



Konstrukce prototypové vyfukovací formy

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství
Autor práce: **Petr Nováček**
Vedoucí práce: Ing. Pavel Brdlík, Ph.D.





Zadání bakalářské práce

Konstrukce prototypové vyfukovací formy

Jméno a příjmení: **Petr Nováček**
Osobní číslo: S16000125
Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojní inženýrství
Zadávající katedra: Katedra strojírenské technologie
Akademický rok: **2018/2019**

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor problematiky konstrukce vyfukovacích forem.
2. Rozbor problematiky technologie Rapid prototypingu.
3. Návrh a realizace konstrukce vyfukovací formy.
4. Ověření funkčnosti návrhu.
5. Závěr.

Rozsah grafických prací: tabulky, grafy
Rozsah pracovní zprávy: cca 30 stran
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická



Seznam odborné literatury:

- [1] LEE, Norman C. *Blow Molding Design Guide*. Munich: Hanser, 1998. ISBN 1-56990-227-5.
- [2] ROSATO, Dominick V., Andrew V. ROSATO a David P. DI MATTIA, ed. *Blow Molding Handbook: Technology, Performance, Markets, Economics: The Complete Blow Molding Operation*. 2nd revised ed. Munich: Hanser Publishers, 2004. ISBN 1-56990-343-3.
- [3] NOWAK, Renard, ed. *Rapid prototyping technology: principles and functional requirements*. Valley Cottage: Scitus Academics, 2017. ISBN 978-1-68117-537-9.
- [4] GEBHARDT, Andreas. *Understanding additive manufacturing: rapid prototyping, rapid tooling, rapid manufacturing*. Munich: Hanser, 2012. ISBN 978-3-446-42552-1.
- [5] GRIMM, Todd. *User's guide to rapid prototyping*. Dearborn: Society of manufacturing engineers, 2004. ISBN 0-87263-697-6.

Vedoucí práce: Ing. Pavel Brdlík, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie
Datum zadání práce: 31. října 2018
Předpokládaný termín odevzdání: 30. dubna 2020

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

V Liberci 1. listopadu 2018



doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že texty tištěné verze práce a elektronické verze práce vložené do IS STAG se shodují.

24. 6. 2019

Petr Nováček

Anotace

Bakalářská práce se zabývá konstrukcí prototypové vyfukovací formy. Pro výrobu prototypové formy byla použita technologie 3D tisku PolyJet, která umožňuje výrobu komplexních součástí bez nutnosti dalších povrchových úprav. Zvoleným materiálem formy byla kombinace materiálů digital ABS plus RGD 531 (povrch) a RGD 515 (výplň). Vyrobená a sestavená forma byla funkčně odzkoušena na extruzním vyfukovacím stroji GM 251.

Klíčová slova: vyfukovací forma, prototypová forma, PolyJet, extruzní vyfukování, 3D tisk, rapid prototyping

Annotation

The bachelor thesis deals with the construction of the prototype blow mould. For the production of the prototype mould The PolyJet 3D printing technology was used, which allows the production of complex parts without the need of further surface treatments. The chosen material of the mould was a combination of digital ABS plus RGD 531 (surface) and RGD 515 (filler). The manufactured and assembled mould was functionally tested on a GM 251 extrusion blow moulding machine.

Key words: blow mould, prototype mould, PolyJet, extrusion blow moulding, 3D printing, rapid prototyping

Poděkování

V první řadě bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Pavlovi Brdlíkovi, Ph.D. za odborné konzultace. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Jiřímu Šafkovi, Ph.D. za podporu v oblasti 3D tisku a panu Ing. Petru Kůsovi Ph.D. za umožnění odzkoušení formy ve firmě GDK spol. s.r.o. Mé poděkování patří také všem ostatním, kteří mě podporovali při studiu a tvorbě bakalářské práce.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	8
1 Úvod	9
2 Teoretická část	10
2.1 Konvenční vyfukovací formy pro extruzní vyfukování	10
2.1.1 Návrh materiálu formy	11
2.1.2 Návrh dutiny formy	12
2.1.3 Návrh odvzdušnění dutiny formy	12
2.1.4 Povrch dutiny formy	13
2.1.5 Návrh tvárníku hrdla	13
2.1.6 Návrh chlazení	14
2.1.7 Návrh svařovací plochy	15
2.1.8 Výroba formy	16
2.2 Prototypové vyfukovací formy	16
2.2.1 Základní technologie 3D tisku	17
2.2.2 PolyJet formy	19
2.2.3 Materiály pro formy PolyJet	20
2.2.4 Konstrukční specifikace forem pro technologii PolyJet	20
2.2.5 Kompenzace smrštění	21
2.2.6 Úprava dělicí roviny	21
2.2.7 Úprava svařovacích ploch	21
2.2.8 Úprava horní části formy	22
2.2.9 Možnosti vodících prvků formy	23
2.2.10 Možnosti upevnění formy	24
3 Experimentální část	26
3.1 Konstrukční návrh vyfukovaného výrobku	26
3.2 Konstrukční návrh prototypové vyfukovací formy	26
3.2.1 Tělo formy	27
3.2.2 Vyměnitelné vložky	29
3.2.3 Deska horní části formy	29
3.2.4 Přidržovač výrobku	30
3.2.5 Kalibrace hrdla	31
3.3 Výroba součástí formy	32
3.4 Ověření funkčnosti formy	35
4. Diskuse výsledků	37
5 Závěr	41
Literatura	43
Seznam příloh a přílohy	44

Seznam použitých zkratek a symbolů

ABS	– akrylonitrilbutadienstyren
FMD	– Fused Deposition Modeling
HDPE	– vysoko hustotní polyethylen
LDPE	– nízko hustotní polyethylen
LOM	– Laminated Object Manufacturing
PA 11	– polyamid 11
PA 12	– polyamid 12
PA	– polyamid
PA–CF	– polyamid plněný uhlíkovými vlákny
PA–GF	– polyamid plněný skelnými vlákny
PC	– polykarbonát
PE	– polyethylen
PET	– polyethylentereftalát
PLA	– polylaktidová kyselina
PP	– polypropylen
SLA	– Stereolitografie
SLS	– Selective Laser Sintering
UV	– ultrafialové

1 Úvod

V mnoha výrobních procesech je pro zhotovení finálního výrobku potřeba použít formu. Tyto formy se liší svou konstrukcí v závislosti na tom, pro jakou technologii zpracování materiálu jsou navrženy. Pro ověření funkčnosti výrobku je velmi často nejprve vyrobena tzv. prototypová forma, která bývá obvykle z méně odolnějších a levnějších materiálů. Funkcí takové formy je ověření procesu produkce a samotné zhotovení několika desítek kusů výrobku pro ověření funkčnosti v koncovém použití.

Od počátku byly tyto formy nejčastěji vyráběny třískovým obráběním, později také elektroerozivním obráběním a dalšími alternativními metodami. S rozvojem technologií rapid prototyping, které v posledních letech zaznamenaly veliký pokrok, se nabízí možnost výroby forem tímto způsobem. V současné době lze některými technologiemi vytisknout velmi složité komponenty s vysokou přesností a hladkým povrchem.

V této bakalářské práci je rozebrána problematika konvenčních a prototypových vyfukovacích forem pro zpracování termoplastických polymerů technologií extruzního vyfukování. U problematiky konvenčních vyfukovacích forem jsou uvedeny základní konstrukční zásady a standardní možnosti konstrukce jednotlivých částí forem. U problematiky prototypových vyfukovacích forem jsou uvedeny možnosti jejich výroby. Značná pozornost je věnována technologiím 3D tisku a konstrukčním specifikacím forem vyrobených technologií PolyJet.

Hlavním cílem bakalářské práce byla konstrukce prototypové vyfukovací formy s ohledem na specifika technologie 3D tisku. Pro splnění tohoto cíle byl navržen výrobek s komplexními prvky na povrchu (písmo, logo, reliéf). Dalšími cíli práce je výroba formy, ověření funkčnosti formy na extruzním vyfukovacím stroji a zhodnocení finálního výrobku z hlediska vzhledu, funkčnosti, přesnosti a porovnat ho s výrobkem z kovové formy.

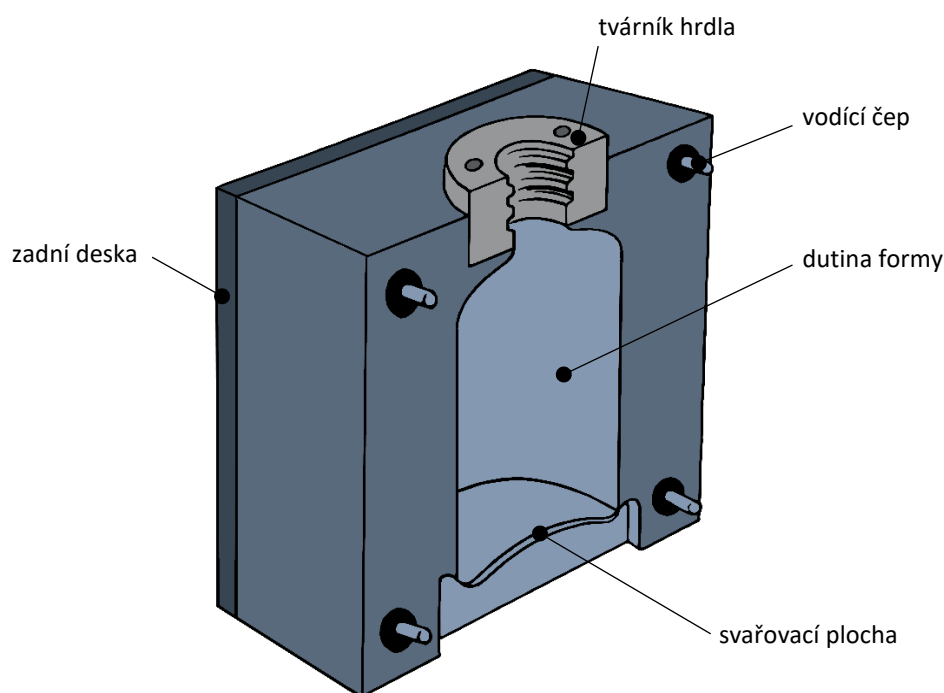
2 Teoretická část

Teoretická část práce pojednává o konstrukci konvenčních a prototypových vyfukovacích forem. U konvenčních vyfukovacích forem jsou popsány používané materiály pro výrobu forem, zásady pro konstrukci základních částí formy, odvodušnění její dutiny a chlazení. U prototypových forem je uveden standartní a velmi moderní způsob výroby pomocí technologie 3D tisku. Z technologie 3D tisku je věnována speciální pozornost technologii PolyJet.

2.1 Konvenční vyfukovací formy pro extruzní vyfukování

Vyfukovací forma je složena z několika částí, viz obr. 2.1.1. Obvykle je rozdělena na dvě poloviny. Při zavření těchto dvou polovin formy je vytvořena jedna nebo více dutin, do které je uzavírán a posléze vyfukován parizon. Forma je na vyfukovací stroj upnuta zadní deskou, do které jsou vyvrtány montážní otvory. Ve spodní části obou polovin formy jsou svařovací plochy, které svaří dno výrobku. Obě části formy mohou mít vytvořené kanály pro cirkulaci chladicího média. Vzájemná přesná poloha obou částí forem je zajištěna pomocí vodících čepů a vodících pouzder. Další částí formy je hrdlo, kde vyfukovací trn kalibruje oblast hrdla výrobku [1].

Při návrhu vyfukovacích forem jsou důležitými aspekty: volba materiálu pro výrobu formy, návrh umístění a tvaru dutiny formy podle výrobku, návrh odvodušnění dutiny formy, volba povrchu dutiny formy, volba aplikovatelného tvárníku hrdla, návrh chlazení formy, návrh svařovacích ploch a způsob výroby formy.



Obr. 2.1.1: Schéma poloviny vyfukovací formy

2.1.1 Návrh materiálu formy

Z důvodu poměrně nízkého uzavíracího a vyfukovacího tlaku není nutné používat vysokopevnostní materiály. Proto mohou být použity lehké slitiny kovů, a to například slitiny mědi nejčastěji beryliové (CA172, AMPCO 18, AMPCO 21, AMPCO 944 [1], [2]), slitiny hliníku (7075 T6, A608, A609 [1], [2]) a slitiny zinku (Kirksite A [1]). Všechny tyto slitiny mají výhodné vlastnosti pro použití na vyfukovací formy. Jsou lehké, snadno obrobitelné a mají vyšší tepelnou vodivost. Naopak nevýhodou těchto materiálů je jejich nižší životnost a vyšší cena. V případech, ve kterých je vyžadována velmi dlouhá životnost formy pro výrobu stovky tisíc až milionů kusů, je používána ocel (AISI P 20, AISI 420, H-13, 420SS, S42000, T51620 [1], [2]). Výhodou oceli jsou vyšší mechanické vlastnosti. Na druhou stranu její nevýhodou je nižší tepelná vodivost, která prodlužuje potřebný čas k chlazení výrobku.

Z výše uvedeného plyne, že pro maximální možnou efektivitu výroby je tedy vhodné použít materiál s co nejvyšší tepelnou vodivostí, viz tab. 2.1.1. Volba materiálu formy je ale ovlivněna i dalšími faktory, jako je například její životnost a cena. Výhodným kompromisem může být ocelová forma s měděnými vložkami. Měděné vložky se umísťují do částí formy, kde je potřeba odvádět více tepla, tím dochází k vyrovnání teplotních rozdílů v jednotlivých částí výrobku a v konečném důsledku také ke zkrácení času potřebného k chlazení.

Tab. 2.1.1: Tepelná vodivost vybraných materiálů [1]

Materiál		Tepelná vodivost [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
Beryliová měď	CA172	111
Hliník	7075 T6	130
Kirksite	A	92
Ocel	AISI P 20	29
Nerezová ocel	AISI 420	24

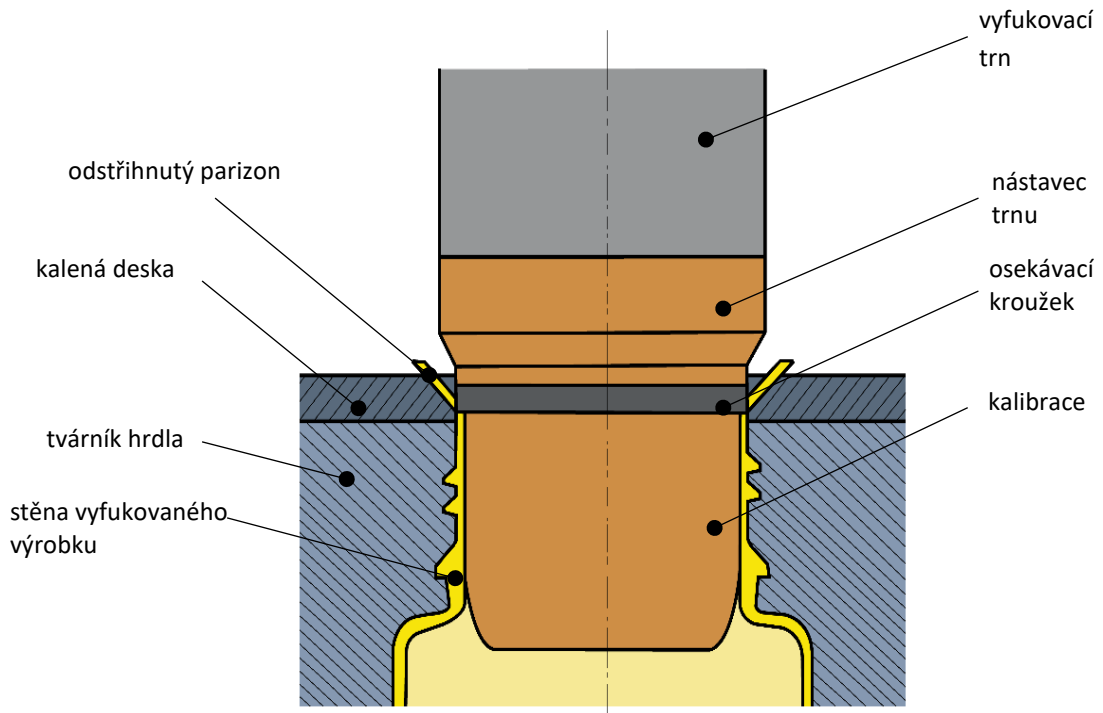
2.1.4 Povrch dutiny formy

Povrch dutiny formy by měl být jemně opracován a bez škrábanců. V případech, kdy je zpracováván průhledný čirý materiál nebo je požadována hladká povrchová úprava výrobku může být povrch formy leštěný. Častěji bývá povrch dutiny formy jemně zdrsňen pískováním. Při pískování je potřeba věnovat pozornost, aby zrna nevytrhala částice kovu a aby nebyly poškozeny hrany formy. Pro povrchy, které budou potištěny „ofset tiskem“, je vyžadována velikost zrna pod 0,1 mm [3]. Ve většině ostatních případů je doporučena velikost zrna 0,2 až 0,3 mm [3]. Používaným abrazivem může být karbid křemíku, křemenný písek nebo ocelová drť [3]. Pískovaný povrch v jisté míře také zlepšuje odvodu vzdušnosti dutiny formy. Povrchová úprava dutiny formy má tedy značný vliv na konečné výrobky. Pro hladký povrch lahví z PE a PP je nezbytné, aby dutina formy byla jemně zdrsňena tryskáním zrny o velikosti 0,15 až 0,2 mm. Pro větší formy mohou být použita zrna o velikosti 0,35 až 0,5 mm [3].

Další finální úpravou povrchu formy může být pokovování. Tato úprava spočívá v tom, že na povrch dutiny formy je nanášena galvanickým nebo chemickým způsobem tenká vrstva tvrdého kovu o minimální tloušťce 0,025 mm. Nejčastěji používaným kovem je chrom z důvodu jeho tvrdosti a odolnosti proti korozi. Dalším často používaným kovem je nikl, který má obdobné vlastnosti jako chrom. Touto tenkou vrstvou je dosaženo zvýšení životnosti nástroje a povrch dutiny formy je chráněn před korozi [3].

2.1.5 Návrh tvárníku hrdla

Tvárník hrdla společně s kalibrací hrdla, viz obr. 2.1.3, primárně tvarují závitové hrdlo výrobku a sekundárně dokončují výrobek odštěpením přebytečného materiálu. Při samotném vyfukování je nutné, aby došlo k dobrému utěsnění mezi hrdlem výrobku a vyfukovacím trnem. Tvárník hrdla je proveden jako hliníkový (pro malé série) nebo kalený ocelový (pro velké série) blok, který je namontován v horní části formy a je určen k tvarování vnějšího povrchu hrdla s různými závity. V oblasti hrdla výrobku je koncentrováno velké množství tepla, které musí být odvedeno. Z tohoto důvodu je tvárník vyroben z dobře teplovodných materiálů a je napojen na systém vnitřního chlazení celé formy.

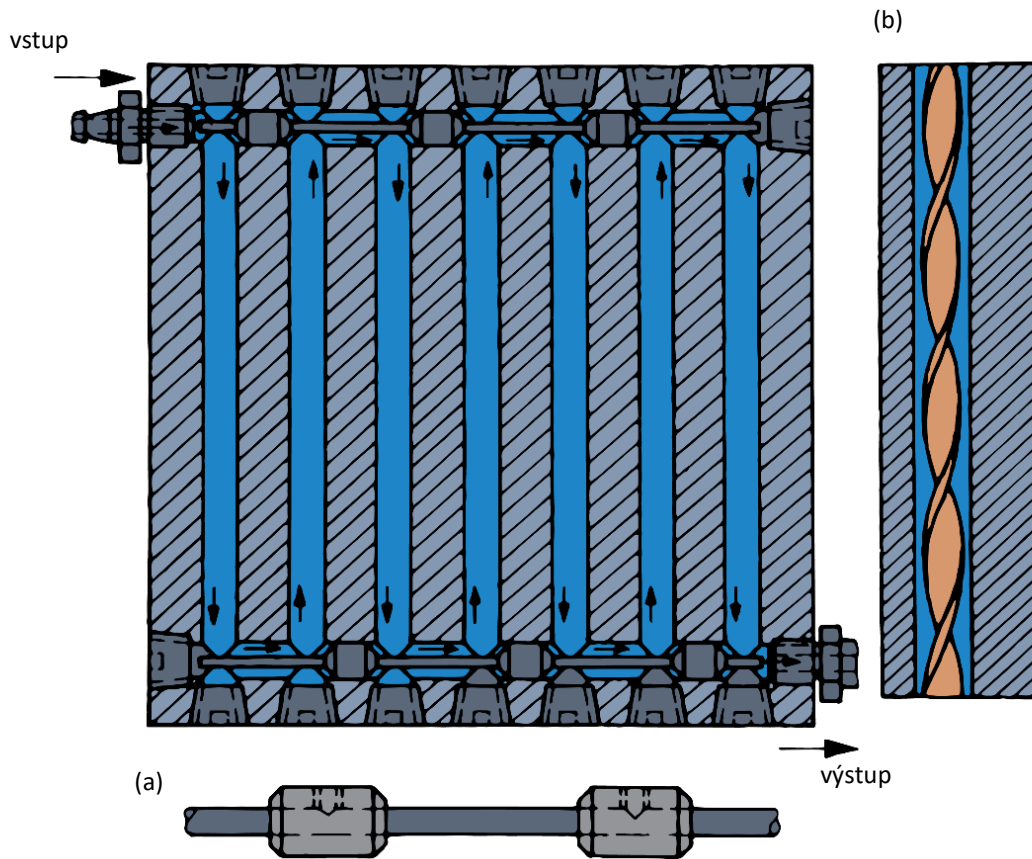


Obr. 2.1.3: Způsob kalibrace hrdla pomocí vyfukovacího trnu

2.1.6 Návrh chlazení

Při návrhu formy je velmi důležité chlazení, protože zaujímá největší dobu výrobního procesu (až 80 % [3]). Pro vysokou ekonomičnost výroby je požadováno co nejrychlejší chlazení, tudíž dosažení kratšího výrobního cyklu. Chlazení může být provedeno chlazením formy, tím dochází k ochlazování vnějšího povrchu vyfukovaného výrobku, a vnitřním chlazením, při kterém je ochlazována vnitřní dutina vyfukovaného výrobku.

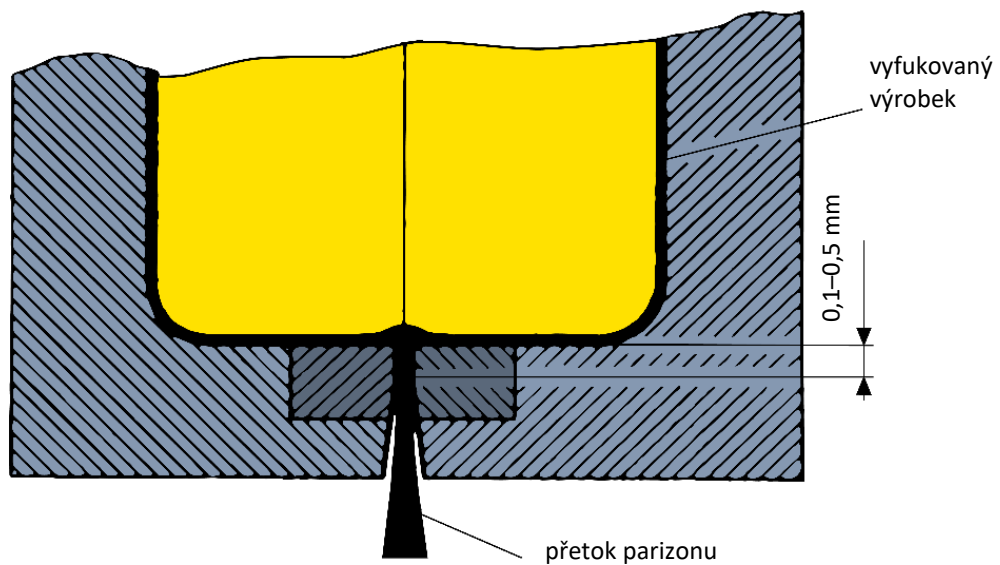
Chlazení formy je uskutečněno tak, že do obou polovin formy jsou vyvrtány chladicí kanály, viz obr. 2.1.4. Chladicí kanály by měly vést co nejbližší k povrchu dutiny a k dělicí rovině formy pro dosažení co nejefektivnějšího chlazení [1]. Tyto kanály jsou spojeny do chladicího okruhu a tímto okruhem při produkci cirkuluje chladicí kapalina a odvádí teplo z formy. K účinnějšímu odvodu tepla dochází při turbulentním proudění kapaliny, proto mají chladicí kanály obvyklý průměr 11 až 14 mm a chladicí okruhy jsou několikrát zahnuty do pravého úhlu [1]. Často se k vytvoření turbulentního proudění dopomáhá i různými překážkami umístěnými do kanálů. Větší formy mohou být vybaveny větším množstvím nezávislých chladicích okruhů.



Obr. 2.1.4: Chladící kanály s labyrintovým průtokem chladicí kapaliny: (a) Kontinuální trubka se zarážkami, (b) vložená měděná spirála [1]

2.1.7 Návrh svařovací plochy

Svařovací plocha je část formy, kde je extrudovaný parizon vzduchotěsně svařen dohromady a zároveň s tím je těsně pod svařovanou linií vytvořený prostor pro snadnější odstranění přetoku parizonu. Kvalita sváru je pro výrobní proces velmi důležitá a zásadně ji ovlivňují svařovací plochy. Svařovací plocha by neměla mít žádné řezací hrany a její plocha by se měla pohybovat v rozmezí od 0,1 do 0,5 mm [1]. Rozevírající úhel by měl být větší než 15° [1]. Jedná se o nejvíce namáhanou část formy, a proto jsou svařovací plochy velmi často vyrobeny jako výměnné vložky z kalené oceli, viz obr. 2.1.5.



Obr. 2.1.5: Svařovací plochy ve formě vložek a šířka svařované oblasti [1]

2.1.8 Výroba formy

Forma je složena z několika částí, z nichž některé části, například rám a upínací deska mohou být normalizované a jsou nakupovány v podobě normálií. Tvárnice formy, která má vždy specifický tvar dutiny, je nejčastěji obrobena z kusu materiálu na CNC centrech nebo CNC frézách. Složitější tvary dutiny mohou být obráběny elektroerozivním hloubením.

Všechny tyto části formy jsou posléze ručně smontovány do celku, který je namontován na vyfukovací stroj. Nevýhodou konvenční výroby forem je, že trvá i několik týdnů a je finančně nákladná. Případné dodatečné úpravy forem jsou opět časově náročné a drahé.

2.2 Prototypové vyfukovací formy

Standartní prototypové vyfukovací formy jsou obráběny z hliníkových slitin na CNC centrech. Jedná o způsob výroby, který je pro vizualizaci a ověření funkčnosti návrhů forem finančně a časově náročný.

Jako ekonomicky velmi zajímavý způsob výroby prototypových vyfukovacích forem se jeví technologie 3D tisku, která je účinným prostředkem pro vyhodnocení návrhů prototypů [4]. Výroba forem pomocí 3D tisku je levnější a výrazně rychlejší než obrábění. Dále umožňuje výrobu složitějších tvarů a dutin. Nevýhodou forem vyrobených technologiemi 3D tisku je nižší trvanlivost.

2.2.1 Základní technologie 3D tisku

Stereolitografie (SLA)

Jedná se o aditivní technologii, při které je díl vytvořen selektivním vytvrzováním fotopolymerních pryskyřic vrstvu po vrstvě (25-100 μm [5]) UV laserovým paprskem. Tato technologie umožňuje tisknout velmi přesné součásti ($\pm 0,5 \%$, dolní mez: $\pm 0,10 \text{ mm}$ – stolních tiskáren; $\pm 0,15 \%$, dolní mez: $\pm 0,01 \text{ mm}$ – průmyslových tiskáren [5]) s hladkou povrchovou úpravou a složitými detaily. Další výhodou je možnost použití speciálních materiálů jako jsou čiré, ohebné či formovací pryskyřice. Nevýhodou vytištěných výrobků je jejich křehkost, a proto nejsou vhodné pro funkční prototypy. Mechanické a vizuální vlastnosti vytištěných dílů degradují při vystavení slunečnímu záření. Další nevýhodou je nutnost tvorby konstrukčních podpor pro tisk a jejich následné odstranění. Z tohoto důvodu je technologie používána pro výrobu vizuálních prototypů, komplexních modelů pro výrobu forem a k testování funkčnosti dílů, kde je vyžadována vysoká přesnost a kvalita povrchu bez významnějšího zatěžování [5], [6].

Fused Deposition Modelling (FDM)

FDM je nejpoužívanější technologie 3D tisku [5], kde je výrobek vytvořen selektivním nanášením roztaveného materiálu vrstvu po vrstvě (50-400 μm [5]) na stavební podložku. Používaným materiálem mohou být různé termoplastické polymery (ABS, PLA, PA, PC [5], [6]) pro různé aplikace ve formě filamentu. FDM je nákladově a časově nejefektivnější způsob výroby termoplastických dílů a prototypů, což je jeho hlavní výhodou. Nevýhodou této technologie je nižší rozměrová přesnost ($\pm 0,5 \%$, dolní mez: $\pm 0,5 \text{ mm}$ – stolních tiskáren; $\pm 0,15 \%$, dolní mez: $\pm 0,2 \text{ mm}$ – průmyslových tiskáren [5]), a rozlišení ve srovnání s technologií SLA [5]. Na povrchu dílů jsou viditelné vrstvy a pro dosažení hladkého povrchu je nutné následné opracování. Z těchto důvodů tato technologie není vhodná pro součásti se složitými detaily. Další nevýhodou je anizotropie výrobků. Při použití některých materiálů může dojít v průběhu tisku k deformaci výrobku vlivem vnitřního pnutí během chladnutí filamentu [5].

Selective Laser Sintering (SLS)

SLS je aditivní technologie, kde jsou součásti vyrobeny z různých druhů materiálu (například: kovy, plasty, sklo a keramika) ve formě prášku. Pomocí CO_2 laseru je tento prášek selektivně ve vrstvách (25-100 μm [5]) spékán a vzniká pevný soudržný díl. Používanými materiály jsou nejčastěji čisté polyamidy (PA 12, PA 11 [5]) nebo plněné polyamidy (Alumid, PA-GF, PA-CF [5]). Tato technologie 3D tisku je s výhodou používána pro výrobu funkčních prototypů s vlastnostmi srovnatelnými s vlastnostmi dílů vyrobených vstřikováním. Je vhodná pro menší série výroby komplexních dílů koncového využití, protože nabízí velmi vysokou flexibilitu při návrhu dílů a vysokou přesnost ($\pm 0,3 \%$, dolní mez: $\pm 0,3 \text{ mm}$ [5]) [6]. Při tisku součásti nejsou

potřeba podpůrné konstrukce na rozdíl od FDM nebo SLA. Nespečený prášek okolo tištěné součásti poskytuje její dostačující upevnění [5].

Laminated Object Manufacturing (LOM)

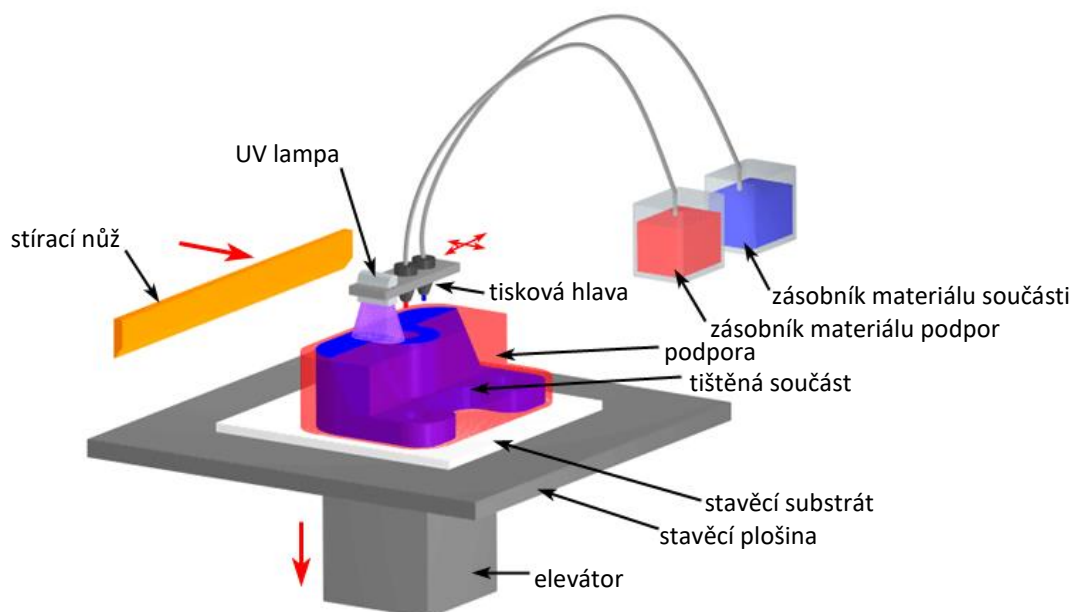
LOM je další aditivní technologie, při které je výrobek vyroben z nařezaných fólií rovnoměrné tloušťky podle řezů 3D CAD souboru, které jsou následně na sebe nalepeny. Fólie mohou být vyrobeny z papíru, plastu, kovu nebo keramiky. Jako řezací zařízení může být použito laseru, nože nebo frézky. Spojování fólií je provedeno lepením, pájením, ultrazvukovým nebo difuzním svařováním. Výhodou této technologie je rychlá výstavba masivních dílů jako jsou například převodové skříně. Nevýhodou je velké množství odpadního materiálu, jenž závisí na geometrii součásti [7].

Technologie PolyJet

PolyJet je velmi výkonná technologie 3D tisku, kterou je možné použít pro výrobu přesných prototypů a součástí s hladkým povrchem. Díky vrstvě s mikroskopickým rozlišením (výška vrstvy 16 μm [8]) a vysokou přesností (20–80 μm pro součásti menší než 50 mm a do 200 μm celého pracovního prostoru [8]) je možné tisknout velmi tenké stěny a složité geometrie. PolyJet je s výhodou používán pro výrobu přesných nástrojů, prototypů a výrobků, které mohou obsahovat komplexní tvary a detaily [9].

Podle informací od společnosti Stratasys Ltd., která je průkopníkem vývoje technologií 3D tisku je z výše uvedených technologií 3D tisku nejvýhodnější použít na výrobu prototypových forem pro extruzní a vstřikovací vyfukování právě tuto technologii 3D tisku [4].

Princip technologie 3D tisku PolyJet, viz obr. 2.2.1, je velmi podobný inkoustovému tisku papírových dokumentů, ale místo kapek inkoustu na papír jsou tiskovou hlavou nanášeny mikroskopické vrstvy kapalného fotopolymeru na stavěcí desku, které jsou vzápětí vytvrzeny UV světlem, a tedy není nutné následné vytvrzování. Do jednotlivých míst je možné nanést různé druhy materiálů včetně materiálu, ze kterého jsou vytvářeny podpory. Podpory mohou být ze dvou materiálů. Lze použít materiál SUP705, který může být odstraněn proudem vody, anebo materiál SUP706, který je možné odstranit rozpuštěním, což snižuje konstrukční omezení pro tisk složitých vnitřních struktur a malých dutin [9]. Po nanesení a vytvrzení jedné vrstvy je stavěcí plošina snížena o výšku jedné vrstvy, a celý proces je opakován, dokud není součást vyhotovena. Po dokončení tisku jsou následně odstraněny podpory (pokud byly pro tisk požadovány) a součást je dokončena [9].



Obr. 2.2.1: Průběh procesu PolyJet [10]

2.2.2 PolyJet formy

Použití technologie PolyJet na výrobu forem s sebou nese značné výhody oproti klasickému obrábění forem. Je snížena časová náročnost výroby formy v průměru o 85–95 % [4] a náklady na výrobu formy v průměru o 75–95 % [4]. Díky rychlé a plně automatizované výrobě nástroje je možno v krátkém čase vyhodnotit funkčnost návrhu formy a lze levně, rychle a snadno změnit návrhy výrobků a forem. PolyJet formy, viz obr. 2.2.2, jsou vhodné pro nízké až středně velké množství do 1000 kusů vyfukovaných výrobků o objemu 1 ml až 1 l [4]. Ověřenými materiály koncových výrobků jsou PP, LDPE, HDPE a PET [4].



Obr. 2.2.2: Vyfukovací forma vytištěná technologií PolyJet [11]

2.2.3 Materiály pro formy PolyJet

Technologií PolyJet jsou díly vytištěny z fotopolymerních pryskyřic. Fotopolymerní materiály mohou mít různé mechanické vlastnosti. Pro aplikaci ve výrobě vyfukovacích forem je požadováno, aby byly použity odolné materiály s vysokou tepelnou vodivostí. Velkou nevýhodou materiálů, které jsou použity pro 3D tisk forem je jejich velmi malá tepelná vodivost. V porovnání s kovovými materiály může být až 1000x nižší.

Pro vyfukovací formy mohou být použity následující materiály:

Digital ABS (RGD5160)

Digital ABS je určen k simulaci skutečných ABS plastů a vytváří kombinaci tepelně odolného a tvrdého materiálu. Je vhodná pro součásti, které vyžadují nejvyšší možnou odolnost proti nárazům a vysokou tepelnou odolnost. Digital ABS™ disponuje pevností v tahu 50–65 MPa [12] a tepelnou vodivostí $0,17 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (23 °C) [13].

FullCure 720 (RGD720)

Materiál RGD720 je určen jako náhrada víceúčelových, čirých plastů. Mezi hlavní výhody tohoto materiálu patří vysoká rozměrová stálost, hladká povrchová úprava a možnosti kombinace s jinými materiály pro vytvoření různých úrovní transparentnosti, odstínů a tvrdostí. Materiál je nejčastěji používán pro vyhodnocení konstrukčního návrhu a umožňuje konstruktérům vizualizovat umístění a rozhraní interních komponent a funkcí [14].

Řada materiálů Vero

Skupina materiálů Vero zahrnuje několik pevných neprůhledných materiálů v různých barvách. Tyto víceúčelové materiály mohou být použity pro vizuální modely, inženýrské prototypy a sestavy výrobků. [14]

Ze zdrojů od společnosti Stratasys Ltd. je pro výrobu vyfukovacích forem nejvíce doporučován materiál digital ABS. Jeho mechanické a tepelné vlastnosti mohou nabídnout delší životnost formy a redukci výrobního času [4].

2.2.4 Konstrukční specifikace forem pro technologii PolyJet

Vyfukovací formy jsou konstruovány podle pravidel, které platí pro klasické formy. Následující aspekty je nutné konstrukčně upravit, aby bylo dosaženo těch nejlepších možných výsledků.

- Kompenzace smrštění
- Úprava dělicí roviny
- Úprava svařovacích ploch
- Úprava horní části formy

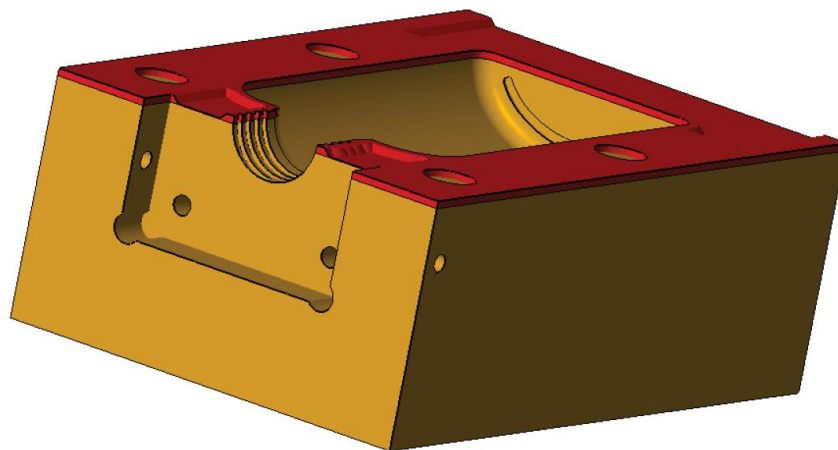
2.2.5 Kompenzace smrštění

Dutinu formy je potřeba navrhnout s ohledem na smrštění vyfukovaného materiálu. Je nutné upravovat pouze rozměry dutiny formy, veškeré další rozměry formy zůstávají nezměněny. Je patrné, že smrštění vzhledem k delšímu času tuhnutí materiálu se výrazně liší od kovových forem. Míra smrštění při extruzním vyfukování s použitím forem PolyJet je často o 50 až 100% vyšší [4].

2.2.6 Úprava dělicí roviny

Dosedací plocha dělicí roviny musí být upravena tak, aby byla rovná a měla ostré hrany, jinak dojde k velkému zvýraznění dělicí roviny, tím je negativně ovlivněn vzhled a přesnost konečného výrobku.

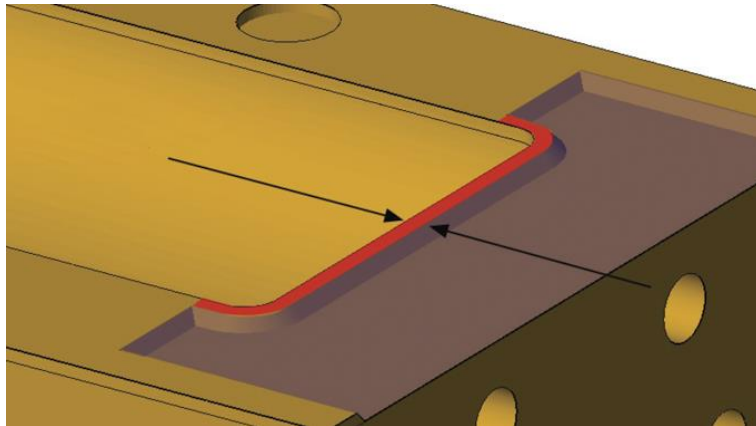
Pro rovnou dělicí rovinu s ostrými hranami, je na plochu obou polovin formy přidán přídavek 1 až 1,5 mm [4]. Při následném frézování jsou tyto plochy zarovnané. Na obrázku níže, obr. 2.2.3, je červeně vyznačena plocha, kde je přidán přídavek.



Obr. 2.2.3: Přídavek pro frézování dělicí roviny [4]

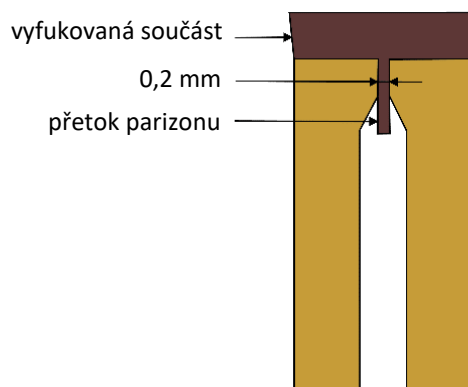
2.2.7 Úprava svařovacích ploch

Svařovací plocha je zodpovědná za utěsnění, odstříhnutí a svaření parizonu ve spodní části formy. Dobrý svár je rozhodující pro vyfukovaný díl. U kovových forem je svařovací plocha obvykle široká 0,1 až 0,5 mm (viz kapitola 2.1.7) [1]. U vytištěných forem z důvodu vysokého namáhání při stlačování je doporučeno zvětšit šířku svařovací plochy minimálně na 2 mm, viz obr. 2.2.4. Zvětšením šířky je také zajištěno vytvoření dobrého svaření a zároveň je zabráněno úplnému odstříhnutí přetoku parizonu, který bývá u maloobjemové prototypové výroby odstraněn ručně [4].



Obr. 2.2.4: Rozšířená svařovací plocha (označena červeně) [4]

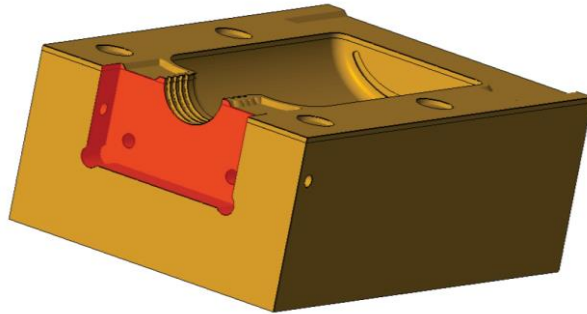
Pro dosažení co nejlepší funkčnosti svařovací plochy je doporučeno ponechat mezeru 0,2 mm mezi dosedacími plochami obou polovin formy, viz obr. 2.2.5. Tím je vytvořen prostor pro parizon mezi plochami uzavřené formy [4].



Obr. 2.2.5: Mezera 0,2 mm mezi svařovacími plochami [4]

2.2.8 Úprava horní části formy

V místě, kde forma přichází do kontaktu s vyfukovacím trnem je nutné, aby do formy byla vložena kovová deska. Použitím kovové desky vhodných rozměrů je sníženo opotřebení formy a také je zajištěn dobrý těsnící povrch mezi formou a vyfukovacím trnem. Do každé poloviny formy, kde bude umístěna kovová deska je vytvořen výřez, viz obr. 2.2.6. Rozměry výřezu by měli být větší o 0,1 mm, než jsou rozměry desky na všech stranách. Dále jsou do formy přidány otvory pro šrouby, kterými je deska připevněna. Tato úprava vede ke zvýšení životnosti nástroje a zabránění ztrátě tlaku v dutině formy [4].

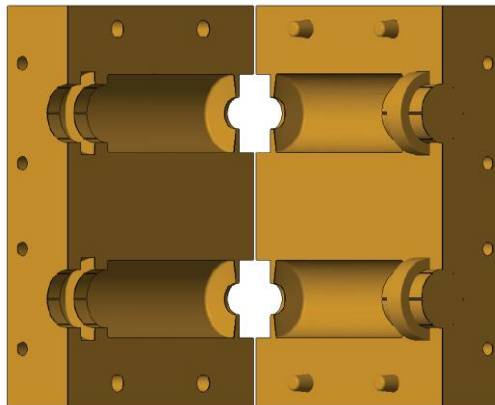


Obr. 2.2.6: Výřez a otvory (vyznačené červenou barvou) pro připevnění desky [4]

2.2.9 Možnosti vodících prvků formy

Pro zarovnání polovin formy je použito vedení pomocí čepů. Jedna polovina formy je opatřena čepy a do druhé poloviny jsou vytvořeny otvory. Čepy mohou být použity vytištěné technologií PolyJet nebo kovové.

Vytištěné čepy jsou součástí jedné poloviny formy, viz obr. 2.2.7. Pro jejich robustnost je doporučený průměr 10 mm nebo větší. Vodící otvory, do kterých budou zasouvány vodící čepy by měli být větší o 0,1 mm, než je průměr čepů a hlubší o 1 až 2 mm, než je délka čepů [4].



Obr. 2.2.7: Umístění vodících čepů (vpravo) a vodících otvorů (vlevo) [4]

Čepy mohou být použity samostatně vytištěné nebo kovové a do formy jsou umístěny až po obrobení dosedací plochy dělicí roviny. Tímto řešením je zkrácen čas potřebný k vytištění formy a je usnadněno obrábění dosedací plochy, viz obr. 2.2.8. Otvory ve formě by měli být takové, aby vodící čepy byly pevně zalisovány do poloviny své délky. Vodící otvory by měli, stejně jako v předcházejícím případě, být větší o 0,1 mm, než je průměr čepů a hlubší o 1 až 2 mm, než je délka čepů [4].



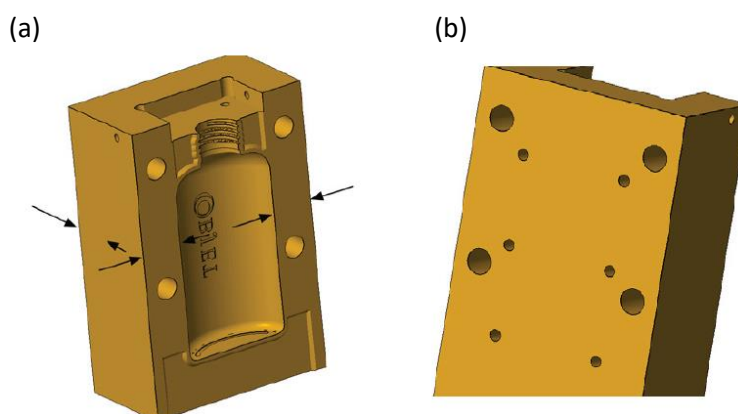
Obr. 2.2.8: Přidané otvory pro nalisování kovových nebo samostatně vytištěných vodících čepů (označeno červeně) [4]

2.2.10 Možnosti upevnění formy

PolyJet formy mohou být namontovány na vyfukovací stroj třemi způsoby jako: samostatná forma, vložka formy nebo skořepina formy.

Samostatná forma

Samostatná vytištěná forma je upevněna rovnou na vyfukovací stroj. Velikost formy musí být dimenzována tak, aby byla schopná vydržet teploty a tlaky při vyfukovacím procesu. Tloušťka stěn polovin formy by měla být dle doporučení [4] 25 až 50 mm, viz obr. 2.2.9 (a). Pro montáž formy na desku vyfukovacího stroje jsou vytvořeny otvory do zadních stěn obou polovin, viz obr. 2.2.9 (b). Pokud chceme formu bezpečně upnout, mohou být nalisovány do otvorů závitové vložky, které by měli být o 0,1 mm větší než průměr otvorů [4].



Obr. 2.2.9: Samostatná forma: (a) tloušťka stěn formy 25–50 mm, (b) zadní strana formy s otvory pro montáž [4]

Vložka formy

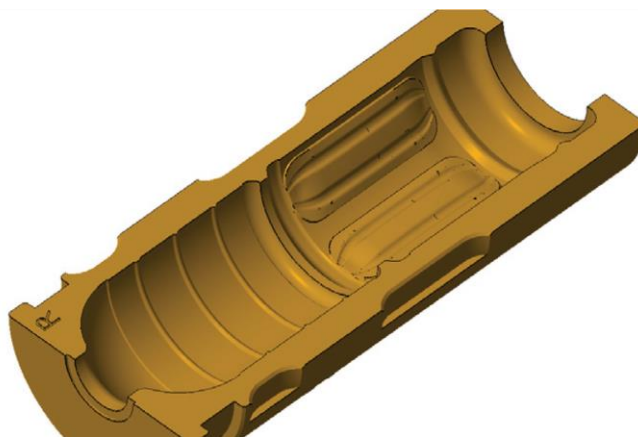
Použití tohoto způsobu upevnění je výhodnější v tom, že dojde ke zmenšení a ke zkrácení doby tisku. Forma ve formě obdélníkové vložky je umístěna do rámu, který je upnut do vyfukovacího stroje, viz obr. 2.2.10. Vložka by měla mít šířku alespoň 20 mm na bocích, spodní a zadní straně. Všechny rozměry kontaktních ploch vložky je dobré navrhnout o 0,1 mm menší, než jaké jsou rozměry dutiny v kovovém rámu [4].



Obr. 2.2.10: Vytištěná vložka formy v kovovém rámu [4]

Skořepina formy

Jedná se o podobný princip jako u výše uvedené formy v podobě vložky. Výroba skořepinové formy je nejrychlejší a cenově nejméně náročná. Vytištěná skořepina, viz obr. 2.2.11, je přizpůsobena tvaru dutiny a je umístěna do kovového pláště, se kterým je pak vložena do kovového rámu, který je připevněn na desce vyfukovacího stroje. Skořepina je navržena tak, aby kopírovala dutinu formy a měla přibližně konstantní 12 mm tlustou stěnu. [4].



Obr. 2.2.11: Skořepinová vložka formy [4]

3 Experimentální část

V experimentální části je nejprve popsán konstrukční návrh vyfukovaného výrobku, pro který byla následně navržena prototypová vyfukovací forma. Při konstrukci jednotlivých částí, kterými jsou tělo formy, vyměnitelné vložky, deska horní části formy, přídržovač výrobku a kalibrace hrdla, bylo přihlédnuto ke konstrukčním specifikacím technologie PolyJet. Dalším krokem práce byla výroba částí formy na 3D tiskárně Objet Connex 500, úprava a dokončení některých částí formy obráběním. V poslední části práce byla ověřena funkčnost prototypové formy odzkoušena na vyfukovacím stroji GM 251.

3.1 Konstrukční návrh vyfukovaného výrobku

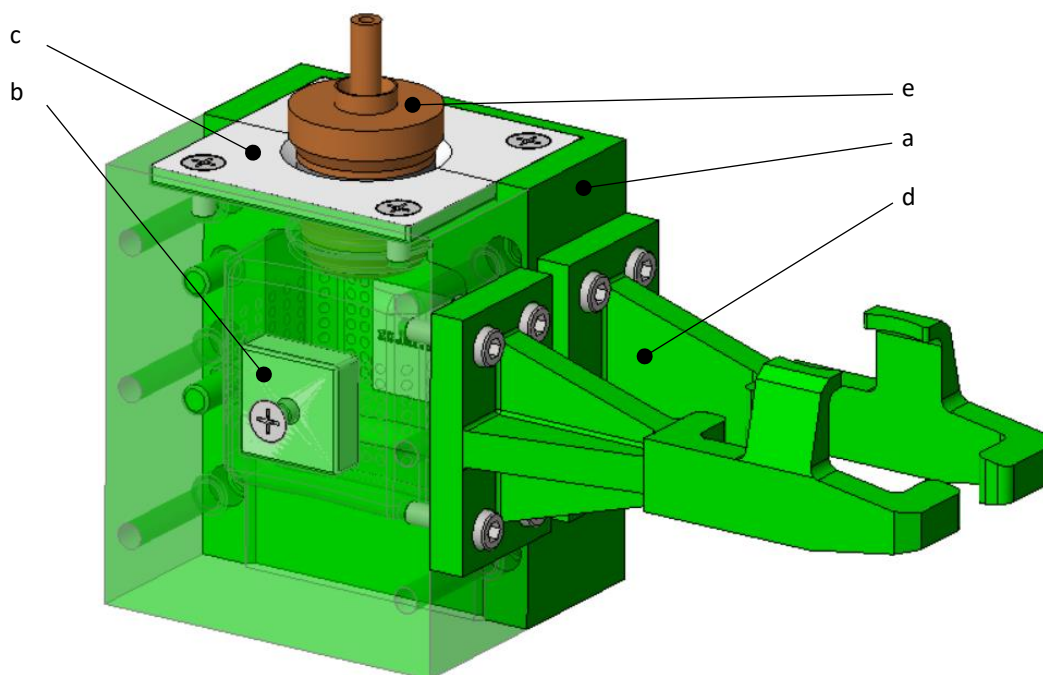
Jako výrobek byla navržena lahvička, viz obr. 3.1.1, o rozměrech: šířka 60 mm, výška 84 mm, hloubka 50 mm, vnitřní průměr hrdla 34 mm. Závit lahvičky byl navržen tak, aby mohlo být použito víčko Bericap SK 38/25. Pro ověření kvality a přesnosti 3D tisku formy byl na povrch přidán reliéf v podobě kulových ploch o průměru 2,75 mm vyčnívajících z povrchu o 0,25 mm. Dále bylo na přední a zadní povrch přidáno logo univerzity a text vyčnívající z povrchu o 0,2 mm. Logo a text jsou zrealizovány jako vyměnitelné vložky, díky kterým lze logo nebo text snadno změnit.



Obr. 3.1.1: Model vyfukovaného výrobku

3.2 Konstrukční návrh prototypové vyfukovací formy

Jednotlivé díly sestavy formy byly vymodelovány v 3D CAD softwaru Creo Parametric a byly sestaveny do celku. Tím byla ověřena návaznost jednotlivých dílů. Jedná se o tělo formy, vyměnitelné vložky, desky horní části, přídržovače výrobku a kalibrace hrdla, viz obr. 3.2.1. Kompletní kusovník sestavy formy je uveden v příloze č. 1.



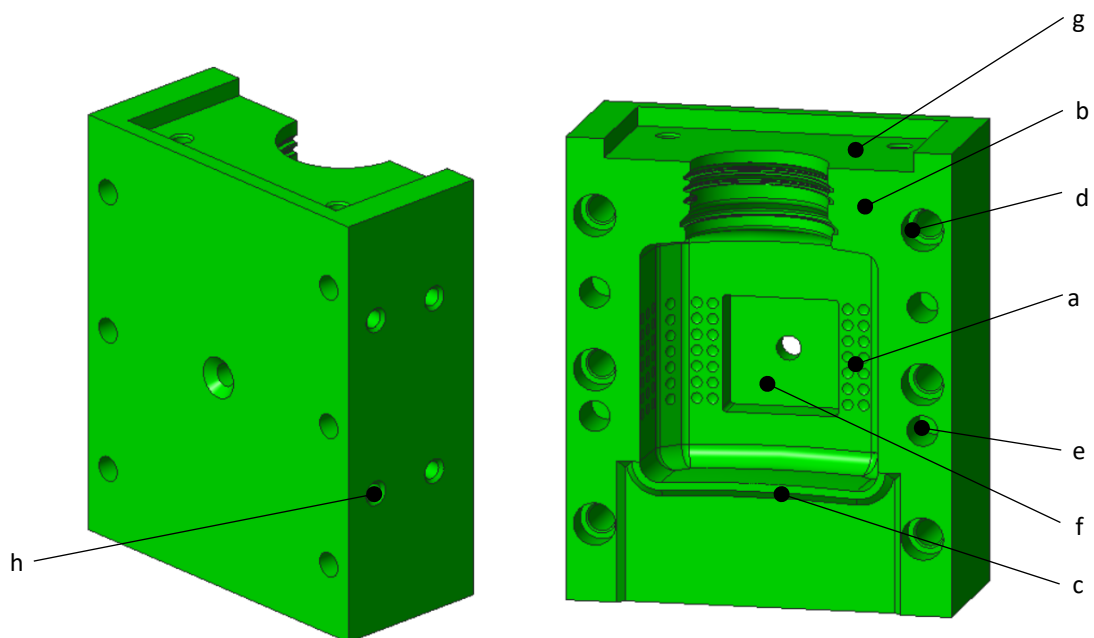
Obr. 3.2.1: Kompletní sestava prototypové vyfukovací formy: (a) tělo formy, (b) vyměnitelná vložka, (c) deska horní části, (d) přidržovač výrobku, (e) kalibrace hrdla

3.2.1 Tělo formy

Při konstrukci prototypové vyfukovací formy bylo bráno v potaz, že forma bude použita na stroji GM 251. Pro tento vyfukovací stroj je doporučeno použít formu maximální šířky 100 mm, výšky 160 mm a hloubky 45 mm (1/2 formy). Posuv formy mezi stanicemi pod vytlačovací hlavou a pod vyfukovacím trnem je 150 mm v horizontálním směru. Rozmístění závitových děr pro šrouby k upevnění formy na stroj je znázorněno v podkladech firmy GDK spol. s.r.o., v příloze č. 2.

Ze znalosti doporučených rozměrů formy, rozmístění upínacích otvorů a velikosti modelu vyfukovaného výrobku byly stanoveny rozměry vyfukovací formy na obr. 3.2.2. Šířka 100 mm, výška 120 mm a hloubka 45 mm (1/2 formy). Forma je symetricky rozdělena na dvě poloviny ve vertikálním směru. Do každé poloviny formy je vytvořena dutina podle tvaru modelu. Podle vyfukovaného materiálu: PE LITEN BB29 byla dutina formy, viz obr. 3.2.2 (a), zvětšena o 3 % z důvodu kompenzace smrštění výrobku při ochlazení. Doporučená šířka stěny formy by se měla pohybovat od 25 mm do 50 mm (viz. kapitola 2.2.10 – samostatná forma), ale z důvodu úspory materiálu a omezeným upínacím rozměrům byla šířka stěny zmenšena na 20 mm. Dle doporučení (viz kapitola 2.2.6), byl na dosedací plochy, viz obr. 3.2.2 (b), přidán přírůstek 1,1 mm. Dále dle doporučení úpravy svařovacích ploch (viz kapitola 2.2.7), byla šířka svařovacích ploch zvětšena na

2 mm. Pod svařovací plochou byl vytvořen prostor pro přetok parizonu. Závitové díry pro upínací šrouby rozvržené podle nákresu, viz příloha č. 2, byly nahrazeny otvory o průměru 7 mm, viz obr. 3.2.2 (d), pro šroub M6 s válcovou hlavou a zahloubením pro hlavu šroubu na straně dosedací plochy. Důvodem této změny je nižší únosnost vyřezaného závitu do vytištěné formy. Mezi tyto otvory byly umístěny další otvory, viz obr. 3.2.2 (e), pro čtyři vložené ocelové vodící čepy o průměru 9 mm. Do jedné poloviny formy byly vytvořeny otvory pro zalisování čepů a do druhé byly vytvořeny vodící otvory s vůlí 0,1 mm na průměr. Jelikož není možné vytisknout otvory s vysokou přesností, byly otvory předtištěny s přídávkem 1 mm na obrábění. V dutině formy byl vytvořen výřez o rozměrech 30,2 x 30,2 mm a hloubce 10 mm pro vyměnitelné vložky, viz obr. 3.2.2 (f). Po stranách mezi stěnou formy a vyměnitelnou vložkou byla vytvořena vůle 0,1 mm. Uprostřed výřezu byl vytvořen otvor pro zápusťný šroub M6, kterým je vyměnitelná vložka upevněna do formy. Dle doporučení (viz. kapitola 2.2.8) byl v horní části formy vytvořen výřez, viz obr. 3.2.2 (g), pro desku o rozměrech 40,1 x 80,2 mm a hloubce 5 mm. Mezi stěnami jednotlivých částí byla opět vytvořena vůle 0,1 mm. Do formy byly vytvořeny dva otvory pro závity sloužící k uchycení desky k formě pomocí zápusťného šroubu M6. Dále byly z boku formy vytvořeny další čtyři otvory pro závity, viz. obr. 3.2.2 (h), pro přichycení přídržovače výrobku. Pro závity M6 byly do formy předtištěné otvory o průměru 5 mm.

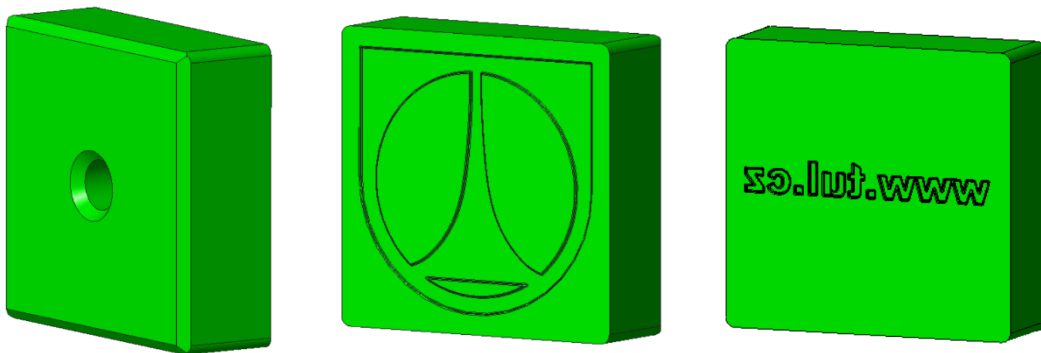


Obr. 3.2.2: Tělo formy: (a) dutina formy, (b) dosedací plocha (dělicí rovina), (c) svařovací plocha, (d) otvor pro šroub M6, (e) otvor pro vodící čep, (f) výřez pro vyměnitelnou vložku, (g) výřez pro desku horní části, (h) závitový otvor pro připevnění přídržovače výrobku

3.2.2 Vyměnitelné vložky

Vyměnitelné vložky jsou rychlou a levnou konstrukční variantou pomocí nichž lze během produkce měnit loga, či texty na povrchu vyfukovaného dílu. Jistou nevýhodou aplikace vyměnitelných vložek je předpoklad vzniku viditelné hrany na výrobku na rozhraní mezi vyměnitelnou vložkou a tělem formy.

Vyměnitelná vložka, viz obr. 3.2.3, byla navržena o rozměrech 30x30 mm a tloušťce 10 mm. Na přední straně vyměnitelné vložky bylo vytvořeno logo do hloubky 0,2 mm. Pro text byl použit font Grotesque MT Bolt o výšce 3,2 mm. Vytvořené kolmé plochy na dělicí rovinu byly zkoseny o úhel 30° a hrany byly zaobleny rádiusem 0,1 mm. Na zadní straně uprostřed vložky byl vytvořen otvor pro závit M6 o průměru 5 mm.

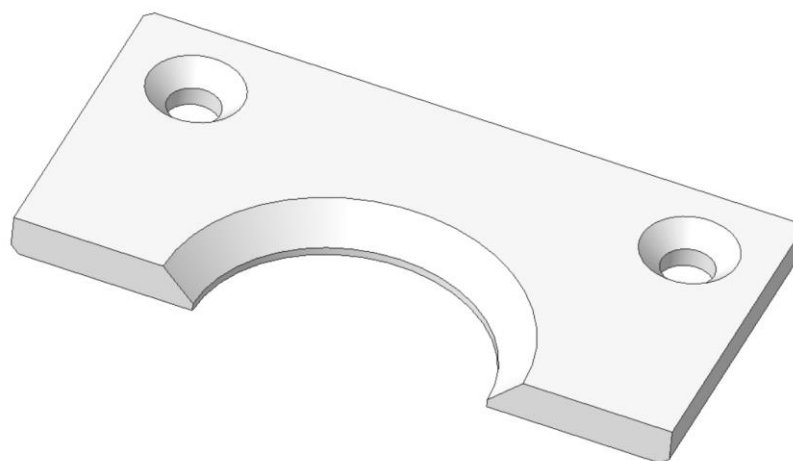


Obr. 3.2.3: Vyměnitelné vložky s logem a textem

3.2.3 Deska horní části formy

Pro lepší odolnost horní části formy (viz kapitola 2.2.8), která je v přímém kontaktu s horkým parizonem a kalibračním trnem nebyl použit stejný materiál jako u zbytku formy, ale deska z hliníkové slitiny, viz obr. 3.2.4. Rozměry desky o tloušťce 5 mm jsou 80x40 mm. Kromě vyšší životnosti (oproti materiálu digital ABS) má hliníková slitina také vyšší schopnost odvádět teplo z oblasti hrdla (teplotní vodivost), což je velmi důležité, jelikož se jedná o místo, kde je forma tepelně nejvíce namáhána. Dva otvory v desce o průměru 7 mm se zahloubením byly vytvořeny pro zápusťné šrouby M6, kterými je deska připevněna k tělu formy. Výkres desky je uveden v příloze č. 3.

V případě, že by volba materiálu horní části formy nebyla změněna, hrozilo by velké riziko jejího brzkého poškození, nedocházelo by k dostatečnému utěsnění parizonu a odvodu tepla z oblasti hrdla formy.

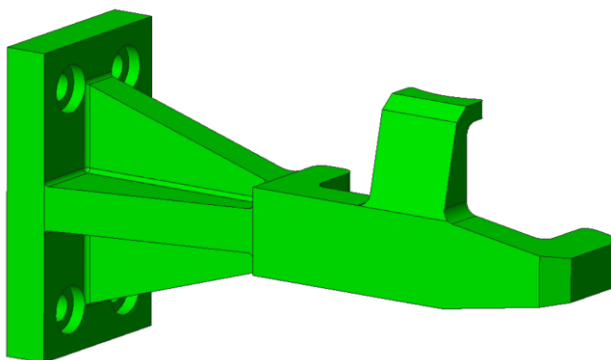


Obr. 3.2.4: Deska horní části formy

3.2.4 Přidržovač výrobku

Přidržovač výrobku slouží k uchycení výrobku proto, aby mohl být vyfukovací trn vysunut z hrdla výrobku a zároveň aby mohli být odstraněny přetoky parizonu nad hrdlem a pod svařenou hranou výrobku.

Přidržovač výrobku, viz obr. 3.2.5, byl dimenzován tak, aby odolal ohybovému namáhání od reakčních sil při vysouvání vyfukovacího trnu a odstraňování přetoků parizonu. K tělu formy je připevněn čtveřicí šroubů M6, aby bylo namáhání vyřezaných závitů do vytištěné formy co nejvíce rozloženo. Při konstrukčním návrhu bylo využito minimálních konstrukčních omezení díky využití technologie 3D tisku a celá konstrukce přidržovače byla navržena z jednoho kusu. Po vytištění nebyly přidržovače žádným způsobem dodatečně upraveny. Podle předpokládaného zatížení byl přidržovač výrobku vyztužen vertikálním a horizontálním žebrováním tak, aby napětí v každém místě bylo přibližně stejné. Tímto způsobem vznikl tvar, který se přibližoval maximální tuhosti při nejmenším objemu materiálu.

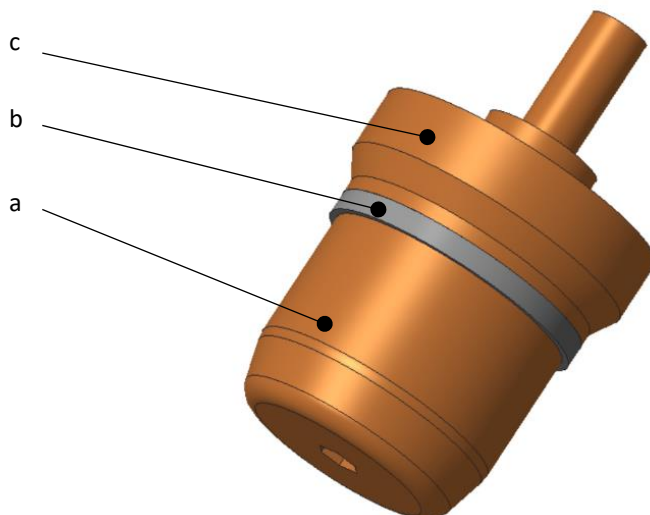


Obr. 3.2.5: Přidržovač výrobku

3.2.5 Kalibrace hrdla

Konstrukce kalibrace hrdla je stejná jako u konvenčních vyfukovacích forem a byla realizována dle podkladů firmy GDK spol. s.r.o., viz příloha č. 4.

Kalibrace hrdla se skládá z kalibrace, osekávacího kroužku a nástavce trnu, viz obr. 3.2.6.



Obr. 3.2.6: Sestava kalibrace hrdla: (a) kalibrace, (b) osekávací kroužek, (c) nástavec trnu

Kalibrace hrdla je navržena v souvislosti s vnějším závitem hrdla výrobku a požadované tloušťce stěny výrobku. Kalibruje vnitřní průměr na 33,7 mm, při požadované tloušťce stěny v oblasti hrdla 1 mm a vnějším průměrem hrdla 35,75 mm. Pro lepší odolnost proti otěru a dostatečnému vedení tepla je kalibrace hrdla vyrobena ze slitiny bronzu. Kalibrace byla vyrobena podle výrobního výkresu, viz příloha č. 5.

Osekávací kroužek je umístěn mezi kalibrací hrdla a nástavcem trnu. Je vyroben z uhlíkové oceli, která je tepelně zpracována kalením. Vnější průměr osekávacího kroužku je 35,7 mm s ostrou hranou, kterou je utěsněna dutina parizonu a mezi deskou a osekávacím kroužkem je parizon ztenčen, což usnadňuje odstřihnutí přetoku parizonu. Osekávací kroužek byl vyroben podle výrobního výkresu, viz příloha č. 6.

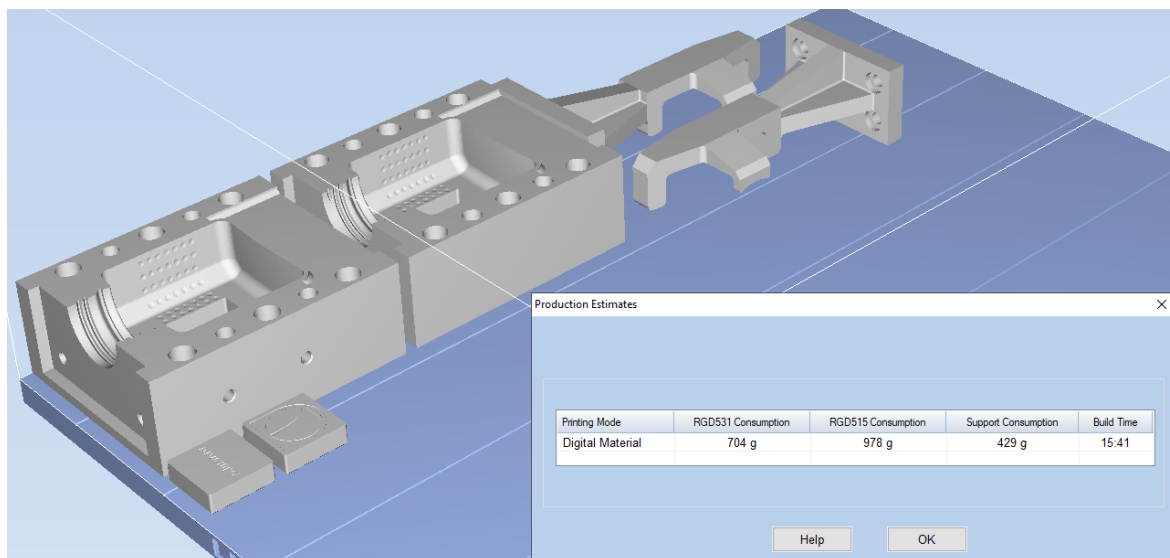
Nástavec trnu slouží jako plynulý přechod mezi kalibrací a vyfukovacím trnem z průměru 35,7 mm na průměr 40 mm. Pro dostatečné odvedení tepla z oblasti hrdla formy je vyrobena z bronzu. Teplo je předáváno do vyfukovacího trnu, který disponuje interním vodním chlazením, které odvádí teplo pryč. Nástavec trnu byl vyroben podle výrobního výkresu, viz příloha č. 7.

3.3 Výroba součástí formy

Pro výrobu na 3D tiskárně byly vybrány komplexní součásti formy. Konkrétně se jedná o tělo formy, přídržovače výrobku a vyměnitelné vložky. Tyto součásti byly vytištěny technologií PolyJet na 3D tiskárně Objet Connex 500 s defaultním nastavením tisku. U této technologie je časově výhodné tisknout co nejvíce součástí najednou, aby byla zaplněna plocha pod tiskovou hlavou. Přípravné práce, které je nutné provést před zahájením každého tisku je nutné provést pouze jednou. Jedná se o nasazení požadovaného materiálu pro tisk, kalibrace tiskárny a její čištění po dokončení tisku. Pro porovnání:

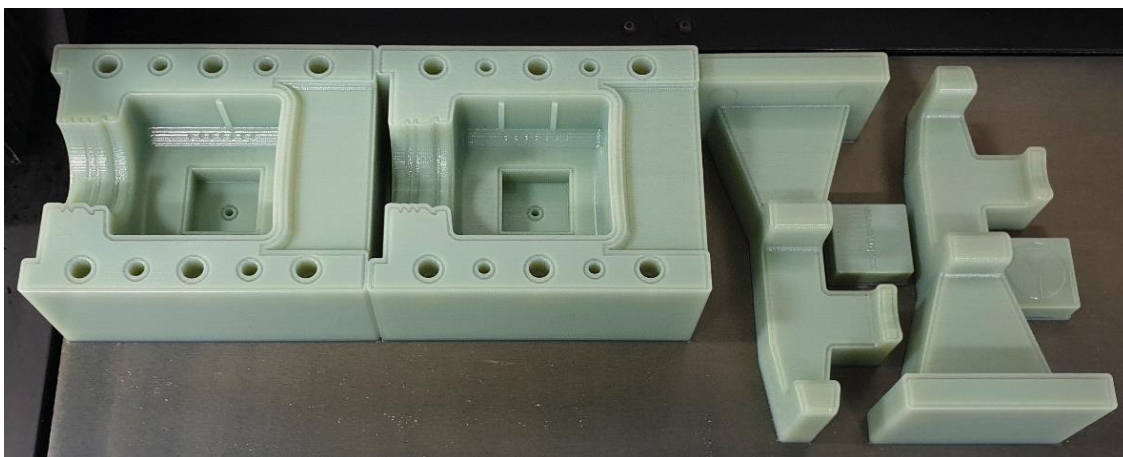
- Samotný tisk těla formy trvá 9 hodin a 33 minut.
- Samotný tisk těla formy, dvou přídržovačů výrobku a dvou vyměnitelných vložek najednou trvá 15 hodin 41 minut.

Pro přípravu tisku byl použit software Objet studio, viz obr. 3.3.1, do kterého byly nahrány 3D modely ve formátu step. Software si jednotlivé díly sám rozmístil na tiskovou plochu a vypočítal potřebné množství materiálů. Pro tisk byly použity celkem tři materiály. Vytištěné součásti jsou dvoukomponentní, kde na povrchu je použit odolnější materiál RGD 531, pro výplň je použitý materiál RGD 515 a pro tisk podpor byl použit materiál SUP 705, který je rozpustný ve vodě.

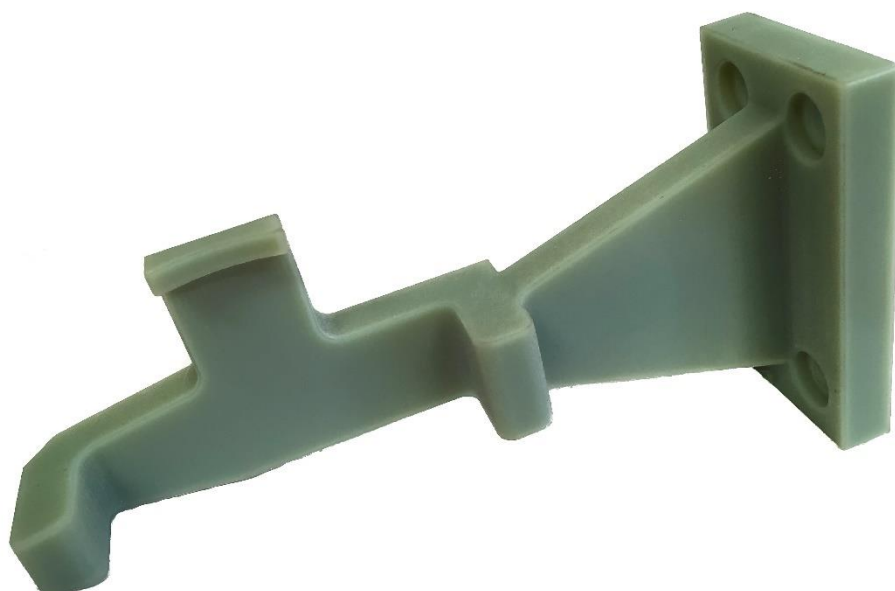


Obr. 3.3.1: Rozložení dílů pro tisk v programu Objet studio, tabulka odhadu spotřeby materiálů a doba tisku

Po dokončení tisku byly součásti, viz obr. 3.3.2 až 3.3.5, očištěny od podpůrného materiálu vodní tryskou a ponořeny do hydroxidu sodného v ultrazvukové čističce. Posléze byly opět součásti opláchnuty od hydroxidu vodní tryskou.



Obr. 3.3.2: Vytištěné díly na tiskárně Objet Connex 500



Obr. 3.3.3: Přidržovač výrobku vyrobený technologií 3D tisku PolyJet

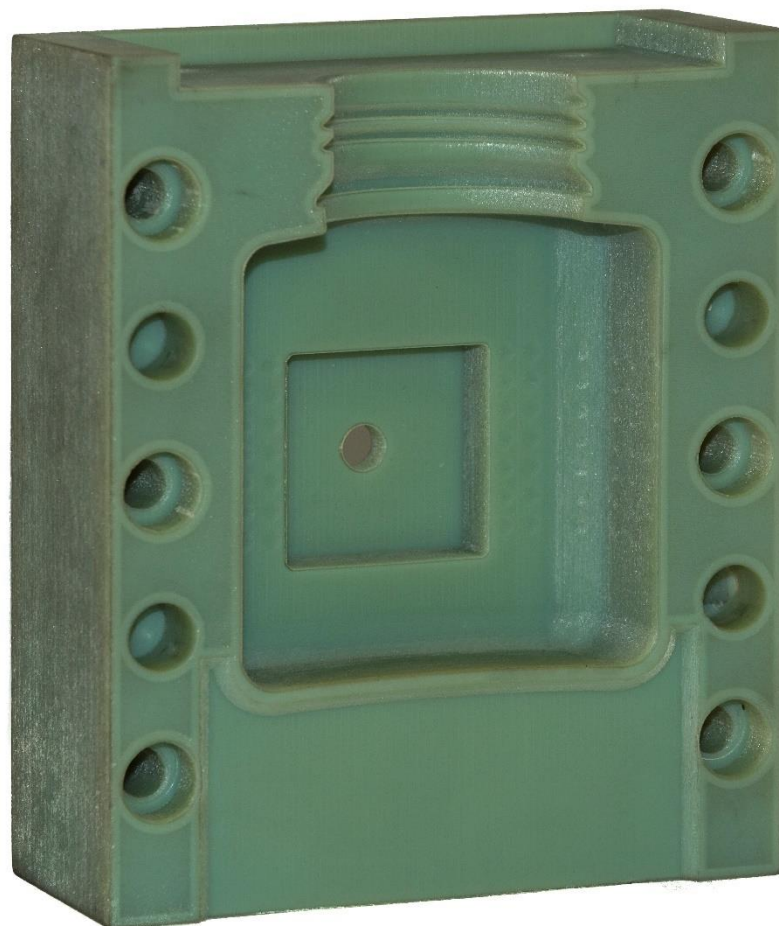


Obr. 3.3.4: Vyměnitelné vložky vyrobené technologií 3D tisku PolyJet

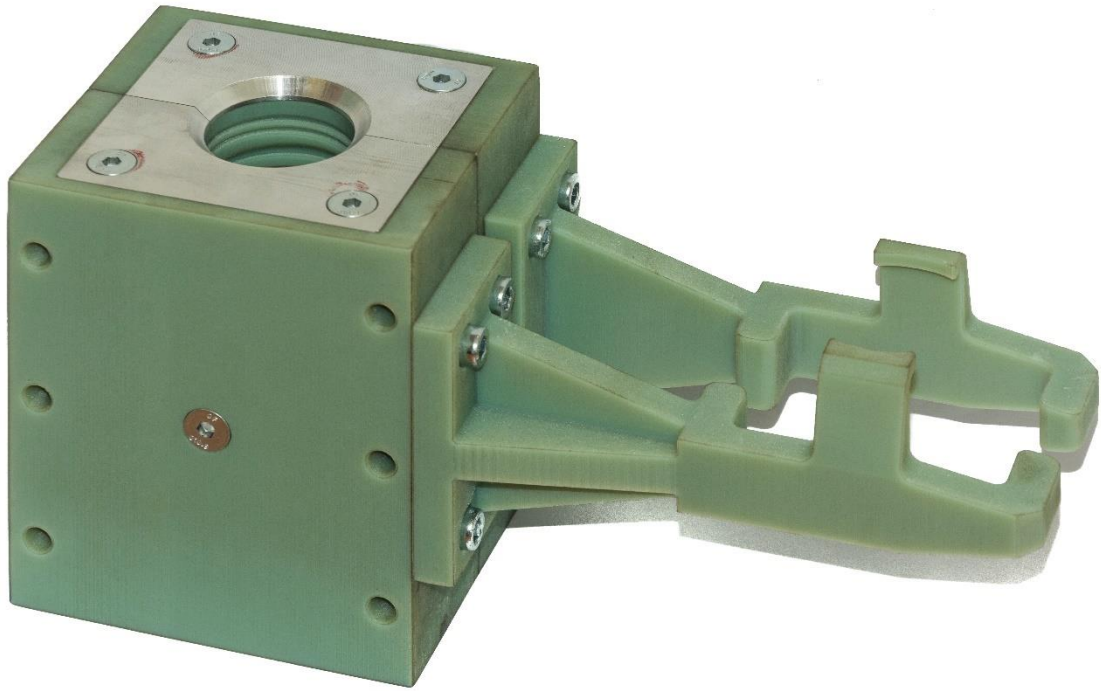
Tělo formy, viz obr. 3.3.5, bylo obrobena na dosedacích plochách. Tím došlo k jejich zarovnání a vytvoření ostré hrany v dělicí rovině. Dále byly obrobena svařovací plochy o 0,1 mm hlouběji než dosedací plochy. Při sevření obou polovin formy k sobě tak vznikla mezi svařovacími plochami mezera 0,2 mm. Tímto řešením je zredukován působící tlak na svařovací plochy při svařování parizonu, čímž je docíleno snížení namáhání svařovacích ploch na otláčení. Otvory pro vodící čepy byly obrobena tak, aby v jedné polovině formy byly ocelové čepy o průměru 9 mm zalisovány a v druhé polovině byla vůle pro vedení 0,1 mm na průměr. Do předtíštěných otvorů byly vyřezány závity. Jako příloha č. 8 je výrobní výkres, podle kterého byla těla formy obrobena.

Do vyměnitelných vložek byly ze zadní strany do předtíštěného otvoru vyřezány závity pro šroub, kterým je vyměnitelná vložka zajištěna ve formě. Výrobní výkres vyměnitelné vložky je přiložen jako příloha č. 9.

Souběžně s výrobou formy byla vyrobena deska horní části a kalibrace hrdla. Následně byla forma kompletně smontována, viz obr. 3.3.6.



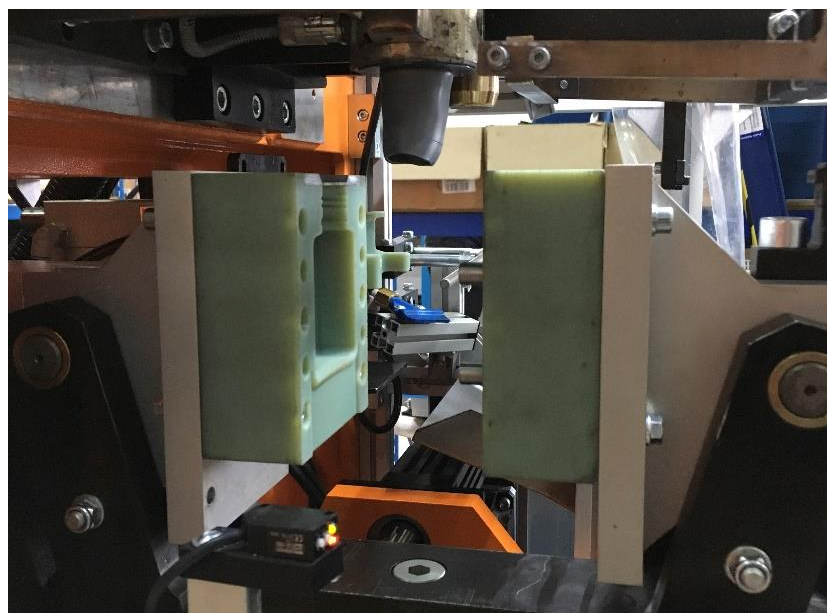
Obr. 3.3.5: Obrobena tělo formy vyrobené 3D tiskem PolyJet



Obr. 3.3.6: Smontovaná prototypová vyfukovací forma

3.4 Ověření funkčnosti formy

Prototypová forma byla navržena pro vyfukovací stroj GM 251 o základních technických specifikacích, viz tab. 3.4.1, podrobněji, viz příloha č. 10. Forma byla připevněna a seřízena na vyfukovací stroj, viz obr. 3.4.1.



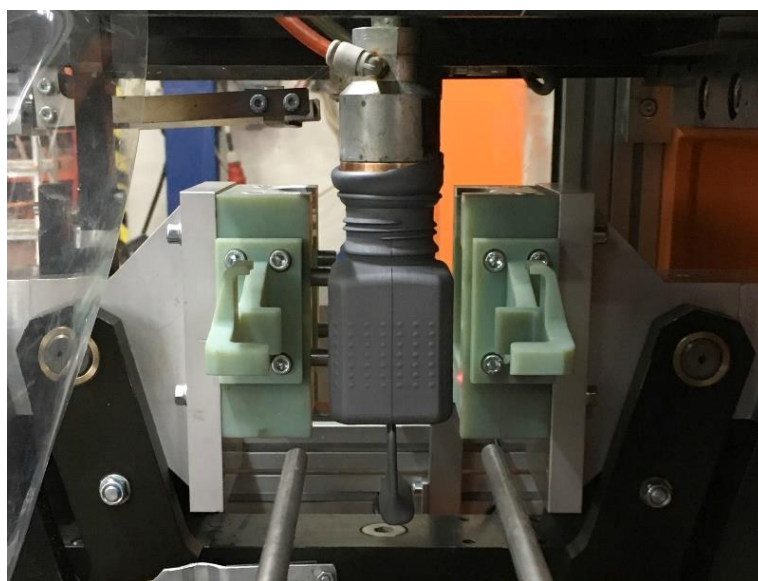
Obr. 3.4.1: Prototypová vyfukovací forma PolyJet na stroji GM 251

Tab. 3.4.1: Základní specifikace stroje GM 251

Vyfukovací stroj GM 251	
Uzavírací síla	12 kN
Objem výrobku	0 – 0,35 l
Výkon extruderu	4 kW
Hmotnostní výkon extruderu pro HD-PE	7 kg/hod
Uzavírání formy	pneumaticky

Nejprve byla forma odzkoušena při standartním nastavení pro běžnou výrobu. Parizon byl vyfukován tlakem 6,5 bar. Teploty plastifikovaného materiálu v extruderu, které jsou měřeny v pěti zónách od vytlačovací hlavy směrem k násypce byly: 1. teplota 200 °C, 2. teplota 195 °C a 3.-5. teplota 190 °C.

Během produkce bylo zjištěno, že vyfukovací tlak je vhodné snížit pro minimalizaci přetoků. Proto byla jeho hodnota snížena na hodnotu 3,8 bar. Vzhledem k vysoké teplotě výrobků byly sníženy teploty v jednotlivých zónách extruderu o 10 °C. I přes tyto změny nebyla možná produkce v automatickém režimu. Důvodem byla příliš dlouhá doba ochlazování výrobku. Z hlediska tepelné vodivosti materiálu těla formy byla tato skutečnost očekávána. Řešením bylo přepnutí stroje do manuálního režimu. Tím bylo docíleno optimální kvality výrobku a stabilizace výroby, viz obr. 3.4.2. Výrobní cyklus jedné lahvičky trval přibližně 90 vteřin. Během zkoušení bylo vyrobeno 50 lahviček a po demontáži forma nevykazovala žádné známky poškození.



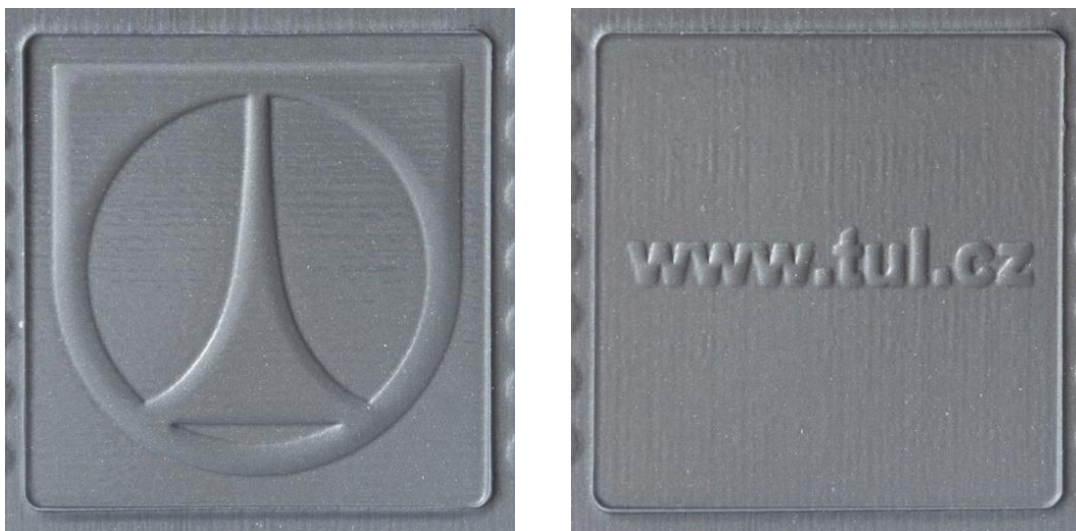
Obr. 3.4.2: Ověření funkčnosti prototypové vyfukovací formy PolyJet na stroji GM 251

4. Diskuse výsledků

Finální výrobek, viz obr. 4.1, je po rozměrové i vizuální stránce na dobré úrovni. Reliéf, logo i text jsou čitelně obtisknuty, viz obr. 4.2 a 4.3. Přetoky parizonu jsou ručně snadno odstranitelné. Výrobek lze funkčně používat (aplikace víčka, rovinnost spodní části výrobku). Na výrobku jsou viditelné drobné přetoky (hrany) v dělicí rovině, viz obr. 4.3, a na rozhraní mezi vyměnitelnými vložkami a tělem formy, viz obr. 4.2, kde jsou výraznější. Na povrchu formy jsou znatelné linie od vrstvení materiálu během její výroby. Vyfouknutý výrobek tento povrch kopíruje, a proto není dosaženo zcela hladkého povrchu.



Obr. 4.1: Finální výrobek



Obr. 4.2: Detail loga a textu na finálním výrobku

Na následujících obrázcích, viz obr. 4.3 až 4.5, je zobrazen rozdíl mezi podobným výrobkem z kovové formy (sériové) a výrobkem z prototypové formy PolyJet. Lze porovnat povrch, zvýraznění dělicí roviny, kvalitu závitů a podobný reliéf na povrchu.



Obr. 4.3: Detail dělicí roviny výrobku z kovové formy (vlevo) a výrobku z prototypové formy PolyJet (vpravo)



Obr. 4.4: Detail závitů výrobku z kovové formy (vlevo) a výrobku z prototypové formy PolyJet (vpravo)



Obr. 4.5: Detail reliéfu výrobku z kovové formy (vlevo) a výrobku z prototypové formy PolyJet (vpravo)

Dle obrázků výše je viditelné, že výrobek z prototypové vyfukovací formy je přesností srovnatelný s výrobkem z kovové formy. Nicméně je také vidět znatelně hrubší povrch výrobků. Dále je zřejmé, že výrobek z prototypové formy obsahuje výraznější přetoky. Tyto přetoky jsou ještě výraznější na rozhraní mezi vyměnitelnou vložkou a tělem formy.

V dalším kroku bylo provedeno srovnání formy PolyJet a kovové formy z hlediska rychlosti produkce. Výrobní čas při použití kovových forem může být až desetinásobně rychlejší než s formou PolyJet. V důsledku příliš dlouhého času chlazení ve formě PolyJet bylo znemožněno použití automatického režimu stroje.

Náklady a časová náročnost výroby prototypové vyfukovací formy, viz tab. 4.1. Významnou výhodou technologií rapid prototyping je plně automatizovaný proces průběhu tisku

bez dohledu obsluhy. To znamená, že tiskárna může vyrábět například i přes noc. Úkolem obsluhy je pouze příprava tiskárny a po dokončení tisku vytištěné díly očistit. Díky této výhodě je prakticky možné vyrobit formu do druhého dne.

Tab. 4.1: Rozklad ceny a času výroby formy PolyJet

OPERACE	POLOŽKY	CENA (S DPH)	VÝROBNÍ ČAS
3D tisk PolyJet	2x tělo formy (1/2)	54 459,00 Kč	15:41
	2x vyměnitelné vložky		
	2x přidržovač výrobku		
Příprava 3D tisku, očištění vytištěných komponent	2x tělo formy (1/2)	500,00 Kč	3:00
	2x vyměnitelné vložky		
	2x přidržovač výrobku		
Dokončovací obrábění, montáž vodících čepů, kompletní sestavení formy	2x tělo formy (1/2)	3 800,00 Kč	6:00
	2x vyměnitelné vložky		
Výroba	deska horní části	3 220,00 Kč	nerelevantní
	Kalibrace	4 220,00 Kč	nerelevantní
	Osekávací kroužek		
	Nástavec trnu		
Celková cena a výrobní čas		66 199,00 Kč	24:41

Podle doporučené technologie 3D tisku a materiálu (viz. Kapitoly 2.2.1 – technologie PolyJet; 2.2.2) by měla být snížena časová náročnost o 85–95 % a finanční náklady o 75–95 % v porovnání s obráběnou formou [4]. Pro srovnání, viz tab. 4.2, byla poslána poptávka na výrobu výše zmíněné formy do nástrojárny forem, kde byla odhadnuta celková cena a výrobní čas. Při obrábění je potřeba zohlednit v jakém režimu směn nástrojárna funguje. Nejrychlejším způsobem může být forma vyrobena do tří dnů.

Tab. 4.2: Porovnání cen a výrobních časů

TECHNOLOGIE	CENA (S DPH)	VÝROBNÍ ČAS
PolyJet	66 199,00 Kč	24:41
Obrábění (hliník)	71 570,00 Kč	51:30
Úspory při použití technologie PolyJet	7,5 %	52,1 %

5 Závěr

V teoretické části práce jsou představeny základní konstrukční zásady konvenčních vyfukovacích forem technologie extruzního vyfukování, konstrukční možnosti jednotlivých částí formy, možnosti výroby prototypových forem a konstrukční specifikace forem vyrobených technologií 3D tisku PolyJet.

V experimentální části práce byl nejprve navržen výrobek (lahvička o objemu 0,2 l), pro který byl následně realizován celkový konstrukční návrh prototypové vyfukovací formy. Při návrhu jednotlivých částí formy, kterými jsou: tělo formy, vyměnitelné vložky, deska horní části, přidržovač výrobku, kalibrace hrdla a vodící čepy, byly brány na zřetel specifika technologie 3D tisku PolyJet. Tělo formy, vyměnitelné vložky a přidržovače výrobku byly vyrobeny technologií 3D tisku PolyJet na tiskárně Objet Connex 500. Deska horní části a kalibrace hrdla byla pro zajištění správné funkčnosti a zvýšení životnosti formy vyrobena obráběním z konvenčních materiálu používaných pro tyto části u technologie extruzního vyfukování (slitiny hliníku a mědi). Dalším krokem výroby formy bylo obrobení přídavku v dělicí rovině (zajištění správného dosednutí polovin formy), implementace vodících čepů a vytvoření závitů pro fixaci jednotlivých částí formy. Dutina formy nebyla nijak dodatečně upravována. Cena kompletní prototypové vyfukovací formy je 66 199 Kč (s DPH). Její funkčnost byla ověřena na stroji GM 251.

Během ověřování funkčnosti bylo zjištěno, že výroba je díky nízkému teplotnímu odvodu formy možná pouze v manuálním režimu. Pro dosažení co nejrychlejší produkce a nejvyšší kvality výrobků byly rovněž upraveny procesní parametry. Vyfukovací tlak byl, pro co nejvyšší eliminace přetoků, snížen na hodnotu 3,8 bar. Teplota plastifikovaného materiálu (PE) byla snížena o 10 °C.

Finální výrobek z prototypové vyfukovací formy PolyJet je z hlediska rozměrového na dobré úrovni a lze ho funkčně používat. V porovnání s výrobkem z kovové formy má hrubší povrch a viditelné drobné přetoky v dělicí rovině. Tyto rozdíly jsou ještě znatelnější na rozhraní mezi tělem formy a vyměnitelnou vložkou.

Při použití prototypové vyfukovací formy PolyJet namísto vyfukovací formy vyrobené z hliníkové slitiny bylo ušetřeno 7,5 % finančních nákladů a 52 % času. Tyto výsledky se liší oproti poznatků z teorie, podle které by mělo být ušetřeno v průměru 75–95 % finančních nákladů a 85–95 % času v porovnání s obráběnou formou. Cenu formy by bylo možné snížit například použitím jednoduchých přidržovačů vyrobených levnějšími metodami 3D tisku nebo jinými výrobními metodami. Další možností je také použití forem v podobě vytištěných vložek nebo skořepin vložených do kovových rámců.

Z prezentovaných výsledků ověření funkčnosti prototypové formy vyrobené technologií 3D tisku PolyJet jsou zřejmé jisté omezení. Jedno z nejzásadnějších je velmi nízký teplotní odvod a

nemožnost aplikace automatického režimu výroby. Toto omezení by mohlo jít odstranit aplikací interního chlazení. Doporučuji proto v budoucnu ověření funkčnosti této možnosti. Z hlediska konstrukce by bylo vhodné upravit upevnění přidržovače výrobku do těla formy tak, aby bylo možné nastavení vzdálenosti prostoru pro přidržení výrobku.

Literatura

- [1] LEE, Norman C. Blow molding design guide. Munich: Hanser, 1998. ISBN 1-56990-227-5.
- [2] BRDLÍK, Pavel. Aplikace CO2 interního chlazení ve vyfukovacím procesu: Application of CO2 Internal Cooling in Blow Molding Process. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015.
- [3] ROSATO, Dominick V., Andrew V. ROSATO a David P. DI MATTIA, ed. Blow molding handbook: technology, performance, markets, economics: the complete blow molding operation. 2nd revised ed. Munich: Hanser Publishers, 2004. ISBN 1-56990-343-3.
- [4] POLYJET FOR BLOW MOLDING. In: Stratasys Ltd. [online]. Eden Prairie, USA, 2014 [cit. 2019-02-26]. Dostupné z: <http://usglobalimages.stratasys.com/Main/Secure/Applications/Blow%20Molding/SSYSTAGBlowMolding%202314%20FINAL.pdf?v=635290490162603894>
- [5] Manufacturing Processes Explained. 3dhubs [online]. 2019 [cit. 2019-02-26]. Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing>
- [6] GRIMM, Todd. User's guide to rapid prototyping. Dearborn: Society of manufacturing engineers, 2004. ISBN 0-87263-697-6.
- [7] GEBHARDT, Andreas. Understanding additive manufacturing: rapid prototyping, rapid tooling, rapid manufacturing. Munich: Hanser, [2012]. ISBN 978-3-446-42552-1.
- [8] Connex500. In: Stratasys Ltd. [online]. 2012 [cit. 2019-02-26]. Dostupné z: https://www.tamuk.edu/engineering/departments/mien/3D%20Printers/Connex500_letter_Stratasys_%20lowres.pdf
- [9] Objet350 and Objet500 Connex3. In: Stratasys Ltd. [online]. 2016 [cit. 2019-02-26]. Dostupné z: http://www.stratasys.com/-/media/files/printer-spec-sheets/pss_pj_objet30.pdf
- [10] Jetted Photopolymer. In: CustomPartNet. [online]. 2008 [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <https://www.custompartnet.com/wu/jetted-photopolymer>
- [11] Blow Moulding With 3D Printers. In: Smg3d [online]. Worcester [cit. 2019-02-26]. Dostupné z: https://www.smg3d.co.uk/images/objet-blow-mold_resized.jpg
- [12] Digital ABS plus. In: Stratasys Ltd. [online]. 2018 [cit. 2019-02-26]. Dostupné z: <https://www.stratasysdirect.com/-/media/files/direct/material-datasheets/polyjet/digital-abs--brochure.pdf?la=en&hash=BA71A8E32A63B24A2783D720D7AEA034BFDE526E>
- [13] Polymer - Thermal Properties. Goodfellow [online]. [cit. 2019-02-27]. Dostupné z: http://www.goodfellow.com/catalogue/GFCat2C.php?ewd_token=aynvIBK5eg02qxNfbU8DMRHU PBHtzR&n=BpZz7pDIQZsapmNkVMr3U69KPP2Ddx&ewd_urlNo=GFCat26&type=30&prop=6
- [14] PolyJet Materials. Stratasys Ltd. [online]. 2019 [cit. 2019-02-26]. Dostupné z: <https://www.stratasysdirect.com/materials/polyjet>

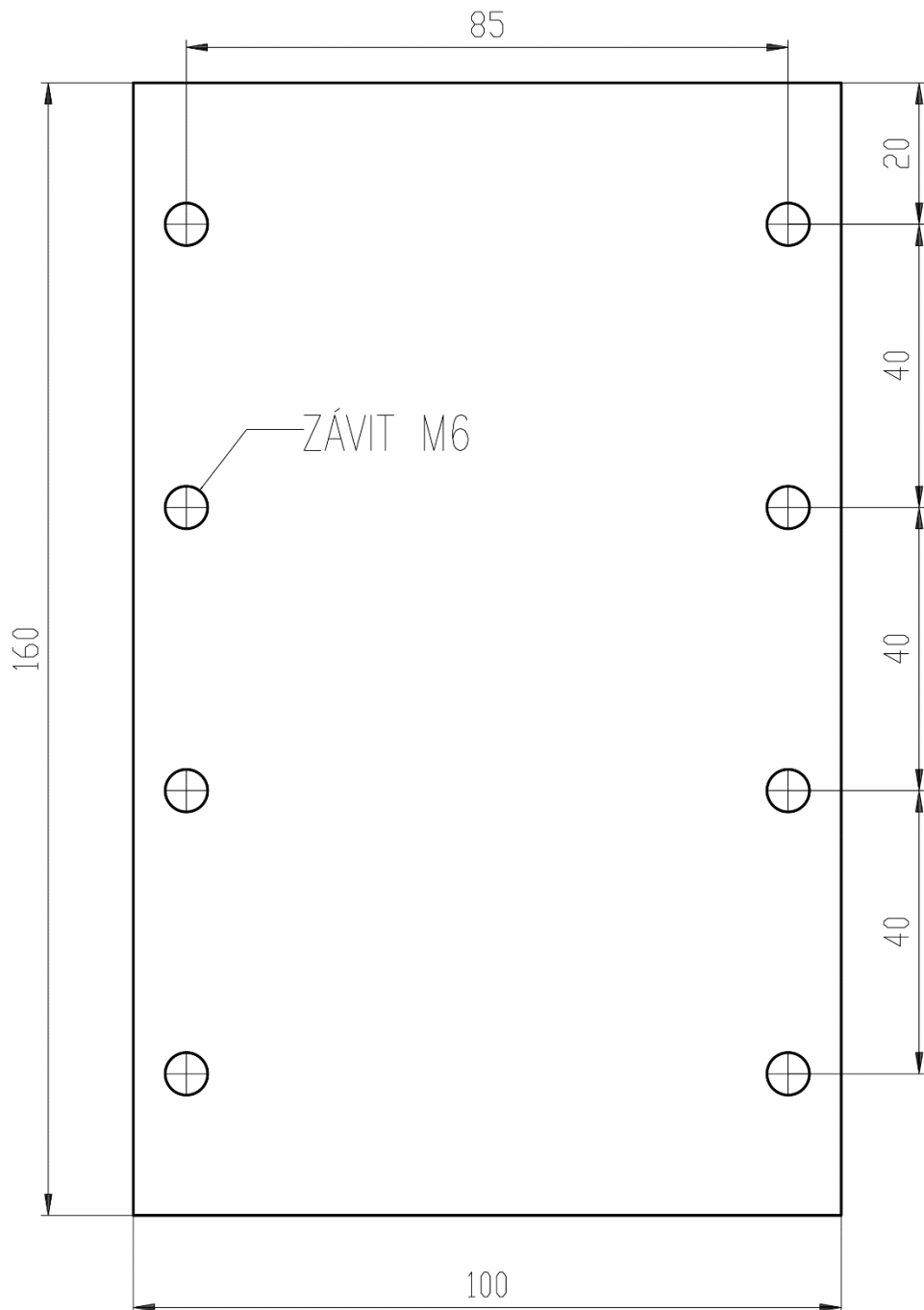
Seznam příloh a přílohy

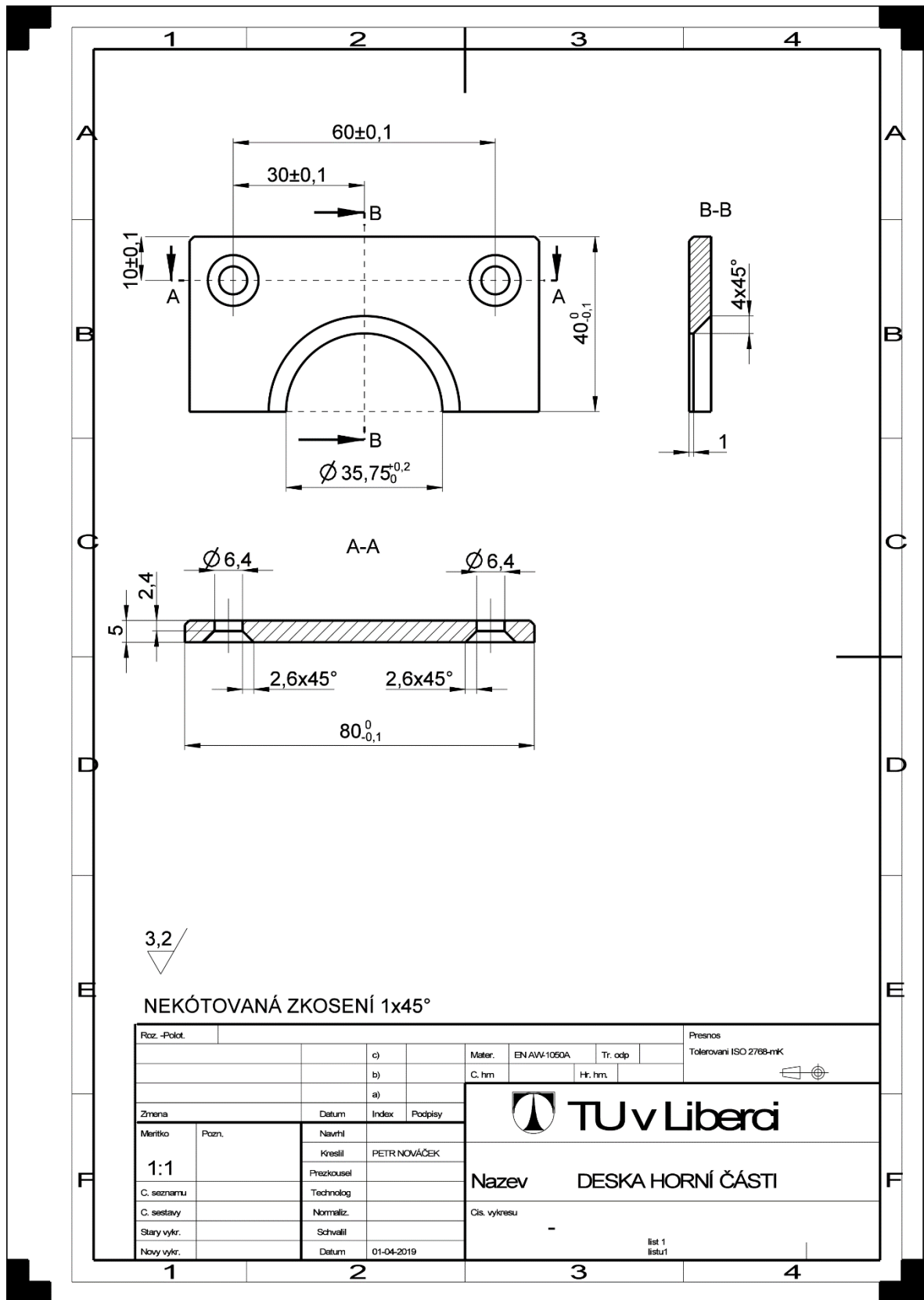
- Příloha č. 1: Kusovník sestavy vyfukovací formy
- Příloha č. 2: Výkres upínací plochy formy
- Příloha č. 3: Výrobní výkres desky horní části formy
- Příloha č. 4: Příklad kalibrace od firmy GDK spol. s.r.o.
- Příloha č. 5: Výrobní výkres kalibrace
- Příloha č. 6: Výrobní výkres osekávacího kroužku
- Příloha č. 7: Výrobní výkres nástavce trnu
- Příloha č. 8: Výrobní výkres těla formy
- Příloha č. 9: Výrobní výkres vyměnitelné vložky
- Příloha č. 10: Technický list stroje GM 251

KUSOVNÍK PROTOTYPOVÉ VYFUKOVACÍ FORMY

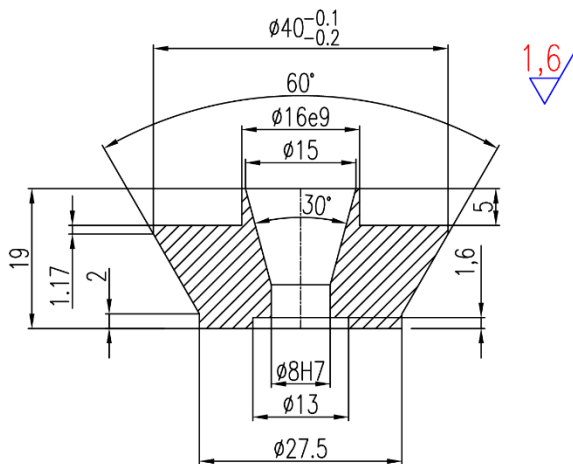
POZ.	NÁZEV	ROZMĚR	MATERIÁL	NORMA	POČET KS
1	TĚLO FORMY_A	100x120x45	DIGITAL ABS PLUS		1
2	TĚLO FORMY_B	100x120x45	DIGITAL ABS PLUS		1
3	DESKA HORNÍ ČÁSTI	80x40x5	Slitina Al		2
4	VLOŽKA_A	30x30x10	DIGITAL ABS PLUS		1
5	VLOŽKA_B	30x30x10	DIGITAL ABS PLUS		1
6	PŘIDRŽOVAČ_A		DIGITAL ABS PLUS		1
7	PŘIDRŽOVAČ_B		DIGITAL ABS PLUS		1
8	KALIBRACE	D33,7x66	BRONZ		1
9	OSEKÁVACÍ KROUŽEK	D35,7x3	12 020.4		1
10	NÁSTAVEC TRNU	D40x19	BRONZ		1
11	VODÍCÍ ČEP	D8x25			4
12	ŠROUB	M6x20		DIN 912	8
13	ŠROUB	M6x14		DIN 965	6

PŘIPEVNĚNÍ FORMY
(POHLED NA ZADNÍ PLOCHU FORMY)





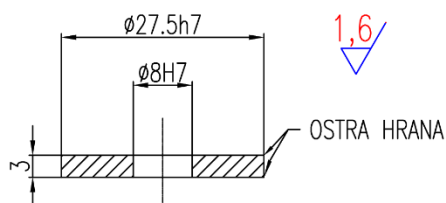
PŘÍKLAD KALIBRACE



NASTAVEC TRNU 27.5

BRONZ

1 ks

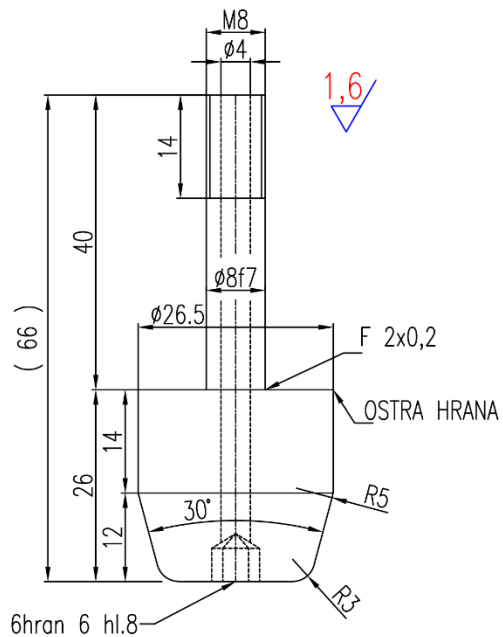


KROUZEK OSEKAVACI 27.5

19 312.40, 12 050.40

1 ks

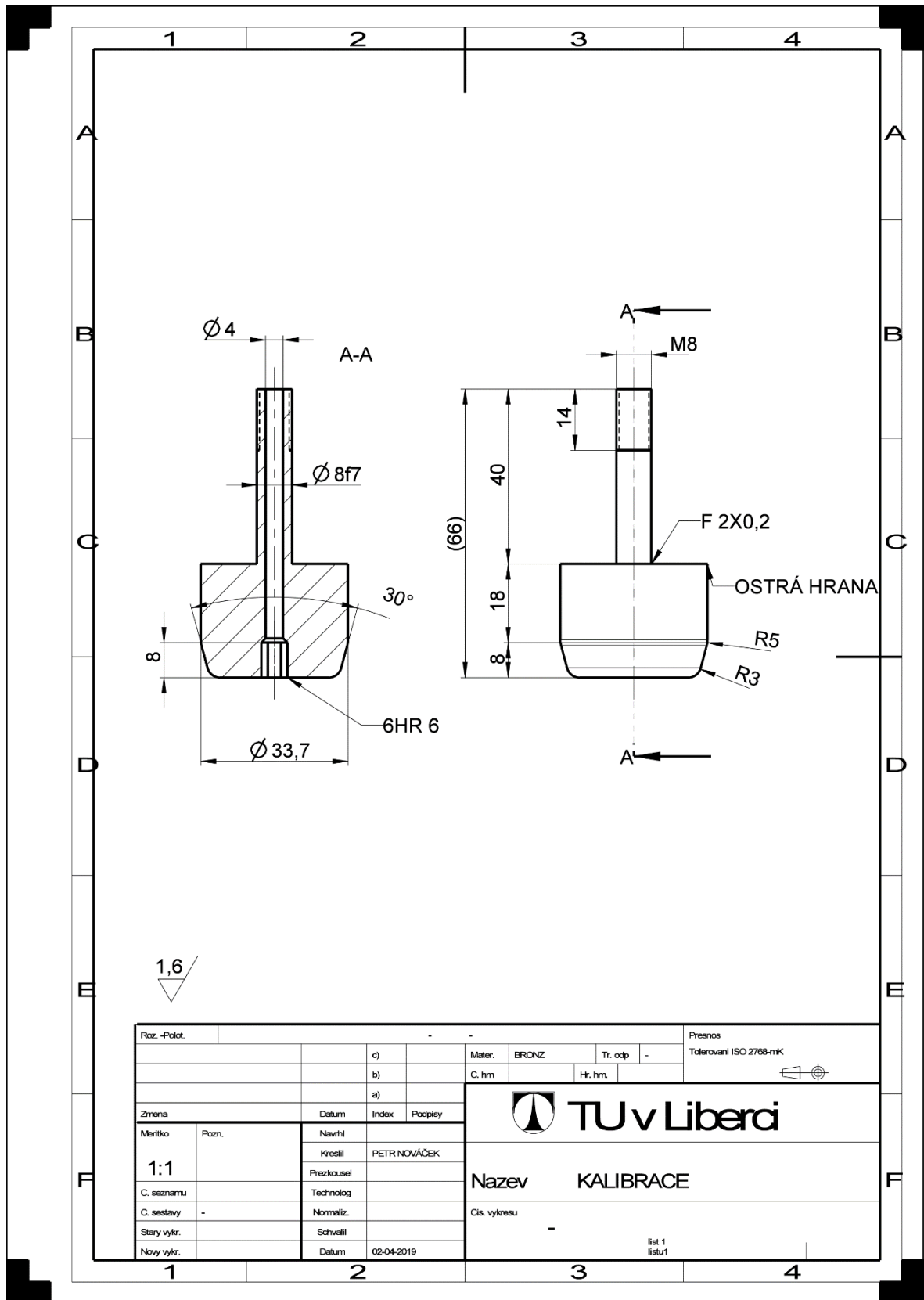
KALENO 55-58 HRC



KALIBRACE 26.5

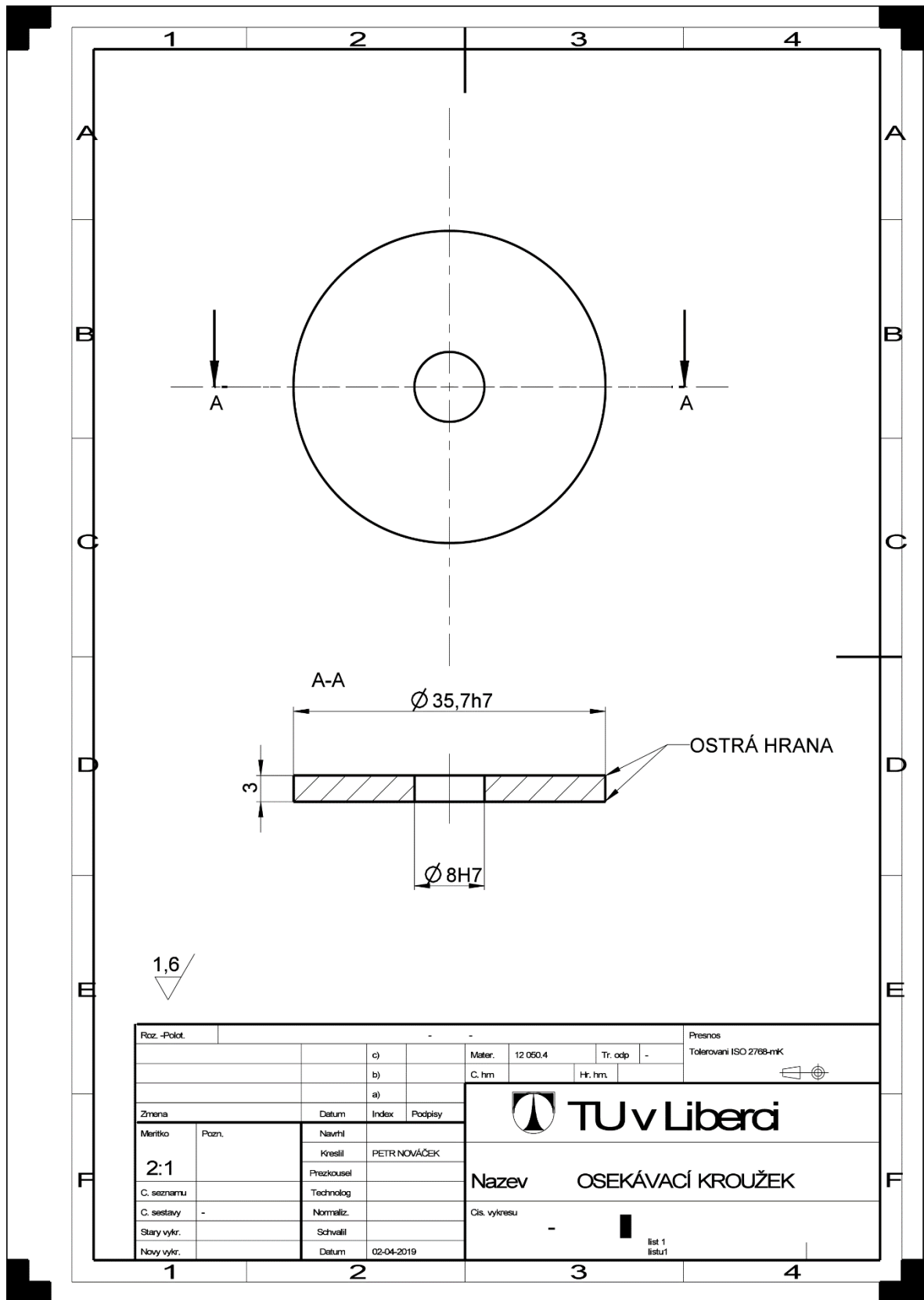
BRONZ

1 ks

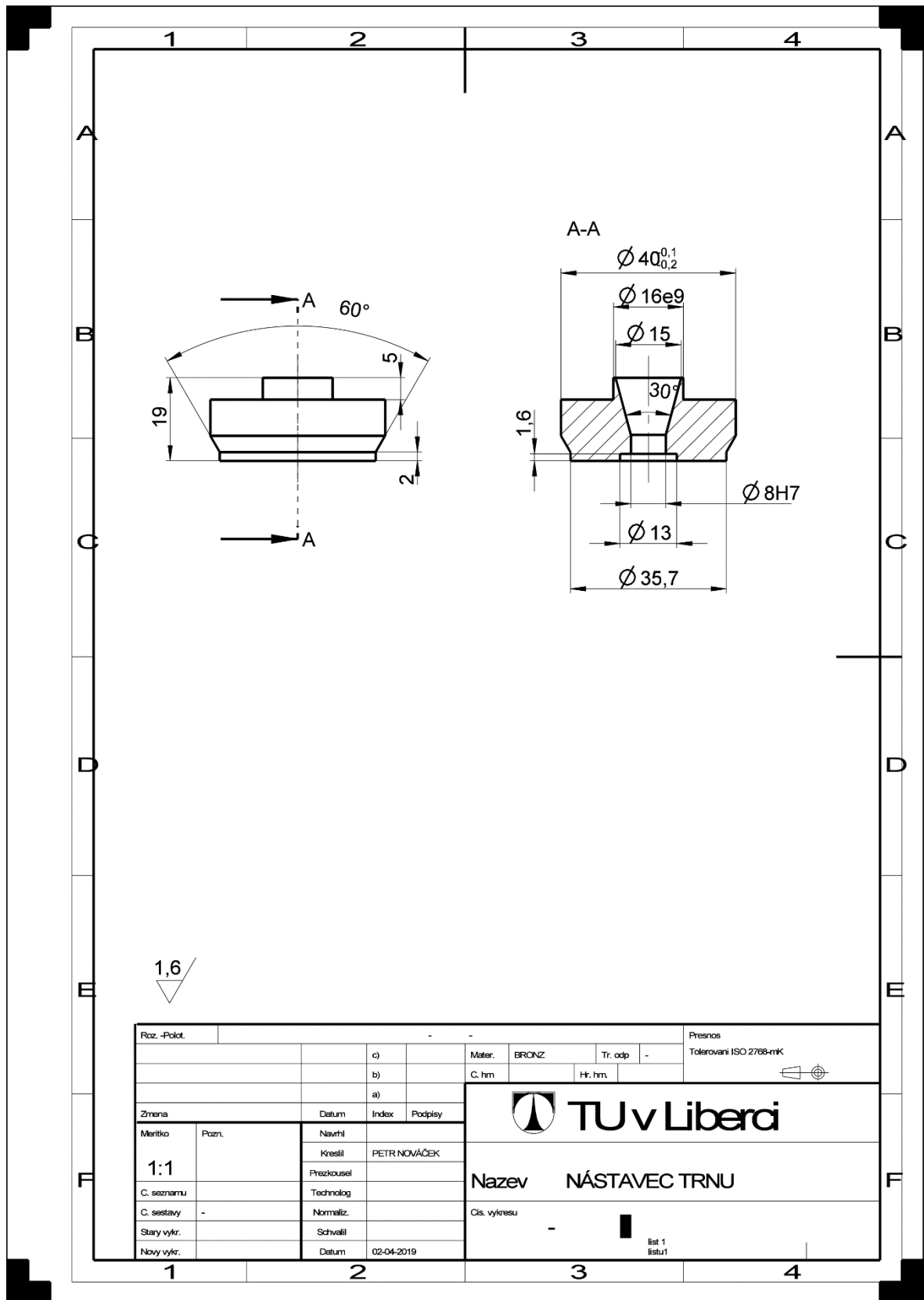


Roz. - Polot.				Mater. BRONZ		Tr. odp. -		Presnos Tolerovani ISO 2768-mK	
		c)		C. hm		Hr. hm			
		b)							
		a)							
Zmena		Datum		Index		Podpisy		 TU v Liberci Nazev KALIBRACE Cis. vyresu -	
Meritko		Navrh		Kresil		PETR NOVAČEK			
1:1		Pozn.		Prezkoušel					
C. seznamu		Technolog							
C. sestavy		Normaliz.							
Stary vykr.		Schválil						list 1 listu 1	
Novy vykr.		Datum		02-04-2019					

Příloha č. 6

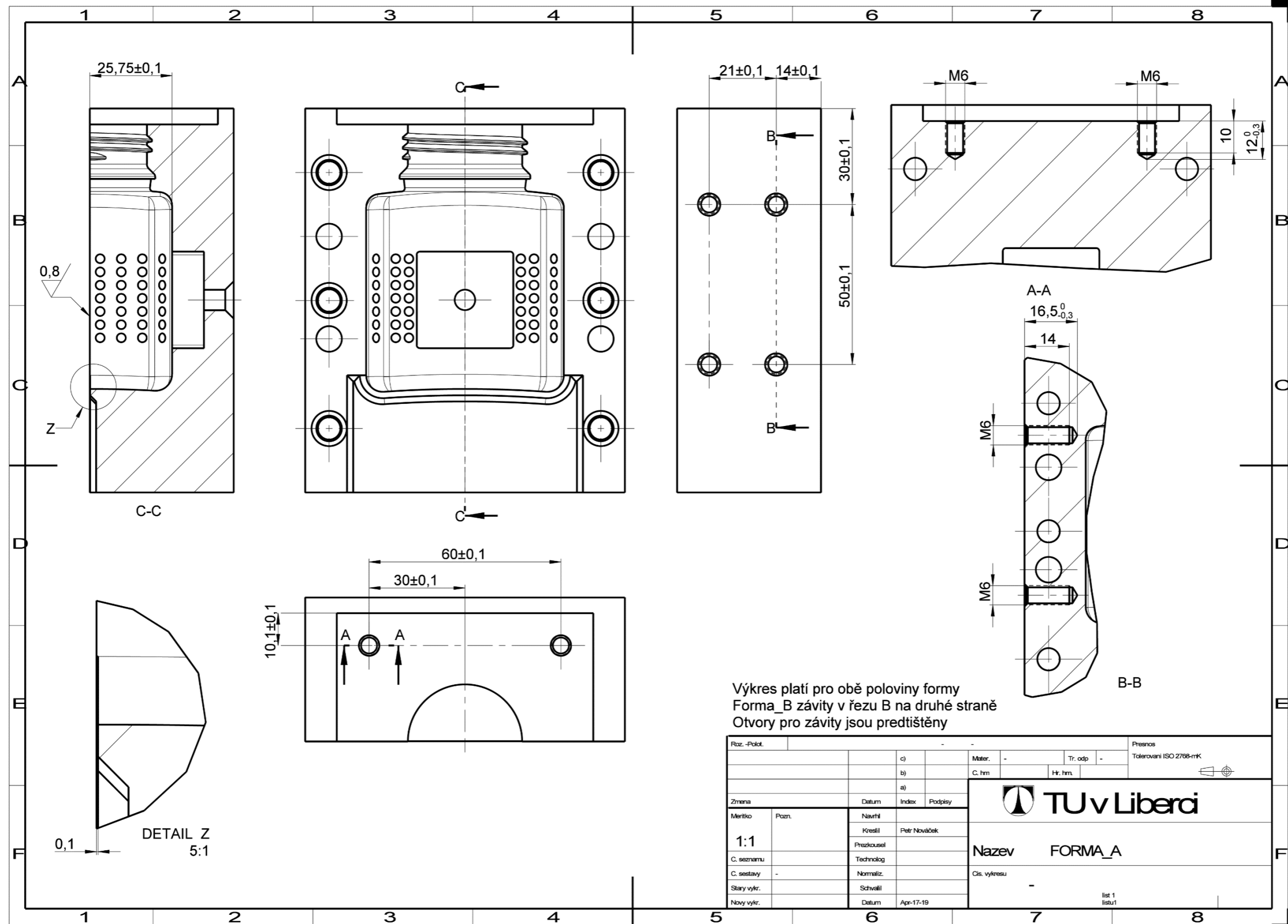


Roz. - Polot.				Mater.		12 050.4	Tr. odp.		-	Presnos		Tolerovani ISO 2768-mK	
				C. hm			Hr. hm						
				a)									
Zmena		Datum		Index		Podpisy							
Meritko		Pozn.		Navrhl		Kreslil		PETR NOVAČEK				Název	
C. seznamu				Przkoušel		Technolog				Cis. vykresu		-	
Stary vykr.				Schválil						list 1		list 1	
Novy vykr.				Datum		02-04-2019							



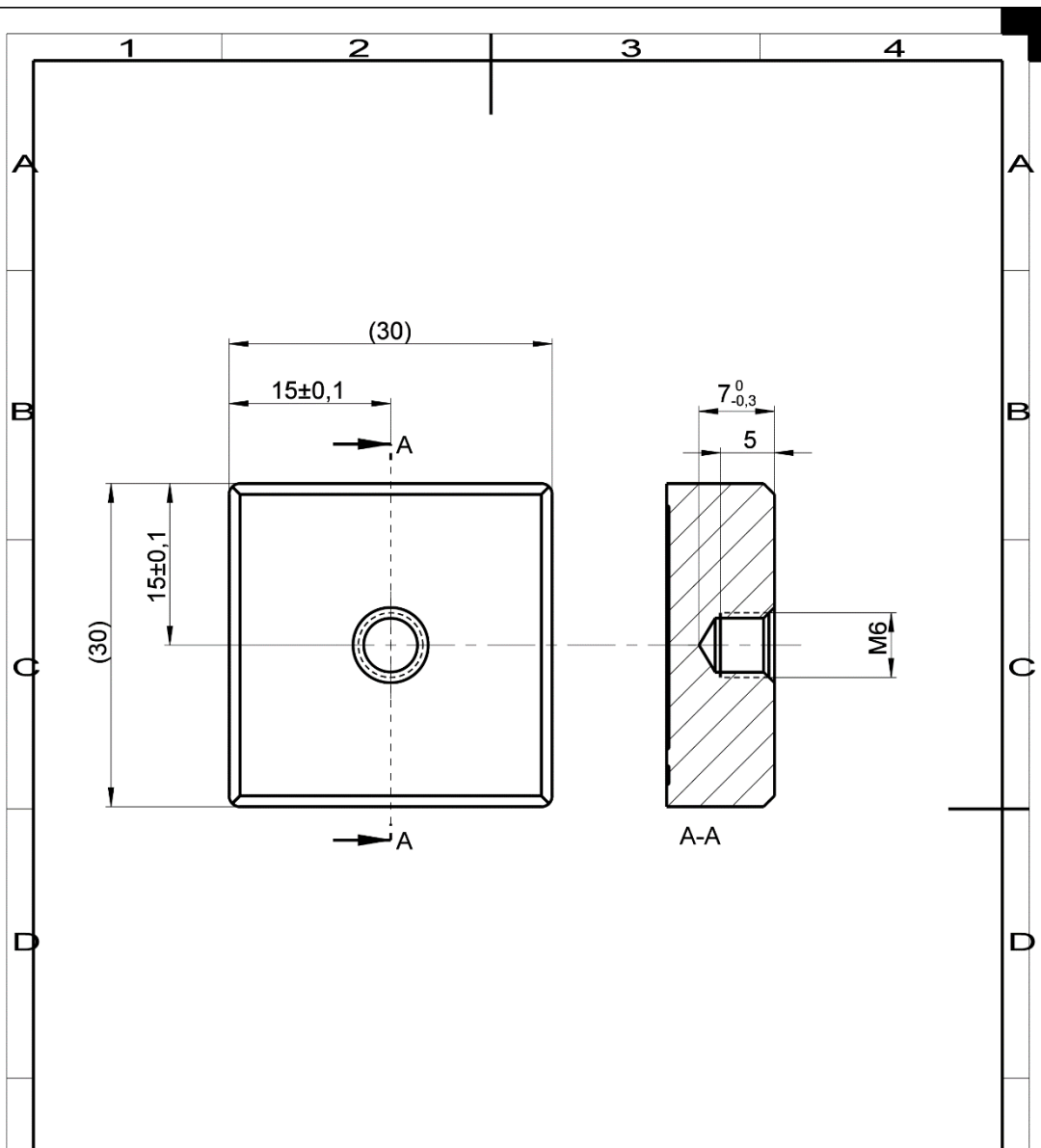
1,6

Roz. - Polot.				Mater. BRONZ		Tr. odp. -		Presnos Tolerovani ISO 2768-mK	
		c)		C. hm		Hr. hm			
		b)							
		a)							
Zmena		Datum		Index		Podpisy		<p>TU v Liberci</p> <p>Nazev NÁSTAVEC TRNU</p> <p>Cis. vykresu -</p> <p>list 1 listu 1</p>	
Meritko	Pozn.	Navrhl		Kreslil		PETR NOVAČEK			
1:1		Prezkoušel		Technolog					
C. seznamu	-	Normaliz.		Schválil					
Stary vykr.		Datum		02-04-2019					



Výkres platí pro obě poloviny formy
 Forma_B závity v řezu B na druhé straně
 Otvory pro závity jsou predtíštěny

Roz. - Polot.				Mater. -		Tr. odp. -		Přesnos Tolerování ISO 2768-mK	
		c)		C. hm.		Hr. hm.			
		b)							
		a)							
Změna		Datum		Index		Podpis			
Meritko	Pozn.	Návrh		Kreslil		Petr Nováček			
1:1		Kontrola		Technolog					
C. seznamu		Normaliz.		Schválil					
C. sestavy	-	Datum		Apr-17-19					
Starý vykr.									
Nový vykr.									
						Název FORMA_A			
						Čís. výkresu -			
								list 1 listu 1	



Výkres platí pro oběvložky do formy
Otvory pro závity jsou předtíštěny

Roz. - Polot.		-		-		Presnos		Tolerovani ISO 2768-mK	
		c)		Mater.		-		Tr. odp. -	
		b)		C. hm.		Hr. hm.			
		a)							
Zmena		Datum		Index		Podpisy			
Merkto		Pozn.		Kresil		Petr Nováček			
C. seznamu				Prezkousel				Nazev VLOZKA_A Cis. vykresu -	
C. sestavy		-		Technolog					
Stary vyk.				Normaliz.				list 1 list 1	
Novy vyk.				Schvati					
		Datum		Apr-17-19					

GM 251.X- Data Sheet

Clamping force	12 kN
Product volumes	0-0,35 l
Shuttle stroke	150 mm
Extruder information	Single station machine
Screw diameter	25 mm
Extruder drive output	4 kW
Extruder output HD-PE	7 kg/h
Drive	hybrid
Mould closing	pneumatic
Carriage movement	electric
Blow pin movement	electric
Parison cutter	pneumatic
Deflashing	pneumatic
Extruder bobbing	pneumatic
Wall thickness control	electric
Dimensions	
Width	900 mm
Length	1 700 mm
Height	2 100 mm
Weight	800 kg

Standard machine features

- machine design based on over 30 years of experience
- automatic extruder revolution control for precise cycle stability and product quality
- optical sensor of parison length allows direct mould closing for exact position of the parison in the mould
- timer machine mode allows automatic run of the machine, regardless of parison length
- interruption of the automatic machine run causes stop of the extruder and starts the alarm
- the machine is equipped with total cycle counter and daily counter with reset option
- machine is equipped with storage for multiple product data recipes
- every machine is custom made according to customers requirements

Optional features for extra cost

- electric parison 100 point wall thickness control with high precision
- PID temperature controlled feeding zone for steady extruder output
- leak testing unit, which secures output of precise product only
- remote checking of the machine by modem, NET or GSM connection is possible

Main components

SMC, EXLAR, NORD, SANKYO Oilless Industry, Ziehl – Abegg, Wittmann, OMRON, JUMO, Dynisco, Eaton, Murr...

Mould dimensions	2 Cavities	3 Cavities	4 Cavities	5 Cavities
Standard center distance	50 mm	-	-	-

GM250

Extrusion blow moulding machines

GDK spol. s r.o., Czech Republic, 362 14 Kolová 181
tel. / fax +420 353 331 391, www.gdk.cz

