

# Návrh nástroje pro výrobu kompozitního motocyklového disku

Tomáš Růčka

---

Bakalářská práce  
2023



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Tomáš Růčka**  
Osobní číslo: **T20268**  
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Technologická zařízení**  
Forma studia: **Prezenční**  
Téma práce: **Návrh nástroje pro výrobu kompozitního motocyklového disku**

## Zásady pro vypracování

1. Vypracování literární rešerše s pomocí odborných zdrojů.
2. Návrh modelu kompozitního motocyklového disku.
3. Návrh konstrukce formy pro výrobu kompozitního motocyklového disku.
4. Návrh metodiky zkoušení kompozitního disku.

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

Seznam doporučené literatury:

1. SHIGLEY, J. E., MISCHKE, Ch. R., BUDYNAS, R. G. a VLK M. Konstruování strojních součástí. 1. vyd. V Brně: VUTIUM, 2010, xxv, 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.
2. EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
3. HARPER, Charles A. Handbook of plastics, elastomers, and composites. 4th ed. New York: McGraw-Hill, c2002, xii, 884 p. ISBN 00-713-8476-6.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Lukáš Maňas, Ph.D.**  
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2023**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **19. května 2023**

**prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.**  
děkan

L.S.

**Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.**  
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 22. února 2023

## **PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji 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;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – 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);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům; pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

### **Prohlašuji,**

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....  
podpis studenta

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce pojednává o návrhu nástroje pro výrobu zadního disku motocyklu z kompozitního materiálu.

V teoretické části práce je zahrnut obecný popis kompozitních materiálů, jejich rozdělení a materiály jednotlivých fází. Dále se teoretická část zabývá zpracovatelskými technologiemi pro výrobu součástí z kompozitních materiálů a jejich následnému využití. Poslední část literární rešerše se zabývá karbonovými disky, jejich namáháním, testováním a nástroji pro jejich výrobu.

Praktická část bakalářské práce se zabývá tvorbou 3D modelů karbonového disku, návrhem nástroje a součástí pro jeho výrobu a v neposlední řadě tvorbou metodiky pro testování karbonového disku. K realizaci praktické části byl použit software Autodesk Inventor 2023.

Klíčová slova: kompozitní materiály, forma, motocyklový disk, uhlíkový disk, Autodesk Inventor

## **ABSTRACT**

The bachelor thesis deals with the design of a tool for the production of a motorcycle rear disc made of composite material.

The theoretical part of the thesis includes a general description of composite materials, their classification and materials of each stage. Furthermore, the theoretical part deals with processing technologies for the production of parts from composite materials and their subsequent use. The last part of the literature search deals with carbon discs, their stresses, testing and tools for their production.

The practical part of the bachelor thesis deals with the creation of 3D models of carbon disc, design of tools and components for its production and last but not least the creation of methodology for testing carbon disc. Autodesk Inventor 2023 software was used to implement the practical part.

Keywords: composite materials, mould, motorcycle disc, carbon disc, Autodesk Inventor

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Lukáši Maňasovi, Ph.D. za projevenou trpělivost, strávený čas nad vedením mé práce a cenné rady, které dopomohly jejímu vypracování. Dále bych rád poděkoval své rodině a blízkému okolí za podporu po dobu mého studia.

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

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY</b> .....	<b>11</b>
1.1 ROZDĚLENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ .....	11
1.1.1 Vláknové kompozitní materiály .....	12
1.1.2 Částicové kompozitní materiály .....	12
1.2 MATRICE .....	12
1.2.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R) .....	12
1.2.2 Epoxidové pryskyřice (EP-R) .....	13
1.2.3 Vinylesterové pryskyřice (VE-R) .....	13
1.3 VÝZTUŽE .....	13
1.3.1 Materiály vláken výztuží .....	14
1.3.2 Polotovary výztuží .....	16
<b>2 TECHNOLOGIE ZPRACOVÁNÍ KOMPOZITŮ</b> .....	<b>17</b>
2.1 PREPREG (PREIMPREGNATED FIBERS) .....	17
2.2 VYUŽITÍ PREFORMU .....	18
2.3 VYTVRZOVÁNÍ V AUTOKLÁVU .....	18
2.4 VYTVRZOVÁNÍ V PEČI .....	19
2.5 RTM METODA .....	19
<b>3 VYUŽITÍ UHLÍKOVÝCH KOMPOZITŮ</b> .....	<b>20</b>
3.1 LETECKÝ PRŮMYSL .....	20
3.2 AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL .....	21
3.3 SPORTOVNÍ POMŮCKY .....	21
<b>4 KOMPOZITNÍ UHLÍKOVÉ DISKY</b> .....	<b>23</b>
4.1 MATERIÁL FOREM .....	23
4.2 JÁDRA .....	24
4.2.1 Pěnová jádra .....	25
4.2.2 3D tisk jader .....	26
4.2.3 Duralové vložky .....	26
4.3 NAMÁHÁNÍ UHLÍKOVÝCH DISKŮ .....	27
4.4 ZKOUŠKY UHLÍKOVÝCH DISKŮ .....	27
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>28</b>
<b>5 STANOVENÍ CÍLŮ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE</b> .....	<b>29</b>
<b>6 TVORBA MODELU DISKU</b> .....	<b>30</b>
6.1 NÁVRHY MODELŮ .....	30

6.1.1	Disk s šestiúhelníkovými paprsky.....	31
6.1.2	Disk s vytažitelným jádrem paprsku.....	32
6.1.3	Disk se zúženými paprsky.....	33
6.1.4	Disk s tvarem hvězdy.....	34
6.2	JÁDRA.....	35
6.2.1	Materiál jader.....	35
6.2.2	Jádra paprsku.....	36
6.2.3	Výroba jádra paprsku.....	37
6.2.4	Středové jádro.....	38
6.3	MODEL SESTAVY.....	39
<b>7</b>	<b>KONSTRUKCE FORMY.....</b>	<b>41</b>
7.1	MODEL PRO ZAFORMOVÁNÍ.....	41
7.2	VOLBA DĚLÍCÍ ROVINY.....	43
7.3	STŘEDĚNÍ FORMY.....	43
7.4	DĚLENÍ FORMY PRO VÝROBU.....	44
7.5	TRANSPORTNÍ ZAŘÍZENÍ.....	46
7.6	FORMOVÁNÍ DISKU.....	47
<b>8</b>	<b>NÁVRH METODIKY TESTOVÁNÍ KOMPOZITNÍCH DISKŮ.....</b>	<b>49</b>
8.1	ÚNAVOVÁ ZKOUŠKA OHYBEM ZA ROTACE.....	49
8.2	ODVALOVACÍ ZKOUŠKA.....	49
8.3	RÁZOVÁ ZKOUŠKA.....	50
8.4	ZKOUŠKA ZKRUTU.....	51
8.5	ZKOUŠKA ÚNIKU VZDUCHU.....	51
	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>53</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>54</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>58</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>60</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>62</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>63</b>



## ÚVOD

Těžko si lze představit svět bez kompozitních materiálů, které nás stále ve větší míře obklopují, a lze s větší nadsázkou říci, že jsou staré jako lidstvo samo. Už ve starém Egyptě lidé budovali svá obydlí pomocí hlíny vyztužené slámou nebo rákosem. Tohle poznání o materiálech, které mají díky jejich kombinaci unikátní vlastnosti v nás přetrvává dodnes. Kompozitní materiály se stávají stále více rozšířené a setkáváme se s nimi na každém kroku ať už jako se součástí automobilového průmyslu, při letu letadlem nebo jako stavebním materiálem.

S větším nárůstem používání těchto materiálů bylo také potřeba vyvíjet technologie pro jejich výrobu a nástroje pro jejich zpracování. Mezi stále hojně využívané metody patří kladení před impregnovaných rohoží do dutiny formy. Touto technologickou operací dostáváme výrobek, který je dokonalým negativem dutiny formy.

Dávno jsou pryč doby, kdy musel stát konstruktér za rýsovacím prknem a takový výrobek nebo formu složitě rýsovat na papír. Technologický vývoj zasáhl i toto odvětví, které konstruktérovi umožňuje využití 2D a 3D softwarů pro přenesení svých myšlenek do virtuálního prostředí. Tohle softwarové prostředí neslouží pouze pro zhmotnění myšlenek ve virtuální model nýbrž díky němu lze i simulovat reálný proces a eliminovat chyby před samotnou výrobou.

# I. TEORETICKÁ ČÁST

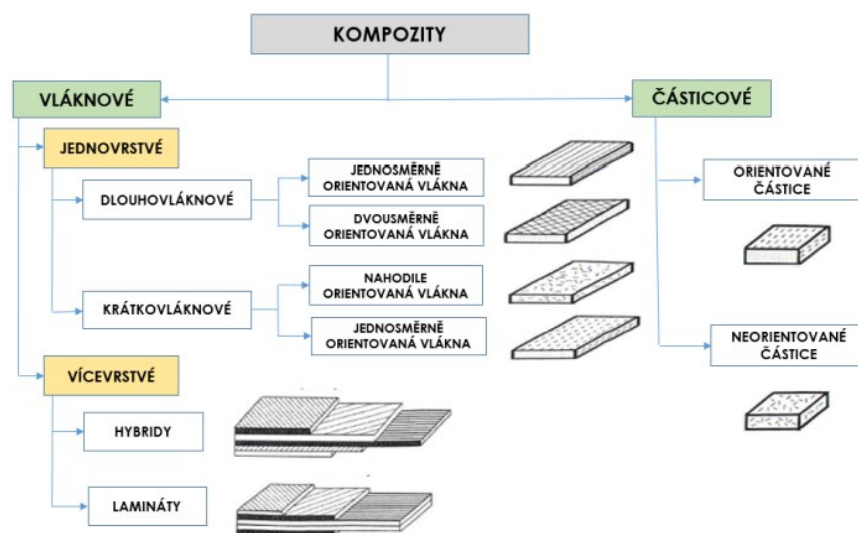
# 1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozitní materiály jsou v současné době obsaženy téměř ve všech technologických odvětvích. Stávají se rozšířené zejména díky svým výhodám, které přinášejí oproti konvenčním materiálům. Tento materiál je tvořen ze dvou či více heterogenních fází, které se liší jak svými mechanickými, tak i chemickými a fyzikálními vlastnostmi. Spojením primární fáze-matrice a sekundární fáze-výztuže vzniká nový materiál-kompozit. Vlastnosti kompozitu jsou kombinací vlastností fázových materiálů a jejich objemového podílu. Na rozdíl od slitin kovů jsou jednotlivé materiály rozlišitelné na makroskopické úrovni.

Strojírenské materiály jsou homogenní a izotropní povahy. To značí, že jejich materiálové charakteristiky jsou ve všech bodech a směrech materiálu stejné. Nespojité povahy výztuže kompozitu znamená, že se materiálové charakteristiky mění jak v závislosti na poloze, tak i směru. Aby bylo dosaženo optimálních hodnot pevnosti a tuhosti z hlediska použití, je struktura kompozitních materiálů vyráběna z několika vrstev, kde jsou jednotlivé vrstvy různě orientovány. [1,6]

## 1.1 Rozdělení kompozitních materiálů

Kompozitní materiály se dělí na vláknové a částicové. Vláknové kompozity se pak dále dělí na jednovrstvé a vícevrstvé. Částicové kompozity se dělí dle orientace částic. [1]



Obrázek 1 – Rozdělení kompozitů [38]

### 1.1.1 Vláknové kompozitní materiály

Použití vláken v kompozitních materiálech jako konstrukčního materiálu vychází ze čtyř paradoxů. První paradox říká, že teoretická pevnost materiálu je podstatně vyšší než pevnost skutečná. To je způsobeno vadami a trhlinami v materiálu, které ovlivňují jeho skutečnou pevnost. Druhý paradox vláknité struktury říká, že materiál vláknité struktury má mnohonásobně vyšší pevnost než materiál ve formě kompaktní. S menším průměrem vlákna roste jeho pevnost v tahu. Vlákná se vyrábějí do průměru 14  $\mu\text{m}$ , jelikož dalším zmenšováním průměru mohou vlákna pronikat do plic. Rovnoměrné umístění vláken do matrice má výhodu zejména díky rozložení napětí a skrytí vad a poruch vláken. Jejich pevnost v kompaktní formě je pak lépe využita. Oproti kovovým materiálům lze vlákna cíleně využít ve směru namáhání díky své anizotropii. [1]

### 1.1.2 Částicové kompozitní materiály

U částicových kompozitních materiálů jsou částice různých geometrických rozptýleny v matrici, díky čemuž zamezují rozvoji plastických deformací. Zvyšuje se tedy mez kluzu a mez pevnosti o jsou ovlivněny další vlastnosti jako elektrická a tepelná vodivost. [5]

## 1.2 Matrice

Matrice neboli pojivo je takový materiál, kterým je prosycena nespojitá část kompozitu (vlákna, partikulární komponenty). Díky jejím vlastnostem dochází po zpracování ke tvarově stálým rozměrům výrobku. Mezi další nedílné úkoly matrice patří ochrana vláken a převedení působících sil na vlákna.

Při volbě matrice je nutno dbát na její vhodnou viskozitu a povrchové napětí. Vlákná musejí být v matrici dokonale smočená a nesmí zde docházet ke tvorbě bublin. Mezi nejčastěji používané matrice patří organické polymerní matrice. Ty se dělí na termoplastické a reaktoplastické. Dále se lze setkat s pojivy kovovými nebo keramickými. [1,4]

### 1.2.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP-R)

Nenasycené polyestery získáváme polykondenzací směsi nenasycených a nasycených dikarboxylových kyselin. Kromě anhydridů kyseliny maleinové se díky nízké ceně nejčastěji používají anhydridy kyseliny ftalové. Pryskyřice jsou bezbarvé roztoky v reaktivních rozpouštědlech. Je možno je vytvrzovat za normální, či zvýšené teploty bez vzniku

vedlejších těkavých produktů. Při vytvrzování dochází u této pryskyřice k objemovému smrštění o 5 až 9 %. Díky jejich nízké viskozitě, rychlosti vytvrzování, dobrému smáčení vláken a ceně patří mezi časté druhy matrice při výrobě kompozitních materiálů. [1,2]

### 1.2.2 Epoxidové pryskyřice (EP-R)

Jsou to pryskyřičné látky, jejichž řetězce zpravidla obsahují více než jednu epoxidovou skupinu. Epoxidové pryskyřice mají značnou reaktivitu s velkým počtem sloučenin, což vede k zesíťování makromolekulárních produktů. Nejběžnějším typem jsou produkty alkalické kondenzace dianu (Bisfenol A) s epichlorhydrinem. [1,3]

Epoxidové pryskyřice se řadí mezi hodnotné a hojně využívané reaktoplasty. Vyznačují se dobrými mechanickými vlastnostmi, vysokou rozměrovou stálostí a adhezí k podkladu. Oproti polyesterovým pryskyřicím mají relativně malé smrštění při vytvrzování. Pro výrobu kompozitních materiálů se používá pouze 8 % epoxidových pryskyřic. Jsou využívány jako zalévací a lisovací hmoty, lepidla nebo nátěrové a lakovací hmoty. [1,3]

### 1.2.3 Vinylesterové pryskyřice (VE-R)

Vinylesterové pryskyřice mají oproti nenasyceným polyesterovým pryskyřicím dvě zásadní výhody a to, že jsou výrazně houževnatější a mají vyšší chemickou odolnost. V porovnání s epoxidovými pryskyřicemi mají nižší viskozitu a říditelnější vytvrzovací reakci. Ta umožňuje snadnější zpracování.

Díky svým vlastnostem se vinylesterové pryskyřice používají v chemicky náročnějším prostředí. Uplatnění nacházejí pro výrobu potrubí, komínů, skladovacích nádrží nebo pro stavbu lodí. [3]

## 1.3 Výztuže

Sekundární část kompozitního materiálu se nazývá výztuž. Výztuž přejímá většinu vnějšího zatížení působící na materiál, proto je vyžadována její vysoká pevnost a vysoký modul pružnosti. Pro zpevňující fázi lze využít celou řadu materiálů například skleněná vlákna a částice, uhlíková vlákna, kovové částice a jiné. [2,5]

### 1.3.1 Materiály vláken výztuží

Samostatná vlákna materiálu se jako konstrukční prvek používají minimálně. Pro technické použití jsou zajímavé v kompaktní formě jako je to u kompozitních materiálů. Jejich úkolem je zvýšit měrnou pevnost a tuhost materiálu. Vytvářejí tedy nosnou strukturu a tvoří až 60 % objemu kompozitu. [4,5]

Jedním z nejdůležitějších kritérií pro dosažení požadovaných mechanických vlastností kompozitu je volba vhodného materiálu vláknové výztuže. Přehled nejčastěji používaných vláken:

- **Skleněná vlákna (GF)** – jedná se o tenká vlákna kruhového průřezu (3 - 24 $\mu$ m), která jsou vyráběna tažením roztavené bezalkalické skloviny. Po povrchové úpravě jsou sdružována do pramene a navíjena na cívku. Vyznačují se vynikajícími elektroizolačními vlastnostmi a vysokou propustností záření. Díky těmto vlastnostem jsou označovány jako E-vlákna a výchozí sklovina jako E-sklovina. Právě vlákna vyráběná z této skloviny se postupně stala standardem a obsadila téměř 90 % trhu. [1,4]

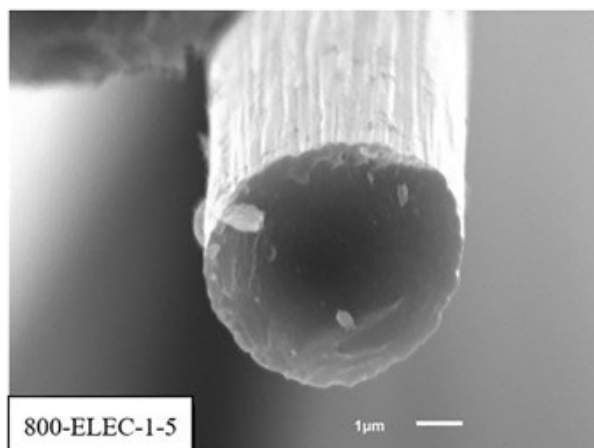


Obrázek 2 – Skelná tkanina [39]

- **Aramidová vlákna (AF)** – jsou to vlákna na bázi lineárních organických polymerů. Mezi jejich přednosti patří vysoká pevnost a tuhost. Tato vlákna lze zpracovávat všemi běžnými reaktivními pryskyřicemi. Využívají se pro výrobu třecích a brzdových obložení, zbrojním průmyslu nebo jako výztuž v pneumatikách.

- **Uhlíková vlákna (CF)** – při jejich malé hustotě ( $1,8-2 \text{ g/cm}^3$ ) mají nejširší spektrum mechanických vlastností. Jsou charakteristická svou vysokou pevností a tuhostí, ale nízkou tažností. Jejich průměr je mezi 5 až 10  $\mu\text{m}$ . Nejvíce častou surovinou pro výrobu uhlíkových vláken je polyakrylonitril (PAN), z něhož se vyrábí 98 % vyprodukovaných vláken. Polyakrylonitril je nejprve dlužen, poté stabilizován na teplotu 200-300  $^{\circ}\text{C}$  pod mechanickým napětím za přístupu vzduchu. Při tomto postupu dochází k dehydrování a změny nitrilových skupin na žebříčkovitý polymer. Žebříčkovitý polymer je pyrolýzou (1600  $^{\circ}\text{C}$ ) v inertní atmosféře přeměněn na grafitickou strukturu. Tímto způsobem se vyrábějí vlákna s vysokou hodnotou E-modulu (přes  $5000 \text{ N/mm}^2$ ). Pro výrobu vysokopevnostních uhlíkových vláken se využívá mezofázových smol, které však zaujímají na trhu minimální podíl vzhledem k náročnosti výroby a následné ceně. [1,4]

Mezi hlavní výhody uhlíkových vláken patří nízká hustota, vysoká pevnost i hodnoty E-modulu, vysoká korozní odolnost, dobrá elektrická a tepelná vodivost nebo také snášenlivost s tělesnými tkáněmi. Díky tomu nacházejí široké spektrum využití například v lékařském průmyslu, letectví, automobilovém průmyslu nebo sportu. [1]



Obrázek 3 – Řez uhlíkovým vláknem [40]

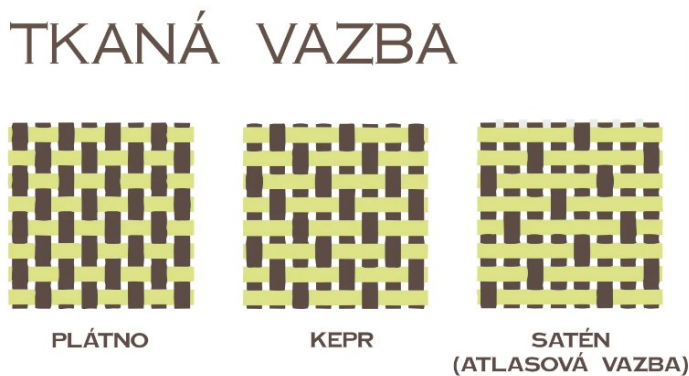
- **Přírodní vlákna** – pro vyztužování kompozitů s polymerní matricí jsou vhodná pouze vlákna rostlinná, která mají jako základ celulózu jako například len, konopí a juta. Jejich hlavní výhodou je odolnost proti stárnutí, nízká hustota a snadná likvidace. Mezi nevýhody pak lze zařadit omezenou volbu matrice vzhledem

k nebezpečí rozkladu, závislost vláken na podmínkách jejich růstu a jejich omezenou délku. [1]

### 1.3.2 Polotovary výztuží

Jednotlivá vlákna jsou sdružována do pramenů a ty jsou následně zpracovávány na tyto polotovary:

- **Roving (prameneček)** – jedná se o nejjednodušší a nejběžnější formu sdružení pramenů. Pramenečky jsou v rovingu nestočena a rovnoběžně uložena a navíjena na cívku. Lze je dále řezat, tkát a zpracovávat pro výrobu jiných polotovarů. Roving bývá dodáván na váhu s jasně stanoveným průměrem a obsahuje 1000 až 24 000 vláken. Stočením rovingu kolem své podélné osy vzniká spředený roving. [1,37]
- **Rohože** – jsou to netkané textilie, které jsou tvořeny kontinuálními vlákny nahodile uspořádanými v rovině. Dále mohou být tvořeny sekanými prameny o délkách od 25 do 50 mm. Sekané prameny bývají spojeny pojivem, jenž je rozpustné v rozpouštědlových pryskyřicích. U kontinuálních vláken není potřeba fixovat jejich vzájemnou polohu. Rohože jsou po navinutí na roli připraveny k použití. [1,5]
- **Tkaniny** – jedná se o vlákna nebo prameny pravouhle uložených v útku a osnově. Tímto uspořádáním působí jako výztuž ve dvou směrech. Kombinací různých druhů vláken vznikají hybridní tkaniny. Mezi výhody patří snadnější zpracování oproti jednosměrné výztuži. Pokud se zvýší počet vláken v osnově vzniknou různé druhy křížení, jenž se nazývají vazby. Při zpracování tkanin se rozeznávají tři základní druhy vazeb a to plátová (základní vazba, dobrá rozměrová stálost), keprová (vyšší pevnost a tuhost, vhodnější pro tvarované prvky) a keprová vazba (rozměrově velké prvky, hladký povrch). [1]



Obrázek 4 – Druhy vazeb [41]



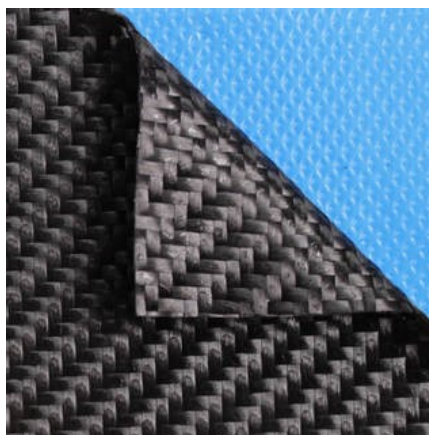
## 2 TECHNOLOGIE ZPRACOVÁNÍ KOMPOZITŮ

Pro výrobu kompozitních materiálů lze využít celou řadu technologických zpracování. Volba vhodného technologického zpracování je nejpodstatnější faktor při výrobě kompozitních součástí. Jsou jím určeny výsledné mechanické vlastnosti, tak i ekonomická stránka výroby. Hlavní zásady volby zpracování jsou sériovost výroby, členitost a rozměry výrobku, kvalita povrchu, požadované fyzikální a mechanické vlastnosti a v neposlední řadě cena. Při výrobě vždy nelze vyhovět všem požadavkům, proto je zde nutno hledat kompromis, který z větší části těmto požadavkům co nejvíce vyhoví. Technologie jsou děleny na ruční, poloautomatizované a automatizované. Výběr se řídí sériovostí výroby. [1,7]

### 2.1 Prepreg (preimpregnated fibers)

Jedná se o vlákna, která jsou výrobcem předimpregnována matricí. Pro výrobu prepregů lze využít ať už kontinuální, tak i sekaná vlákna různých materiálů (nejčastěji uhlíková) a různé druhy polymerních matric. Prepregy je možno sestavit na míru obsahem a typem pryskyřice a výběrem vláken. U těchto polotovarů je od dalšího zpracování oddělen proces prosycování a výroba je prováděna za kontrolovaných a reprodukovatelných podmínek. Díky tomu lze dosáhnout lepší kvality výsledného výrobku. Zpracovává se za působením tlaku a teploty lisováním nebo vytvrzováním v autoklávu. Rozlišují se dvě typy tříd prepregů, a to pro vysoce výkonné aplikace (letectví, kosmonautika) a pro méně výkonné formování. [1,8]

Mezi výhody patří snadná manipulace a reprodukovatelnost. Mezi nevýhody lze zařadit jejich skladování. Prepregy s termosetickou matricí musí být skladovány v prostředí o teplotách kolem  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  a maximálně po dobu šesti měsíců. [1]



Obrázek 5 – Prepreg [42]

## 2.2 Využití preformu

Jedná se o předlisky vláken a tkanin. Vlákna jsou uspořádána v přibližném tvaru a tloušťce finálního výrobku. Preformy se vytvářejí několika způsoby například nástřikem sekaných vláken s pojivem na formu, stohováním a slepením souvislých vrstev tkaniny nebo samotným tkaním. V naprosté většině případů se jedná o suché vláknové předlisky, které se sytí pryskyřicí při formovacím procesu. (RTM). Méně častá výroba předlisků je z prepregů. Ta se nejčastěji uplatňuje ve velkosériové výrobě automobilového průmyslu. Pro výrobu tvarově složitějších součástí je výhodné použít méně krčivé materiály, jelikož se tím zamezí případným vadám a nedokonalostem. [9]

## 2.3 Vytvrzování v autoklávu

Je to poměrně moderní proces, který slouží k výrobě součástí převážně z karbonových vláken. Přesně nařezaný prepreg je vrstven a vkládán do formy, následně jsou zde umístěny pomocné fólie a tkaniny. Celá forma s příslušnými vrstvami je vložena do vakuovacího pytle, který musí být dobře utěsněn. Následně dochází k vložení do autoklávu, odsátí vzduchu a spuštění regulovaného programu. Vytvrzování probíhá za působení zvýšené teploty a tlaku. Díky izostatickému působení tlaku je součást v komoře vystavena stejným podmínkám nezávisle na jejich rozměru nebo geometrii. Výsledný produkt je velice lehký, pevný a rozměrově stabilní. Jedná se o jednu z nejlepších technologií pro výrobu kompozitů. Své uplatnění nachází v leteckém průmyslu, automobilovém průmyslu, zdravotnictví a motorsportu. [10,11]



Obrázek 6 – Autokláv [10]

## 2.4 Vytvrzování v peci

Tato metoda výroby kompozitů je oproti technologii vytvrzování v autoklávu odlišná tím, že vytvrzování neprobíhá za působení tlaku. Prepreg je nařezán, navrstven na formu a následně je vše vloženo do vakuovacího pytle. Po odsátí vzduchu následuje vytvrzování v peci pouze za působení vysoké teploty. Teplo je jak v peci, tak v autoklávu vedeno konvektivně, a tudíž je přenos tepla méně účinný bez působení tlaku než za jeho působení. Při menší účinnosti trvá vytvrzovací cyklus déle, tím pádem rostou náklady na vytvrzování, což je jedna z nevýhod použití vytvrzovacích pecí. Tuto nevýhodu kompenzují pořizovací náklady pecí, které jsou násobně nižší než pořizovací cena autoklávu. Mezi další nevýhody pecí patří vyšší pórovitost výsledného výrobku a jeho výsledné mechanické vlastnosti. To je způsobeno absencí tlaku při tomto procesu. V současné době však probíhají výzkumy nových systémů pryskyřic, které umožní lepší smáčení vláken a konsolidaci součástí a tím pádem i větší využití vytvrzovacích pecí. [11]

## 2.5 RTM metoda

Zkratka RTM pochází z anglického Resin Transfer Molding. Při této technologii jsou UP a EP vháněny do uzavřené formy a tím se do prostoru neuvolňuje reaktivní rozpouštědlo. Ohřátá pryskyřice a tavidlo jsou dopravovány do mísící hlavy pomocí nízkotlakých čerpadel a k promísení dojde bezprostředně před vstříknutím. Pryskyřice je ve formě rozváděna vakuem. Jelikož se jedná o uzavřenou formu, jsou povrchy hladké a rozměry dílce přesné. Podíl vyztužujících vláken je u tohoto způsobu menší než u jednosměrně kladených prepregů. Výztuží jsou tkaniny nebo rohože. Tato technologie je vhodná pro drobné karosářské výrobky a kryty zařízení.

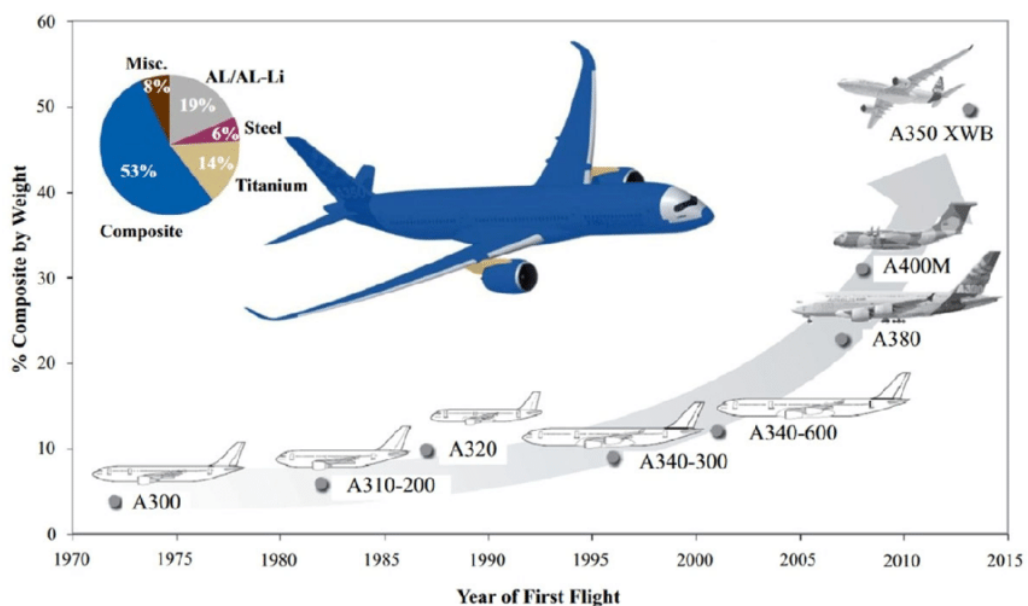
Pro menší sériovost a pro méně tuhé formy je vhodná metoda RTM light, která pracuje s menšími vstřikovacími tlaky. [4]

### 3 VYUŽITÍ UHLÍKOVÝCH KOMPOZITŮ

Využívání kompozitů vyztužených uhlíkovými vlákny se stává stále atraktivnější alternativou vzhledem k používání různých druhů konvenčních kovových materiálů. Je to v důsledku jejich nízké hmotnosti, vysoké pevnosti a trvanlivosti, odolnosti proti korozi a poškození nebo schopností tlumit rázy. Pečlivě navržené součásti z uhlíkových kompozitů dosahují o 20-30 % nižší hmotnosti než jejich alternativy z kovových materiálů. [12]

#### 3.1 Letecký průmysl

Kompozitní materiály byly původně aplikovány ve vojenské části leteckého průmyslu poté ale našly uplatnění i v komerční části letectví. Letecký průmysl se řadí mezi jeden z nejvíce používaných druhů dopravy a je zde dbáno na snižování jednak ekonomických nákladů, tak i nákladů emisních. S rozšířením komerční přepravy se z letectví stal i nezanedbatelný zdroj emisí (přibližně 2 % celosvětově vyprodukovaného CO<sub>2</sub>) a tím i nutnost tuto stopu eliminovat. To se daří zejména právě díky využívání kompozitních materiálů. Při svých vlastnostech přímo v letadlech nahrazují konstrukce a součásti z kovů nebo jejich slitin. Tímto nahrazováním se snižuje hmotnost letounů, a to má za následek i snižování spotřeby pohonných hmot. Ku příkladu u letounu Airbus A380 došlo díky výměně hliníkových součástí za kompozitní o redukci hmotnosti o 800 kg. U tohoto typu letounu jsou kompozity zastoupeny například v trupu (až 20 %), křídlech, ocasních plochách, podvozku nebo dveřích. [13,14]



Obrázek 7 – Procentuální zastoupení materiálů v letadle [44]

### 3.2 Automobilový průmysl

Díky svým vlastnostem je používání uhlíkových kompozitů v automobilovém průmyslu stále častější hlavně v důsledku jejich korozivzdornosti a nízké hmotnosti při vysoké pevnosti. Jejich nízká hmotnost má za následek snížení celkové hmotnosti automobilu a tím i úsporu paliv. Tuhost uhlíkových kompozitů zajišťuje velkou stabilitu, která napomáhá automobilům absorbovat velké množství nárazové energie a tím zajišťuje větší bezpečnost uživatelů. Používání kompozitních materiálů napomáhá automobilovému průmyslu expandovat i do více ekologicky udržitelných oblastí. Uhlíkové kompozity naleznou své uplatnění v různých prvcích automobilu jako části motorů a převodovek, dveře, disky, části karoserií a různého příslušenství. Kromě materiálových vlastností se jedná i o zajímavý designový prvek. [15]



Obrázek 8 – Automobilový uhlíkový disk [45]

### 3.3 Sportovní pomůcky

Spotřebitelé se snaží vyhledávat pro maximalizaci svých výkonů co nejvhodnější a nejlepší sportovní vybavení. Díky svým vlastnostem tuto poptávku dokonale splňují pomůcky a vybavení vyrobené právě z uhlíkových kompozitních materiálů. [16]

Typický vývoj lze pozorovat u hokejových holí. První hokejky byly vyrobeny v 19. století a byly ručně vyřezávány z jednoho kusu dřeva (nejčastěji březového). V různých modifikacích se čistě dřevěné hokejky používaly do padesátých let 20. století. Právě v této době přišel první kontakt s kompozitními materiály, kdy se na čepele hokejek začal aplikovat sklolaminát. O deset let později se kromě čepelí začal sklolaminát aplikovat i na samotné

násadky. Na přelomu milénia byly vyrobeny první hokejky z uhlíkových kompozitních materiálů a během následujících pěti let používalo téměř 90 % všech hráčů v NHL právě tyto hole. V současné době až na pár výjimek používají všichni hokejisté hole z kompozitních uhlíkových materiálů, a to například z důvodu hmotnosti nebo vlastnostech při střelbě. Také to usnadňuje práci výrobcům holí, jelikož mnoho vrcholových hráčů používá unikátní záhyb čepele a díky použití uhlíkových kompozitních materiálů jsou snadno reprodukovatelné. [17]



*Obrázek 9 – Kompozitní hokejka [46]*

Mezi další sportovní pomůcky, které jsou v současné době nejčastěji vyráběny z uhlíkových kompozitů patří rybářské pruty. V historii byly vyráběny pruty z různých druhů materiálů ať už dřevo, bambus nebo kosti. Ve 20. století převládaly pruty vyrobené ze sklolaminátů, které se v menší míře stále vyrábějí. V současné době však na trhu převládají uhlíkové pruty, a to zejména díky svým vlastnostem. [18]

Nástupem uhlíkových kompozitních materiálů však byla ovlivněna celá řada sportů jako například tenis, cyklistiky, lyžování a snowboarding nebo široké odvětví vodních sportů. [19]

## 4 KOMPOZITNÍ UHLÍKOVÉ DISKY

V dřívějších dobách byly uhlíkové disky považovány za lehkovážný luxus a byly pro mnohé motocyklisty nedosažitelné. Jedinou výjimku tvořili profesionální závodníci, kteří tyto ultralehké součásti používali na svých závodních motocyklech. To se však s vývojem technologií v posledních letech značně změnilo a uhlíkové disky se díky tomu stávají stále více rozšířené.

Mezi předchůdce uhlíkových disků patřily disky vyrobené z hliníku. Tento materiál se pro výrobu disků stále používá, nicméně uhlíkové disky mají nespornou řadu výhod. Mezi první výhodou patří samotná hmotnost. Oproti běžným hliníkovým diskům dosahují karbonové až o polovinu nižší hmotnosti. Snížením hmotnosti dochází i ke snížení neodpružené hmotnosti. Neodpružená hmotnost je nedílnou součástí jízdních vlastností, která je usnadňuje a snižuje setrvačnost. Čím je neodpružená hmotnost vyšší, tím více práce má tlumič s pružinou, které musí být tužší. Větší tuhost znamená i menší komfort při jízdě například při tlumení hrbolů. Snížení hmotnosti má za přímý následek i zvýšení bezpečnosti jezdce díky lepší ovladatelnosti předního kola v důsledku nižší rotační hmotnosti a menší vynaložené síle na řídítkách. Mezi další prvky bezpečnosti patří lepší přilnavost zadního kola při zatáčení a tlumení vibrací a otřesů způsobené jízdou. [20,21]



Obrázek 10 – Motocyklový uhlíkový disk [43]

### 4.1 Materiál forem

Pro výrobu kompozitních součástí se jako hlavní výrobní nástroj používají formy z různých druhů materiálů. Samotná forma je tvořena z pravidla tvárníkem a tvárnicí nebo v případech,

kdy se tolik nedbá na výsledný povrch tak pouze jedním z těchto členů. Před volbou materiálu formy je nutno důkladně zvážit její samotnou konstrukci. Aby nedocházelo k poškození součásti při procesu odformování je nutné, aby byla tloušťka formy minimálně pětinásobně tlustší než stěna součásti. Volba vhodného materiálu pro výroby formy je závislá na mnoha aspektech jako například sériovost výroby, vytvrzovací podmínky, rozměrová stabilita výsledného výrobku nebo i jeho povrch.

Pro díly, které jsou vyráběny v sérii jednotek kusů nebo pro výrobu prototypů se lze nejčastěji setkat s formami vyrobených ze sklolaminátu, vysoko hustotních pěn, opracovaných epoxidových desek, různých druhů polymerů vytištěných na 3D tiskárnách nebo lze využít modely vyrobené ze dřeva či sádry. Tyto materiály se využívají při prototypové výrobě hlavně z hlediska jejich snadné obrobitelnosti a nízké pořizovací ceně.

Pro velkosériovou výrobu a pro vysoce výkonné součásti se lze nejčastěji setkat s ocelovými formami. Jsou levné, snadno a přesně obrobitelné a díky dokončovacím operacím lze dosáhnout i výbornou kvalitu jejich povrchu. Rovněž si zachovávají rozměrovou stabilitu a mají výdrž při větším počtu cyklů výroby. Mezi další materiály pro výrobu forem patří uhlíkové kompozity, keramika, litý grafit případně jiné druhy kovových materiálů. [22,23]



*Obrázek 11 – Odformování kompozitního dílce [47]*

## 4.2 Jádra

Přidáním jádra se z kompozitních materiálů stává sendvičová konstrukce. Jádro vyplňuje meziprostor, který je obklopen výztuží s matricí. Použitím vhodně zvolených jader lze vytvářet pevné, tuhé, lehké a vysoce odolné konstrukce. Tyto konstrukce se osvědčily



u výroby lodí, automobilů, lopatek turbín nebo stavebních panelů. Zakomponováním jádra do konstrukce při nárůstu hmotnosti o 3 % lze zvýšit pevnost v ohybu tři a půl násobně a tuhost až sedminásobně. Materiálem jádra lze rovněž zlepšit tepelnou vodivost, zvukovou izolaci a požární bezpečnost. Zároveň slouží jako šablona pro výrobu tvarově složitějších součástí, které by jiným způsobem nebylo možno vyrobit. [24]

Mezi běžně používané materiály jader patří polyvinylchlorid, polyuretan, polyethylen, syntetické pěny, balsové dřevo, kovové pěny nebo voštinové struktury. Jádra se s konstrukcí spojují matricí nebo speciálními lepidly. [25]

#### 4.2.1 Pěnová jádra

Materiály na bázi pěny patří mezi jedny z nejrozšířenějších pro výrobu jader. Přednostně jsou využívána v případech, kdy je třeba zajistit vodotěsnost, zvukovou izolaci, tepelnou izolaci a díky snadnému opracování jsou vhodná i pro tvarově složitější součásti. Pěny v kombinaci s voštinou zajišťují v sendvičových kompozitech lepší adhezi a vedou ke změně dynamických vlastností oproti samotným voštinám. Jednou z jejich výhod je i cenová dostupnost. [26]

**Pro výrobu jader z pěny se používají tyto materiály:**

- **PVC pěny** – jsou tvořeny kombinací polyvinylchloridu a vzduchových bublin. Jedná se o konzistentní materiál s mnohonásobně zvětšeným objemem při zachování nízké hmotnosti. Vzduch zde zaujímá 50 – 95 %, což vede k její nízké hustotě. PVC pěny jsou kombinovatelné s různými druhy pryskyřic jako například epoxidové nebo vinylesterové. Lze je rovněž kombinovat s různými materiály výztuže například uhlíkovou, aramidovou, skleněnými vlákny a jinými. PVC pěny se dělí na dva základní druhy, a to tuhé a tvárné. Díky své nízké nasákavosti jsou nejčastěji využívány v konstrukcích a součástech, které jsou ve styku s vodou. V důsledku jejich fyzikálních vlastností a odolnosti proti hoření naleznou uplatnění v leteckém průmyslu, kosmonautice nebo vojenském průmyslu. [27,28]
- **PUR pěny** – polyuretanové pěny bývají nejčastěji dodávány dvousložkově ve formě pěny a tužidla. Je kompatibilní s většinou pryskyřic díky své dobré adhezi. Jedná se o relativně levný materiál, který je používán při výrobě částí malých letadel. Mezi jeho výhody patří ohnivzdornost, dobrá akustická izolace a snadná obrobitelnost do požadovaného tvaru. Mezi nevýhody patří degradace stářím, kdy dochází k oddělování pěny od výztuže s matricí. [27,28,29]

- **Polystyren (PS)** – jedná se o cenově dostupný materiál pro výrobu jader. Dělí se na dva základní druhy a to expandovaný (EPS) a extrudovaný (XPS). Ve srovnání s polyuretanovými pěny dosahuje nižší hmotnosti a menší nasákavosti vody. Typickým výrobkem, který obsahuje jádro z polystyrenu jsou windsurfy a surfovací prkna. Je snadno obrobitelný a vhodný pro výrobu prototypů a tvarově složitých součástí. [28]

#### 4.2.2 3D tisk jader

Při této technologii vzniká fyzický model z digitální předlohy. Jedná se o aditivní proces, kdy je materiál přidáván, na rozdíl od obrábění, kdy se materiál odebírá z celistvého bloku na požadovaný tvar. Samotný 3D tisk má mnoho technologií (FDM, SLA, SLS). Nejběžněji používanou metodou tvorby je technologie FDM, kdy je natavován tenký proužek (struna) polymerního materiálu a objekt vzniká vrstvením. [30]

Pro výrobu jader se jedná o jednu z nejlepších technologií. 3D tisk zaručuje vyšší přesnost než tradičně používané metody výroby jader. Samotnému tisku přechází návrh jádra v 3D CAD softwaru. Poté započne samotné tištění jádra, kdy je možné určit procentuální zastoupení a rozmístění výplně. Tato technologie dosahuje největšího uplatnění při výrobě dutých automobilových součástí nebo různých profilů. Hlavními benefity jsou rozměrová přesnost, povrch výrobku a cenové náklady. Rovněž lze volit i různé materiály jádra, které lze i chemicky rozpustit a tím vytvořit složité profily. [31]



Obrázek 12 – Jádro vniklé 3D tiskem [47]

#### 4.2.3 Duralové vložky

Dural je název pro slitiny hliníku a mědi s nepatrnou příměsí hořčíku, kdy hliník ve slitině zaujímá více než 90 %. Jeho hustota je nepatrně větší než hustota čistého hliníku, avšak jeho pevnost v tahu je až pětinasobně větší a rovněž má i větší tvrdost ve srovnání s čistým hliníkem. [32]

Kovové vložky bývají ve velkém procentu případu k propojení kompozitu a ostatních mechanických součástí nezbytné (kryty nábojů kol, závitové vložky). Pro spojení kompozitu s vložkou jsou používána dvousložková epoxidová lepidla. [33]



Obrázek 13 - Duralová vložka [48]

### 4.3 Namáhání uhlíkových disků

Motocyklové disky jsou součástí, kdy je nutno dbát hlavně na bezpečnost. K zajištění bezpečnosti slouží analyzování zatížení modelů disků v softwarových analýzách. Pro studium tuhosti, pevnosti a životnosti modelů se využívají působící tlaky nebo rázová, ohybová a krutová zatížení působící na osu rotace disku případně kolmo na ni o různých velikostech. Z výsledného působení zatížení je možno zjistit správnou konstrukci modelu a upravit jej tak, aby vyhovoval maximálnímu zatížení, které lze očekávat pro příslušnou stavbu materiálu. [34,35]

### 4.4 Zkoušky uhlíkových disků

Testování disků se provádí standardizovaně podle normy JASO T 203-85. Na disk se nasadí duše s pláštěm a kolo se nahustí na požadovaný tlak. Mezi jednu z nejpoužívanějších zkoušek patří zkouška radiálního nárazu na disk. Celé kolo je upnuto a v radiálním směru na něj dopadá těleso určitou silou. Tato zkouška simuluje nárazy způsobené výmoly a měří se zde deformace disku po nárazu. Mezi další zkoušky patří zkouška házivosti nebo odvalovací zkouška. Jedná se o únavovou zkoušku, která simuluje odolnosti disku za daných podmínek při jízdě na silnici. [36]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 STANOVENÍ CÍLŮ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Za cíle vypracování bakalářské práce byly vytyčeny následující body:

- 1) Vypracování literární rešerše daného tématu
- 2) Tvorba modelu kompozitního motocyklového disku
- 3) Návrh konstrukce formy pro výrobu kompozitního motocyklového disku
- 4) Návrh metodiky zkoušení kompozitního disku

V literární rešerši je obsažen úvod a seznámení se s kompozitními materiály, který obsahuje zejména materiály jednotlivých fází různých druhů kompozitních materiálů. Rešerše dále obsahuje přehled technologií pro jejich zpracování a výrobu. Poslední část literární studie se zabývá jejich aplikací, materiálem forem pro výrobu součástí a testováním uhlíkových disků.

Praktická část byla zpracována za pomoci softwaru Autodesk Inventor Professional 2023 v modulech tvorby součástí a jejich následné sestavy. Normálie obsažené ve formě pro výrobu disku byly vybrány z katalogu firmy HASCO.

## 6 TVORBA MODELU DISKU

Tvorba prvotního modelu kompozitního disku patří mezi prvotní a jednu z nejdůležitějších součástí pro tvorbu samotné formy. Na modelech disků jsou prezentovány jejich různé grafické návrhy a lze na nich posoudit, jestli bude design v souznění s motocyklem.

Tvorba modelu vycházela z výkresové dokumentace zadního disku motocyklu, která byla poskytnuta vedoucím bakalářské práce. Mezi charakteristické rozměry disku, které musely být dodrženy patřily jeho šířka a průměr 6'' x 17'' (152,5 x 432 mm) a v neposlední řadě vnitřní průměr náboje 52 mm.



Obrázek 14 – Charakteristické rozměry

### 6.1 Návrhy modelů

Bylo zpracováno několik různých grafických návrhů, které vycházejí z charakteristických rozměrů daných ve výkresovém podkladu. Hlavní odlišností mezi modely je různé zpracování geometrie paprsků. Počty děr pro spojení náboje s kompozitním diskem a počet paprsků jsou u všech modelů totožné.

### 6.1.1 Disk s šestiúhelníkovými paprsky

Tento návrh modelu disku vychází z moderního designu paprsků, které svou geometrií v řezu tvoří šestiúhelník. Mezi největší přednosti tohoto návrhu se řadí neobvyklý design. Nevýhody tvoří samotná geometrie paprsku, jenž vede ke složitému a členitějšímu tvaru jádra a s tím souvisejícím obtížnějším vrstvením prepregu do dutiny výrobní formy. Současně může docházet ke špatnému odformování.



*Obrázek 15 – Návrh s šestiúhelníkovými paprsky*

### 6.1.2 Disk s vytažitelným jádrem paprsku

Návrh s vytažitelnými paprsky vychází z designu disků u automobilů, kdy je velké množství tvaru a orientace paprsků koncipováno právě takto. Hlavní výhodou tohoto modelu je možnost vytažení jader paprsků po vytvrzovacím procesu vzhledem k jejich geometrii. Díky možnosti vytažení jader lze pro tento model použít ocelová jádra. Mezi nevýhody lze zařadit samotný grafický návrh disku, který více připomíná automobilový disk a jeho použití na motocyklu by působilo nevzhledně.



*Obrázek 16 – Návrh s vytažitelným jádrem paprsku*



### 6.1.3 Disk se zúženými paprsky

V tomto grafickém modelu byly použity paprsky zúžené ve svém středu. Mezi výhody tohoto návrhu patří snadná volba dělicí roviny pro výrobu formy. Kvůli tvaru paprsků může docházet k obtížnému odformování výrobku z formy a také ke zhoršenému vrstvení prepregu mezi paprskem a vnitřním obvodem disku.



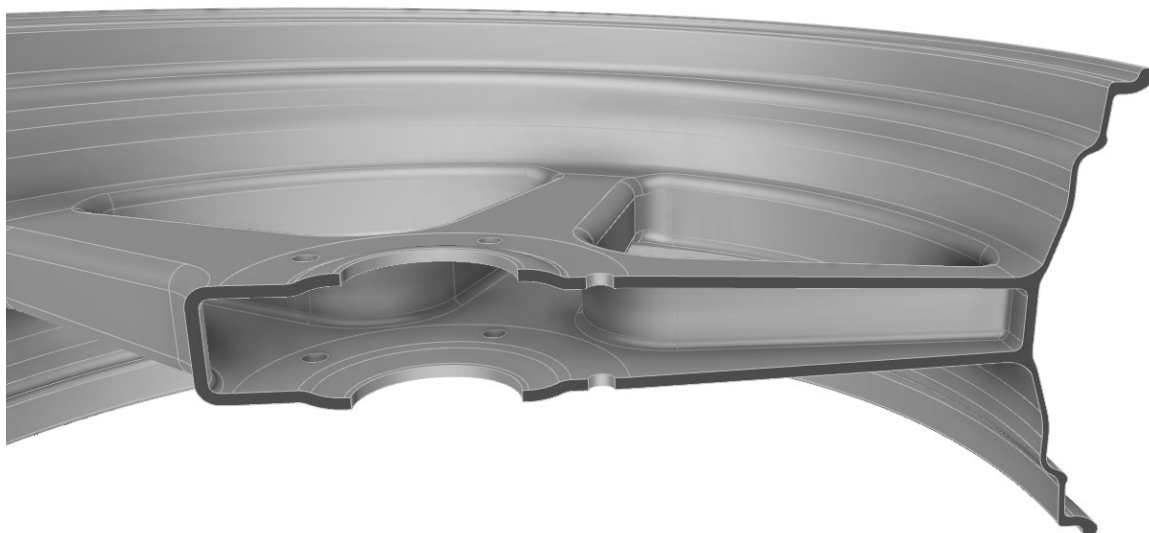
*Obrázek 17 – Návrh se zúženými paprsky*

#### 6.1.4 Disk s tvarem hvězdy

Model disku s tvarem paprsků uspořádaných do hvězdy patří mezi často využívané návrhy. Výhodou tohoto návrhu je design, který je možné vzhledově uplatnit u větší části motocyklů. Díky jeho relativní jednoduchosti lze snadno zvolit dělicí rovinu pro výrobu formy a samotná výroba dutiny formy nebude z hlediska obrábění náročná. Paprsky v tomto návrhu vycházejí ze tvaru čtyřbokého jehlanu, takže zde dojde i ke snadnému odformování výsledného disku. Mezi menší nevýhodu lze zařadit, že po vytvrzování budou jádra paprsků součástí výsledného disku. Z hlediska výše zmíněných kladů a záporů byl tento návrh disku vybrán k dalšímu zpracování pro tvorbu návrhu formy.



*Obrázek 18 – Návrh s tvarem hvězdy*



*Obrázek 19 – Detail návrhu v řezu*

## 6.2 Jádra

Pro výrobu složitých skořepinových součástí je nezbytné použití jader, která mají za cíl udržení tvarové stability a rovněž díky nim lze vytvářet skořepinové součásti. Použitím jader z polymerních materiálů rovněž dochází k zachování nízké hmotnosti disku při dostatečné pevnosti.

### 6.2.1 Materiál jader

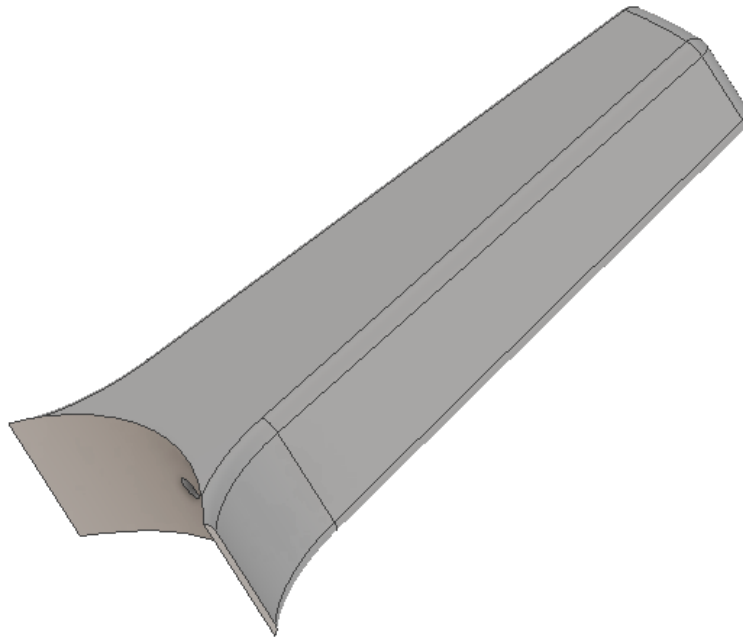
Vzhledem k technologii výroby jader metodou 3D tisku a samotné technologii vytvrzování výsledného disku v autoklávu musí být zvolen materiál pro výrobu jader, který si zachová své mechanické vlastnosti i při teplotě 150 °C. Pro výrobu jader byl volen materiál PA12 + 15GF dodávaný firmou Fiberthree. Jedná se o technický filament modifikovaný pro 3D tisk vyrobený z polyamidu s přídavkem skleněných vláken, které zaujímají 15 % podíl. Materiál se vyznačuje vysokou odolností vůči teplu a médiím. Rovněž vykazuje velkou pevnost, malou míru deformace a dobrou přilnavost vrstvy.

Tabulka 1 – Základní vlastnosti materiálu [50]

<b>Fyzikální vlastnosti</b>		
<b>VLASTNOST</b>	<b>HODNOTA</b>	<b>JEDNOTKA</b>
Hustota	112	g/cm <sup>3</sup>
Nasákavost	0,3	%
Teplota tání	178	°C
<b>Mechanické vlastnosti</b>		
Pevnost v tahu	72	MPa
Modul pružnosti v tahu	3,1	GPa
Modul pružnosti v ohybu	3	GPa
<b>Zpracovatelské vlastnosti</b>		
Teplota trysky	265	°C
Teplota podložky	80	°C
Rychlost tisku	50	mm/s
Tloušťka vrstvy	3	mm
Výplň	0-100	%

### 6.2.2 Jádra paprsku

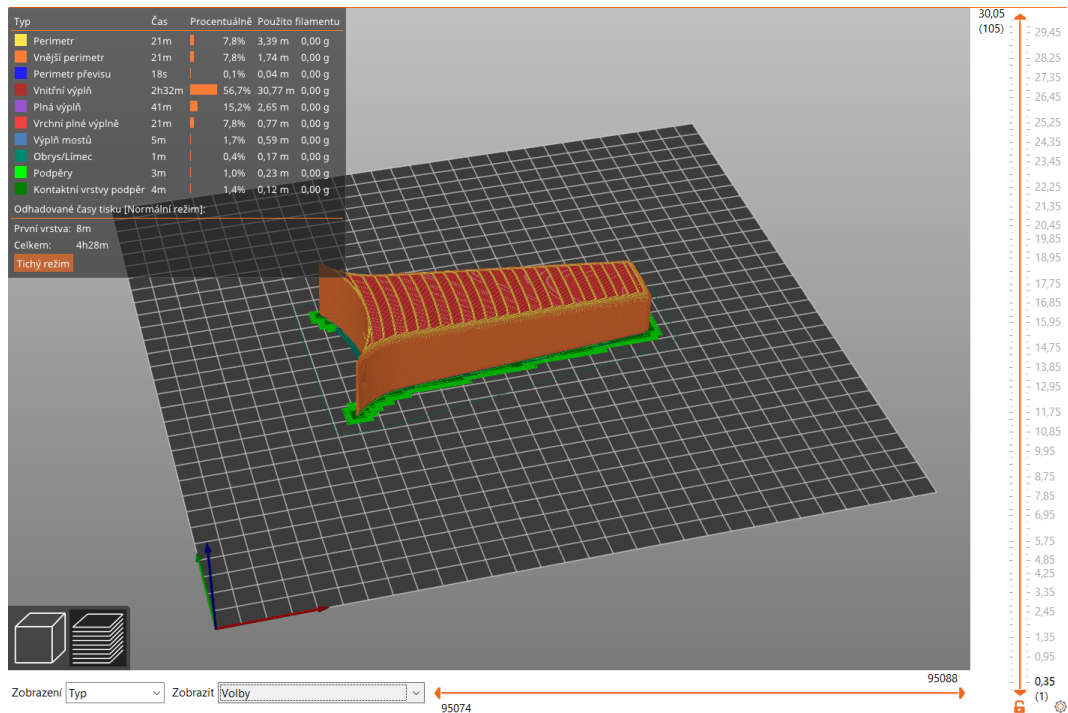
Každý z paprsků finálního disku je vyplněn jádrem z polymerního materiálu. Jádro vyplňuje prostor mezi stěnami uhlíkového prepregu a zajišťuje tak tvarovou stabilitu paprsků. Výhodou těchto jader je i variabilní úprava tloušťky stěny disku. Pokud je například požadováno zvětšení tloušťky uhlíkové stěny o 1 mm dojde ke zmenšení jádra ve stejném poměru aniž by byl nutný zásah do geometrie samotné formy.



*Obrázek 20 – 3D model jádra paprsku*

### **6.2.3 Výroba jádra paprsku**

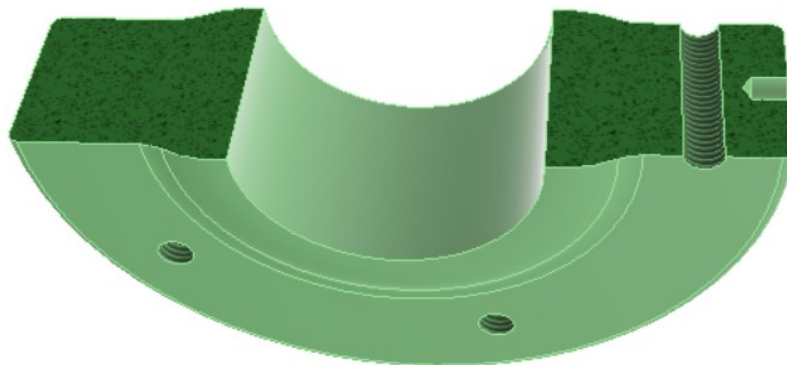
Pro výrobu jádra paprsku byla zvolena metoda 3D tisku. Vytvořený model byl převeden do příčného souboru a vložen do softwaru PrusaSlicer, který slouží pro tvorbu G-kódu pro tisk součástí. Z technického listu pro materiál PA12 + 15GF byly vloženy vstupní parametry materiálu, teplota trysky 270 °C, teplota podložky 80 °C a míra výplně byla zvolena 60 %. Rovněž byly vygenerovány podpěry nutné pro tisk. Po provedení tisku prvotního dílu může dojít k následné úpravě vstupních parametrů z důvodu dosažení co nejlepšího výsledku.



Obrázek 21 – Zobrazení součásti v programu PrusaSlicer

### 6.2.4 Středové jádro

Druhým typem jádra, které je potřeba pro tvorbu disku je jádro středové. Toto jádro rovněž zajišťuje stabilitu a díky svému tvaru se chová jako zámek a zabraňuje tím sesmeknutí prepregu při jeho vrstvení. Ze středového jádra plynule navazují jádra paprsků a spojení mezi nimi je zajištěno čepy, které jsou podlepeny, aby nedocházelo k rozpojení. Rovněž slouží k propojení disku s dvoudílným nábojem kola za pomoci šroubů a otvorů se závitem vytvořených v jádru.

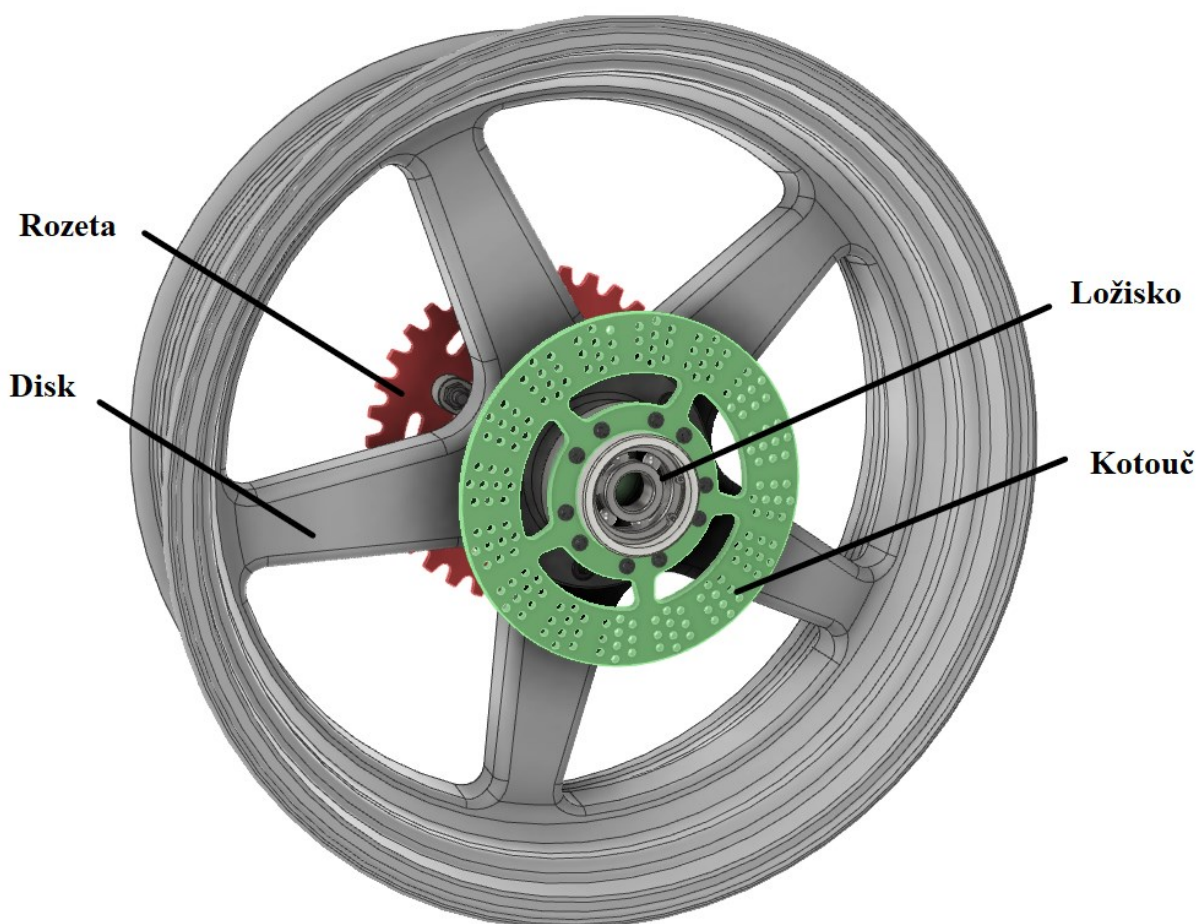


Obrázek 22 – Středové jádro

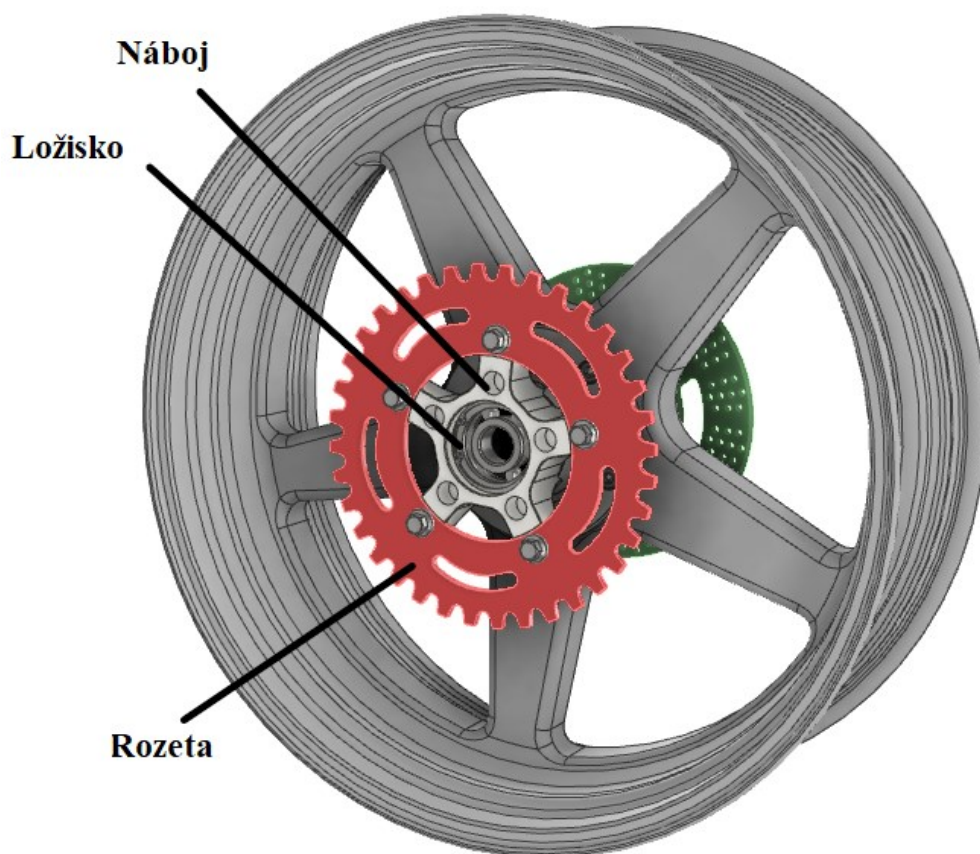
### 6.3 Model sestavy

Pro lepší přehlednost a zasazení do kontextu byl vymodelován model sestavy zadního kola. Krom samotného disku se zde nachází již dříve zmiňovaný dvoudílný náboj. Spojení náboje a disku zajišťují šrouby a díry se závitem nacházející se ve středovém jádru. Náboj je dále osazen rozetou, která s pomocí řetězu zajišťuje přenos rotace z motorové části motocyklu na zadní kolo. Dále je náboj osazen brzdovým kotoučem a ten ve spojení s brzdovými čelistmi motocyklu zamezuje rotaci kola.

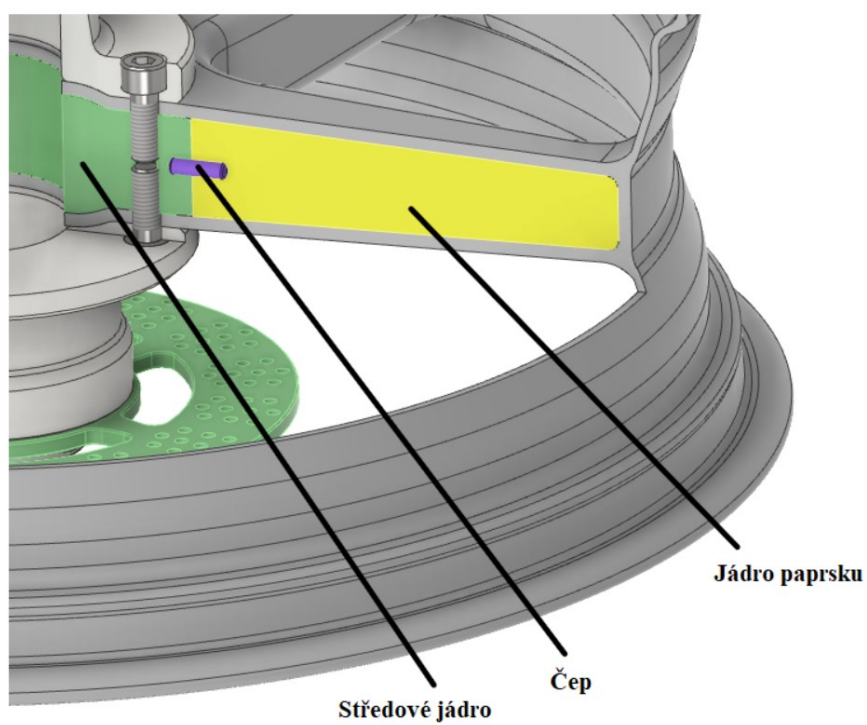
Na řezu sestavou (obrázek 25) lze vidět spojení středového jádra a jádra paprsku pomocí čepu. Rovněž je zde zobrazeno i spojení náboje s diskem pomocí šroubů.



Obrázek 23 – Model sestavení kola z pohledu na kotouč



Obrázek 24 – Model sestavení kola z pohledu na rozetu

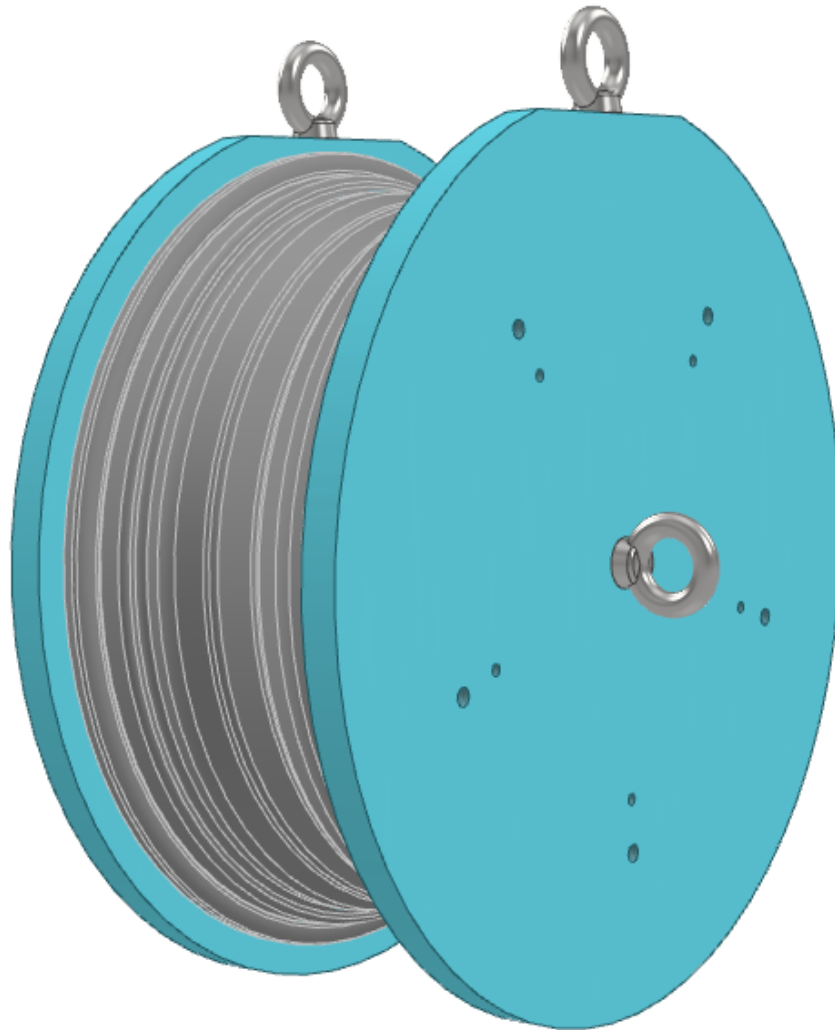


Obrázek 25 – Řez sestavou



## 7 KONSTRUKCE FORMY

Při konstrukci formy je nutné, aby její výroba byla co nejjednodušší, byl kladen důraz na její přesnost a zároveň byla ekonomicky výhodná. Nutné je brát v potaz i kvalitu povrchu dutiny formy, jelikož se její kvalita odrazí přímo na výsledném výrobku. Na výslednou cenu formy má vliv například použitý materiál a použití normalizovaných či katalogových dílců.



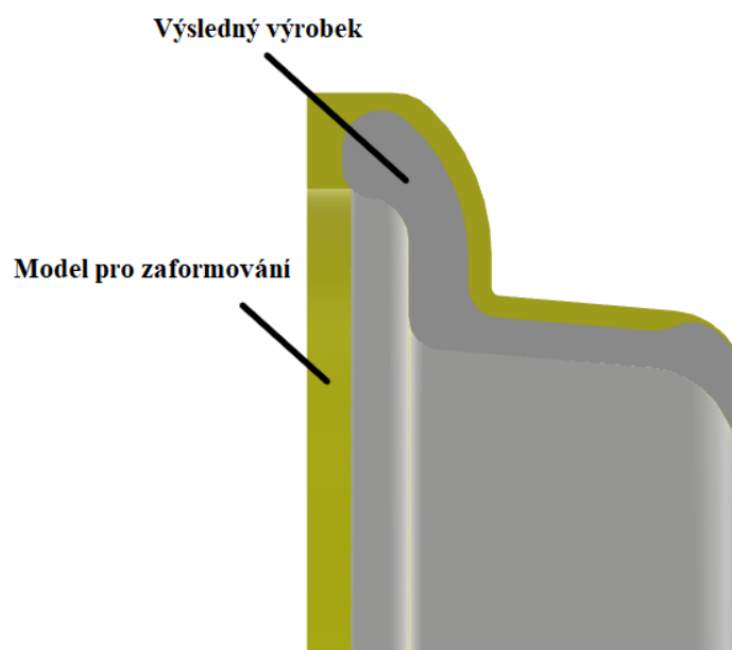
Obrázek 26 – Forma kompozitního disku

### 7.1 Model pro zaformování

Tvorba modelu pro zaformování je důležitá z hlediska vytvoření správné dutiny ve formě. Tento model má oproti výslednému výrobku zaslepené všechny otvory a také přídavek na lemu disku, který zajišťuje správnou polohu obutí pneumatiky. Tento lem bude dále obráběn dokončovací operací broušení na patřičný rozměr.



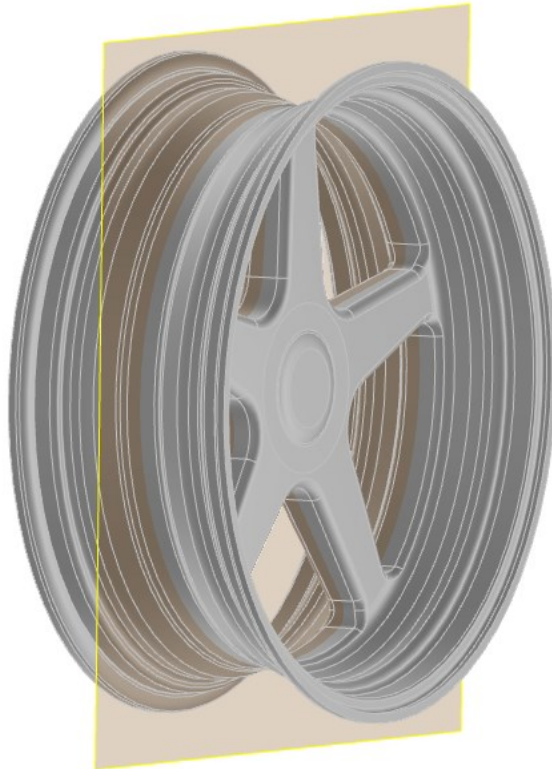
Obrázek 27 – Model pro zaformování



Obrázek 28 – Rozdíl mezi výsledným a formovacím profilem lemu

## 7.2 Volba dělicí roviny

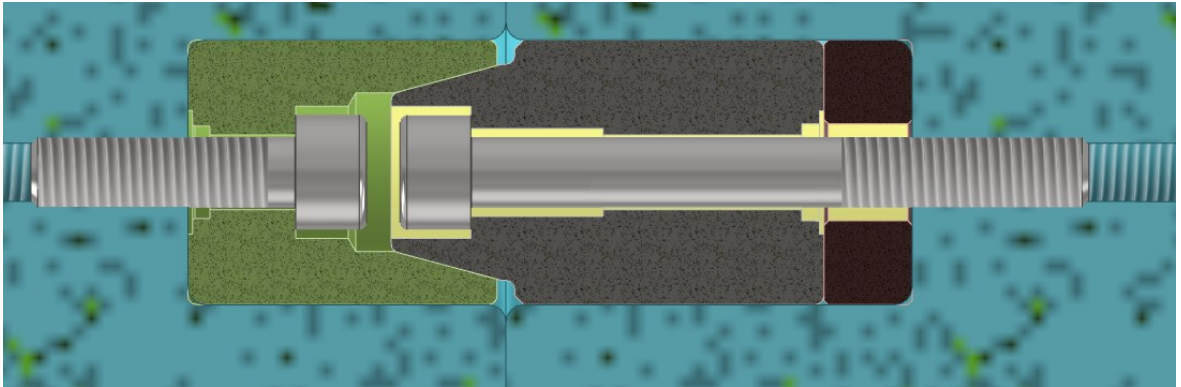
Nedílnou součástí před návrhem samotné formy je vhodně zvolit umístění dělicí roviny. Její správné zvolení má za následek snadné vypracování formy a rovněž snadné vyjmutí výrobku z formy. Díky faktu, že je tento motocyklový disk symetrický, nejvhodnějším místem pro umístění dělicí roviny je rovina souměrnosti.



Obrázek 29 – Volba dělicí roviny

## 7.3 Středění formy

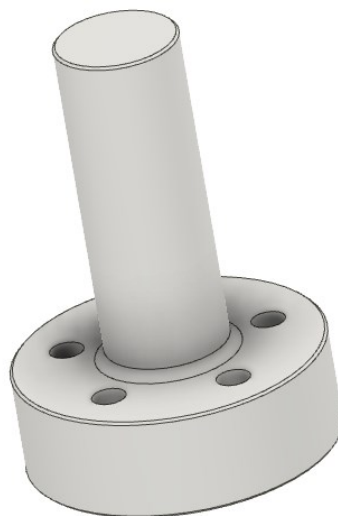
Pro správné vystředění formy bylo použito pět normalizovaných kuželových středících elementů HASCO Z051/30. Kromě správného vystředění formy zároveň absorbují příčné síly a zajišťují ochranu tvarové dutiny. Tyto elementy jsou složeny ze dvou částí, a to kuželové vložky a kuželového čepu. Vložky jsou připevněny do těla levé části formy a čepy do těla pravé části formy.



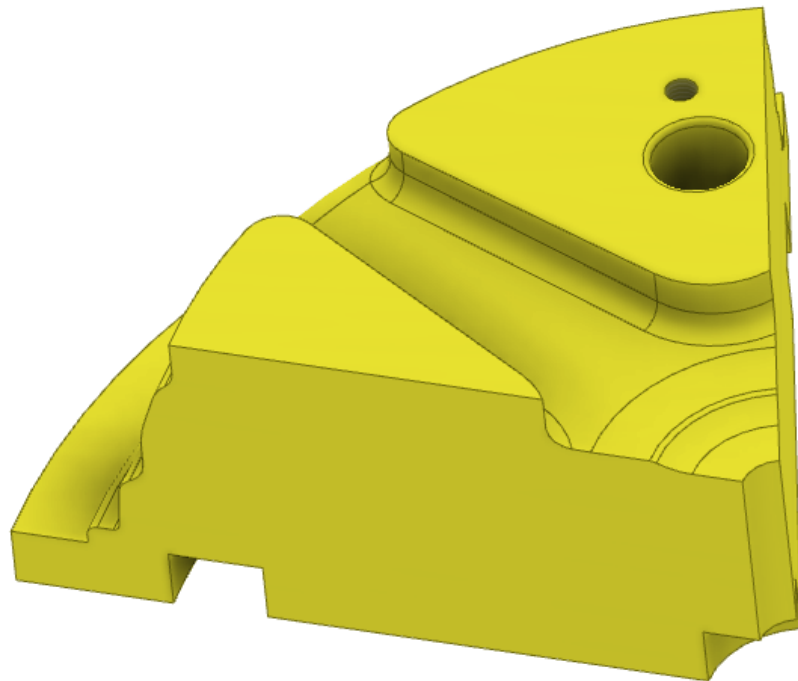
Obrázek 30 – Kuželové středění

#### 7.4 Dělení formy pro výrobu

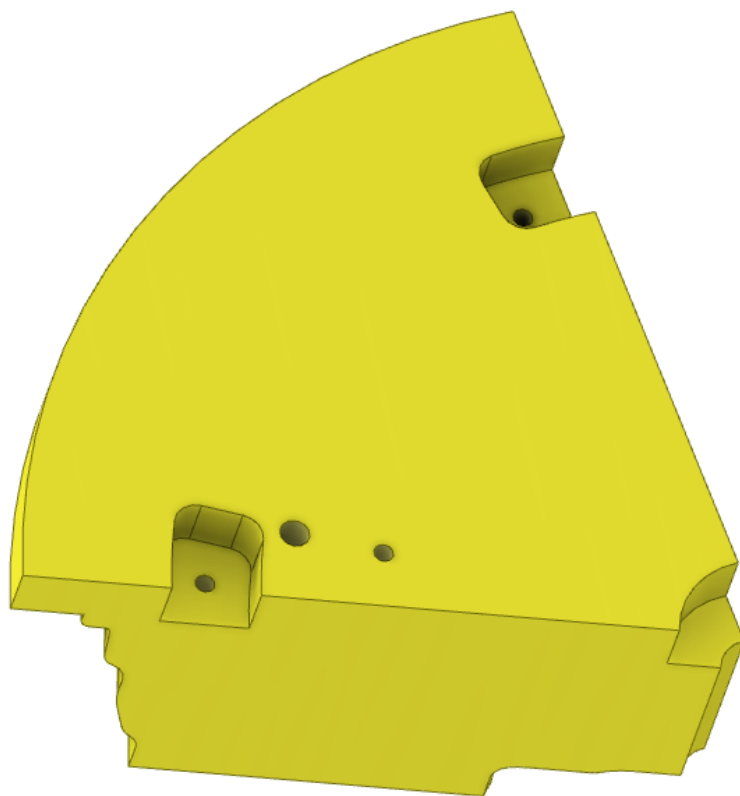
Z pohledu případné výroby formy na univerzitních strojích je nutné formu rozdělit na menší segmenty. Každá ze dvou částí formy byla rozdělena na pět identických segmentů, které zajistí tvorbu pouze jednoho programu pro obrábění. Dělení je nutné provést v místech, kde možný otisk stopy po spojení bude co nejméně viditelný. Spojení a vystředění vzájemné polohy segmentů je zajištěno přes zámky a středící čep. Zámek se nachází na každém segmentu a je tvořen kapsou a západkou, které jsou se segmenty spojeny šrouby. Spojení rovněž probíhá i v místě středícího čepu, na němž je vytvořeno osazení, které je zapuštěno do segmentů a pomocí šroubů spojuje čep a segmenty do jednoho celku. Otisk po středícím čepu, který vznikne na součásti se nachází v místě, které bude obráběno a nezůstane tedy na výsledném disku.



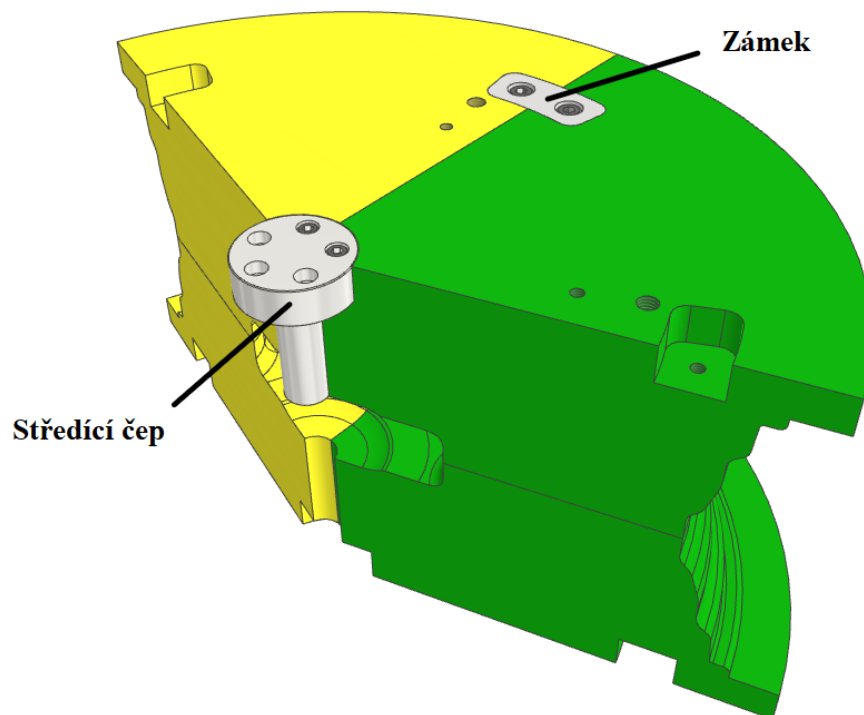
Obrázek 31 – Středící čep



*Obrázek 32 – Segment formy z pohledu dutiny*



*Obrázek 33 – Segment formy z pohledu zadní části*



Obrázek 34 – Pohled na rozděleno formu

## 7.5 Transportní zařízení

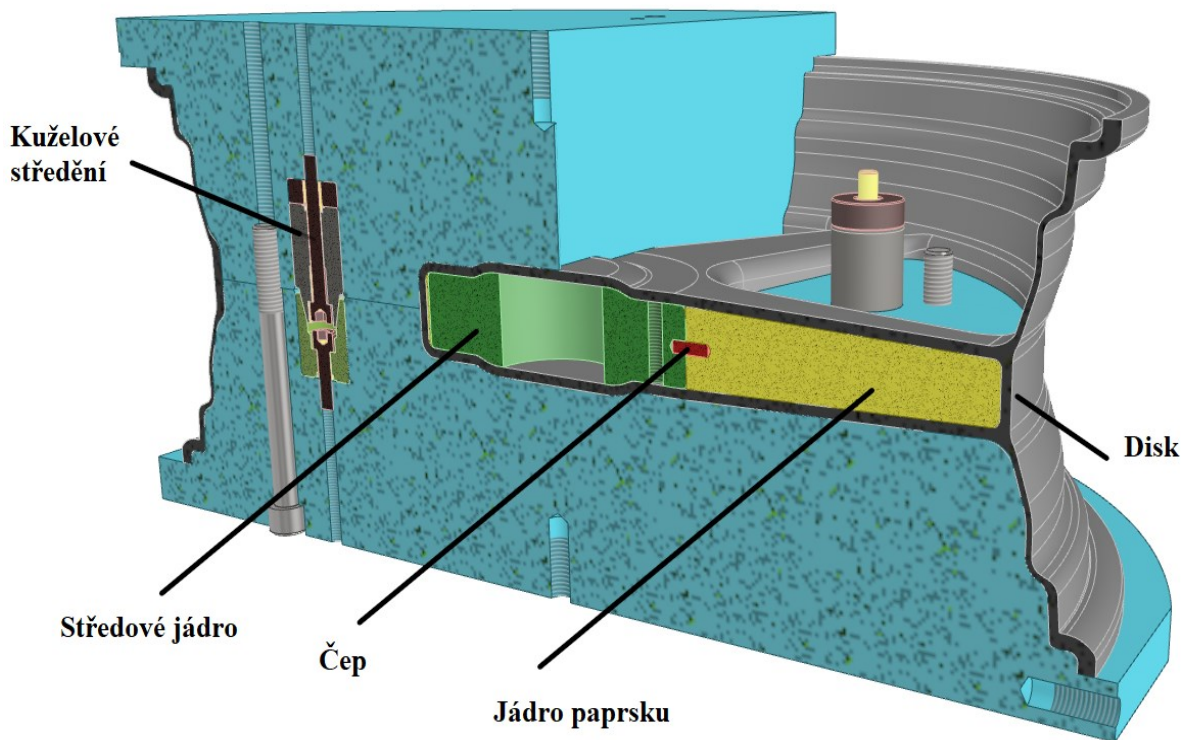
Za účelem snadného transportu v horizontálním i vertikálním směru byla každá ze dvou hlavních částí formy opatřena dvěma závěsnými oky Z710 z katalogu produktů od firmy HASCO. Oka jsou přišroubována do děr se závitem na rámu formy. Závěsná oka lze snadno demontovat před vložením sestavy do vakuovací fólie.



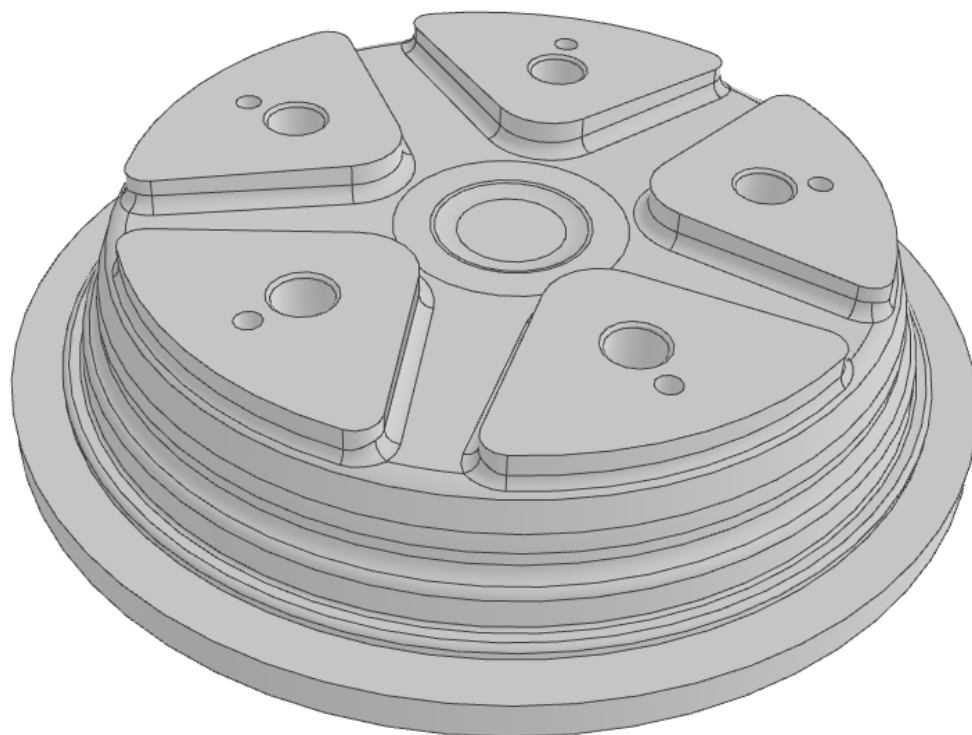
Obrázek 35 – Závěsné oko

## 7.6 Formování disku

Forma pro výrobu kompozitního disku je složena ze dvou hlavních částí – levé a pravé strany formy. Dutiny každé z částí jsou vyplněny nastříhaným prepregem, který je vrstven do tloušťky dvou milimetrů. Následně jsou do dutiny formy vložena spojená jádra, která jsou rovněž obalena dvoumilimetrovou vrstvou prepregu. Pomocí šroubů dochází ke spojení dvou dílů formy v jeden celek. Správné spojení a dosednutí formy zaručují použitá kuželová středění. Po montáži formy dochází k finálnímu překrytí vnějšího profilu prepregem. Samotná vnější část profilu je formována podtlakem po vložení do vakuovací fólie a následném odsátí vzduchu.



Obrázek 36 – Řez zaformovanou částí



*Obrázek 37 – Pohled do dutiny levé části formy*

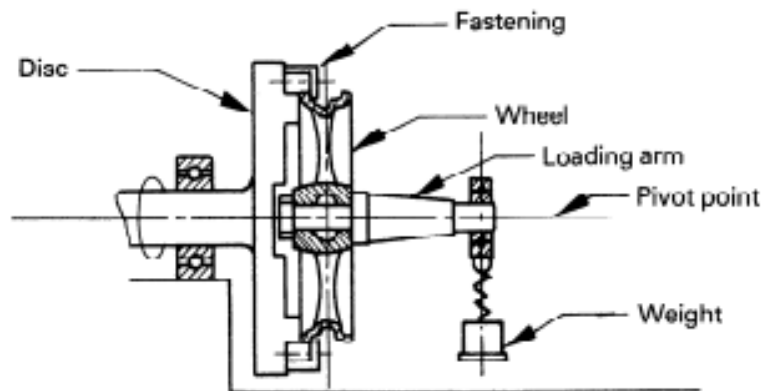


## 8 NÁVRH METODIKY TESTOVÁNÍ KOMPOZITNÍCH DISKŮ

Disky jakožto prvek výbavy vozidla podléhají schválení o technické způsobilosti pro užívání v běžném provozu na základě čísla schválení KBA. Pro udělení čísla KBA musejí disky absolvovat zátěžové testy, které vycházejí z norem ISO – 8644 případně JASO T203-85. [49]

### 8.1 Únavová zkouška ohybem za rotace

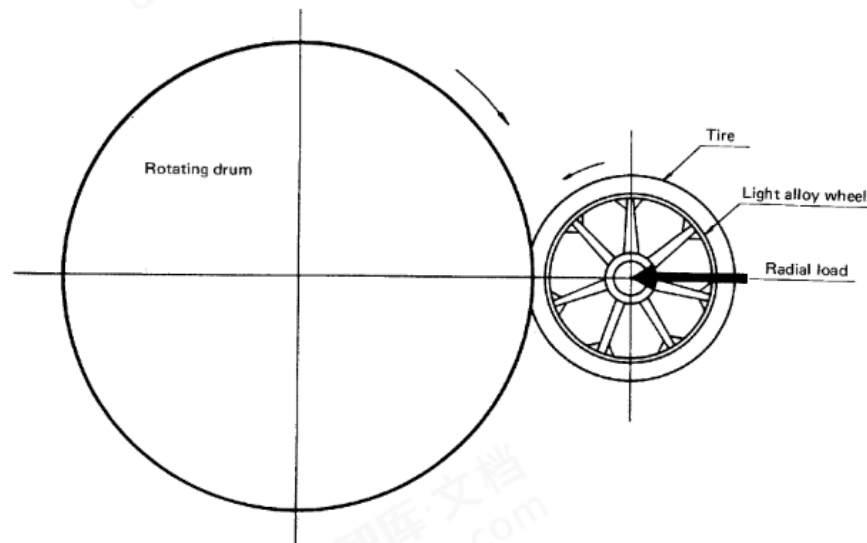
Tato zkouška simuluje působení sil působících na disk při jízdě v zatáčce. Testovaný disk je uchycen za vnitřní stranu ráfku na rotujícím kotouči a zároveň je k disku připevněno zatěžující rameno stejným způsobem, jako je disk běžně připevněn k vozidlu. Na konci zatěžujícího ramene se nachází závaží o stejném průměru, jako je průměr testovaného disku. [49]



Obrázek 38 – Schéma únavové zkoušky ohybem za rotace [49]

### 8.2 Odvalovací zkouška

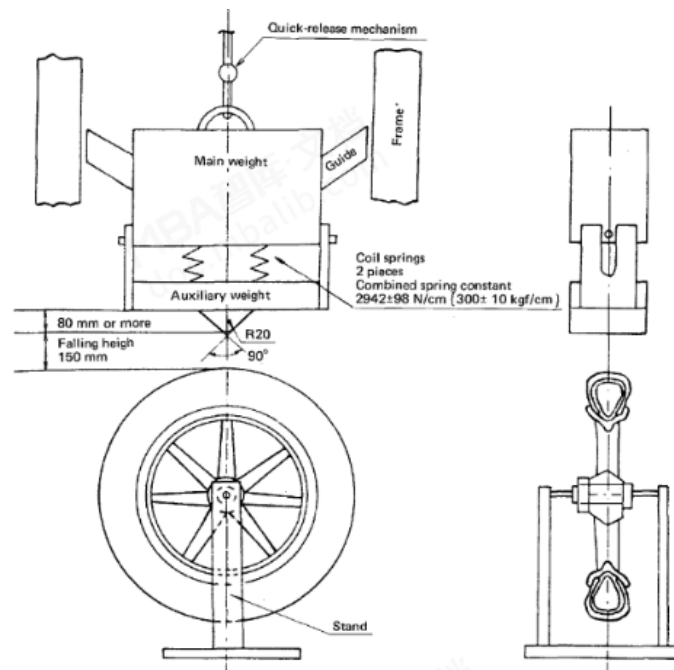
Odvalovací zkouška simuluje dopřednou jízdu motocyklu a zjišťuje se výdrž disku, který je opatřen duší a pneumatikou. Po nahuštění na dovolený tlak pneumatiky je kolo upnuto a přiloženo k rotujícímu válci o minimálním průměru 1,7 m po němž se odvaluje. Zkouška probíhá po dobu 72 h při požadovaném zatížení, které může kolísat maximálně o  $\pm 5\%$ . Při selhání pneumatiky může po její výměně test pokračovat. Po testu nesmí disk vykazovat žádné známky poškození. [49]



Obrázek 39 – Odvalovací zkouška [49]

### 8.3 Rázová zkouška

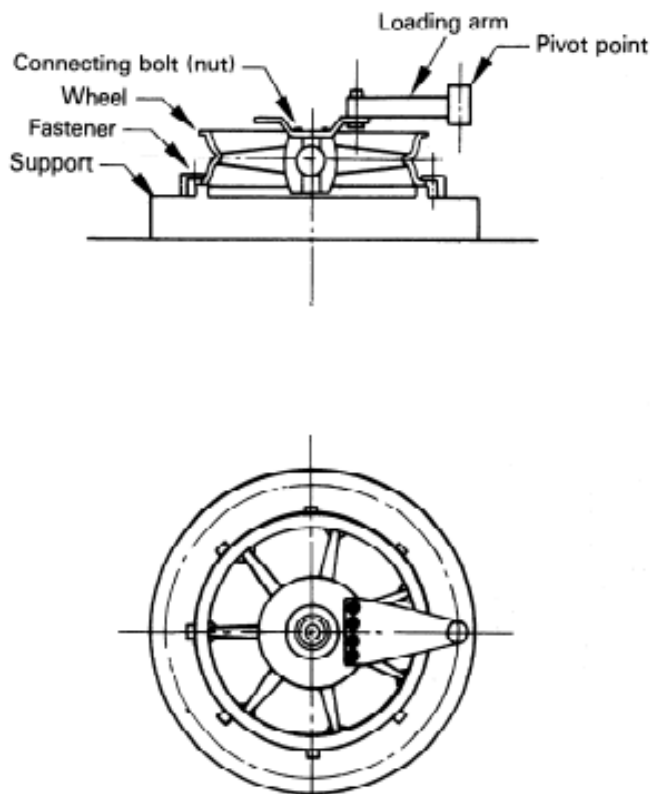
Zkoušený disk je osazen duší a pneumatikou, nahuštěn na požadovaný tlak a upnut do stojanu zkušebního zařízení tak, aby rázové zatížení působilo na okraje ráfku. Beran zkušebního stroje o stanoveném rozměru a profilu je spuštěn z výšky 150 mm na kolo. Za vyhovující se vykazuje disk bez prasklin a dalšího poškození a zároveň nesmí být únik tlaku z pneumatiky větší, než 0,2 bar. [49]



Obrázek 40 – Rázová zkouška [49]

## 8.4 Zkouška zkrutu

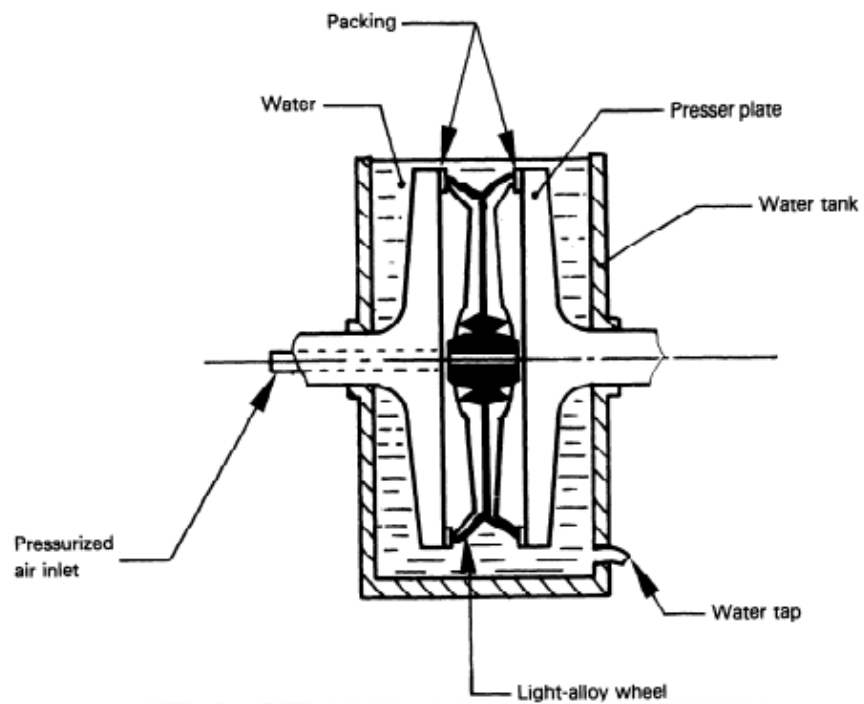
Disk je ke zkušebnímu zařízení upevněn ve dvou místech a to za ráfek ke stolu zkušebního stroje a za náboj k ramenu, které vyvolává torzní moment. Tento test má za cíl ověřit odolnost paprsků a náboje disku. Jedná se o cyklickou zkoušku s počtem cyklů jeden milion. Rovněž u této zkoušky nesmí být vidět na disku žádné poškození. [49]



Obrázek 41 – Torzní zkouška [49]

## 8.5 Zkouška úniku vzduchu

Tato zkouška se používá pro disky, které jsou určeny pro bezdušové systémy. Disk je z obou částí uzavřen přírubami a upevněn do nádrže s vodou. Do soustavy přírub s diskem je vháněn vzduch a zjišťuje se jeho únik do kapaliny. Za vyhovující se pokládá ten disk, ve kterém nedochází k úniku vzduchu do kapaliny a je tak vzduchotěsný. [49]



Obrázek 42 – Zkouška vzduchotěsnosti [49]

## ZÁVĚR

Bakalářská práce se odvíjela od stanovených cílů na jejím začátku. V první řadě bylo zapotřebí vypracovat literární rešerši, která se zabývala obecným popisem kompozitních materiálů a jejich rozdělením, fázovými materiály, zpracovatelskými technologiemi pro výrobu součástí a jejich následné aplikaci v odvětvích. Rovněž se studie zabírala karbonovými motocyklovými disky, jejich namáháním, testováním a nástroji pro výrobu.

Praktická část bakalářské práce se zabírá identifikací součásti, tvorbě 3D modelů disku z nichž vychází nástroj pro jeho výrobu, podpůrnými prvky pro výrobu výsledné součásti a metodikou jejího testování. Zadanou součástí byl zadní motocyklový disk vyrobený z kompozitních materiálů. Byly zpracovány různé modelové designy disku, z nichž byl zvolen nejvhodnější pro následný návrh výrobního nástroje. Následně bylo zapotřebí vymodelovat podpůrné prvky – jádra, která umožňují výrobu disku. Následovalo umístění modelu disku z jeho podpůrnými prvky do sestavy pro lepší přehled a zobrazení. Pro tvorbu samotného nástroje disku bylo nutné vhodně zvolit dělicí rovinu pro správné zaformování a vytvořit formovací model pro vznik dutiny ve formě. Vystředění obou polovin formy bylo zajištěno katalogovými produkty od výrobce normálií firmy HASCO. Dále byly použity šrouby pro spojení dvou polovin formy a každá z polovin byla opatřena transportními oky pro ulehčení manipulace. Ve vytvořeném nástroji došlo následně k popisu procesu zaformování a zobrazení všech jeho součástí a součástí výrobku. Kvůli rozměrům formy bylo nutné každou z polovin rozdělit na pět totožných segmentů, které usnadní její výrobu. Pro vystředění a montáž segmentů v jeden celek byl použit středící čep a systém pěti zámků se západkami, které byly propojeny s jednotlivými segmenty šrouby. V poslední části bylo nutné vypracovat metodiku pro testování kompozitních disků. Ta vychází z normy ISO - 8644, která je zaměřena na testování motocyklových disků.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] EHRENSTEIN, Gottfried W., 2009. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [2] PROKOPOVÁ, Irena, 2007. *Makromolekulární chemie*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT. ISBN 978-80-7080-662-3.
- [3] DUCHÁČEK, Vratislav, 2006. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT. ISBN 80-7080-617-6.
- [4] KOŘÍNEK, Zdeněk. Kompozity. *Kompozity* [online]. [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://kompozity.webnode.cz/>
- [5] VRBKA, Jan, 2008. *Mechanika kompozitů* [online]. Fakulta strojního inženýrství v Brně [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/priloha.php?dpid=83340](https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=83340)
- [6] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš, ed., 2010. *Konstruování strojních součástí*. Přeložil Martin HARTL. V Brně: VUTIUM. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 9788021426290.
- [7] *Technologie výroby kompozitů* [online]. [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/uploads/files/Technologie%20v%C3%BDroby%20kompozit%C5%AF.pdf>
- [8] *ASM Handbook*, 2001. Materials Park: ASM International. ISBN 978-0-87170-703-1.
- [9] *Structural preform technologies emerge from the shadows* [online]. 2013 [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/structural-preform-technologies-emerge-from-the-shadows>
- [10] *Autokláv* [online]. [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <http://www.plastic.cz/technologie-autoklav-cz>
- [11] PARK, Soo-Jin, 2018. *Carbon Fibers* [online]. Singapore: Springer Singapore [cit. 2023-02-19]. Springer Series in Materials Science. ISBN 978-981-13-0537-5. Dostupné z: doi:10.1007/978-981-13-0538-2

- [12] LENGSELD, Hauke, Felipe WOLFF-FABRIS, Johannes KRÄMER, Javier LACALLE a Volker ALTSTÄDT, 2015. *Composite Technology* [online]. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. [cit. 2023-02-19]. ISBN 978-1-56990-599-9. Dostupné z: doi:10.3139/9781569906002
- [13] BREUER, Ulf Paul, 2016. *Commercial Aircraft Composite Technology* [online]. Cham: Springer International Publishing [cit. 2023-02-19]. ISBN 978-3-319-31917-9. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-31918-6
- [14] *Aerospace: Use of composite materials in Aerospace* [online]. [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://compositesuk.co.uk/composite-materials/applications/aerospace/>
- [15] PATIL, Shubham, 2021. *Carbon Composites For Automotive* [online]. [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/351935752\\_CARBON\\_COMPOSITES\\_FOR\\_AUTOMOTIVE](https://www.researchgate.net/publication/351935752_CARBON_COMPOSITES_FOR_AUTOMOTIVE)
- [16] *Carbon Fiber in Everyday Applications* [online]. [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://www.compositesone.com/carbon-fiber-in-everyday-applications/>
- [17] *History of the Hockey Stick* [online]. [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://www.thehockeyfanatic.com/hockey-facts/history-of-the-hockey-stick/>
- [18] *Fishing Rod* [online]. [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <http://www.madehow.com/Volume-5/Fishing-Rod.html>
- [19] *Carbon Fiber Uses in Sports* [online]. [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://smicomposites.com/the-top-5-carbon-fiber-uses-in-sports/>
- [20] *Benefits of Carbon Fiber Motorcycle Wheel* [online]. [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: <https://damon.com/blog/benefits-carbon-fiber-wheels/>
- [21] *Carbon wheels for private motorbikes: when a material dream comes true* [online]. [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: <https://www.thyssenkrupp.com/en/stories/carbon-wheels-for-private-motorbikes--when-a-material-dream-comes-true>
- [22] *Mold Construction Guide* [online]. [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: [https://www.fibreglast.com/product/mold-construction/Learning\\_Center](https://www.fibreglast.com/product/mold-construction/Learning_Center)
- [23] *Materials & Processes: Tooling for composites* [online]. [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/tooling>

- [24] *Composite materials: Core* [online]. [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://compositeslab.com/composite-materials/core/>
- [25] *Sandwich core* [online]. [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://www.castrocompositesshop.com/en/9-sandwich-cores>
- [26] *SANDWICH STRUCTURE BASED ON CORRUGATED-CORE: A REVIEW* [online]. Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Malaysia Pahang [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/159185568.pdf>
- [27] *Sandwich Structures and Cores* [online]. 2021 [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://www.addcomposites.com/post/sandwich-structures-and-cores>
- [28] *Types of Core Materials* [online]. [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: [https://www.fibermaxcomposites.com/shop/index\\_files/typesofcore.html](https://www.fibermaxcomposites.com/shop/index_files/typesofcore.html)
- [29] *Dvoukomponentní polyurethanová pěna* [online]. [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://www.havel-composites.com/cs/produkty/pur-2k-45-dvoukomponentni-polyurethanova-pena-45kg-m3-slozka-a-3209-452>
- [30] *O 3D tisku* [online]. [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://josefprusa.cz/o-3d-tisku/>
- [31] GANDIAGA, Juan Carlos. *3D Printing Sacrificial Cores for Carbon Fiber Composite Layups* [online]. 2018 [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://trimech.com/blog/3d-printing-sacrificial-cores-for-carbon-fiber-composite-layups>
- [32] *Materiály a technologie* [online]. [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://www.rockpoint.cz/materialy-a-technologie/dural>
- [33] *Kompozitová robotická paže* [online]. [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://www.ensingerplastics.com/cs-cz/strojirenstvi/roboticka-paze-baleni>
- [34] KARTEEK, Navuri, Kasi V Rao POTHAMSETTY, K. RAVI PRAKASH BABU, D. MOJESHWARA RAO, S. TUMMALA, S. KOSARAJU, P. BOBBA a S. SINGH. *Structural Analysis of Motorcycle Alloy Wheel*. E3S Web of Conferences [online]. 2021, 309 [cit. 2023-05-14]. ISSN 2267-1242. Dostupné z: doi:10.1051/e3sconf/202130901158
- [35] KEATLEY, Rachel. *Optimizing Composite Wheel Rim Designs with COMSOL Multiphysics* [online]. [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: <https://www.comsol.com>
- [36] *Motorcycle Wheel Testing* [online]. [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: <https://www.wheeltest.com/services/motorcycle.html>



- [37] *Materials & Processes: Fiber formats for composites* [online]. 2016 [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/fiber-reinforcement-forms>
- [38] BAREŠ, Richard. *Kompozitní materiály*. 1.vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988. 328 s.
- [39] *Skelná tkanina* [online]. [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: <https://www.boatpark.cz/laminovaci-skelna-tkanina-220-gm2-role-10-m2.html>
- [40] *Journal of materials research and technology: JMR&T : an official publication of the Brazilian Metallurgical, Materials and Mining Association*. Amsterdam: Elsevier.
- [41] *Druhy vazeb* [online]. [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: <https://www.caramilla.cz/latky/>
- [42] *Prepreg* [online]. [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: <https://www.easycomposites.co.uk/prepreg-reinforcements>
- [43] *Wheels of Fortune* [online]. [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: <https://www.cycleworld.com/story/motorcycle-gear-and-products/carbon-fiber-wheels-explained/>
- [44] *Airbus* [online]. [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Trends-in-the-use-of-composite-materials-in-Airbus-aircraft-reprinted-with-permission\\_fig1\\_353879171](https://www.researchgate.net/figure/Trends-in-the-use-of-composite-materials-in-Airbus-aircraft-reprinted-with-permission_fig1_353879171)
- [45] *Carbon Fiber Wheels* [online]. [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: <https://brixtonforged.com/forged-wheels/carbon-series/>
- [46] *Ice Hockey Stick* [online]. [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: <https://www.hockeymonkey.com/ice-hockey/sticks/composite/ccm-hockey-stick-tacks-classic-pro-sr.html>
- [47] *Cores for Carbon Fiber Composite* [online]. [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: <https://trimech.com/blog/3d-printing-sacrificial-cores-for-carbon-fiber-composite-layups>
- [48] *Kryt náboje zadního kola* [online]. [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: <https://www.yshop.cz/rizoma-kryt-naboje-zadniho-kola-pro-motocykly-bmw-modra>
- [49] ISO DIS 8644, 2005 Edition, February 28, 2005 [online]. [cit. 2023-05-16]. - MOTORCYCLES - LIGHT-ALLOY WHEELS - TEST METHOD
- [50] *Fiberlogy Nylon PA12 + GF15* [online]. [cit. 2023-05-16]. Dostupné z: <https://www.3djake.com/fiberlogy/nylon-pa12-gf15-black>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

AF	Aramidové vlákno
CF	Uhlíkové vlákno
CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý
EP-R	Epoxidové pryskyřice
FDM	Fused Deposition Modeling
GF	Skelné vlákno
KBA	Číslo homologace
NHL	National Hockey League
PA	Polyamid
PS	Polystyren
PUR	Polyuretan
PVC	Polyvinylchlorid
RTM	Resin Transfer Molding
SLA	Stereolitografie
SLS	Selective Laser Sintering
UP	Nenasycené polyesterové pryskyřice
VE-R	Vinylesterové pryskyřice
2D	Dvourozměrné
3D	Trojrozměrné
μm	Mikrometr
g/cm <sup>3</sup>	Hustota
°C	Teplota
mm	Milimetr
kg	Kilogram
MPa	Megapascal

GPa	Gigapascal
mm/s	Rychlost
h	Hodina
m	Metr
bar	Tlak
%	Procenta
''	Palec

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 – Rozdělení kompozitů [38]</i> .....	11
<i>Obrázek 2 – Skelná tkanina [39]</i> .....	14
<i>Obrázek 3 – Řez uhlíkovým vláknem [40]</i> .....	15
<i>Obrázek 4 – Druhy vazeb [41]</i> .....	16
<i>Obrázek 5 – Prepreg [42]</i> .....	17
<i>Obrázek 6 – Autokláv [10]</i> .....	18
<i>Obrázek 7 – Procentuální zastoupení materiálů v letadle [44]</i> .....	20
<i>Obrázek 8 – Automobilový uhlíkový disk [45]</i> .....	21
<i>Obrázek 9 – Kompozitní hokejka [46]</i> .....	22
<i>Obrázek 10 – Motocyklový uhlíkový disk [43]</i> .....	23
<i>Obrázek 11 – Odformování kompozitního dílce [47]</i> .....	24
<i>Obrázek 12 – Jádru vniklé 3D tiskem [47]</i> .....	26
<i>Obrázek 13 - Duralová vložka [48]</i> .....	27
<i>Obrázek 14 – Charakteristické rozměry</i> .....	30
<i>Obrázek 15 – Návrh s šestiúhelníkovými paprsky</i> .....	31
<i>Obrázek 16 – Návrh s vytažitelným jádrem paprsku</i> .....	32
<i>Obrázek 17 – Návrh se zúženými paprsky</i> .....	33
<i>Obrázek 18 – Návrh s tvarem hvězdy</i> .....	34
<i>Obrázek 19 – Detail návrhu v řezu</i> .....	35
<i>Obrázek 20 – 3D model jádra paprsku</i> .....	37
<i>Obrázek 21 – Zobrazení součásti v programu PrusaSlicer</i> .....	38
<i>Obrázek 22 – Středové jádro</i> .....	38
<i>Obrázek 23 – Model sestavení kola z pohledu na kotouč</i> .....	39
<i>Obrázek 24 – Model sestavení kola z pohledu na rozetu</i> .....	40
<i>Obrázek 25 – Řez sestavou</i> .....	40
<i>Obrázek 26 – Forma kompozitního disku</i> .....	41
<i>Obrázek 27 – Model pro zaformování</i> .....	42
<i>Obrázek 28 – Rozdíl mezi výsledným a formovacím profilem lemu</i> .....	42
<i>Obrázek 29 – Volba dělicí roviny</i> .....	43
<i>Obrázek 30 – Kuželové středění</i> .....	44
<i>Obrázek 31 – Středící čep</i> .....	44
<i>Obrázek 32 – Segment formy z pohledu dutiny</i> .....	45
<i>Obrázek 33 – Segment formy z pohledu zadní části</i> .....	45
<i>Obrázek 34 – Pohled na rozděleno formu</i> .....	46

---

<i>Obrázek 35 – Závěsné oko .....</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 36 – Řez zaformovanou částí.....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 37 – Pohled do dutiny levé části formy .....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 38 – Schéma únavové zkoušky ohybem za rotace [49] .....</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 39 – Odvalovací zkouška [49].....</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 40 – Rázová zkouška [49] .....</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 41 – Torzní zkouška [49].....</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 42 – Zkouška vzduchotěsnosti [49] .....</i>	<i>52</i>

## SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 – Základní vlastnosti materiálu [50] .....</i>	<i>36</i>
---	-----------

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Materiálový list pro tisk jader

Příloha P2: Modelované soubory

# PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST PRO TISK JADER



## TECHNICAL DATA SHEET NYLON PA12+GF15

TRADE NAME:	Fiberlogy Nylon PA12+GF15
MANUFACTURER:	Fiberlab S.A., Brzezie 387, 32-014 Brzezie, Poland
DESCRIPTION:	<b>Nylon PA12+GF15</b> filament designed for printing in FFF/FDM technology, available in different colors, wound on a spool, vacuum-packed in a plastic bag, placed in a cardboard box.

### TECHNICAL INFORMATION:

Diameter:	1.75 mm
Diameter Tolerance:	+/- 0.02 mm
Avg Roundness:	+ 0.01 mm
Net Weight:	0.5 kg
Print Temperature:	255°C - 270°C
Bed Temperature:	90°C - 110°C



Physical Properties	Test Method	Unit	Typical Value
Specific Density	ISO 1183	g/cm <sup>3</sup>	1.13
Mechanical Properties	Test Method	Unit	Typical Value
Tensile Strength @ Yield	ISO 527	MPa	-
Tensile Strength @ Break	ISO 527	MPa	72
Tensile Modulus	ISO 527	MPa	3100
Elongation @ Yield	ISO 527	%	-
Elongation @ Break	ISO 527	%	8
Flexural Strength	ISO 178	MPa	-
Flexural Modulus	ISO 178	MPa	3000
Izod Impact Strength (Notched) @ 23°C	ISO 180	kJ/m <sup>2</sup>	16
Thermal Properties	Test Method	Unit	Typical Value
Heat Distortion Temperature @ 0.45 MPa	ISO 75	°C	172
Heat Distortion Temperature @ 1.8 MPa	ISO 75	°C	155
Vicat Softening Temperature	ISO 306	°C	170
Glass Transition Temperature T <sub>g</sub>	DSC	°C	-
Melting Temperature T <sub>m</sub>	DSC	°C	178
Continuous Use Temperature (UL Yellow Card)	UL 746	°C	100

The information set forth herein has been gathered from standard reference materials and/or supplier test data. To the best knowledge and belief of Fiberlab S.A. they are accurate and reliable. Information is offered only for your consideration, investigation and verification. Fiberlab S.A. makes no warranties, expressed or implied, with respect to the use of such information or the use of the specific material identified herein combination with any other material or process, and assumes no responsibility therefore.

Last update January 21, 2022