

# 3D tisk jako podpora kompozitních struktur

Bc. Jan Dobiáš

---

Diplomová práce  
2018

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2017/2018

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan Dobiáš**  
Osobní číslo: **T16259**  
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **3D tisk jako podpora kompozitních struktur**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární rešerše
2. Návrh a výroba kompozitních struktur
3. Mechanické zkoušky
4. Závěr a zhodnocení řešené problematiky

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**Dle doporučení vedoucího diplomové práce**

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Lukáš Mañas**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

**2. ledna 2018**

Termín odevzdání diplomové práce:

**18. května 2018**

Ve Zlíně dne 5. února 2018



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



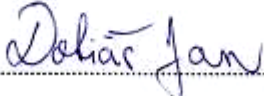
prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

## 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<sup>1/</sup>;
- 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<sup>2/</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60<sup>3/</sup> 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<sup>3/</sup> 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 Zlíně 17. 5. 2018

  
.....

---

<sup>19</sup> 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 zduřelých prací:

(1) Vysoká škola nevydělčně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigoráční 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 rigoráční práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlázení 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 požítovat 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.

<sup>20</sup> 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).

<sup>21</sup> 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). Odpírá-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 užití 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 výdětku 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 přihlíží k výši výdětku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá možnostmi využití technologie 3D tisku pro podporu kompozitních struktur. Teoretická část popisuje základní principy 3D tisku, možnosti využití 3D tisku při výrobě kompozitních dílů, postup při návrhu kompozitního dílu s využitím tištěného jádra a popis konvenčních postupů při výrobě dutých kompozitních dílů. V praktické části této práce je popsán postup výroby tištěných jader, postup výroby zkušebních těles, jejich testování a následné vyhodnocení. Dále je v praktické části proveden návrh přípravku pro zkoušku krutem a návrh využití jádra vyrobeného 3D tiskem u skutečné součásti.

Klíčová slova: 3D tisk, jádro, rozpustné jádro, kompozitní struktura, prepreg.

## **ABSTRACT**

This diploma thesis discusses about the use of 3D printing technology as a support for composites structures. The theoretical part describes the basic principles of 3D printing, the possibilities of using 3D printing in the production of composite parts, the process of designing a composite part using the 3D printed core and a description of conventional procedures in the production of hollow composite parts. The practical part of this thesis describes the production process of 3D printed cores, the process of production of test samples and their testing and evaluation of the tests. Further, the practical part, describes the design of the fixture for the torsion test. The last part of this thesis describes design of the real part that using 3D printed core.

Keywords: 3D printing, 3D printed core, soluble core, composite structures, prepreg.

Zde bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce, panu Ing. Lukáši Maňasovi za jeho čas, poskytnuté rady, konzultace a pomoc při tvorbě práce.

*„Každá práce, vykonávaná čestně,  
je užitečná a zasluhuje proto uznání.“*

*(Stendhal)*

Tato práce a projekt je realizován s finanční podporou interního grantu UTB ve Zlíně IGA / FT / 2018/004 financovaného ze zdrojů specifického univerzitního výzkumu.

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

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1. 3D TISK</b> .....	<b>12</b>
1.1 FUSED DEPOSITION MODELING .....	12
1.2 MATERIÁLY POUŽÍVANÉ K 3D TISKU TECHNOLOGIÍ FDM .....	13
1.2.1 ABS – Akrylonitrilbutadienstyren.....	14
1.2.2 PLA – Kyselina polymléčná.....	14
1.2.3 HIPS – Houževnatý polystyren .....	15
1.2.4 PVA – Polyvinylalkohol .....	15
<b>2. VYUŽITÍ 3D TISKU U KOMPOZITNÍCH STRUKTUR</b> .....	<b>16</b>
2.1 FORMY VYROBENÉ 3D TISKEM .....	16
2.2 JÁDRA DUTÝCH KOMPOZITNÍCH DÍLŮ VYROBENÁ 3D TISKEM .....	17
2.2.1 Mechanicky odstranitelná jádra.....	17
2.2.2 Rozpustná jádra .....	18
2.3 PŘÍKLADY APLIKACÍ 3D TISKU U KOMPOZITNÍCH DÍLŮ .....	18
<b>3. NÁVRH A VÝROBA KOMPOZITNÍCH STRUKTUR</b> .....	<b>19</b>
3.1 NÁVRH KOMPOZITNÍ STRUKTURY S VYUŽITÍM 3D TISKU .....	19
3.2 POSTUP TVORBY KOMPOZITNÍ STRUKTURY S VYUŽITÍM 3D TISKU .....	20
3.2.1 Návrh jádra.....	20
3.2.2 Nastavení parametrů tisku.....	20
3.2.3 Tisk jádra.....	21
3.2.4 Příprava jádra .....	22
3.2.5 Laminace .....	22
3.2.6 Vytvrzení.....	23
3.2.7 Rozpuštění jádra.....	24
3.2.8 Hotový díl.....	24
3.3 VÝROBA KOMPOZITNÍCH STRUKTUR .....	25
3.3.1 Vakuová infuze .....	25
3.3.2 Vytvrzování v peci pomocí vakua.....	26
3.3.3 Vytvrzování v autoklávu .....	27
<b>4. TECHNOLOGIE VÝROBY DUTÝCH KOMPOZITNÍCH DÍLŮ</b> .....	<b>28</b>
4.1 NAVÍJENÍ.....	28
4.2 ODSŤŘEDIVÉ LITÍ .....	28
4.3 TUBE ROLING .....	29
4.4 OPLÉTÁNÍ.....	30
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>31</b>
<b>5. CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE</b> .....	<b>32</b>
<b>6. VÝROBA JADER</b> .....	<b>33</b>



6.1	NÁVRH PRŮŘEZŮ .....	33
6.2	TISK JADER.....	34
<b>7.</b>	<b>VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES .....</b>	<b>38</b>
7.1	ZKUŠEBNÍ POSTUP VÝROBY 1. ....	38
7.2	VÝROBA FOREM .....	39
7.2.1	Postup výroby forem .....	41
7.3	ZKUŠEBNÍ POSTUP VÝROBY 2. ....	44
7.4	POSTUP VÝROBY ZKUŠEBNÍCH TĚLES.....	46
7.4.1	Zkušební tělesa Typ 1. (6 vrstev) .....	48
7.4.2	Zkušební tělesa Typ 2. (3+3 vrstvy).....	50
7.4.3	Vytvrzovací program.....	52
<b>8.</b>	<b>MECHANICKÉ TESTOVÁNÍ.....</b>	<b>54</b>
8.1	ZKOUŠKA OHYBEM.....	54
8.2	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ZKOUŠKY OHYBEM.....	55
8.2.1	Typ 1. – kruh (6 vrstev).....	56
8.2.2	Typ 1. – vačka (6 vrstev).....	58
8.2.3	Typ 2. – kruh (3+3 vrstvy) .....	61
8.2.4	Typ 2. – vačka (3+3 vrstvy) .....	64
8.2.5	Celkové zhodnocení .....	67
8.3	NÁVRH PŘÍPRAVKU PRO ZKOUŠKU KRUTEM.....	68
8.3.1	Návrh 1. – spoj pomocí lepidla .....	68
8.3.2	Návrh 2. – spoj pomocí kleštiny.....	69
8.3.3	Návrh 3. – spoj pomocí kolíku.....	70
8.3.4	Zhodnocení návrhů přípravku pro zkoušku krutem .....	72
<b>9.</b>	<b>NÁVRH SOUČÁSTI S VYUŽITÍM JÁDRA VYROBENÉHO TECHNOLOGIÍ 3D TISKU .....</b>	<b>73</b>
9.1	NÁVRH KOMPOZITNÍCH ŘÍDÍTEK SILNIČNÍHO KOLA.....	73
9.2	TECHNOLOGICKÝ POSTUP VÝROBY KOMPOZITNÍCH ŘÍDÍTEK.....	76
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>79</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>81</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>83</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>84</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>87</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>88</b>

## ÚVOD

Výroba kompozitních struktur je rozsáhle rozšířenou technologickou operací a vyskytuje se v současné době ve všech základních odvětvích průmyslového sektoru. V některých odvětvích plně vytlačila doposud využívané konvenční materiály a postupy s nimi spojené. Kompozitní struktury a jejich výroba si sebou však nese řadu úskalí, s nimiž je potřeba při navrhování technologických postupů počítat. Jedním z těchto úskalí je výroba dutých těles, například s nepravidelným tvarem dutiny – tedy nepravidelným či jinak tvarově složitým povrchem jádra potřebného k výrobě požadované struktury. Možným řešením je právě použití technologie 3D tisku, která v kombinaci s vhodně zvoleným jádrovým materiálem umožňuje vyrobit právě takové jádro a to bez nutnosti výroby samostatných forem pro jádra. Velkou výhodou je zde naopak možnost takto vyrobené jádro ze struktury odstranit a snížit tak její celkovou hmotnost, což je stěžejní vlastnost, pro kterou se kompozitní materiály využívají.

Teoretická část diplomové práce se zabývá technologií 3D tisku, zejména způsoby a materiály, které je možné využít při výrobě součástí z kompozitních polotovarů. V této části jsou rovněž teoreticky vysvětleny základní principy technologie 3D tisku. Jsou zde popsány jednotlivé kroky při navrhování kompozitní součásti využívající jádro vyrobené touto technologií. Dále jsou v této části popsány odlišnosti oproti výrobě kompozitního dílu bez využití tištěného jádra. Teoretická část práce obsahuje také popis některých konvenčních výrobních postupů pro výrobu dutých kompozitních dílů.

Praktická část diplomové práce se zabývá návrhem, výrobou a testováním zkušebních těles, k jejichž výrobě bylo využito jádro vyrobené pomocí technologie 3D tisku. V této části je popsán postup výroby zkušebních těles a jejich testování. Jsou zde také uvedeny výsledky experimentálního testování, které porovnávalo zkušební vzorky s rozdílnou skladbou vrstev a simulovalo tak různé způsoby ukládání těchto vrstev do vícedílných forem. V další části práce jsou porovnány navržené varianty upínacích přípravků pro zkoušku krutem. V poslední kapitole této práce je popsán návrh reálné součásti, při jejíž výrobě je využito jádro vyrobené technologií 3D tisku.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1. 3D TISK

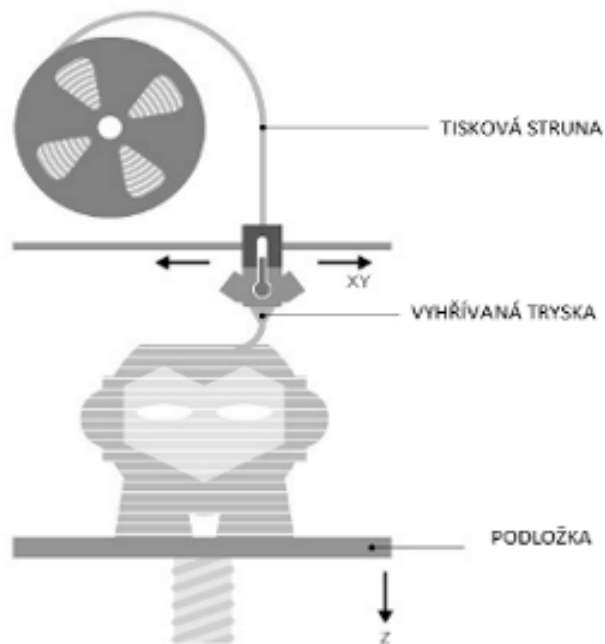
3D tisk je technologie, která se nejvíce používá k Rapid Prototypingu, tedy rychlé výrobě prototypových součástí. Rapid Prototyping je označení pro technologie, při kterých je součást vytvářena nekonvenčními postupy. Tímto způsobem výroby nedochází k úběru materiálu z polotovaru, jako je tomu při obrábění, a ani nedochází k jednorázovému přidání materiálu, jako při odlévání. Tvar výrobku se získá rozložením 3D modelu výrobku do tenkých vrstev, které po složení vytváří fyzický díl. [1]



*Obr. 1. 3D tiskárna od firmy Stratasys. [2]*

### 1.1 Fused Deposition Modeling

Je nejčastěji používanou technologií 3D tisku, zkráceně FDM. Tato technologie byla vynalezena firmou Stratasys. Principem FDM technologie je tavení tiskové struny z termoplastického polymeru v tiskové hlavě. Po roztavení se polymer vytlačuje pomocí trysky v tenkých vrstvách na tiskovou podložku, kde dochází k okamžitému zatuhnutí polymeru. Tištěný díl vzniká vrstvením tenkých vrstev polymeru. Při opakování tohoto postupu dosáhneme vytištění požadovaného dílu. Výhodou technologie FDM je rychlost tisku a především cena, která je v porovnání s ostatními technologiemi nižší. [3]



Obr. 2. Technologie FDM.

## 1.2 Materiály používané k 3D tisku technologií FDM

Technologií FDM lze tisknout téměř všechny druhy termoplastů. Pro 3D tiskárny se používá termoplast ve formě struny, který je navinut na cívce. Vyrábí se pomocí vytlačování na vytlačovacím stroji a obvykle se dodává ve standardních průměrech 1,75 mm a 2,9 mm. Při výrobě struny je důležité co nejpřesněji dodržet průměr struny.



Obr. 3. Tisková struna. [4]

### 1.2.1 ABS – Akrylonitrilbutadienstyren

Jedná se o amorfni termoplastický průmyslový kopolymer, který je odolný vůči mechanickému poškození. Je tuhý, houževnatý, odolný proti nízkým i vysokým teplotám, málo nasákvavý a zdravotně nezávadný. Je odolný vůči kyselinám, hydroxidům, uhlovodíkům, olejům a tukům. Je rozpustný v acetonu. Nevýhodou je nízká odolnost proti UV záření. [5]

Tab. 1. Vlastnosti ABS pro 3D tisk. [4]

<b>Materiál:</b>	<b>Rozpustnost:</b>	<b>Hlavní výhody:</b>	<b>Smrštění během ochlazování:</b>
ABS – Akrylonitrilbutadienstyren	Ano, v acetonu	Vysoká pevnost, trvanlivost, rázová odolnost, tuhost	Ano, doporučeno regulovat ochlazovací rychlost
<b>Velikost výtisků:</b>	<b>Teploty tisku:</b>	<b>Vhodné pro:</b>	<b>Vyhřívání podložka:</b>
Libovolná, omezena velikostí pracovního prostoru	210 °C až 250 °C	Pohyblivé části, díly s použitím v automotive, hračky	Ano 50 °C až 100 °C

### 1.2.2 PLA – Kyselina polymléčná

Jedná se o materiál pro FDM technologii, který je vhodný i pro tisk velkých předmětů. Je pružný, tvrdý a odolný jako jiné plasty a lze ho plně biologicky odbourat. Nevýhodou tohoto materiálu je špatná obrobitelnost a nízká teplota skelného přechodu. [5]

Tab. 2. Vlastnosti PLA pro 3D tisk. [4]

<b>Materiál:</b>	<b>Rozpustnost:</b>	<b>Hlavní výhody:</b>	<b>Smrštění během ochlazování:</b>
PLA – Kyselina polymléčná	Ne	Dobrá pevnost, odolnost, uživatelsky přívětivý materiál,	Méně citlivé než ABS
<b>Velikost výtisků:</b>	<b>Teploty tisku:</b>	<b>Vhodné pro:</b>	<b>Vyhřívání podložka:</b>
Libovolná, omezena velikostí pracovního prostoru	180 °C až 230 °C	Spotřební zboží, vysoké tiskové rychlosti, malé hračky	Doporučena, ale není vyžadována

### 1.2.3 HIPS – Houževnatý polystyren

Jedná se o termoplast, polystyren s přidavkem kaučuku. Je velmi pevný, houževnatý a má dobrou teplotní stálost. Obvykle se používá pro tisk na dvouhlavých 3D tiskárnách. Kdy jedna hlava tiskne podpůrné konstrukce a druhá samotný model. Podpůrné konstrukce z HIPS jsou rozpustné lemonsolím. [5]

Tab. 3. Vlastnosti HIPS pro 3D tisk. [4]

<b>Materiál:</b>	<b>Rozpustnost:</b>	<b>Hlavní výhody:</b>	<b>Smrštění během ochlazování:</b>
HIPS – Houževnatý polystyren	Ano, v lemonsolu	Vhodné jako podpora v kombinaci s ABS	Ano, doporučeno regulovat ochlazovací rychlost
<b>Velikost výtisků:</b>	<b>Teploty tisku:</b>	<b>Vhodné pro:</b>	<b>Vyhřívaná podložka:</b>
Libovolná, omezena velikostí pracovního prostoru	210 °C až 250 °C	Jednoduše odstranitelné podpory k výtiskům z ABS	Ano 50 °C až 100 °C

### 1.2.4 PVA – Polyvinylalkohol

Je to syntetický nízkoteplotní polymer rozpustný v čisté vodě. PVA je bez zápachu a je netoxický. Dále je odolný vůči olejům, masnotě a rozpouštědlům. PVA se nemusí používat k výrobě hotového výrobku, slouží spíše pro vytvoření podpůrných struktur pro části, které by se mohly během tisku zhroutit nebo zdeformovat. [5]

Tab. 4. Vlastnosti PVA pro 3D tisk. [4]

<b>Materiál:</b>	<b>Rozpustnost:</b>	<b>Hlavní výhody:</b>	<b>Smrštění během ochlazování:</b>
PVA – Polyvinylalkohol	Ano, ve vodě	Vhodné jako podpora v kombinaci s PLA	Ano, doporučeno regulovat ochlazovací rychlost
<b>Velikost výtisků:</b>	<b>Teploty tisku:</b>	<b>Vhodné pro:</b>	<b>Vyhřívaná podložka:</b>
Libovolná, omezena velikostí pracovního prostoru	180 °C až 230 °C	Jednoduše odstranitelné podpory k výtiskům z PLA	Ne

## 2. VYUŽITÍ 3D TISKU U KOMPOZITNÍCH STRUKTUR

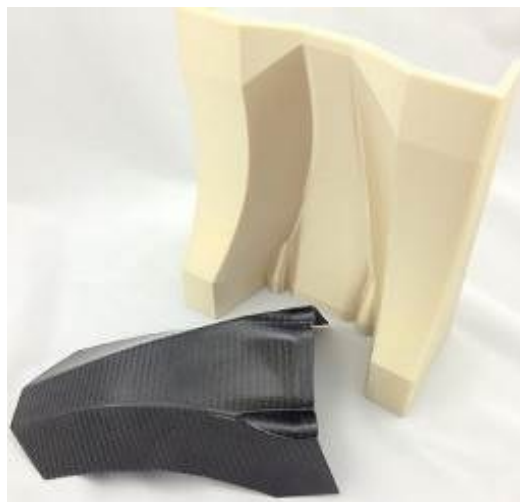
3D tisk má u kompozitních struktur širokou škálu využití. Pomocí 3D tisku je možné tisknout například formy pro výrobu kompozitních dílů nebo jádra pro duté kompozitní díly. [6]



*Obr. 4. Forma (na levé straně) a rozpustné jádro (na pravé straně) vyrobené 3D tiskem [7]*

### 2.1 Formy vyrobené 3D tiskem

Formy vyrobené technologií 3D tisku jsou zhotoveny v automatizovaném procesu přímo z CAD souboru, což znamená, že je dosaženo velmi vysoké přesnosti a není nutné formu dodatečně ručně upravovat. Takto vyrobené formy jsou vhodné pro malé počty vyráběných kusů daného dílu. Pro výrobu forem se používají materiály odolné proti pryskyřicím, a teplotám do 200 °C. [8]



*Obr. 5. Forma vyrobená 3D tiskem. [8]*



## 2.2 Jádra dutých kompozitních dílů vyrobená 3D tiskem

Jádra mohou být vytištěna z materiálů, které zůstanou po vytvrzení pryskyřice pevnou součástí výsledné struktury, nebo mohou být vytištěna z materiálů, které se po vytvrzení odstraní. Způsob odstranění jádra je závislý na materiálu jádra. K uložení výztuže na jádro lze použít například technologii ručního kladení nebo navíjení. Vytvrzení se provádí v peci za pomoci vakua, nebo v autoklávu. [6]



Obr. 6. Porovnání dvoudílné formy a rozpustného jádra. [6]

### 2.2.1 Mechanicky odstranitelná jádra

Mechanicky odstranitelná jádra jsou tištěna z materiálů, které se pro odstranění musí rozbít na malé části. K usnadnění tohoto procesu se jádro naleptá acetonem, čímž dojde ke zkřehnutí materiálu jádra. Tímto krokem se proces rozrušení jádrového materiálu zjednoduší. [6]



Obr. 7. Jádro po mechanickém odstranění. [6]

### 2.2.2 Rozpustná jádra

Rozpustná jádra jsou vytištěna z materiálů, které jsou rozpustné například ve vodě o teplotě 60 °C až 80 °C nebo ve speciálních vodních lázních, které obsahují látky urychlující proces rozpouštění jádra. Takovou látkou je například hydroxid sodný, což je velmi zásaditá anorganická sloučenina. Výhodou rozpustných jader, oproti jádrům, která se musí rozbíjet je eliminace rizika mechanického poškození kompozitního dílu, například poškrábáním. [6]



Obr. 8. Rozpustné jádro. [6]

### 2.3 Příklady aplikací 3D tisku u kompozitních dílů

Při výrobě kompozitních dílů se 3D tisk uplatňuje zejména u dutých dílů pro automobilový průmysl. V automobilovém průmyslu se jedná o díly do drahých sportovních vozů. Typickou aplikací je sací potrubí a potrubí vedoucí vzduch k turbodmychadlu.



Obr. 9. Kompozitní díly vyrobené s pomocí rozpustného jádra. [6]

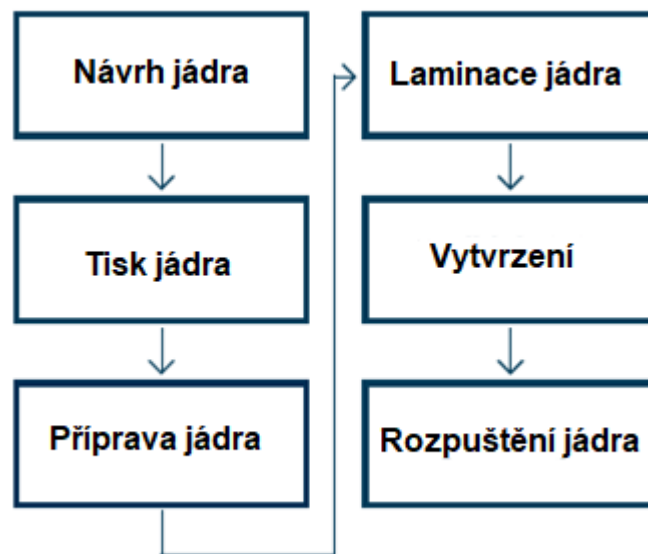
### 3. NÁVRH A VÝROBA KOMPOZITNÍCH STRUKTUR

#### 3.1 Návrh kompozitní struktury s využitím 3D tisku

Zahrnutí výroby jader do procesu výroby kompozitních dílů je relativně snadné a nepředstavuje žádné technologické komplikace. Před vytvrzením pryskyřice a odstraněním jádra jsou potřebné minimální úpravy standardně využívaného procesu. Vytvrzovací cyklus je nutno volit s ohledem na využití jádrové materiály. Teplotní rozsah při vytvrzování je tedy hlavním rozdílem při využití technologie 3D tisku a je nutné jej respektovat tak, aby nedošlo k deformaci nosného jádra a tím znehodnocení celé struktury součásti. Jedním z možných rozdílů v procesu výroby je možnost odstranění jádra po vytvrzení předimpregnovaných či jiných materiálů tvořících pevnou a trvalou strukturu jádra, případně hotové součásti. [9]

Jádro může být navrženo dvěma různými způsoby. Jedním ze způsobů je vytvoření objemového 3D modelu, a v softwaru 3D tiskárny se automaticky vytvoří vnitřní struktura, která minimalizuje objem použitého jádrového materiálu, využitím například voštinových struktur vně jádra. Druhou možností je použít způsob, při kterém je vytvořen model s vnitřní strukturou, která například formou žeber zajišťuje stabilitu, a tedy tuhost jádra. Jádrový materiál musí být schopen odolávat teplotám a tlakům používaných při vytvrzování. Při návrhu jádra je důležité optimalizovat spotřebu jádrového materiálu s ohledem na tuhost jádra, čas tisku a také čas potřebný k odstranění jádra. [9]

### 3.2 Postup tvorby kompozitní struktury s využitím 3D tisku



Obr. 10. Jednotlivé kroky výroby kompozitního dílu s použitím rozpustného jádra. [10]

#### 3.2.1 Návrh jádra

Prvním krokem při návrhu kompozitní struktury s využitím 3D tisku je vytvoření modelu jádra v CAD programu a jeho uložení ve správném formátu (STL).

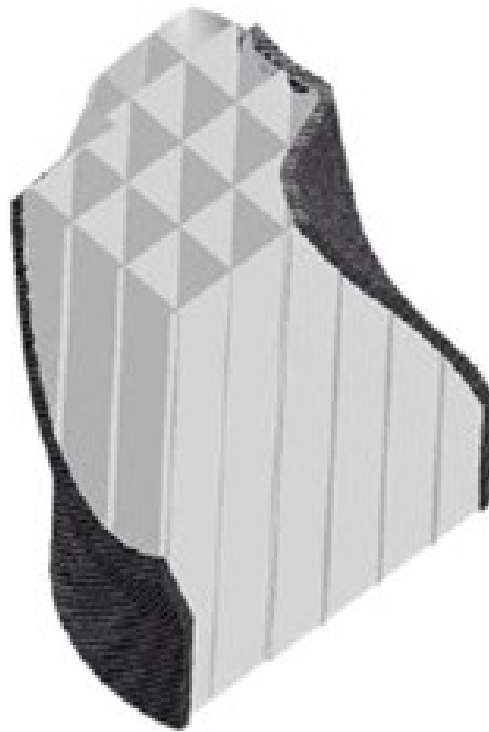


Obr. 11. 3D model jádra. [7]

#### 3.2.2 Nastavení parametrů tisku

Takto vytvořený model se otevře v softwaru tiskárny, kde dochází k nastavení procesních parametrů. Mezi tyto parametry patří například nastavení rastru vzduchových mezer,

nastavení tloušťky stěn a nastavení pohybů tiskové hlavy. Po nastavení všech parametrů je možné odeslat data do 3D tiskárny.



*Obr. 12. Nastavení parametrů tisku. [7]*

### 3.2.3 Tisk jádra

Po nastavení všech parametrů je možné začít tisknout. Tisk je nejdelsí částí procesu. Trvá v řádu několika hodin.



*Obr. 13. Vytištěné jádro. [10]*

### 3.2.4 Příprava jádra

Po vyčištění se provádí příprava jádra k laminaci. Příprava spočívá v dobroušení detailů a nanášení vrstev separátoru. Při požadavku na vnitřní pohledové plochy součásti je možno povrchové plochy jádra dále upravovat pomocnými materiály, pomocí kterých lze docílit hladké pohledové plochy. Mezi tyto materiály patří hmoty sloužící pro vyplnění vzniklých pórů a dutin v jádru.



Obr. 14. Příprava jádra. [10]

### 3.2.5 Laminace

Na jádro se co nejpečlivěji umístí materiál výztuže. Lze použít předimpregnované materiály, tkaninu, případně vlákna ve formě punčoch či jiných standardně využívaných polotovarech. Jednotlivá vlákna je možno na vytisknuté jádro rovněž navinout. Dále se na jádro umístí pomocné materiály a díl se zabalí do vakuovací fólie. Pomocnými materiály jsou separační fólie, odsávací rohož a v některých případech také strhávací tkanina.



Obr. 15. Laminace jádra. [7]



Obr. 16. Příprava na vytvrzení. [7]

### 3.2.6 Vytvrzení

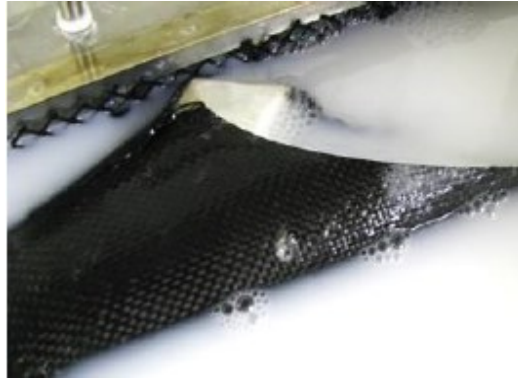
Při vytvrzování je velmi důležité správné nastavení vytvrzovací teploty, tlaku a času. Teploty se pohybují v rozmezí 80 – 120 °C s tlaky kolem 500 kPa v závislosti na vlastnostech použitého materiálu jádra. Vytvrzovací časy se pohybují podle zvolené vytvrzovací teploty a výrobní technologie v rozmezí několika desítek minut až několika hodin. Tyto parametry musí být voleny tak, aby nedošlo k poškození jádra, a tím ke znehodnocení celého dílu. Parametry vytvrzování jsou voleny s ohledem na materiálové listy dodávané jejich výrobcem.



Obr. 17. Vytvrzení v autoklávu. [7]

### 3.2.7 Rozpuštění jádra

Rozpuštění jádra je posledním krokem výrobního procesu. Rozpuštění se provádí ve vodě nebo vhodných vodných roztocích. Po rozpuštění jádra získáme výsledný dutý kompozitní díl.



*Obr. 18. Rozpouštění jádra. [7]*

### 3.2.8 Hotový díl

U hotového dílu se po odstranění jádra provádí začištění hran a případných přetoků pryskyřice. K začišťování se používají smirková plátna o různých zrnitostech. Pokud je potřeba, tak se do dílu vyvrtají, nebo vyřežou požadované otvory. Další možností úprav je vložení nebo vlepení například kovových insertů. Poslední možností úprav je možnost díl vyleštit, případně nalakovat.



*Obr. 19. Kompozitní díl po odstranění jádra. [10]*



### 3.3 Výroba kompozitních struktur

Pro kompozitní struktury existuje mnoho výrobních technologií, které lze pro výrobu použít. Výrobní technologií lze ovlivnit výsledné vlastnosti struktur. Jedná se především o vlastnosti jako jsou tuhost, pevnost, houževnatost a tepelná odolnost. Tyto vlastnosti ovlivňují zejména použité materiály, jejich obsah a rozmístění ve výztuži struktury. Volba výrobní technologie, také ovlivňuje náklady na výrobu a cenu finálního produktu. Proto je zvolení vhodné technologie výroby velmi důležitým krokem. [11]

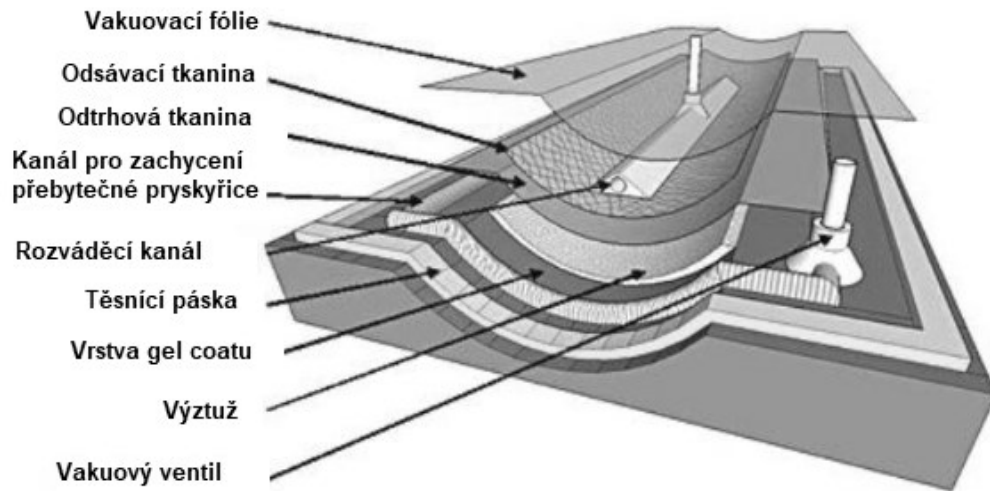
Při použití jader z termoplastických materiálů je při sestavování vytvrzovacího programu nutné zohlednit vlastnosti zvoleného materiálu jádra a použité pryskyřice. Musí být zajištěno, že při vytvrzování nedojde k deformaci jádra, a tím ke znehodnocení výsledného dílu. Obecně platí, že kompozitní díly s jádry se vytvrzují při teplotách do 120 °C a tlacích do 600 kPa. Omezení vytvrzovacích teplot má za následek prodloužení vytvrzovacích časů (Tab. 5).

Tab. 5. Vytvrzovací časy v závislosti na vytvrzovací teplotě. [12]

Vytvrzovací teplota	85 °C	90 °C	100 °C	120 °C	140 °C
Vytvrzovací čas	720 min	360 min	120 min	60 min	30 min

#### 3.3.1 Vakuová infuze

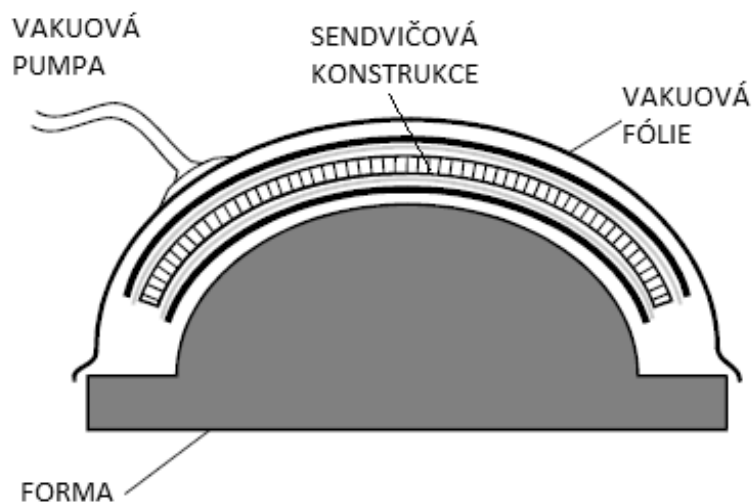
Jedná se o technologii, která k prosycení jednotlivých suchých vrstev kompozitní struktury využívá podtlaku. Do formy se postupně začínou vkládat jednotlivé vrstvy, z kterých je struktura složena. Poté se na sestavenou strukturu umístí další technologické materiály. Mezi tyto technologické materiály patří separační fólie, odtrhová tkanina, odsávací tkanina a rozváděcí tkanina. Nakonec se umístí vakuová fólie, která se pomocí těsnící pásky přichytí k okraji formy. Vytvrzení pryskyřice probíhá v prostředí o teplotě okolního vzduchu. [13]



Obr. 20. Schéma vakuové infuze.

### 3.3.2 Vytvrzování v peci pomocí vakua

Při této technologii se vytvoří kompozitní struktura, která se následně umístí do formy. Forma má tvar, který odpovídá tvaru finálního výrobku. Do formy jsou vloženy všechny vrstvy struktury a pomocné materiály. Poté se na okraj formy pomocí těsnící butylkaučukové pásky přichytí vakuová fólie a forma se vloží do vyhřívané pece. [13]



Obr. 21. Vytvrzování v peci pomocí vakua.

### 3.3.3 Vytvrzování v autoklávu

Autokláv je vyhřívaná tlaková nádoba, která díky přesnému řízení teplot a tlaků umožňuje vytvrzení kompozitních materiálů. U této technologie se jako vnější vrstvy používají prepregy. Nejdříve se na jádro uloží všechny vrstvy prepregu s pomocnými materiály. Poté se díl vloží do autoklávu a provede se evakuace podtlakem, následně se hodnota tlaku zvýší. Po vyhřátí autoklávu na požadovanou teplotu začne docházet k vytvrzování pryskyřice. Vlivem zvýšeného tlaku v autoklávu dochází k přitisknutí jednotlivých vrstev a tím k jejich pevnému spojení. [14]

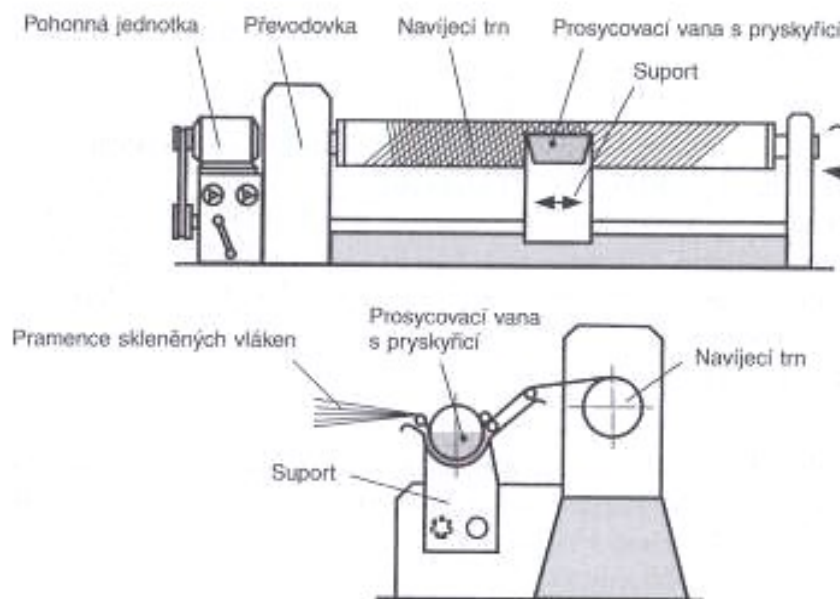


*Obr. 22. Vytvrzování v autoklávu. [15]*

## 4. TECHNOLOGIE VÝROBY DUTÝCH KOMPOZITNÍCH DÍLŮ

### 4.1 Navíjení

Jedná se o technologii, kterou se vyrábějí dutá tělesa, která jsou symetrická k ose otáčení. Nejčastěji se jedná o roury, nádrže, tlakové zásobníky a jednoduché prvky, jako například kardanové hřídele a listová pera. Je to mechanizovaná tvářecí technologie, která se vyznačuje vysokou přesností a reprodukovatelností. Při navíjení dochází ke spojení pohybu rotujícího trnu s dopředným a zpětným pohybem suportu. Tím je umožněno ukládat pramence prosycené pryskyřicí na trn podle navíjecího vzoru. Navíjet je možné i tkaniny nebo rohože. Navíjecí jádra nebo trny mohou být jednodílné, nebo skládací. Z důvodu snadného snímání těles bývají jednodílné trny vyrobeny s malým úkošem. [14]

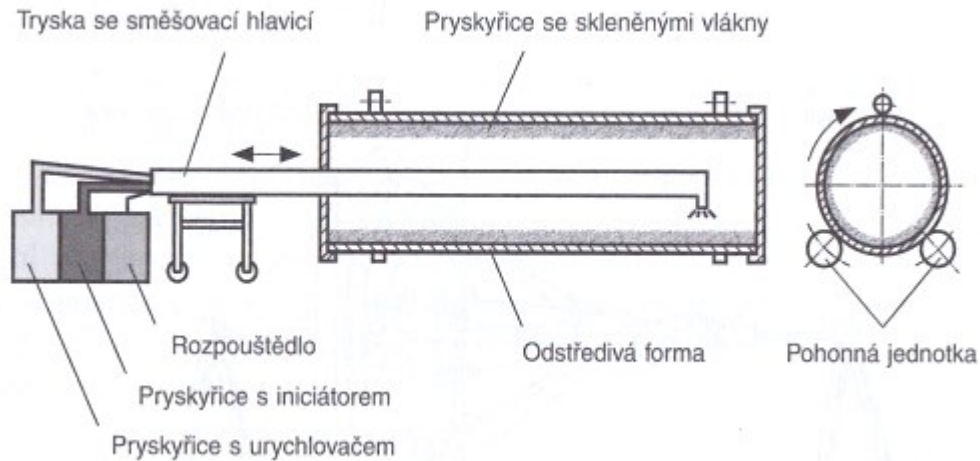


Obr. 23. Technologie navíjení. [14]

### 4.2 Odstředivé lití

Touto technologií je možné vyrábět velká rotačně symetrická tělesa s vnějším hladkým povrchem. Výztuž se do formy vkládá předem, nebo se nanáší tryskou umístěnou na zasouvacím rameni společně s pryskyřicí. Protože skleněná vlákna mají vyšší měrnou hmotnost než pryskyřice, dochází vlivem působení odstředivé síly ke vzniku dutého tělesa. Takto vzniklé těleso má ve vnější vrstvě vyšší obsah výztuže a ve vnitřní vrstvě vyšší

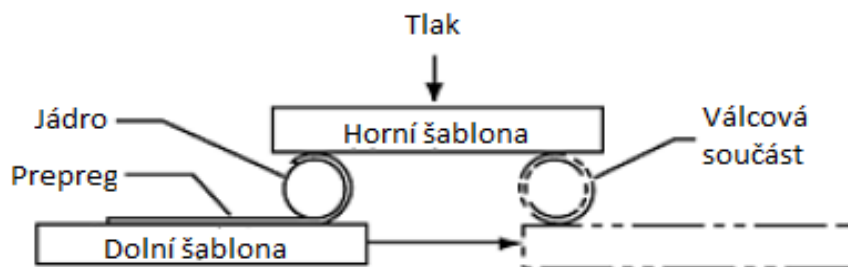
obsah korozně odolnějšího pojiva. Zejména proto jsou roury vyrobené touto technologií vhodné pro dopravu agresivních médií. [14]



Obr. 24. Technologie odstředivého lití. [14]

### 4.3 Tube Rolling

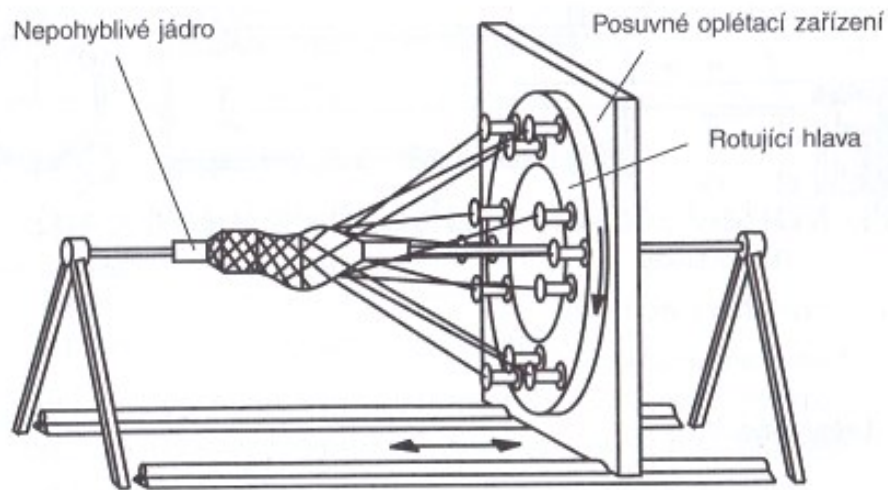
Je to nejpoužívanější způsob výroby kompozitních válcových nebo kuželových trubek, u kterých je požadována vysoká pevnost, nízká hmotnost a vysoká produktivita výroby. Vrstvy tkaninového nebo jednosměrného prepregu, které jsou upraveny podle šablony, se položí na rovný povrch a pod tlakem naválí na jádro, poté dochází k vytvrzení ve vytvrzovací peci. Po vytvrzení je jádro odstraněno a součást zkrácena na požadovanou délku. Vnější povrch součásti je obroušen a může být i nalakován. Mezi výhody této metody patří vysoká produktivita a velmi kvalitní vnější povrch. Nevýhodou je vyšší cena materiálů a omezení velikosti výsledného dílu (průměr 0,76 – 609 mm, délka maximálně 7,3 m). Typickými výrobky jsou golfové hole, rybářské pruty nebo lyžařské hůlky. [11]



Obr. 25. Technologie tube roling. [11]

## 4.4 Oplétání

Tato technologie byla převzata z textilního průmyslu. Je to technologie výrobně velmi náročná a vyžaduje vysoké investiční náklady. Vyztužující vlákna se z posuvného oplétacího zařízení pokládají pomocí rotující hlavy na nepohyblivé jádro. Tím se na jádru vytvoří tkaná struktura, která se podobá tkanině. K prosycení vláken se nejčastěji používá technologie RIM. Touto technologií je možné vyrábět složitá tělesa, jako například kolena rour s proměnným průřezem. Dalším příkladem jsou tenisové rakety, u nichž je držadlo i rám vyrobeno z hybridu skleněných a uhlíkových vláken. [14]



Obr. 26. Technologie oplétání. [14]

## II. PRAKTICKÁ ČÁST

## 5. CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce bylo navrhnout, vyrobit a otestovat kompozitní struktury s odlišným průřezem a různou skladbou vrstev výztuže. K výrobě bude využito jádro vyrobené technologií 3D tisku. Tištěná jádra pro výrobu kompozitních struktur demonstrují universálnost technologie při potřebě rychlého ověření zvoleného typu průřezu jednotlivých profilů. Dalším cílem je návrh upínacího přípravku pro zkoušku krutem, který by bylo možno využít u jednotlivých navrhnutých profilů. Bude provedeno více návrhů přípravku, které se od sebe budou lišit v řešení upnutí zkušební vzorku. Posledním cílem je navrhnout součást, při jejíž výrobě by bylo možné využít jádro vytištěné na 3D tiskárně a technologický postup při její výrobě.

### Cíle práce v bodech:

- návrh průřezů jader,
- tisk jader,
- výroba zkušebních těles,
- mechanické testování zkušebních těles,
- návrh upínacího přípravku pro zkoušku krutem,
- návrh součásti a technologického postupu výroby součásti využívající podporu tisknutého jádra.

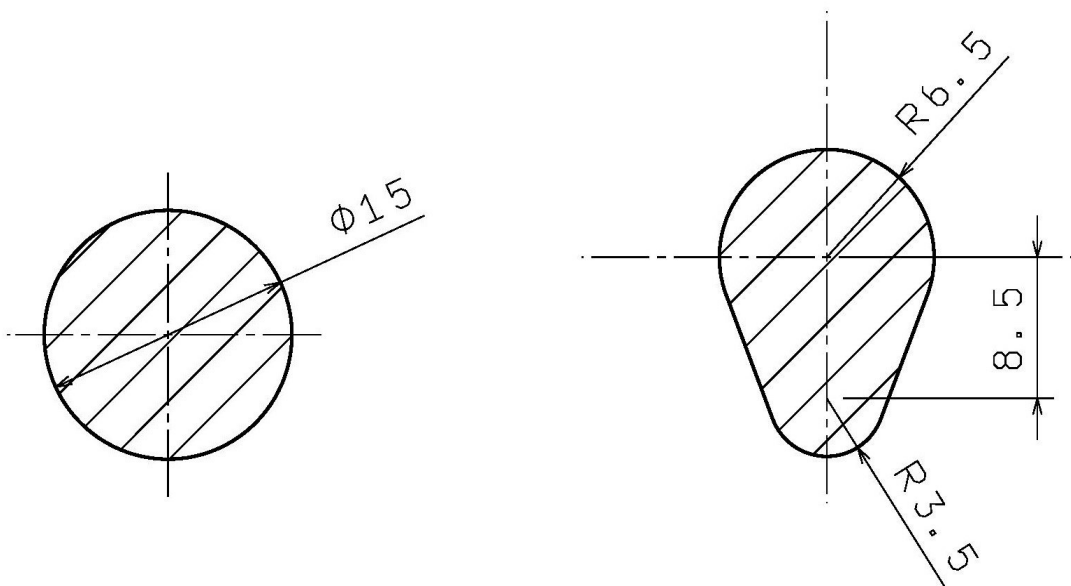


## 6. VÝROBA JADER

Výroba jednotlivých jader byla odkázána na potřebu využívat tyto materiály v nových technologických aplikacích určených především pro sektor dopravního průmyslu. V tomto sektoru je stále běžnější, že jsou konvenčně využívané profily, sloužící například pro propojení jednotlivých součástí, nahrazovány novými materiálovými skladbami. Nové poznatky umožňují mimo úspory hmotnosti také zlepšení jednotlivých požadovaných vlastností na vyráběné součásti.

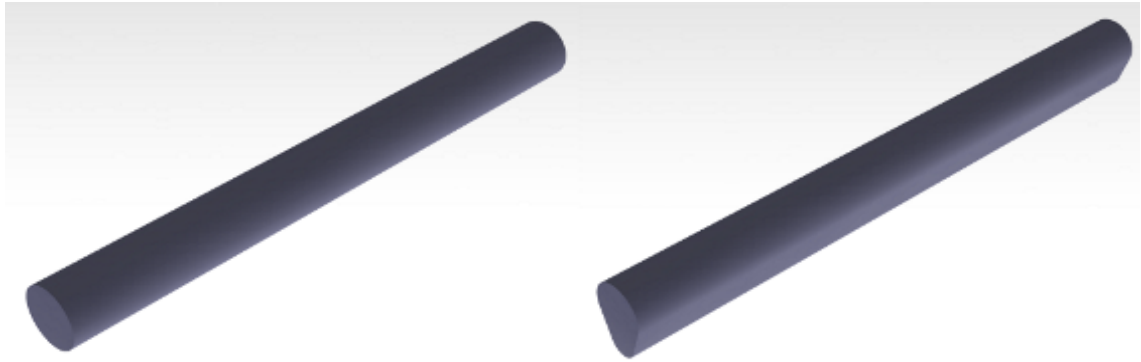
### 6.1 Návrh průřezů

Prvním krokem při výrobě jader bylo navržení jejich průřezů. Byly navrženy dva základní průřezy. Jedním z těchto průřezů je průřez ve tvaru kruhu, druhý ve tvaru vačky. Profily byly navrženy takovým způsobem, aby měly přibližně shodný obsah v průřezu. Obsah pro průřez ve tvaru kruhu byl  $1,76 \text{ cm}^2$  a pro průřez tvaru vačky  $1,767 \text{ cm}^2$ .



Obr. 27. Průřezy jader (vlevo průřez kruh, vpravo průřez vačka).

Po navržení průřezů byly v programu *CATIA V5* vytvořeny 3D modely jader o délce 170 mm. Tyto modely byly uloženy ve formátu STL a předány k vytištění.



*Obr. 28. 3D modely jader (vlevo průřez kruh, vpravo průřez vačka).*

## 6.2 Tisk jader

Pro tisk jader byla použita 3D tiskárna Stratasys Dimension SST 768. Jedná se 3D tiskárnu pracující na principu FDM. Tato tiskárna tiskne pouze filament z materiálu ABS, proto byl jako materiál jader zvolen tento druh polymeru. Volba tiskárny byla podmíněna strojním vybavením Ústavu výrobního inženýrství Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně.

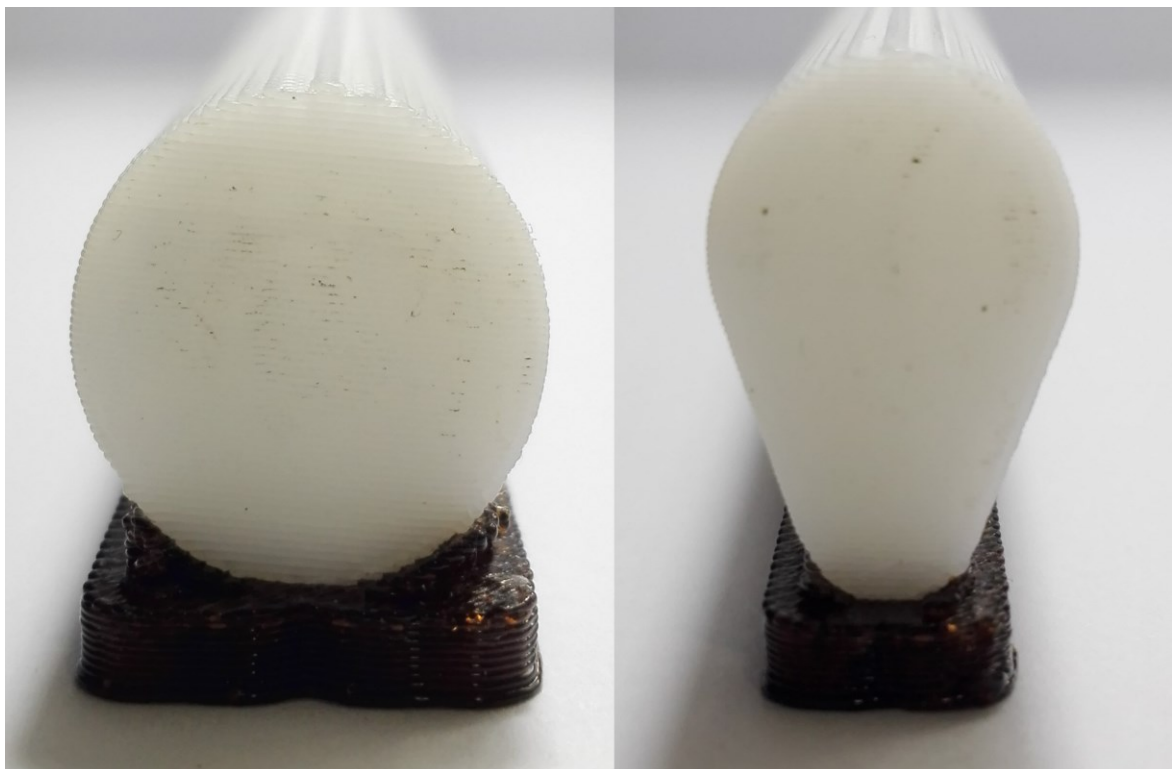


*Obr. 29. 3D tiskárna Stratasys Dimension SST 768.*

Tab. 6. Technické parametry 3D tiskárny Stratasys Dimension SST 768.

<b>Pracovní prostor: (x, y, z)</b>	200 x 200 x 250 mm
<b>Velikost vrstvy:</b>	0,254 mm
<b>Materiál:</b>	ABS

Pro úsporu materiálu byla vnitřní struktura jader tisknuta jako voština. Parametry voštiny a podpor byly automaticky nastaveny v softwaru *CatalystEX* dodávanému společně s tiskárnou. Podpory byly vytištěny z materiálu, který lze po dokončení tisku snadno oddělit od požadované součásti. Jako materiál podpor byl použit materiál HIPS, což je houževnatý polystyren. K odstranění podpor v tomto případě nebylo potřeba žádné nářadí, stačila pouze malá síla a podpora byla odloupnuta rukou.

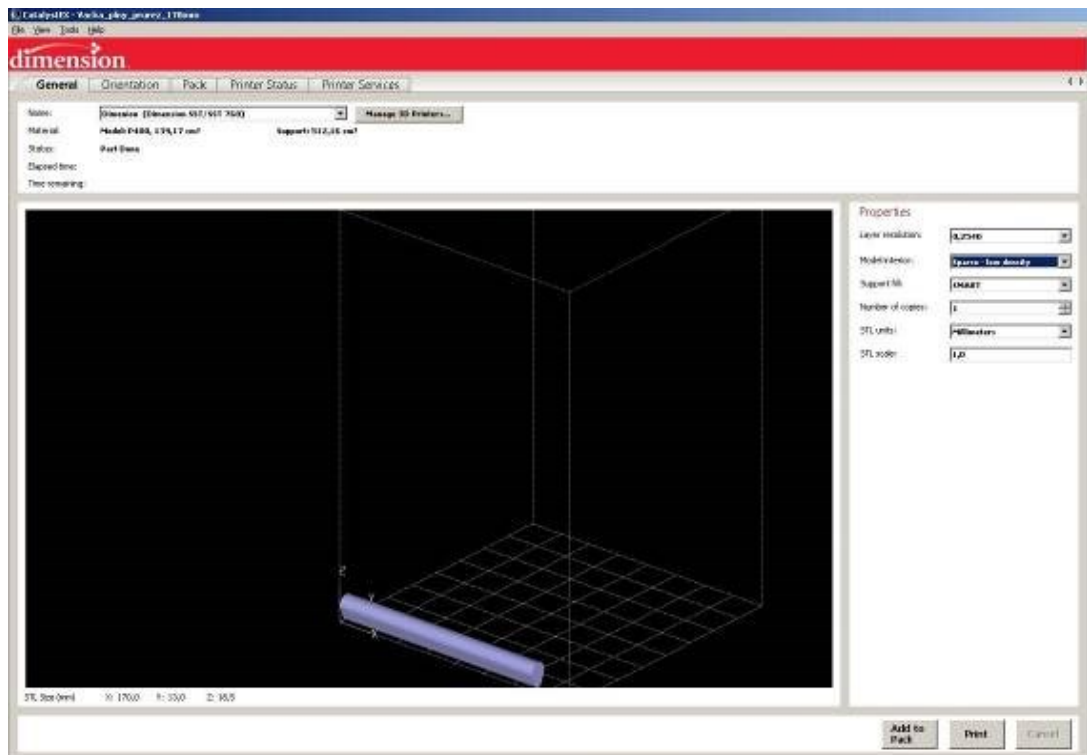


Obr. 30. Jádra (bílé) s podporou (černé) vlevo pro průřez kruh, vpravo pro průřez vačka.



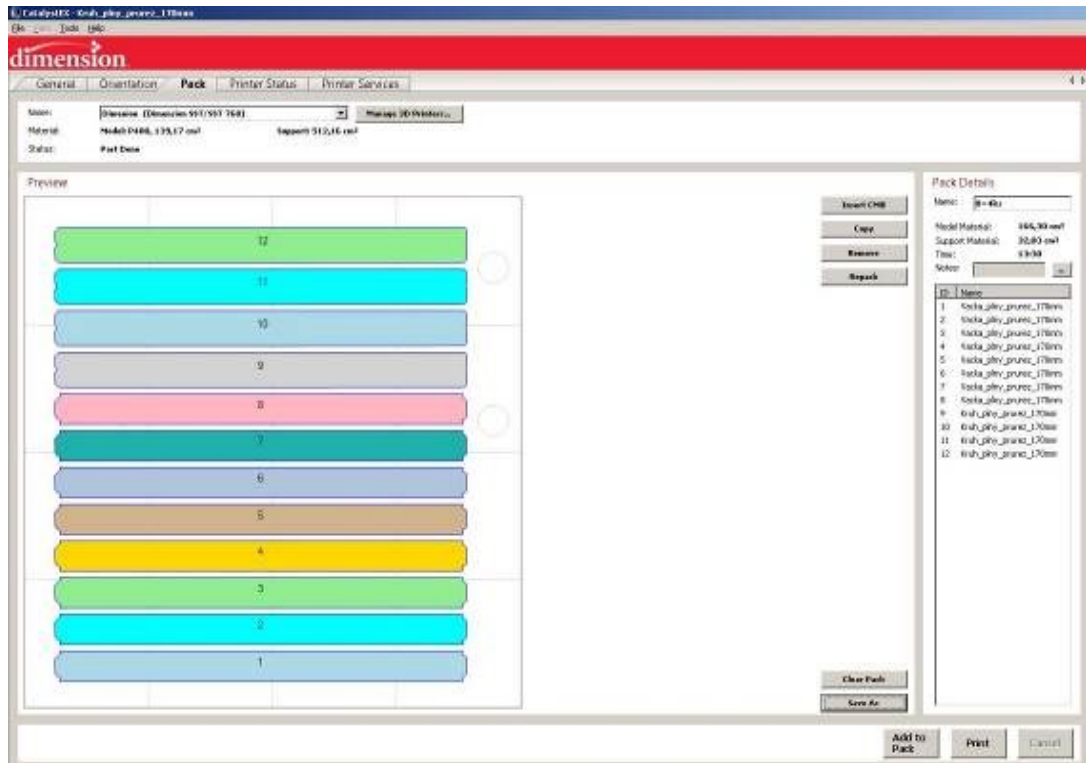
Obr. 31. Detailní pohled na řez strukturou voštiny.

Na obrázcích níže (Obr. 32 a Obr. 33) je znázorněno prostředí programu *CatalystEX*, ve kterém probíhalo nastavení procesních parametrů. Na obrázku (Obr. 32) je zobrazeno nastavení vlastností jako jsou velikost vrstvy, výběr podpor, nastavení voštiny a měřítka.



Obr. 32. Snímek obrazovky programu *CatalystEX* – nastavení parametrů tisku.

Na obrázku (Obr. 33) je zobrazeno rozložení jednotlivých jader na tiskové podložce. Na tomto obrázku je také zobrazen potřebný objem materiálů. Další informací na tomto obrázku je zobrazení času, který je potřebný k vytištění. Pro vytištění osmi jader vačkového a čtyř jader kruhového průřezu bylo potřeba 166,3 cm<sup>3</sup> materiálu ABS, ze kterého jsou vytištěna jádra a 33,03 cm<sup>3</sup> materiálu HIPS, ze kterého jsou vytištěny podpory. Celkový čas tisku pro těchto dvanáct jader dosahoval 13 hodin a 30 minut.



Obr. 33. Snímek obrazovky softwaru CatalystEX – rozvržení dílů na tiskové podložce.

## 7. VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

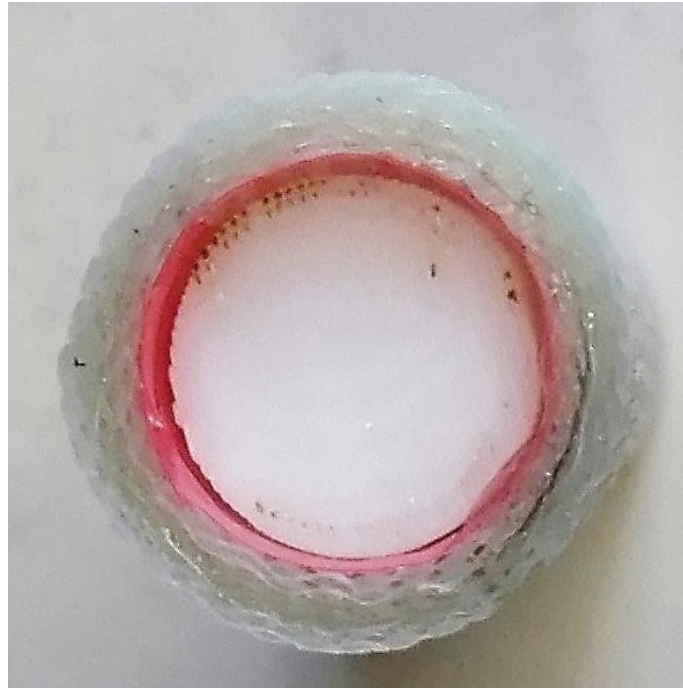
Jelikož je výroba kompozitních struktur využívající předimpregnované materiály složitou operací vyžadující poměrně velké praktické zkušenosti plynoucí z experimentální práce s těmito materiály, byly jednotlivé postupy použité při výrobě zkušebních těles upravovány takovým způsobem, aby výsledný postup plně odpovídal materiálovým a technologickým požadavkům.

### 7.1 Zkušební postup výroby 1.

Prvotním plánem bylo vyrobit zkušební tělesa pomocí technologie vakuového lisování prepregů. Jako materiál výztuže byl použit jednosměrný prepreg ze skelných vláken s epoxydovou matricí DT806. Postup výroby spočíval v obalení jádra separační fólií. Separací fólie byla do struktury přidána kvůli usnadnění pozdějšího odformování jádra od materiálové skladby profilu. Poté byly na separační fólii ukládány jednotlivé vrstvy výztuže. Počet vrstev výztuže byl stanoven tak, aby výsledná tloušťka stěny byla 2 mm. To při udávané tloušťce jedné vrstvy 0,28 mm odpovídalo celkem osmi vrstvám. Tento údaj je definován výrobcem materiálu. Zvolený počet vrstev nebylo možné dodržet, jelikož na malém jádru nebylo možné vrstvy výztuže uložit takovým způsobem, aby nedocházelo ke vzniku vzduchových bublin. Následkem vzduchových bublin by bylo nedokonalé stlačení jednotlivých vrstev, což by mělo za následek geometrickou nepřesnost průřezu. Proto byly vyrobeny dvoudílné formy sloužící k zafixování přesného tvaru profilu.



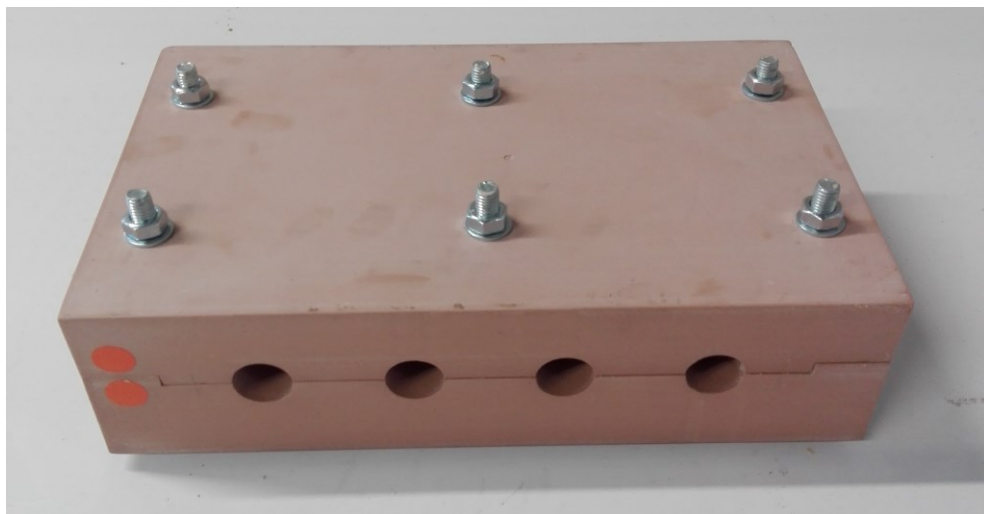
*Obr. 34. Jádro obalené separační fólií.*



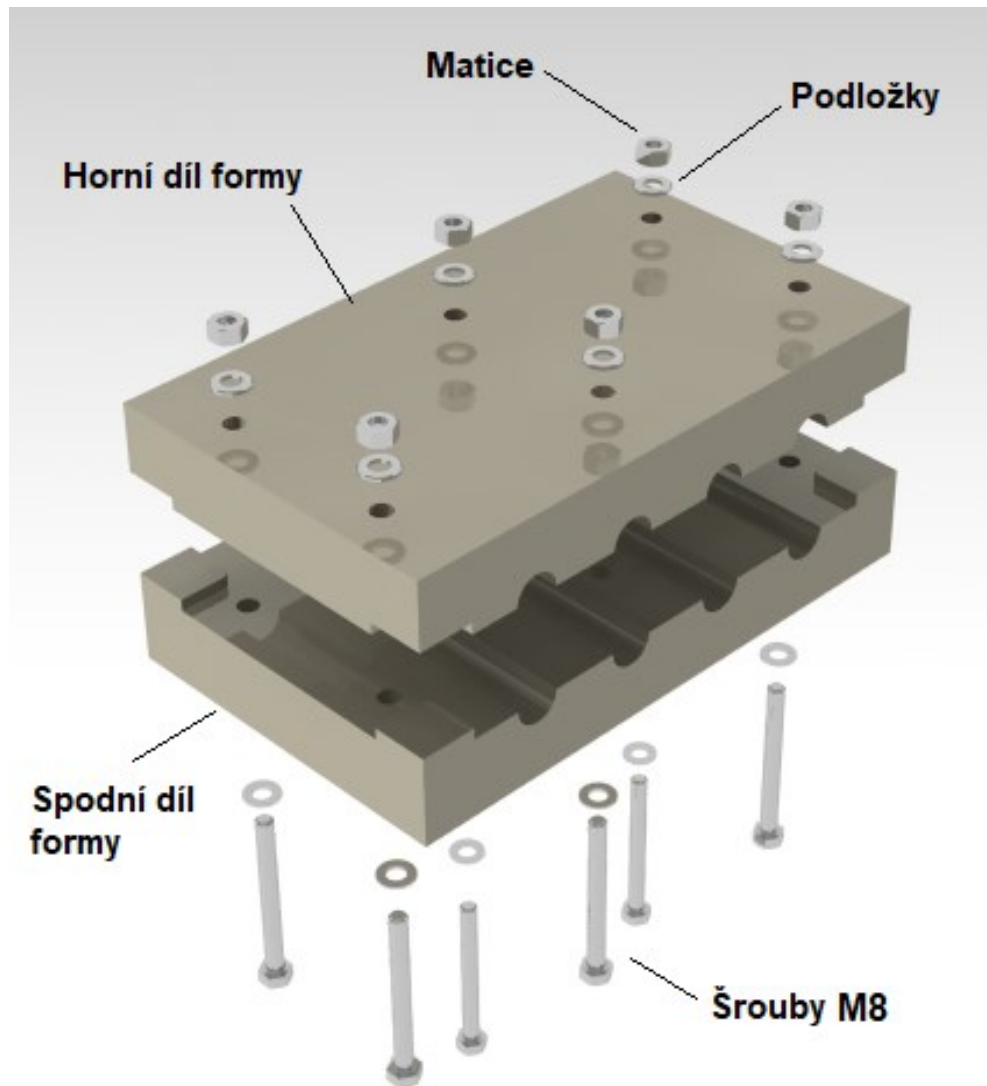
*Obr. 35. Znárodnění špatného uložení vrstev.*

## 7.2 Výroba forem

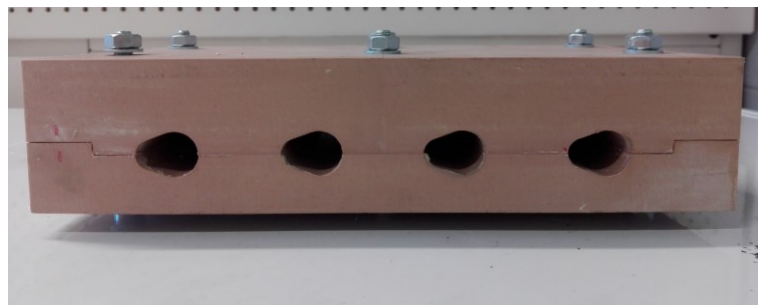
Pro výrobu forem byly v programu *CATIA V5* vytvořeny parametrické modely dvoudílných forem pro oba dva zvolené průřezy zkušebních těles. Formy byly navrženy s tvarovými zámky, které zajistí přesné lícování spodní a horní poloviny formy. Pro pevné spojení obou polovin formy bylo navrženo spojení pomocí šesti šroubů s podložkami a maticemi. Po dokončení návrhu byly formy vyrobeny v dílnách Ústavu výrobního inženýrství.



*Obr. 36. Hotová forma pro kruhový průřez.*



Obr. 37. Model formy pro průřez ve tvaru kruhu.



Obr. 38. Hotová forma pro vačkový průřez.

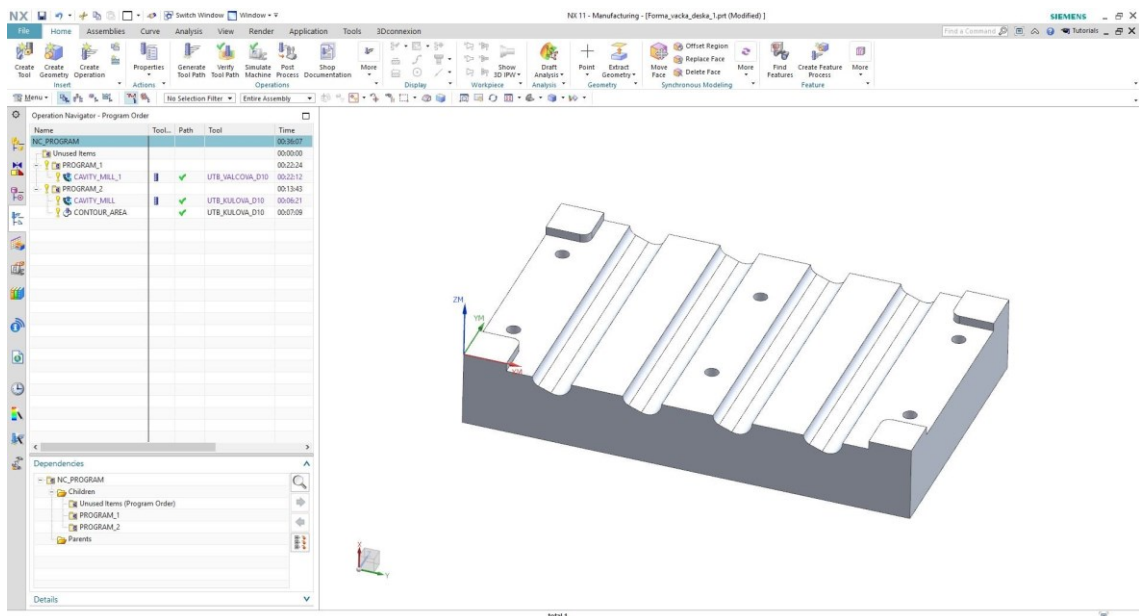
Výroba dvoudílné formy probíhala na CNC stroji AZK HWT C-442. Jako materiál forem byl zvolen Necuron, známý také pod názvem „umělé dřevo“, který byl dostupný



v univerzitních dílnách. Jedná se o polyuretanový materiál, který je snadno a rychle strojně opracovatelný. S tepelnou odolností do 120 °C byl tento materiál vhodným pro použití i při standardních vytvrzovacích programech pro předimpregnované materiály.

### 7.2.1 Postup výroby forem

Aby mohli být formy vyrobeny bylo potřeba vytvořit programy pro CNC stroj. Pro vytvoření těchto programů byl použit software *NX 11*. Po importu vytvořených modelů forem bylo provedeno vytvoření obráběcího programu. K vytvoření tohoto programu byla využívána operace cavity mill, což je operace používaná zejména pro základní úběr třísky a operace contour area, což je operace vhodná pro odstranění zbytkového materiálu.

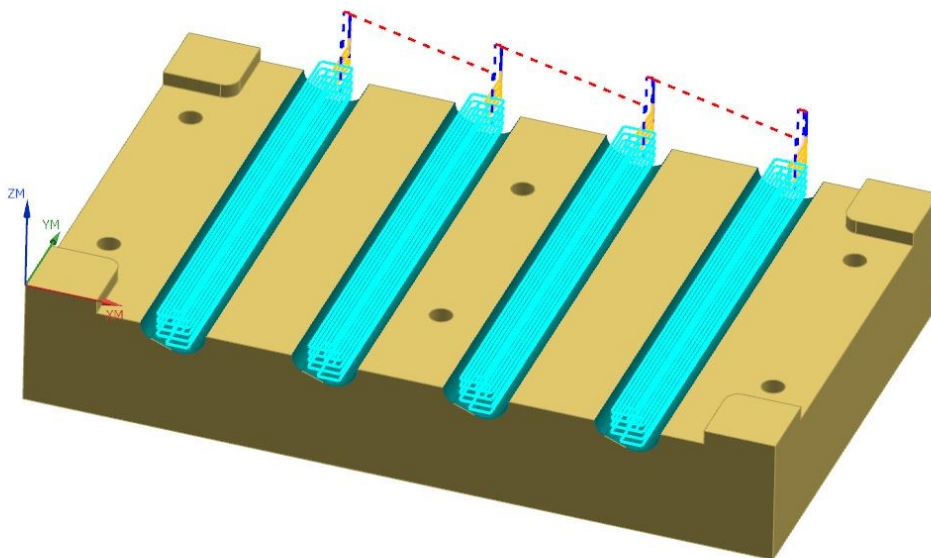


Obr. 39. Model spodní poloviny formy načtený v programu NX.

Pro obrábění rovinných ploch byla použita válcová fréza o průměru 10 mm s označením Jabro 93L100 od výrobce nástrojů Seco. Pro tuto část obrábění prováděnou operací cavity mill, kterou se běžně provádí hrubování byly vzhledem k vlastnostem použitého materiálu nastaveny parametry, jakými jsou velikost záběru frézy a velikost maximálního možného úběru materiálu v jednom kroku. Velikost záběru frézy byla nastavena na hodnotu 40 % průměru nástroje a maximální velikost úběru byla 3 mm. Dále byla nastavena také

maximální hloubka, do které bude materiál obráběn. Tato hloubka byla nastavena na hodnotu 40 mm a její nastavení je důležité zejména pro bezpečné upnutí polotovaru.

Po obrobení rovinných ploch bylo možné přistoupit k hrubování tvarových dutin. Hrubování těchto dutin bylo prováděno opět pomocí operace cavity mill, s tím rozdílem, že byla použita kulová fréza o průměru 10 mm s označením Jabro 97102 od výrobce Seco a byla změněna velikost záběru frézy na 50 % průměru nástroje. Po vyhrubování tvarových dutin bylo provedeno dokončovací obrábění. K zaručení přesného obrobení tvarových dutin byla použita operace contour area, která je vhodná pro dokončování tvarových ploch. Pro tuto operaci bylo použito stejné nastavení jako v předchozím kroku.



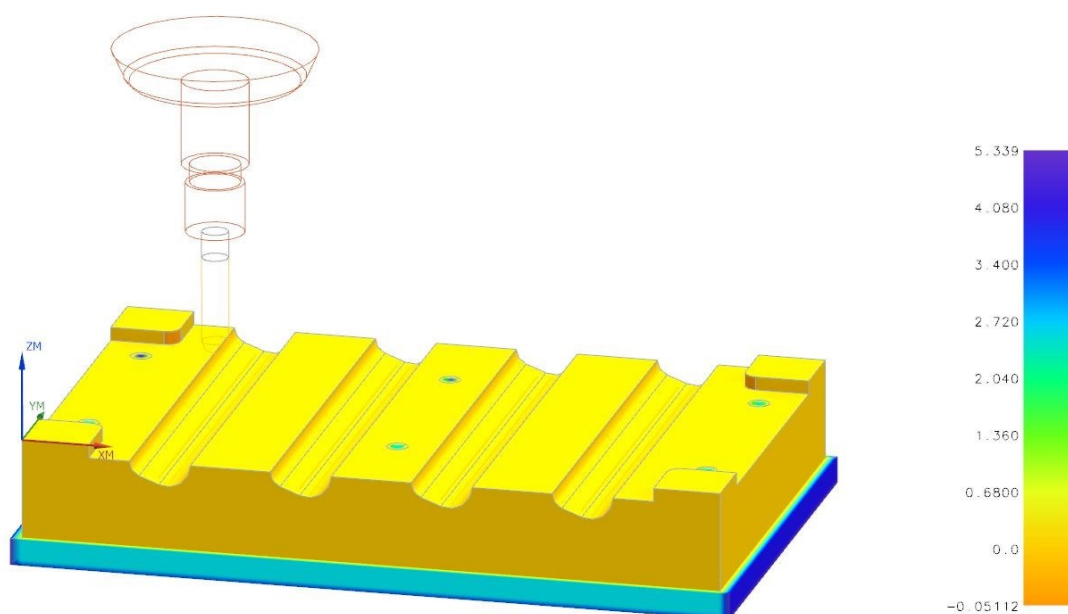
*Obr. 40. Vygenerované dráhy nástroje při hrubování tvarových dutin.*

Po dokončení těchto operací byla spodní polovina formy otočena a bylo provedeno obrobení horní plochy. Posledním krokem bylo vyvrtání otvorů pro šrouby. Vyvrtání bylo prováděno dodatečně na sloupové vrtačce Optimum B40 GSM.

Výše popsany postup byl použit při výrobě obou polovin formy, a to jak pro formu s dutinou tvaru vačky, tak pro formu s dutinou ve tvaru kruhu.

Tab. 7. Parametry sloupové vrtačky Optimum B40 GSM.

<b>Pracovní stůl:</b>	560 x 560 mm
<b>Otáčky:</b>	40 – 450 ot./min
<b>Počet rychlostních stupňů:</b>	18
<b>Max. průměr vrtáku (ocel):</b>	35 mm



Obr. 41. Výsledek simulace obrábění v programu NX.

Tab. 8. Parametry CNC stroje AZK HWT C-442 CNC.

<b>Otáčky vřetene:</b>	2000 – 25000 ot./min
<b>Pracovní prostor:</b>	400 x 400 x 200 mm
<b>Max. rychlost posuvu:</b>	3000 mm/min
<b>Programovatelný krok:</b>	0,00625 mm



*Obr. 42. Proces výroby formy na CNC stroji.*

### **7.3 Zkušební postup výroby 2.**

Po vyrobení forem byla jádra obalena do separační fólie, na kterou bylo uloženo osm vrstev výztuže. Nicméně i při co nejpečlivějším ukládání vrstev výztuže docházelo ke vzniku vzduchových bublin, které znemožňovaly uzavření forem. Proto bylo provedeno zkušební zavakuování jader, aby došlo ke stlačení vrstev a následnému bezproblémovému uzavření forem. Pomocí vakua sice bylo dosaženo stlačení vrstev, ale také došlo ke vzniku míst s nahromaděným materiálem (*Obr. 45*), který opět bránil uzavření formy. Nepřesné stlačení materiálu bylo způsobeno typem fólie a pomocným materiálem podporujícím odvod vzduchu ze struktury materiálu. Vzniklé vady by bylo možné eliminovat použitím například teplem smrštitelné fólie, kterou by byl materiál obalen a na materiál by tak

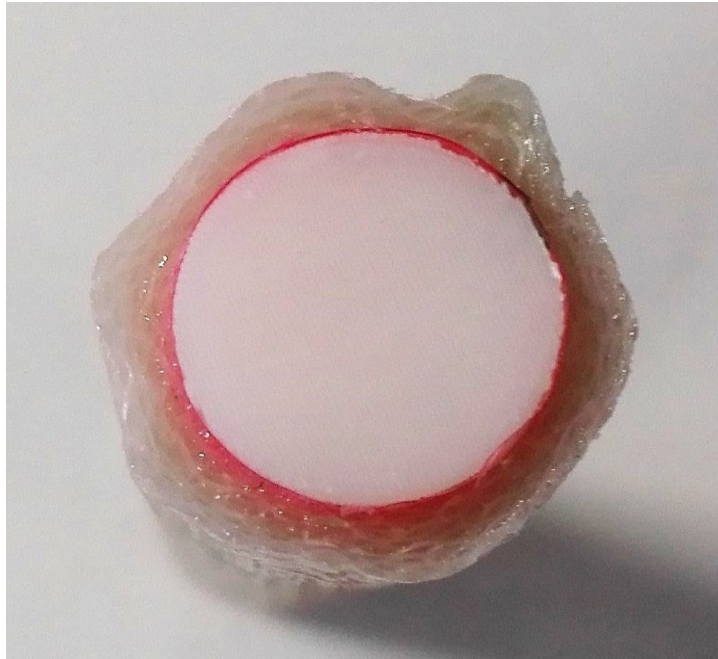
v celém obvodu působila stejná síla vyvolaná smrštěním fólie. V kombinaci s přesnějším a také pečlivějším ukládáním jednotlivých vrstev by mohlo být docíleno lepších výsledků. Tento experiment nebyl ověřen z důvodu nedostupnosti právě tohoto typu fólie. Jedním z důvodů nedokonalého kladení vrstev materiálů je také náročnost celé operace. Kvůli této skutečnosti bylo rozhodnuto snížit počet vrstev výztuže z osmi na šest. Tato hodnota sice neodpovídá doporučení výrobce, avšak pro účely zaformování není nijak omezující. Pro jednotlivé profily bude totiž počet vrstev stejný.



*Obr. 43. Zkušební vzorky před působením vakua.*



*Obr. 44. Zkušební vzorky během působení vakua.*



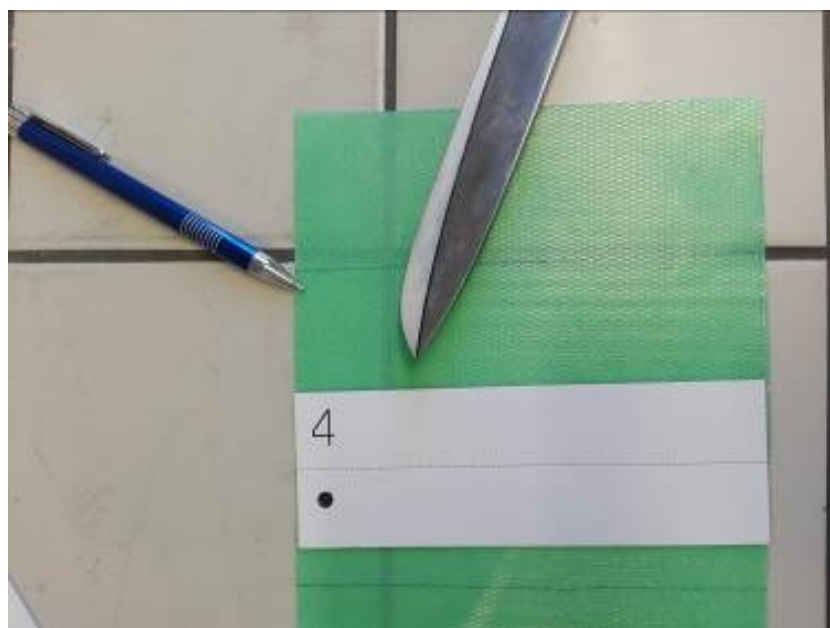
*Obr. 45. Zkušební vzorek po působení vakua.*

#### **7.4 Postup výroby zkušebních těles**

Po ověření bezproblémového uzavření forem byly navrženy typy skladeb zkušebních těles. Pro každý průřez byly navrženy dva typy skladeb, které se lišily postupem výroby a umístěním spojů výztuže. Pro co nejpřesnější ukládání vrstev výztuže byly vytvořeny šablony, podle kterých byly nastříhány jednotlivé vrstvy. K nastříhání bylo využito nůžek a při ukládání materiálu výztuže byly použity rukavice. Pro co nejjednodušší vyjmutí vytvrzených vzorků byly všechny části forem důkladně ošetřeny separačním voskem Oskar's M700/C-WAX v celkem třech vrstvách s intervalem mezi vrstvami 15 minut. Dále byly formy po každém vytvrzovacím cyklu důkladně očištěny a znovu ošetřeny separačním voskem. Celkem bylo vyráběno osm kusů vzorků pro každou skladbu a typ průřezu, což znamená celkem 32 kusů zkušebních vzorků.

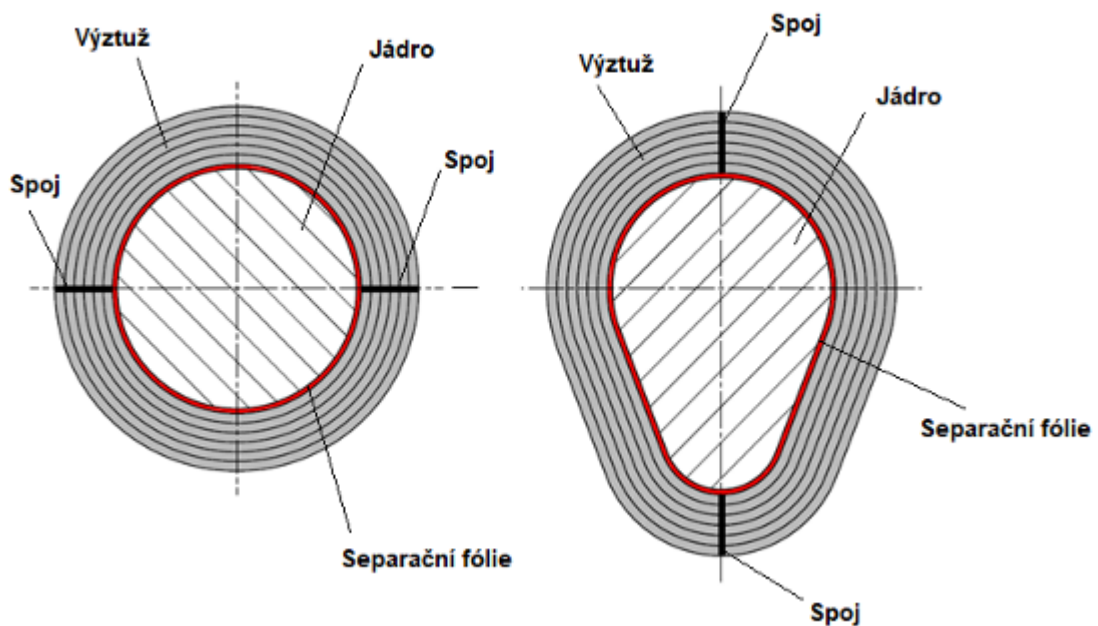


*Obr. 46. Použitý separační vosk.*



*Obr. 47. Stříhání materiálu výztuže podle šablony.*

## 7.4.1 Zkušební tělesa Typ 1. (6 vrstev)



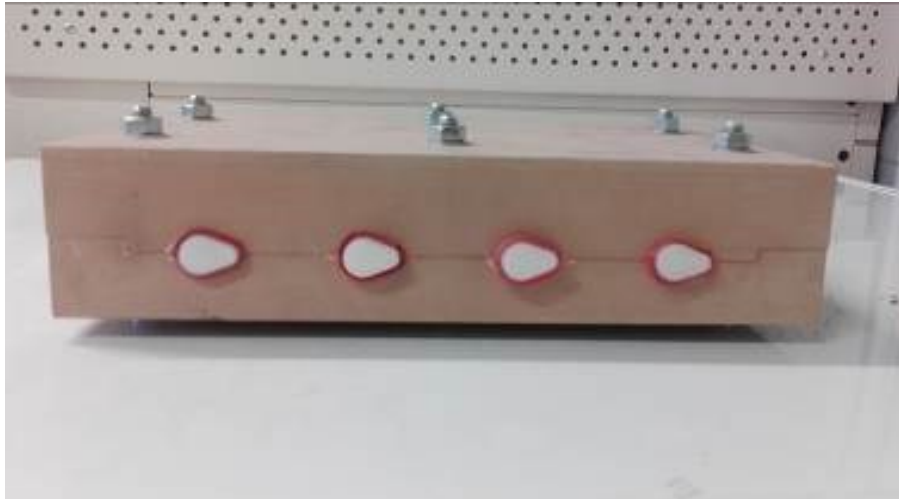
Obr. 48. Zkušební tělesa Typ 1. (vlevo průřez kruh, vpravo průřez vačka).

První typ zkušebních těles byl složen z jádra, na kterém byla umístěna separační fólie. Na tuto fólii bylo uloženo šest vrstev výztuže, které byly spojeny vždy v dělicí rovině formy takovým způsobem, jaký se běžně používá při kladení výztuže do připravených vícenásobných forem. Po uložení všech vrstev výztuže byla umístěna krycí vrstva separační fólie, která měla za úkol zjednodušit vyjmutí vytvrzených vzorků z forem.



Obr. 49. Zkušební tělesa Typ 1. při ukládání do forem.





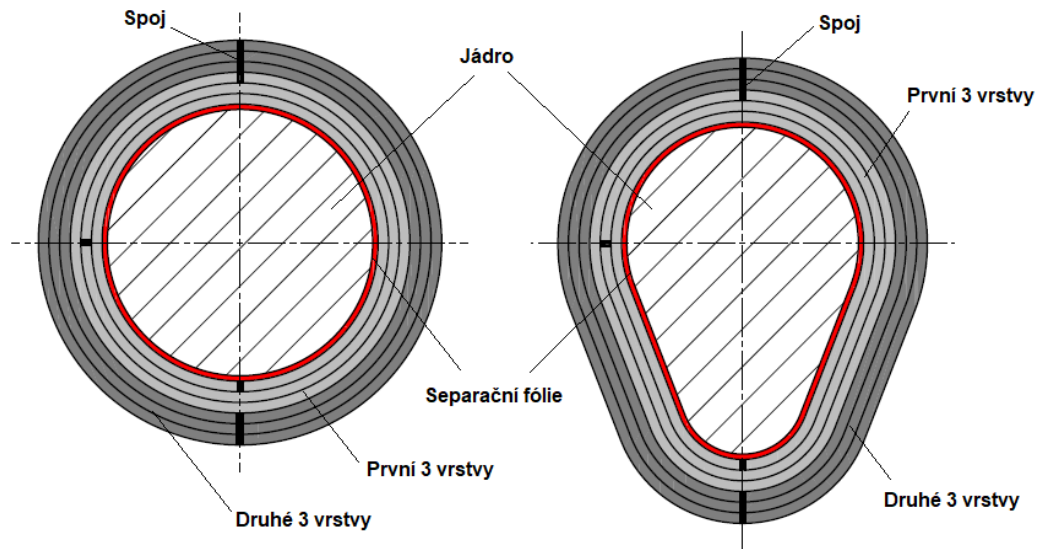
*Obr. 50. Zkušební tělesa Typ 1. uzavřeny ve formě.*

Po vytvrzení byla vyjmuta jádra, stržena vrchní vrstva separační fólie a pomocí kleští bylo provedeno odtržení vnitřní vrstvy separační fólie. Dále bylo provedeno začištění vzorků od přetoků pryskyřice tak, aby došlo k odstranění ostrých hran. K začištění byl použit smirkový papír zrnitosti P 120.



*Obr. 51. Zkušební tělesa po vytvrzení (vlevo průřez kruh, vpravo průřez vačka).*

## 7.4.2 Zkušební tělesa Typ 2. (3+3 vrstvy)



Obr. 52. Zkušební tělesa Typ 2. (vlevo průřez kruh, vpravo průřez vačka).

Druhý typ zkušebních těles se od prvního typu lišil především v postupu výroby. Při výrobě tohoto typu zkušebních těles byla na jádro umístěna nejprve separační fólie, na kterou byly umístěny tři vrstvy výztuže, tak aby došlo k překrytí spojů. U prvních čtyř kusů vzorků pro oba průřezy byla na poslední vrstvu výztuže umístěna separační fólie, která byla stažena lepicí páskou.

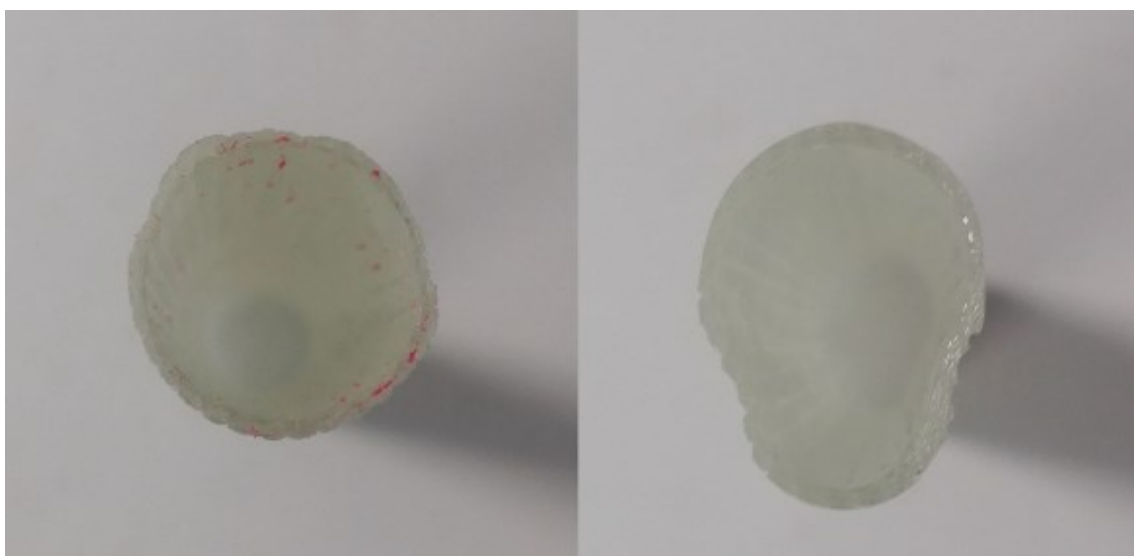


Obr. 53. Jádro vzorku Typ 2. připravené k vytvrzení (bez použití strhávací tkaniny).

U druhých čtyř kusů byla na poslední vrstvu výztuže nejdříve umístěna strhávací tkanina, na kterou se umístila separační fólie a opět bylo provedeno stažení pomocí lepicí pásky. Takto připravené vzorky byly vloženy do pece k vytvrzení. Po vychladnutí vzorků byla odstraněna jádra a další pomocné materiály (separační fólie a strhávací tkanina).



*Obr. 54. Jádro vzorku Typ 2. se strhávací tkaninou připravené k zabalení do separační fólie.*



*Obr. 55. Nezačištěná jádra se třemi vrstvami po vytvrzení (vlevo průřez kruh, vpravo vačka).*

V dalším kroku bylo nutné jádra, u kterých nebyla při výrobě použita strhávací tkanina, obrousit smirkovým papírem. Obrousění povrchu bylo důležité pro následné kvalitní spojení nově přiložených vrstev. Po těchto úpravách bylo možné umístit poslední tři vrstvy

výztuže. Tyto vrstvy byly uloženy tak, aby spoje vrstev byly v dělicí rovině forem. Toto rozmístění spojů opět odpovídá ukládání výztuže do vícenásobných forem. Rozdílem je však použití pevného kompozitního jádra sloužícího jako opora. Po uložení posledních vrstev byla umístěna separační fólie a vzorky byly uzavřeny do naseparovaných forem. Po uzavření forem následovalo konečné vytvrzení v peci popsané v kapitole níže (7.4.3).



*Obr. 56. Hotové nezačištěné vzorky Typ 2. po vytvrzení (vlevo průřez kruh, vpravo vačka).*

Po vytvrzení bylo stejně jako u prvního typu provedeno začištění konců zkušebních vzorků smirkovým papírem zrnitosti P 120.

### 7.4.3 Vytvrzovací program

Vytvrzení probíhalo v peci v univerzitní laboratoři Ústavu výrobního inženýrství. Parametry vytvrzení byly limitovány vlastnostmi materiálu ABS, ze kterého byla vytištěna jádra a bylo nutné vytvrzovací program volit dle této skutečnosti. Materiál je schopen odolávat teplotám maximálně do 90 °C. Z tohoto důvodu byl z technického listu pro prepregový materiál Deltatech DT806 pro vytvrzení v peci vybrán cyklus číslo 4, definovaný výrobcem teplotní hodnotou působících v celkovém čase 3 hodin. Uvedený cyklus využívá přehřev materiálu z teploty okolního prostředí na teplotu vytvrzení, při kterém musí být teplota zvyšována rychlostí 1 až 3 °C/min. Rovnoměrný ohřev je stěžejní pro důkladné prohřátí materiálů což vede ke kvalitnímu spojení jednotlivých vrstev.

Rovnoměrný ohřev je důležitý hlavně v případě, kdy není na uložené vrstvy působeno dodatečným tlakem vyvolaným například použitím autoklávu, případně technologií lisování. Dalším důležitým parametrem byla ochlazovací rychlost, která nesměla překročit 2 °C/min. Důvodem bylo zejména dodržení dostatečně dlouhé doby pro uvolnění veškerých vnitřních pnutí, která by při prudkém ochlazení zkušebních vzorků mohla způsobit defekty ve struktuře vedoucí k následnému poškození jednotlivých zkušebních těles.



*Obr. 57. Pec použitá pro vytvrzení.*



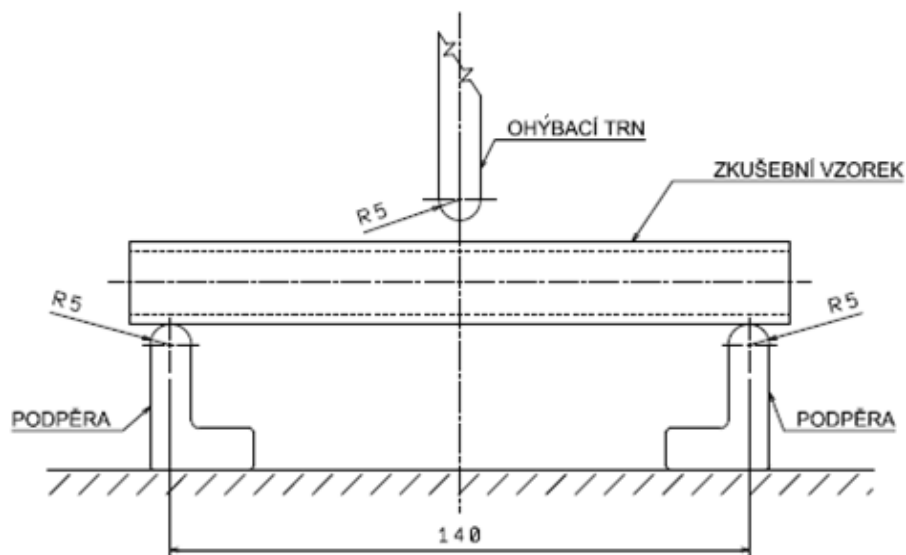
*Obr. 58. Forma se vzorky po vytvrzení.*

## 8. MECHANICKÉ TESTOVÁNÍ

Kapitola mechanické testování obsahuje popis provedení a vyhodnocení zkoušky tříbodovým ohybem. Jsou zde rovněž navrženy tři varianty přípravku pro provedení zkoušky krutem.

### 8.1 Zkouška ohybem

Na vyrobených zkušebních vzorcích byla provedena zkouška tříbodovým ohybem, která vzhledem k nenormalizovanému tvaru zkušebních těles nevychází z jasně definované normy. Pro zkoušku však byly zvoleny parametry vzdálenosti podpěr, která byla 140 mm a velikosti rádiusů podpěr a ohýbacího trnu, které byly R5 (Obr. 59).



Obr. 59. Schéma zkoušky tříbodovým ohybem pro kruhový průřez tělesa.

Zkouška byla prováděna v univerzitní laboratoři za teploty 24 °C na univerzálním zkušebním stoji Zwick 1456.

Tab. 9. Technické údaje zkušebního stroje Zwick 1456

<b>Maximální posuv příčnicku:</b>	800 mm/min
<b>Snímače síly:</b>	2,5 až 20 kN
<b>Teplotní komora:</b>	-80 / +250 °C
<b>Možnost testů:</b>	Tah / Ohyb / Tlak



*Obr. 60. Univerzální zkušební stroj Zwick 1456.*

## **8.2 Vyhodnocení výsledků zkoušky ohybem**

Zkouška třibodovým ohybem byla prováděna z důvodu porovnání mechanických vlastností jednotlivých typů zkušebních vzorků při stejném počtu vrstev lišících se umístěním spojů ve struktuře. Cílem bylo zjistit, který průřez a typ zkušebních vzorků dosáhne nejlepších vlastností a také chování jednotlivých těles vyrobených odlišnými technologickými postupy. Hlavním parametrem při vyhodnocení byla maximální dosažená zatěžující síla.

### 8.2.1 Typ 1. – kruh (6 vrstev)

Průměrná maximální velikost síly z celkem osmi kusů zkušebních těles tohoto typu byla 1880 N. Velikost této maximální průměrné síly byla nejspíše ovlivněna tím, že jeden ze zkušebních vzorků byl pravděpodobně vyroben s nějakou blíže nespecifikovanou vadou. Mohlo se jednat o nepřesné uložení spoje jedné z vrstev ve struktuře. Takto vybočující hodnota tedy byla ze souboru hodnot vyloučena. Velikost maximální průměrné síly byla přepočítána na hodnotu 2048 N.

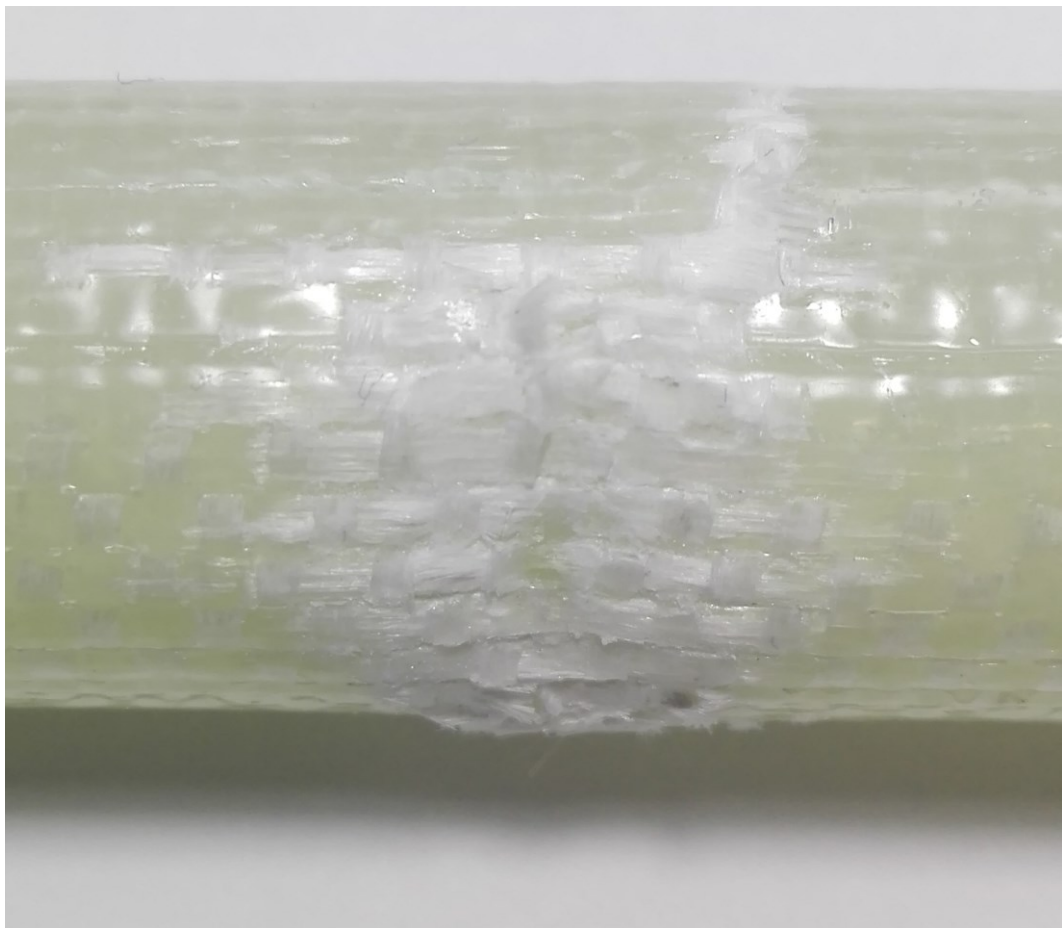


*Obr. 61. Vzorek Typ 1. – kruh při zkoušce.*



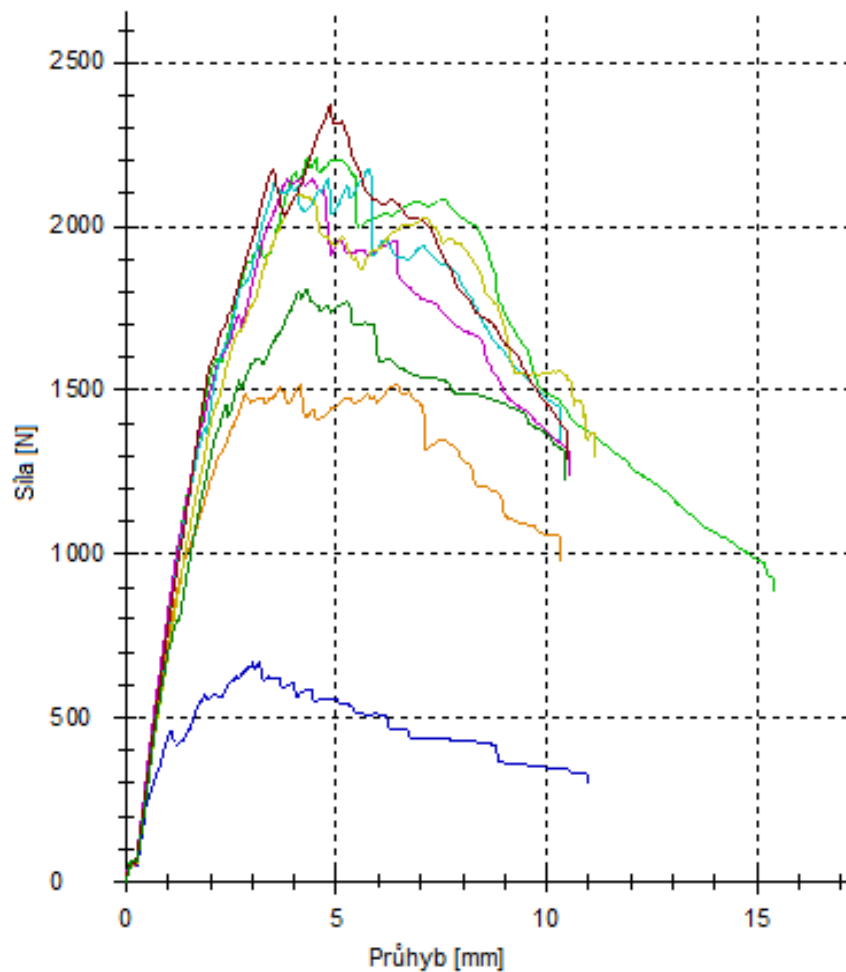


*Obr. 62. Vzorek Typ 1. – kruh po zkoušce.*



*Obr. 63. Vzorek Typ 1. – kruh detail porušení.*

Na obrázku výše (*Obr. 63*) je znázorněno porušení po zatěžování ohybovou silou. Porušení se v tomto případě šířilo ve směru kolmém na směr vláken, tedy po obvodu zkušebního vzorku. Z obrázku je také vidět, že došlo k přetržení některých vláken.



Obr. 64. Graf naměřených hodnot Typ 1. – kruh.

Z grafu (Obr. 64) závislosti působící síly na velikosti průhybu bylo zjištěno, že většina zkušebních těles snesla sílu přibližně 2000 N při současném průhybu přibližně 3 mm. Dále graf zobrazuje tři zkušební tělesa, u kterých se pravděpodobně vyskytla blíže nespecifikovaná výrobní vada. Jako nejpravděpodobnější se jeví možnost, že došlo k nepřesnému uložení vrstev výztuže, a tím k oslabení struktury zkušebních těles.

### 8.2.2 Typ 1. – vačka (6 vrstev)

Průměrná maximální velikost síly z celkem osmi kusů zkušebních těles tohoto typu byla 2290 N. V případě zkušebních vzorků tohoto typu nedošlo k výskytu žádného výrazně vadného vzorku, tudíž nebylo třeba přepočítávat výsledné hodnoty. V porovnání se vzorky stejného typu kruhového průřezu bylo zjištěno, že průřez tvaru vačky je z hlediska

maximální velikosti síly vhodnější. Této skutečnosti lze využít při optimalizacích průřezů a tím snížení jejich velikostí, případně zvýšení pevnosti. Rozdíl mezi těmito typy činí 242 N ve prospěch průřezu ve tvaru vačky.



*Obr. 65. Vzorek Typ 1. – vačka při zkoušce.*

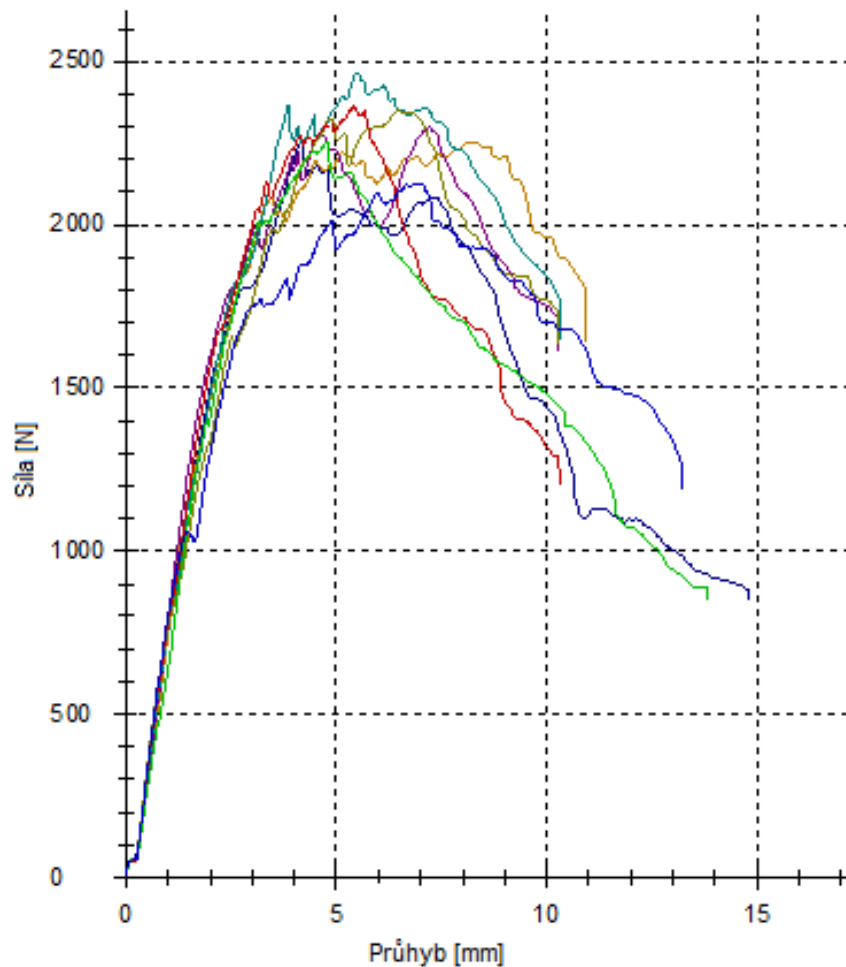


*Obr. 66. Vzorek Typ 1. – vačka po zkoušce.*



*Obr. 67. Vzorek Typ 1. – vačka detail porušení.*

Na obrázku (*Obr. 67*) je znázorněno porušení zkušebního tělesa s průřezem tvaru vačky o šesti vrstvách se spoji v dělicí rovině formy. Porušení se u těchto zkušebních těles šířilo jak ve směru kolmém na směr vláken, tedy po obvodu zkušebního vzorku, tak ve směru vláken, tedy podélně. Nejvýraznější poškození v podélném směru bylo nejviditelnější v místě největší šířky průřezu vačky. Z obrázku je vidět, že také zde došlo k přetržení některých vláken.



Obr. 68. Graf naměřených hodnot Typ 1. – vačka.

Graf (Obr. 68) závislosti působící síly na velikosti průhybu znázorňuje, že většina zkušebních těles vačkového průřezu o šesti vrstvách se spoji v dělicí rovině formy snesla sílu přibližně 2200 N při současném průhybu přibližně 3 mm. Dále je z grafu vidět, že všechna zkušební tělesa byla porušena přibližně ve stejný okamžik, tudíž nedošlo k výskytu žádného výrazně vadného zkušebního tělesa.

### 8.2.3 Typ 2. – kruh (3+3 vrstvy)

Průměrná maximální velikost síly z celkem osmi kusů zkušebních těles tohoto typu byla 2190 N. V porovnání se zkušebními vzorky typu 1. kruhového průřezu vydrží tento typ vzorků sílu o 142 N vyšší. Ale v porovnání s typem 1. vačkového průřezu je dosaženo síly o 100 N nižší, což indikuje, že z pevnostního hlediska je vhodnější tvar s průřezem ve

tvaru vačky. Dalším porovnáním bylo srovnání jader. V tomto ohledu bylo zjištěno, že zkušební vzorky, u kterých byla na jádrech použita strhávací tkanina, dosahovaly vyšších hodnot maximální síly než jádra, která byla pouze obroušena smirkovým papírem. Tato skutečnost pouze potvrdila domněnku, která zohledňuje skutečnost, že je nutné při výrobě zkušebních vzorků dodržovat technologické zásady a používat pomocné materiály, které dodávají výsledné struktúře požadované vlastnosti. Příznivé ovlivnění výsledných vlastností je tedy přínosné a žádoucí i přes zvýšené náklady na výrobu zkušebních těles.



*Obr. 69. Vzorek Typ 2. – kruh při zkoušce.*

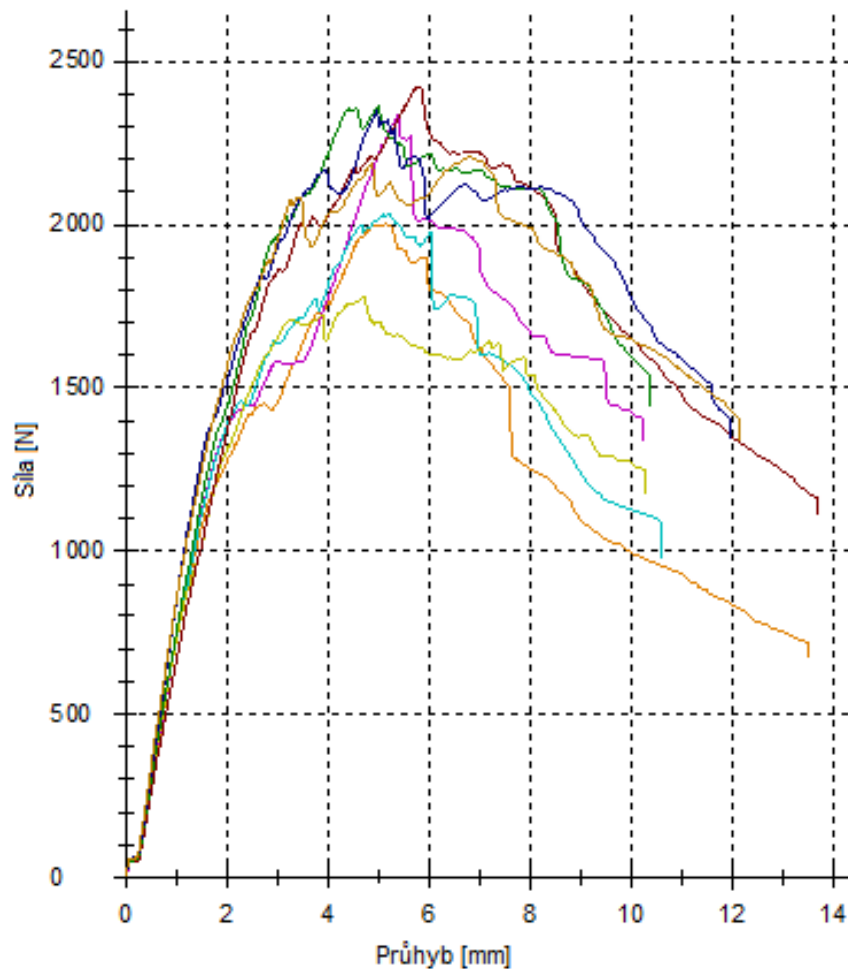


*Obr. 70. Vzorek Typ 2. – kruh po zkoušce.*



*Obr. 71. Vzorek Typ 2. – kruh detail porušení.*

Obrázek (*Obr. 71*) znázorňuje porušení zkušebních těles typu 2., tedy tělesa se skladbou vrstev 3+3 a průřezu ve tvaru kruhu. Porušení u těchto zkušebních těles se šířilo zejména ve směru kolmém na směr vláken, tedy po obvodu zkušebního vzorku. I na tomto obrázku je vidět, že také zde došlo k přetržení některých vláken.



Obr. 72. Graf naměřených hodnot Typ 2. – kruh.

Graf (Obr. 72) závislosti působící síly na velikosti průhybu znázorňuje, že většina zkušebních těles snesla sílu přibližně 2100 N při současném průhybu přibližně 5 mm. Dále je z grafu vidět poměrně velký rozptyl naměřených hodnot. Tento rozptyl je způsoben tím, že u těchto těles byly použity různé výrobní postupy. Dle grafu a naměřených hodnot lze usoudit, že u čtyř těles, u kterých byla použita strhávací tkanina bylo dosaženo větších ohybových sil než u těles, jejichž povrch byl pouze obroušen.

#### 8.2.4 Typ 2. – vačka (3+3 vrstvy)

Průměrná maximální velikost síly z celkem osmi kusů zkušebních těles tohoto typu byla 2390 N. Tato naměřená hodnota je ze všech zkušebních typů nejvyšší, a tudíž je možné označit tento typ vzorku z hlediska maximální síly za nejlepší. V porovnání s typem 1.



vačkového průřezu bylo dosaženo síly o 100 N vyšší. V porovnání s typem 2. kruhového průřezu byla síla u tohoto typu o 200 N vyšší. Dalším porovnáním bylo opět srovnání jader. V tomto ohledu bylo, stejně jako u typu 2. pro kruhový průřez, zjištěno, že zkušební vzorky, u kterých byla na jádrech použita strhávací tkanina byly schopny vydržet vyšší hodnoty maximální síly než tělesa, jejichž jádra byla pouze obroušena smirkovým papírem.



*Obr. 73. Vzorek Typ 2. – vačka při zkoušce.*

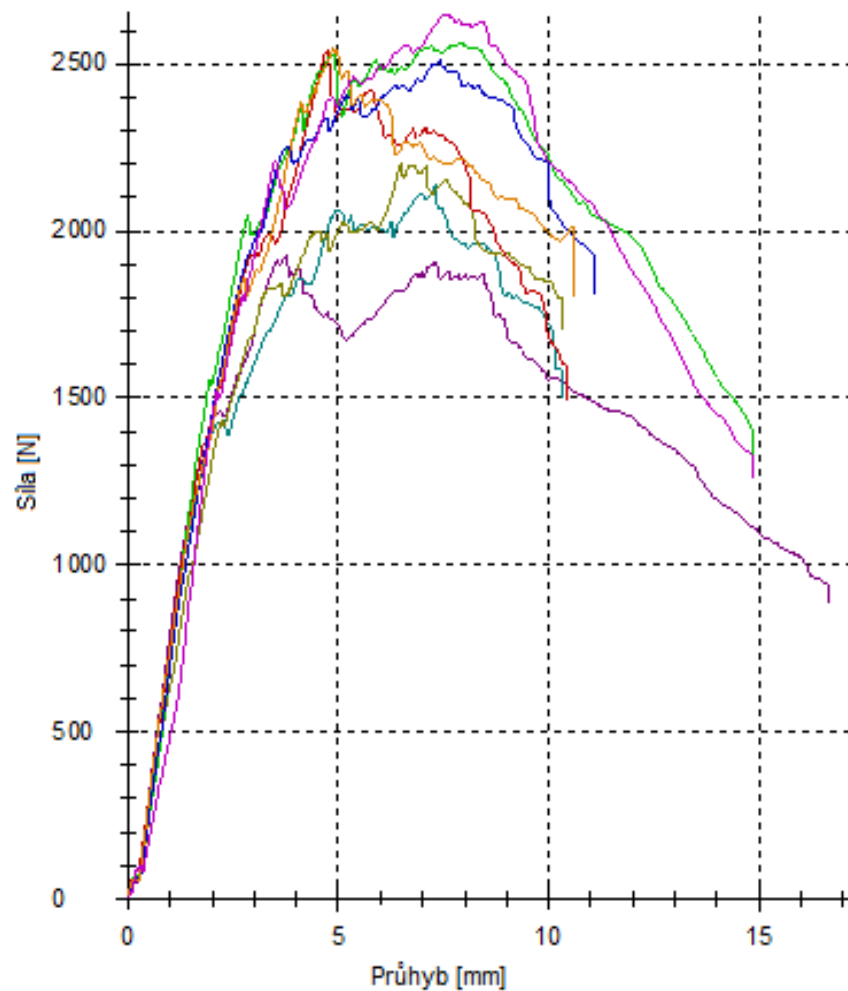


*Obr. 74. Vzorek Typ 2. – vačka po zkoušce.*



*Obr. 75. Vzorek Typ 2. – vačka detail porušení.*

Obrázek (Obr. 75) znázorňuje porušení zkušebních těles typu 2., tedy tělesa se skladbou vrstev 3+3 a průřezu ve tvaru vačky. Porušení u těchto zkušebních těles se šířilo zejména ve směru kolmém na směr vláken, tedy po obvodu zkušebního vzorku, ale také ve směru vláken. V porovnání s typem 1. vačkového průřezu docházelo z poškození ve směru vláken v menším rozsahu. Také tento obrázek znázorňuje, že i zde došlo k přetržení některých vláken.



Obr. 76. Graf naměřených hodnot Typ 2. – vačka.

Graf (Obr. 76) závislosti působící síly na velikosti průhybu znázorňuje, že většina zkušebních těles se skladbou vrstev 3+3 pro vačkový průřez snesla sílu přibližně 2300 N při současném průhybu přibližně 5 mm. Také zde je z grafu vidět poměrně velký rozptyl naměřených hodnot, který je způsoben tím, že i u těchto těles byly použity různé výrobní postupy. Dle grafu a naměřených hodnot lze také pro tato zkušební tělesa usoudit, že u čtyř těles, u kterých byla použita strhávací tkanina bylo dosaženo vyšších hodnot ohybové síly než u těles, jejichž povrch byl obroušen.

### 8.2.5 Celkové zhodnocení

Po zpracování naměřených hodnot bylo provedeno vyhodnocení, které odhalilo, že nejlépe ve zkoušce obstál zkušební vzorek typ 2. se skladbou vrstev 3+3 a průřezem ve tvaru

vačky. Dále bylo zjištěno, že výrobním postupem použitým pro výrobu zkušebních vzorků typu 2. bylo dosaženo vyšších hodnot naměřených sil. Také bylo zjištěno, že lepším ze dvou porovnávaných průřezů je průřez tvaru vačky. Posledním zjištěním bylo, že u zkušebních vzorků typu 2. je vhodnější použít strhávací tkaninu.

Tab. 10. Porovnání výsledků pro jednotlivé zkušební vzorky.

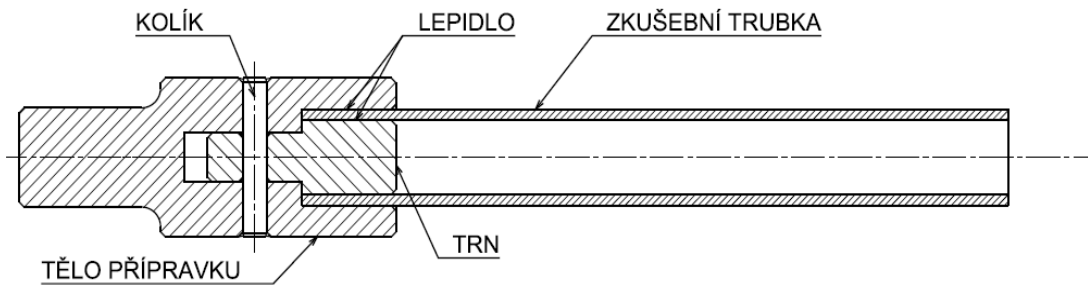
Typ zkušebního vzorku:	$F_{\max}$ [N]	Pořadí dle $F_{\max}$
Typ 1. – kruh (6 vrstev)	(2048 ± 266)	4.
Typ 1. – vačka (6 vrstev)	(2290 ± 100)	2.
Typ 2. – kruh (3+3 vrstvy)	(2190 ± 227)	3.
Typ 2. – vačka (3+3 vrstvy)	(2390 ± 259)	1.

### 8.3 Návrh přípravku pro zkoušku krutem

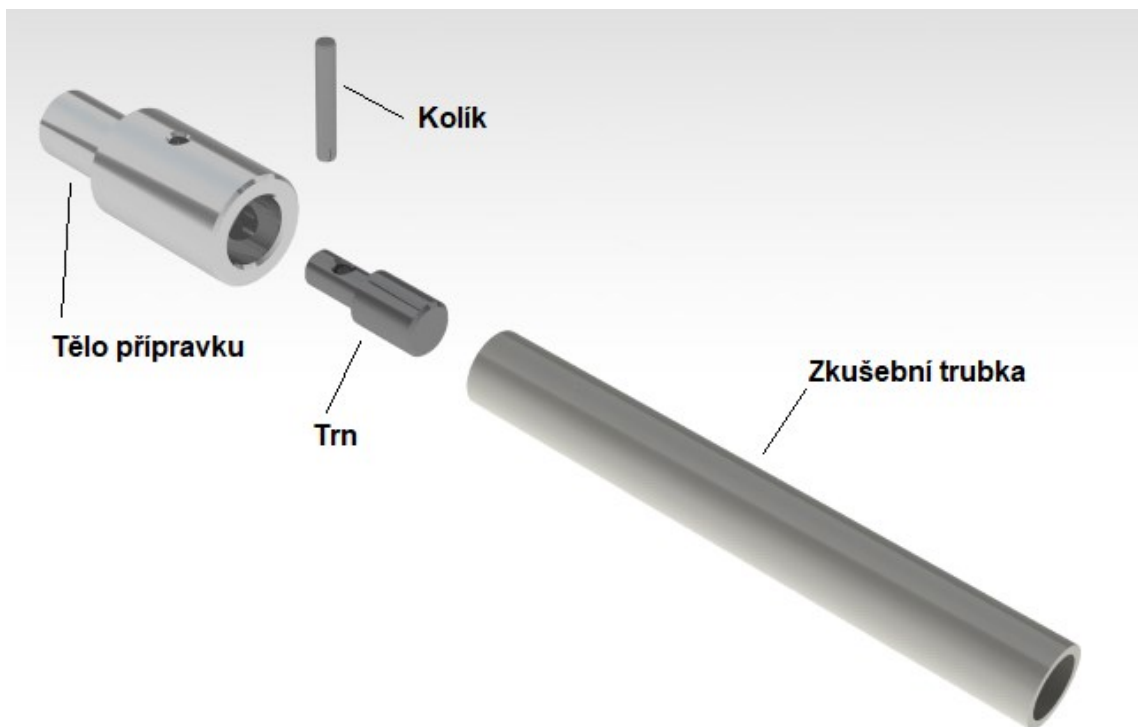
Dalším bodem praktické části diplomové práce bylo navržení přípravku pro zkoušku krutem. Jako zkušební těleso byla zvolena kompozitní trubka s kruhovým průřezem. Celkem byla navržena tři řešení přípravku. Jednotlivá řešení se od sebe lišila způsobem upnutí zkušební trubky a náročností výroby jednotlivých částí přípravku. Při návrhu jednotlivých přípravků, jejich konstrukce a možného následného využití je nutno také zohlednit, který z těchto navržených přípravků bude vhodný pro rozličné tvary navrhovaných průřezů – tedy jeho maximální možnou univerzálnost.

#### 8.3.1 Návrh 1. – spoj pomocí lepidla

V tomto návrhu je přípravek sestaven z celkem tří částí. Přípravek byl navrhován dle normy ASTM D 5448, ale byl upraven pro zkušební trubku o menším průměru. Postup při sestavení přípravku spočívá v upevnění těla ke zkušebnímu stroji. Způsob tohoto upevnění je závislý na použitém typu zkušebního stoje. Poté se do zkušební trubky nalepí trn, který se vlepe do těla přípravku a následně zajistí kolíkem k tělu přípravku. Výhodou tohoto návrhu je snadná výroba všech částí přípravku. Nevýhodou je pracné vlepování trnů do zkušebních trubek. Lepený spoj je v tomto případě nutno navrhovat takovým způsobem, aby byl pevnější než maximální pevnost zkoušeného materiálu a nedocházelo tak k vytržení lepeného spoje a jeho poškození.



Obr. 77. Schéma návrhu přípravku s lepeným spojem.

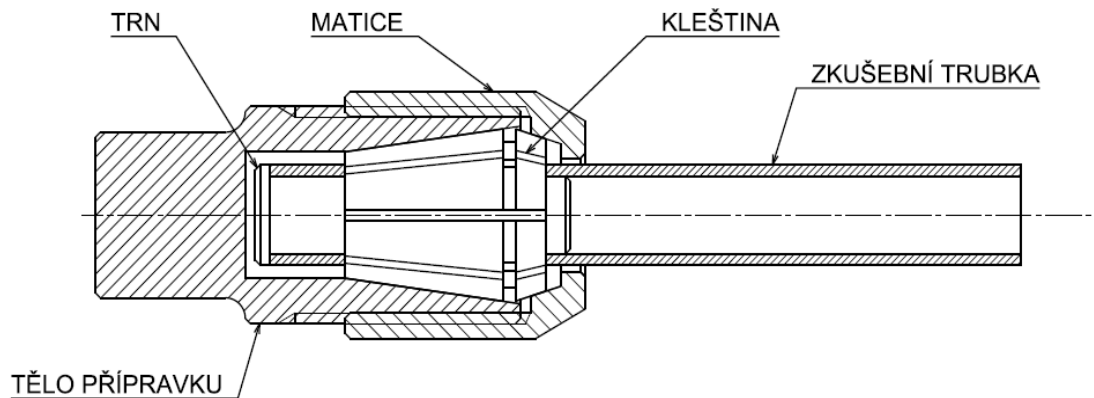


Obr. 78. Model návrhu přípravku s lepeným spojem.

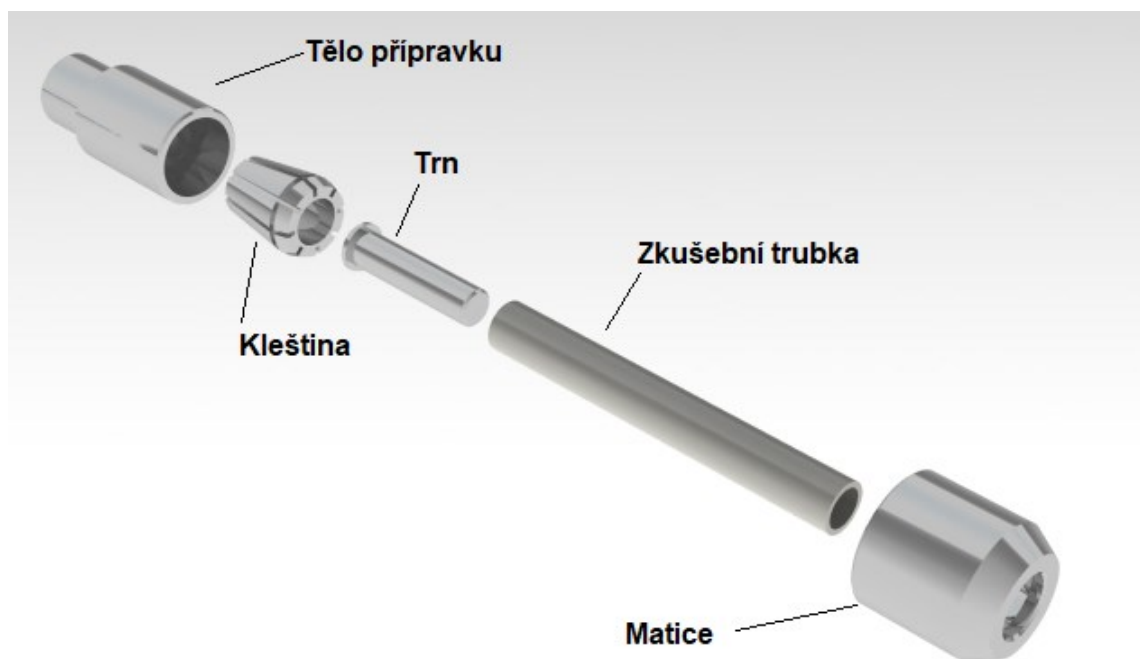
### 8.3.2 Návrh 2. – spoj pomocí kleštiny

Spojení zkušební trubky s přípravkem je řešeno pomocí kleštiny. Do kleštiny umístěné v tělu přípravku se vsune zkušební trubka. Poté se našroubuje matice, pomocí které dojde k sevření kleštiny a tím k upnutí zkušební trubky. Aby bylo zajištěno, že kleština nebude zkušební trubku deformovat, tak je do ní vsunut trn. Výhodou tohoto řešení je možnost výměny kleštiny, a tím zkoušení trubek různých průměrů. Nevýhodou je složitější výroba

jednotlivých součástí přípravku a také možnost, že by mohlo docházet k protáčení zkušební trubky v kleštině.



Obr. 79. Schéma návrhu přípravku s upnutím do kleštiny.

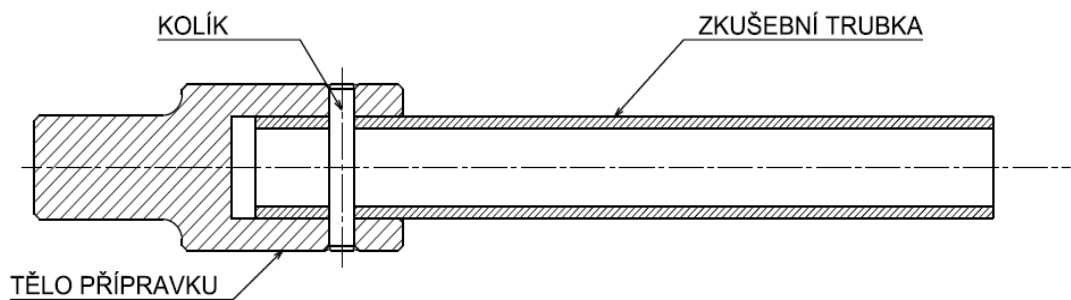


Obr. 80. Model návrhu přípravku s upnutím do kleštiny.

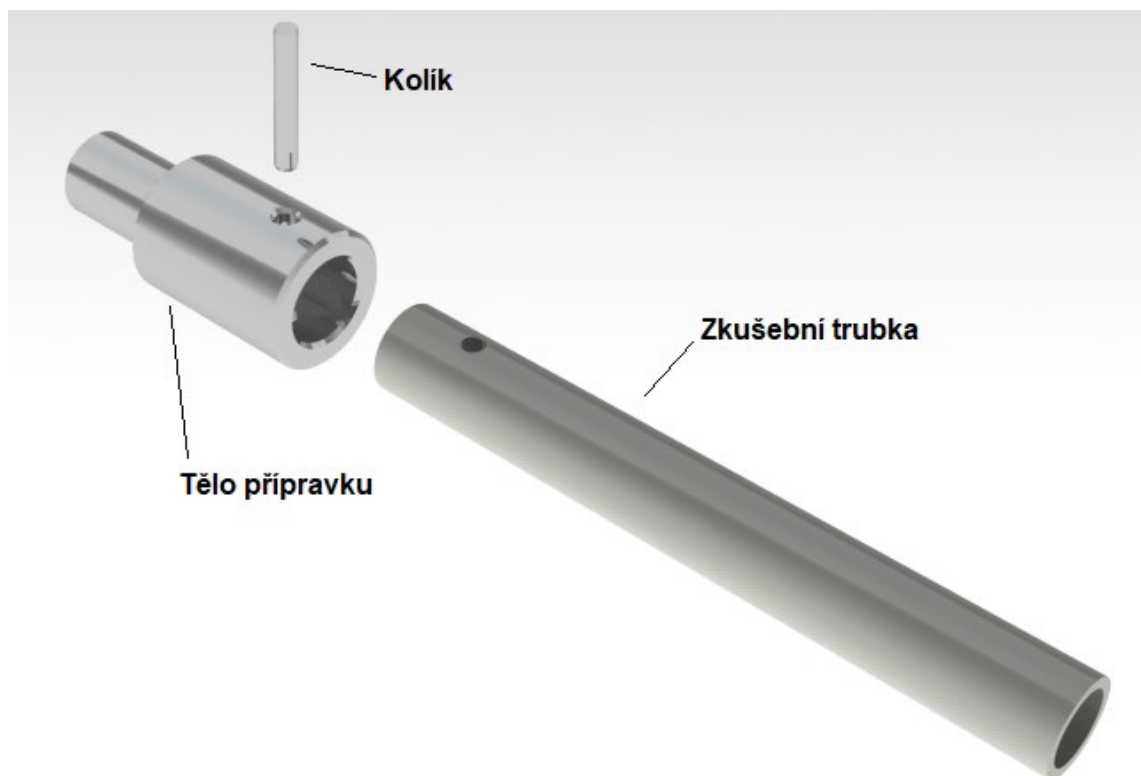
### 8.3.3 Návrh 3. – spoj pomocí kolíku

Dalším možným řešením pro spojení zkušební trubky a přípravku je použití tvarového spoje. Tento spoj je zajištěn použitím kolíku. U tohoto řešení je zkušební trubka opatřena

otvorem, kterým je prostrčen kolík. Výhodou tohoto řešení je snadná výroba přípravku, nevýhodou je nutnost vytvoření otvoru ve zkušební trubce a riziko porušení trubky v místě otvoru pro kolík.



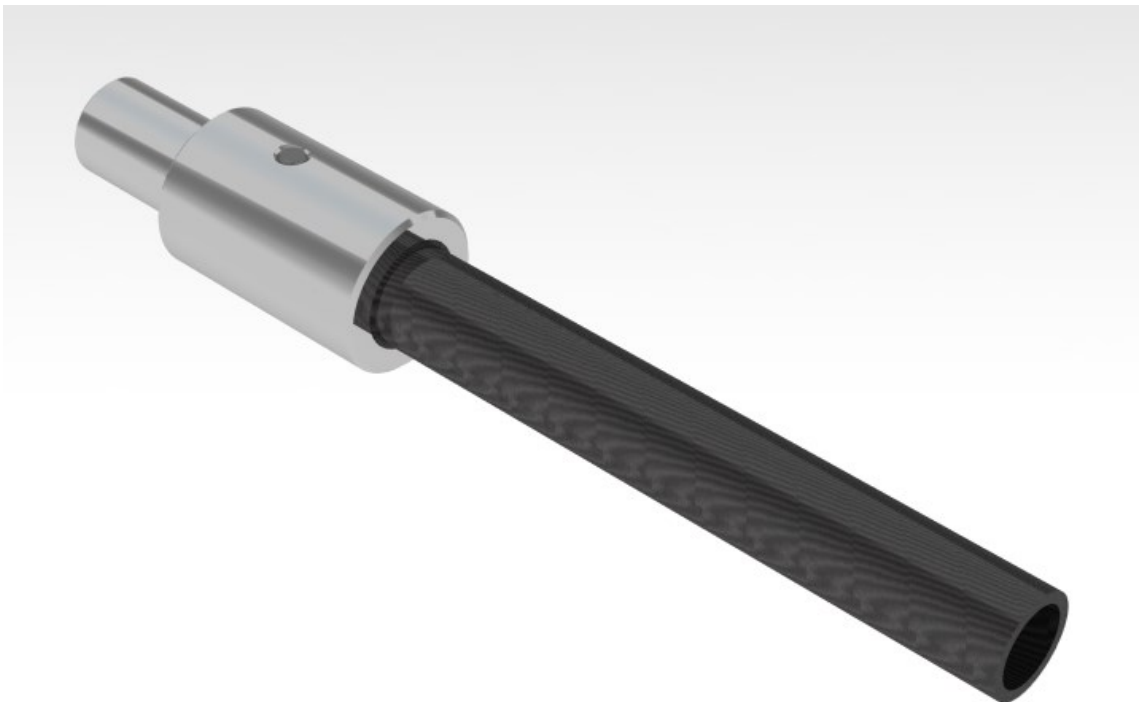
*Obr. 81. Schéma návrhu přípravku s upnutím pomocí kolíku.*



*Obr. 82. Model návrhu přípravku s upnutím pomocí kolíku.*

### 8.3.4 Zhodnocení návrhů přípravku pro zkoušku krutem

Z výše uvedených návrhů se jako nejlepší jeví první návrh s lepeným spojem. U tohoto návrhu je výhodou velmi snadná výroba všech součástí. Výhodou tohoto řešení je také možnost testovat různé materiálové skladby, vzorky vyrobené z různých výztužných materiálů pomocí různých výrobních technologií a také vzorky o různých průřezech. Nevýhoda v podobě pracného vlepování trnu je převážena výhodami tohoto řešení. Také v porovnání s nevýhodami dalších návrhů se použití lepeného spoje vyplatí. U druhého návrhu, který používá k upnutí kleštinu je velkou nevýhodou komplikovaná výroba součástí, především kleštiny. Další nevýhodou je také možnost, že by mohlo docházet k protáčení zkušebního tělesa a tím k ovlivnění výsledků zkoušky. Třetí návrh, který je ze všech návrhů výrobně nejjednodušší by měl pravděpodobně nevýhodu v tom, že by docházelo k praskání zkušebních těles v místě vyvrtaného otvoru pro kolík ještě dříve, než by bylo dosaženo maximálního krouťícího momentu, který by byl materiál schopen přenést.



*Obr. 83. Sestavený model přípravku návrh 1. spoj pomocí lepidla.*



## 9. NÁVRH SOUČÁSTI S VYUŽITÍM JÁDRA VYROBENÉHO TECHNOLOGIÍ 3D TISKU

Vzhledem k velkému výběru materiálů, které je možné tisknout, je důležité vybrat správný materiál pro danou složitost konstrukce dílu. Dále je také nutné předem zvážit, zda bude jádro pevnou součástí struktury, nebo bude odstraněno. Existují například materiály, které je možné rozpustit ve vodě či jiných vhodných vodných roztocích. Pro tyto součásti lze také využít různé způsoby kladení výztuže. Je možné použít technologii ručního kladení a pryskyřici nanášet ručně. Dalším způsobem je ruční kladení předimpregnovaných výztuží, nebo je možné využít technologii navíjení.

### 9.1 Návrh kompozitních řídítek silničního kola

Jako součást, která by mohla být vyráběna s využitím jádra vyrobeného na 3D tiskárně byla zvolena řídítka pro silniční kolo. Řídítka byla vybrána proto, že jsou tvarově a ergonomicky složitým dílem. Z tohoto důvodu je použití technologie 3D tisku vhodným řešením. Zejména z důvodu, že je možné ověřit, jak funkční, tak ergonomickou správnost návrhu již na jádře. Řídítka byla navrhována, dle již vyráběných řídítek od firmy Ninex (Obr. 84.). Jedná se o řídítka s šířkou 420 mm a váhou 358 g, jejichž prodejní cena se pohybuje kolem 8500 Kč.



Obr. 84. Řídítka od výrobce Ninex. [16]

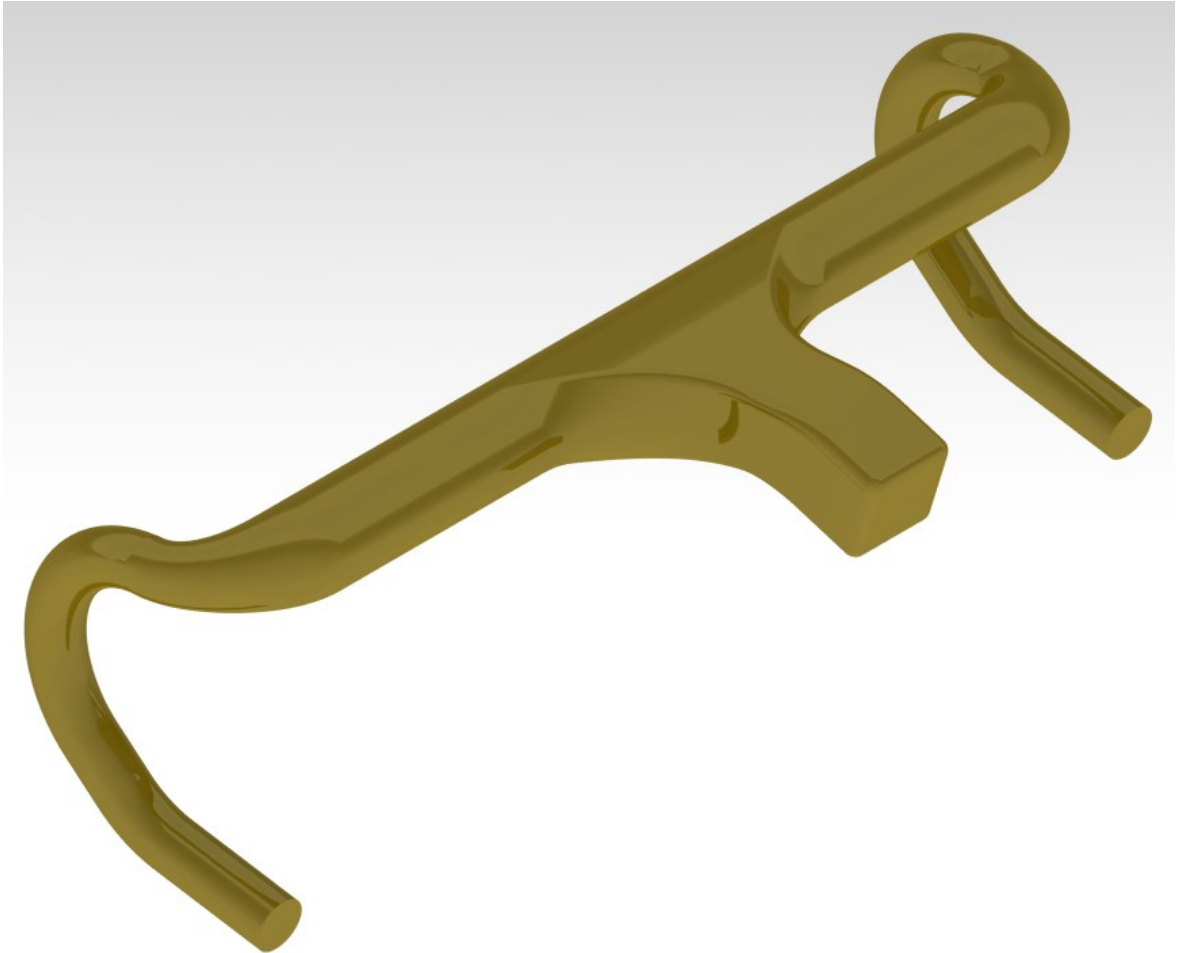
Navrhovaná řídítka se liší ve způsobu upevnění ke kolu. Zatímco řídítka od firmy Ninex používají k upevnění na vidlici svěrný spoj, tak navrhovaná řídítka budou používat spoj lepený. Lepený spoj byl zvolen proto, aby bylo dosaženo co nejnižší hmotnosti. Samotná konstrukce tohoto spoje spočívá ve vlepení dvoudílného insertu vyrobeného z uhlíkových vláken do otvoru v řídítkách. Tím dojde k vytvoření plochy, která bude následně sloužit pro vzájemné spojení řídítek a vidlice. Pro zajištění dlouhé trvanlivosti spoje byla navržena krytka, která bude chránit lepený spoj před vnikáním nečistot a vzdušné vlhkosti.



*Obr. 85. Sestava navrhovaných kompozitních řídítek.*

Řídítka budou vyráběna za pomoci jádra, které bude vytištěno z rozpustného materiálu dodávaného pod obchodním označením SR-30 od výrobce Stratasys. Rozpustný materiál byl zvolen proto, aby bylo dosaženo co nejnižší hmotnosti řídítek. Dalším důvodem pro použití rozpustného materiálu byl také komplikovaný tvar řídítek, který znemožňuje

jakýkoliv jiný způsob odstranění jádra. Navíc díky použití rozpustného materiálu jádra dojde k vytvoření dutiny, která bude sloužit pro vedení ovládacích lan brzd a přehazovačky.



*Obr. 86. Návrh tištěného jádra z rozpustného materiálu pro kompozitní říditka silničního kola.*

Pro říditka byl vybrán postup výroby, který bude využívat teplem smrštitelnou pásku a vytvrzení v peci. Do této pásky bude po uložení všech vrstev výztuže zabalen celý díl. Důvodem pro použití této pásky byla skutečnost, že díky jejímu použití dochází k rovnoměrnému působení tlaku po obvodu součásti, a tím ke vzniku rovnoměrné tloušťky stěn po celém průřezu. Dalším důvodem pro použití byl komplikovaný tvar řídítek, který by vyžadoval výrobu drahé a složité formy, která by již tak drahý díl ještě více prodražila.

Jako materiál výztuže byl zvolen prepreg z uhlíkových vláken. Uhlíková vlákna byla zvolena zejména kvůli svým velmi dobrým mechanickým vlastnostem. V neposlední řadě bylo také uvažováno to, že se jedná o díl, který je viditelný a struktura uhlíkových vláken je z hlediska designu velice atraktivní. Jedná se o prototypový díl, u kterého se nepočítá s větší sérií vyráběných kusů. Pokud by se jednalo o větší sérii, tak by bylo výhodnější vyrobit formu a podle velikosti série upravit volbu materiálu.



*Obr. 87. Návrh kompozitních řídítek z uhlíkových vláken pro silniční kolo.*

## **9.2 Technologický postup výroby kompozitních řídítek**

Tento technologický postup je platný pouze pro použití jádra, které bylo vyrobeno z rozpustného materiálu SR-30. Při práci podle tohoto technologického postupu je nutné dodržovat všechny podmínky bezpečnosti práce.

Samotný technologický postup pro výrobu kompozitních řídítek s použitím rozpustného jádra je následující:

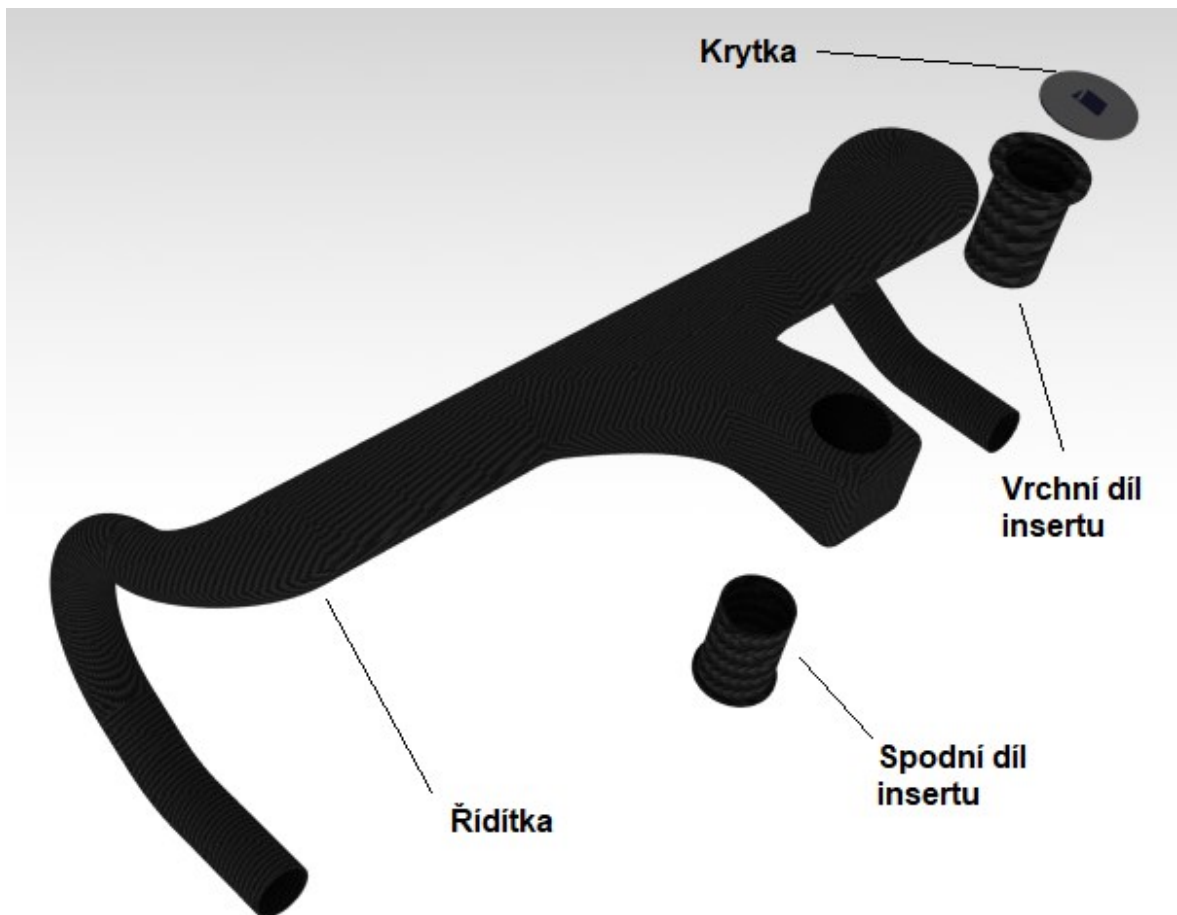
1. Po dokončení tisku se od jádra oddělí materiál podpor. Pro oddělení budou použity kleště, případně nůž s odlamovací čepelí. Po oddělení materiálu tištěné podpory se jádro zkontroluje, případně začistí a upraví pro další technologické operace.
2. Podle modelu součásti jsou vytvořeny šablony, pomocí nichž se nastříhají jednotlivé vrstvy uhlíkového prepregu – v případě využití plátňové formy předimpregnovaného polotovaru materiálu.
3. Postupně začneme ukládat vrstvy uhlíkového prepregu na jádro takovým způsobem, aby vznikla vrstva silná 1 mm. Jednotlivé vrstvy ukládáme přesně a pečlivě s ohledem na obecné zásady využívané při ukládání prepregů.
4. Po pečlivém uložení všech vrstev provedeme stažení pomocí teplem smrštitelné pásky, která se při působení vytvrzovacího programu se zvýšenou teplotou stahuje, čímž vytváří rovnoměrný tlak na stěny vyráběné součásti.
5. Takto připravený díl vložíme do vytvrzovací pece a provedeme vytvrzení. Vytvrzení musí probíhat dle vytvrzovacích podmínek, které musí zohledňovat vlastnosti materiálu jádra, pryskyřice a použité stahovací pásky.

Tab. 11. Podmínky vytvrzení pro navrhovanou součást.

	Náběh na vytvrzovací teplotu [°C/min]	Vytvrzovací teplota [°C]	Čas vytvrzování [hodin]	Rychlost ochlazování [°C/min]	Tlak v případě použití autoklávu [bar]
<b>S jádrem</b>	2	80	5	2	3
<b>Bez jádra</b>	2	120	1	2	6

6. Po vytvrzení a ochlazení dílu, které musí být v souladu s technickým listem se díl vyjme z pece a odstraní se smršťovací páska a ostatní potřebné pomocné materiály.

7. Pro urychlení procesu rozpouštění vyvrtáme otvor v místě, kde budou vkládány inserty.
8. Vytvrzený díl s vyvrtaným otvorem se vloží do vodní lázně, kde zůstane tak dlouho dokud nedojde z rozpouštění celého jádra.
9. Po rozpouštění jádra se provede začištění od přetoků pryskyřice a ostrých hran. K začištění se použije pilník a brusné plátno. Při začištění je nutné používat ochranné pomůcky.
10. Po začištění se do předem vyvrtaného otvoru vlepí oba díly insertu.
11. Po zaschnutí lepidla se celý díl zlehka přebrousí brusným plátnem a přelakuje vrstvou průhledného laku, případně pryskyřicí, která je následně vyleštěna.
12. Po nalakování nebo vyleštění se přilepí krytka.



Obr. 88. Rozpad sestavy kompozitních řídítek s držákem.

## ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo vyrobit zkušební tělesa, u kterých bylo využito jader vyrobených 3D tiskem. Při výrobě jader byla využita 3D tiskárna Stratasys Dimension SST 768. Tato tiskárna pracuje na principu FDM. Jako materiál jader byl zvolen materiál ABS a jako materiál podpůrných konstrukcí byl použit materiál HIPS. Celkem byly navrženy dva průřezy jader. Jedním z průřezů byl průřez ve tvaru kruhu a druhým průřez ve tvaru vačky. Po navržení těchto průřezů byly v programu *CATIA V5* vytvořeny modely jader. Po vytvoření těchto modelů byly v programu *CatalystEX* nastaveny procesní parametry tisku a bylo provedeno vytištění jader. Po vytištění jader bylo přistoupeno k samotné výrobě zkušebních těles. Postup výroby spočíval v obalení jádra separační fólií, která měla za úkol zajistit pozdější bezproblémové odstranění jádra. Po obalení jádra separační fólií byly podle šablon nastříhány jednotlivé vrstvy výztuže, která byla tvořena jednosměrným prepregem ze skelných vláken a pryskyřice DT806 od výrobce Deltatech. Poté následovalo ukládání výztuže na jádro. U zkušebních těles 1. typu bylo na jádro uloženo šest vrstev tak, aby byl spoj v dělicí rovině formy. Po uložení všech vrstev byla na poslední vrstvu výztuže přidána vrstva separační fólie a zkušební vzorky byly vloženy a uzavřeny do naseparované formy a dále vloženy do pece k vytvrzení. U zkušebních těles 2. typu byly na jádro uloženy pouze tři vrstvy výztuže. Výztuž byla ukládána tak, aby vždy došlo k překrytí spoje. Poté byla na poslední, třetí, vrstvu uložena vrstva strhávací tkaniny a poté vrstva separační fólie. Dalším krokem bylo stažení vrstev pomocí lepicí pásky, která měla za úkol stlačit vrstvy výztuže. Takto připravená jádra byla vložena do pece k vytvrzení. Tímto způsobem došlo k vytvoření polotovaru, na který byly po vytvrzení přidány další tři vrstvy výztuže. Na poslední vrstvu výztuže byla uložena separační fólie a zkušební vzorky byly vloženy a uzavřeny do naseparované formy a dále do pece k vytvrzení. Vytvrzení obou typů zkušebních těles probíhalo přesně podle postupů uvedených v technickém listu. Po vyrobení všech zkušebních vzorků bylo provedeno začištění, a to za pomoci smirkového papíru. Po začištění bylo možné přistoupit k testování.

Pro testování byla zvolena zkouška tříbodovým ohybem a použit univerzální zkušební stroj Zwick 1456. Při samotném testování bylo zjištěno, že zkušební vzorky typ 2. jejichž skladba vrstev byla 3+3 dosáhly vyšší maximální ohybové síly než zkušební vzorky typ 1. sestavené ze šesti vrstev. Také bylo zjištěno, že ze dvou navržených průřezů byl lepším průřez ve tvaru vačky.

Dalším cílem diplomové práce bylo navržení několika variant přípravku pro zkoušku krutem. Po porovnání všech výhod a nevýhod bylo usouzeno, že nejlepší variantou je první návrh, který používá lepený spoj. Po realizaci navrhnutého profilu, a tedy jeho výrobě bude dále použit při testování navrhnutých struktur s odlišným profilem průřezu a porovnání jejich vlastností.

Posledním cílem diplomové práce bylo navržení skutečné součásti, která by k výrobě využívala jádro vyrobené technologií 3D tisku. Jako součást byla vybrána řídítko silničního kola. K jejich výrobě bylo navrženo použít jádro z rozpustného materiálu. Důvodem pro použití rozpustného jádra byla snaha o dosažení do nejnižší hmotnosti řídítek. Z důvodu, že se jedná o pohledový díl, byla jako materiál výztuže zvolena předimpregnovaná uhlíková vlákna. Celý proces výroby řídítek byl popsán technologickým postupem.

Závěrem lze říci, že použití tištěných jader při práci s kompozitními strukturami přináší řadu výhod. Mezi výhody patří možnost vyrábět rozličné množství tvarů profilů, a tím vyrábět duté kompozitní součásti složitých tvarů, u kterých je tímto způsobem možné dosáhnout nižších hmotností než v případě použití trvalých jader. Další možností je vytvořit s pomocí jader polotovary, které mohou být následně vloženy do vícedílné formy a zalaminovány. Takovýmto způsobem je v dané součásti vytvořena dutina, která může sloužit jako odlehčení, nebo jako místo pro vedení ovládacích lan a táhel, případně elektrické kabeláže. Výhodou tohoto řešení je rovněž možnost využít vytvrzovací programy, které dále nejsou ovlivněny použitým jádrovým materiálem. Lze tedy dosáhnout kratších časů a vyšších vytvrzovacích tlaků. Mimo možnost odlehčení součásti lze tisknuté polotovary využít jako přesně definovaná a cíleně umístěná žebra, která dále umožňují zpevnění vyráběné struktury a umožňují eliminovat deformace vzniklé působením okolních vlivů na vyráběnou součást.



**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] EVANS, Brian. Practical 3D printers. New York: Distributed to the book trade world wide by Springer Science Business Media, 2012. Technology in action. ISBN 14-302-4392-9.
- [2] stratasys.com [online]. [cit. 2017-12-15]. Dostupné z: <http://www.stratasys.com/3d-printers/uprint-se-plus>
- [3] BARNATT, Christopher. 3D printing: Third Edition. 3. dopl. vyd. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2016. ISBN 978-1539655466.
- [4] pinshape.com [online]. [cit. 2017-12-16]. Dostupné z: <https://pinshape.com/blog/popular-3d-printing-filaments-3d-printer-filament-types/>
- [5] 3D Printer filament comparison guide. Matter Hackers [online]. [cit. 2017-11-10]. Dostupné z: <https://www.matterhackers.com/3d-printer-filament-compare>
- [6] Manufacturing solutions [online]. [cit. 2018-01-24]. Dostupné z: <https://www.ndiastorage.blob.core.usgovcloudapi.net/ndia/2013/armament/Dobstetter.pdf>
- [7] Additive manufacturing composite materials for automotive product development [online]. [cit. 2018-01-24]. Dostupné z: [http://www.temp.speautomotive.com/SPEA\\_CD/SPEA2015/pdf/3D/3D1.pdf](http://www.temp.speautomotive.com/SPEA_CD/SPEA2015/pdf/3D/3D1.pdf)
- [8] Soluble cores with a 3D printer [online]. [cit. 2018-01-24]. Dostupné z: [http://www.smg3d.co.uk/3d\\_printer\\_applications/soluble\\_cores\\_with\\_a\\_3d\\_printer](http://www.smg3d.co.uk/3d_printer_applications/soluble_cores_with_a_3d_printer)
- [9] Carbon fibre layup with 3D printer [online]. [cit. 2018-01-24]. Dostupné z: [http://www.smg3d.co.uk/brand/fiber\\_layup\\_with\\_polyjet\\_or\\_fdm\\_3d\\_printers](http://www.smg3d.co.uk/brand/fiber_layup_with_polyjet_or_fdm_3d_printers)
- [10] FDM Sacrificial Cores And Mandrels For Composite Layups [online]. [cit. 2018-01-24]. Dostupné z: [http://www.stratasys.com/-/media/files/education-f123/tags/tag\\_fdm\\_solublecores\\_en\\_0915\\_web.pdf?la=en&hash=FD0FCEE797C472583785593C446BA841BF107A91](http://www.stratasys.com/-/media/files/education-f123/tags/tag_fdm_solublecores_en_0915_web.pdf?la=en&hash=FD0FCEE797C472583785593C446BA841BF107A91).

- [11] B. MIRACLE, Daniel, L. DONALDSON Steven. ASM Handbook Volume 21: Composites. 1. vyd. ASM International, 2001. ISBN 978-0-087170-703-1
- [12] Technický list Hexply® M49 [online]. [cit. 2018-01-24]. Dostupné z: [http://www.hexcel.com/user\\_area/content\\_media/raw/HexPly\\_M49\\_eu\\_DataSheet.pdf](http://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/HexPly_M49_eu_DataSheet.pdf)
- [13] Honeycomb sandwich design technology [online]. [cit. 2017-11-16]. Dostupné z: <http://www.hexcel.com/Resources/Technology-Manuals>
- [14] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [15] composites.ubc.ca [online]. [cit. 2017-12-16]. Dostupné z: <http://composites.ubc.ca/facilities/attachment/8/>
- [16] cyklovb.cz [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://www.cyklovb.cz/combo-integrovana-carbon-silnicni-riditka-a-predstavec-v-jednom-big-ninex>
- [17] NOAKES, Keith. Successful composite techniques: a practical introduction to the use of modern composite materials. 4th ed. Ramsbury: Crowood, 2008. ISBN 9781847970541.
- [18] WANBERG, John. Composite materials: step by step projects. Stillwater, MN: Wolfgang Publications, 2014. ISBN 9781929133369
- [19] AIRD, Forbes. Fiberglass & other composite materials: a guide to high performance non-metallic materials for race cars, street rods, body shops, boats, and aircraft. Rev. and updated ed. New York: HP Books, c2006. ISBN 9781557884985
- [20] WANBERG, John. Composite materials: fabrication handbook. Stillwater, MN: Wolfgang Pub, 2010. ISBN 9781929133932.
- [21] WANBERG, John. Composite materials: fabrication handbook. Stillwater, MN: Wolfgang Pub, 2012. ISBN 9781935828662.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

°C	Stupeň Celsia.
°C/min	Stupeň Celsia za minutu.
%	Procento.
ABS	Acrylonitrile butadiene styrene.
ASTM	American Society for Testing and Materials.
CAD	Computer aided design.
CNC	Computer numeric control.
cm <sup>2</sup>	Centimetr čtvereční.
cm <sup>3</sup>	Centimetr krychlový.
FDM	Fused deposition modeling.
HIPS	High impact polystyrene.
Kč	Koruna česká.
kPa	Kilopascal.
kN	Kilonewton
m	Metr.
mm	Milimetr.
mm/min	Milimetr za minutu.
N	Newton.
ot./min	Otáčky za minutu.
PLA	Polyactic acid.
PVA	Polyvinyl alcohol.
RIM	Reaction injection molding.
STL	Formát souboru standard template library.

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1. 3D tiskárna od firmy Stratasys. [2].....	12
Obr. 2. Technologie FDM.....	13
Obr. 3. Tisková struna. [4].....	13
Obr. 4. Forma (na levé straně) a rozpustné jádro (na pravé straně) vyrobené 3D tiskem [7].....	16
Obr. 5. Forma vyrobená 3D tiskem. [8].....	16
Obr. 6. Porovnání dvoudílné formy a rozpustného jádra. [6].....	17
Obr. 7. Jádro po mechanickém odstranění. [6].....	17
Obr. 8. Rozpustné jádro. [6].....	18
Obr. 9. Kompozitní díly vyrobené s pomocí rozpustného jádra. [6].....	18
Obr. 10. Jednotlivé kroky výroby kompozitního dílu s použitím rozpustného jádra. [10].....	20
Obr. 11. 3D model jádra. [7].....	20
Obr. 12. Nastavení parametrů tisku. [7].....	21
Obr. 13. Vytisknuté jádro. [10].....	21
Obr. 14. Příprava jádra. [10].....	22
Obr. 15. Laminace jádra. [7].....	22
Obr. 16. Příprava na vytvrzení. [7].....	23
Obr. 17. Vytvrzení v autoklávu. [7].....	23
Obr. 18. Rozpouštění jádra. [7].....	24
Obr. 19. Kompozitní díl po odstranění jádra. [10].....	24
Obr. 20. Schéma vakuové infuze. ....	26
Obr. 21. Vytvrzování v peci pomocí vakua. ....	26
Obr. 22. Vytvrzování v autoklávu. [15].....	27
Obr. 23. Technologie navíjení. [14].....	28
Obr. 24. Technologie odstředivého lití. [14].....	29
Obr. 25. Technologie tube roling. [11].....	29
Obr. 26. Technologie oplétání. [14].....	30
Obr. 27. Průřezy jader (vlevo průřez kruh, vpravo průřez vačka). ....	33
Obr. 28. 3D modely jader (vlevo průřez kruh, vpravo průřez vačka). ....	34
Obr. 29. 3D tiskárna Stratasys Dimension SST 768. ....	34

Obr. 30. Jádra (bílé) s podporou (černé) vlevo pro průřez kruh, vpravo pro průřez vačka.....	35
Obr. 31. Detailní pohled na řez strukturou voštiny.....	36
Obr. 32. Snímek obrazovky programu CatalystEX – nastavení parametrů tisku. ....	36
Obr. 33. Snímek obrazovky softwaru CatalystEX – rozvržení dílů na tiskové podložce.....	37
Obr. 34. Jádro obalené separační fólií. ....	38
Obr. 35. Znázornění špatného uložení vrstev. ....	39
Obr. 36. Hotová forma pro kruhový průřez. ....	39
Obr. 37. Model formy pro průřez ve tvaru kruhu. ....	40
Obr. 38. Hotová forma pro vačkový průřez. ....	40
Obr. 39. Model spodní poloviny formy načtený v programu NX.....	41
Obr. 40. Vygenerované dráhy nástroje při hrubování tvarových dutin.....	42
Obr. 41. Výsledek simulace obrábění v programu NX.....	43
Obr. 42. Proces výroby formy na CNC stroji.....	44
Obr. 43. Zkušební vzorky před působením vakua. ....	45
Obr. 44. Zkušební vzorky během působení vakua.....	45
Obr. 45. Zkušební vzorek po působení vakua.....	46
Obr. 46. Použitý separační vosk. ....	47
Obr. 47. Stříhání materiálu výztuže podle šablony.....	47
Obr. 48. Zkušební tělesa Typ 1. (vlevo průřez kruh, vpravo průřez vačka). ....	48
Obr. 49. Zkušební tělesa Typ 1. při ukládání do forem. ....	48
Obr. 50. Zkušební tělesa Typ 1. uzavřeny ve formě. ....	49
Obr. 51. Zkušební tělesa po vytvrzení (vlevo průřez kruh, vpravo průřez vačka).....	49
Obr. 52. Zkušební tělesa Typ 2. (vlevo průřez kruh, vpravo průřez vačka). ....	50
Obr. 53. Jádro vzorku Typ 2. připravené k vytvrzení (bez použití strhávací tkaniny). ....	50
Obr. 54. Jádro vzorku Typ 2. se strhávací tkaninou připravené k zabalení do separační fólie.....	51
Obr. 55. Nezačištěná jádra se třemi vrstvami po vytvrzení (vlevo průřez kruh, vpravo vačka). ....	51
Obr. 56. Hotové nezačištěné vzorky Typ 2. po vytvrzení (vlevo průřez kruh, vpravo vačka). ....	52
Obr. 57. Pec použitá pro vytvrzení. ....	53

Obr. 58. Forma se vzorky po vytvrzení.....	53
Obr. 59. Schéma zkoušky tříbodovým ohybem pro kruhový průřez tělesa. ....	54
Obr. 60. Univerzální zkušební stroj Zwick 1456.....	55
Obr. 61. Vzorek Typ 1. – kruh při zkoušce.....	56
Obr. 62. Vzorek Typ 1. – kruh po zkoušce. ....	57
Obr. 63. Vzorek Typ 1. – kruh detail porušení. ....	57
Obr. 64. Graf naměřených hodnot Typ 1. – kruh.....	58
Obr. 65. Vzorek Typ 1. – vačka při zkoušce.....	59
Obr. 66. Vzorek Typ 1. – vačka po zkoušce. ....	60
Obr. 67. Vzorek Typ 1. – vačka detail porušení. ....	60
Obr. 68. Graf naměřených hodnot Typ 1. – vačka.....	61
Obr. 69. Vzorek Typ 2. – kruh při zkoušce.....	62
Obr. 70. Vzorek Typ 2. – kruh po zkoušce. ....	63
Obr. 71. Vzorek Typ 2. – kruh detail porušení. ....	63
Obr. 72. Graf naměřených hodnot Typ 2. – kruh.....	64
Obr. 73. Vzorek Typ 2. – vačka při zkoušce.....	65
Obr. 74. Vzorek Typ 2. – vačka po zkoušce. ....	66
Obr. 75. Vzorek Typ 2. – vačka detail porušení. ....	66
Obr. 76. Graf naměřených hodnot Typ 2. – vačka.....	67
Obr. 77. Schéma návrhu přípravku s lepeným spojem. ....	69
Obr. 78. Model návrhu přípravku s lepeným spojem. ....	69
Obr. 79. Schéma návrhu přípravku s upnutím do kleštiny.....	70
Obr. 80. Model návrhu přípravku s upnutím do kleštiny.....	70
Obr. 81. Schéma návrhu přípravku s upnutím pomocí kolíku.....	71
Obr. 82. Model návrhu přípravku s upnutím pomocí kolíku. ....	71
Obr. 83. Sestavený model přípravku návrh 1. spoj pomocí lepidla.....	72
Obr. 84. Řídítka od výrobce Ninex. [16] .....	73
Obr. 85. Sestava navrhovaných kompozitních řídítek. ....	74
Obr. 86. Návrh tištěného jádra z rozpustného materiálu pro kompozitní řídítka silničního kola. ....	75
Obr. 87. Návrh kompozitních řídítek z uhlíkových vláken pro silniční kolo. ....	76
Obr. 88. Rozpad sestavy kompozitních řídítek s držákem.....	78

**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1. Vlastnosti ABS pro 3D tisk. [4].....	14
Tab. 2. Vlastnosti PLA pro 3D tisk. [4].....	14
Tab. 3. Vlastnosti HIPS pro 3D tisk. [4].....	15
Tab. 4. Vlastnosti PVA pro 3D tisk. [4] .....	15
Tab. 5. Vytvrzovací časy v závislosti na vytvrzovací teplotě. [12] .....	25
Tab. 6. Technické parametry 3D tiskárny Stratasys Dimension SST 768. ....	35
Tab. 7. Parametry sloupové vrtačky Optimum B40 GSM. ....	43
Tab. 8. Parametry CNC stroje AZK HWT C-442 CNC. ....	43
Tab. 9. Technické údaje zkušebního stroje Zwick 1456.....	54
Tab. 10. Porovnání výsledků pro jednotlivé zkušební vzorky.....	68
Tab. 11. Podmínky vytvrzení pro navrhovanou součást. ....	77

## SEZNAM PŘÍLOH

Všechny přílohy jsou obsaženy na přiloženém CD.

P I Diplomová práce

P II Modely jader

P III Modely forem

P IV Modely navrhovaných přípravků pro zkoušku krutem

P V Model navrhovaných řídítek

P VI Naměřená data ze zkoušky ohybem

P VII Soubory programu NX 11 pro vygenerování CNC kódů

P VIII Technický list s vytvrzovacími podmínkami pryskyřice DT806