

# Konstrukční řešení RTM formy pro zadaný díl

Bc. Jan Horák

---

Diplomová práce  
2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická  
Ústav výrobního inženýrství  
akademický rok: 2015/2016

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan Horák**  
Osobní číslo: **T14529**  
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Konstrukční řešení RTM formy pro zadaný díl**

Zásady pro vypracování:

1. I. Literární rešerše
2. Formy pro kompozitní materiály, rozdělení, charakterizace
3. Materiály forem, skladba kompozitních forem, modely a výroba forem
4. Polymerní kompozitní materiály, rozdělení, základní vlastnosti
5. II. Experimentální část
6. Návrh modelu pro zadaný díl
7. Konstrukce formy, návrh materiálového složení s ohledem na požadované parametry
8. Formové gelcoaty aktuální situace a návrh inovace v oblasti složení
9. Návrh výrobních parametru, cenová kalkulace pro dané množství
10. Diskuze dosažených výsledku
11. Závěr

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**Dle doporučení vedoucího DP**

Vedoucí diplomové práce:

**doc. Ing. Soňa Rusnáková, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

**8. ledna 2016**

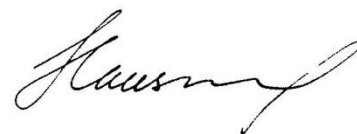
Termín odevzdání diplomové práce:

**13. května 2016**

Ve Zlíně dne 26. ledna 2016



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



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

Příjmení a jméno: Horak Jan.....

Obor: Výrobní inženýrství

## 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 12.5.2016.....

  
.....

---

<sup>1)</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 závěrečných prací:

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

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k 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 pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

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

<sup>2)</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>3)</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 užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

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

## **ABSTRAKT**

Tato práce se zabývá konstrukčně technologickým řešením RTM formy pro zadaný díl. V teoretické části práce pojednává o formách pro kompozitní materiály, jejich rozdělení a charakterizaci. Dále jsou zde zmíněny materiály pro výrobu forem a zásady výroby forem. V práci je také uvedena charakteristika kompozitních materiálů včetně jejich rozdělení a popisu základních vlastností. Poslední kapitola popisuje RTM technologii a její modifikace. Praktická část je zaměřená na konstrukční řešení RTM formy, volbu materiálů formy a výrobku, technologický postup výroby a cenovou kalkulaci. V závěru práce je provedena diskuze výsledků.

Klíčová slova: RTM, forma, model, konstrukce, technologie výroby.

## **ABSTRACT**

This work deals with the design technological solutions RTM molds for a given part. The theoretical part covers forms for composite materials, their distribution and characterization. There are also mentioned materials for mold and mold manufacturing principles. The work is also given the characteristics of composite materials, including their classification and description of the basic features. The last chapter describes RTM technology and its modifications. The practical part is focused on design solutions RTM mold, choice of materials and product forms, technological process of production and pricing. The conclusion is a discussion of the results.

Keywords: RTM, shape, pattern, design, production technology.

V první řadě bych chtěl poděkovat vedoucí diplomové práce doc. Ing. Soně Rusnákové, Ph.D. za její vstřícný přístup a cenné rady a připomínky které mi napomohly k dokončení diplomové práce.

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

# OBSAH

ÚVOD.....	10
I TEORETICKÁ ČÁST.....	11
1 FORMY PRO KOMPOZITNÍ MATERIÁLY, ROZDĚLENÍ, CHARAKTERIZACE .....	12
1.1 CHARAKTERIZACE.....	12
1.2 ROZDĚLENÍ.....	12
1.3 PROCESY S OTEVŘENOU FORMOU .....	12
1.3.1 Formy pro technologii lay-up a spray-up.....	12
1.3.2 Formy pro technologii vakuového vaku .....	13
1.4 PROCES S UZAVŘENOU FORMOU .....	14
1.4.1 Formy pro lisování .....	15
1.4.2 Formy pro technologii infuze pryskyřice.....	15
2 MATERIÁLY FOREM, SLKADBA KOMPOZITNÍCH FOREM, MODELY A VÝROBA FOREM.....	17
2.1 MATERIÁLY FOREM.....	17
2.1.1 Kovové materiály forem .....	17
2.1.1.1 Hliník .....	18
2.1.1.2 Ocel.....	18
2.1.1.3 Invar .....	19
2.1.1.4 Slitiny mědi.....	19
2.1.1.5 Kirksite.....	19
2.1.2 Nekovové materiály forem.....	19
2.1.2.1 Keramika.....	20
2.1.2.2 Dřevo .....	21
2.1.2.3 Kompozitní formy.....	21
2.1.2.4 Monolitický grafit .....	21
2.2 KONSTRUKCE A VÝROBA FORMY PRO KOMPOZITNÍ MATERIÁLY .....	22
2.2.1 Master model.....	23
2.2.2 Pozice vtoku ve formě.....	24
2.2.3 Okraje formy bez těsnění .....	24
2.2.4 Okraje formy s těsněním .....	25
2.2.5 Okraj s tenkou mezerou .....	27
2.2.6 Vedení formy .....	27
2.2.7 Vyhazovací systém.....	28
2.2.8 Úprava povrchu formy .....	28
2.3 PREFORMY .....	29
3 POLYMERNÍ KOMPOZITNÍ MATERIÁLY, ROZDĚLENÍ, ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI.....	30
3.1 CHARAKTERISTIKA KOMPOZITNÍHO MATERIÁLU .....	30
3.2 ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI.....	31
3.2.1 Pevnost a tuhost kompozitních materiálů .....	31
3.3 ROZDĚLENÍ KOMPOZITŮ .....	32
3.3.1 Typ materiálu matrice .....	32
3.3.1.1 Termoplastická.....	32



3.3.1.2	Reaktoplastická .....	32
3.3.2	Typ geometrie výztuže .....	33
3.3.2.1	Částicové kompozity .....	33
3.3.2.2	Vláknité kompozity .....	33
<b>4</b>	<b>RTM TECHNOLOGIE .....</b>	<b>35</b>
4.1	POPIS RTM TECHNOLOGIE .....	35
4.2	RTM VYTVRZOVÁNÍ .....	36
4.3	RTM FORMA .....	36
4.4	RTM VSTRÍKOVACÍ JEDNOTKA .....	36
4.5	LRTM (LIGHT RESIN TRANSFER MOLDING) .....	38
4.6	HP-RTM (HIGH PRESSURE RESIN TRANSFER MOLDING) .....	39
4.7	SQRTM .....	39
4.8	VÝROBKY RTM TECHNOLOGIÍ .....	40
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>42</b>
<b>5</b>	<b>CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE .....</b>	<b>43</b>
<b>6</b>	<b>KONSTRUKČNÍ NÁVRH A POSTUP VÝROBY RTM FORMY PRO DANÝ DÍL .....</b>	<b>44</b>
6.1	NÁVRH SKÁKACÍ PRUŽINY .....	45
6.1.1	Návrh materiálového složení pružiny .....	46
6.2	NÁVRH MODELŮ PRO VÝROBU FORMY .....	49
6.3	KONSTRUKČNÍ NÁVRH LRTM FORMY A OCELOVÉHO RÁMU .....	50
6.3.1	Návrh materiálu formy .....	51
6.3.2	Konstrukční návrh rámu formy .....	53
6.3.3	Řešení umístění vtoků a vakuových portů .....	55
6.4	TECHNOLOGICKÝ POSTUP VÝROBY LRTM FORMY .....	56
<b>7</b>	<b>NÁVRH VÝROBNÍCH PARAMETRŮ A CENOVÁ KALKULACE .....</b>	<b>62</b>
7.1	CENOVÁ KALKULACE MATERIÁLU: .....	63
<b>8</b>	<b>NÁVRH TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ VÝROBY PRUŽINY .....</b>	<b>64</b>
<b>9</b>	<b>DISKUZE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>65</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>67</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>69</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>72</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>73</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>75</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>76</b>

## ÚVOD

Cílem této diplomové práce je navrhnout konstrukčně technologické řešení RTM formy pro zadaný díl, včetně volby materiálu formy a zadaného dílu, a přiblížit čtenáři problematiku spojenou s konstrukcí forem pro výrobu kompozitních výrobků.

Daný díl bude vyráběn technologií Light Resin Transfer Moulding dále jen LRTM. Technologie LRTM je modifikací klasické technologie RTM a přináší řadu vylepšení, ale nese si i několik nevýhod. Velkou výhodou jsou nízké náklady na materiál formy a snadná vyrobiteľnosť a opraviteľnosť. Nevýhodou je nemožnosť použiť formu pri vysokých tlaciach z dôvodu nízkej tuhosti formy. Tuto technologii je vhodné využiť na střední sériie do 500 kusů.

Cílem této práce je i cenová kalkulace a stanovení technologických parametrů. Konstrukční řešení bude probíhat v programu CATIA v5 a přílohou diplomové práce bude výkresová dokumentace.

V dnešní době vystupují kompozitní materiály do popředí. Zásahu na tom má především jejich nízká hmotnost a pevnost srovnatelná s kovy. Stále více kovových konstrukcí je nahrazováno kompozitními z důvodu úspory hmotnosti při zachování pevnosti a tuhosti. Především v automobilovém, leteckém a sportovním průmyslu se s kompozity setkáváme stále častěji.

Kompozitní materiály jsou materiály budoucnosti.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 FORMY PRO KOMPOZITNÍ MATERIÁLY, ROZDĚLENÍ, CHARAKTERIZACE

Pod pojmem forma pro kompozitní materiály rozumíme nástroj, jenž udává budoucí tvar výrobku. Typ formy, její tvar nebo zvolený materiál se odvíjí od zvolené technologie výroby kompozitního výrobku. [1]

## 1.1 Charakterizace

Role formy je důležitá ve výrobním procesu kompozitních dílů. Design formy a její materiál vychází z požadavků na formu zachovat si svůj tvar během výrobního procesu, fungovat za pracovní teploty při působení zatížení po určitý čas. Geometrie součásti je omezena formou. Tvarově složité součásti vyžadují tvarově složitou formu. [1]

## 1.2 Rozdělení

Máme několik typů forem z různých materiálů, jejich výběr ovlivňuje několik parametrů.

Provozní teplota a tlak zásadně určuje materiál formy. Dalším kritériem pro výběr formy je viskozita zpracovávaného materiálu, podle které volíme typ těsnícího systému formy.

Důležitým parametrem pro výběr formy a jejího materiálu je také požadovaná životnost a sériovost výroby. Pro velké série volíme formy kovové nebo hliníkové, které mají vysokou životnost a odolnost proti poškození. Pro malé série nebo pro prototypové součásti volíme formy dřevěné, polymerní nebo kompozitní, které nemají tak velkou životnost jako formy kovové, tuto nevýhodu ale vyvažují svou nízkou cenou. [2]

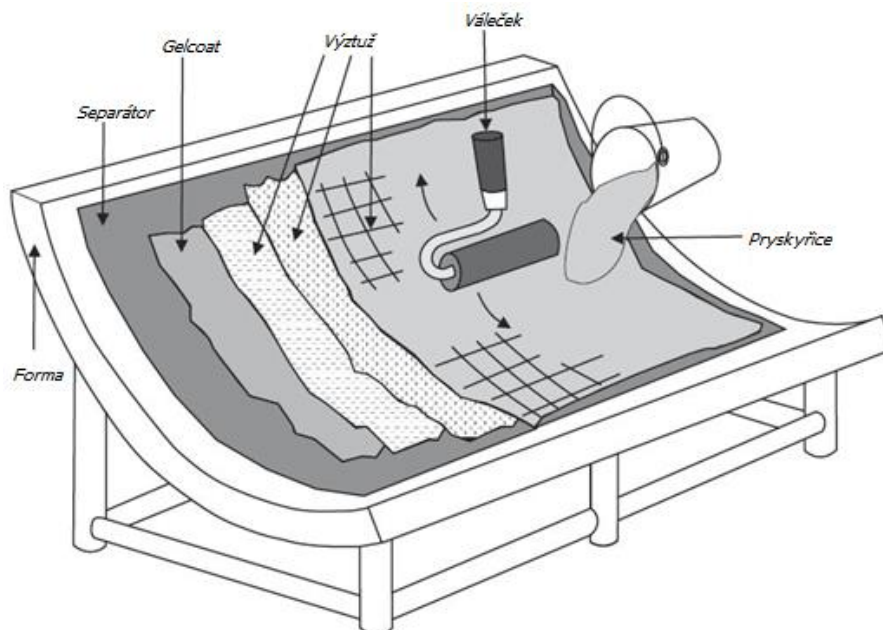
## 1.3 Procesy s otevřenou formou

Procesy s otevřenou jsou nejjednodušší a nejstarší technologií pro výrobu kompozitních výrobků. Forma je jednodílná (otevřená). Pro zlepšení procesu se na otevřenou formu může přiložit flexibilní vak. Výrobní technologie v této kategorii jsou: lay-up, spray-up a ruční nebo automatické pokládání prepregů. [3]

### 1.3.1 Formy pro technologii lay-up a spray-up

U technologií lay-up a spray-up (ruční laminování a laminování pomocí stříkáčkové pistole) se výztuž spolu s pryskyřicí nanáší ve vrstvách do požadované tloušťky buď ručně s pomocí

ručních nástrojů jako je váleček a štětec, nebo pomocí sekací pistole, která seká vlákna výztuže na malé kousky a tryská je, spolu s pryskyřicí na stěnu formy. [3]



Obrázek 1 Forma pro ruční laminování s potřebnými komponenty [4]

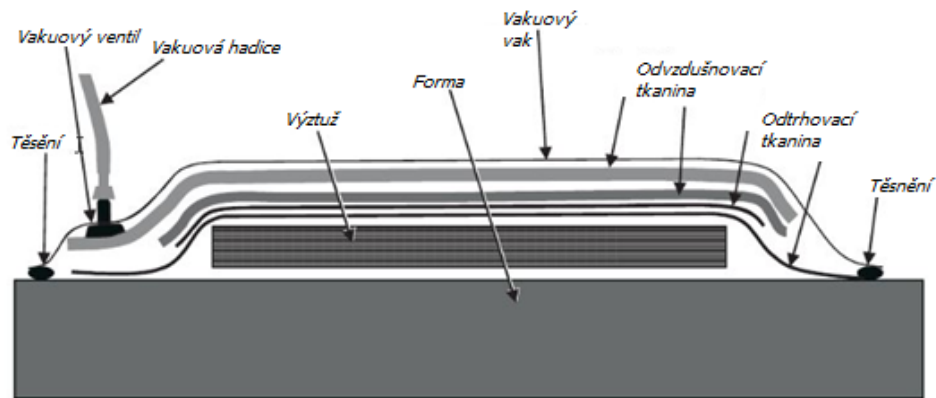
Vzhledem k tomu že forma definuje tvar finálního výrobku, je nutné věnovat pozornost zajištění přesných rozměrů a vlastností povrchu. Pro výrobu forem mohou být použity různé materiály, nejčastěji kovy a kompozity. Volba materiálu závisí na:

- Požadované životnosti formy (kovové formy mají delší životnost)
- Teplotě při vytvrzování (kovové formy snesou vyšší teploty)
- Procesnímu tlaku (kovové formy snesou vyšší tlak)
- Teplotní roztažnosti (kompozitní formy vykazují lepší výsledky)
- Ceně (kompozitní formy jsou mnohem levnější)

Vzhledem k tomu že výrobky při lay-up a spray-up technologii vytvrzují za teploty okolí a při atmosférickém tlaku, jsou kompozitní formy ve většině případů vyhovující. [4]

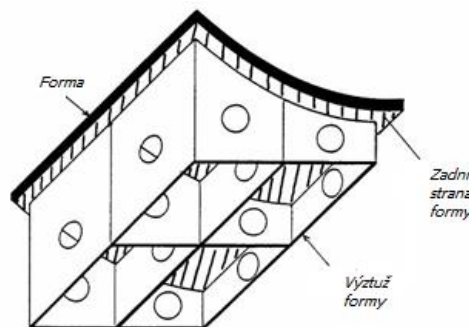
### 1.3.2 Formy pro technologii vakuového vaku

Proces s jednou flexibilní polovinou formy nazýváme metoda vakuového vaku. Lisování vláken se provádí pomocí tlaku vakuového vaku na výztuž. Formy bývají jednoduché, na pevnou polovinu formy se přikládá vakuový vak. [2]



Obrázek 2 Forma pro vakuovou infuzi s potřebnými komponenty [4]

Po přiložení vaku na pevnou polovinu formy a naplnění formy pryskyřicí následuje vytvrzování. S ohledem na tlak a teplotu, kterou můžeme v průběhu vytvrzování ovlivňovat, máme k dispozici dvě technologie vytvrzování. Jedna je vytvrzování v autoklávu a druhá mimo autokláv. Formy použité v autoklávu jsou obvykle vyráběny z kovu nebo kompozitu a musí vydržet tlakové síly a teplotu při vytvrzování. Proto se formy zpevňují rošty, aby bylo dosaženo vyšší odolnosti proti tlaku. Viz obr. 5. [5]



Obrázek 3 Vyztužení formy [5]

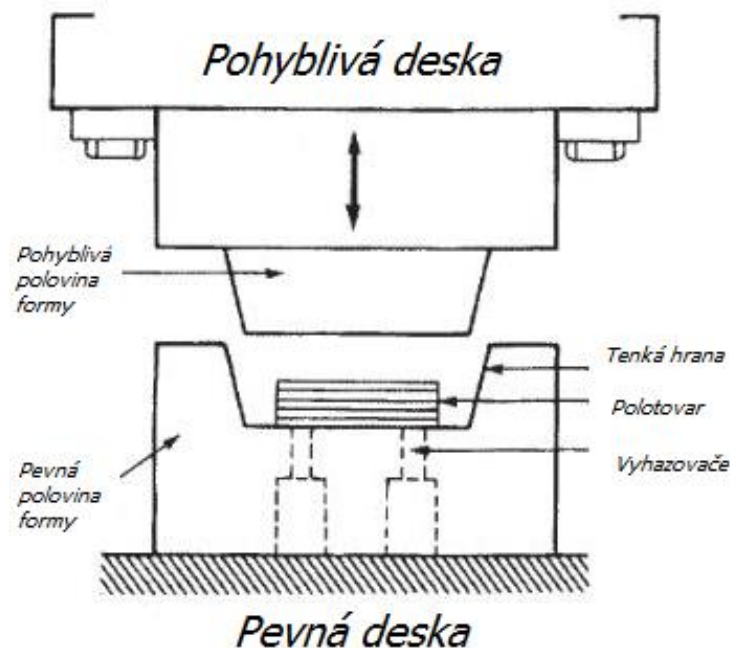
Pokud proces vytvrzování nevyžaduje vysokých tlaků a teplot, musí být forma vyrobena z vhodného materiálu. Pro pokročilé kompozitní díly jsou formy vyrobeny převážně z výkonných epoxidů vyztužených uhlíkovými vlákny nebo z kovu či keramiky v závislosti na sériovosti výroby. [4]

#### 1.4 Proces s uzavřenou formou

Formy pro procesy s uzavřenou formou se skládají minimálně ze dvou pevných částí. Do jedné z částí se vkládá výztuž. Před prosycováním a během vytvrzování se formy sevrou. [4]

### 1.4.1 Formy pro lisování

Při lisování plastů je určité množství materiálu (nevytvrzené pryskyřice a výztuže) vloženo do dutiny formy. Poté se forma uzavře, čímž se vygeneruje tlak, který stlačí materiál a ten vyplní rovnoměrně dutinu formy. Zatím co je materiál pod tlakem, je zahříván čímž dojde k vytvrzení. Tento proces probíhá za vysokých tlaků a formy jsou proto umístěny do lisů. Formy jsou téměř vždy vyrobeny z kovu, neboť tlaky při lisování jsou příliš vysoké. Nejběžnější kovový materiál je nástrojová ocel, a vzhledem k abrazivní povaze kompozitních materiálů, bývají funkční plochy formy chromovány. Pochromování také napomáhá k vyjmutí vylisku z formy. Formy jsou obvykle zahřívány deskou, ke které jsou ukotveny. K vyhození vylisků z formy slouží vyhazovače. Před vyhozením musí být vylisek dokonale vytvrzen, jinak by mohlo dojít k jeho poškození vyhazovači. [4]



Obrázek 4 Forma pro lisování kompozitů [6]

### 1.4.2 Formy pro technologii infuze pryskyřice

Při infuzních technologiích se vkládá do dutiny formy výztuž, která může být vytvarovaná do podoby budoucího výrobku. Takové výztuži říkáme preform. Pryskyřice je do formy vháněna buď pomocí tlaku, nebo vakua až do úplného smáčení vláken. Resin transfer moulding, vakuum assisted resin transfer moulding a resin film infusion jsou některé z technologií infuze pryskyřice, které dnes používáme. [3]

Při infuzi pryskyřice se využívají uzavřené formy vyrobené ze dvou nebo více částí. Při konstrukci takové formy je nutné dodržovat několik zásad. Pro úspěšné vyjmutí součásti z formy je nutné stěny formy vyrobit se skosením pod uhlím nejméně 1-5°. Dutina formy by měla být řádně utěsněna, aby bylo zamezeno úniku těkavých a toxických látek. Forma může být opatřena temperačním systémem v závislosti na použité pryskyřici a technologických podmínkách. Zásadní pro infuzi pryskyřice je umístění vtokového ústí a výdechu. Polohu vtokového ústí je nutné volit s ohledem na optimální zaplnění formy. Při volbě polohy ústí je možné využít počítačových programů. Výdech na formě složí k uniku vzduchu z dutiny formy. Pro zamezení vzniku vzduchových kapes ve formě a následných vzduchových bublin ve výrobku je možné na výdech připojit vakuovou pumpu a tím zajistit dokonalé prosycení výztuže pryskyřicí. Umístění výdechu hraje klíčovou roli při konstrukci formy. Materiál forem pro infuzi pryskyřice bývá nejčastěji kov nebo komposit v závislosti na použitých procesních podmínkách jako je teplota a tlak. Dále hraje roli požadovaná životnost formy. [2]



## 2 MATERIÁLY FOREM, SLKADBA KOMPOZITNÍCH FOREM, MODELY A VÝROBA FOREM

### 2.1 Materiály forem

Formy pro kompozitní materiály mohou být vyrobeny z téměř jakéhokoliv materiálu.

Pro součásti vytvrzované při nízké teplotě, nebo pro výrobu prototypů, kde není vyžadováno přesné dodržení rozměrové přesnosti, mohou být formy či modely vyrobeny z materiálů jako skelné vlákno, vysoko hustotní pěny, obrobené epoxidové desky nebo dokonce hlína, dřevo či sádra. Formy, které mají vydržet mnoho cyklů a u nichž je požadována vysoká jakost povrchu a rozměrová stálost, bývají vyrobeny z ušlechtilých kovů. Formy, které slouží k výrobě vysoko výkonných kompozitních součástí, mohou být vyrobeny z uhlíkových vláken, monolitického grafitu, keramiky nebo kovu kterým bývá ocel nebo hliník. Každý materiál nabízí jedinečné výhody i nevýhody. [36].

Při výběru materiálu, ze kterého bude forma vyrobena, je nutné zohlednit mnoho materiálových aspektů, jimiž jsou:

- Prostorová přesnost
- Prostorová stálost
- Životnost
- Teplotní roztažnost
- Teplotní stálost
- Cena materiálu
- Obrobitelnost
- Náklady na údržbu formy
- Hustota (hmotnost)

Je nutné zohlednit i technologii výroby, pro kterou bude forma použita. [5]

#### 2.1.1 Kovové materiály forem

Kovové materiály se vyznačují svou vysokou životností. Jsou proto vhodné pro formy na výrobky, které budeme vyrábět ve velkých sériích. Nejrozšířenějším kovovým materiálem pro výrobu forem je hliník a ocel. Oba tyto materiály se vyznačují svou relativně nízkou cenou, dobou životností a tepelnou vodivostí. [5]

### 2.1.1.1 *Hliník*

Hliník jako materiál pro formy je jeden z široce rozšířených materiálů. Využívá se na ploché nebo malé a mírně tvarované formy. Snadno se odlévá a obrábí. Je lehký, čímž usnadňuje manipulaci. Má vynikající tepelnou vodivost pro přenos tepla při tvarování a vytvrzování. Hliník se jako materiál formy volí pro aplikace, při nichž se teplota pohybuje pod 200 °C. Hliníkové formy jsou vyhovující pro jednoduché formy bez úzkých tolerancí.

Výhody použití hliníku:

- Nízká cena
- Snadno obrobiteľný
- Nižší hmotnosť v porovnaní s ocelí
- Snadno opraviteľný

Nevýhody použití hliníku:

- Prostorová stálost
- Použitelný pouze při teplotách nižších než 200°C
- Malá odolnost proti vrypu [5]

### 2.1.1.2 *Ocel*

Ocel je osvědčený materiál pro výrobu forem s dlouhou životností. Je vhodná i pro formy na složité součásti. Ocel je rozšířený materiál pro výrobu forem díky své nízké ceně a nižšímu koeficientu teplotní roztažnosti než v případě hliníku. Pro velké formy je ocel lepší volbou než hliník.

Výhody použití oceli jsou:

- Velká životnost
- Snadná svařitelnost
- Opravitelnost
- Kvalita povrchu

Mezi nevýhody patří:

- Deformace
- Teplotní roztažnost
- Hmotnost [5]

### 2.1.1.3 *Invar*

Snad nejvíce známý z kovových materiálů pro výrobu forem je Invar 36 (36% niklu) nebo Invar 42 (42% niklu). Jedná se o nízkouhlíkovou austenitickou ocelovou slitinu s velmi nízkým koeficientem teplotní roztažnosti ( $\alpha = 1.2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ). Invar má výbornou prostorovou stálost, je odolnější než ocel, má všechny výhody oceli plus jako bonus nízký koeficient teplotní roztažnosti. [5]

### 2.1.1.4 *Slitiny mědi*

Formy vyrobeny ze slitin mědi se vyznačují vysokou teplotní vodivostí (dvakrát až třikrát vyšší než v případě ocelových a hliníkových forem). Mají vysokou pevnost v tahu a dobrou odolnost vůči opotřebení a korozi. Formy mohou být vyrobeny jako monolitické, nebo měď může být použita pouze na část formy, která je v přímém kontaktu s výrobkem a zbytek formy může být vyroben z jiného materiálu. Nízká pórovitost a jemná struktura zrna zaručuje dobré detaily a vysoký lesk formy. Formy ze slitin mědi mohou být obráběny konvekčními obráběcími metodami, a oprava forem není složitá. [5]

### 2.1.1.5 *Kirksite*

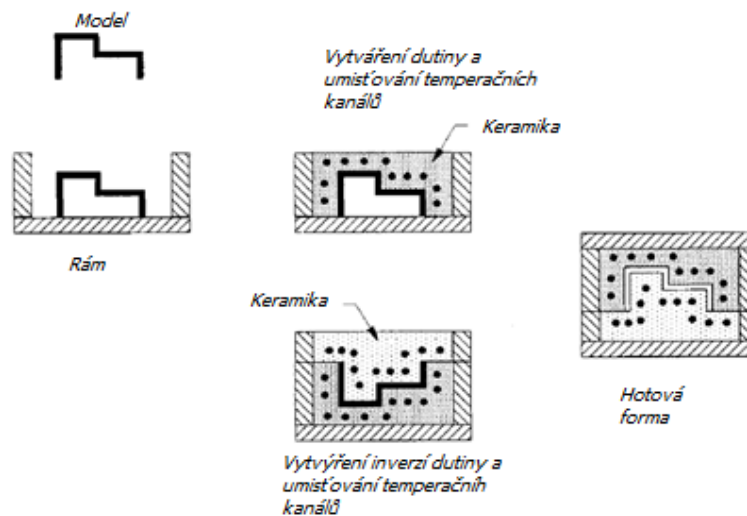
Kirskitové formy na základu slitin zinku mohou být odlévány do složitých tvarů, s jemnými detaily a hladkými plochami s vysokým povrchovým leskem. Temperanční kanály mohou být vyrobeny přímo ve formě a materiál má dobré tepelné vlastnosti. Odlévané kirksitové formy jsou ideální pro nízkonákladovou produkci v krátkém čase a hodí se také pro prototypové formy. Nicméně, při odlévání velkých forem mohou být patrné relativně velké deformace. Vzhledem k nízké pevnosti a tvrdosti povrchu, jsou kirksitové formy nevhodné pro velkosériové použití. Tento materiál je sám o sobě dražší než hliníkové slitiny, to může být vyváženo naopak snadnou recyklovatelností. [7]

## 2.1.2 **Nekovové materiály forem**

Nekovové materiály pro výrobu forem lze rozdělit na dvě základní skupiny. Do první skupiny patří materiály vhodné pro prototypové formy, kde nám záleží především na nízké pořizovací ceně formy a nezáleží příliš na přesnosti výroby nebo formy s malou předpokládanou životností. Sem patří například dřevo, sádra a polymerní formy. Druhá skupina materiálů jsou materiály jako keramika nebo grafit. Tyto materiály mají mnohem vyšší cenu než dřevo nebo polymery. Jejich použití je vhodné na formy pro více sérií, kde je kladen důraz na tvarovou přesnost. [7]

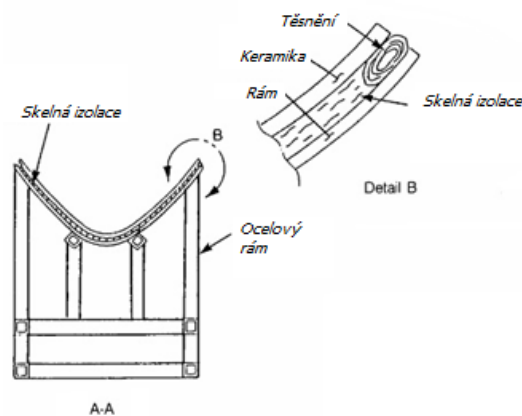
### 2.1.2.1 Keramika

Chemicky lepená keramika (CBC) je organický materiál, jehož vazby mohou být vytvořeny za pomoci chemické reakce při nízké teplotě. Míchání a odlévání keramiky může být prováděno ve vakuu, aby se zabránilo tvorbě pórů, do keramiky mohou být přidána skelná vlákna za účelem zvýšení pevnosti a snížení smrštění. Výroba formy probíhá tak že se keramika rozmístí okolo modelu s temperačními kanály. Viz Obr. 5 [7]



Obrázek 5 Postup výroby keramické formy [7]

Keramika má relativně vysoký pracovní teplotní rozsah (nad 400°C) a nízkou teplotní vodivost, kterou je možné zvýšit přidáním kovových částic. Přestože formy vyrobeny z keramiky jsou velmi tvrdé a odolné proti vrypům, pevnost v ohybu je velmi nízká, a forma je náchylná na poškození. [7]



Obrázek 6 Keramická forma [5]

### **2.1.2.2 Dřevo**

Dřevo jako materiál forem je levné a umožňuje výrobu formy v domácích podmínkách. Dřevo se obzvláště hodí pro prototypové formy s malou sérií. V průmyslu se využívají prototypové formy na výrobky, které musí být vyrobeny rychle, čemuž dřevo vyhovuje díky své snadné obrobiteľnosti. Dřevěné formy jsou schopny snést až 100 cyklů výroby.

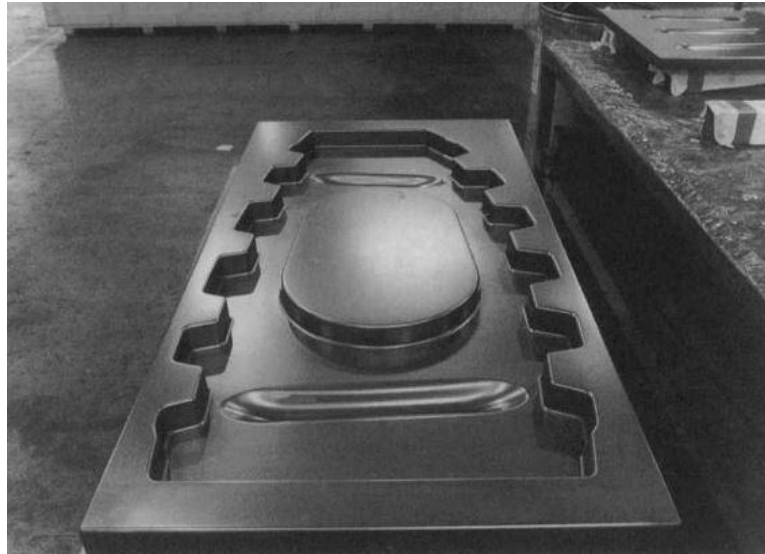
Dřevěné formy jsou vyráběny pomocí konvekčních obráběcích metod. Před výrobou forem se dřevo musí vysušit. Pokud bychom použili nevysušené dřevo, forma by se při vytvrzování pryskyřice začala rychle vysušet a mohlo by dojít k deformaci a zničení formy. Vlastnosti dřeva můžeme zlepšit pomocí impregnace. [35]

### **2.1.2.3 Kompozitní formy**

Kompozitní materiály jsou vhodné pro formy na výrobu prototypových dílů nebo dílů v malé sérii. Kompozity jsou snadno tvarovatelné a obrobiteľné. Kompozitní formy vydrží i 1000 cyklů. Kompozitní forma musí být zcela vytvrzena před následným opracováním. Při procesu vytvrzování pryskyřice dochází ke změně tvaru a objemu v důsledku teplotní roztažnosti. K těmto změnám musí dojít před finálním dokončením formy pomocí obrábění. Vytvrzování obvykle trvá 24 až 48 hodin. Po opracování je dobré povrch kompozitní formy potáhnout smaltem nebo polyuretany aby se zabránilo degradaci materiálu a další rozměrové změně. Kompozitní formy jsou 2 – 5x rychlejší na výrobu než stejné formy z oceli či hliníku. [35]

### **2.1.2.4 Monolitický grafit**

Monolitické grafitové formy jsou obráběny z pevných bloků grafitu. Díky skvělé obrobiteľnosti s použitím vysokých řezných rychlostí, lze grafitové formy vyrobit padesátkrát až stokrát rychleji než stejné formy z hliníkových slitin. Není nutné odstraňovat žádné vnitřní pnutí mezi obráběcími operacemi. Grafitové formy jsou vhodné pro výrobky z karbon-epoxidových laminátů, neboť grafit má podobný koeficient teplotní roztažnosti. Vysokoteplotní kapacita grafitu činí formu z něj vyrobenou vhodnou pro procesy probíhající za vysoké teploty. Nevýhodou grafitu je jeho vysoká cena, která ho jako nástrojový materiál omezuje pouze na použití maloobjemových součástí především v kosmickém průmyslu a příbuzných odvětvích. [7]



*Obrázek 7 Forma z monolitického grafitu [5]*

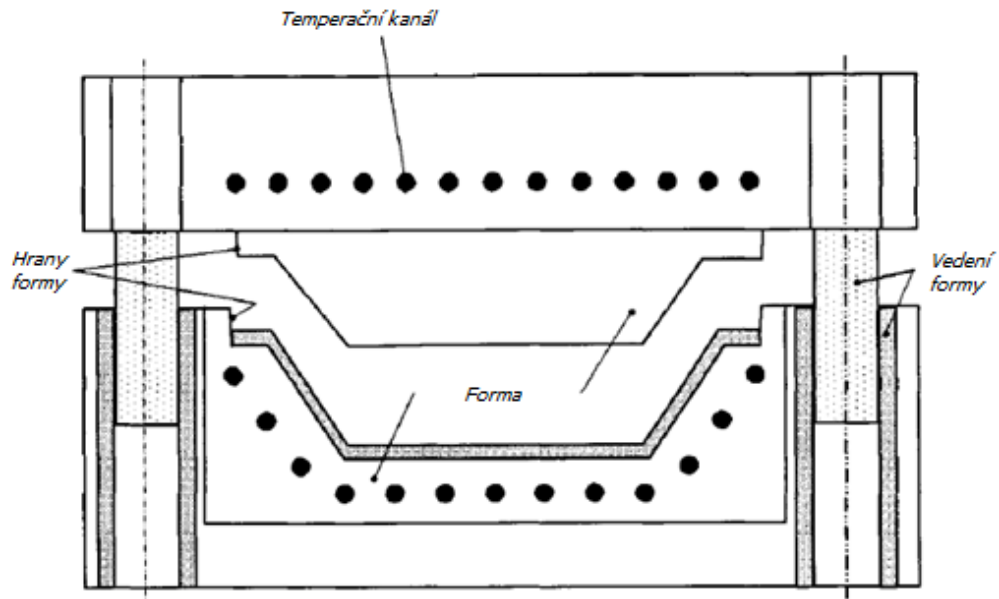
## **2.2 Konstrukce a výroba formy pro kompozitní materiály**

Konstrukce formy je silně ovlivněna metodou použitou pro její výrobu. Metody na výrobu forem můžeme rozdělit do tří kategorií a to přímé, nepřímé a hybridní. V přímé metodě je dutina ve formě vytvořena přímo za pomoci obrábění. Často se využívá CAD/CAM modelování. V nepřímé metodě se používá master modelu k odlévání formy nebo jsou na master model nanášeny vrstvy laminátu a je tak vytvořen negativ modelu. V hybridní metodě se kombinují prvky přímé a nepřímé metody výroby forem. [8]

Při designování formy bychom jako první věc měli zvažovat procesní a technologické parametry, při nichž bude vyráběn budoucí výrobek. Určité podmínky jako je teplota, požadavek na tlak nebo vakuum, počet cyklů formy, prostorové tolerance pro finální díl nebo sestavu, použitá výrobní technologie a materiál by měly být zvaženy při designování formy. [1]

Formy můžeme rozdělit na pevné, polopevné a netrvalé.

Pevné formy jsou jak monolitické tak i skořepinové formy vyztužené za účelem snížení průhybu. [7]



Obrázek 8 Pevná forma [7]

Hlavní předností tohoto typu formy je schopnost použití při tlakové nebo vakuové infuzi. Je zajištěna výborná prostorová tolerance. Za předpokladu dostatečné tuhosti a uzavírací síly může být řízena tloušťka laminátů, a lze zpracovávat materiály s vysokým podílem vláken. Polotuhé formy se nejčastěji používají pro technologii vakuové infuze kde je pryskyřice do formy vháněna za pomoci rozdílu tlaku mezi dutinou formy a okolním prostředím. Tato metoda vyžaduje jednu pevnou část formy a druhou nepevnou, která je obvykle vyrobena z polymerního materiálu. Použití polotuhé formy snižují náklady, neboť není nutné vyrábět druhou polovinu formy, a jsou vhodné pro velké díly. Nevýhodou jejich použití je obtížné dodržení prostorových tolerancí, špatná a pomalá opakovatelnost výroby. Celková kvalita vyrobeného dílu potom závisí hodně na zkušenosti pracovníka. Netrvalé formy používáme, pokud chceme maximálně snížit náklady. [7]

### 2.2.1 Master model

Master model zahrnuje veškeré geometrie budoucího výrobku. Může být vyroben z různých materiálů, materiál musí být ovšem volen tak aby z něj bylo možné vyrobit model v požadované přesnosti s navrženými detaily. Výroba modelů se obvykle provádí konvenčními metodami, nejčastěji se využívají víceosé CNC stroje. Povrch modelu je tvarovaný a upravený tak, aby přesně odpovídal povrchu požadovaného výrobku. Master model se vyrábí větší o procento smrštění budoucího materiálu výrobku. Tím je zajištěno dosažení požadovaných rozměrů výrobku. Určit přesnou velikost smrštění je složité a závisí na dru-

hu pryskyřice, typu a množství výztuže a procesních teplotách. Master model je opatřen úkosovými hranami pro snadné odformování výrobku. Velikost úkosu se pohybuje okolo 2°. Na povrch modelu bývá nanесena speciální tvrdá povrchová úprava pro zvýšení životnosti modelu. [4]

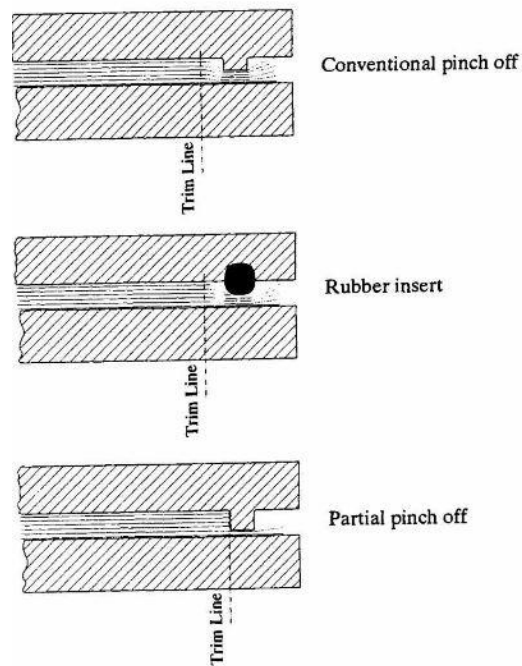
### 2.2.2 Pozice vtoku ve formě

S výjimkou vakuové infuze je běžnou praxí v RTM a SRIM zavést pryskyřici ve středu nebo podél jednoho okraje. Pokud je vtokové ústí umístěné do středu součásti, odvzdušňovací okraj je po obvodu formy. V případě že vtokové ústí umístíme do okraje formy, odvzdušňovací kanál leží v protilehlém okraji. Existují však praktické obtíže, včetně možné delaminace způsobené adhezí na vtokový kanál. Je potřeba odstranit vytvrzenou pryskyřici od vtokového kanálu po vstříknutí. Použití vtokové vložky umožňuje umístit místo vtoku pryskyřice mimo pohledové plochy do míst kde by případná delaminace neměla vliv na kvalitu výrobku. [7]

### 2.2.3 Okraje formy bez těsnění

Detailní konstrukce hrany formy je důležitá pro řízení toku pryskyřice. Nejrozšířenější odvzdušňovací technika se jmenuje pinch-off. (viz obr. 9). Pinch-off pracuje na prostém principu kdy je výztuž chycena mezi poloviny formy a vytváří částečnou bariéru prostupující pryskyřici. Opakovaným svíráním výztuže dochází k postupnému opotřebení okraje. Životnost okraje může být zvýšena umístěním pryžové vložky, která stlačuje výztuž. Absence obvodového těsnění vede k vylití pryskyřice mimo formu, dále k nebezpečným emisím par, poškození povrchu formy a ztížení údržby formy. Po vytažení hotové součásti z formy, okraje součásti obsahují přetoky a roztřepené části výztuže. Okraje výrobku je nutné dále obrábět, což zvyšuje výrobní čas součásti. [7]

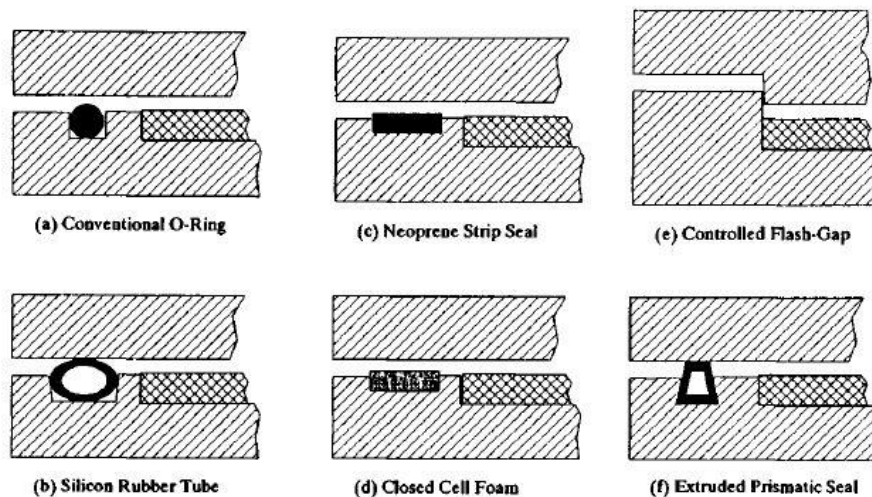




Obrázek 9 Odvzdušňovací technika pinch –off [7]

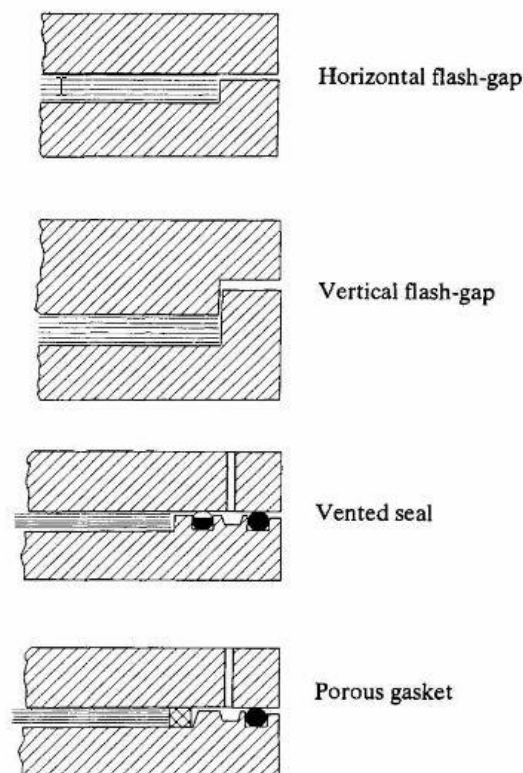
### 2.2.4 Okraje formy s těsněním

Pro zlepšení stupně kontroly nad tokem pryskyřice ve formě a zjednodušení údržby formy je vhodné začlenit kontrolované odvzdušnění což je podmíněno přítomností bariérového těsnění. Těsnící systémy mohou být různých typů. Viz obr 10. [7]



Obrázek 10 Typy těsnění a) konvenční kruhové těsnění b) gumové trubice c) neoprenový pásek d) porézní těsnění e) tenká mezera f) vytlačované prismatické těsnění [7]

Je-li proces založen na vakuové infuzi, nebo kombinaci vakua a tlaku, je nutné dokonalé utěsnění formy pro zamezení vzniku bublin, které vy vznikly v procesu vytvrzování, pokud by se do formy dostal vzduch. Při vstřikování pryskyřice do formy je požadavek na těsnění závislý na umístění vtoku, viskozitě materiálu a pracovního tlaku. Konvenční o-kroužky jsou používány hlavně v RTM formách a jsou jednoduše namontovány v drážce na hraně formy. Materiál těsnění vyžaduje v drážce prostor pro deformaci. Pokud toto není umožněno, je nutné použít duté těsnění. Tento systém je vhodný pro malé výrobní série, neboť je nutné časté čištění pryskyřice z drážky a těsnění, čímž se prodlužuje čas nutný na údržbu formy. Specializované trvalé těsnící drážky mohou být použity pro částečné vyřešení tohoto problému, jsou ale mnohem nákladnější na výrobu, a následnému čištění se stejně nevyhneme. Je-li forma opatřena některým z těsnících systémů, musí být taky opatřena výfuky sloužícím k odvodu vzduchu z formy. Viz obr11. [7]



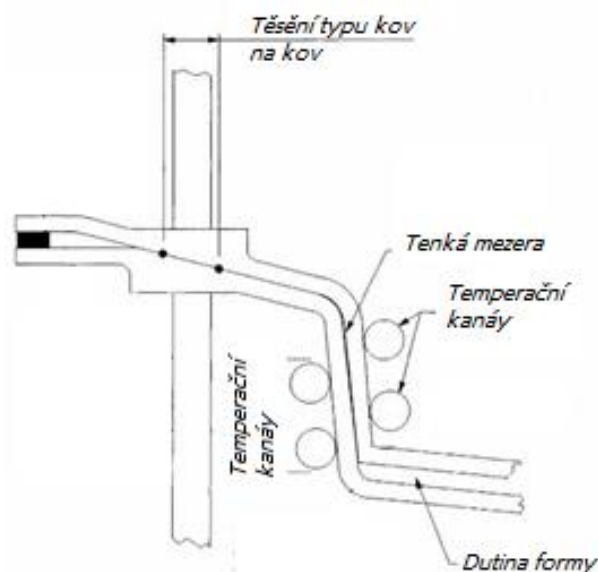
Obrázek 11 Možnost odvodu vzduchu z formy [7]

Poloha umístění větracích otvorů, spolu s polohou vtoku je rozhodující při návrhu formy. Pozice vtoku a větracích otvorů musí být zvolena pečlivě, aby se zabránilo vzniku vzduchových kapes. Společný přístup k odvzdušnění je použít dvojího těsnění. Vnitřní těsnění je odvětrávací buď celé kdy se používají porézní těsnění, nebo pouze na určitých místech. Vnější plně bariérové těsnění zabrání vytečení pryskyřice a emisi škodlivých par. Mezi

těsněními je odvodušňovací ventil pro odvádění pryskyřice a tlaku z dutiny formy. Hlavním problémem při použití elastomerových těsnění v praxi je udržet je v čistotě a bez vytvrzené pryskyřice, což snižuje jejich efektivitu. Při práci ve velkých sériích s monolitickými kovovými formami, je v případě velké přesnosti výroby formy nejvíce vyhovující těsnění typu kov na kov díky své nenáročnosti na údržbu. [7]

### 2.2.5 Okraj s tenkou mezerou

Vertikální tenká mezera se často používá pro podporu čistění formy po vyjmutí výrobku z formy. Čas potřebný k odstranění přetoku a vyčistění formy může být snížen. Tenký přetok na výrobku může být snadno odstraněn stříháním nebo podobnou metodou. Výhodou použití okraje s tenkou mezerou je také to že vede předlisek do dutiny formy a poskytuje mu podporu. Okraj s tenkou mezerou může být také použit k odstranění mnohých problémů spojených s údržbou elastomerních těsnění, jako jsou o-kroužky. Tenká mezera kov na kov vyžaduje přesnou povrchovou úpravu formy pro zajištění společné integrity. [7]



Obrázek 12 Okraj formy s tenkou mezerou "Flash gab" [7]

### 2.2.6 Vedení formy

Za účelem koordinace při uzavírání formy, zamezení poškození povrchu formy a vychýlení nebo posunutí předlisku je vhodné formu vybavit vodícím systémem, jako například kovo-

vými vodícími kolíky v případě kovových forem. Vodící systém musí být navržen tak, aby byl schopný snést síly při zaformování a nedošlo k vychýlení polovin formy. [7]

### 2.2.7 Vyhazovací systém

Pro všechny tvary s výjimkou těch nejjednodušších je třeba začlenit do návrhu formy nějakou funkci na částečné vyhození výrobku. Máme dvě možnosti jak přistupovat k vyhození výrobku z dutiny formy:

- Odstupňovaná dělicí linie, která umožní vyzvednutí nebo vypíchnutí výrobku z formy
- Využití mechanických nebo tlakových vyhazovačů k oddělení výrobku z povrchu nástroje.

První řešení je jednodušší v provozu neboť nevyžaduje použití žádných mechanických součástí a je prakticky bezúdržbové. Nicméně tuto metodu není vhodné použít u forem z tvrdých materiálů. Použití ručního nářadí jako například klínů potřebných k rozdělení jednotlivých dělicích linií, by mohlo poškodit formu. Druhé řešení kdy se používají mechanické nebo pneumatické vyhazovače je vhodnější neboť nemůže dojít k poškození formy a celý proces od zaformování až po vyhození výrobku může být automatizován. [7]

### 2.2.8 Úprava povrchu formy

Na kvalitě povrchu formy je závislá kvalita výsledného výrobku. Kvalitní povrchová úprava formy neznamena pouze kvalitní povrch výrobku, má také zásadní vliv na životnost formy. [9]

V praxi se dnes více používají kompozitní formy díky své nízké ceně a podobné tepelné roztažnosti jako vyráběný díl. Jsou ale také mnohem křehčí a jejich životnost se nedá s životností kovových forem srovnat. Kompozitní formy jsou velice náchylné na poškození povrchu při opakovaném odformování. Vzniklé mikrotrhliny a póry mohou mít za následek ztrátu vakua během vytvrzování, což může mít vliv na kvalitu výrobku. Možností je nanesení tenkého kovového povlaku na povrch kompozitní formy a tím zkombinovat výhody obou typů forem. Technologie pro nanesení povlaku mohou být:

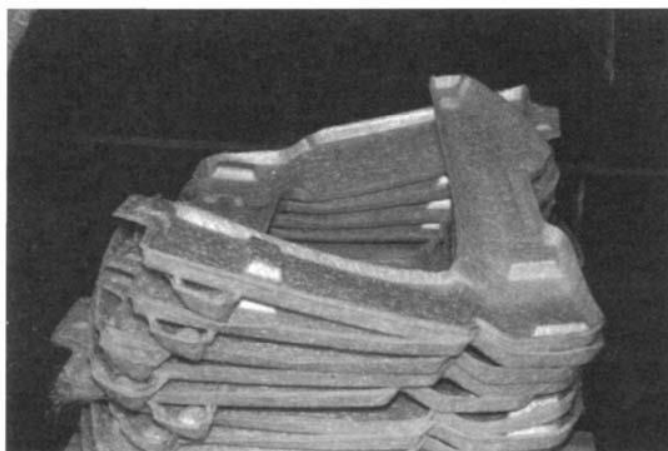
- Termal spray coating, při kterém se stříká roztavený kov na povrch formy. Nevýhodou je, že roztavený kov oxiduje a výsledný povrch má tendenci být křehký, málo pevný a hrubý.

- Electro-deposition and electrodeless deposition, technologie konvenčního pochromování.
- Physical vapor deposition. Při této technologii se využívá elektronového paprsku pro nanesení velmi tenké vrstvy na povrch formy umístěné ve vakuové komoře. Tato technologie je použitelná pouze pro malé díly.
- Chemical vapor deposition. "

Metal cladding. Zahrnuje přikládání kovové fólie na povrch formy. Tato metoda sníží náklady na materiál velkých forem, ale je vhodná pouze pro ploché části formy a nejsou vhodné na složitě zakřivené formy. [10]

### 2.3 Preformy

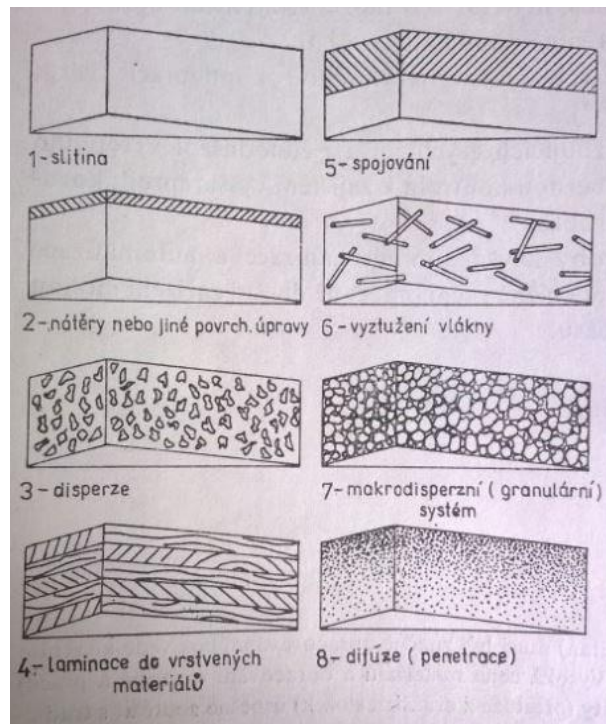
Existuje několik důvodů vyrábět preformy a netvarovat výztuž až přímo ve formě. Jedním je urychlení procesu výroby dílu. Preform je snadné umístit do formy. Dalším důvodem je zlepšení kvality výrobku a stejnorodosti výrobků. Pro zrychlení času cyklu je ideální, aby preform byl natolik ztuhlý, že při uzavírání formy dojde k samoumístění ve formě. V případech, kdy je kladen velký důraz na mechanické vlastnosti výrobku, je nutné minimalizovat množství pojiva v preformu, protože pojivo může nepříznivě ovlivňovat mechanické vlastnosti finálního výrobku. Obecně platí že dobrý preform musí být dostatečně tuhý, aby snášel manipulaci a skladování před vstřikováním pryskyřice a neměnila se během manipulace a vstřikování orientace vláken. K dosažení všech těchto vlastností je běžné použití nějaké formy preformovacích prostředků, například termoplastických a reaktoplastických prášků. [8]



Obrázek 13 Preform [8]

### 3 POLYMERNÍ KOMPOZITNÍ MATERIÁLY, ROZDĚLENÍ, ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI

V nejobecnějším smyslu je téměř každý dnes užívaný materiál kompozitem. Nalézt materiál v čisté formě je velice neobvyklé. [11]



Obrázek 14 Typy materiálů [11]

#### 3.1 Charakteristika kompozitního materiálu

Kompozit je každý materiálový systém, který je složen z aspoň dvou složek, z nichž alespoň jedna je pevná, a který dosahuje vlastností, které nemohou být dosaženy jakoukoli složkou samotně ani prostou sumací. Z této definice vyplývá, že během návrhu a výroby kompozitního materiálu má být vyvolán synergický účinek tak, aby bylo možno získat nový materiál. [11]

Aby mohl být materiál nazýván kompozitem, musí být splněny tyto podmínky:

- Podíl výstužné fáze musí být větší než 5%
- Vlastnosti matrice a výztuže (mechanické, chemické i fyzikální) se liší, výztuž je významně pevnější v tahu a obvykle tužší než matrice
- Kompozit musí být připraven mísením složek

Kompozitní materiály mohou obsahovat vyztužující složky různých rozměrů. [12]

### 3.2 Základní vlastnosti

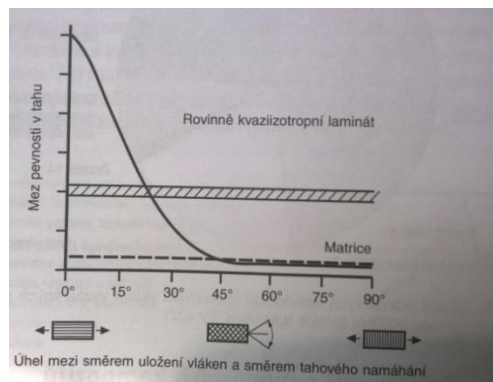
Vlastnosti materiálu jsou dány jednak svými vlastními charakteristikami nebo také vzájemnou interakcí a interakcí tuhých a tekutých struktur. Tato interakce je převážně fyzikální nebo fyzikálně chemická. Právě interakce jednotlivých fází a struktur přináší nové kvality materiálu, jichž nemůže být dosaženo žádnou složkou samostatně. Je možné dosáhnout toho, že jsou zdůrazněny výhodné vlastnosti složek a potlačeny jejich nevýhodné vlastnosti podle potřeb navrhovaného prvku nebo konstrukce. [11]

Z hlavních parametrů, na nichž závisí vlastnosti kompozitu, definujeme především tyto:

- Mechanické vlastnosti a jejich poměr (pevnost, E modul, Poissonův součinitel, pracovní diagram, mezní přetvoření) a anizotropní vlastnosti jednotlivých fází
- Objemové zastoupení fází, jejich geometrický tvar a jejich geometrické uspořádání v systému včetně pórů, tj. například množství, orientace a průměrné vzdálenosti dispergované fáze
- Interakce jednotlivých fází a vlastnosti styku, tedy schopnost přenosu zatížení z matrice do výstužné části a naopak, jinými slovy soudržnost na kontaktu fází.
- Interakce s okolním prostředím
- Historie materiálu i fází od jejich vzniku, která zahrnuje především časové faktory nebo technologii výroby [11]

#### 3.2.1 Pevnost a tuhost kompozitních materiálů

Pevnost a tuhost kompozitního materiálu závisí v rozhodující míře na pevnosti a tuhosti vláken. Vlákná a jejich orientace významným způsobem ovlivňují také další mechanické vlastnosti kompozitu.



Obrázek 15 Závislost orientace vláken na pevnosti kompozitního materiálu [13]

V důsledku velmi odlišných mechanických vlastností vlákna a matrice vznikají ve struktuře kompozitu místní složité stavy napjatosti. [13]

Jednosměrně vyztužené kompozity mohou být zatěžovány různým způsobem. Podle toho, zda zatížení působí ve směru uložení vláken, kolmo na ně nebo v jiném libovolném směru, dochází k rozdělení uplatnění výztuže. [13]

Pro dosažení vysoké pevnosti se žádá vysoká soudržnost složek, pro dosažení vysoké houževnatosti stačí i slabá soudržnost, umožňující disipaci energie a tlumení na mezifázových diskontinuitách. Velmi pevná a vysokomodulová vlákna přinášejí kompozitu pevnost a tuhost, naopak nízkomodulová vlákna s vysokým protažením přinášejí vysokou absorpci energie a rázovou pevnost. [11]

### **3.3 Rozdělení kompozitů**

V současnosti je na trhu dostupné relativně široké spektrum kompozitních materiálů lišících se pojivem, typem a charakterem výztuží a způsobem výroby. Kompozitní materiály se pak rozlišují podle některého ze strukturních kritérií. Z hlediska kvalifikace podle typu matric existují dva základní typy polymerních pryskyřic a to reaktoplasty a termoplasty. Z hlediska typu výztuže pak kompozitní materiály dělíme na částicové a vláknité. [14]

#### **3.3.1 Typ materiálu matrice**

Kompozity s reaktoplastickou matricí mají mezi konstrukčními aplikacemi vláknitých kompozitů naprostou převahu. Naproti tomu v oblasti plněných plastů a částicových kompozitů zcela převládají termoplastické matrice. [14]

##### **3.3.1.1 Termoplastická**

Termoplasty jako například polystyren, polypropylen nebo polyetylen jsou tuhé látky, které měknou a tečou při zvýšení teploty nad teplotu tečení charakteristickou pro daný polymer. Po ochlazení pod tuto teplotu opět přejdou do pevného stavu. [14]

##### **3.3.1.2 Reaktoplastická**

Termosety, jakými jsou například epoxidy, nenasycené polymery, melaminy či fenol formaldehydové pryskyřice, jsou obvykle dodávány ve formě viskózních tekutin tvořené relativně malými molekulami, které jsou vytvrzeny chemickou reakcí po dodání katalyzátoru a iniciátoru. Při vytvrzování dochází ke vzniku třídímenzionálních polymerních sítí s různou



hustotou. V ideálním případě je celý makroskopický výrobek jedinou makromolekulou. To způsobuje, že vytvrzený reaktoplast zůstává v tuhé fázi i po zahřátí, což zvyšuje jeho odolnost proti creepu a vysokým teplotám. [14]

### 3.3.2 Typ geometrie výztuže

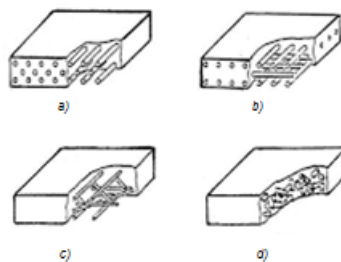
Podle typu výztuže kompozity dělíme na částicové a vláknité. Zvolený typ výztuže má zásadní vliv na výsledné vlastnosti kompozitního materiálu. [14]

#### 3.3.2.1 Částicové kompozity

Částicový kompozit má větší modul pružnosti v tlaku, tvarovou stálost za tepla a tepelnou vodivost a menší smrštění při chladnutí z teplot zpracování a tepelnou roztažnost než polymer. Částice jsou většinou vyrobeny mikro mletím anorganických materiálů. Složením jsou to především mastek, kaolín, slída, vápenec a těživec. U reaktoplastů lze použít práškový kov nebo cement. Pro zlepšení kluzných vlastností a zvýšení odolnosti proti oděru je možno kombinovat částice bronzu s částicemi grafitu. Částice sférického tvaru by neměly být příliš velké, aby nezmenšovaly pevnost polymeru. [12]

#### 3.3.2.2 Vláknité kompozity

Jedním z nejčastěji dělicích kritérií je orientace a délka vyztužujících vláken.



Obrázek 16 Orientace výztuže a) jednosměrně orientovaná, b) dvousměrně orientovaná, c) vícesměrně orientovaná, d) nahodile orientovaná [14]

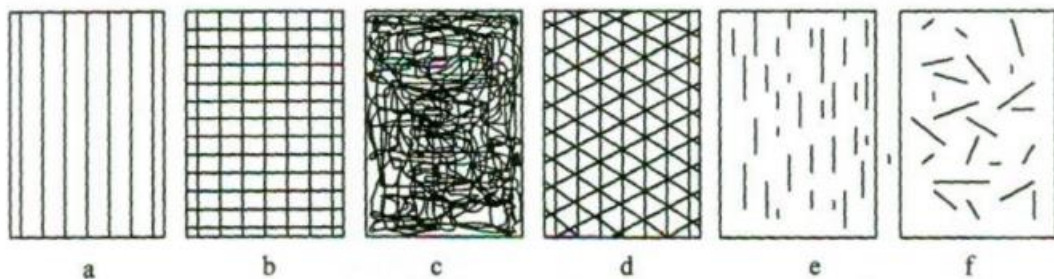
Z toho hlediska je možné dělit vláknité kompozity na:

- Jednosměrné (vlákna jsou orientována především v jednom směru):
  - Krátkovláknové (poměr délka/průměr  $L/D < 100$ )
  - Dlouhovláknové ( $L/D >$  či kontinuální vlákna tj. délka vlákna je shodná s délkou dílce)

- Mnohoseměrné (vlákna jsou nahodile či pravidelně orientována dvěma či více směry)
  - Krátkovláknové ( $L/D < 100$ )
  - Dlouhovláknové ( $L/D > 100$ )

Dalším kritériem může být způsob 3D prostorového uspořádání výztuže. Podle tohoto kritéria rozdělujeme vláknité kompozity na:

- Lamina (jedna vrstva kompozitu s tloušťkou zanedbatelnou ve srovnání se zbývajícími dvěma rozměry)
- Lamináty (střídání vrstev – lamin – s různými vzájemnými orientacemi výztuže)
  - Lamináty s tkanou výztuží (střídání vrstev vyztužujících rohoží, ve kterých jsou vlákna utkána běžnými nebo speciálními textilními technologiemi)
  - Lamináty s netkanou výztuží (střídání vrstev vyztužujících rohoží, ve kterých jsou vlákna zpracována do roun, aniž by byla tkaná)
  - Tažené profily (komplikovanější tvary průřezu lineárních prvků s konstantním průřezem s kombinací vyztužujících vláken a tkaných nebo netkaných rohoží)
  - Navíjené profily (kruhové nebo oválné tvary průřezu, tlakové nádoby či trubky) [14]

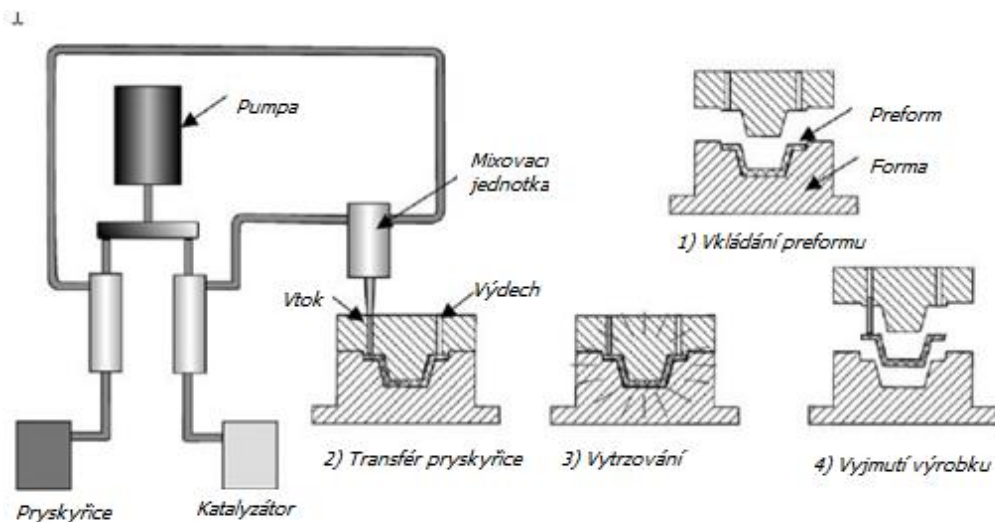


Obrázek 17 Typy vláknových výztuží [12]

## 4 RTM TECHNOLOGIE

### 4.1 Popis RTM technologie

RTM technologie je technologií kombinující prvky vstřikování a lisování. Při RTM technologii se využívá dvoudílná forma, do jejíž dutiny se vkládá výztuž. Po uzavření formy je do dutiny čerpadlem vháněna pryskyřice do doby, než je pryskyřice vidět v transparentní zkumavce, která je umístěna v nejvyšším místě formy. Před vháněním pryskyřice může být v dutině formy vytvořen podtlak, což má za následek kvalitnější výrobek bez vad jako jsou bubliny. [15]



Obrázek 18 RTM cyklus [16]

Proces obvykle probíhá za pokojové teploty. Pro RTM technologii je vyžadována mnohem pevnější forma než pro technologie ručního laminování nebo vakuové infuze neboť pryskyřice je do formy vháněna pod tlakem. [15]

Výhody RTM oproti vakuové infuzi jsou především v pracovních tlacích. RTM asi 100psi na rozdíl od asi 15psi při vakuové infuzi. Vyšší tlak má vliv na prosycení výztuže pryskyřicí. Další výhodou je ve snazší opakovatelnosti výroby a podstatně kratšímu výrobnímu cyklu. [17]

## 4.2 RTM vytvrzování

Vytvrzování se může provádět několika způsoby:

- Formy s integrovaným temperančním systémem který je vytápěný elektřinou, horkou vodou nebo olejem
- Formy umístěné v peci
- Forma umístěná mezi vyhřívanými lisovacími deskami, které vyvíjejí teplotu a tlak na formu.

Pro tekuté lisovací procesy, které používají pouze vakuovou injekci, jako například VARTM a SCRIMP při kterých je tlak vyvíjen pouze vakuovým pytlek je možno použít jako zdroj tepla ohřívače, pece nebo tepelní zářiče. [18]

## 4.3 RTM forma

Forma samotná je jedním z nejdůležitějších součástí RTM systému. Správně navržení formy je klíčové pro získání kvalitního dílu. Konvenční RTM forma se skládá ze dvou pevných polovin, obvykle vyrobených z nástrojové oceli, což zaručuje dlouhou životnost pro velké série a odolnost proti poškození při manipulaci. Povrch formy je obvykle vyleštěn do vysokého lesku, což zaručuje vysokou kvalitu pohledové části. Mnohé kovové formy se vyrábějí s dostatečnou tuhostí, nemusejí být během vstřikování pryskyřice umístěné v lisu. Použití oceli a zvýšení tuhosti má za následek zvýšení hmotnosti formy. Forma musí být opatřena úchyty a oky pro snadnou manipulaci.[18]

Kovy jsou nejpoužívanější materiál pro RTM formy. Pokud je použit nízký tlak jako u VIP (vakuum infusion proces), forma může být vyrobena z kompozitního materiálu nebo jako kombinace s kovovým povrchem. K uzavření formy se používají mechanické svorky nacházející se po obvodu formy. Ty jsou obvykle ovládány ručně, ale mohou být i na strojní pohon. Tyto typy svorek jsou snadno použitelné, levné a spolehlivé. Nevýhodou je nemožnost jejich použití pro vysoké tlaky. Pokud procesní tlak překročí schopnosti svorky, forma je umístěna do lisu. [4]

## 4.4 RTM vstříkovací jednotka

Anglické Národní kompozitní centrum (NCC UK) je vybaveno KraussMaffei RimStar Compact 4/4/4 míchacím a dávkovacím centrem. Systém je vybaven dvěma míchacími

hlavami, které umožňují zpracovávat i epoxidové pryskyřice i polyuretany pod vysokým tlakem (HP-RTM). Toto zařízení umožňuje zpracovávat rychle reagující systém, čímž se zkracuje čas cyklu, což umožňuje vyrábět součástky ve velkém množství. [19]



*Obrázek 19 RTM vstřikovací jednotka [19]*

Jako další je jednotka od firmy Euroresins. Jedná se o jednotku pro RTM aplikace, použitelnou i po větší komponenty. Technické parametry:

- Průtok 4 l/m
- Vstřikovací kapacita 65 ml/cyklus
- Tlak vzduchu 6 barů
- Spotřeba vzduchu 200-250 l/min
- Rozměry 900x900x1750 [20]



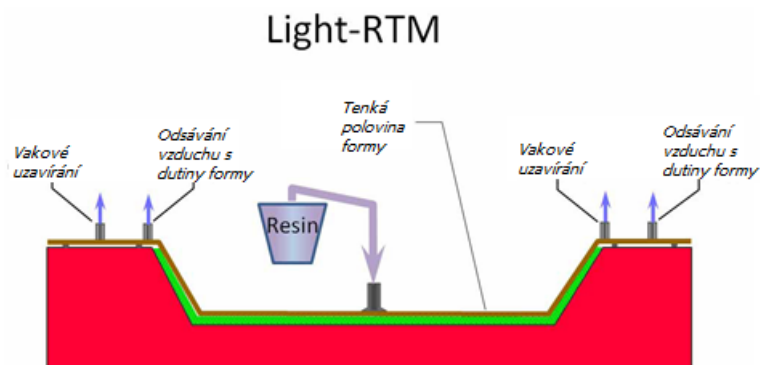
*Obrázek 20 RTM vstřikovací jednotka Euroresins [20]*

## 4.5 LRTM (Light Resin Transfer Molding)

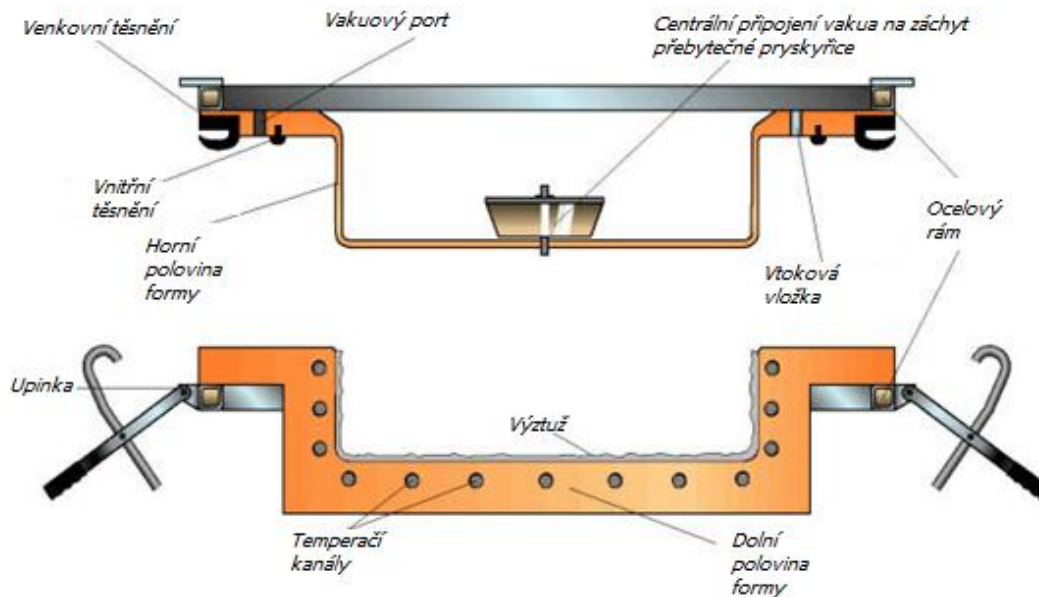
LRTM je proces při kterém jsou kompozitní výrobky vyráběné v uzavřené formě. Uzavřená forma se skládá z pevné a polotuhé části. Forma je uzavřena pomocí podtlaku. Pryskyřice je nasávána do vzniklé dutiny pomocí vakua a infuzi může napomáhat vstřikovací čerpadlo, které urychlí proces infuze. LRTM je velmi všestranný výrobní proces s následujícími charakteristikami:

- Vysoká produktivita
- Snížení nákladů na pracovní sílu
- Pohledové vlastnosti na obou stranách výrobku
- Vylepšené rozměrová stálost
- Lepší kontrola procesu
- Dlouhá životnost formy
- Žádné emise
- Výrazně zlepšené pracovní podmínky

LRTM je účinnější než většina ostatních procesů. Lze využít jednu polotuhou část formy pro několik tuhých částí a tím zrychlit výrobu. [21]



Obrázek 21 Princip LRTM technologie [22]



Obrázek 22 Popis komponent LRTM formy [23]

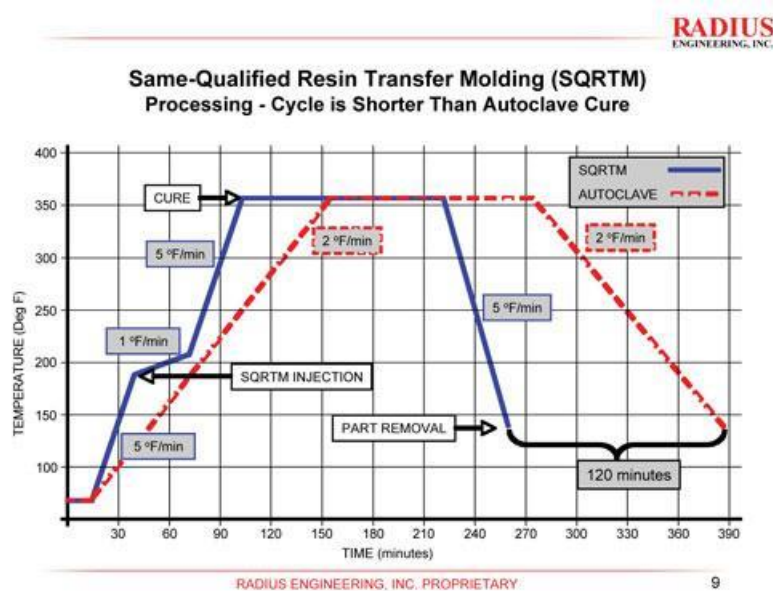
#### 4.6 HP-RTM (High Pressure Resin Transfer Molding)

HP-RTM je někým považována za novou technologii, někdo ji považuje za modifikaci RTM technologie která se používá už několik let. Rozdíl mezi RTM a HP-RTM technologií je především v čase výrobního cyklu. Jak už název napovídá, HP-RTM technologie využívá vysokého tlaku pro dosažení kratšího výrobního cyklu. Nízkotlaké RTM technologie využívají vstřikovacích tlaků 10-20 barů a výrobní cyklus se pohybuje standardně mezi 30-60 minutami. HP-RTM využívá tlaku 150 barů ve směšovací hlavě a tlaku 30-120 barů pro vstřikování do dutiny formy. Díky vysokému tlaku je možno zkrátit cyklus u lehkých struktur i pod 10 minut. Klíčovou roli při HP-RTM hraje stupeň automatizace a kvalitní vybavení. [24]

#### 4.7 SQRTM

Technologie SQRTM se od klasické RTM technologie odlišuje tím, že se do formy nevkládají suchá vlákna, ale používají se prepregy. Do následně uzavřené formy se vstříkne malé množství pryskyřice pod tlakem 6,89 barů. Pryskyřice neslouží k prosycení prepregů ale k zajištění stabilního hydrostatického tlaku. Tlak udržuje těkavé látky a vlhkost ve formě roztoku, díky čemu je zabráněno tvoření pórů a dutin. Je nutné přesně umístit vtokový a evakuační kanál k zajištění rovnoměrného zaplnění formy. Díky SQRTM dosahují výrobky kvalit výrobků vyrobených v autoklávu. Kvalitu výrobku je snadnější ovládat

technologií SQRTM než v autoklávu protože hydrostatický tlak pryskyřice je řízen přímo a není závislý na proměnných uvnitř autoklávu a dílu uvnitř vakuového pytle. Technologií SQRTM jsme schopni vyrobit díl rychleji než v autoklávu. [25]



Obrázek 23 Stovnání výrobních časů SQRTM a autoklávu [25]

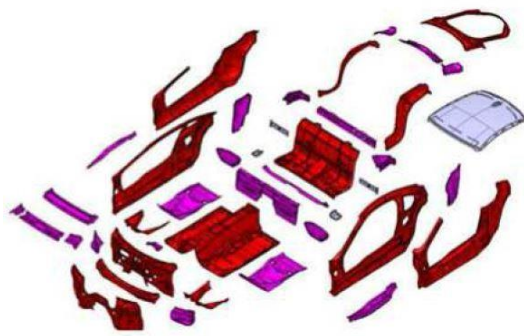
#### 4.8 Výrobky RTM technologií

RTM technologie má velké uplatnění v leteckém, automobilovém a sportovním odvětví. Zde jsou některé výrobky vyráběné RTM technologií:



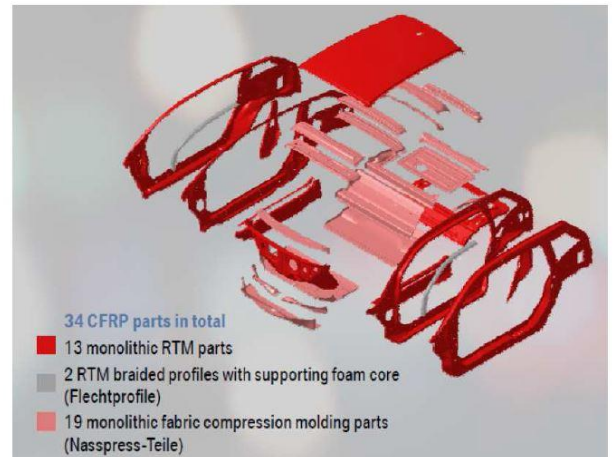
Obrázek 24 Uhlíkový kokpit vozu BMW i3 [26]





- RTM parts
- Wet compression molding
- Part out of CF recycled fibers

Fig. 1: CFRP Part BMW i8 (Dirschmid 2015)



- 34 CFRP parts in total
- 13 monolithic RTM parts
- 2 RTM braided profiles with supporting foam core (Flechtprofile)
- 19 monolithic fabric compression molding parts (Nasspress-Teile)

Fig. 2: CFRP Part BMW i3 (Wüllner 2015)

Obrázek 25 Části karoserie vozu BMW i8 a i3 [27]



Obrázek 26 Dveře komerčního letadla [28]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem mé práce je navrhnout konstrukční řešení RTM formy pro pružinu skákacích bot.

Konstrukční návrh zahrnuje:

- Návrh modelu pružiny.
- Návrh materiálového složení pružiny.
- Konstrukční návrh formy včetně materiálového složení.
- Návrh povrchového gelcoatu formy.
- Návrh výrobních parametrů a cenovou kalkulaci.

## 6 KONSTRUKČNÍ NÁVRH A POSTUP VÝROBY RTM FORMY PRO DANÝ DÍL

Díl, pro který je konstruována forma, je kompozitní pružina, která je součástí skákacích „sedmimílových“ bot. Pro názornou ukázkou je skákací bota znázorněna na následujícím snímku.



*Obrázek 27 Skákací boty*

Konstrukční řešení bylo vypracováno v programu Catia V5. V příloze práce je přiložena výkresová dokumentace modelů pro výrobu formy, výkresová dokumentace částí formy, rámu formy a kompletní sestavy.

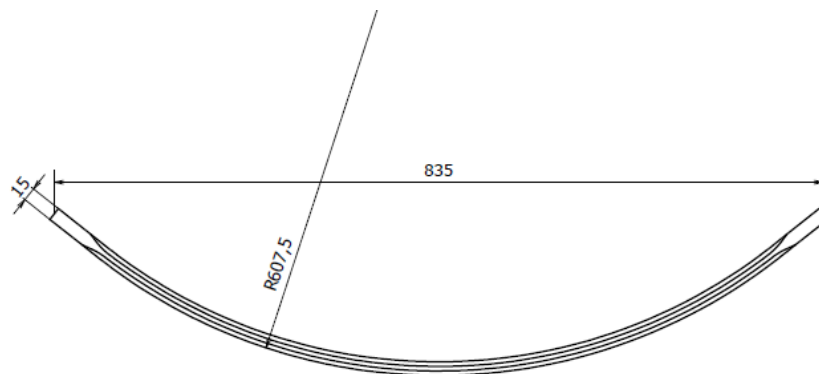
Jako technologii pro výrobu pružiny jsem zvolil technologii Light Resin Transfer Moulding (LRTM) která vychází z klasické technologie RTM. Při technologii LRTM se využívá vakuum k odsátí vzduchu z dutiny formy a nasátí pryskyřice. Vakuum také slouží k uzavření formy. Při této technologii je vtok umístěn na okraji formy a ventil pro odvod vzduchu z dutiny formy je umístěn uprostřed formy a v prostoru mezi těsněními. Jeden vakuový port slouží k nasávání pryskyřice a druhý k uzavření formy. Toto je zásadní rozdíl oproti technologii RTM kdy je vtok umístěn uprostřed formy a ventily v rozích formy. Při použití

LRTM nevzniknou okolo výrobku velké přetoky neboť vakuum a těsnění ve formě nedovolí pryskyřici vytéct mimo dutinu formy. Dále je díky vakuu výrazně eliminován vznik vzduchových bublin, které by mohly mít vliv na pevnost pružiny. Výhodou LRTM technologie jsou také nízké náklady na pořízení formy. Formy pro LRTM jsou vyrobeny z kompozitního materiálu. Protože při technologii LRTM nevzniká tak velký tlak jako při technologii RTM, není tak velký požadavek na tloušťku stěny. Formy pro technologii LRTM mohou být skořepinové. Pro zvýšení tuhosti formy je vhodné stěny opatřit žebry.

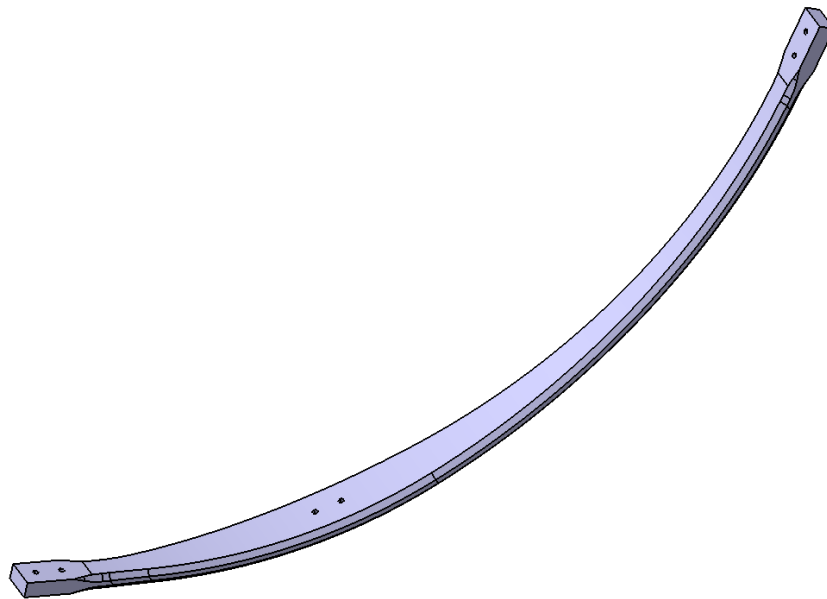
V návrhu jsem zvolil kompozitní formu vyráběnou nepřímou metodou. Výroba formy nepřímou metodou je finančně nejlevnější neboť není nutné dutinu formy obrábět. Ve výrobním návrhu formy jsem použil skelné rohože a tkaniny prosycené polyesterovou pryskyřicí. Forma bude vyrobena za pomoci modelu, na který se budou ve vrstvách nanášet pláty skelné rohože, které se budou ručně prosycovat pryskyřicí.

## 6.1 Návrh skákací pružiny

Základní tvar pružiny je kruhová úseč o poloměru 600 mm a délce tětivy 835 mm. Šířka konců pružiny je 30 mm a dlouhé jsou 60 mm. Na pružině je 6 děr pro uchycení pružiny k mechanismu boty. Díry budou v pružině vyrobeny vrtáním jako následující operace a jejich vyhotovení není předmětem práce, proto se jimi v práci dále nezabývám. Barva pružiny není podstatná, neboť na pružinu se navléká ochranný gumový tepelně smrštitelný rukáv. Tloušťka pružiny je 15 mm. Protože je nutné upravovat tuhost pružiny v závislosti na hmotnosti skokana, navrhuji řešení úpravy tuhosti změnou množství výztuže a změnou tloušťky pružiny, kterou lze měnit díky použité technologii LRTM za použití distančních podložek a změnou těsnění.



Obrázek 28 Základní rozměry pružiny



Obrázek 29 3D model pružiny

### 6.1.1 Návrh materiálového složení pružiny

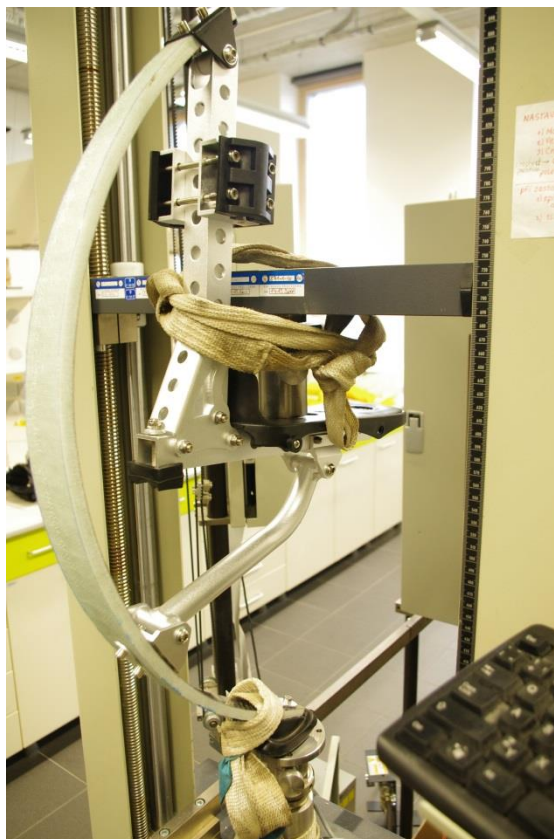
Při volbě materiálu pružiny byly uvažovány dva materiály, konkrétně skelné a uhlíkové vlákna. Pro potřeby měření byla vyrobena prototypová forma z MDF desek, na které byla vyrobena deska, ze které byl vyřezán tvar pružiny. Na následujícím obrázku můžeme vidět prototypovou formu a výrobu prototypové pružiny.



Obrázek 30 Výroba prototypové pružiny

Na výrobu prototypové pružiny byl použit materiál firmy Saertex s označením 30000944. Jedná se o quadraxiální tkaninu se skladbou  $[0,45,90,-45]$  s gramáží  $820 \text{ g/m}^2$ . Na výrobu pružiny bylo použito 15 vrstev. Tloušťka prototypové pružiny byla 12mm. Vyráběna byla

ručním laminováním pod vakuovým vakem. Na prosycení byla použita epoxidová pryskyřice L 285 /MGS/ od firmy havel-composites. Další vyrobenou prototypovou pružinou byla pružina z uhlíkových vláken taktéž v tloušťce 12 mm. Vyrobené prototypové pružiny byly následně upevněny do skákací boty a byla na nich provedena ohybová zkouška. Ohybová zkouška byla také provedena na originální pružině s tloušťkou 12mm. Na následujícím obrázku vidíme průběh měření.

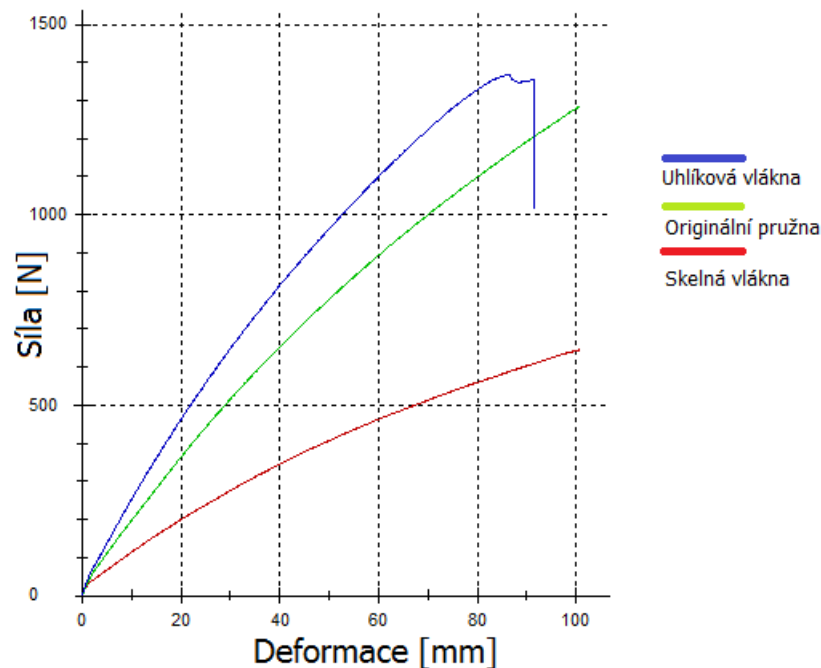


Obrázek 31 Měření tuhosti pružiny

Při měření byla měřena síla, která je potřebná ke stlačení pružiny o 100 mm. Z naměřených výsledků byl stanoven koeficient tuhosti dle vzorce.

$$k = \frac{F}{\Delta l} \text{ [N} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (1)$$

$F$  je síla v newtonech, jakou byla stlačena pružina a  $\Delta l$  je rozdíl délek v milimetrech před stačením a po stlačení pružiny. Následující graf s tabulkou znázorňují průběh měření.



Obrázek 32 Graf znázorňující průběh měření

Tabulka 1 Výsledky měření tuhosti pružiny

	E [GPa]	F [N]	$\Delta l$ [mm]	k [N/m]
Originální pružina	0,116	1280	100,6	12,72
Skelná vlákna	0,118	646	100,5	6,43
Uhlíková vlákna	0,0282	1370	86,1	15,91

V obrázku 32 a tabulce 1 vidíme hodnoty naměřené při ohybové zkoušce. Ke stlačení originální pružiny o 100 mm bylo zapotřebí síly 1280 N a ke stlačení stejně tlusté prototypové pružiny ze skelné tkaniny bylo zapotřebí 646 N. Tuhost prototypové pružiny je poloviční. Nízká tuhost prototypové pružiny je způsobena použitým materiálem. Na rozdíl od originální pružiny, která je vyrobena z jednosměrně orientovaných skelných vláken, byla pro prototypovou pružinu použita tkanina s orientací vláken  $[0,45,90,-45]$ . Vlákná orientovaná pod úhlem  $45^\circ$  a  $90^\circ$  nezpevňují při ohybu pružinu tak jako vlákna s orientací  $0^\circ$ . Pokud by byly pro výrobu prototypové pružiny použita jednosměrně orientovaná sklená vlákna, byla by tuhost pružiny srovnatelná. Tkanina s orientací vláken  $[0,45,90,-45]$  byla použita z důvodu předpokladu, že vlákna orientovaná pod úhlem  $45^\circ$  a  $90^\circ$  zvýší životnost pružiny, neboť zvýší soudržnost vrstev při opakovaném stlačování. Problémem originální pružiny je fakt, že při opakovaném stlačování dochází k postupnému trhání vláken a tím snižování tuhosti pružiny až do stavu kdy pružina pod tíhou skokana praskne.



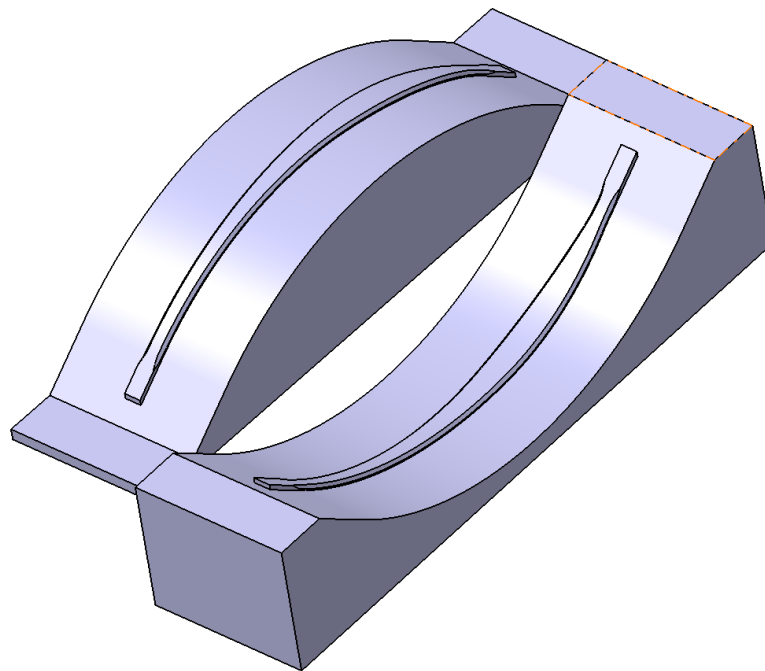
Měření proběhlo i na pružině vyrobené z uhlíkových vláken. Jak je ale patrné z obrázku 32, pružina praskla ještě před stlačením o 100 mm. Toto měření proto nepovažuji za srovnatelné. K prasknutí došlo vlivem špatného prosycení tkaniny pryskyřicí. Pružina neměla dostatečnou pevnost a došlo k deformaci při průhybu 86 mm. Z naměřených výsledků je ovšem patrné, že při prasknutí pružiny byla tuhost o 7 % vyšší než v případě originální pružiny. Pokud by byla uhlíková vlákna dobře prosycená, mohla by být výsledná tuhost vyšší i o 25 %. Takto vyrobená pružina z uhlíkových vláken by byla stejně tuhá již při menší tloušťce. Došlo by k velké úspoře materiálu a snížení hmotnosti skákací boty. Na druhou stranu uhlíková tkanina je mnohem dražší než skelná tkanina, proto by i cena pružiny byla mnohem vyšší.

Z naměřených výsledků navrhuji na výrobu pružiny použít jednosměrně orientované skelné tkaniny od firmy Saertex s označením B-E 1200 g/m<sup>2</sup> které budou prokládány skelnou tkaninou Aeroglass – plátno s gramáží 100 g/m<sup>2</sup>. Jednosměrně orientovaná skelná tkanina zajistí požadovanou ohybovou tuhost a skelné plátno zajistí soudržnost vrstev a tím delší životnost. Skladbu vrstev navrhuji opakovat ve složení jedné vrstvy skelného plátna, dvou vrstev jednosměrně orientované tkaniny a jedné vrstvy plátna. Tato skladba se násobí v závislosti na požadované tuhosti pružiny, která se odvíjí od hmotnosti skokana. Navrženou skladbu navrhuji odzkoušet na prototypové pružině. Jako matici navrhuji použít polyesterovou pryskyřici HAVELpol5 pevnostní.

## 6.2 Návrh modelů pro výrobu formy

Protože dutina formy nebude obrobena na obráběcích strojích, ale bude vyrobena nepřímo metodou pomocí modelů, je nutné navrhnout model pro výrobu formy. V mém případě bylo nutné zhotovit dva modely. Jeden model pro horní polovinu formy a druhý pro dolní polovinu formy. Rozměry modelů jsem zvětšil o přídavek na smrštění materiálu a všechny kolmé stěny jsou skoseny pod úhlem 2° aby bylo zajištěno úspěšné vyjmutí výrobku z formy. Modely sloužící pro výrobu formy nemusí být vyrobeny z co nejlepšího materiálu, neboť slouží pouze k vyrobění formy. Při volbě materiálu modelu je důležité, aby vyrobený model dosahoval požadovaných výrobních přesností a jakosti povrchu. Zásadní roli hraje také cena materiálu. Materiály vhodné pro výrobu modelu jsou MDF desky, polyuretanové pěny, napěněný polystyrén, polymerní desky a kompozitní materiály. Pro výrobu modelu jsem zvolil materiál MDF desky. Vyznačuje se dobrou obrobiteľností a nízkou

cenou. Dřevo se ovšem nevyznačuje dobrou tvrdostí povrchu a materiálovou stálostí. Problémem je především navlhavost, která by mohla model znehodnotit a znemožnit tak pozdější opakovanou výrobu formy. Pro prodloužení životnosti modelu navrhuji ošetření ochranným lakem na bázi polyuretanové disperze, který zvýší jeho tvrdost a odolnost proti vlhkosti. Laky na bázi polyuretanové disperze se používají k ošetření dřevěných schodišť a poskytnou výbornou ochranu i dřevěnému modelu. Návrh modelu byl realizován v programu Catia V5. Protože je model příliš velký a jeho výroba z jednoho kusu dřeva by byla nákladná, bude vstupním materiálem několik MDF desek, které se slepí stěnami k sobě tak, aby se blíže podobaly modelu. Po zaschnutí lepidla bude model obroben na CNC obráběcím stroji, kde se dokončí tvarové plochy. Po strojním obrábění bude následovat ruční úprava povrchu pomocí brusných papírů se zrnitostí 500-1500. Po ručním opracování se na model nanese ochranný lak, který bude vyleštěn pro dosažení vysoké jakosti povrchu. Pro výrobu jednoho modelu je potřeba slepit 20 MDF desek o rozměrech 500x240x25 mm. Následující obrázky znázorňují podobu modelů.

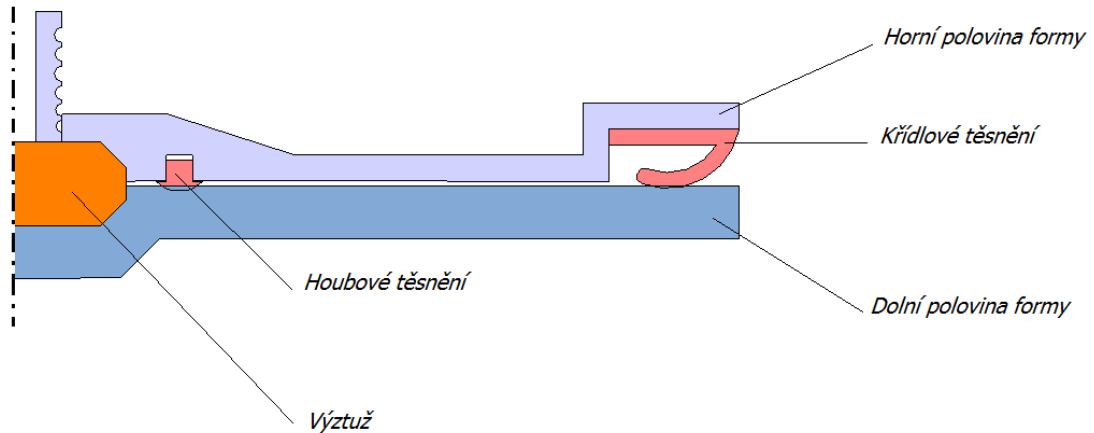


*Obrázek 33 Modely sloužící pro výrobu formy*

### **6.3 Konstrukční návrh LRTM formy a ocelového rámu**

Při konstrukčním řešení LRTM formy se vychází z rozměrů modelů. Tvar horní a dolní poloviny formy je odvozen od tvaru modelů. Na horní polovinu formy jsou umístěny dvě těsnění. Jedno těsnění na obvodu formy slouží k udržení vakua potřebného k uzavření for-

my. Druhé těsnění je okolo dutiny formy a slouží k udržení vakua uvnitř dutiny formy a brání pryskyřici vytékat mimo dutinu. Obě poloviny formy mají konstantní tloušťku stěny s výjimkou prostoru v blízkosti dutiny formy, kde je tloušťka formy větší z důvodu zvýšení tuhosti. Na následujícím obrázku vidíme řez formou.



Obrázek 34 Řez formou

### 6.3.1 Návrh materiálu formy

Formy pro technologii LRTM mají přednost ve své nízké hmotnosti, nízké pořizovací ceně a snadné vyrobiteľnosti a opraviteľnosti. LRTM formy bývají vyrobeny z kompozitních materiálů. Jako materiál LRTM formy jsem zvolil sklené tkaniny a rohože prosycené polyesterovou pryskyřicí. Materiál formy jsem zvolil s ohledem na použitou technologii výroby, velikost výrobní série a cenu. Zvolený materiál jsem podrobil mechanickým zkouškám v laboratoři, abych stanovil optimální tloušťku kompozitní formy. Provedl jsem tříbodovou ohybovou zkoušku na přístroji Zwick 1456.



Obrázek 35 Tříbodová ohybová zkouška

K měření jsem si připravil sklolaminátovou desku složenou ze čtyř a osmi vrstev skelné tkaniny od firmy Saertex s označením 30000944. Jedná se o prošivanou čtyřvrstvou tkaninu s orientací vláken [0,45,90,-45] o celkové gramáži 820 g/m<sup>2</sup>. Vrstvy skelné tkaniny byly prokládány netkanou textilií pro lepší prosycení vrstev. Celková hmotnost použitého materiálu byla pro čtyřvrstvou deku 287 g a pro osmivrstvou desku 575 g. Deska byla vyrobena technologií ručního laminování pod vakuovou fólií. Jednotlivé vrstvy jsem přikládal na sebe a postupně prosycoval epoxidovou pryskyřicí havel L285 /MGS/. Poté jsem na prosycené vrstvy přiložil vakuový vak a připojil vývěvu. Po vytvrzení jsem získal dvě desky, ze kterých jsem na kotoučové pile vyřezal deset zkušebních vzorků o rozměrech 20x120x6 mm z osmi vrstev tkaniny, a 20x120x3 mm ze čtyř vrstev tkaniny. Následně jsem provedl ohybovou zkoušku, abych zjistil, jaká bude optimální tloušťka formy. V následující tabulce můžeme vidět výsledky měření.

Tabulka 2 Výsledky ohybové zkoušky

4 vrstvy	E	$\sigma_{fM}$	$\varepsilon_{fM}$	$F_{max}$	$y_{fM}$	W	a	b
n = 10	MPa	MPa	%	N	mm	Nmm	mm	mm
hodnota	11800	397	3,5	1260	4,3	2920,37	3,286	20,5
směrodatná odchylka	1690	39,3	0,6	131	0,3	721,84	0,166	0,166
8 vrstev	E	$\sigma_{fM}$	$\varepsilon_{fM}$	$F_{max}$	$y_{fM}$	W	a	b
n = 10	MPa	MPa	%	N	mm	Nmm	mm	mm
hodnota	14700	423	3,7	1730	7,7	10613,92	6,4	20,4
směrodatná odchylka	471	0,375	0,1	158	0,5	99,61	0,1414	0,1414

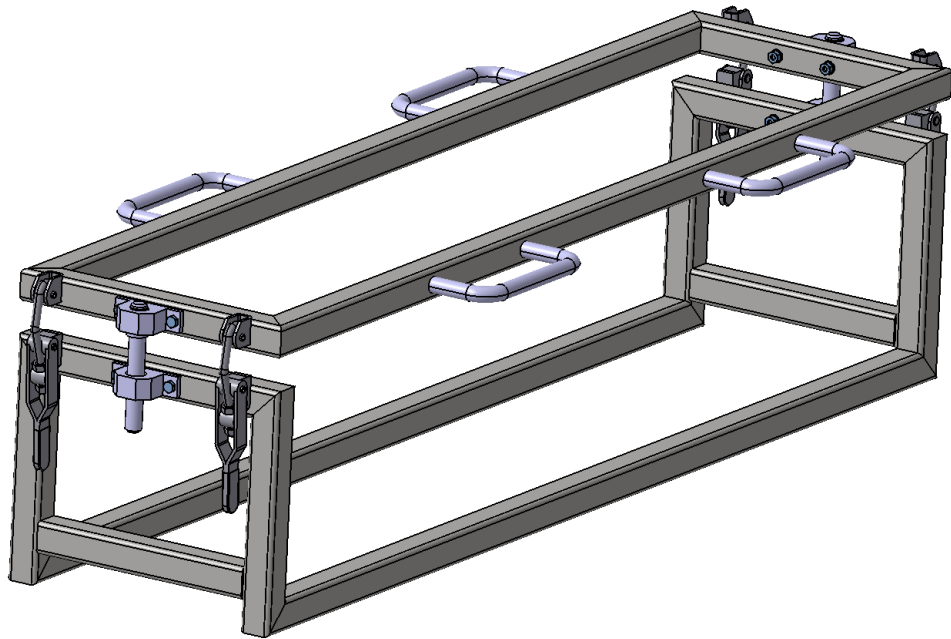
Vzorky, o tloušťce 3 mm, složené ze čtyř vrstev skelné tkaniny, dosáhly meze pevnosti při průměrnému zatížení 1260 N. Při tomto zatížení, byl průhyb vzorku 4,3 mm. Vzorky o tloušťce 6 mm s osmi vrstev skelné tkaniny pak dosáhly meze kluzu při zatížení 1730 N a průhybu 7,7 mm. Na základě této zkoušky usuzuji, že materiál by byl dostatečně pevný, aby snesl výrobní zatížení. Navrhl jsem proto dvoudílnou formu, která bude mít spodní díl tlustý 10mm, na který se bude přikládat horní díl tlustý 5 mm. Navržená tloušťka formy zajistí formě dostatečnou tuhost. Na dolní polovinu formy navrhuji použít skelné rohože o gramáži 30 a 450 g/m<sup>2</sup> a skelnou tkaninu o gramáži 110 g/m<sup>2</sup>. Vrstvy rohoží a tkaniny navrhuji prosycovat pevnostní polyesterovou pryskyřicí. Složení horní poloviny formy navrhuji pouze ze skelných rohoží. Podrobný rozpis použitých materiálů a jejich pořadí při výrobě formy je popsán v kapitole 6.4

### 6.3.2 Návrh formového gelcoatu

Gelcoat je vrstva tvořící ochranný povrch formy, který je v přímém kontaktu s výztuží a pryskyřicí. Pro zajištění dlouhé životnosti povrchu formy je nezbytné, aby byl gelcoat oděruvzdorný. Na trhu jsou v dnešní době tři základní typy gelcoatů. Epoxidový, polyesterový a vinylesterový. Typ použitého gelcoatu by měl záviset na typu použité pryskyřice pro výrobu formy. Polyesterové a vinylesterové gelcoaty jsou vhodné pro polyesterové pryskyřice. Epoxidové gelcoaty pak pro epoxidové pryskyřice. Epoxidové gelcoaty mají vyšší tvrdost a tím i vyšší odolnost proti oděru než polyesterové a vinylstyrenové gelcoaty. Jsou ale také dražší. Pro zvýšení oděruvzdornosti lze gelcoaty míchat s kovovými prášky, nejčastěji se používá hliník. Pro mnou navrženou formu navrhuji použít gelcoat firmy Havel composites s označením Norpol GM 60014 – zelený. Jedná se o vinylesterový gelcoat vhodný speciálně pro formy, na jejichž výrobu byla použita polyesterová pryskyřice. Tento gelcoat lze leštit a brousit díky čemuž lze snadno opravit případné poškození formy. Množství použitého gelcoatu a postup nanášení je popsán v technologickém postupu kapitoly 6.4.

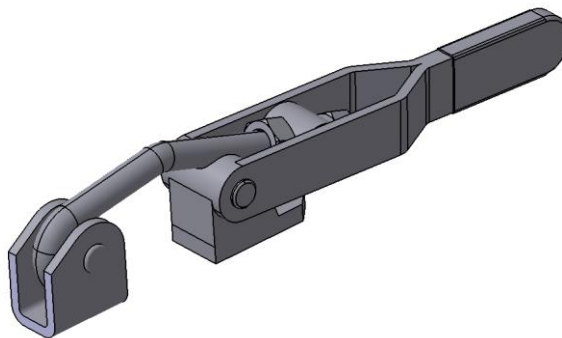
### 6.3.3 Konstrukční návrh rámu formy

Protože skořepinová forma není dostatečně tuhá a manipulace se samotnou skořepinou by byla obtížná a forma by byla náchylná na poškození, navrhl jsem formu vyztužit kovovým rámem z ocelových čtvercových tenkostěnných profilů o rozměrech 30x30 mm s tloušťkou stěny 2 mm, které budou svařeny. Rám slouží také k upevnění upínek a naváděcích čepů sloužících pro přesné usazení horní poloviny formy, ty budou k rámu přivařeny. K rámu jsou také přivařeny madla pro snadnou manipulaci s formou. Kovový rám je natřen antikorozním nátěrem pro dlouhou životnost.



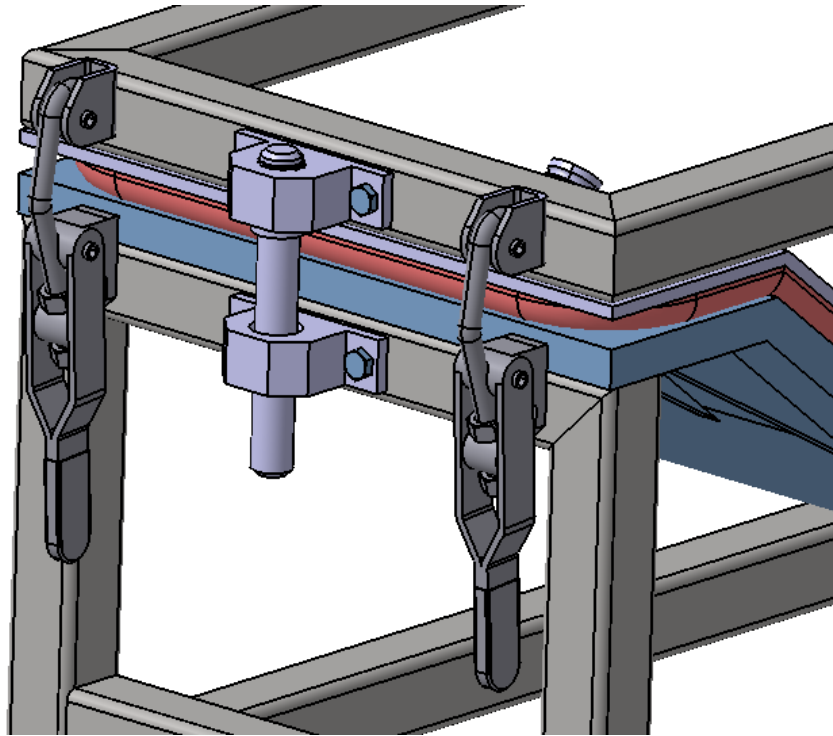
Obrázek 36 Svařený ocelový rám s madly, upínkami a naváděcími kolíky

Uzavření formy je řešeno pomocí vakua. Upínky slouží pouze k zajištění obou polovin formy. Pro zajištění formy bylo použito čtyř upínek. Budou použity hákové upínky, které pracují na principu páky a tím umožňují rychlé uzavření. Jejich velkou výhodou je malá potřeba prostoru a velká upínací síla. Upínky mají nastavitelnou délku, takže bude možné měnit velikost mezery ve formě. Maximální uzavírací síla je 2000 N.



Obrázek 37 Upínka zajišťující horní polovinu formy [29]

Pro výrobu přesného výrobku je nezbytné přesné sesazení polovin formy. Z tohoto důvodu jsou na formě připevněny naváděcí čepy, které zajistí přesné sesazení polovin formy. Pokud by forma při výrobě nebyla přesně sesazena, bude vyroben nestandardní neopravitelný výrobek.



Obrázek 38 Konstrukční řešení naváděcího systému a uchycení upínek

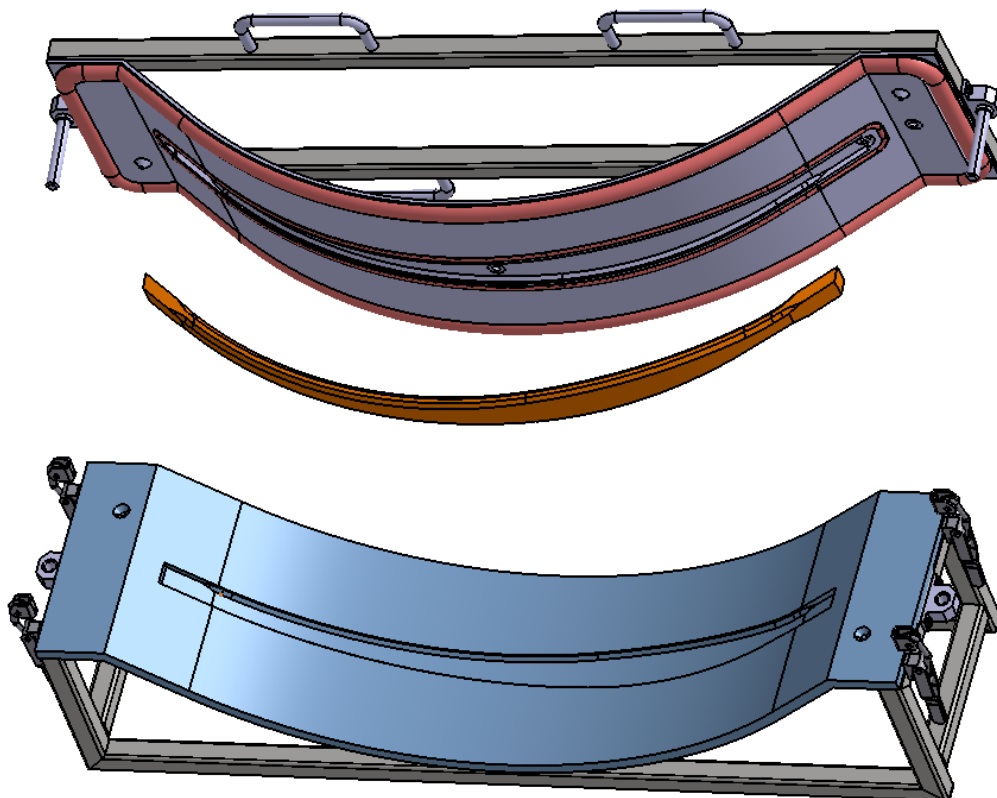
Na ploše formy jsou také vytvořeny dva kužely, které napomohou přesnému usazení formy během výrobního procesu.

#### 6.3.4 Řešení umístění vtoků a vakuových portů

Na formě jsou umístěny dva vakuové porty. Jeden souží k uzavření formy a druhý k nasání pryskyřice. Vzhledem ke tvaru výrobku jsem navrhl dvě vtoková ústí na každém konci pružiny pro snadné, rychlé, rovnoměrné a kvalitní prosycení výztuže. Vakuový port a vtoková vložka je znázorněna na následujícím obrázku.



Obrázek 39 Vlevo vakuový port, vpravo vtoková vložka



Obrázek 40 Finální sestava LRTM formy s vyráběnou pružinou

#### 6.4 Technologický postup výroby LRTM formy

Celkový povrch jedné modelové desky je  $0,7 \text{ m}^2$ . K této hodnotě jsem přidal 30 % jako rezervu. Celková plocha, na kterou jsou nanášeny vrstvy, je  $0,9 \text{ m}^2$ . Na připravenou a vyleštěnou modelovou desku je nanesen separátor RA-57 který bude tvořit základ pro výrobu formy. Separáční prostředek slouží k oddělení modelové desky od hotové formy.

Separátor RA-57 je víceúčelový, tekutý uvolňovací prostředek s krátkou dobou sušení. Použití tohoto produktu eliminuje potřebu opakovaného voskování a leštění. Separáční prostředek lze nanést pomocí štětce nebo stříkací pistole. Z důvodu úspory času navrhuji separáční prostředek stříkat pistolí. [30]

Na aplikovaný separáční prostředek je nanesen zelený gelcoat vhodný pro výrobu forem Norpol GM 60014 – zelený.

Norpol GM 60014 je gelcoat vhodný pro výrobu forem na bázi vinylesterové pryskyčice vyznačující se vynikající odolností vůči chemikáliím a rozpouštědlům. Tento gelcoat zajišťuje vysoce lesklý povrch který vydrží vysoký počet odformování. Gelcoat je stříkán ve



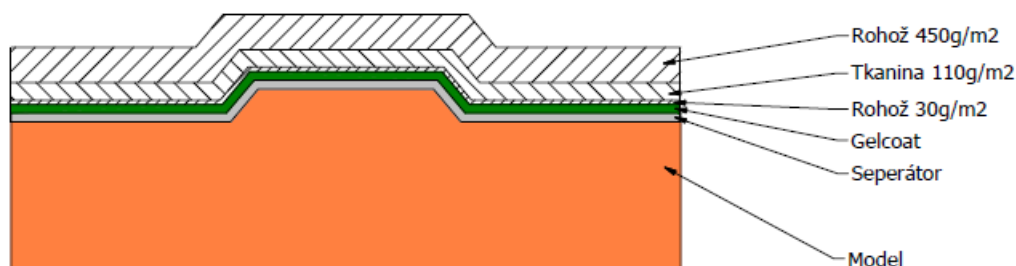
čtyřech vrstvách o tloušťce 0,5 mm do celkové tloušťky 2 mm. Želatinační doba gelcoatu je 10-25 minut. Gelcoat je vhodný pro formy laminované polyesterovou pryskyřicí. Povrch a detaily vytváříte přesným kopírováním modelu. Lze brousit a leštit. Případné opravy jsou lehce proveditelné. Při stříkání je nutné nanášet postupně tak, aby mohlo dojít k úplnému úniku nežádoucích vzduchových mikrobubinek. Gelcoat je nutné míchat s tužidlo-katalyzátorem. Doporučený katalyzátor je peroxid K1 v přídatku 1,3-2 hm. %. [30]

Jako první vrstva na vrstvu gelcoatu je přiložena skelná rohož Typ ST 3022 s gramáží 30 g/m<sup>2</sup> která je vhodná pro výrobu forem.

Díky své nízké gramáži je velmi poddajná a vhodná i pro velmi složité tvary kde tkanina nebo jiná rohož neobstojí. Je určena pro prosycení polyesteru i epoxy. Vytváří vrstvy o tloušťce 0,1-0,3 mm. [30]

Tato rohož je příkládána v pěti vrstvách do tloušťky 1mm. Pro prosycení rohože bude použita polyesterová pryskyřice HAVELpol 5 – pevnostní.

Polyesterová pryskyřice HAVELpol 5. je vhodná pro výrobu pevnostně náročných dílů, které musí odolávat většímu zatížení. Pryskyřici je nutno míchat s urychlovačem a katalyzátorem. Výrobce doporučuje použít jako katalyzátor Peroxid K1 v přídatku 1-2 hm. % a následně přidat urychlovač Kobalt 1 % roztok v přídatku 1-2 hm. % a rozmíchat aby byl v pryskyřici rovnoměrně dispergován. Urychlovač a katalyzátor se nesmí míchat společně, neboť dochází k prudké reakci. Doba zpracovatelnosti je v rozsahu 5-42 minut v závislosti na množství použitého katalyzátoru. [30]



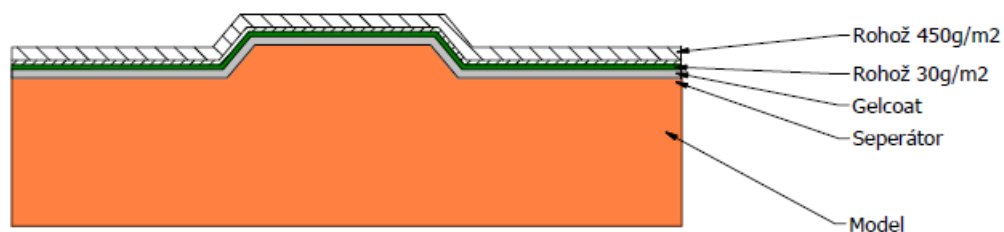
Obrázek 41 Skladba dolní části formy

Na vrstvu skelné rohože je přiložena skelná vysokopevnostní tkanina Aeroglass 110 g/m<sup>2</sup> – plátno z důvodu rozměrové stálosti formy. Jedná se o velmi kvalitní skelnou tkaninu, která se rychle prosycuje epoxidovými, polyesterovými i vinylesterovými pryskyřicemi. Vykazuje vysokou pevnost. Po prosycení je velmi transparentní. Jako pojivo bude použita opět

pryskyřice HAVELpol 5. Je nutné klást důraz na odstranění přebytečné pryskyřice a vzduchových bublin. Sklená tkanina je přikládána v počtu dvaceti vrstev o tloušťce 0,1mm do celkové tloušťky 2mm.

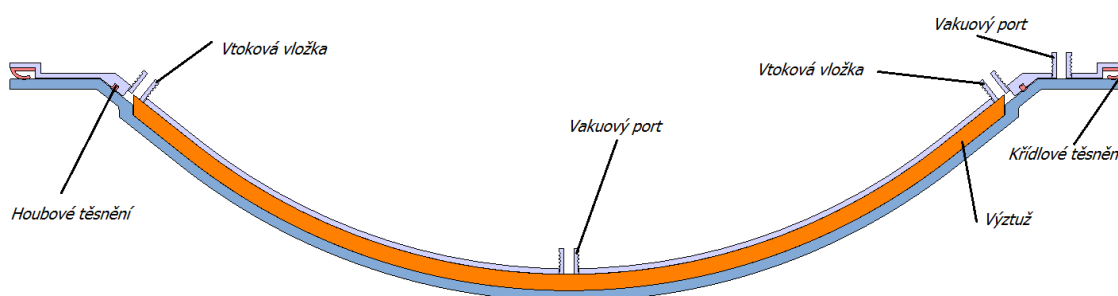
Poslední vrstvu tvoří sklená rohož RP 34 450 R s gramáží 450 g/m<sup>2</sup>, která je rovněž prosycená pryskyřicí HAVELpol 5. Tloušťka této rohože je 1 mm a je přiložena v pěti vrstvách do tloušťky 5 mm. Celková vrstva laminátu je 10 mm. Po dokončení formy jsou okraje ořezány na požadovaný rozměr. Na vnější stranu formy jsou přilepena žebra, která zajistí formě tuhost. Žebra jsou vyrobena ze skelných rohoží RP 34 450 R s gramáží 450 g/m<sup>2</sup> prosycených pryskyřicí HAVELpol 5. Tloušťka žeber bude 5 mm. Kompletní spodní polovina formy bude přilepena k rámu pomocí jednosložkového lepidla Emfimastic PU 50 určeného pro lepení laminátových dílů. Pružně spojuje laminát a kov a je tudíž vhodné pro spojení formy a rámu. Nalepený ocelový rám bude následně v místě kontaktu s formou překryt skelnou rohoží RP 34 450 R a prosycen pryskyřicí pro dokonalé spojení rámu s formou.

Horní polovina formy bude vyrobena stejnou metodou jako spodní polovina formy. Před nanášením gelcoatu je nutné připevnit těsnění potřené separačním prostředkem pro vytvoření drážky na umístění těsnění. Těsnění jsou umístěny na kraji dutiny a na okraji formy. Celková tloušťka horní vrstvy bude 5 mm. Horní polovina formy se bude skládat z 1 mm tlusté vrstvy gelcoatu Norpol GM 60014, 1 mm tlusté vrstvy rohože ST 3022 30 g/m<sup>2</sup>, a 3mm tlusté vrstvy rohože RP 34 450 R 450 g/m<sup>2</sup>. V okolí dutiny formy budou přikládány rohože RP 34 450 R 450 g/m<sup>2</sup> do tloušťky dle výkresové dokumentace. V okolí dutiny formy je vrstva laminátu (tlustší jak můžeme vidět na následujícím obrázku) aby se předešlo případným deformacím. Větší tloušťka je také z důvodu nutnosti umístění těsnění. Následující obrázek znázorňuje skladbu horního dílu formy.



Obrázek 42 Skladba horního dílu formy

Po dokončení horní vrstvy budou vyvrtány otvory pro umístění vtokových vložek a vakuového portu. Poté budou přilepeny žebra a kovový rám. Po vyhotovení obou polovin formy je nutné provést kontrolu kvality povrchu a opravit případné kazy a odstranit případné zbytky vosku a nečistot. Před výrobou je vhodné ověřit funkčnosti formy, hlavně její těsnost. Po ověření je forma připravena k výrobě.



Obrázek 43 Znárodnění umístění vtokových vložek a vakuových portů

Tabulka 3 Technologický postup výroby formy

ČO.	NÁZEV	MATERIÁL / MNOŽSTVÍ
	Výroba modelu pro spodní polovinu formy	
1.	Slepení MDF desek do bloku	MDF deska 1300x300x25 mm 20 ks, lepidlo na dřevo
2.	Výroba modelu na CNC obráběcím stroji	MDF blok 300x500x1300 mm
3.	Dokončení tvarových ploch Přebroušení Nanesení laku smíchaného s tužidlem (míchat dle návodu) Jemné přebroušení Vyleštění Nanesení separátoru	Brusný papír - P500-1500 EPOLEX LAK NA DŘEVO S1300 + tužidlo separátor RA-57
4.	Nástřik gelcoatu - 4 vrstvy do tloušťky 2 mm doba želatinace 10-25 minut	Norpol GM 60014 – 1,98 kg

	Technologická přestávka 4 hodiny	Peroxid K1 – 38 g
	Výroba spodní poloviny formy	
5.	<p>Přikládání skelných rohoží a tkanin:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ST 3022 30 g/m<sup>2</sup> 1. vrstva</li> <li>- Aeroglass 110 g/m<sup>2</sup> 2. vrstva</li> <li>- RP 34 450 R 450 g/m<sup>2</sup> 3. Vrstva</li> </ul> <p>Prosycování pryskyřicí:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- HAVELpol 5</li> </ul>	<p>ST 3022 30 g/m<sup>2</sup>, - 135 g  Aeroglass 110 g/m<sup>2</sup> – 1980 g  RP 34 450 R 450 g/m<sup>2</sup> – 2025 g    HAVELpol 5 – 4270g</p>
6.	Svaření výztužného rámu, ořezání přebytečných částí, přilepení a zalaminování kovového rámu	<p>RP 34 450 R 450 g/m<sup>2</sup> – 225 g  HAVELpol 5 – 450 g</p>
7.	<p>Výroba žeber.  RP 34 450 R 450 g/m<sup>2</sup>  Prosycování pryskyřicí:  HAVELpol 5</p>	<p>RP 34 450R 450 g/m<sup>2</sup> – 4.5 g    HAVELpol 5 – 9 g</p>
8.	Přilepení žeber pryskyřicí HAVELpol 5	
7.	Vyjmutí modelu z formy	
	Výroba modelu pro horní polovinu formy	
8.	Stejný výrobní postup jako v krocích 1-3	
	Výroba horní poloviny formy	
9.	Vložení pásky na výrobu drážek pro těsnění	
10.	<p>Nástřik gelcoatu – 2 vrstvy do tloušťky 1mm  doba želatinace 10-25 minut  Technologická přestávka 4 hodiny</p>	<p>Norpol GM 60014 – 1 kg  Peroxid K1 – 20 g</p>
11.	<p>Přikládání skelných rohoží a tkanin:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ST 3022 30 g/m<sup>2</sup> 1. vrstva</li> <li>- RP 34 450 R 450 g/m<sup>2</sup> 2. vrstva</li> </ul> <p>Prosycení pryskyřicí:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- HAVELpol 5 – 4270 g</li> </ul>	<p>ST 3022 30 g/m<sup>2</sup>, - 135 g  RP 34 450 R 450 g/m<sup>2</sup> – 1215 g  HAVELpol 5 – 2700 g</p>
12.	Svaření výztužného rámu, ořezání přebytečných částí, přilepení a zalaminování kovového rámu	<p>RP 34 450 R 450g/m<sup>2</sup> – 225g  HAVELpol 5 – 450g</p>
13.	Vyjmutí modelu z formy	
14.	Odstranění pásky na výrobu drážek pro těsnění	

15.	Vyvrtnání otvorů pro umístění vtokové vložky a vakuových portů	
16.	Instalace vtokové vložky a vakuových portů	
17.	Instalace upínek a vedení dle výkresové dokumentace	
18.	Očištění formy od nečistot	
19.	Vyleštění povrchu formy	
20.	Vizuální kontrola povrchu formy, zkouška těsnosti	

## 7 NÁVRH VÝROBNÍCH PARAMETRŮ A CENOVÁ KALKULACE

Vyráběná forma je pro technologii LRTM. Mnou navržená forma je vyrobena ze skelných vláken ve formě rohoží a tkanin prosycených polyesterovou pevnostní pryskyřicí. Na povrchu formy je nanesen gelcoat určený pro výrobu forem který vytvoří na formě tvrdý povrch odolný proti škrábancům a jinému poškození. Náklady na výrobu formy nejsou vysoké, neboť použitá technologie neklade vysoké nároky na pevnost formy. Při klasické RTM technologii je pryskyřice do formy dopravována pomocí tlaku. Je tedy kladen důraz na pevnost formy a uzavírací sílu. Takové formy bývají vyrobeny z oceli, neželezných kovů, nebo z kompozitu v závislosti na procesních parametrech a jsou tlustostěnné. Mnou navržená forma má spodní polovinu formy tlustou 10 mm a horní polovinu formy 5 mm. Pokud bychom chtěli stejnou formu vyrobit z nástrojové oceli, byla by cena za materiál, opracování a povrchovou úpravu mnohonásobně vyšší. Taková forma by ovšem také měla mnohonásobně vyšší životnost. Zadavatel pružiny předpokládá ale výrobu do 500 ks/rok a na takové objemy postačuje kompozitní forma.

Kompozitní forma bude vyráběna technologií ručního laminování. Jednotlivé vrstvy výztuže se budou přikládat na model z MDF dřeva a ručně prosycovat pryskyřicí. Následně se na model přiloží vakuový vak a forma se nechá vytvrdit. Při laminování je nutné klást důraz na odstranění co možná nejvíce vzduchových bublin, které by měly za následek vady na formě a snížily by její životnost případně jakost vyráběného výrobku.

## 7.1 Cenová kalkulace materiálu:

Tabulka 4 Cenová kalkulace materiálu

ČP	NÁZEV/MNOŽSTVÍ	CENA
	Náklady na materiál modelů	
1.	MDF deska 2800x2070x25 mm / 3 ks	6975 Kč [33]
2.	EPOLEX LAK NA DŘEVO S1300 + tužidlo 0,84 kg	248 Kč [34]
	Náklady na materiál pro výrobu formy	
4.	Gelcoat Norpol GM 60014 / 1kg	508 Kč [30]
5.	Peroxid K1	106 Kč [30]
6.	Rohož ST 3022 30 g/m <sup>2</sup> / 9 m <sup>2</sup>	421 Kč [30]
7.	Aeroglass 110 g/m <sup>2</sup> / 18 m <sup>2</sup>	787 Kč [30]
8	Rohož RP 34 450 R 450 g/m <sup>2</sup> / 7.2 m <sup>2</sup>	881 Kč [30]
9.	Pryskyřice HAVELpol 5 / 7 kg	1140 Kč [30]
10.	Ocelové profily 30x2 L 7000 mm	306 Kč [31]
11.	Upínky / 4 ks	1600 [29]
12.	Vakuové křídlové těsnění	3 Kč [32]
13.	Těsnění "houba"	3 Kč [32]
14.	Vakuový adaptér 2 ks	1462 Kč [32]
15	Vtokový adaptér 2 ks	1652 Kč [32]

Uvedené ceny jsou platné ke dni 7.5.2016

## 8 NÁVRH TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ VÝROBY PRUŽINY

Pro výrobu dobře prosyceného a jakostního výrobku splňujícího všechny požadavky je zásadní úspěšně zvolit procesní parametry. Zvolené procesní parametry pro výrobu výrobku je nutné odzkoušet. Procesní parametry, které můžeme při technologii LRTM měnit jsou tlak vakua, teplota při vytvrzování, doba vytvrzování. Stanovení optimálních procesních parametrů bude probíhat experimentálně. Bude vyrobeno deset pružin při rozdílných procesních podmínkách. Pružiny budou následně podrobeny mechanickým zkouškám při zatížení podobajícím se zatížení v provozu. Výsledné hodnoty budou pečlivě analyzovány a zaznamenány. Tlak vakua můžeme měnit pomocí regulátoru umístěného v tlakovém obvodu. Je také nutné použít dostatečně silnou vývěvu pro zajištění kompletního prosycení výztuže. Teplota při vytvrzování je v mém případě závislá od teploty okolí neboť mnou navržená forma neobsahuje temperaci. Doba vytvrzování ovlivňujeme množstvím použitého katalyzátoru a urychlovače. Na době vytvrzování nejvíce závisí mechanické vlastnosti budoucího výrobku. Čím kratší bude čas vytvrzení, tím křehčí bude finální výrobek. Vzhledem k charakteristice pružiny navrhuji vytvrzovací čas volit v horní hranici času potřebného pro vytvrzení polyesterové pryskyřice HAVELpol 5. Což je 40 minut. Pomalé vytvrzení zajistí pružině poddajnost a houževnatost, což je nezbytné pro správnou funkci pružiny ve skákacích botách. Procesní parametry po výrobu série vzorků stanovuji následující:

- Tlak 0,002 mbar
- Teplota okolí 20°C
- Doba vytvrzování 40 minut

Tyto zvolené parametry se budou měnit při výrobě zkušebních vzorků. Tímto způsobem jsme schopni stanovit procesí parametry výroby.



## 9 DISKUZE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Provedl jsem kompletní návrh LRTM formy pro výrobek dle specifikací zákazníka. Při práci jsem postupoval podle zásad pro konstrukci LRTM formy z kompozitního materiálu. Pokud bych se zaměřil na konkrétní zásady pro konstrukci forem z kompozitních materiálů, zjistil bych, že technologie a postupy pro výrobu forem se mohou v některých detailech lišit v závislosti na výrobcí forem. Například materiálové složení formy by bylo možné upravit za jiné, stejně kvalitní nebo lepší. Namísto sklených vláken prosycených polyestrovou pryskyřicí by bylo možné použít uhlíková vlákna prosycená epoxidovou pryskyřicí. Taková forma by vykazovala odlišné vlastnosti z hlediska pevnosti, tuhosti, teplotní roztažnosti a ceny. Také gelcoat, který tvoří ochrannou vrstvu formy, by bylo možné použít jiný. Na trhu jsou kromě mnou navrženého vinylesterového i epoxidově a polyesterové gelcoaty. Epoxidové gelcoaty jsou tvrdší, díky čemuž ochrání povrch formy před poškrábáním. Pokud bych se zaměřil na konstrukci formy, bylo by možné, navrhnou formu s větší násobností. Taková forma by byla mnohem větší než mnou navržená, a jistě by vyžadovala samostatný velký rám. Tuto formu by již nebylo možné umístit na stůl jak je to v mém případě. Také rám formy by mohl být odlišný. Například by mohl být vyroben z jiného materiálu. Bylo by možno vyrobit kompozitní rám při výrobě formy. Já jsem zvolil rám svařený ze standardních ocelových profilů. Toto řešení přispěje k nízké ceně formy, neboť nebude nutné vyrábět příliš atypických součástek.

Pro získání kvalitní formy, která bude vyrábět výrobky v požadované kvalitě a snese technologické podmínky procesu je kromě kvalitního návrhu formy nezbytná i vhodná technologie pro výrobu formy. Já jsem zvolil technologii ručního laminování s použitím vakuového vaku. Tato technologie má výhodu oproti klasickému ručnímu laminování v tom, že odsátím vzduchu z vakuového vaku dojde k odstranění množství bublin, které by jinak měly za následek snížení životnosti a horší kvalitu povrchu. Po výrobu lepší formy by bylo možné celý proces ručního laminování dokončit v autoklávu, ve kterém je možné optimálně regulovat procesní parametry.

Díky použitému materiálu pro výrobu formy má mnou navržená forma nízkou hmotnost. Materiál potřebný na výrobu formy a rámu váží 28 kg. Po odřezání okrajů a úpravě je finální hmotnost formy 23,4 kg. Horní polovina formy s rámem váží 9 kg a spodní polovina formy s rámem 12 kg. Při tak nízké hmotnosti formy, není nutné využívat k manipulaci s formou žádných vozíků nebo mechanických zvedáků. Uzavření i otevření formy zvlád-

nou dva lidé. Pokud by byla forma pro stejný výrobek vyrobena z oceli, bylo by pro její vysokou hmotnost nezbytné její umístění v lise. Nutnost využít lis při otevírání a uzavírání formy by prodražilo celý výrobní proces.

Z ekonomického hlediska je mnou navržená forma velice výhodná. Pokud budeme uvažovat samotný materiál pro výrobu formy, modelových desek a příslušenství, dostáváme se na částku 16217 Kč. Ve srovnání s podobnou ocelovou formou, jsou náklady na pořízení materiálu minimální. Do celkových nákladů na výrobu formy kromě nákladů na materiál zahrnujeme i výrobní náklady na výrobu modelových desek a náklady na lidskou práci. Přesné výrobní náklady nejsou známy, neboť jsem nestanovoval přesný postup obrábění modelových desek. Neznám proto časy potřebné na obrobení MDF dřeva. Usuzuji ale, že náklady na obrobení MDF dřeva budou mnohem nižší než náklady na obrobení nástrojové oceli, ze které by byla vyráběna ocelová forma. Také rychlost obrábění dřeva je mnohem vyšší než rychlost obrábění oceli. Dochází také k mnohem menšímu opotřebení nástrojů, což se promítne do celkové kalkulace.

Při výrobě formy je nutné klást důraz na ochranu zdraví. Při práci s pryskyřicí a skelnou tkaninou jsou ohroženy především dýchací cesty, kůže a zrak. Proto je nutné při výrobě formy používat ochranných pomůcek jako jsou ochranné brýle, respirátor rukavice a kombinéza.

## ZÁVĚR

Závěrem této práce bych chtěl poukázat na splnění cílů diplomové práce. Teoretická část diplomové práce je zaměřené na problematiku RTM technologie. V první kapitole se zaměřuji na formy pro kompozitní materiály, jejich rozdělení a charakterizaci. Druhá kapitola obsahuje informace o materiálech pro výrobu forem, jejich rozdělení, výhodách a nevýhodách. Dále jsou zde zmíněny zásady pro konstrukci forem, popis jednotlivých prvků a možné způsoby výroby forem. Třetí kapitola se zabývá polymerními kompozitními materiály, jejich charakteristickými vlastnostmi a rozdělením. Ve čtvrté a poslední kapitole se zmiňuji o RTM technologii. Je zde popis RTM technologie a základní vývojové směry RTM technologie. Dále je zde popsán způsob výroby výrobků pomocí RTM, popis RTM formy a komponent potřebných pro výrobu. Jako poslední je zde zmínka o některých výrobcích vyráběných technologií RTM.

V praktické části jsem se zabýval samotným návrhem LRTM formy pro kompozitní pružinu která je součástí skákacích bot. V první fázi jsem provedl 3D modelaci pružiny na základě hodnot zadaných zadavatelem. Navrhl jsem materiál pro výrobu pružiny. Konkrétně se jedná o skelná vlákna prosycená polyesterovou pryskyřicí. Materiál byl zvolen na základě měření ohybu prototypových pružin. Následně jsem provedl 3D modelaci a návrh materiál a technologie obrábění modelových desek sloužící pro výrobu LRTM formy. Materiál pro výrobu modelových desek jsem zvolil MDF desky. Jako nejvhodnější způsob výroby modelů jsem z důvodu složitosti tvarových ploch zvolil frézování na pětiosém CNC stroji s následným ručním dokončením pomocí brusných papírů. Po návrhu modelů jsem se začal zabývat nejdůležitější částí diplomové práce a to samotným návrhem LRTM formy včetně materiálového složení. Jako materiál pro výrobu formy jsem zvolil skelné tkaniny a rohože prosycené polyesterovou pryskyřicí. Tloušťku formy jsem zvolil na základě ohybové zkoušky na vzorcích o dvou rozdílných tloušťkách. Vzhledem k tomu že by samotná forma neměla dostatečnou tuhost, provedl jsem i konstrukční řešení rámu z ocelových normalizovaných profilů. Rám na formě také slouží pro uchycení vedení formy a upínek pro uzavření formy.

Další kapitolou praktické části je technologický postup výroby formy. Technologický postup je do detailů zpracovaný postup výroby formy včetně pořadí kladení jednotlivých vrstev. Je zde taky uvedeno množství jednotlivých materiálů potřebných pro výrobu formy. Forma je dvoudílná, skládá se z dolní a horní poloviny, výstužného rámu, dvou těsnění,

vtokových a odvodušňovacích kanálů, upínek a vedení. Součástí technologického postupu je i příprava formy k výrobě. Důležitým úkolem před samotnou výrobou je kontrola funkčnosti formy. Především je důležité zkontrolovat povrch formy, zdali neobsahuje kazy, a provést zkoušku těsnosti formy.

Poslední kapitola se zabývá volbou technologických parametrů a kalkulací nákladů na materiál formy. Je nutné stanovit technologické parametry výroby kompozitní pružiny. Technologické parametry budou přesně zvoleny až na základě provedení série zkoušek. V práci jsem provedl stanovení orientačních technologických parametrů. Dobu vytvrzování jsem doporučil na základě materiálového listu pryskyřice. Tlak vakua dle limitů vývěvy. Teplota vytvrzování se bude odvíjet od teploty okolí, neboť forma neobsahuje temperaci.

Cenová kalkulace proběhla na základě známého množství materiálu potřebného pro výrobu formy. Náklady na materiál pro výrobu modelových desek a formy jsou 16217 Kč. Pro celkovou kalkulaci je k těmto nákladům nezbytné připočítat i náklady spojené s výrobou modelových desek a platy dělníků.

V příloze práce je přiložena výkresová dokumentace pružiny, modelů pro výrobu formy, výkresová dokumentace částí formy, rámu formy a kompletní sestavy. Všechny stanovené cíle diplomové práce byly splněny.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ASM handbook. Materials Park, Ohio: ASM International, c2001. ISBN 0871707039.
- [2] MENNIG, Günter a Klaus STOECKHERT. *Mold-making handbook*. 3rd Edition. Cincinnati: Hanser Publications, 2013. ISBN 9781569904466.
- [3] ELSHENNAWY, Ahmad K a Gamal S WEHEBA. *Manufacturing processes & materials*. Fifth edition. Dearborn, Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 2015. ISBN 9780872638716.
- [4] STRONG, A. *Fundamentals of composites manufacturing: materials, methods and applications*. 2nd ed. Dearborn, Mich.: Society of Manufacturing Engineers, c2008. ISBN 9780872638549.
- [5] MICHAEL C.Y. NIU. *Composite airframe structures: practical design information and data*. 3rd ed. Hong Kong: Conmilit Press, 2010. ISBN 9789627128113.
- [6] LEE, Dai Gil a Nam P SUH. *Axiomatic design and fabrication of composite structures: applications in robots, machine tools and automobiles*. New York: Oxford University Press, c2006. ISBN 0195178777.
- [7] C.D. RUDD .. [ET AL.]. *Liquid moulding technologies: resin transfer moulding, structural reaction injection moulding, and related processing techniques*. 1. publ. Warrendale, PA: SAE International, 1997. ISBN 9781855732421.
- [8] RAJU S. DAVE, ALFRED C. LOOS (EDS.), eds. a WITH CONTRIBUTIONS FROM F. ABRAMS .. [ET AL.]. *Processing of composites*. München: Hanser, 1999. ISBN 9783446180444.
- [9] SLOAN, Jeff. *Proper mold care: Mandatory!.* *Composites Technology* [online]. 2011 [cit. 2016-04-21]. Dostupné z: <http://www.compositesworld.com>
- [10] BLACK, Sara. *New metal coating to optimize composite tooling. High-Performance Composites* [online]. 2008 [cit. 2016-04-21]. Dostupné z: <http://www.compositesworld.com>
- [11] BAREŠ, Richard. *Kompozitní materiály*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [12] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2., opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.

- [13] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [14] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2003. ISBN 8021424435.
- [15] EDITORS, Hanna Dodiuk. *Handbook of Thermoset Plastics*. 3rd ed. Burlington: Elsevier Science, 2013. ISBN 9781455731091.
- [16] SWIFT, K. G. a J. D. BOOKER. *Manufacturing process selection handbook*. Boston: Elsevier, Butterworth-Heinemann, 2013. ISBN 0080993605.
- [17] GARDINER, Ginger. *Resin transfer molding: An update*. CompositesWorld [online]. 2016 [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: <http://www.compositesworld.com/>
- [18] CAMPBELL, F. C. *Manufacturing technology for aerospace structural materials*. Boston: Elsevier, 2006. ISBN 9781856174954.
- [19] CALIENDO, Heather. *National Composites Centre installs RTM system from KraussMaffei*. CompositesWorld [online]. 2016 [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: <http://www.compositesworld.com/>
- [20] Injection Unit BETA3 RTM. Euroresins [online]. [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: <http://www.euroresins.com/products/machinery/injection-processes>
- [21] Closed molding. Compositesworld [online]. [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: <http://www.compositesworld.com/knowledgecenter/closed-molding/Closed-Mold-Process/Resin-Transfer-Molding>
- [22] Vacuum Infusion Molding. Moldedfiberglass [online]. [cit. 2016-05-07]. Dostupné z <http://www.moldedfiberglass.com/processes/processes/closed-molding-processes/vacuum-infusion-molding>
- [23] *LRTM machine*. Neo [online]. [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: [http://www.neo.co.th/p\\_MagnumVenus\\_en.php](http://www.neo.co.th/p_MagnumVenus_en.php)
- [24] GARDINER, Ginger. *HP-RTM on the rise*. CompositesWorld [online]. 2015 [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: <http://www.compositesworld.com/articles/hp-rtm-on-the-rise>
- [25] BLACK, Sara. *SQRTM enables net-shape parts*. CompositesWorld [online]. 2010 [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: <http://www.compositesworld.com/articles/hp-rtm-on-the-rise>

- [26] SLOAN, Jeff. *Auto composites quest: One-minute cycle time?* CompositesWorld [online]. 2008 [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: <http://www.compositesworld.com/articles/hp-rtm-on-the-rise>
- [27] *Wet compression molding*. Compositesworld [online]. 2016 [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: <http://www.compositesworld.com/blog/post/wet-compression-molding>
- [28] SLOAN, Jeff. *Integrated, optimized aircraft door*. High-Performance Composites [online]. 2012 [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: <http://www.compositesworld.com/articles/integrated-optimized-aircraft-door>
- [29] *Hákové upínky*. Zamet [online]. [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: <http://www.zamet.cz/cz/14-detail-produktu/5-hakove/132-hakove-upinky.html>
- [30] *Havel composites* [online]. [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/>
- [31] *Ocelové profily*. Kondor [online]. [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: <http://www.kondor.cz/jekl-30x30x2/d-78629/>
- [32] *JHM technologies* [online]. [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: <https://www.rtmcomposites.com/>
- [33] *Topdrevo* [online]. [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: <http://www.topdrevo.cz/>
- [34] *Ibarvy* [online]. [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: <http://ibarvy.com>
- [35] SOCIETY OF PLASTICS ENGINEERS. *ANTEC 2000 plastics: the magical solution: conference proceedings, Orlando, Florida, May 7-11, 2000*. Brookfield, Conn: Society of Plastics Engineers, 2000. ISBN 9781566769570.
- [36] STAFF. *Tooling*. CompositesWorld [online]. 2014 [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: <http://www.compositesworld.com/articles/tooling>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

RTM	Resin transfer molding	
LRTM	Light Resin transfer molding (Lehké RTM)	
HP-RTM	High pressure resin transfer molding (Vysokotlaké RTM)	
SQRTM	Same qualified resin transfer molding	
$F_{\max}$	Zatížení na mezi pevnosti	[N]
$y_{fM}$	Deformace na mezi pevnosti	[mm]
E	Modul pružnosti v tahu nebo ohybu	[MPa]
$\sigma_{fM}$	Pevnost v ohybu	[MPa]
$\varepsilon_{fM}$	Průhyb	[%]
W	Práce	[Nmm]



## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 Forma pro ruční laminování s potřebnými komponenty [4]</i> .....	13
<i>Obrázek 2 Forma pro vakuovou infuzi s potřebnými komponenty [4]</i> .....	14
<i>Obrázek 3 Vyztužení formy [5]</i> .....	14
<i>Obrázek 4 Forma pro lisování kompozitů [6]</i> .....	15
<i>Obrázek 5 Postup výroby keramické formy [7]</i> .....	20
<i>Obrázek 6 Keramická forma [5]</i> .....	20
<i>Obrázek 7 Forma z monolitického grafitu [5]</i> .....	22
<i>Obrázek 8 Pevná forma [7]</i> .....	23
<i>Obrázek 9 Odvzdušňovací technika pinch –off [7]</i> .....	25
<i>Obrázek 10 Typy těsnění a) konvenční kruhové těsnění b) gumové trubice c) neoprenový pásek d) porézni těsnění e) tenká mezera f) vytlačované prismatické těsnění [7]</i> .....	25
<i>Obrázek 11 Možnost odvodu vzduchu z formy [7]</i> .....	26
<i>Obrázek 12 Okraj formy s tenkou mezerou ‘Flash gab’ [7]</i> .....	27
<i>Obrázek 13 Preform [8]</i> .....	29
<i>Obrázek 14 Typy materiálů [11]</i> .....	30
<i>Obrázek 15 Závislost orientace vláken na pevnosti kompozitního materiálu [13]</i> .....	31
<i>Obrázek 16 Orientace výztuže a) jednosměrně orientovaná, b) dvousměrně orientovaná, c) vícesměrně orientovaná, d) nahodile orientovaná [14]</i> .....	33
<i>Obrázek 17 Typy vláknových výztuží [12]</i> .....	34
<i>Obrázek 18 RTM cyklus [16]</i> .....	35
<i>Obrázek 19 RTM vstřikovací jednotka [19]</i> .....	37
<i>Obrázek 20 RTM vstřikovací jednotka Euroresins [20]</i> .....	37
<i>Obrázek 21 Princip LRTM technologie [22]</i> .....	38
<i>Obrázek 22 Popis komponent LRTM formy [23]</i> .....	39
<i>Obrázek 23 Stovnění výrobních časů SQRTM a autoklávu [25]</i> .....	40
<i>Obrázek 24 Uhlíkový kokpit vozu BMW i3 [26]</i> .....	40
<i>Obrázek 25 Části karoserie vozu BMW i8 a i3 [27]</i> .....	41
<i>Obrázek 26 Dveře komerčního letadla [28]</i> .....	41
<i>Obrázek 27 Skákací boty</i> .....	44
<i>Obrázek 28 Základní rozměry pružiny</i> .....	45
<i>Obrázek 29 3D model pružiny</i> .....	46

---

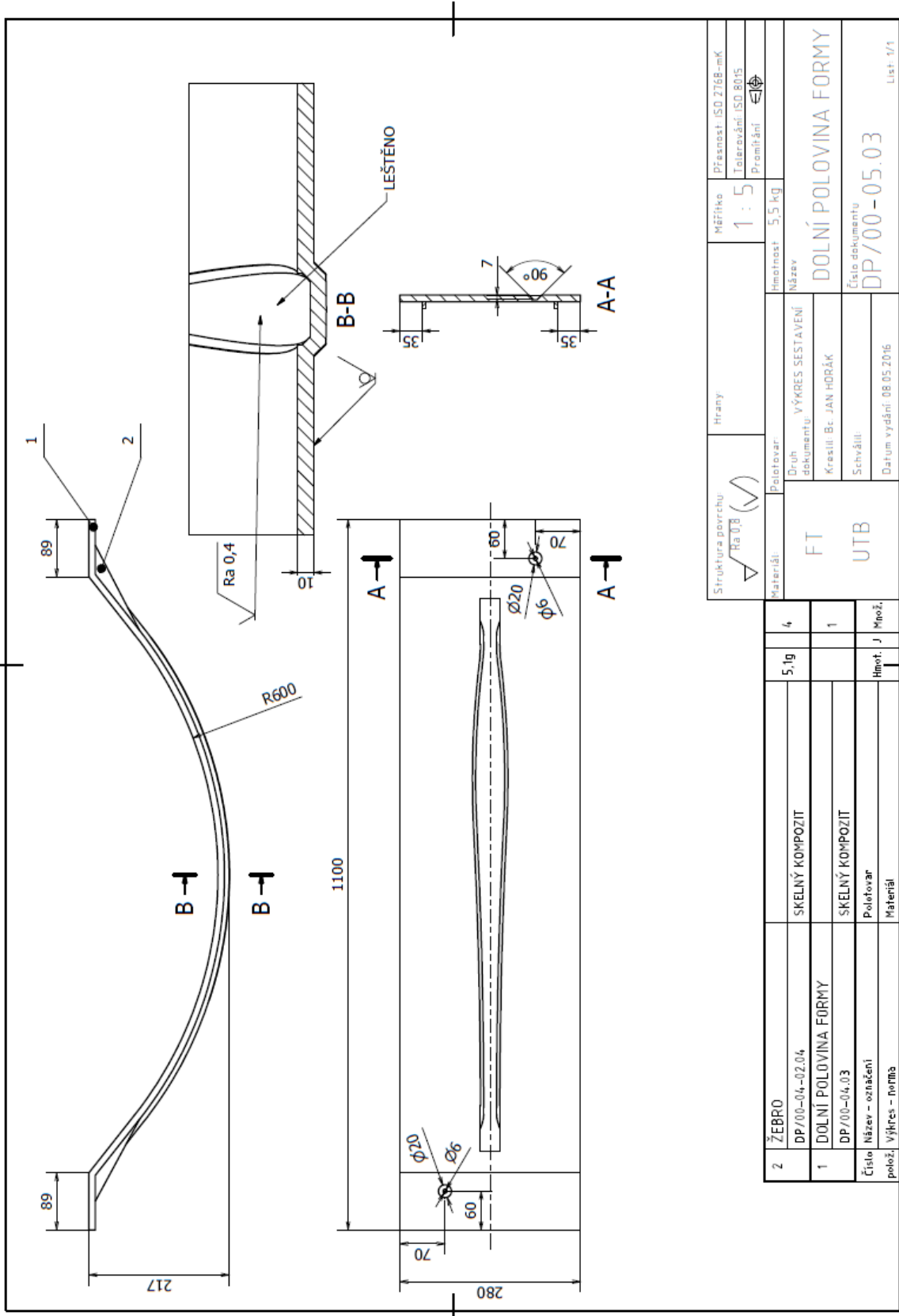
<i>Obrázek 30 Výroba prototypové pružiny .....</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 31 Měření tuhosti pružiny .....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 32 Graf znázorňující průběh měření .....</i>	<i>48</i>
<i>Obrázek 33 Modely sloužící pro výrobu formy .....</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 34 Řez formou.....</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 35 Třibodová ohybová zkouška .....</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 36 Svařený ocelový rám s madly, upínkami a naváděcími kolíky .....</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 37 Upínka zajišťující horní polovinu formy [29] .....</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 38 Konstrukční řešení naváděcího systému a uchycení upínek.....</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 39 Vlevo vakuový port, vpravo vtoková vložka .....</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 40 Finální sestava LRTM formy s vyráběnou pružinou .....</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 41 Skladba dolní části formy .....</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 42 Skladba horního dílu formy .....</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 43 Znárodnění umístění vtokových vložek a vakuových portů.....</i>	<i>59</i>

**SEZNAM TABULEK**

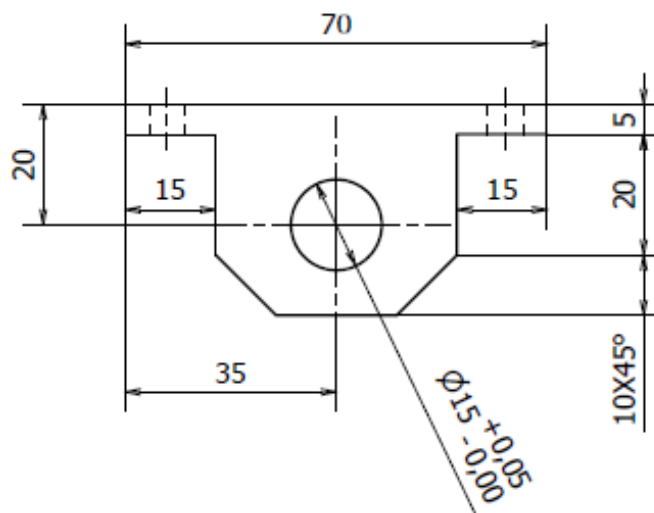
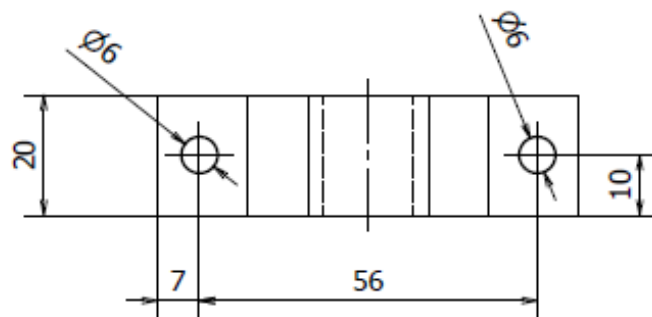
<i>Tabulka 1 Výsledky měření tuhosti pružiny .....</i>	<i>48</i>
<i>Tabulka 2 Výsledky ohybové zkoušky .....</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 3 Technologický postup výroby formy .....</i>	<i>59</i>
<i>Tabulka 4 Cenová kalkulace materiálu .....</i>	<i>63</i>

**SEZNAM PŘÍLOH**

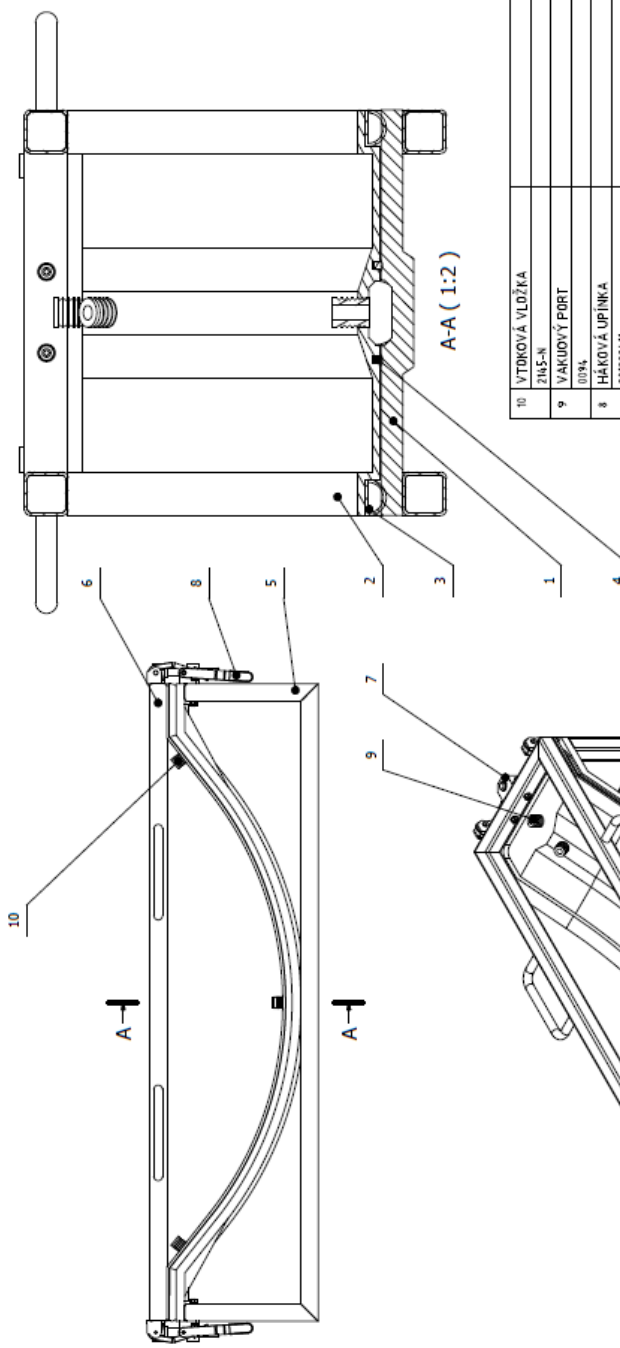
DP/00-05.03.....	Dolní polovina formy
DP/00-03-01.04.....	Držák čepu
DP/00.02.....	Sestava formy
DP/00-04.03.....	Horní polovina formy
DP/00-02-04.04.....	Jekl 30X2 L220
DP/00-02-02.04.....	Jekl 30X2 L230
DP/00-01-02.04.....	Jekl 30X2 L280
DP/00-02-03.04.....	Jekl 30X2 L280
DP/00-01-01.04.....	Madlo
DP/05-01-02.03.....	Modelová deska horní
DP/05-01-01.03.....	Modelová deska dolní
DP/00-02.03.....	Rám dolní
DP/00-01.03.....	Rám horní
DP/05.04.....	Sestavení uzavírání formy
DP/00-03.03.....	Vedení formy
DP/00-03-02.04.....	Vodící pouzdro
DP/00-04-02.04.....	Žebro
DP/00-01-03.04.....	Jekl 30X2 L1100
DP/00-03-03.04.....	Vodící čep



2	ŽEBRO	SKELNÝ KOMPOZIT	5,1g	4	Struktura povrchu Ra 0,4 (M)	Hrany	Měřítka 1 : 5	Přesnost ISO 2768-mK Tolerování ISO 8015 Promítání	
1	DOLNÍ POLOVINA FORMY	SKELNÝ KOMPOZIT		1	Číslo dokumentu DP/00-04.03	Druh dokumentu VÝKRES SESTAVENÍ Kreslil: Bc. JAN HORAČEK Schválil:	hmotnost 5,5 kg		
Číslo polož.		Název výkres - norma	Hmot., g	Množ.	Název DOLNÍ POLOVINA FORMY				
					Číslo dokumentu DP/00-05.03				
					Datum vydání: 08.05.2016				List 1/1

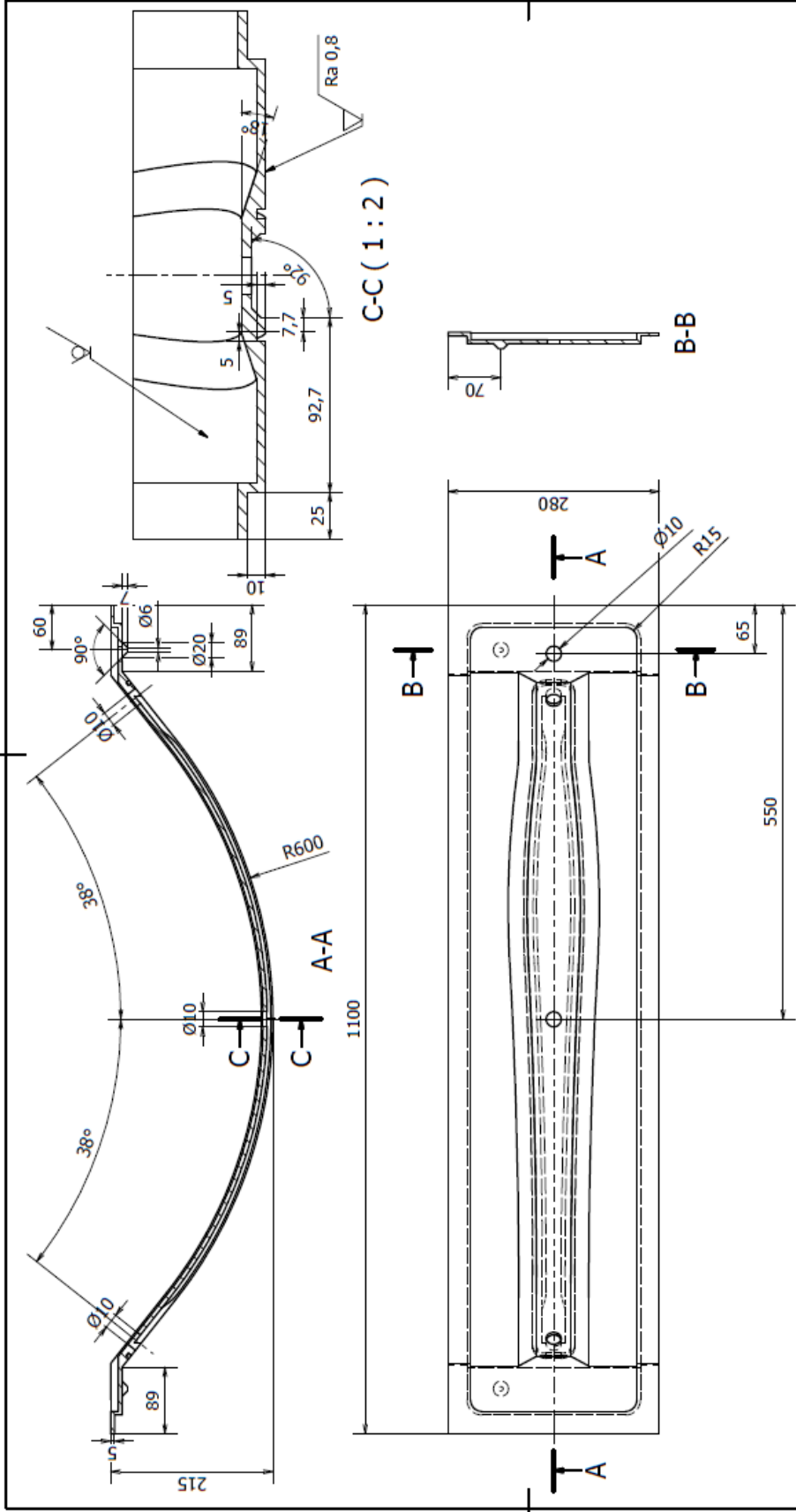


Struktura povrchu: 		Hrany: 		Měřítko 1:1	Přesnost: ISO 2768-mK Tolerování: ISO 8015 Promítání:
Materiál: 11 375		Polotovár: 80X40X20 ČSN EN 10058		Hmotnost: 0,2 kg	
FT  UTB	Druh dokumentu: VÝKRES SOUČÁSTI			Název DRŽÁK ČEPU	
	Kreslil: Bc. JAN HORÁK				
	Schválil:  Datum vydání: 12.05.2016			Číslo dokumentu DP/00-03-01.04	
List: 1/1					



10	VTOKOVÁ VLOŽKA ZLIS-N		2
9	VAKUOVÝ PORT 0094		2
8	HÁKOVÁ UPÍNKA 08000411	0,27	4
7	VEDENÍ FORMY DP/02-03.03	0,6	2
6	RÁM HORNÍ DP/02-01.03	6,56	1
5	RÁM DOLNÍ DP/02-02.03	6,3	1
4	TĚSNĚNÍ "HOUBA"		1
3	TĚSNĚNÍ KŘÍDLOVÉ 8095-00 1600-000		1
2	HORNÍ POLOVINA FORMY DP/02-04.03	2,7	1
1	DOLNÍ POLOVINA FORMY DP/02-05.03	5,5	1
Číslo kresby - sestava		Položka	10001 / 10002
půloží VÝKRES - norma		Měřítko	1:1
Struktura prvků		Měřítko	1:1
		1:5	
		1:20	
		1:50	
		1:100	

Schválil:	Upraveno:	Upraveno:	Upraveno:
FT	UTB		
Sestava formy			
Číslo dokumentu			
DP/00.02			
Datum vydání: 08.05.2018			
List: 1/1			



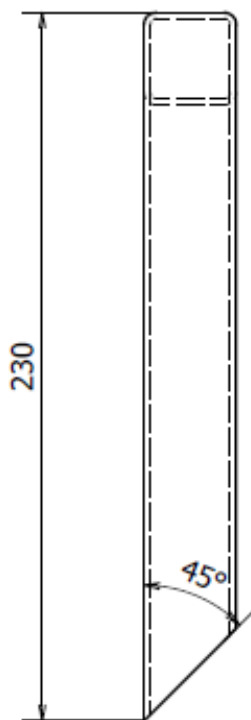
DUTINU FORMY LEŠTIT NA Ra 0,4

Struktura povrchu	Hrany	Měřítka	Přesnost ISO 2768-mK
		1:5	Tolerování ISO 8015
			Proměřání
Materiál	Položtovar	Hmotnost	2,7kg
FT	Druh dokumentu: VÝKRES SOUČÁSTI	Název	HORNÍ POLOVINA FORMY
UTB	Kreslí	Číslo dokumentu	DP/00-04.03
	Schválí	Datum vydání: 07.05.2016	List 1/1

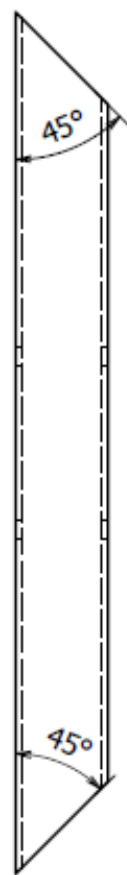
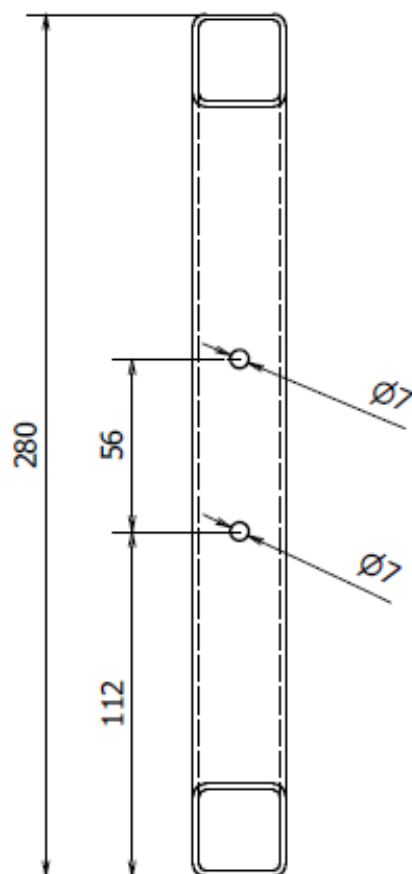


220

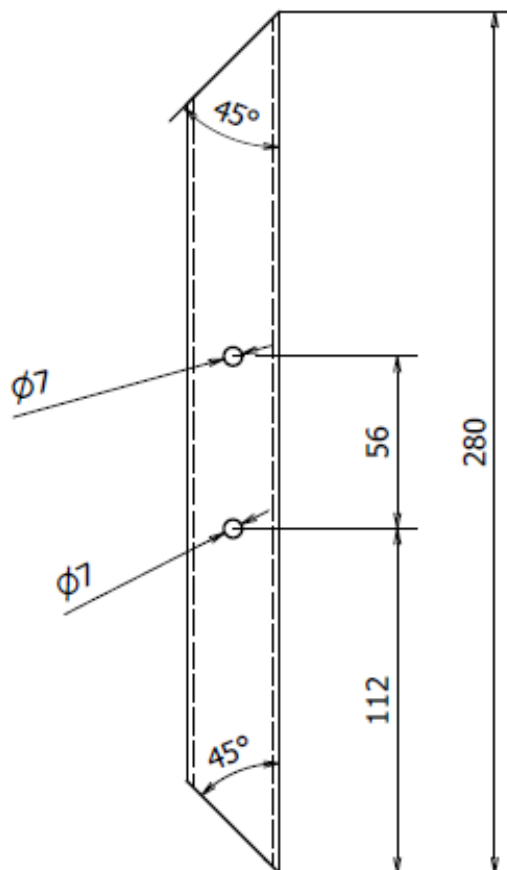
Struktura povrchu:		Hrany:		Měřítko	Přesnost: ISO 2768-mK
				1 : 2	Tolerování: ISO 8015
					Promítání
Materiál: 11 375	Polotovary: ČSN EN 10219-2		Hmotnost 0,37 kg		
FT	Druh dokumentu: VÝKRES SOUČÁSTI		Název		
	Kreslil: Bc. JAN HORÁK		JEKL 30X2 L220		
UTB	Schválil:		Číslo dokumentu		
	Datum vydání: 12.05.2016		DP/00-02-04.04		



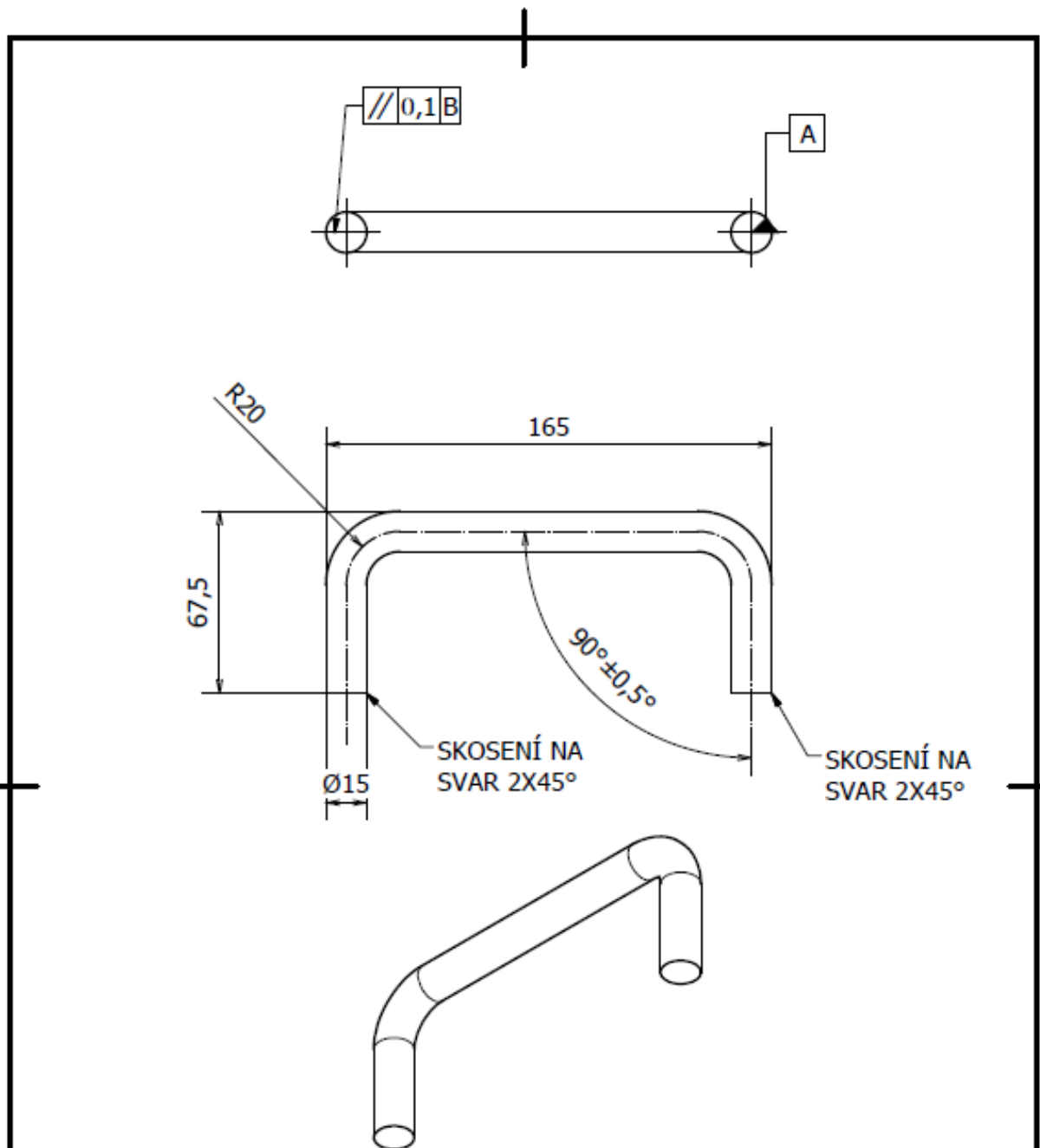
Struktura povrchu:		Hrany:		Měřítko	Přesnost: ISO 2768-mK
				1 : 2	Tolerování: ISO 8015
					Promitání
Materiál: 11 375	Polotovary: ČSN EN 10219-2		Hmotnost 0,34 kg		
FT  UTB	Druh dokumentu: VÝKRES SOUČÁSTI		Název		
	Kreslil: Bc. JAN HORÁK		JEKL 30X2 L230		
	Schválil:		Číslo dokumentu		
	Datum vydání: 12.05.2016		DP/00-02-02.04		
					List: 1/1



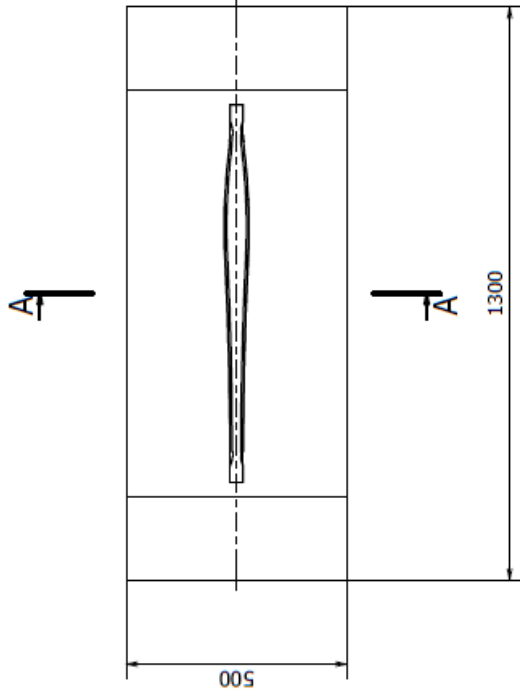
Struktura povrchu:		Hrany:		Měřítko	Přesnost: ISO 2768-mK
				1 : 2	Tolerování: ISO 8015
					Promítání
Materiál: 11 375	Polotovary: ČSN EN 10219-2	Hmotnost: 0,43 kg			
FT  UTB	Druh dokumentu: VÝKRES SOUČÁSTI	Název			
	Kreslil: Bc. JAN HORÁK	JEKL 30X2 L280			
	Schválil:	Číslo dokumentu			
	Datum vydání: 12.05.2016	DP/00-01-02.04			
					List: 1/1



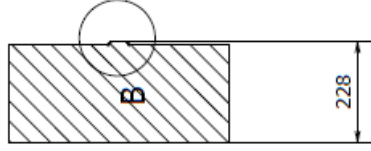
Struktura povrchu:		Hrany:		Měřítko 1 : 2	Přesnost: ISO 2768-mK
					Tolerování: ISO 8015
					Promítání
Materiál: 11 375	Polotovary: ČSN EN 10219-2	Hmotnost: 0,43 kg			
FT  UTB	Druh dokumentu: VÝKRES SOUČÁSTI	Název JEKL 30X2 L 280			
	Kreslil: Bc. JAN HORÁK				
	Schválil:	Číslo dokumentu DP/00-02-03.04			
	Datum vydání: 12.05.2016				



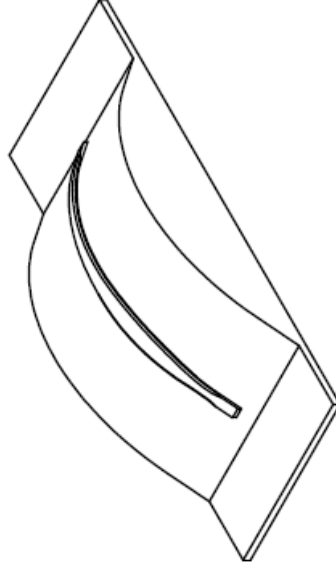
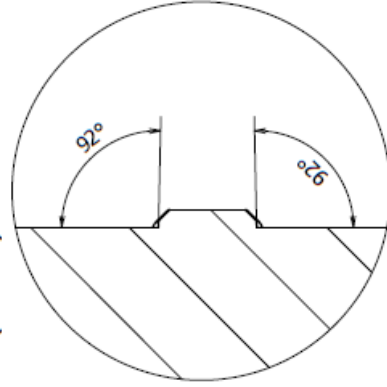
Struktura povrchu: ✓(✓)		Hrany:		Měřítko 1 : 2	Přesnost: ISO 2768-mK
					Tolerování: ISO 8015
					Projitání
Materiál: 11 375		Polotovár: ČSN EN 10219-2		Hmotnost: 0,45 kg	
FT  UTB	Druh dokumentu: VÝKRES SOUČÁSTI		Název MADLO		
	Kreslil: Bc. JAN HORÁK				
	Schválil:		Číslo dokumentu DP/00-01-01.04		
	Datum vydání: 07.05.2016				
List: 1/1					



A-A

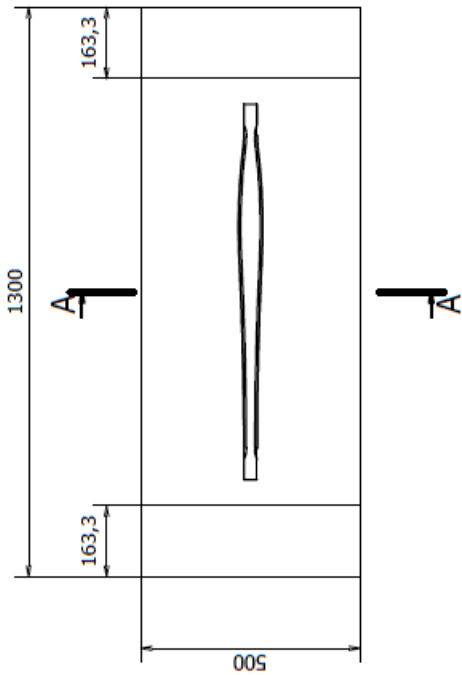


B (1:2)



OBROBIT DLE CNC PROGRAMU

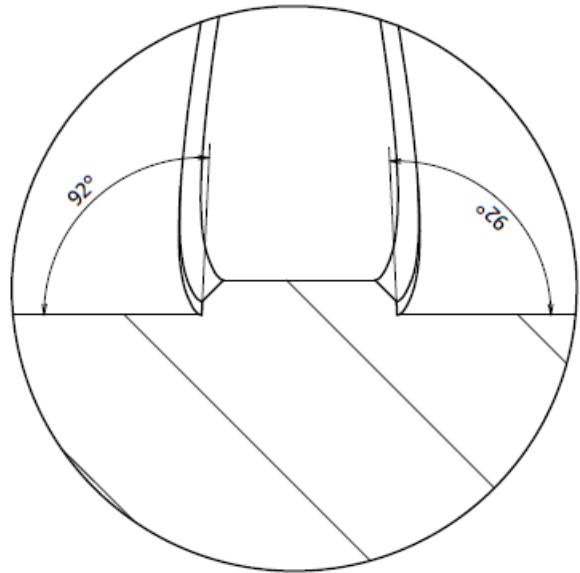
Struktura povrchu	Hrany	Měřítko	Přesnost: ISO 2768-mK Tolerování: ISO 8015 Promítání:
Materiál: MDF	Položka:	Hmotnost: 35,7kg	
FT	Druh dokumentu: VÝKRES SOUČÁSTI	Název: MODELOVÁ DESKA H	
UTB	Kreslí: Bc. JAN HORÁK	Číslo dokumentu: DP/05-01-02.03	
	Schválí:		
	Datum vydání: 07.05.2016		List 1/1



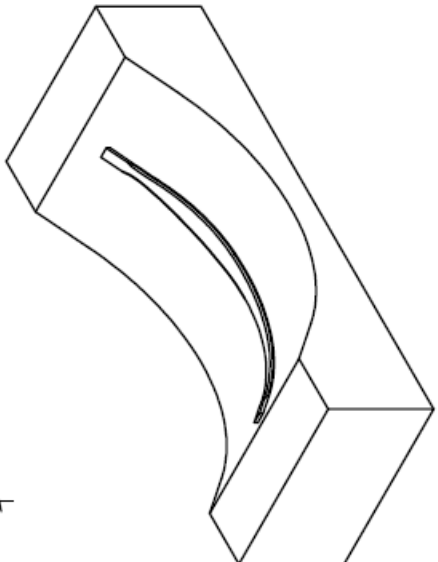
A-A



A

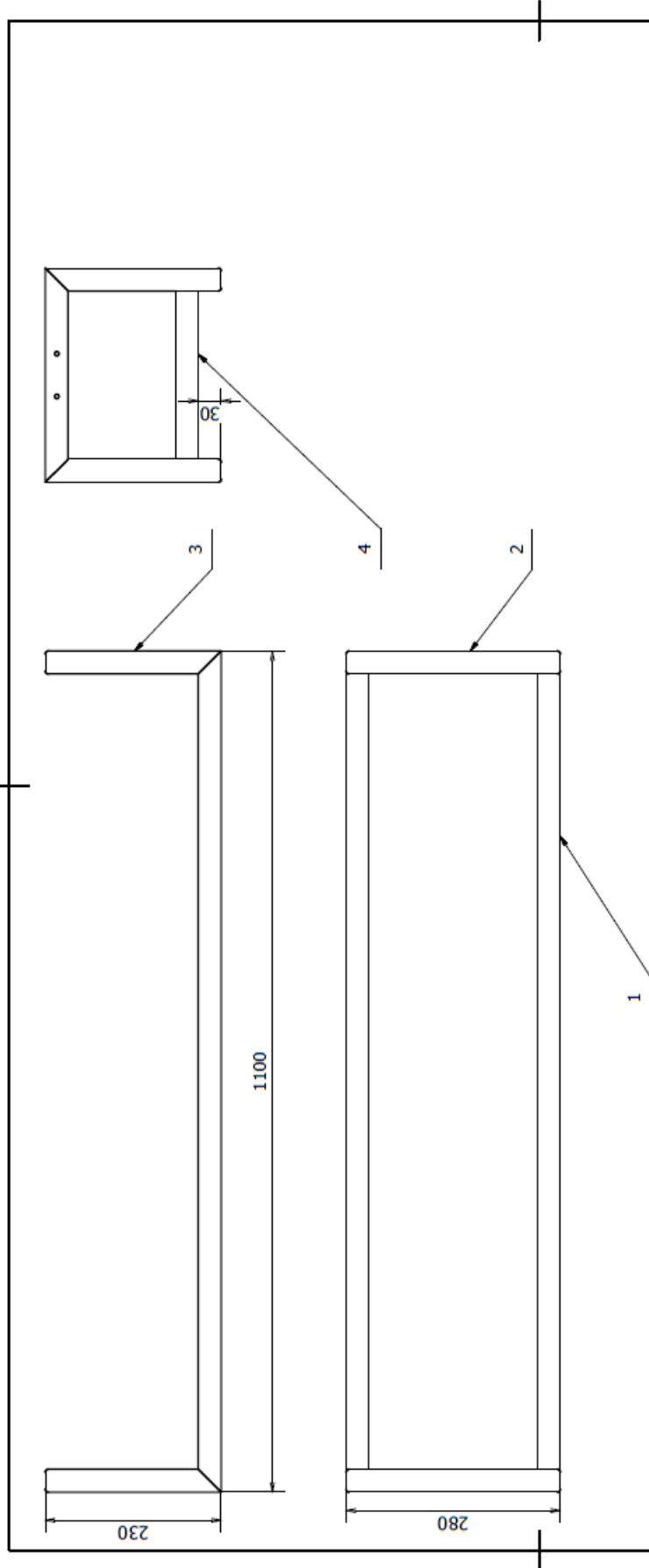


B (1:1)



OBROBIT DLE CNC PROGRAMU

Struktura povrchu:	hrany	Měřítka	Číslo ISO 2768-mK
Materiál: MDF	Pojistovar:	1 : 10	Tolerování: ISO 8015
FT	Druh dokumentu: VÝKRES SOUČÁSTI	hmotnost: 60kg	Průmítání:
UTB	Kreslí:	Název	MODELOVÁ DESKA D
	Schválí:	Číslo dokumentu	DP/05-01-01.03
	Datum vydání: 07.05.2016		List: 1/1



DÍLY SVARĚT – SVAR KOUTOVÝ OBVOODOVÝ VELIKOST 1

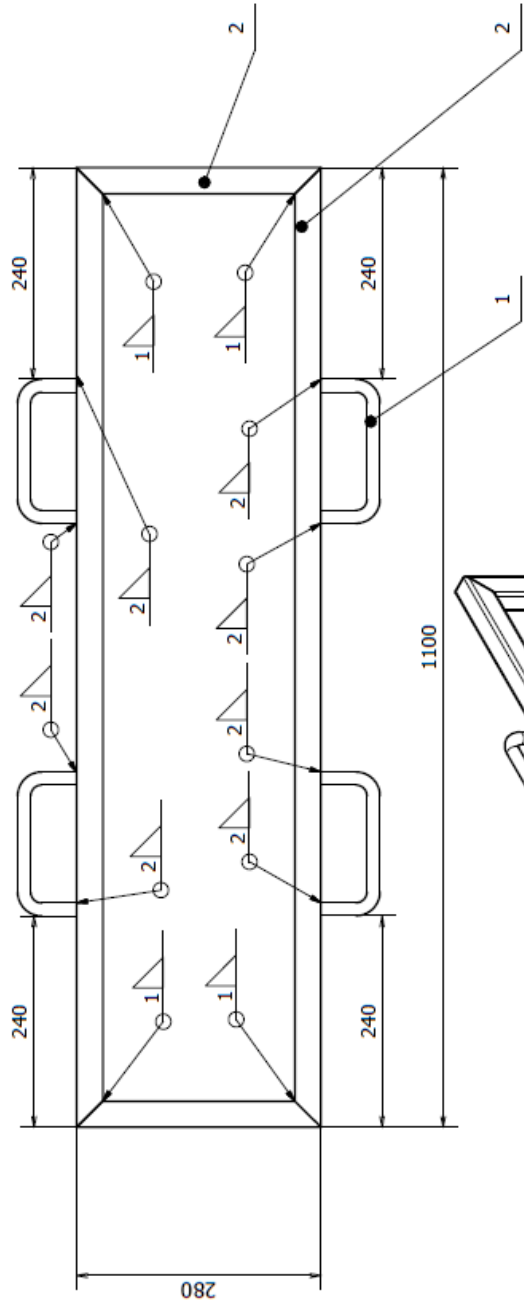
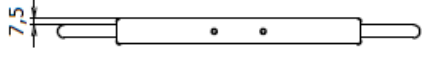
SVARÝ 131 – OK AUTROD 12.51 – STUPEŇ JAKOSTI SVARŮ “C” DLE CSN EN 25 817

SVARÝ NA PLOCHÁCH ZAČÍSTIT DO ROVINY

4	JEKL 30X2 L220 DP/00-02-04.04	ČSN EN 10219-2 10219-1	0,37	2
3	JEKL 30X2 L230 DP/00-02-03.04	ČSN EN 10219-2 10219-1	0,34	4
2	JEKL 30X2 L280 DP/00-02-02.04	ČSN EN 10219-2 10219-1	0,43	2
1	JEKL 30X2 L110 DP/00-02-01.04	ČSN EN 10219-2 10219-1	1,8	2
Číslo polož.	Název – označení	Polotovary	Hmot.	J
	Výkres – norma	Materiál		Množ.

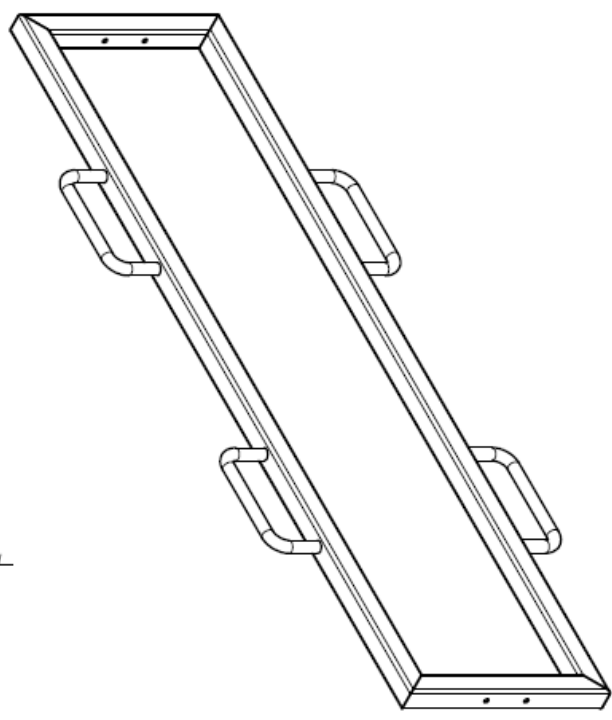
Struktura povrchu	Hrany:	Měřítka	Právnost: ISO 2768-mH
		1:5	Tolerování: ISO 8015
			Primitivní
Materiál:	Polotovary:	Hmotnost: 6,56 kg	CHRÁNĚNO PODLE ISO 16016
FT	Druh dokumentu: SVAŘENEC	Název	RÁM DOLNÍ
UTB	Kreslí: Bc. JAN HORAČ		
	Schválil:		
	Datum vydání: 12.05.2016		
		Číslo dokumentu	DP/00-02.03
			Lišt. 1/1

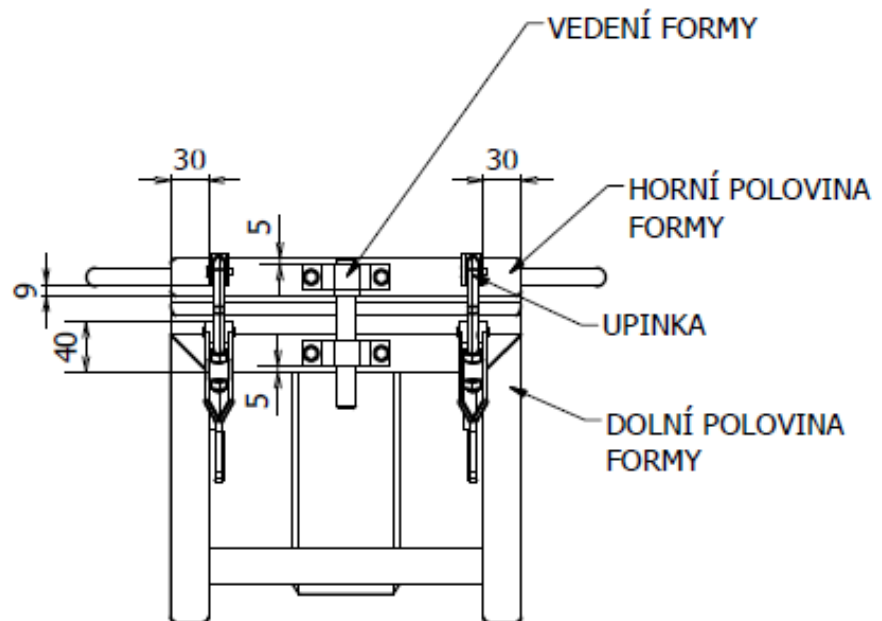




SVARY 131 - OK AUTROD 12.51 - STUPEŇ JAKOSTI SVARŮ "C" DLE ČSN EN 25 817  
VŠECHNY SVARY ZAČÍSTIT DO HLADKA

3	JEKL 30X2 L 1100	ČSN EN 10219-2	1,8	2
	DP/00-01-03.04	11 375		
2	JEKL 30X2 L 280	ČSN EN 10219-2	0,43	2
	DP/00-01-02.04	11 375		
1	MADLO	ČSN EN 10060	0,45	4
	DP/00-01-01.04	11 375		
Číslo polož.	Název - označení	Poletovar	Hmot. J	Množ.
Výřez - norma		Materiál		
Struktura povrchu	Hrany	Měřítka	1:5	Přesnost: ISO 2768-mK
		Tolerování		ISO 8015
		Profilování		
Materiál	Poletovar	Hmotnost	6,3 kg	
FT	Druh dokumentu	Název	HORNÍ RÁM	
UTB	Kreslil: BC JAN HORÁK			
	Schválil:			
	Číslo dokumentu		DP/00-01.03	
	Datum vydání: 12.05.2016			

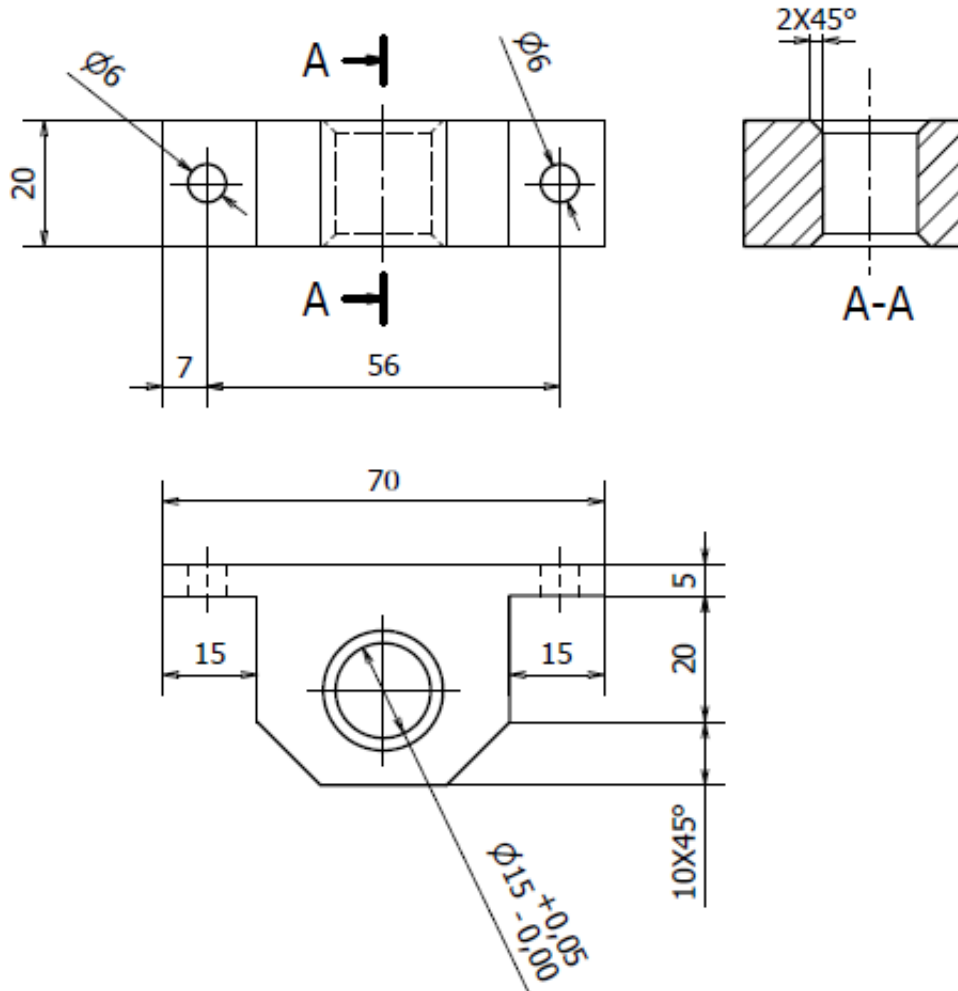




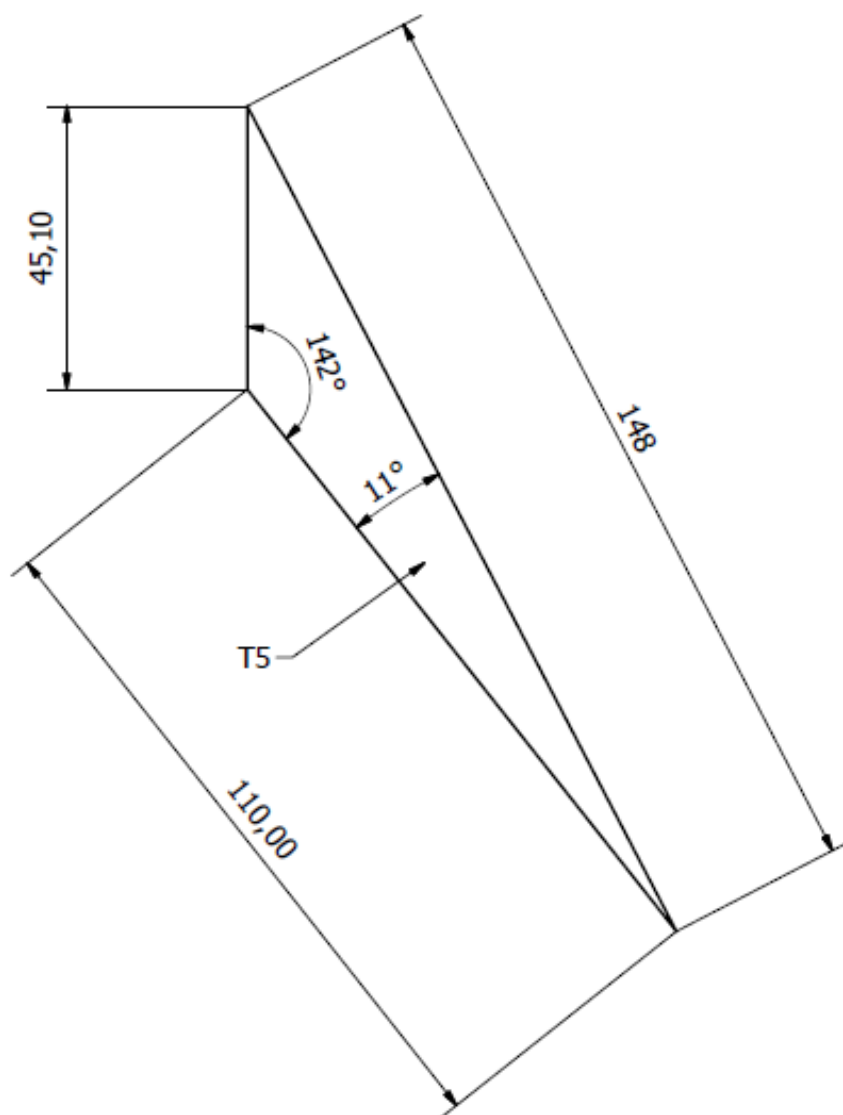
### UPINKY PŘIVAŘIT, SVAR KOUTOVÝ VELIKOST 1

Struktura povrchu:		Hrany:		Měřítko	Přesnost: ISO 2768-mK
				1:5	Tolerování: ISO 8015
					Promítání
Materiál:	Polotovary:		Hmotnost		
FT  UTB	Druh dokumentu: MONTÁŽNÍ SCHÉMA		Název		
	Kreslil: Bc. JAN HORÁK		SESTAVENÍ UZAVÍRÁNÍ FORMY		
	Schválil:		Číslo dokumentu		
	Datum vydání: 07.05.2016		DP/05.04		
					List: 1/1

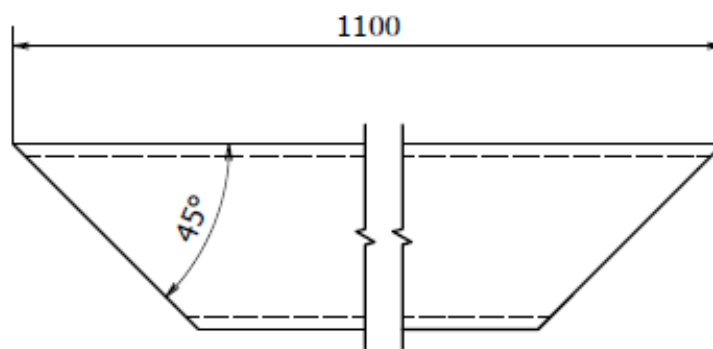




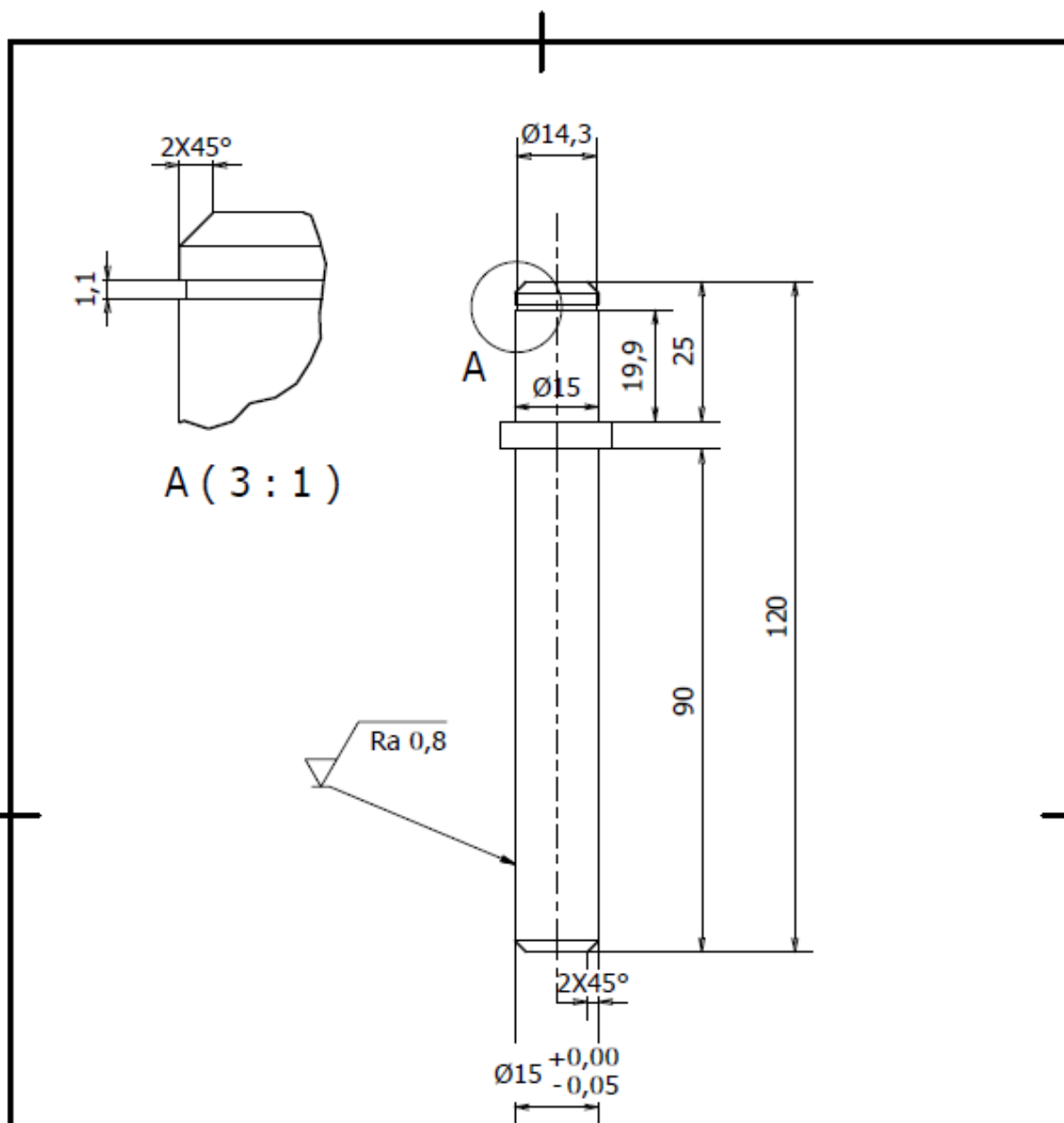
Struktura povrchu: 		Hrany:		Měřítka 1:1	Přesnost: ISO 2768-mK
					Tolerování: ISO 8015
					Promítání: 
Materiál: 11 375	Polotovary: 80X40X20 ČSN EN 10058	Hmotnost: 0,2 kg			
FT  UTB	Druh dokumentu: VÝKRES SOUČÁSTI	Název VODÍČÍ POUZDRO			
	Kreslil: Bc. JAN HORÁK				
	Schválil:	Číslo dokumentu DP/00-03-02.04			
	Datum vydání: 07.05.2016				



Struktura povrchu:		Hrany:		Měřítko	Přesnost: ISO 2768-mK
				1 : 1	Tolerování: ISO 8015
					Promítání 
Materiál: SKELNÝ KOMPOZIT		Polotovary:	Hmotnost	5,1g	
FT	Druh dokumentu: VÝKRES SOUČÁSTI		Název		
	Kreslil: Bc. JAN HORÁK		ŽEBRO		
UTB	Schválil:		Číslo dokumentu		
	Datum vydání: 07.05.2016		DP/00-04-02.04		
					List: 1/1



Struktura povrchu:		Hrany:		Měřítko	Přesnost: ISO 2768-mK
				1 : 1	Tolerování: ISO 8015
					Promítání 
Materiál: 11 375	Polotovary: ČSN EN 10219-2		Hmotnost	1,8 kg	
FT	Druh dokumentu: VÝKRES SOUČÁSTI		Název		
	Kreslil: Bc. JAN HORÁK		JEKL 30X2 L1100		
UTB	Schválil:		Číslo dokumentu		
	Datum vydání: 12.05.2016		DP/00-01-03.04		



Struktura povrchu: 		Hrany:		Měřitko 1:1	Přesnost: ISO 2768-mK
Materiál: 11 375		Polotovár: D18 L 130 ČSN EN 10060		Hmotnost: 0,17kg	Tolerování: ISO 8015
FT		Druh dokumentu: VÝKRES SOUČÁSTI		Název VODÍČÍ ČEP	
UTB		Kreslil: Bc. JAN HORÁK		Číslo dokumentu DP/00-03-03.04	
		Schválil:			
		Datum vydání: 01.05.2016			