu. Lze je využít i pro formu do, které se odlévají lože obráběcích strojů z kompozitu na bázi polymerbetonu.

Výrobu kovové formy lze rozdělit na dvě fáze oproti kompozitní. V první opět dochází k vývoji a konstrukci virtuálního 3D CAD modelu a ve druhé již dochází k samotné výrobě formy pomocí CNC stroje a programu, která je zvětšena o smrštění materiálu budoucího výrobku. Tyto formy jsou vhodné pro menší díly, které ovšem musí odpovídat vysokým nárokům na kvalitu budoucího výrobku. Temperace těchto forem je zde zdlouhavá protože se musí prohřát v celém objemu. Cena je samozřejmě mnohem vyšší než u kompozitních.



Obr. 27. Příklad hliníkové formy [26]

4.4 Ostatní materiály forem na kompozity

Mezi ostatní druhy materiálů, které se dají použít na výrobu forem pro kompozity lze zařadit například stavební hmoty na bázi cementu, sádry a jiných. Dále to pak může být samotný beton nebo polymerbeton, který byl již zmiňován v souvislosti s obráběcími stroji. Jeho výhodami jsou například takřka nulová smrštitivost a teplotní roztažnost. Dále to může být vysoká životnost funkční tvarové plochy, použití za extrémních teplot a tlacích. Polymerbeton se skládá z výztuže ve formě minerálů, jako je žula, živec a křemen s různou zrnitostí, a matrice kterou tvoří pryskyřice na bázi epoxidu a tvrdidlo. S těmito druhy matric se dají použít jen do teplot okolo 80 °C. Obrovskou nevýhodou je jejich hmotnost, která může dosáhnout i desítek až stovek tun. Tyto formy jsou statické a nelze je převážet a tudíž nejsou mobilní. Používají se na hromadnou výrobu.

5 PŘEHLED TYPŮ DISKŮ A RÁFKŮ V AUTOMOBILISMU

Pneumatika jako celek je tvořena diskem, který je přišroubován k náboji na konci nápravy. Disk obsahuje ráfek, který je opatřen pryžovým kompozitem v podobě pláště. Tento plášť má potřebnou nosnost a umožňuje přenos sil mezi vozidlem a vozovkou za různých podmínek. Úkolem pneumatiky je tedy nést hmotnost vozidla a také přenášet síly mezi vozidlem a vozovkou, a obohacovat pružicí systém vozidla, protože patří mezi neodpružené hmoty automobilu a proto je nutné, aby měly co nejmenší hmotnost. Dále musí mít potřebnou pružnost, pevnost a musí být dobře vyvážena, aby se zabránilo přenosu vibrací na vozidlo, což má nepříznivý vliv na nápravy a bezpečnost jízdy. [27]

5.1 Rozdělení disků

Disk se skládá ze střední nosné části a ráfku. Existuje několik konstrukcí střední nosné části disku, podle kterých je lze rozdělit na:

- diskové
- hvězdicové
- paprskové
- drátové

Podle použití se rozeznávají disky pro:

- motocykly
- osobní automobily
- nákladní automobily
- autobusy
- přípojná vozidla
- zemědělské a stavební stroje

Podle počtu pneumatik na náboji nápravy lze rozdělit také na:

- jednoduchá
- podvojná

Disky spolu s pláštěm pneumatiky jsou připevněny k nábojům šrouby. Středění disků může být na šroubech a upevněn pomocí matic s podložkami, což umožňuje snadnější demontáž tohoto disku. Další středění je na hlavách šroubů a dává šroubovému spoji větší bezpečnost, avšak demontáž je obtížnější. V motosportu se středí pomocí centrální matice. [28]

5.2 Typy ráfků

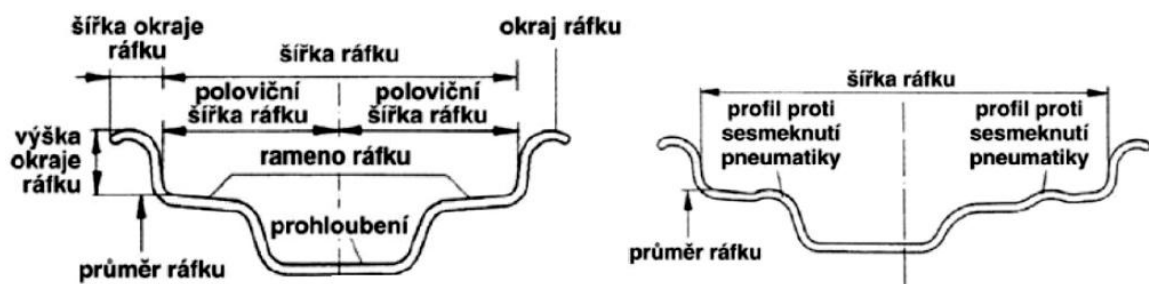
Ráfek je součástí disku sloužící k uložení pláště, který musí být s ráfkem spojen tak, aby mohly být přenášeny svislé, boční a obvodové síly bez relativního pohybu mezi pláštěm a ráfkem. Nejvíce se vyrábí ocelové, ovšem s postupujícím časem začíná u osobních automobilů převaha používání ráfků z hliníkových slitin z důvodů nižší hmotnosti.

Ráfký se dělí na:

- jednodílné
- vícedílné

Dále lze jednodílné ráfký rozdělit na:

- symetrické
- asymetrické [28]



Obr. 28. Jednodílný ráfek: vlevo symetrický a vpravo asymetrický [28]

5.3 Druhy kol

Tato podkapitola se zabývá druhy disků neboli kol, které jsou rozděleny dle konstrukce střední nosné části. Bude zde uvedeno konstrukční provedení jednotlivých typů společně s jejich výhodami a nevýhodami.

5.3.1 Diskové kolo

Pro velkosériovou výrobu jako je produkce osobních a užitkových vozidel se pro tyto účely používají převážně ocelová disková kola. Ocelová disková kola se skládají ze dvou částí, jako je ráfek, což je profilovaný prstenec na obvodu kola, který nese plášť pneumatiky, a z nosného disku nebo kotoučové výplně kola, to slouží jako spojovací člen mezi nábojem a ráfkem. Obě tyto části jsou k sobě pevně spojovány odporovým nebo obloukovým svařováním případně nýtováním. Nosná část disku je opatřena otvory různých tvarů, což umožňuje dosáhnout nižší hmotnosti a díky tomu se i zlepšuje chlazení brzd. [27], [28]

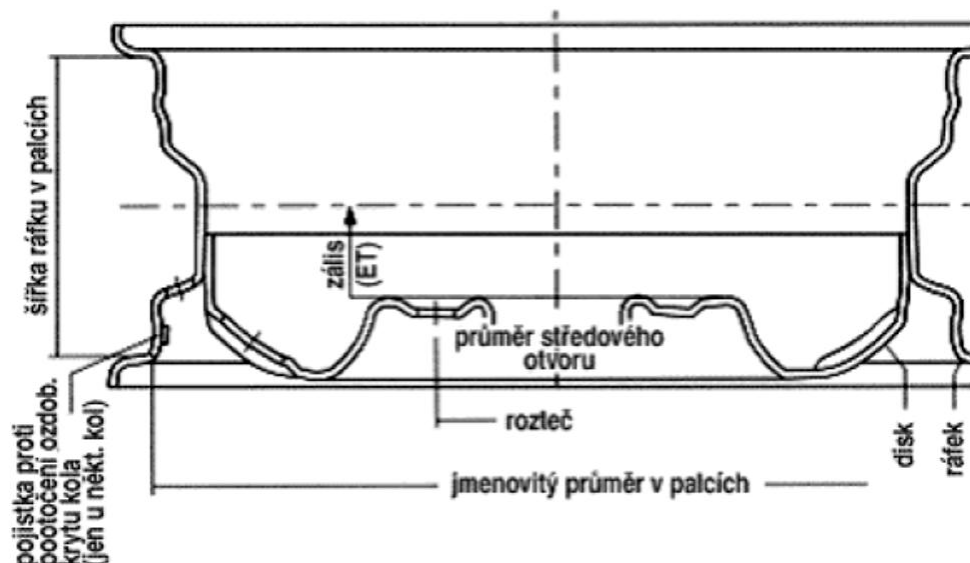
Rozměry spolu s označením diskových kol jsou stanoveny normami DIN, jako je například DIN 7817, 7820 a jiné. V současnosti jsou v souladu s mezinárodními standardy.



Obr. 29. Diskové kolo [31]

Jednou z největších výhod ocelových neboli plechových disků je cena, která je spojena s jednoduchou a relativně v dnešní době levnou výrobou s použitím levnějších materiálů. Další výhodou těchto disků, pokud jsou řádně ošetřeny, je použití v zimním období, kde jsou tyto kola odolnější vůči chemickým posypům.

Mezi nevýhody lze zařadit drahou výrobu nástrojů pro tento druh kol. Zásadním nedostatkem je design plechových kol, který zaostává oproti kolům z lehkých slitin. [27], [28]



Obr. 30. Hlavní rozměry diskového kola [31]

5.3.2 Hvězdicové kolo

Konstrukce hvězdicových kol je obdobná, jako u kol diskových jen nosná část je nahrazena hvězdicí, která je obvykle šestiramenná. Pro osobní vozy bývají hvězdice lisovány z tenkého ocelového plechu, a tudíž jsou lehká než u nákladních automobilů, kde se hvězdice odlévají jako jeden celek. Většinou jsou tyto kola opatřeny děleným ráfkem, jako je to například u hvězdicového kola s třídílným ráfkem Trilex.

Disky Trilex mají v porovnání s diskovými koly velké výhody, které se projevují při výměně kol a při montáži plášťů pneumatik. Jsou složena z hvězdice, která obsahuje náboj, trojdílný ráfek a spojujících součástí. Ráfky disku Trilex mají sice uzavřený profil, ale jsou rozděleny na tři stejné části. Při montáži ráfku Trilex se na hvězdici kola musí matice utahovat postupně po obvodu disku. V žádném případě se nesmí utahovat do kříže, jak se to provádí u diskových kol.



Obr. 31. Hvězdicové kolo typu Trilex [32]

Šesti paprsková konstrukce disku u systému Trilex má výhodu v tom, že při opravě nebo výměně pláště pneumatiky se snímá jen třídílný ráfek s pláštěm pneumatiky. Hvězdice se nedemontuje a zůstává na automobilu přišroubovaná součást brzdového bubnu. Dělitelný ráfek lze, při vypuštěném plášti, montážní pákou demontovat tak, že se vpáčí jeden konec dovnitř, a v tom okamžiku se ráfek rozpadne na tři oblouky, které lze snadno vyjmout. Jakmile se plášť pneumatiky nahustí, tak všechny tři sekce ráfku drží v sobě pohromadě a jako celek jsou na nosnou hvězdici přitáhnuty šesti trojúhelníkovými upínkami. Takovéto řešení mělo výhodu v nižší hmotnosti. Aplikace těchto druhů disků bylo spíše u autobusů a nákladních vozidel. Dnes tento typ disků lze vidět jen zřídka, protože jej nahradily jednodílné prohloubené disky pro bezdušové pláště pneumatiky. [29]

5.3.3 Drátové kolo

Drátové kolo je konstruováno tak, že ráfek je spolu s nábojem kola spojen paprsky ve formě drátů. Tyto dráty jsou uspořádány pod různými úhly, aby byly zachyceny zatěžovací a hnací síly, které jsou přenášeny mezi vozovkou a automobilem. Ovšem výroba tohoto disku, kde paprsky jsou rovnoměrně napnuty, vyžaduje systematický postup a je časově náročná. Samotný drát disku vyžaduje velkou pozornost, protože musí si udržet správné nastavení neboli napnutí a z tohoto důvodu je dnes tato konstrukce prakticky zastaralá. Jenže drátové disky se stále používají a to hlavně u starých motocyklů a automobilů dnes označované jako veteráni a proto se stále vyrábějí jako náhradní díly, ale jejich cena je hodně vysoká. Mimo to se tyto disky vyrábějí z designového důvodu hlavně v Americe.

Výhodou těchto disků je větší pružnost, pevnost a nízká hmotnost oproti diskovým kolům. Díky předpružení drátů se při průjezdu po nerovnosti sníží napětí v drátech a netrpí tak podvozek vozu. Nevýhodou je jejich vysoká cena, jsou náročné na údržbu a mají velký aerodynamický odpor.



Obr. 32. Drátové kolo [33]

5.3.4 Paprskové kolo

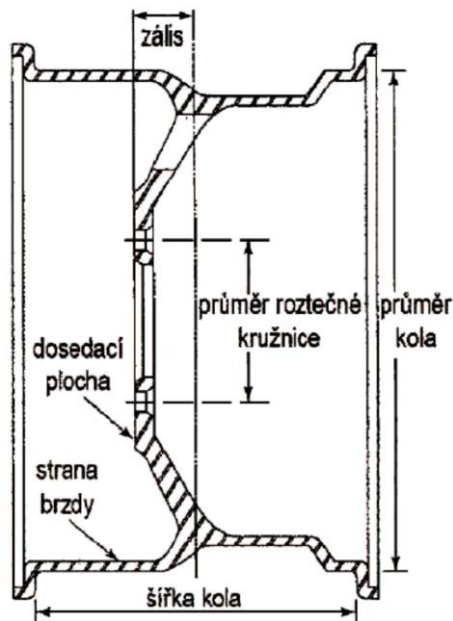
Dnes se u osobních automobilů nejčastěji používají paprsková kola z lehkých slitin. I skrze to, že v zimním období podléhají korozi a není doporučeno použití pro toto období. Nicméně vzhledem k nižší pevnosti oproti oceli je tloušťka stěn více jak dvojnásobná, tak hmotnost tohoto kola z legovaného hliníku je o 20% a z legovaného hořčíku o 40% menší. Tyto kola se tedy vyrábí převážně ze slitin hliníku a hořčíku. U těchto typů kol je důležité, aby funkční plochy a upevňovací otvory byly obráběny, a proto mají tato kola vysokou přesnost a tudíž mají vynikající házivost oproti ocelovým diskovým kolům. [27], [28]

Kola z lehkých slitin se vyrábí dvěma nejčastějšími způsoby, jedním z nich je odlévání, dvě nejobvyklejší odlévací metody jsou gravitační nebo nízkotlaké lití. Jako druhá technologie výroby je zápusťkové kování, které umožňuje vyrábět kola s velmi vysokou pevností o nízké hmotnosti. Kola bývají ve formě monobloku neboli jednodílná nebo vícedílná.



Obr. 33. Paprskové kolo z hliníku [34]

Obrovskou výhodou je nízká hmotnost a nízké setrvačné síly jak při rozjezdu, tak i při brzdění. Dále je to menší neodpružená hmota, lepší přilnavost k vozovce a lepší estetika. Nevýhodou je vyšší pořizovací cena než u ocelových disků, nižší pevnost materiálu, proto je nutné citlivě dotahovat šrouby nebo matice u těchto disků, nízká odolnost vůči solím v zimě. [27], [28]



Obr. 34. Hlavní rozměry kola z hliníku [27]

Jak už bylo řečeno tak kola se vyrábějí z:

- a) **Hliníku** – Hliníkový disk je vyroben ze slitiny hliníku a několika dalších lehkých kovů, které zlepšují jeho vlastnosti. Kvůli hlavnímu podílu hliníku jsou tyto disky označovány jako Alu disky. Odlévají nebo se kovají jako jeden kus, ale v případě šroubovaných kol jsou složeny z více dílů. V závěrečné fázi se na hliníkové disky nanáší ochranná vrstva laku. [30]
- b) **Hořčíku** – Hořčíkový disk je vyroben ze slitiny, která se nazývá elektron. Tyto disky jsou lehčí než hliníková a ocelová o 5 až 9 kg v závislosti na velikosti. Používají se hlavně pro závodní auta v motosportu. Bohužel hořčíková kola mohou velmi snadno začít hořet při případné nehodě, a je obtížné je uhasit, proto byly na některých závodech úplně zakázány. Tudiž tyto disky nelze doporučit pro silniční vozidla. Mimo jiné jsou velice drahá a některé mají nízkou odolnost vůči korozi. Další nevýhodou je, že mohou korodovat zevnitř a disk tak může prasknout a korodují více než hliníkové. Je nutnost disky často kontrolovat, například rentgenem. S hliníkovými disky tento problém odpadá. [30]

5.4 Porovnání paprskových kol s diskovými z lehkých kovů

Rozdílů mezi ocelovými disky a disky z lehkých slitin existuje nepřeberné množství. Pokud se rozhoduje mezi koupením hliníkových disků nebo plechových, tak rozhoduje hlavně bezpečnost, vzhled a cena. V zásadě se jedná o použití, ve kterém ročním období se hliníková nebo plechová kola budou používat. V zimě je jednoznačně lepší používat plechové disky a to z mnoha faktorů. Mimo to v zimě bývá vozovka namrzlá a často se upravuje směsí soli a štěrku. Existuje možnost vniknutí nečistot do brzdového systému z důvodu velkých mezer mezi paprsky, a tudíž mohou nastat komplikace při brzdění. U plechových disků se toto výrazně snižuje, protože míst, kde by se nečistoty dostaly ke kotouči, je méně. Naopak může tato situace nastat v létě, při vysokých teplotách a při častém brzdění. Jakmile je vůz v letním období osazen disky z lehkých slitin, potom na tom bude určitě lépe než s plechovými disky. Poněvadž při odvodu tepla od brzd je konstrukce litých kol s velkým prostorem mezi paprsky nedocentelná, protože nedochází k velkému zahřívání brzd. Hliníkové disky ztrácí v zimních měsících svůj lesk a korodují. Příčinou je sůl a další jevy, kvůli kterým se na nich vylučuje oxid hlinitý, a jakmile dojde k prudkému nárazu, tak mohou prasknout. Plechové disky jsou v tomhle případě výhodnější na úkor vzhledu.

6 SHRNUÍ TEORETICKÉ A CÍLE PRAKTICÉ ČÁSTI PRÁCE

Teoretická část diplomové práce se zabývala, co je to kompozit, jeho definici a rozdělení. Byl popsán podle toho, co obsahuje včetně jeho vlastností. Dále se podívala na samotný uhlík jako na materiál, jeho postup výroby a v jakých formách se vyskytuje. Následovala jeho charakteristika a využití. Navazuje popis jednotlivých technologií, včetně jejich modifikací, které umožňují výrobu uhlíkových kompozitů jako polotovary anebo hotové součásti. Na to následuje rozbor forem, které se pro výrobu uhlíkových kompozitů využívají z hlediska materiálů a požadavků kladených na tyto formy a dále na jejich postup výroby. Závěrem se zmiňuje o rozdělení typů ráfků a disků jakožto kol pro automobilový průmysl z hlediska materiálů, konstrukce a jejich výhod a nevýhod.

Cílem praktické části diplomové práce bude vytvoření designu disku pomocí 3D modelu v CAD softwaru. Následuje konstrukce formy na tento navržený ráfek popřípadě její výroba na CNC strojích. Poté bude popsán technologický postup výroby samotného uhlíkového disku včetně vytvrzovacích podmínek. Na závěr bude shrnutí celé této práce a její výsledky a formulace závěru.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 ÚVOD DO PRAKTICKÉ ČÁSTI DIPLOMOVÉ PRÁCE

Praktická část této diplomové práce se bude snažit přiblížit problematiku, jak hliníkové popřípadě hořčíkové disky, které se používají na studentské formuli ve VUT Brno, nahradit disky z uhlíkového vlákna. V první řadě bude popsán design a konstrukční prvky disku a jeho složení, což znamená, co všechno bude obsahovat výsledný produkt. Dále bude vysvětlena konstrukce vytvrzovacího přípravku neboli formy. Spolu s tím budou popsány její konstrukční prvky a funkčnost. Poté bude určena technologie, kterou se bude daný disk neboli ráfek vyrábět. Na to bude navazovat popis technologických podmínek pro vytvrzování. Nakonec proběhne diskuze a formulace závěru, ve kterém se popíší dosažené výsledky.

Důvodem je úspora hmotnosti, tak aby byly zachovány vlastnosti předešlých disků. Mezi tyto vlastnosti lze zařadit hlavně jejich pevnost, tuhost a únosnost. Dále to může být jejich těsnost, protože se jedná o bezdušový systém. S tím dále souvisejí jízdní vlastnosti vozu a jeho ovladatelnost.



Obr. 35. Výsledný návrh karbonového disku

8 POPIS PROGRAMŮ PRO TVORBU DISKU A FORMY

Praktická část diplomové práce dále popisuje programy, které byly použity pro tvorbu příslušných součástí. Nejdříve se věnuje CAD programu CATIA V5 ve verzi R19, který byl použit především pro návrh a tvorbu 3D modelů jak disku, tak i příslušné formy a dalších komponentů pro disk. Pro případné generování řezných drah, simulací a NC programů bude využit CAD/CAM program SolidCAM 2013, který je integrovaný v programu SolidWorks 2012.

8.1 CATIA V5

CATIA V5 je 3D software pro konstruování na počítači v oblastech CAD/CAM/CAE ale i v jiných nejrozšířenější CAx systém v automobilovém a leteckém průmyslu na světě.

Jedná se tedy o systém, který je schopen pokrýt kompletní životní cyklus výrobku tzv. PLM, což znamená návrh designu od koncepce, přes vlastní konstrukci, různé analýzy, simulace a optimalizace až po tvorbu dokumentace a NC programů pro vlastní výrobu.

Program se vyznačuje značnou úrovní průmyslové univerzality, což znamená, že může být nasazen do zcela rozdílných oblastí strojírenství. Široké spektrum modulů, kterými CATIA V5 disponuje a umožňuje vytvářet softwarové řešení sladěné s konkrétními podmínkami a požadavky uživatelů. Může to být například automobilový či letecký průmysl, výroba spotřebního zboží a stejně tak i výroba obráběcích strojů nebo investičních celků těžkého strojírenství.

V této práci byl použit program CATIA V5 ve verzi R19, kterou disponuje fakulta technologická na UTB. [35]

8.1.1 Hlavní oblasti využití programu CATIA V5

- Letecký průmysl
- Automobilový průmysl
- Lodní průmysl
- Elektrotechnický průmysl
- Energetický průmysl
- Spotřebitelský průmysl [35]

8.2 SolidCAM

Byl založen před více než 30 let a má tudíž bohaté zkušenosti s vývojem CAM systému jako je SolidCAM. Strategie integrace tohoto programu do významných 3D CAD systémů, jako je Inventor a v tomto případě SolidWorks vytvořila hlavní růst SolidCAM a ustanovila ho předním integrovaným CAM systémem.

Samotná struktura programu umožňuje CAM programátorům používat CAD systém, který už důvěrně znají, k programování svých CNC strojů. Skutečná provázanost s konstrukčním modelem umožňuje automatickou úpravou dráhy nástroje při změně modelu. Odpadá nutnost importování souborů.

Uživatelé jsou vybaveni těmi nejlepšími a nejvýkonnějšími nástroji CAM k programování jejich vlastními způsoby a nikdy se nepředpokládá, že tvůrci programu umí programovat obrobky lépe než oni sami. SolidCAM na svých webových stránkách poskytuje uživatelům bezplatné školící videa pro jeho užívání.

Tento systém disponuje 2D iMachining, 3D iMachining, 2,5D frézováním, vysokorychlostním obráběním, 3D vysokorychlostním frézováním, souvislým pěti osým frézováním. Dále je to soustružení, soustružení s poháněnými nástroji a měření sondou.

Jedinečná revoluční technologie iMachining uplatněná v SolidCAM šetří 70% i více času obrábění a dramaticky prodlužuje životnost nástroje. Tato technologie tvorby dráhy nástroje konečně naplňuje sliby inteligentních drah nástroje, které může používat kdokoliv, s jakýmkoliv vybavením pro zásadní urychlení času obrábění a snížení opotřebení stroje i jednotlivých nástrojů. Na rozdíl od jiných systémů, které nechávají uživatele hádat, iMachining přichází s modulem Průvodce technologií, který je uživateli spolehlivým partnerem při nastavování řezných podmínek a dalších parametrů obrábění tak, aby bylo možné dostat z existujícího vybavení maximum. [36]

8.2.1 Hlavní uplatnění programu SolidCAM

- Výroba forem a zápusťek v průmyslu
- Výroba komponentů pro letecký a kosmický průmysl
- Výroba pro zbrojní průmysl
- Výroba pro energetický průmysl
- Výroba pro automobilový průmysl
- Výroba pro elektrotechnický průmysl [36]

9 KONSTRUKCE DISKU PRO STUDENT FORMULI

9.1 Zadání

Zadáním této práce bylo navrhnout popřípadě vyvinout automobilový disk z uhlíkových vláken neboli karbonu pro student formuli, která se každoročně modernizuje a vyvíjí na VUT v Brně. Tento disk by měl disponovat nižší hmotností než původní hliníkové anebo hořčíkové disky, které vyrábí italská firma O. Z. racing, při zachování původních vlastností disku, kvůli snížení spotřeby paliva, ale hlavně kvůli zvýšení rychlosti, poněvadž se sníží celková hmotnost celého vozu.



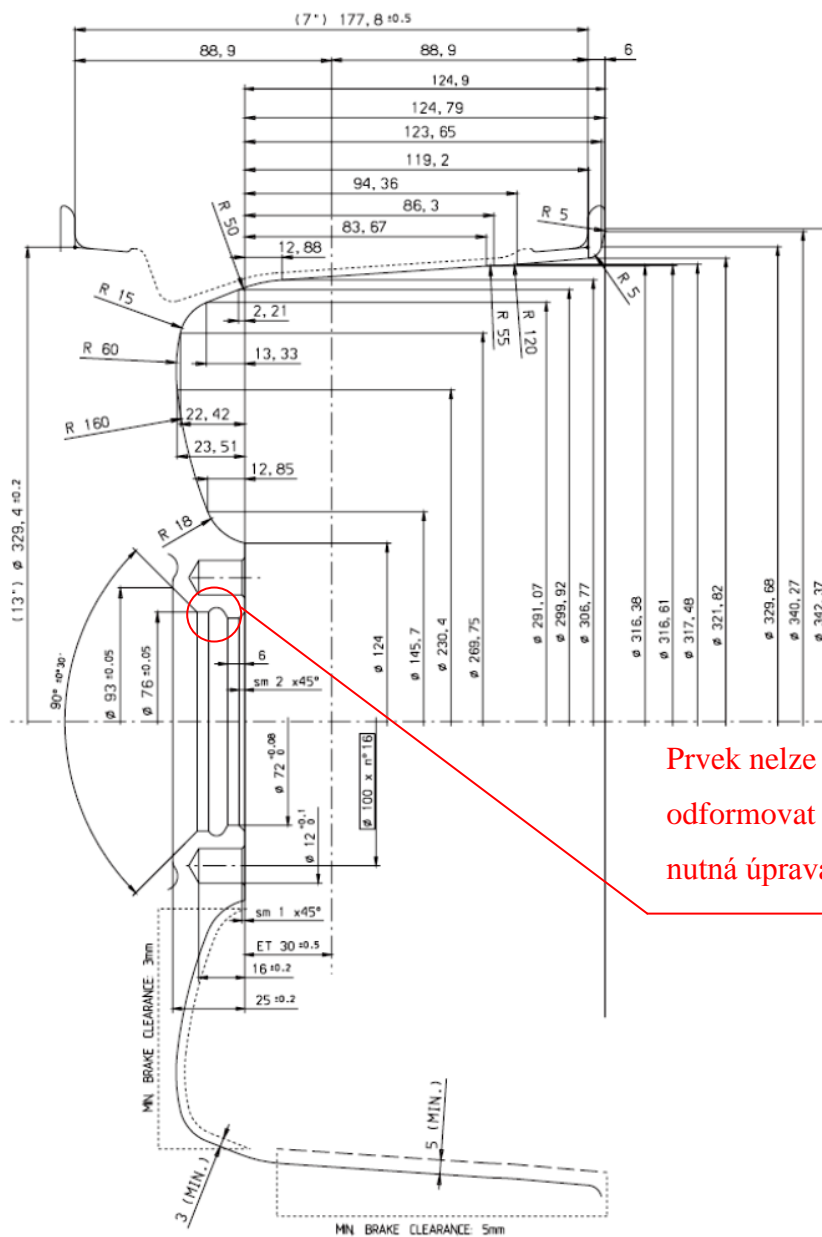
Obr. 36. Hořčíkový disk nyní používaný na student formuli ve VUT Brno

Jak lze vidět na obrázku 36, tak upínání disku na náboj je pomocí centrální matice s kuželovou dosedací plochou. Toto uchycení je jednoduché a umožňuje rychlou výměnu těchto pneumatik. Tyto disky jsou kovány, protože tento materiál to vyžaduje, a kdyby byly odlévány, nedosahovaly by požadované pevnosti a jiných mechanických vlastností.

9.2 Požadavky

Hlavními požadavky jakožto kritérii, na které se kladl důraz, byly:

- Zachovat tvar profilu ráfku
- Zachovat průměr ráfku a šířku ráfku
- Velikost zálisu neboli ET zůstala stejná
- Stejné uchycení disku na náboji pomocí centrální matice
- Co nejmenší počet paprsků a počet otvorů 12 pro unašeč
- Snadné odformování

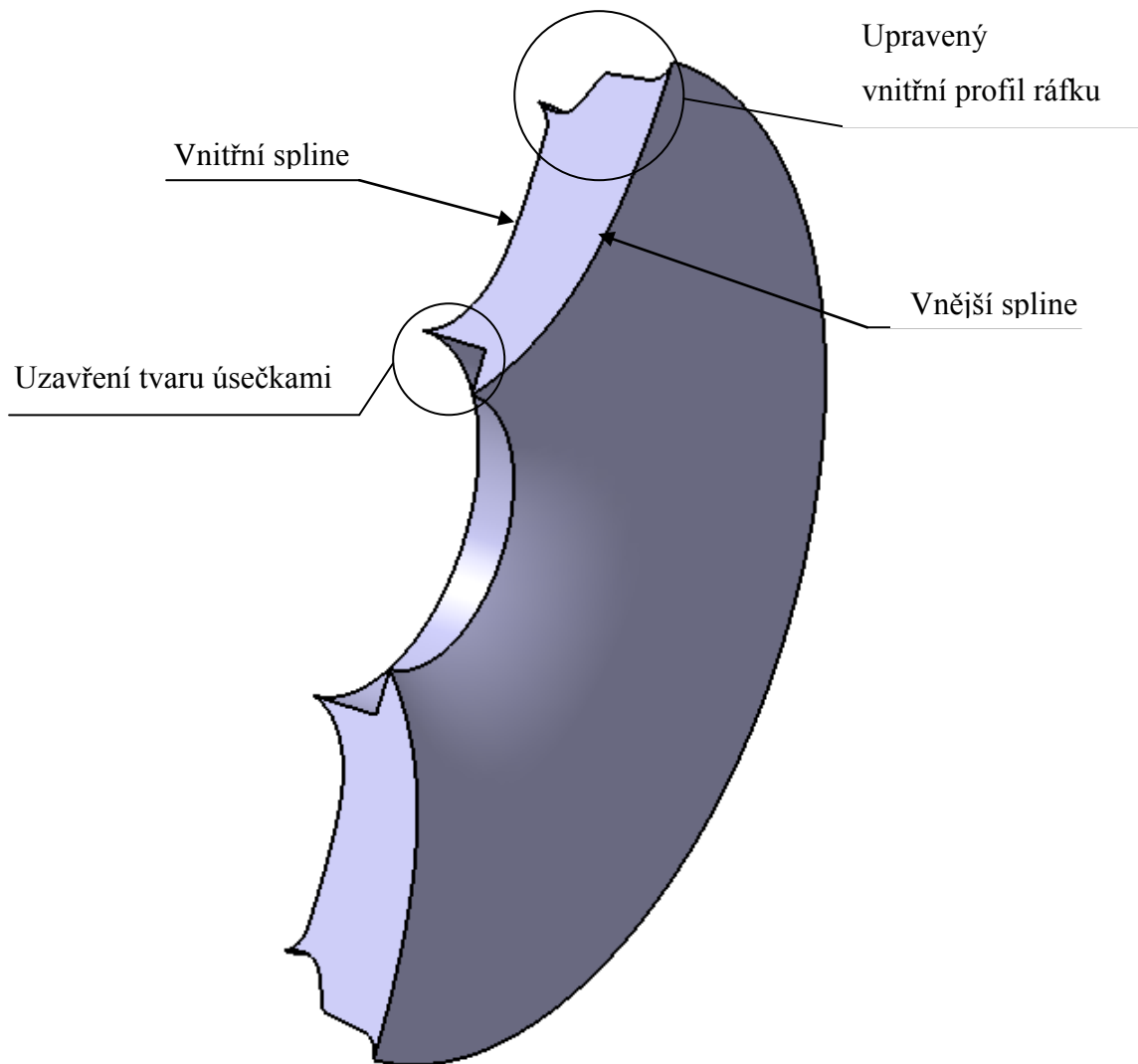


Obr. 37. Tvar a rozměry původního disku

9.3 Modelování disku

Předtím než byl určen ten správný postup modelování, tak jej předcházela řada nepodařených postupů z toho důvodu, že se udělal jeden prvek a poté další a další a nakonec následovalo takové zjištění, že není z dané situace východisko.

A proto se dospělo k tomu, že nejvýhodnější bylo udělat náčrt (sketch) budoucího tvaru, který bude tvořit paprsky disku. Poté se tento náčrt nechal orotovat kolem vlastní osy příkazem „Shaft“, tak aby vzniklo výchozí těleso pro paprsky. Rozměry byly převzaty z původního disku, kromě jejich hloubky a tvaru.

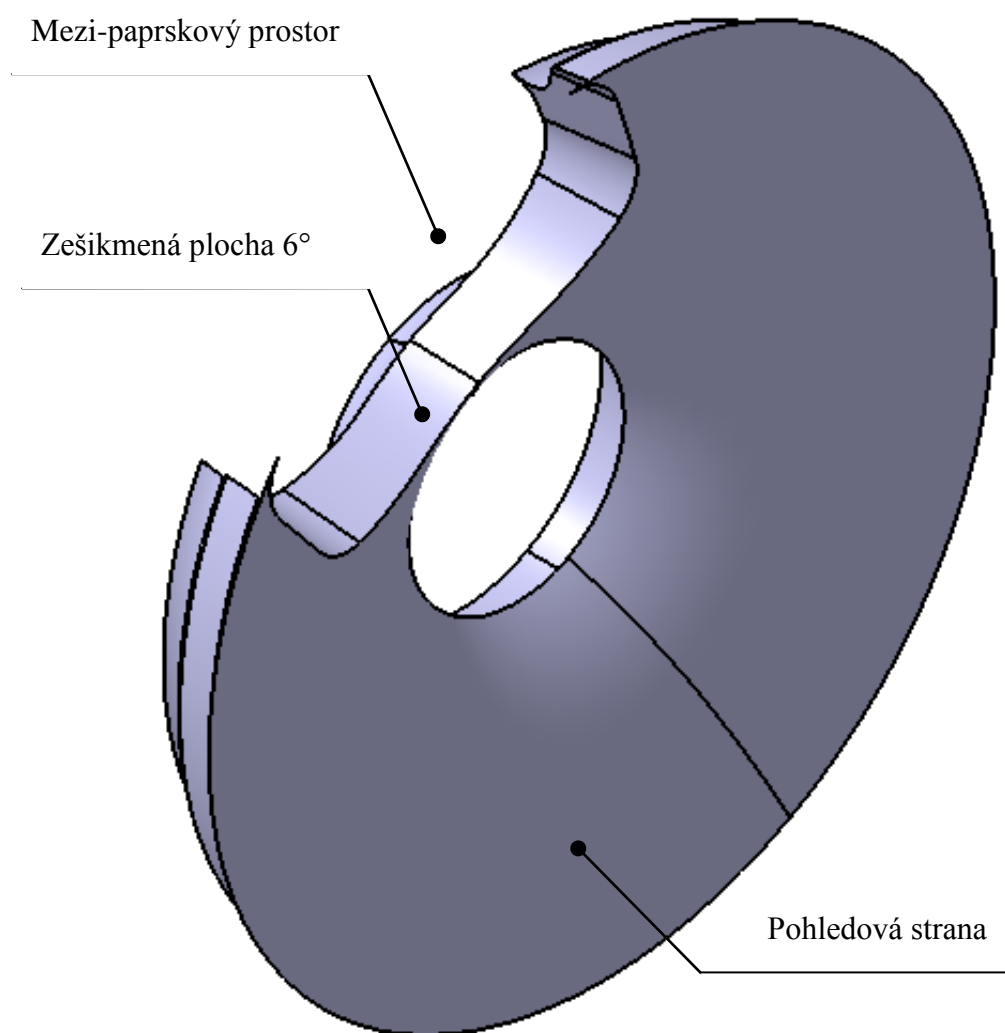


Obr. 38. Řez výchozího modelu pro paprsky

Všechny splíny v náčrtu jsou tečně navázány na rovné úseky. Důvodem proto je eliminace koncentrace napětí a jeho příznivý průběh ve výsledném modelu, ale hlavně v budoucí reálné součásti. Při určování polohy vnitřní splíny se samozřejmě bral ohled na velikost a

polohu brzdového třmenu, který je umístěn na náboji, tak aby se maximálně využil prostor mezi paprskem a třmenem a zároveň aby nedošlo k jejich vzájemné kolizi. To bylo zjištěno z celkové sestavy uchycení disku, ve které je vymodelován a zobrazen kompletní náboj, a kterou poskytl závodní tým VUT Brno.

Dále byl počet paprsků stanoven na tři po 120° kolem vlastní osy, nejen proto, že je kladen požadavek na co nejmenší jejich počet, ale i proto, že rovina je definována právě třemi body v tomto případě samotnými paprsky. Jejich počet byl i schválen týmem z VUT.

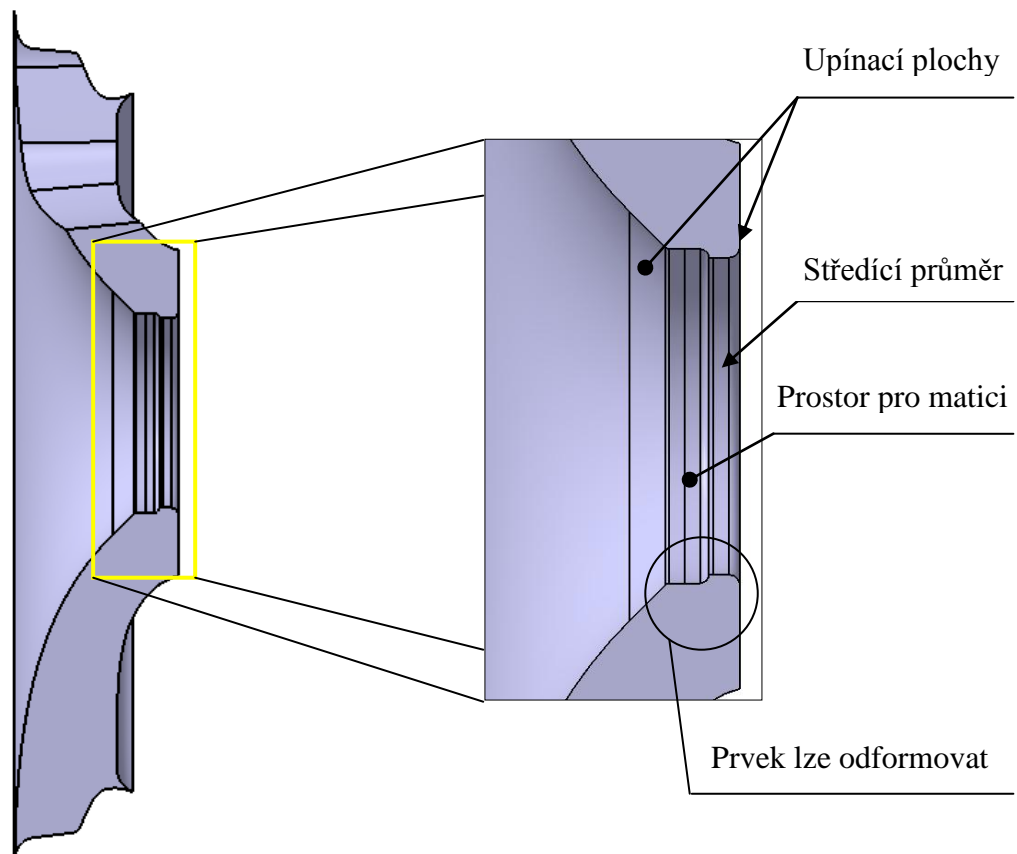


Obr. 39. Model po vytvoření jednoho mezi-paprskového prostoru

Při tvorbě mezi-paprskového prostoru se postupovalo následovně. Nejprve se definoval tvar tohoto prostoru pomocí vytvořené skici. Poté se tato skica vysunula podél rotační osy modelu tak, aby byl odebrán materiál a vznikl mezi-paprskový prostor. Toho bylo docíleno

příkazem „Pocket“ neboli kapsa. Na to byla vzniklá plocha zešikmena o 6 stupňů. Toto zešikmení umožňuje snadnější odformování. Tato plocha se svažuje k pohledové straně.

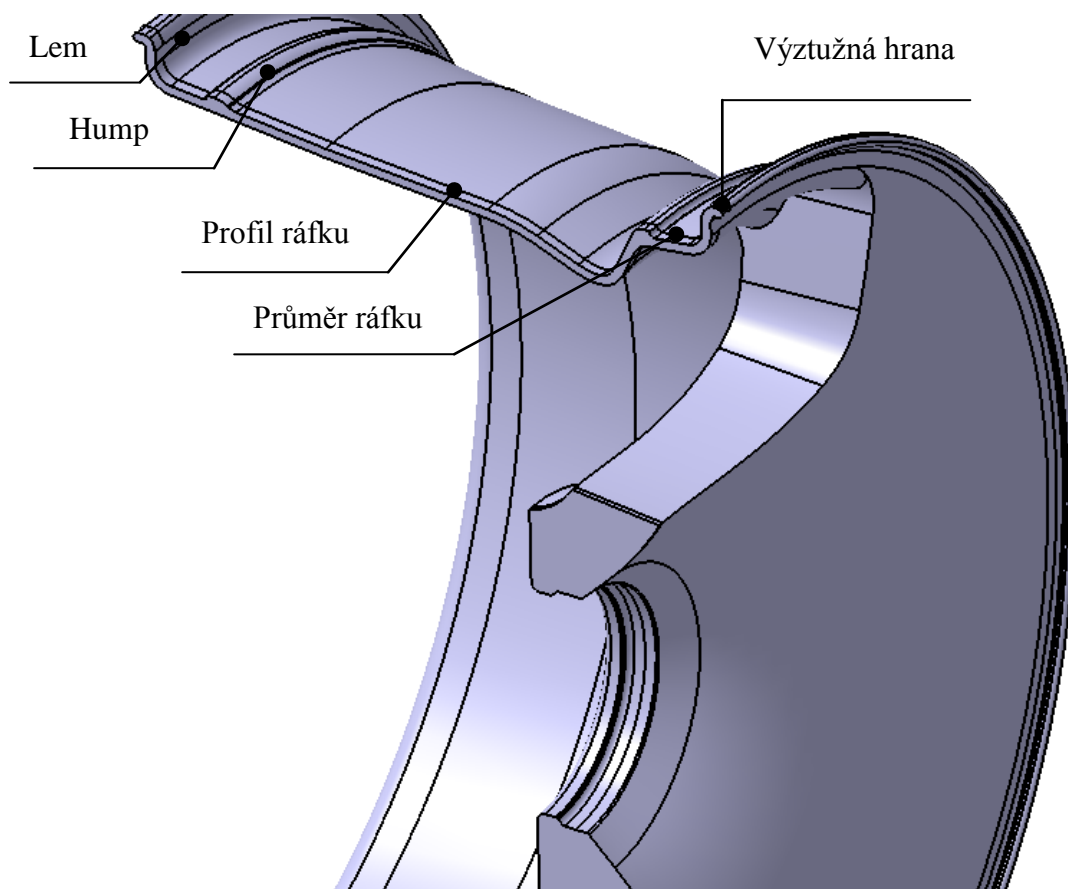
Dále následovalo modelování středu disku, tak aby to odpovídalo zadání. Tudíž byly využity původní rozměry tak, aby pasoval na již existující náboj. Jednalo se hlavně o upínací plochy, středící průměr, prostor pro centrální matici a hlavně o velikost zálisu, který zůstal, dle zadání, stejný o velikosti 30 mm. Mimo to muselo dojít ke změně tvaru středu tak, aby jej šlo bez problémů odformovat, viz obrázek 37 a 40.



Obr. 40. Řez a detail modelu s upraveným středem

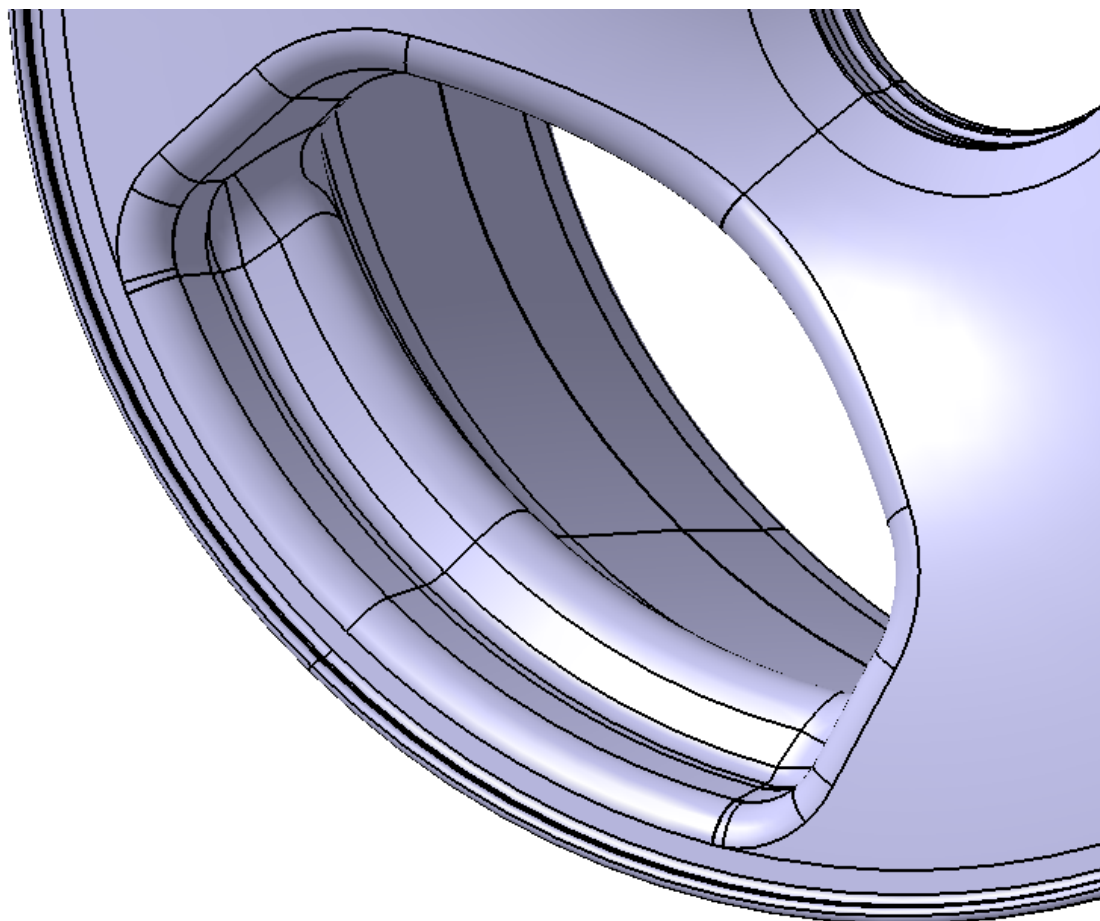
Samotný střed se vytvořil tak, že se opět nakreslila příslušná skica, která odpovídala původním rozměrům a také obsahovala potřebnou úpravu kvůli odformování a také obsahovala výsledné rádiusy. Byly využity úsečky, které uzavíraly tvar a profil v náčrtu ze, kterého je odvozen výchozí model pro paprsky. Tyto úsečky byly promítnuty do skici tvořící střed disku tak, aby ji uzavřeli a zároveň, aby výsledek splynul s výchozím modelem a stal se jeho součástí. Hotová skica se orotovala opět příkazem „Shaft“ a vznikl střed disku, který byl součástí celkového modelu.

Dalším krokem bylo přidání samotného profilu disku neboli ráfku k současnému modelu. Součástí tohoto profilu jsou dvě výztužné hrany a dva humpy. Výztužná hrana slouží ke zvýšení tuhosti postraních lemů, o které, se po nasazení a nafouknutí pláště pneumatiky, opírají patky pláště. Bez této výztužné hrany by mohlo dojít k ulomení těchto lemů po jeho nasazení. To může být způsobeno rázem při nafukování pláště. Hump neboli vrcholek slouží k zamezení sesunutí pláště pneumatiky při působení velkých bočních sil, ke kterým dochází při jízdě v zatáčce nebo při náhlém poklesu tlaku v plášti pneumatiky. Profil je definován hlavně průměrem ráfku, který je v tomto případě 13 palců a šířkou ráfku, které činí 7 palců. Tyto parametry jsou zachovány dle požadavků. Samotný profil včetně výztužných hran, ale bez humpů má konstantní tloušťku 3 mm. Tato hodnota byla stanovena na základě doporučení vedoucího a kolegů z VUT Brno. V tomto případě se jedná o asymetrický ráfek a jeho geometrie se svažuje se směrem k pohledové straně disku, ale pak se vrací zpět kvůli zachování průměru ráfku. Tato geometrie napomáhá k lepšímu sejmutí z formy a ke snadnějšímu nasazení pláště pneumatiky.



Obr. 41. Řez modelu s vytvořeným profilem ráfku

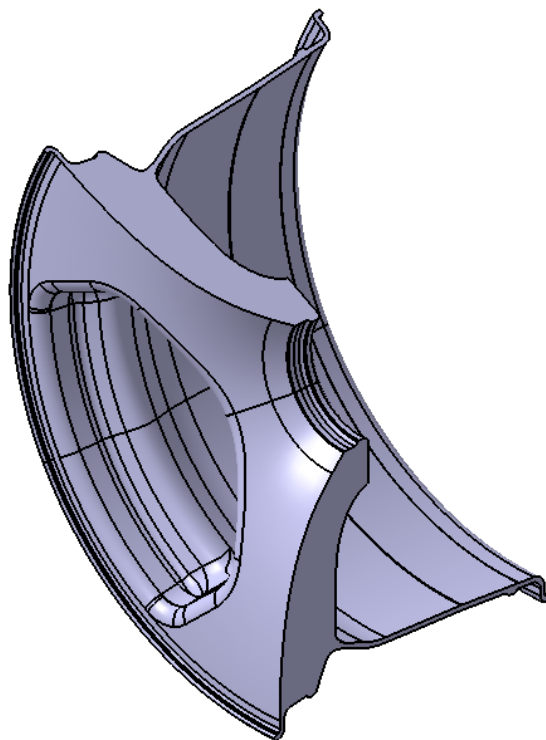
Tvar a geometrie profilu ráfku je z větší části odvozena z původního hoččíkového disku. Pro modelování se udělal náčrt, který tuto geometrii obsahoval, a zároveň do něj byl promítnut upravený vnitřní profil ráfku z výchozího modelu tak, aby navazoval a byla určena vzájemná poloha. Tento náčrt dále obsahoval geometrii humpu a zaoblení výztužných hran. Hotový náčrt se poté nechal opět orotovat příkazem „Shaft“, tak aby vznikl samotný kruhový profil ráfku. Poté se zaoblily náhlé přechody a ostré hrany.



Obr. 42. Navázání parsku na ráfek pomocí zaoblení

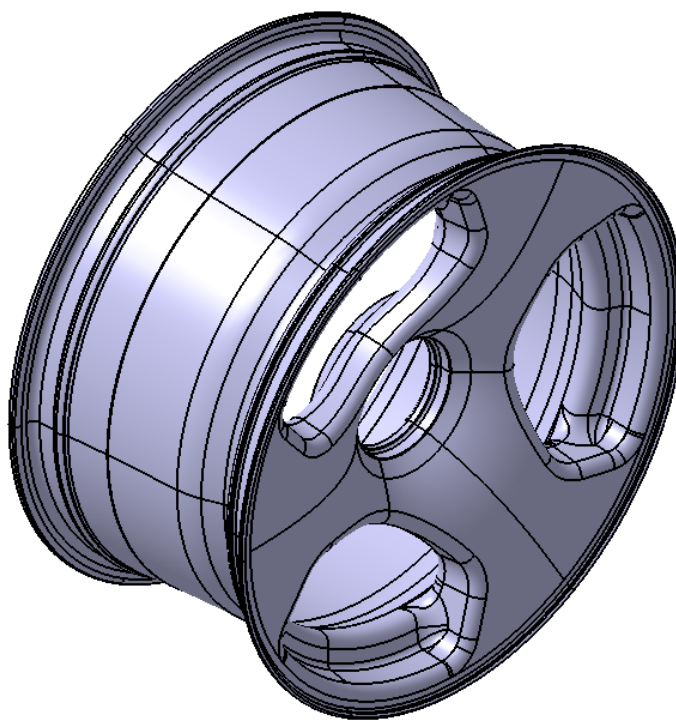
Pro plynulé navázání prvku, ze kterého budou paprsky, na prvek v podobě ráfku se využil mezi-paprskový prostor tak, že se pomocí příkazu „Edge Fillet“ a jeho dalšími modifikacemi docílilo požadovaného přechodu mezi těmito prvky, viz obrázek 42. Velikost těchto zaoblení neboli rádiusů jsou na základě odhadu a estetiky. Toto navázání, do určité míry, usnadní i případnou výrobu formy na tento disk.

Po této úpravě se, z modelu pomocí náčrtu a příkazu „Pocket“, vytvořil model segmentu disku, který svírá úhel 120° . Tento segment obsahuje již dokončený mezi-paprskový prostor a z každé strany polovinu paprsku, viz obrázek 43.



Obr. 43. Model segmentu disku

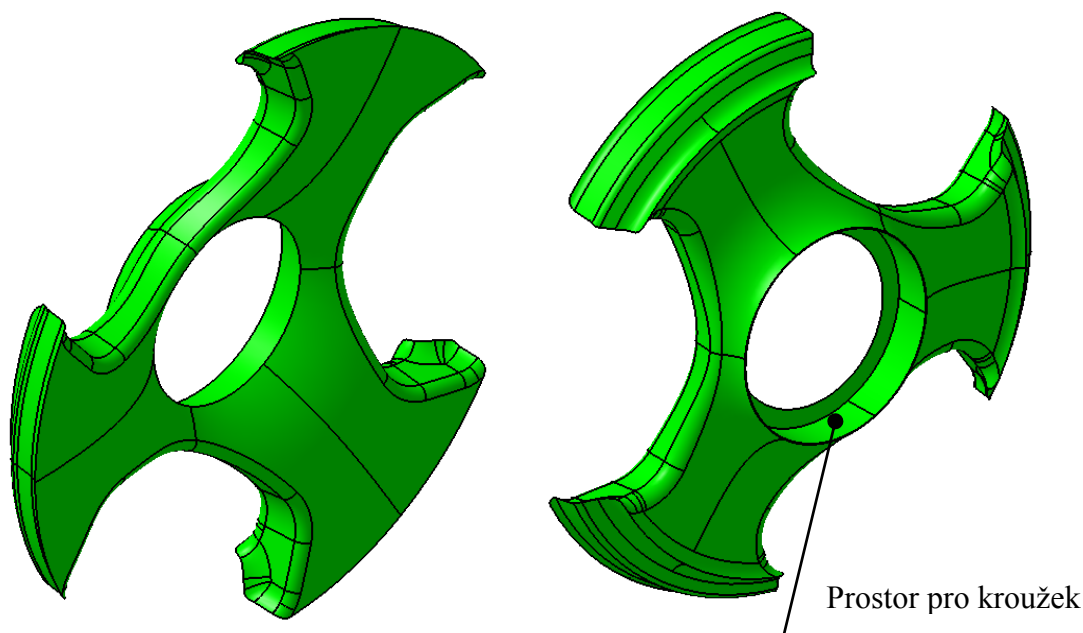
Pomocí tohoto segmentu a pomocí kruhového pole se vytvořil celistvý model disku, který je zobrazen na obrázku 44. Tento design byl odeslán na VUT v Brně a posléze schválen závodním týmem.



Obr. 44. Celistvý model disku

9.4 Modelování jader a dokončení disku

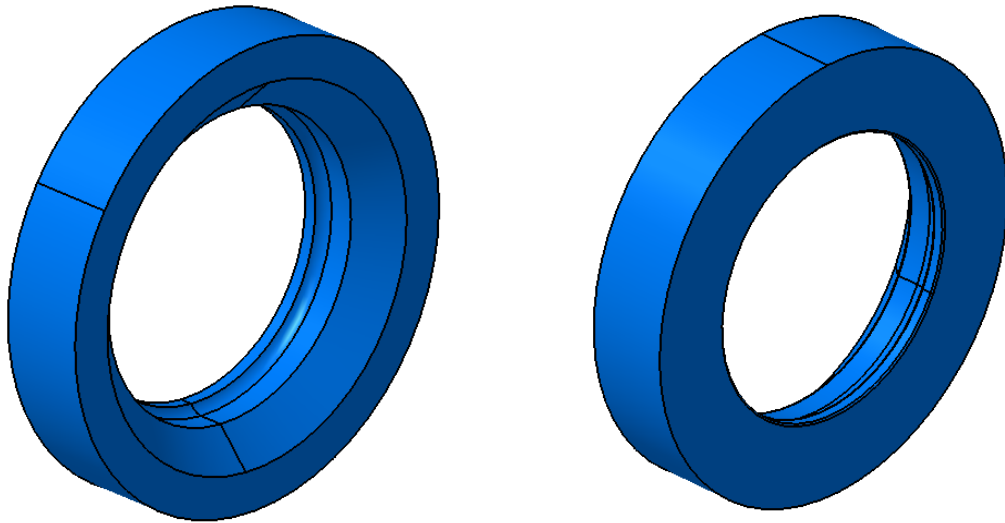
Největší úsporu hmotnosti a drahého uhlíkového materiálu, který bude ve formě prepregu, lze docílit převážně v oblasti paprsků. Zde by bylo zapotřebí i velké množství vrstev, protože uhlíkový prepreg má velmi malou tloušťku a to cca 0,2 mm. Z toho důvodu se vytvořil model jádra, které kopíruje tvar paprsků. Toto jádro bude mít menší hmotnost a bude sloužit jen jako výplň a podpora při výrobě karbonového disku. Jádro bude vyrobeno z největší pravděpodobností z polyuretanové pěny. Model jádra je zobrazen na obrázku 45.



Obr. 45. Model jádra disku ve formě paprsků z PUR pěny

Samotné jádro je vymodelováno pomocí offsetu z modelu disku a jeho paprskové části. Velikost offsetu je taková, že vznikla stěna silná 2 mm mezi jádrem a modelem disku. Tato hodnota byla projednána a vzájemně schválena. Jádro obsahuje prostor pro hliníkový kroužek, který se vytvořil příkazem „Groove“, což je v podstatě orotování náčrtu kolem osy tak, aby byl odebrán materiál. Rozměry tohoto prostoru jsou takové, aby kroužek byl dostatečně velký a dalo by se do něj posléze vyvrtat požadovaný počet unášecích otvorů a disponoval potřebnými upínacími plochami. Dále paprsky byly ukončeny vnitřním profilem ráfku tak, aby to vzájemně navazovalo. Samotný offset se tvořil pomocí ploch, které se museli ručně pospojovat a vyplnit případné mezery mezi nimi. Poté tyto plochy byly převedeny na objemové těleso. Výsledné jádro může, ale i nemusí být součástí disku.

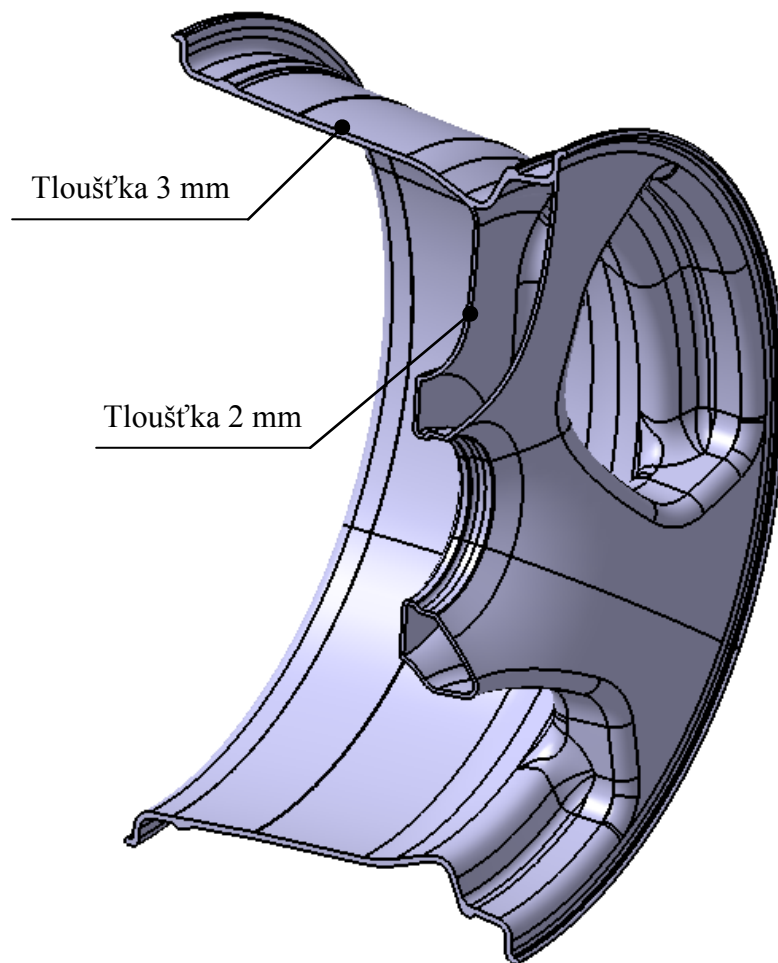
Jak už bylo řečeno, v jádru ve formě paprsků je prostor pro hliníkový kroužek, který je součástí tohoto jádra a plní funkci výztuže. Tento kroužek přenáší upínací sílu, kterou vyvine centrální matice a posléze bude obsahovat i unášecí otvory pro přenos hnací síly na disk a vozovku. Materiál kroužku je hliník, protože je lehký a dostatečně pevný pro přenos těchto sil. Bez tohoto prvku by mohl disk při upnutí a zatížení prasknout, protože karbon je sice pevný, ale křehký.



Obr. 46. Model hliníkového kroužku jako výztuže

Vnější průměr kroužku je 120 mm. Tento průměr je i v jádru ve formě paprsků. Šířka kroužku je 23 mm, stejně jako v paprskovém jádru, což umožní vzájemné spojení. Vnitřní průměry a zaoblení byly zvětšeny o 2 mm na poloměr tak, aby vnikla stěna mezi kroužkem a vnějším povrchem středu disku. To znamená, že kroužek zůstane uvnitř středu disku a kolem něj se vytvoří vrstva karbonu o tloušťce 2 mm s navázáním na paprsky.

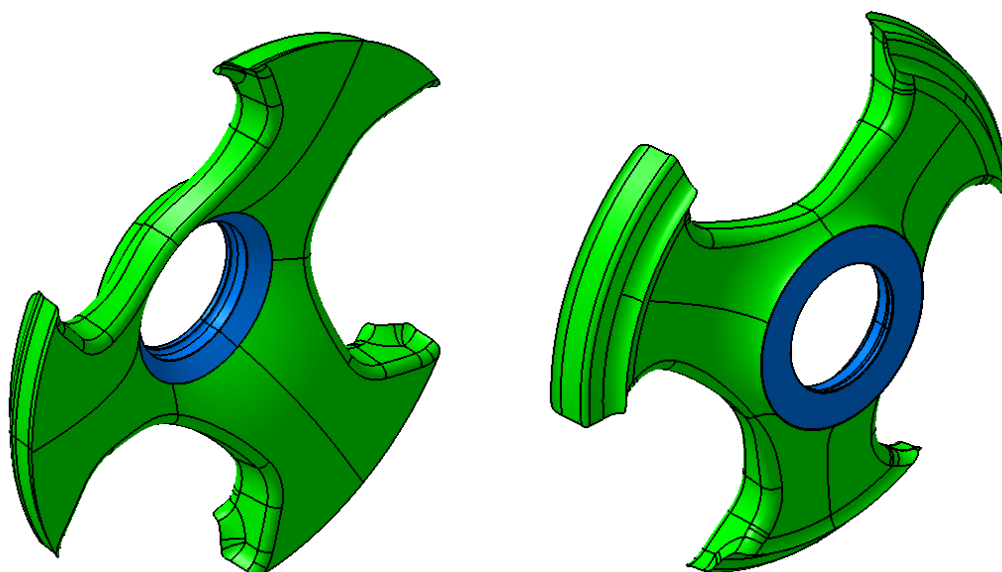
Modelování kroužku proběhlo příkazem „Shaft“, kde se orotoval výchozí náčrt a vznikl tak objemový model.



Obr. 47. Řez modelu disku s dutými paprsky a středem

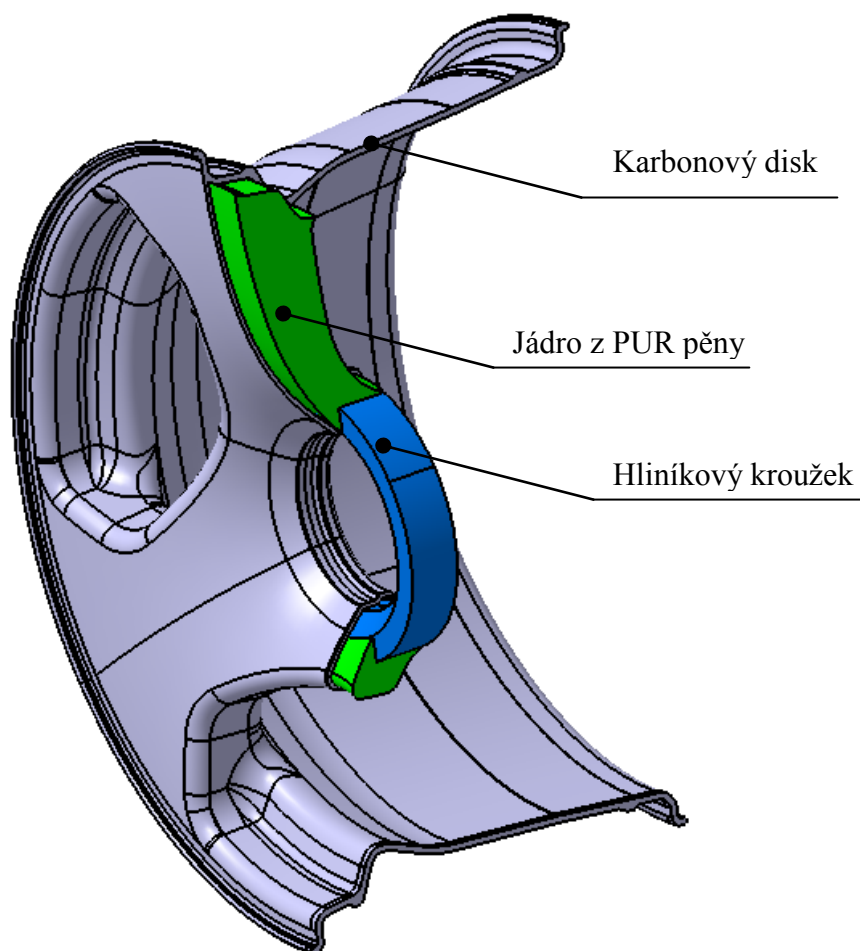
Na obrázku 47 je zobrazen řez modelu disku, který má paprsky a středovou část disku dutou. Toho se docílilo pomocí takzvaných booleovských operací, kdy tyto operace umožnily virtuální odečtení modelu jádra paprsků a modelu výztužného kroužku od modelu karbonového disku. Díky tomu tento model vznikl a lze vidět samotný výsledek. Dále je vidět jak a kde všude bude aplikován karbonový materiál ve formě prepregu. Dále to umožní zjištění výsledné hmotnosti celkové součásti. Tloušťka paprsků a středové části disku je menší než tloušťka samotného profilu ráfku, protože jsou zde aplikovány výztužné prvky ve formě jader.

Pro názornost a lepší pochopení, je dále zobrazeno spojení modelu hliníkového kroužku s jádrem paprsků. Toto spojení vytváří celek jako společné jádro disku z příslušných komponent. Zároveň ukazuje vzájemnou polohu a orientaci mezi kroužkem a jádrem paprsků. Pro sestavení bylo použito vazeb, jako je sousost a kontaktu plochy na plochu. Tuto sestavu lze pozorovat na obrázku 48.



Obr. 48. Spojení hliníkového kroužku a paprskového jádra disku

Konečné složení modelu karbonového disku je vyobrazeno pomocí sestavy na obrázku 49.

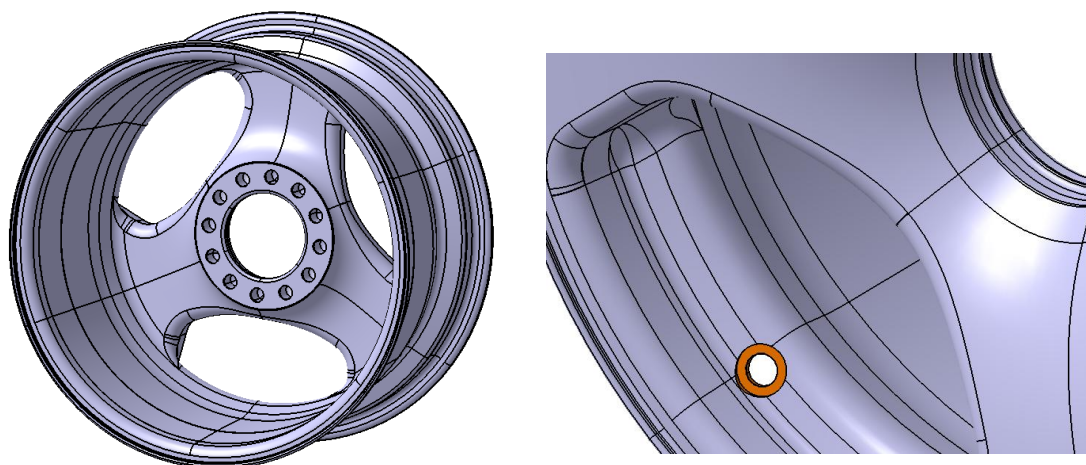


Obr. 49. Sestava složení disku

Nakonec se na model disku přidaly dva poslední konstrukční prvky.

Zprvé se jednalo o vytvoření dvanácti unášecích otvorů o průměru 12 mm a celkové hloubce 16 mm. Tyto otvory leží na roztečné kružnici o průměru 100 mm. Počet otvorů odpovídá zadání a požadavkům z VUT. Ve skutečnosti jsou funkční pouze 4 tyto otvory, protože na náboji jsou právě 4 unášecí kolíky. Dvanáct je jich proto, aby se usnadnilo a urychlilo nasazování disku na náboj. Kdyby byl počet otvorů jen čtyři, tak by se musela hledat poloha, kde jsou umístěny jen ty 4 unášecí kolíky a to by bylo zdlouhavé. Má to i tu výhodu, že dojde ke snížení celkové hmotnosti disku. Umístění otvorů viz obrázek 50.

Zadruhé byl vytvořen otvor pro ventilek, který dodá VUT. Průměr otvoru je 10 mm a zahĺoubení z pohledové strany má hloubku 0,4 mm a ze zadní strany má 0,1 mm. Průměr tohoto zahĺoubení je 16 mm. Otvor je dále pod úhlem 25° od osy rotace disku a je umístěn ve středu jednoho mezi-paprskového prostoru. Na obr. 50 je zobrazen oranžovou barvou.



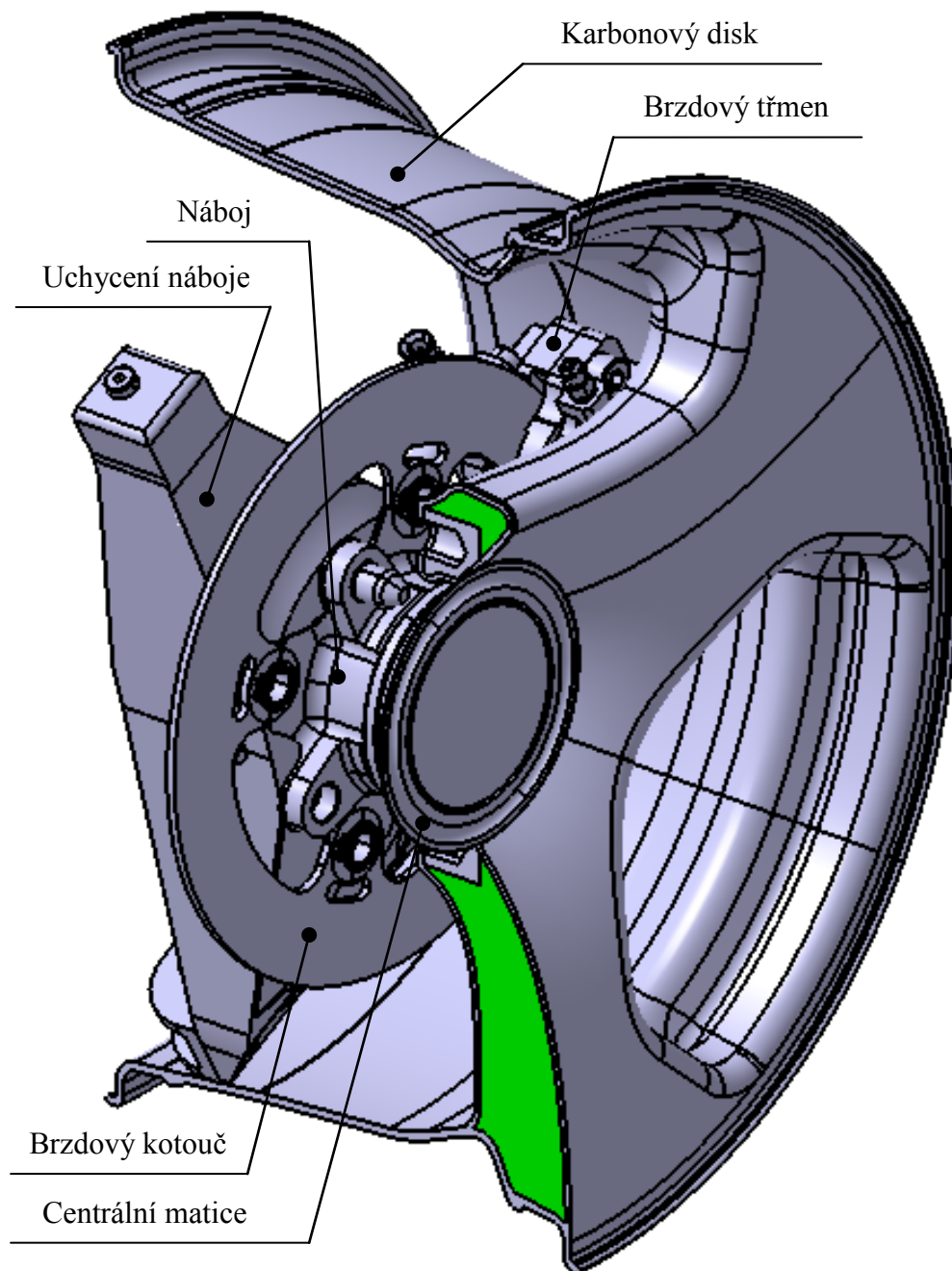
Obr. 50. Hotový model disku s otvory pro unášecí kolíky a otvorem pro ventilek

Na obrázku 51 je zobrazen ventilek, který bude případně namontován na hotový disk.



Obr. 51. Ventilek

Na závěr této kapitoly je znázorněn hotový disk v řezu, jak je uchycen na náboji pomocí centrální matice M68x1,5, která je vyrobena z titanu. Náboj je vyroben ze slitiny hliníku a obsahuje brzdový kotouč, brzdový třmen, uchycení náboje na rám vozu a různé spojovací a potřebný materiál. Tento model sestavy kompletního náboje s příslušnými komponenty byl poskytnut závodním týmem z VUT Brno. Z obrázku 52 je patrné, že disk sedí na svém místě.



Obr. 52. Model disku uchycený na náboji

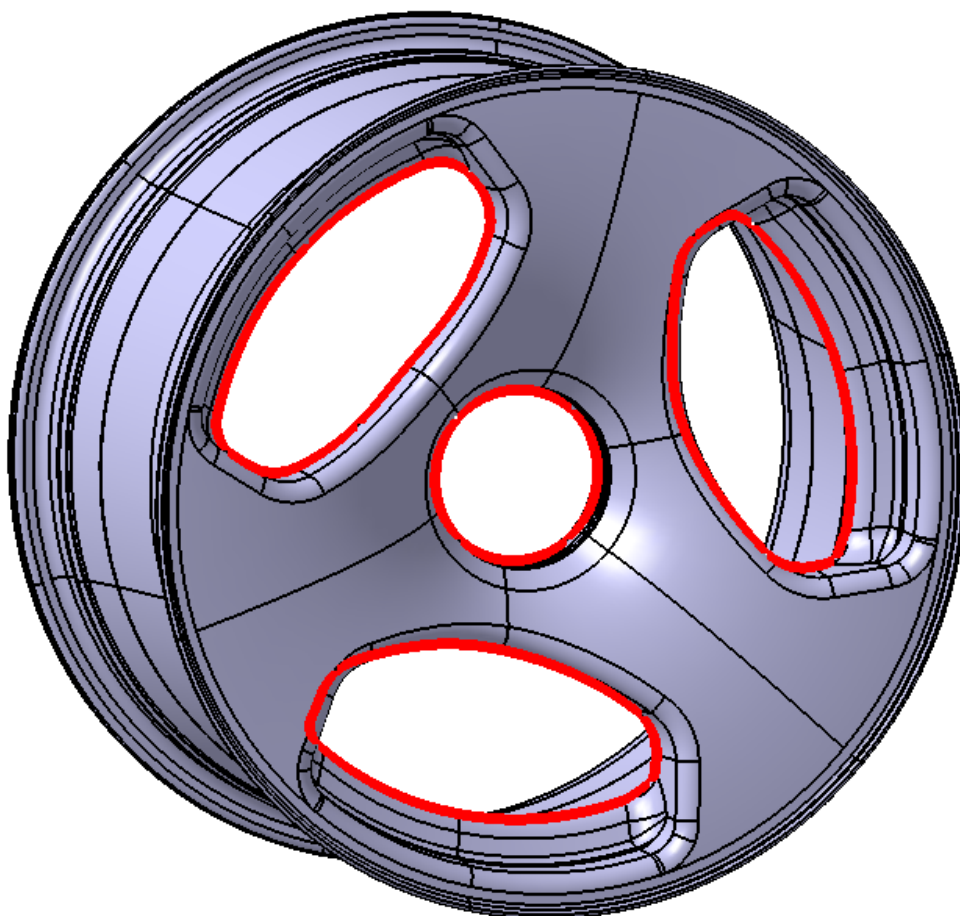
10 KONSTRUKCE VYTVRZOVACÍHO PŘÍPRAVKU - FORMY

10.1 Koncept

Koncept výsledné formy je založen na principu pouze dvou protilehlých součástí v podobě tvárníků, které budou plnit funkci podobnou jako je takzvané kopyto. Tyto tvárníky rozděljuje tvarová dělicí rovina. Pro lepší popis se tvárník tvořící pohledovou stranu disku nazývá tvárnice. V tomto případě je to odlišné od klasických vstříkovacích forem, protože se zpracovává jiný druh materiálu a to reaktoplastu v podobě kompozitu s tkanou výztuží z uhlíkového vlákna s předimpregnovanou epoxidovou pryskyřicí.

10.2 Dělicí rovina

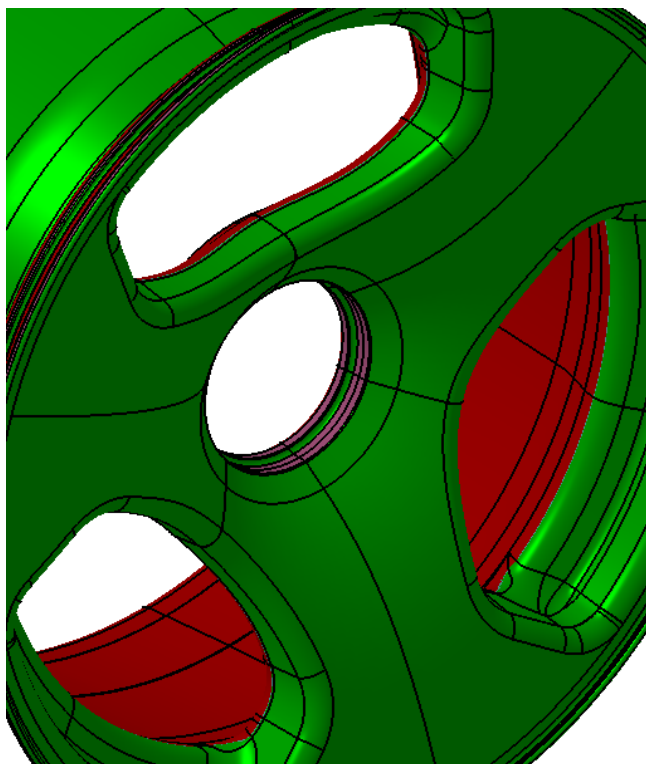
Dělicí rovina je umístěna v mezi-paprskovém prostoru disku a v jeho středu. Tvoří ji čtyři uzavřené tvarové křivky. Její poloha je taková, aby došlo k bezpečnému odformování disku. Samotná dělicí rovina je zobrazena silnou červenou barvou na obrázku číslo 53.



Obr. 53. Disk s vyznačenou dělicí rovinou

10.3 Označení tvárnice a tvárníku

Zde je uvedeno barevné odlišení ploch, které náleží tvárníku, a které náleží tvárnici. Toho bylo docíleno v programu Catia V5R19 pomocí takzvaného modulu „Core and Cavity“ a funkce „Pulling Direction“. Dále toto odlišení je zobrazeno na obrázku 54, kde červená barva označuje plochy, které určují tvárník a zelená barva označuje plochy, které určují tvárnici. Přechod mezi barvami hranici neboli již uvedenou dělicí rovinu. Jedná se hlavně o vnitřní část disku.

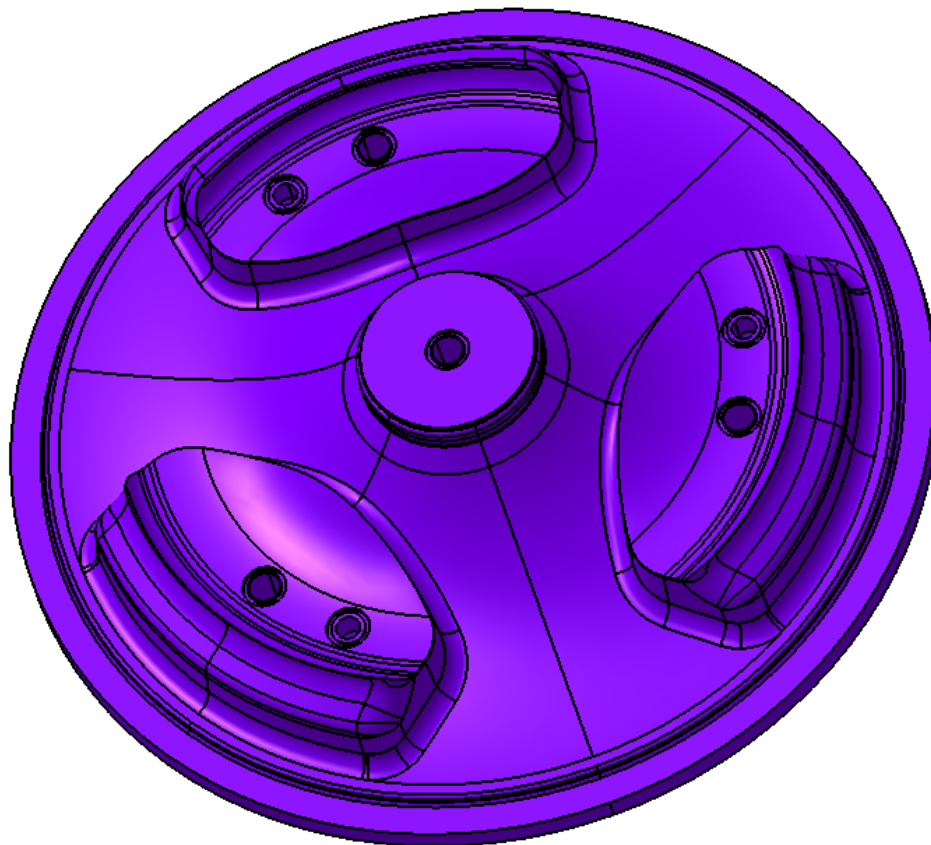


Obr. 54. Barevné rozlišení tvárníku a tvárnice

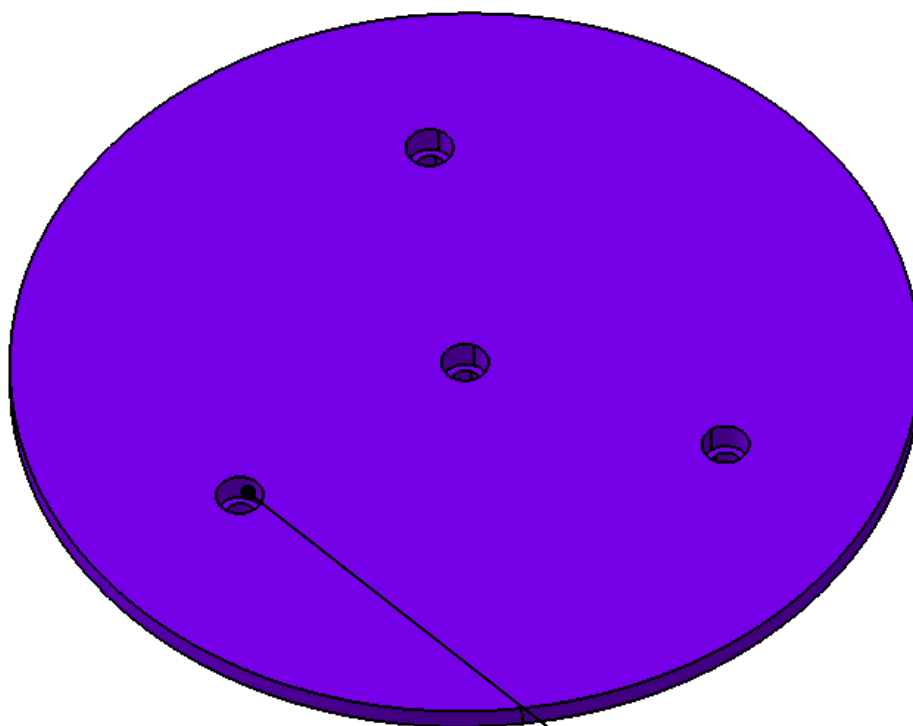
10.4 Modelování formy

10.4.1 Tvárnice

Při modelování tvárnice byly extrahovány plochy z disku, které jí budou tvořit. Jedná se hlavně o zelené plochy z modulu „Core and Cavity“. Ty, které zasahovaly do tvárníku, byly oříznuty jednotlivými křivkami tvořící dělicí rovinu a vzniklý prostor byl posléze vyplněn a spojen v jeden celek. Dále došlo k uzavření tak, že se vytvořil pomocí ploch průměr 380 mm dlouhý 10 mm z důvodu výroby. Ten se připojil ke stávajícím plochám a vytvořilo se uzavřené těleso tvořené plochami, které bylo poté převedeno na objemové těleso. Výsledek je zobrazen na obrázcích 55 a 56.



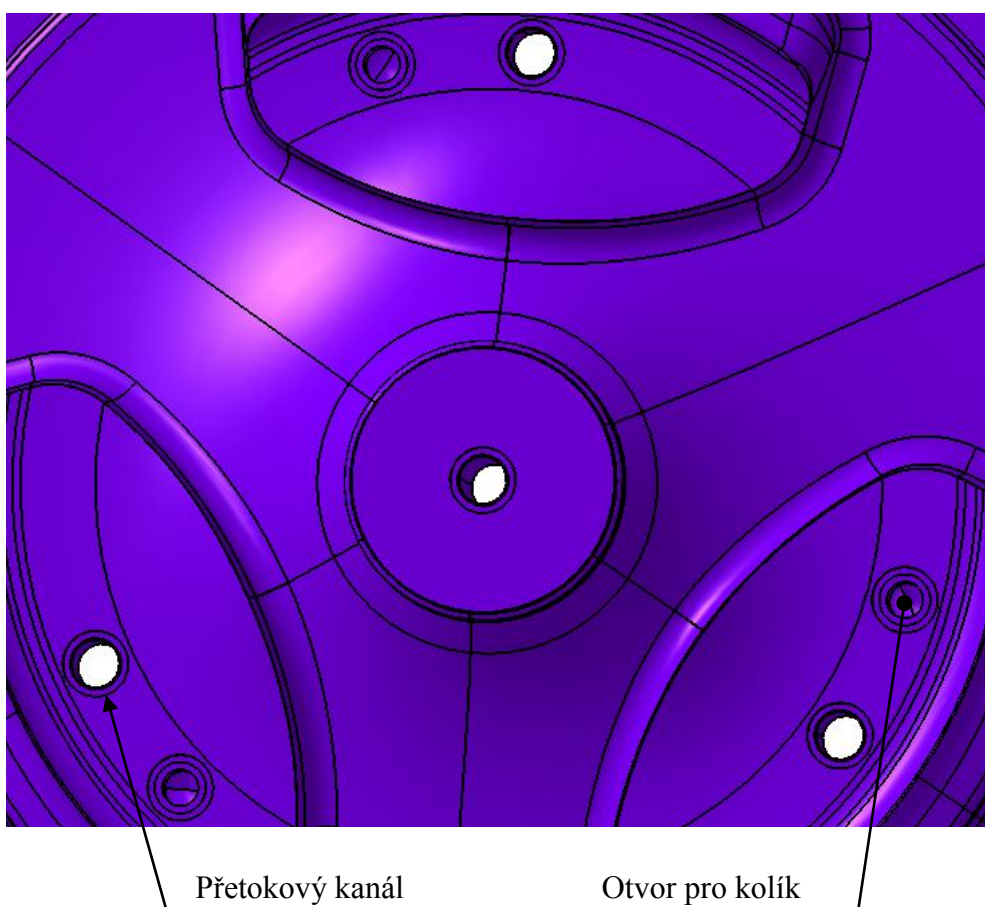
Obr. 55. Hotový model tvárnice – funkční strana



Otvory pro šroub M12

Obr. 56. Hotový model tvárnice – zadní strana

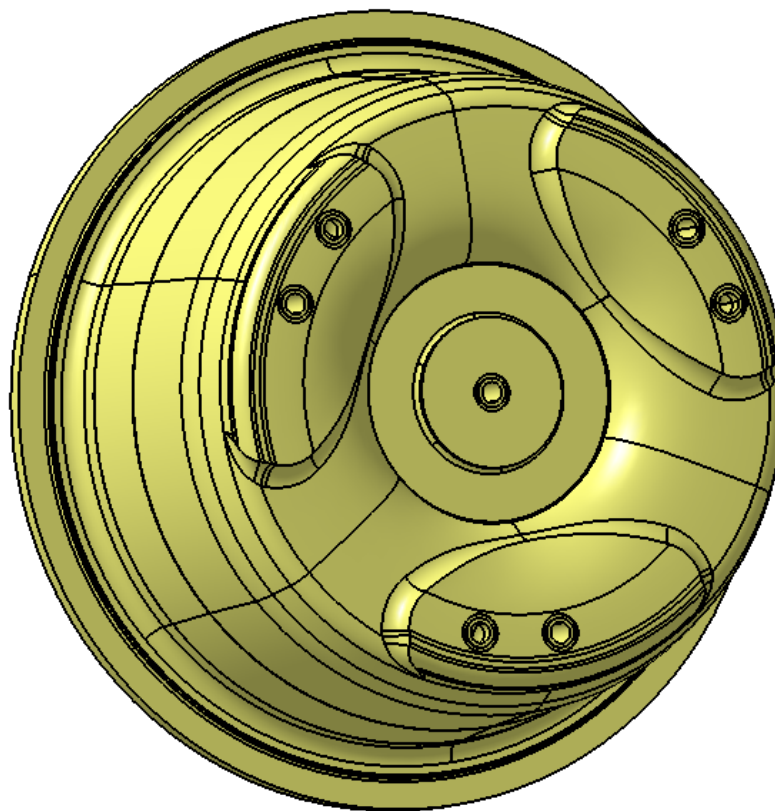
Dále, na obrázku 56, lze také vidět konstrukční prvek v podobě čtyř otvorů pro šrouby M12 s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem, které slouží ke spojení tvárnice s tvárníkem. Tři z těchto otvorů jsou umístěny ve středu mezi-paprskového prostoru, což znamená, že jsou na roztečné kružnici o průměru 236 mm po 120° a jeden je v ose tvárnice. Tyto otvory byly vytvořeny příkazem „hole“. Stejně tak jsou vytvořeny otvory pro kolík o průměru 10 mm a hloubce 12 mm, které zajišťují vzájemnou polohu mezi tvárníkem a tvárnicí. Tyto otvory jsou na stejné roztečné kružnici a je mezi nimi také úhel 120°, ale jsou pootočené o úhel 20° vůči otvorům pro šrouby. Nakonec se ke všem otvorům přidaly přetokové kanály tak, aby nedošlo k případnému zatečení pryskyřice, viz obrázek 57.



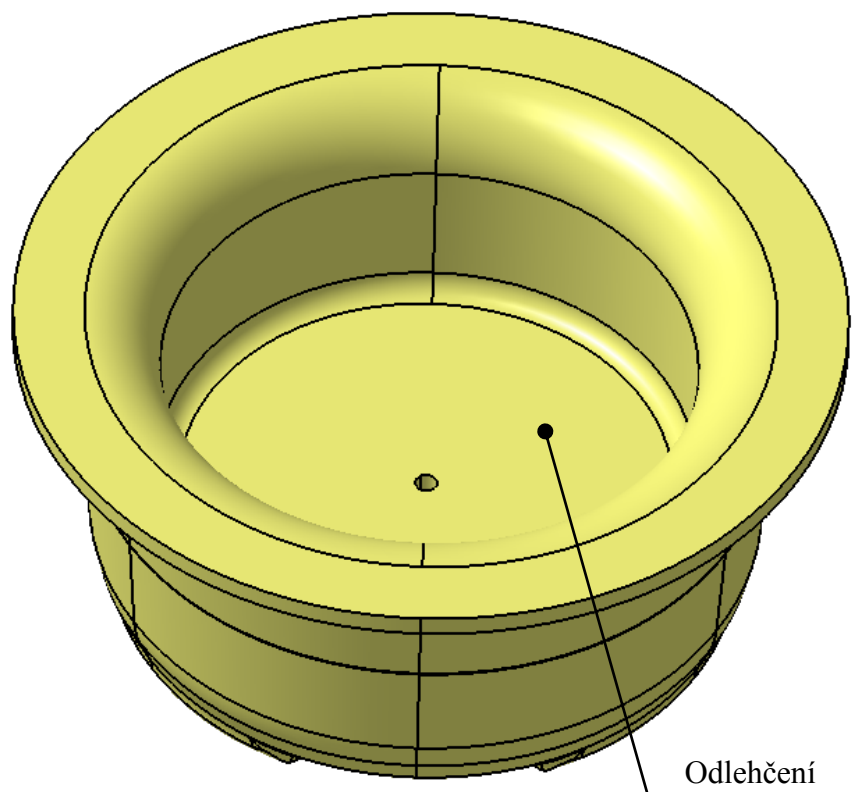
Obr. 57. Hotový model tvárnice – konstrukční prvky

10.4.2 Tvárník

Při modelování tvárníku byl aplikován stejný postup jako při modelování tvárnice, akorát místo zelených ploch se extrahovaly plochy červené. Také došlo k uzavření tak, že se vytvořil pomocí ploch průměr 380 mm dlouhý 10 mm z důvodu výroby, který se připojil ke stávajícím plochám, a vytvořilo se uzavřené těleso tvořené plochami, které bylo poté převedeno na objemové těleso. Výsledek je zobrazen na obrázcích 58 a 59.

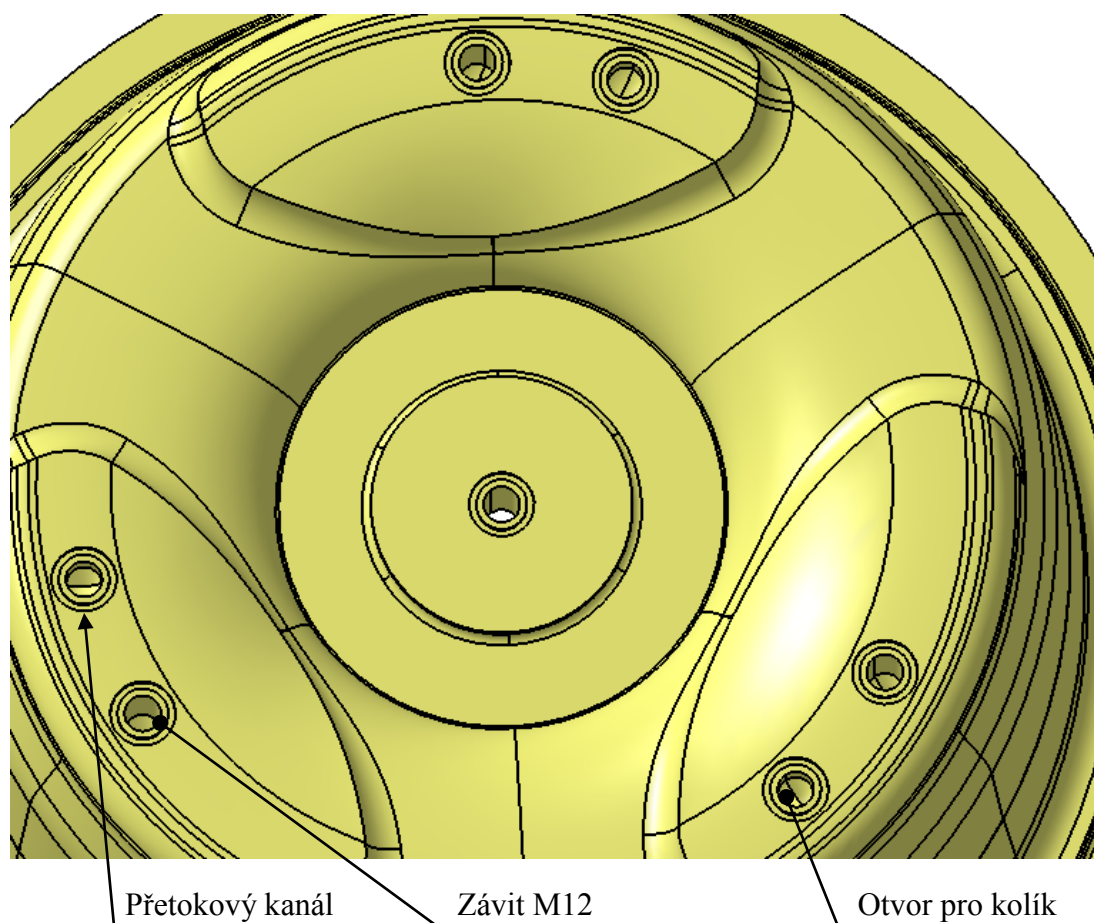


Obr. 58. Hotový model tvárníku – funkční strana



Obr. 59. Hotový model tvárníku – zadní strana

Také, na obrázku 59, lze vidět konstrukční prvek v podobě odlehčení, které sníží celkovou hmotnost tvárníku a usnadní tak manipulaci s ním. Toto odlehčení je také důležité z hlediska rychlejšího prohřátí tvárníku při vytvrzování disku. Dále na obrázku 60 jsou vidět čtyři otvory se závity M12 hluboké 22 mm pro šrouby s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem, kterými se tvárnice přišroubuje k tvárníku. Tři z těchto otvorů jsou umístěny stejně jako u tvárnice a to ve středu mezi-paprskového prostoru, což znamená, že jsou na roztečné kružnici o průměru 236 mm po 120° a jeden je skrz stěnu v ose tvárníku. Tyto otvory byly vytvořeny příkazem „hole“ se závitem. Poté jsou vytvořeny otvory pro kolík o průměru 10 mm a hloubce 8 mm, které zajišťují vzájemnou polohu mezi tvárníkem a tvárnicí. Tyto otvory jsou na stejné roztečné kružnici a je mezi nimi také úhel 120°, ale jsou pootočené o úhel 20° vůči otvorům pro šrouby. Nakonec se ke všem otvorům přidaly přetokové kanály tak, aby nedošlo k případnému zatečení pryskyřice, viz obrázek 60.

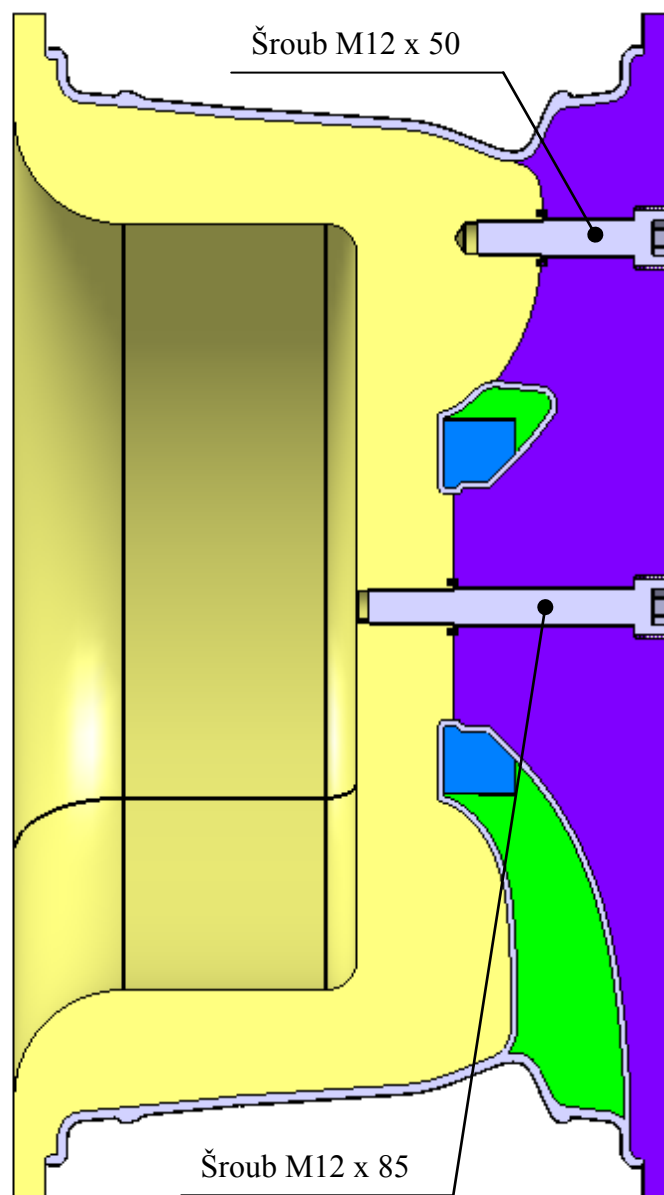


Obr. 60. Hotový model tvárníku – konstrukční prvky

10.4.3 Smrštění

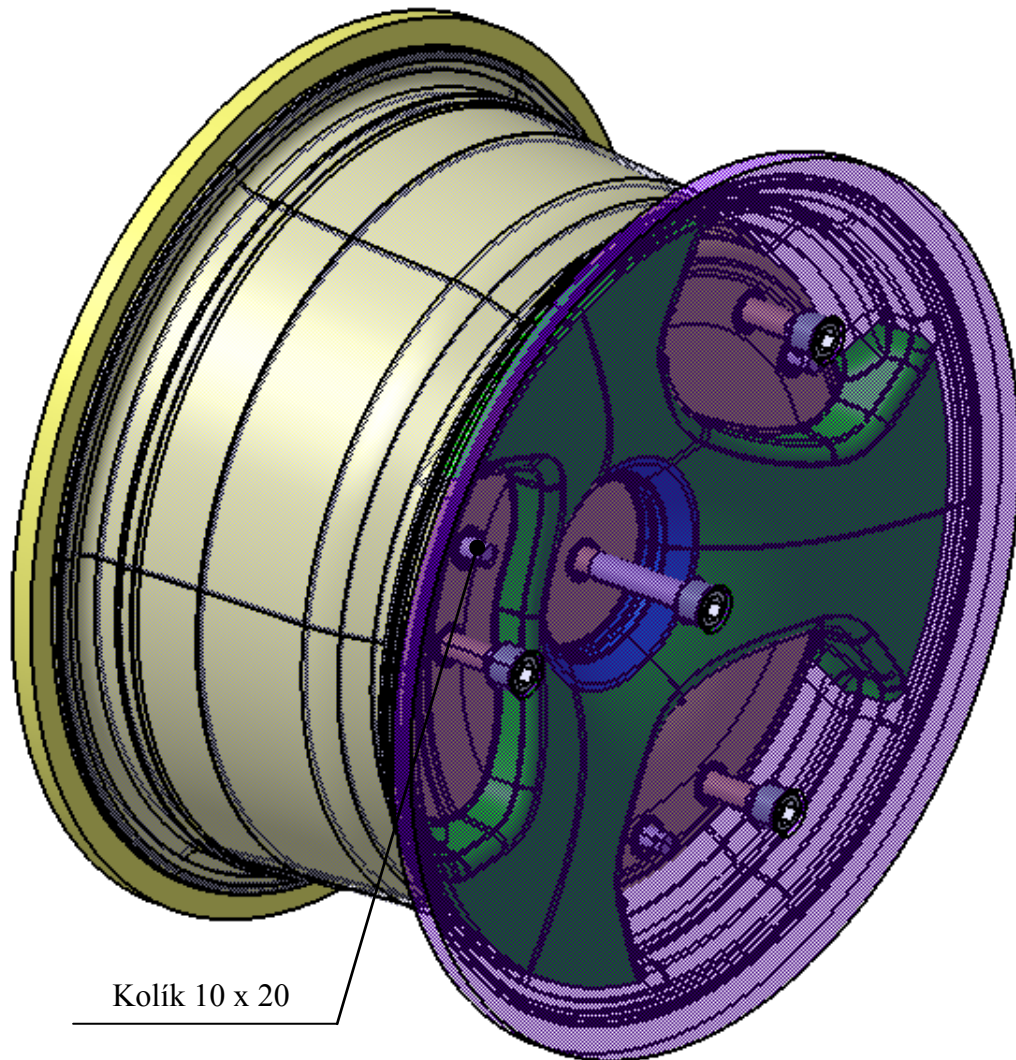
Správně by se měl tvárník i tvárnice zvětšit o smrštění materiálu, ale v tomto případě se uhlíková tkanina v průběhu vytvrzení nijak nesmršťuje a co se týká epoxidového systému, tak má smrštitivost při vytvrzování menší než 0,5%. Obecně se počítá s nulou. Systém neobsahuje žádné těkavé látky a neočekává se, že by během vytvrzení nějaký podíl hmoty zmižel. S prepregy se pracuje většinou lisováním do forem, které jsou přesné, a výrobek pak zaujme tvar formy. Z toho vyplývá že tvárník i tvárnice si zachovají výchozí rozměry.

10.5 Zaformování



Obr. 61. Řez zaformovaným diskem a formou

Pro názornost je na obrázku 61 zobrazen řez zaformovaným diskem, kde lze vidět, jak na sebe navazuje tvárník a tvárnice. Dále uvádí, jak a čím jsou vzájemně spojeny.



Obr. 62. Zcela zaformovaný disk

Nakonec je na obrázku 62 zobrazen kompletní 3D model sestavy, kde je disk zaformován mezi tvárníkem a tvárnici. Tvárnice je zobrazena transparentně, aby byl možný pohled dovnitř formy a aby byly zřetelné všechny spojovací součásti, jako je kolík a šrouby. Transparentně je také zobrazen disk z důvodu představy a umístění paprskového jádra a hliníkového kroužku.

11 TECHNOLOGIE VÝROBY JADER A UHLÍKOVÉHO DISKU

Zde bude popsána výroba jednotlivých jader, jako je hliníkový kroužek a jádro paprsků. Dále následuje popis výroby samotného uhlíkového disku včetně technologických podmínek vytvrzování.

11.1 Výroba hliníkového kroužku

Hliníkový kroužek neboli výztužné jádro středu disku, vychází z 3D modelu, který se vytvořil v programu Catia V5R19 a je popsán v kapitole 9.4. Jeho výroba byla provedena na počítačově řízeném neboli CNC soustruhu pomocí NC programu a soustružnických nožů. Polotovár byl ve formě kruhové tyče o průměru 130 mm a délce 26 mm. Jako podklad pro výrobu byla použita přiložená výkresová dokumentace. Hmotnost kroužku činí 368 g.



Obr. 63. Kroužek jako výztužné jádro středu disku

Materiál tohoto kroužku je hliník, v tomto případě hliníková slitina popsána v následující tabulce.

Tab. 2. Specifikace materiálu AlZn5Mg3Cu1,5 [37]

| Materiál | Modul pružnosti v tahu [MPa] | Mez kluzu [MPa] | Mez pevnosti [MPa] | Hustota [Kg/m ³] | Tažnost [%] | Tvrдость HB |
|----------------------------|------------------------------|-----------------|--------------------|------------------------------|-------------|-------------|
| AlZn5Mg3Cu1,5 (EN AW 7122) | 72 000 | 430 - 460 | 490 - 530 | 2760 | 2 - 7 | 140 - 160 |

11.2 Výroba paprskového jádra

Výroba paprskového jádra může být provedena dvěma způsoby:

11.2.1 Technologie CNC obrábění

Jednalo by se o jeho zhotovení pomocí technologie obrábění na CNC stroji. Může se jednat o stroj se třemi osami nebo o stroj s pěti osami. Výběr stroje záleží na volbě strategie obrábění, možnostech firmy a zkušenostech.

Materiál jádra je podle dokumentace pěnový polyuretan, který lze pořídit ve formě desky o potřebné tloušťce. Z tohoto hlediska by polotovarem pro obrábění byla tedy deska v podobě kvádrů s rozměry jádra zvětšených o přídavek. Polyuretan je vhodný, protože vydrží technologické podmínky vytvrzování disku, které budou uvedeny dále. Model jádra poslouží k tvorbě řezných drah. Jádro by bylo obrobena v celku dle výkresu na dvě upnutí. V prvním by se obrobila zadní část, což znamená ta část s prostorem pro hliníkový kroužek a upnutí by bylo pomocí upínek. Ve druhém upnutí by se nejprve nalepil již hotový kroužek do vzniklého prostoru a celé by se to upnulo do univerzálního sklíčidla, kde by došlo k dokončení jádra. Lze jej také vyrobit ve formě tří stejných segmentů, ale to záleží na velikosti a parametrech stroje.

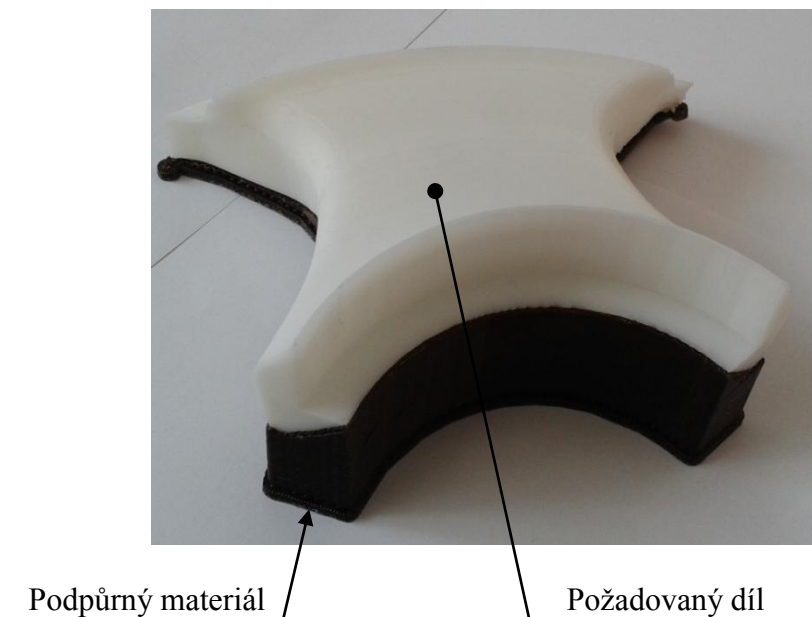
Tento způsob výroby je velice přesný, ale na druhou stranu časově náročný a to vyžaduje i potřebnou výrobní kapacitu, a proto se tento způsob nerealizoval. Dále je potřeba kvalifikovaná obsluha, programátor a vhodné nástroje.

Hmotnost celého jádra, bez kroužku, by činila cca 190 g, což záleží na druhu a hustotě pěnového polyuretanu, který bude použit.

11.2.2 Technologie 3D tisku

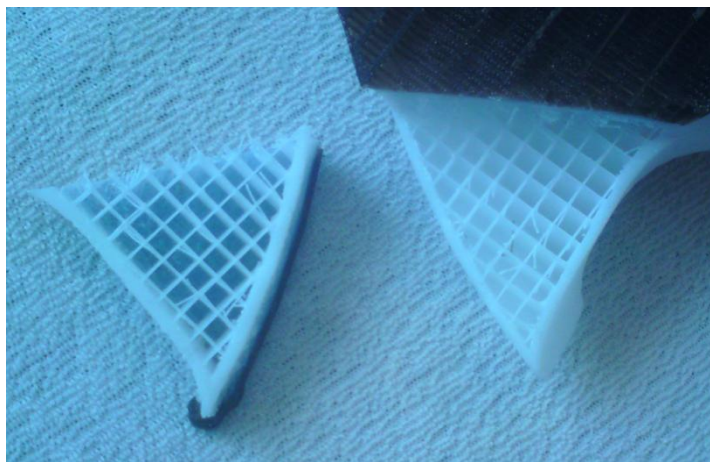
V tomto případě jde o technologii, kdy se materiál v podobě struny odvíjí ze zásobníku a prochází tavnou hlavou, která se pohybuje ve třech osách a je řízená pomocí CNC systému.

Materiálem jádra je zde ABS, protože PUR touto technologií nelze zpracovat. Nejprve byl model jádra rozdělen na tři stejné segmenty po 120°, kvůli malému pracovnímu prostoru tiskárny. Dále se tento model segmentu rozvrstvil, protože tiskárna pracuje na principu postupného vrstvení strunového materiálu. Samotný proces začíná výstavbou podpůrného materiálu, aby nedošlo ke zborcení tisknuté součásti, a který se na závěr odstraní a poté dojde k výstavbě požadovaného dílu.



Obr. 64. Vytisknutý segment paprsku

ABS má sice větší hustotu než pěnový PUR, ale výsledný díl má uvnitř vytisknutou voštinovou strukturu a tudíž se jedná o téměř duté těleso a celková hmotnost jádra je proto přibližně stejná jako u předchozí technologie, která činí 75 g na jeden segment a 225 g jako celek.



Obr. 65. Vnitřní struktura segmentu

ABS sice nemá tak vysokou tepelnou odolnost jako PUR, ale to se jedná o provozní neboli dlouhodobou tepelnou odolnost, tudíž by mohl proces vytvrzování disku vydržet, protože se nejedná o dlouhodobé tepelné zatížení.

Tento způsob výroby je vcelku jednoduchý, ale zdlouhavý, protože jeden segment se tiskl cca 7 hodin a nutností příslušného strojního vybavení.



Obr. 66. Výsledný segment jádra paprsku

V poslední řadě se jednotlivé segmenty nalepí pomocí lepidla „Mamut“ na hliníkový kroužek čímž vznikne jednotné jádro pro uhlíkový disk, které se poté zaformuje.

11.3 Výroba uhlíkového disku

V této kapitole budou uvedeny pomůcky, formovací prostředky a strojní vybavení, které jsou potřebné pro výrobu uhlíkového disku. Následuje popis samotného uhlíkového materiálu a výpočet jeho potřebného množství na zhotovení jednoho disku. S tím souvisejí technologické podmínky vytvrzování, které budou taktéž uvedeny. Nakonec bude popsán samotný technologický postup výroby uhlíkového disku.

11.3.1 Pomůcky, formovací prostředky a strojní vybavení

Pomůcky, které budou potřeba k výrobě disku, jsou:

- Nůžky
- Rukavice
- Lámací nůž
- Hladítko
- Forma
- Čistící tkanina

Mezi hlavní strojní vybavení, které by mělo být použito, lze zařadit:

- Vývěvu
- Plotr
- Autokláv nebo vytvrzovací pec
- Vakuovací ventil
- Hadice

Mezi formovací materiál, látky a prostředky, lze uvést:

- Aceton
- Fólie (pytel) na vakuování
- Těsnící páska
- Odtrhová tkanina
- Odsávací rohož
- Separátor
- Uhlíkový prepreg

11.3.2 Výpočet potřebného množství uhlíkového prepregu a jeho ceny

Zde je uveden výpočet potřebného množství uhlíkového prepregu v metrech čtverečních, které budou potřeba na výrobu jednoho uhlíkového disku. Uveden je i výpočet jeho ceny.

Dáno:

- Plocha disku: $S_D = 0,536 \text{ m}^2$
- Tloušťka uhlíkového prepregu: $t_C = 0,2 \text{ mm}$
- Tloušťka stěny ráfku: $t_R = 3 \text{ mm}$
- Cena za 1 m^2 : $26,82 \text{ Euro/m}^2$

Výpočet počtu vrstev p :

$$p = \frac{t_R}{t_C} = \frac{3}{0,2} = \mathbf{15 \text{ vrstev}}$$

Výpočet celkové počtu metrů čtverečních S :

$$S = p \cdot S_D = 15 \cdot 0,536 = \mathbf{8,04 \text{ m}^2}$$

Výpočet ceny materiálu:

$$S \cdot 26,82 = 8,04 \cdot 26,82 = \mathbf{231,71 \text{ Euro} \doteq 6256 \text{ Kč}}$$

Z toho vyplývá, že jeden disk se bude skládat z patnácti vrstev uhlíkového prepregu o celkové ploše 8,04 m² a ceně 6256 Kč. Vzhledem k tomu, že tloušťka stěny není konstantní po celém disku, se proto uvažovala ta největší. To co zbude, bude sloužit jako rezerva anebo to bude jako odpad. Závisí to na zručnosti a nástřížném plánu.

11.3.3 Druh a popis vlastností zvoleného uhlíkového prepregu

Pro výrobu disku by byl zvolen materiál v podobě uhlíkového prepregu o celkové gramáži 200 g/m² s keprovou vazbou 2/2. Tento druh vazby je velmi vhodný pro tvarově složité výrobky, kterým je i tento disk a dobře se klade do formy. Prepreg tvoří nejen uhlíková tkanina, ale i epoxidový systém ze 42 procent, což je standardní prosycení. Tyto i ostatní parametry a vlastnosti jsou uvedeny v tabulce číslo 3. Obchodní označení vybraného uhlíkového prepregu je GG200T-DT120-42.

Tab. 3. Parametry uhlíkového prepregu GG200T-DT120-42 [38]

Caratteristiche del tessuto impregnato/ Features of the impregnated fabric:

| | |
|---|--|
| Tipo di filato (Ordito; Trama)/ Yarn type (Warp; Weft) | Carbonio alta resistenza 3K/ 3K HS Carbon |
| Stile di tessitura/ Weaving style | Twill 2x2 |
| Larghezza standard/ Standard width | 1000 ± 5 mm (esclusa cimosa/ without selvedge) |
| Lunghezza standard/ Standard length | 50 ± 5 m |
| Ordito (fili/ cm)/ Warp (ends/ cm) | 4,90 ± 0,10 |
| Trama (fili/ cm)/ Weft (picks/ cm) | 5,00 ± 0,10 |
| Peso areale fibra secca/ FAW | 200 ± 8 g/m ² |
| Contenuto di resina/ Resin content | 42 ± 3 % in peso/ by weight |
| Contenuto di volatili/ Volatile content | < 0,8 % in peso/ by weight (3) |
| Spessore lamina/ Laminate thickness | 0,230 mm (4) |
| Conservazione/ Shelf life | 30 giorni @ 21°C/ 30 days @ 21°C 12 mesi @ -18°C/ 12 months @ -18°C |

(3) Perdita in peso dopo 15 min in forno ventilato a 160°C/ Weight loss after 15 min in oven @ 160°C

(4) Valore indicativo, può variare in funzione dell'eventuale fuoriuscita di resina dal laminato e dalla porosità residua/ This value depends on eventual resin bleed out and/or residual porosity in the cured laminate

(*) Per maggiori dettagli riferirsi alla corrispondente matrix TDS/ For additional information please refer to the appropriate matrix TDS

11.3.4 Technologické podmínky vytvrzování

Průběh a správnost samotného procesu vytvrzování udávají již zmíněné technologické podmínky vytvrzování. Tyto podmínky jsou velmi důležité a měly by být dodrženy, aby se

dosáhlo požadovaného výrobku. Jinak by mohlo dojít k poškození samotného prepregu. Nejdůležitější je teplota vytvrzování, která činí 80 – 135°C a doba vytvrzování. Další podmínky jsou uvedeny v tabulce číslo 4.

Tab. 4. Podmínky vytvrzování pro uhlíkový prepreg GG200T-DT120-42 [38]

Caratteristiche del sistema resinoso/ Features of the resin matrix: ()*

| | |
|--|---|
| Natura del formulato/ <i>Chemical nature</i> | Epossidico termoindurente altamente tenacizzato/ <i>High toughened thermosetting epoxy</i> |
| Temperatura di cura/ <i>Cure temperature</i> | 80 ÷ 135°C |
| Gel time | 29 ÷ 33 min @ 100°C 8 ÷ 13 min @ 120°C |
| Tg [Ciclo di cura]/ <i>Tg [Cure cycle]</i> | 115 ÷ 120°C [90 min @ 120°C] 115 ÷ 120°C [40 min @ 135°C] (1) |
| Viscosità/ <i>Viscosity</i> | Alta/ <i>High</i> (2) |
| Trasparenza/ <i>Transparency</i> | Da discreta a buona/ <i>Fair to Good</i> |
| Stabilità all'ingiallimento/ <i>UV stability</i> | Buona/ <i>Good</i> |
| Indicato per applicazioni dove siano richiesti:/ <i>Recommended for those applications requiring:</i> | - Alta resistenza all'impatto/ <i>High impact resistance</i> - Assorbimento dell'energia a impatto/ <i>Impact Energy Absorption</i> - Buona finitura superficiale/ <i>Good surface finish</i> |

(1) Misurata con DSC alla velocità di scansione di 20°C/min / *Measured by DSC @ 20°C/min*

(2) Viscosità complessa misurata a 60°C maggiore di 2.000 Poise (frequenza 10 rad/sec) / *Complex viscosity > 2.000 Poise @ 60°C (frequency 10 rad/sec)*

11.3.5 Technologický postup výroby uhlíkového disku

V tomto případě se jedná o technologii, kde dochází ke kladení materiálu ve formě uhlíkového prepregu do hliníkové formy, která je v podstatě trojdílná, protože třetí část formy tvoří vakuovací fólie nebo pytel, do kterého se forma spolu se zaformovaným diskem vloží a pomocí něj a vývěvy se vytvoří vakuum, které napomáhá ke tvarování součásti.

Existuje možnost vytvořit i pevnou třetí část formy jako segmenty s profilem ráfku, ale to by prodražilo nejen samotnou formu, ale hlavně výsledný dílec. Dále by to zkomplikovalo samotnou výrobu formy a dílce.

Výrobu může provádět jedna nebo i více osob, to záleží na tom jak rychle je potřeba součást neboli disk vyrobit.

Samotný technologický postup výroby uhlíkového disku je následující:

1. Vezme se aceton a čisticí tkanina, kterými se očistí a odmastí funkční povrch tvárníku a tvárnice neboli formy. Tím bude forma připravena.
2. Aplikuje se separátor na funkční povrch tvárníku a tvárnice. Separátor zajistí snadné a bezpečné odformování. Případně lze poté aplikovat i gelcoat.
3. Postupně se kladou jednotlivé vrstvy uhlíkového prepregu na tvárník a poté i na tvárnici, až vznikne vrstva silná 2 mm na obou částech formy. Předtím je uhlíkový prepreg nastříhán na požadované útvary. Během kladení se musejí ořezávat vzniklé zbytky v dělicí rovině, aby je šlo poté smontovat.
4. Očistí se a odmastí již slepené jádro jako celek a vloží se do tvárníku.
5. Na tvárník s již vloženým jádrem se položí a ustaví tvárnice s vytvořenou vrstvou uhlíkového prepregu a dojde ke spojení obou částí formy pomocí šroubů.
6. Po montáži se kladou další nastříhané útvary uhlíkového prepregu na vzniklý obvod disku z tvárnice a tvárníku, až vznikne požadovaná a konečná vrstva o tloušťce 3 mm.
7. Na vzniklý obvod disku z uhlíkového prepregu se aplikuje odtrhová tkanina a na ní pak odsávací rohož.
8. Do připravené vakuovací fólie nebo pytle s vakuovacím ventilem se vloží již celá připravená forma s nakladeným uhlíkovým prepregem, vloženým jádrem a aplikovanou odtrhovou tkaninou a odsávací rohoží.
9. Pomocí vývěvy se odsaje vzduch a vznikne vakuum.
10. Forma je připravená a lze ji vložit do autoklávu nebo vytvrzovací pece na 120°C po dobu 13 minut dle vytvrzovacích podmínek. Lze je upravit vzhledem k materiálu formy a její velikosti.
11. Po vytvrzení se forma rozloží a vyjme se hotový uhlíkový disk. Sejme se odsávací rohož a odtrhová tkanina.
12. Pomocí CNC stroje se vyvrtají unášecí otvory a otvor pro ventil.
13. Otvor na ventil se ošetří epoxidovou pryskyřicí, kvůli těsnosti.

ZÁVĚR

V praktické části diplomové práce byla vysvětlena a popsána problematika konstrukce karbonového neboli uhlíkového disku pro automobilový průmysl. Konkrétně se jednalo o aplikaci na student formuli ve VUT Brno. Dále byla vysvětlena a popsána problematika konstrukce vytvrzovacího přípravku neboli formy na tento disk. Model disku a formy byl vytvořen CAD programem Catia V5R19. Dále pak byl popsán CAM program SolidCAM 2013, který je integrovaný v CAD programu SolidWorks 2012, na generování řezných drah a NC kódů pro případnou výrobu formy. Nakonec byl popsán samotný technologický postup výroby uhlíkového disku včetně podmínek vytvrzování a postup výroby jednotlivých jader.

Nejprve byl vytvořen výchozí model, podle původního disku, který se upravoval až do finální podoby. Poté se vytvořil model jádra středu disku, který je ve formě kroužku a model paprskového jádra. Tyto jádra se následně odečetly z modelu disku, aby byl zjištěn celkový objem disku a tudíž i hmotnost podle hustoty materiálu. Dále se vytvořila sestava disku a obou jader. Následuje popis konstrukčních prvků, které jsou důležité pro funkci disku, jejich modelování a výroba. Nakonec se vytvořila sestava disku uchyceného na náboji.

Dále byl vytvořen model formy na již vymodelovaný disk. Samotná forma je tvořena dvěma tvárníky. Jeden tvoří pohledovou část disku a druhý tvoří zadní a funkční část disku. Jako první je uvedení polohy a tvaru dělicí roviny. Pak je zobrazeno, co tvoří tvárník a tvárnici. Tato část práce se hlavně věnuje popisu, jak byly oba tvárníky formy neboli tvárník a tvárnice vymodelovány. Poté se věnuje konstrukčním prvkům, které zajišťují funkci formy. Mezi ně patří hlavně poloha spojovacích šroubů a kolíků. Jako poslední je zobrazen řez zaformovaným diskem a 3D model sestavy zaformovaného disku.

Ke konci se práce věnuje technologii výroby jádra středu disku a paprskového jádra. Popisuje se, jak bylo středové jádro disku, neboli kroužek ze slitiny hliníku, zhotoveno. Pak popisuje možné technologie výroby paprskového jádra pomocí CNC obrábění a 3D tisku. Dále byly uvedeny potřebné pomůcky, prostředky a strojní vybavení pro realizaci disku. Byl také uveden druh použitého uhlíkového prepregu s jeho vlastnostmi a vytvrzovacími podmínkami. Bylo vypočítané i jeho potřebné množství a jeho cena na výrobu jednoho disku. Jako poslední byl popsán technologický postup výroby uhlíkového disku.

Závěrem lze říci, že bylo docíleno správné konstrukce disku a bylo splněno zadání, protože se výsledná hmotnost disku snížila z původních cca 2,40 kg, kde tuto hodnotu uvedlo VUT Brno, na cca 2,13 kg, kde tato hodnota byla dána 3D modelem sestavy disku a střední hustotou uhlíkových vláken, která činila 1750 kg/m^3 , při zachování zadaných parametrů a funkčních prvků. Výsledná úspora činí cca 270 g.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *Juice magazin*. [online]. 2015. [cit. 25. března 2016]. Dostupný z WWW: <<http://juicemagazin.sk/2015/01/15/tehla-kamen-a-drevo-v-interieri/>>
- [2] DVOŘÁK, Z.; LAMBOROVÁ, R. *Základy výrobních procesů I.: Konstrukční materiály polymerní a kompozity* [online]. Zlín: UTB, 2008. [cit. 25. března 2016]. 64 s. Dostupné z WWW: <<http://www.utb.cz/ft/intranet-ft/studijni-podpora>>
- [3] *Všeobecný a základní popis materiálů používaných při výrobě kompozitů*. [online]. havel-composites.com. [cit. 25. března 2016]. Dostupný z WWW: <<http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/74-Vseobecny-a-zakladni-popis-materialu-pouzivanych-pri-vyrobe-kompozitu.html>>
- [4] *Uhlíkové vlákno*. [online]. poslední aktualizace 26. února 2016 18:29. [cit. 25. března 2016]. Wikipedia. Dostupný z WWW: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Uhl%C3%ADkov%C3%A9_vl%C3%A1kno>
- [5] GRÉGR, J.; SLAVÍK, M. *Chemické základy moderních materiálů*. [online]. 2009. [cit. 25. března 2016]. Dostupný z WWW: <<http://www.slideshare.net/kchtul/che-kompozity-nanotechnologie>>
- [6] *HT model*. [online]. 1991. [cit. 25. března 2016]. Dostupný z WWW: <<http://www.htmodel.sk/produkty/stavebny-material/uhlik-laminat/znacka-86/uhlikovy-roving-1610-tex-15449.html>>
- [7] GRÉGR, J. *Povrchové vlastnosti uhlíkových vláken*. [online]. říjen 2004. [cit. 25. března 2016]. Dostupný z WWW: <http://centrum.tul.cz/centrum/centrum/3Aplikace/3.1_zaverecne_zpravy/%5B3.1.09%5D.pdf>
- [8] PANCHÁRTEK, P.; JÍLEK, J. *Nanoelektromechanické systémy*. [online]. 22. května 2015. [cit. 25. března 2016]. Dostupný z WWW: <http://www.aldebaran.cz/bulletin/2015_19_qua.php>
- [9] LAŠ, V. *Úvod do modelování v mechanice: Mechanika kompozitních materiálů*. [online]. Liberec: TUL 2010. [cit. 30. března 2016]. Dostupný z WWW: <http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/KM/Kompozity%20Dad/05_vlakna.pdf>

- [10] *Duratec: Použité materiály*. [online]. 2011. [cit. 30. března 2016]. Dostupný z WWW: <<http://www.duratec.cz/cs/techinfo/pouzivane-materialy/uhlikova-vlakna-karbonove-kompozity/>>
- [11] *SpiderCars*. [online]. 2015. [cit. 30. března 2016]. Dostupný z WWW: <<http://spidercars.net/2014-bmw-i8/>>
- [12] *Carbon fiber gear: Weds sport full carbon fiber wheel*. [online]. 2010. [cit. 30. března 2016]. Dostupný z WWW: <<http://www.carbonfibergear.com/weds-sport-full-carbon-fiber-wheel/>>
- [13] *Autofun*. [online]. 2011. [cit. 30. března 2016]. Dostupný z WWW: <<http://autofun.blesk.cz/audi-ski-6880/fotky/7/>>
- [14] JANČÁŘ, J. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. 1. vyd. Brno, 2003, 194 s. ISBN 80-214-2443-5.
- [15] KORÍNEK, Z. *Technologie*. [online]. 2014. [cit. 30. března 2016]. Dostupný z WWW: <<http://mujweb.cz/zkorinek/technologie.pdf>>
- [16] *Plastic: Ruční laminace* [online]. 2016. [cit. 30. března 2016]. Dostupný z WWW: <http://www.plastic.cz/technologie-rucni_laminace>
- [17] BISKUP, P. *Lehké materiály – Nové požadavky* [online]. automobilrevue.cz, 20. březen 2012. [cit. 30. března 2016]. Dostupný z WWW: <http://www.automobilrevue.cz/rubriky/technika/lehke-materialy-nove-pozadavky_40846.html>
- [18] *Technologie jejich popis a schémata*. [online]. havel-composites.com. [cit. 30. března 2016]. Dostupný z WWW: <<http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/76-Technologie-jejich-popis-a-schemata.html>>
- [19] *ECTA*. [online]. 2012. [cit. 28. února 2016]. Dostupný z WWW: <<http://test.ecta-gmbh.de/index.php/de/verfahren-de/spritzpressen-de>>
- [20] EHRENSTEIN, W. G. *Polymerní kompozitní materiály*. 1. vydání. Praha: Scientia, 2009. 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [21] *DRAG ZINE*. [online]. 2014. [cit. 30. Března 2016]. Dostupný z WWW: <<http://www.dragzine.com/features/shop-tours/shop-tour-from-shocks-to-carbon-fiber-driveshafts-at-qa1/>>
- [22] *American muscle*. [online]. 2016. [cit. 30. Března 2016]. Dostupný z WWW: <<http://www.americanmuscle.com/dss-cf-driveshaft-0712gt500.html>>

- [23] *Charles: Formy*. [online]. 2016. [cit. 30. března 2016]. Dostupný z WWW: <<http://www.charles.cz/formy/>>
- [24] *Kompozitní materiály*. [online]. České Budějovice: VŠTE 2000. [cit. 30. března 2016]. Dostupný z WWW: <<http://slideplayer.cz/slide/6936677/>>
- [25] *Kompozity Michalík s.r.o.: Služby*. [online]. 2005 – 2016. [cit. 30. března 2016]. Dostupný z WWW: <<http://www.kompozity-michalik.cz/sluzby>>
- [26] *Allbiz: Lisovací forma z hliníkových slitin*. [online]. 2016. [cit. 30. března 2016]. Dostupný z WWW: <<http://sanok.all.biz/cs/lisovaci-forma-z-hlinikovych-slitin-g230280#.Vv-ObOKLRdj>>
- [27] VLK, F. *Podvozky motorových vozidel*. 3. vydání Brno: Nakladatelství a vydavatelství VLK, 2006. 464 s. ISBN 80-239-6464-X.
- [28] BROŽ, J. *Praktická dílna*. [online]. říjen 2007. [cit. 30. března 2016]. Dostupný z WWW: <<http://www.znalec.tym.cz/kola%20a%20pneu.pdf>>
- [29] JAN, Z.; ŽDÁNSKÝ, B. *Automobily I: podvozky*. 1. vydání Brno. Vydavatelství: Avid spol. s r.o. v Brně. 2001. 228 s. ISBN: 978-80-87143-03-2
- [30] *Hliníkový disk*. [online]. poslední aktualizace 26. února 2016 18:29. [cit. 30. března 2016]. Wikipedia. Dostupný z WWW: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Hlin%C3%ADkov%C3%BD_disk>
- [31] *ELUC: Kola*. [online]. 2016. [cit. 30. března 2016]. Dostupný z WWW: <<https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1488>>
- [32] *Autonet: Ráfky*. [online]. 20. duben 2011. [cit. 30. března 2016]. Dostupný z WWW: <<http://net-auto.cz/moodle/mod/resource/view.php?r=122>>
- [33] *Auto Kulhánek: Drátěná kola*. [online]. 2015. [cit. 30. března 2016]. Dostupný z WWW: <<http://www.auto-kulhanek.cz/auto-kulhanek-prodej/dratena-kola>>
- [34] *Borbet – Motorsport spol. s.r.o.* [online]. 2011. [cit. 30. března 2016]. Dostupný z WWW: <<http://www.borbet.cz/alu-kola-borbet-fs.html>>
- [35] *Technodat*. [online]. 2016. [cit. 2. května 2016]. Dostupný z WWW: <<http://www.technodat.cz/catia-v5>>
- [36] *SolidCAM*. [online]. 2016. [cit. 2. května 2016]. Dostupný z WWW: <<http://www.solidcam.cz/company/about-solidcam/>>

- [37] *GLEICH Aluminium, s.r.o.* [online]. 2016. [cit. 2. května 2016]. Dostupný z WWW: <<http://gleich.de/cz/produkty/vlcovan-desky/vlcovan-desky-na-vrobuforem/certal-spc?pdf>>
- [38] *BOKATECH, s.r.o.* [online]. 2012. [cit. 2. května 2016]. Dostupný z WWW: <<http://www.bokatech.cz/>>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| | | |
|-------|--|-----------------------------------|
| CNC | Computer Numerical Control | Počítačem číslicové řízené |
| NC | Numerical Control | Číslicové řízené |
| BMW | Bayerische Motoren Werke | Bavorská motorová dílna |
| CAD | Computer Aided Design | Počítačová podpora konstrukce |
| DIN | Deutsche Industrie Norm | Německá průmyslová norma |
| MDF | Medium Density Fibreboard | Středně hustá dřevovláknitá deska |
| UD | Undirectional | Jednosměrné |
| HT | High tensile | Vysoká pevnost |
| IM | Intermediate modulus | Střední modul |
| HM | High modulus | Vysoký modul |
| UHM | Ultrahigh modulus | Ultra vysoký modul |
| VGCF | Vapor Grown Carbon Fiber | Parou pěstované uhlíkové vlákno |
| SBCF | Stretch Broken Carbon Fiber | Tažením rozdělené uhlíkové vlákno |
| SMC | Sheet Molding Compound | |
| SMC-R | Sheet Molding Compound Random | |
| SMC-C | Sheet Molding Compound Continuous | |
| SMC-D | Sheet Molding Compound Directed | |
| RTM | Resin Transfer Molding | |
| LRTM | Light Resin Transfer Molding | |
| SQRTM | Some Qualified Resin Transfer Molding | |
| VARTM | Vacuum Assisted Resin Transfer Molding | |
| HSRTM | Hight Speed Resin Transfer Molding | |
| PAN | Polyakrylonitril | |
| 3D | Tří rozměrný prostor | |

| | | |
|----------------------|----------------------------|-------------------|
| VUT | Vysoké Učení Technické | |
| PUR | Polyuretan | |
| ABS | Akrylonitrilbutadienstyren | |
| C | Chemická značka uhlíku | |
| σ | Napětí | [MPa] |
| ε | Deformace | [-], [%] |
| ρ | Hustota | kg/m ³ |
| d | Průměr | mm |
| °C | Stupně celsia | |
| <i>mm</i> | Milimetr | |
| <i>kg</i> | Kilogram | |
| <i>m³</i> | Metr krychlový | |
| <i>MPa</i> | Megapascal | |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|--|----|
| <i>Obr. 1. Laminární kompozit – dřevěná překližka [1]</i> | 12 |
| <i>Obr. 2. Synergické chování kompozitu [2]</i> | 13 |
| <i>Obr. 3. Tahové křivky křehké matrice a kompozitu [2]</i> | 13 |
| <i>Obr. 4. Základní složení kompozitního materiálu [2]</i> | 14 |
| <i>Obr. 5. Schéma tkaniny s plátňovou vazbou [3]</i> | 15 |
| <i>Obr. 6. Schéma tkaniny s keprovou vazbou [3]</i> | 15 |
| <i>Obr. 7. Schéma tkaniny se saténovou vazbou [2]</i> | 16 |
| <i>Obr. 8. Nalevo řez uhlíkovým vláknem a napravo cívka s tímto vláknem [5], [6]</i> | 19 |
| <i>Obr. 9. Polyakrylnitrilové vlákno pro výrobu uhlíkového vlákna [4]</i> | 20 |
| <i>Obr. 10. Struktura uhlíkové nanotrubičky [8]</i> | 23 |
| <i>Obr. 11. Únavové chování různých druhů kompozitů [10]</i> | 25 |
| <i>Obr. 12. Tahová charakteristika oceli a kompozitu [2]</i> | 25 |
| <i>Obr. 13. Automobil BMW i8 vyroben z uhlíkového kompozitu [11]</i> | 26 |
| <i>Obr. 14. Karbonový automobilový ráfek [12]</i> | 27 |
| <i>Obr. 15. Karbonové sjezdové lyže [13]</i> | 27 |
| <i>Obr. 16. Schéma principu ručního laminování [16]</i> | 29 |
| <i>Obr. 17. Příklad ručního laminování střechy na Lamborghini [17]</i> | 29 |
| <i>Obr. 18. Schéma technologie RTM [19]</i> | 30 |
| <i>Obr. 19. Schéma výroby SMC polotovaru [20]</i> | 33 |
| <i>Obr. 20. Schéma technologie navíjení [15]</i> | 34 |
| <i>Obr. 21. Výroba uhlíkového kardanového hřídele [21]</i> | 35 |
| <i>Obr. 22. Uhlíkový kardanový hřídel [22]</i> | 35 |
| <i>Obr. 23. Virtuální model karoserie vozu [25]</i> | 37 |
| <i>Obr. 24. Obrobený skutečný model z MDF desek [25]</i> | 37 |
| <i>Obr. 25. Hotová kompozitní forma [25]</i> | 38 |
| <i>Obr. 26. Hotová kompozitní karosérie vozu [25]</i> | 39 |
| <i>Obr. 27. Příklad hliníkové formy [26]</i> | 40 |
| <i>Obr. 28. Jednodílný ráfek: vlevo symetrický a vpravo asymetrický [28]</i> | 42 |
| <i>Obr. 29. Diskové kolo [31]</i> | 43 |
| <i>Obr. 30. Hlavní rozměry diskového kola [31]</i> | 43 |
| <i>Obr. 31. Hvězdicové kolo typu Trilux [32]</i> | 44 |
| <i>Obr. 32. Drátové kolo [33]</i> | 45 |

| | |
|---|----|
| <i>Obr. 33. Paprskové kolo z hliníku [34]</i> | 46 |
| <i>Obr. 34. Hlavní rozměry kola z hliníku [27]</i> | 46 |
| <i>Obr. 35. Výsledný návrh karbonového disku</i> | 50 |
| <i>Obr. 36. Hořčikový disk nyní používaný na student formulí ve VUT Brno</i> | 53 |
| <i>Obr. 37. Tvar a rozměry původního disku</i> | 54 |
| <i>Obr. 38. Řez výchozího modelu pro paprsky</i> | 55 |
| <i>Obr. 39. Model po vytvoření jednoho mezi-paprskového prostoru</i> | 56 |
| <i>Obr. 40. Řez a detail modelu s upraveným středem</i> | 57 |
| <i>Obr. 41. Řez modelu s vytvořeným profilem ráfku</i> | 58 |
| <i>Obr. 42. Navázání parsku na ráfek pomocí zaoblení</i> | 59 |
| <i>Obr. 43. Model segmentu disku</i> | 60 |
| <i>Obr. 44. Celistvý model disku</i> | 60 |
| <i>Obr. 45. Model jádra disku ve formě paprsků z PUR pěny</i> | 61 |
| <i>Obr. 46. Model hliníkového kroužku jako výztuže</i> | 62 |
| <i>Obr. 47. Řez modelu disku s dutými paprsky a středem</i> | 63 |
| <i>Obr. 48. Spojení hliníkového kroužku a paprskového jádra disku</i> | 64 |
| <i>Obr. 49. Sestava složení disku</i> | 64 |
| <i>Obr. 50. Hotový model disku s otvory pro unášecí kolíky a otvorem pro ventilek</i> | 65 |
| <i>Obr. 51. Ventilek</i> | 65 |
| <i>Obr. 52. Model disku uchycený na náboji</i> | 66 |
| <i>Obr. 53. Disk s vyznačenou dělicí rovinou</i> | 67 |
| <i>Obr. 54. Barevné rozlišení tvárníku a tvárnice</i> | 68 |
| <i>Obr. 55. Hotový model tvárnice – funkční strana</i> | 69 |
| <i>Obr. 56. Hotový model tvárnice – zadní strana</i> | 69 |
| <i>Obr. 57. Hotový model tvárnice – konstrukční prvky</i> | 70 |
| <i>Obr. 58. Hotový model tvárníku – funkční strana</i> | 71 |
| <i>Obr. 59. Hotový model tvárníku – zadní strana</i> | 71 |
| <i>Obr. 60. Hotový model tvárníku – konstrukční prvky</i> | 72 |
| <i>Obr. 61. Řez zaformovaným diskem a formou</i> | 73 |
| <i>Obr. 62. Zcela zaformovaný disk</i> | 74 |
| <i>Obr. 63. Kroužek jako výztužné jádro středu disku</i> | 75 |
| <i>Obr. 64. Vytisknutý segment paprsku</i> | 77 |
| <i>Obr. 65. Vnitřní struktura segmentu</i> | 77 |

Obr. 66. Výsledný segment jádra paprsku..... 78

SEZNAM TABULEK

| | |
|---|-----------|
| <i>Tab. 1. Mechanické vlastnosti některých druhů uhlíkových a skleněných vláken [4]</i> | <i>24</i> |
| <i>Tab. 2. Specifikace materiálu AlZn5Mg3Cu1,5 [37].....</i> | <i>75</i> |
| <i>Tab. 3. Parametry uhlíkového prepregu GG200T-DT120-42 [38]</i> | <i>80</i> |
| <i>Tab. 4. Podmínky vytvrzování pro uhlíkový prepreg GG200T-DT120-42 [38]</i> | <i>81</i> |

SEZNAM PŘÍLOH

P. I.: Vytisknuté výkresy disku, formy, jader a sestav

P. II.: CD/DVD disk obsahující:

- diplomovou práci
- model disku pro student formulí
- model formy na příslušný disk
- modely jader
- výkresy disku, jader a formy