



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA PODNIKATELSKÁ
ÚSTAV MANAGEMENTU**

FACULTY OF BUSINESS AND MANAGEMENT
INSTITUTE OF MANAGEMENT

APLIKACE MODERNÍCH TECHNOLOGIÍ PRO VÝROBU PŘEDNÍHO DÍLU UPÍNACÍHO SYSTÉMU HOROLEZECKÉ MAČKY

APPLICATION OF MODERN TECHNOLOGIES FOR PRODUCTION FRONT PART
FASTENING SYSTEM MOUNTAINEERING CRAMPONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

LUKÁŠ SAMOHÝL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR
BRNO 2013

ING. JOSEF SEDLÁK, PH.D.

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Samohýl Lukáš

Ekonomika a procesní management (6208R161)

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách, Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně a Směrnicí děkana pro realizaci bakalářských a magisterských studijních programů zadává bakalářskou práci s názvem:

Aplikace moderních technologií pro výrobu předního dílu upínacího systému horolezecké mačky

v anglickém jazyce:

Application of Modern Technologies for Production of Front Part Fastening System Mountaineering Crampons

Pokyny pro vypracování:

Úvod
Vymezení problému a cíle práce
Teoretická východiska práce
Analýza problému a současné situace
Vlastní návrhy řešení, přínos návrhů řešení
Závěr
Seznam použité literatury
Seznam příloh

Seznam odborné literatury:

- JACOBSON, D. M., RENNIE, A. E. W., BOCKING C. E. In Proceedings of the 5th National Conference on Rapid Design, Prototyping, and Manufacture. United Kingdom : Professional Engineering Publishing, 2004. 112 pp. ISBN 1860584659.
- PÍŠA, Z., KEJDA, P., GÁLOVÁ, D. Rapid Prototyping in Mechanical Engineering. In Proceedings of the Abstracts 12th International Scientific Conference CO-MA-TECH. Bratislava : STU, 2004. 160 s. ISBN 80-227-2121-2.
- PÍŠKA, M. a kolektiv. Speciální technologie obrábění. 1. Vydání. Brno : CERM, 2009. 246 s. ISBN 978-80-214-4025-8.
- SEDLÁK, J., PÍŠA, Z. Rapid Prototyping master modelů pomocí CAD/CAM systémů. In Mezinárodní vědecká konference. Ostrava : VŠB TU Ostrava, Fakulta strojní, 2005. 30 s. ISBN 80-248-0895-1.
- TMS (The Minerals, Metals & Materials Society): Rapid Prototyping of Materials. USA : The Minerals, Metals & Materials Society. 2002. 615 pp. ISBN 0873395301.
- VLÁČILOVÁ, H., VILÍMKOVÁ, M., HENCL, L. Základy práce v CAD systému SolidWorks. 1. vyd. Brno: Computer Press, a.s., 2006. 319 s. ISBN 80-251-1314-0.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

L.S.

prof. Ing. Vojtěch Koráb, Dr., MBA
Ředitel ústavu

doc. Ing. et Ing. Stanislav Škapa, Ph.D.
Děkan fakulty

V Brně, dne 31.05.2013

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce bude výroba prototypu předního dílu upínacího systému horolezecké mačky. V práci bude proveden návrh a konstrukce nového prototypového dílu s využitím parametrické aplikace SolidWorks. Pro výrobu prototypu předního dílu mačky bude využita aditivní metoda Fused Deposition Modeling – 3D tiskárna uPrint. Součástí práce bude výroba silikonové formy předního dílu mačky pomocí vakuového lícího systému. Silikonová forma bude sloužit pro odlití určitého počtu dílů z komerčně dostupných materiálů. Práce bude ukončena technicko-ekonomickým zhodnocením výroby předního dílu mačky s doporučením a rozбором nejvhodnější ekonomické varianty řešení.

Abstract

The aim this bachelor thesis is a production of prototype front part fastening system mountaineering crampons. In this work will be carried out the design and construction of a new prototype parts using the parametric application SolidWorks. For prototype production front part crampons will be used additive method Fused Deposition Modeling - uPrint 3D printer. Part of the work will be production of silicone moulds front part crampons using vacuum casting system. Silicone mould will be used for casting of a certain number parts from commercially available materials. The work will be finished with technical and economic evaluation of production front part crampons with recommendations and the best economic analysis of alternatives.

Klíčová slova

CAD, Rapid Prototyping, Fused Deposition Modeling, silikonová forma, odlévání, polyuretanový elastomer, horolezecká mačka.

Key Words

CAD, Rapid Prototyping, Fused Deposition Modeling, silicone mould, casting, polyurethane elastomer, mountaineering crampon.

Bibliografická citace:

SAMOHÝL, L. *Aplikace moderních technologií pro výrobu předního dílu upínacího systému horolezecké mačky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta podnikatelská, 2013. 60 s., 3 přílohy. Vedoucí bakalářské práce Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že předložená bakalářská práce je původní a zpracoval jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem ve své práci neporušil autorská práva (ve smyslu Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

V Brně dne 31. května 2013

.....

Lukáš Samohýl

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Josefu Sedlákoví, Ph.D., za jeho ochotu, cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce. Dále děkuji Ing. Martinovi Macků, Ing. Břetislavu Homolkovi, Ing. Martinu Horákovi a Ing. Jiřímu Hrdinovi za pomoc s praktickou částí práce. Také bych chtěl poděkovat svým rodičům za podporu a umožnění studia na vysoké škole.

OBSAH

Úvod.....	10
1 Vymezení problému a cíle práce	11
2 Teoretická východiska práce	15
2.1 Solidworks.....	15
2.1.1 Princip vytváření dílů.....	15
2.2 Rapid Prototyping	15
2.2.1 Vymezení pojmu.....	15
2.2.2 Základní fáze vzniku fyzického modelu.....	16
2.2.3 Technologie RP.....	18
2.3 Vakuové odlévání.....	21
2.3.1 Princip vakuového lití.....	22
2.3.2 Materiály pro lití	22
3 Analýza problému a současné situace	25
3.1 Návrh 3D modelu.....	25
3.1.1 Postup tvorby 3D modelu	25
3.2 Tisk master modelu	27
3.3 Příprava master modelu pro vytvoření formy	29
3.4 Tvorba silikonové formy.....	31
3.4.1 Prostředky pro tvorbu silikonové formy.....	31
3.4.2 Postup tvorby silikonové formy.....	32
3.5 Odlévání nové součástky.....	35
3.6 Výběr vhodného materiálu	38
3.7 Návrh nové silikonové formy.....	39
3.7.1 Prostředky pro tvorbu nové silikonové formy	39
3.7.2 Postup tvorby nové silikonové formy.....	39

3.7.3	Zkušební odlití funkčního prototypu	43
3.7.4	Testování funkčních vlastností prototypu	43
4	Ekonomicko-technické zhodnocení	44
4.1	Náklady na tvorbu funkčního prototypu metodou silikonové formy	44
4.1.1	Náklady na výrobu silikonové formy za běžných podmínek	46
4.2	Náklady na tvorbu funkčního prototypu metodou Polyjet Matrix	47
4.3	Porovnání nákladů mezi jednotlivými metodami výroby	48
4.3.1	Výroba 1 ks prototypového dílu	48
4.3.2	Výroba 20 ks prototypových dílů	50
	Závěr	52
	Seznam použitých zdrojů	54
	Seznam použitých zkratk a symbolů	56
	Seznam obrázků a grafů	57
	Seznam tabulek	59
	Seznam příloh	60

ÚVOD

Rapid Prototyping patří do kategorie moderních technologií, jež se začala rozvíjet koncem osmdesátých let 20. století. Rapid Prototyping doslova znamená „*rychlé vyrábění prototypů*“ (Translate.google, ©2012). Díky rychlému vyrábění prototypů vznikla možnost výrazně snížit čas a náklady na výrobu prototypového dílu. Na prototypovém dílu je možno ověřit především tvar a ergonomii, což výrazně snižuje dobu přípravy pro sériovou výrobu a následné uvedení produktu na trh.

V dnešní době, kdy plasty pronikají téměř do všech výrobních sfér, se stává funkční prototyp plastového výrobku stěžejním faktorem vývoje produktu. Vývoj Rapid Prototyping byl umožněn především strmým vývojem informačních a výpočetních technologií. V dnešní době je Rapid Prototyping velmi používán např. v automobilovém průmyslu, leteckém průmyslu, spotřebním průmyslu, strojírenství, lékařství apod. Na prototypu lze odhalit chybu dříve, než se začne vyrábět série výrobků s nízkou jakostí. Největší předností Rapid Prototyping je téměř neomezená možnost vývoje funkčních prototypových součástí.

Tvorba funkčního prototypu prochází třemi fázemi. V první fázi, buď za pomoci 3D scanneru nebo CAD softwaru, dojde ke vzniku digitálního modelu. Ve druhé fázi vzniká fyzická podoba prototypové součásti a ve třetí fázi se provádí povrchové úpravy fyzického modelu zvaného master model. Master model je dále možno použít jako vzor pro tvorbu forem, které bývají tvořeny ze silikonových kaučuků. Po vytvoření formy následuje odlití libovolného množství modelů z materiálů s požadovanými vlastnostmi.

Tato práce je zaměřena právě na aplikaci těchto moderních technologií pro konstrukci prototypové části horolezecké mačky.

1 VYMEZENÍ PROBLÉMU A CÍLE PRÁCE

„Mačky, nebo-li stoupací železa, tvoří společně s cepínem tvoří základní výbavu do zimního horského terénu, na ledovce, ale i pro náročné výstupy kolmými ledy nebo mixy.“ (Frank a Kublák, 2007, str. 113).

Přes více než stoletý vývoj moderní horolezecké mačky, kdy u prvních modelů neexistoval lepší upínací systém než kožené řemínky, které se při navlhnutí povolovaly a mačka tím pádem sklouzávala z boty, první modely desetihrotých maček s horizontálními hroty, vynález dvanáctihrotých maček z chrom-molybdenové oceli, maček s vertikálními hroty pro lezení extrémních ledopádů se technologický vývoj dopracoval po mačky plně nastavitelné, co se týče počtu hrotů, typu upínání a velikosti pro maximální uživatelský komfort (Lanex, ©2012-2013; About.com, ©2013).

Cílem této bakalářské práce je výroba prototypu předního dílu upínacího systému horolezecké mačky, viz obr. 1.1. Konkrétně se jedná o plastový prototypový díl pro dva modely stoupacích želez.



Obr. 1.1: Přední díl upínání.

(Zdroj: Autor práce, 2013)

První model je s univerzálními plastovými úchyty pro upínání boty viz obr. 1.2. Pro tento typ maček lze použít jakákoliv obuv. Mačky jsou určeny především pro turistiku

ve sněhovém a lehkém ledovém terénu. Díky pohyblivému kloubu jsou pohodlné při chůzi a dochází k nižšímu nabalování sněhu ze spodní části mačky (nabalování sněhu na mačku může velmi ohrozit uživatele, pokud se pod mačkou nashromáždí hodně sněhu, dojde k neúčinnosti hrotů). Mačka se dotahuje nylonovým řemínkem, který se protáhne oky v přední a zadní části mačky. Nevýhoda tohoto upnutí je kompromis mezi dotažením řemínku a tlakem, kterým řemínek stahuje nohu. Při moc velkém sevření boty dochází k odkrvení nohy, což může zapříčinit omrzliny. Další nevýhodou je pomalejší nasazování a obtížné sundávání, pokud řemínky zamrznou. Tento typ mačky se vyrábí v několika modifikacích, od ultralehké skialpinistické mačky po robustní turistickou mačku vhodnou pro neobtížné ledové a mixové (skála a led) terény (Pohora.cz, 2011; Lanex, ©2012-2013; About.com, ©2013).



Obr. 1.2: Univerzální upínání mačky.

(Zdroj: Lanex, ©2012-2013)

Druhým modelem jsou mačky s plastovým úchytem špičky a rychloupínací patou viz obr. 1.3. Konstrukčně se neliší od mačky s univerzálním upínáním, liší se pouze druhem obuvi, na kterou je lze připnout. Obuv musí být opatřena plastovou drážkou na patě, do které se pákou patka zapne a zatlačí tím do přední plastové části upínání. Řemínek je protažen drážkou na rychloupínací patě a předním okem. Slouží především jako

pomocný prvek, který stabilizuje botu na mačce a zabraňuje rozepnutí paty. Nejedná se o tak pevné připnutí, jako u třetího typu upínání (upínání s kovovou hrazdičkou a rychloupínací patou) k jehož výrobě není vyráběná prototypová část vhodná (Pohora.cz, 2011; Lanex, ©2012-2013; About.com, ©2013).



Obr. 1.3: Upínání mačky, plastový úchyt špice a rychloupínací pata.

(Zdroj: Lanex, ©2012-2013)

Třetí druh upínání disponuje místo plastového předního oka kovovou hrazdičkou viz obr. 1.4. Pro upínání na tento typ musí bota mít uzpůsobenou špičku i patu (upínání funguje na podobném systému jako skialpinistické vázání Silvretta), (Pohora.cz, 2011).



Obr. 1.4: Upínání mačky, kovová hrazdička a rychloupínací pata.

(Zdroj: Lanex, ©2012-2013)

Prototypový díl bude vyroben pomocí moderní technologie Rapid Prototyping (RP), konkrétně metou Fused Deposition Modeling (FDM).

Nejprve bude v digitální podobě navrhnut a následně vyroben 3D plastový model, který poslouží jako master model pro výrobu silikonové formy, k jejíž výrobě bude použita vakuová lící komora. Do silikonové formy bude následně provedeno zkušební odlití dvousložkové polyuretanové lící hmoty s vysokou tekutostí, pro otestování funkčnosti formy. Bude-li forma funkční, bude do ní odlita polyuretanová hmota, jejíž vlastnosti, na rozdíl od master modelu, budou podobné pryži. Nejdůležitější požadovanou vlastností je pružnost, aby se dal prototyp ohnout, připevnit na rám mačky a následně do mačky připnout botu. Účelem je otestování vhodnosti rozměrů modelu a vzhledu. Odlitek není určen k běžnému používání mačky.

2 TEORETICKÁ VÝCHODISKA PRÁCE

2.1 SOLIDWORKS

SolidWorks® je softwarové vybavení pro automatizaci strojírenského designu, které využívá známé grafické uživatelské rozhraní Microsoft® Windows®. Tento jednoduše ovladatelný nástroj umožňuje strojírenským inženýrům rychlé skicování nápadů, experimentování s prvky a kótami i tvorbu modelů a podrobných výkresů (Dassault Systemes, ©1995-2013).

2.1.1 Princip vytváření dílů

Nejprve je nutno vytvořit v rovině náčrtek, kterému se říká Skica. Tento náčrtek musí být určený buď kótami, nebo vzájemnými vztahy jednotlivých objektů skici (např. rovnoběžností úseček, soustředností kružnic, apod.) a musí být tvořen uzavřenou křivkou. Ze skici se vytvoří základní díl (hrubý model součástky) jedním ze dvou způsobů, buď vytažením skici směrem od povrchu do požadované výšky, nebo rotací skici kolem osy. Základní díl je možno dále upravovat tak, že se k němu budou přidávat či odebírat další části vytvářením výstupků, prohlubní, dutin nebo kopií těla. Díly lze také upravovat zaoblováním či zkosením (Pšenčíková, 2005).

2.2 RAPID PROTOTYPING

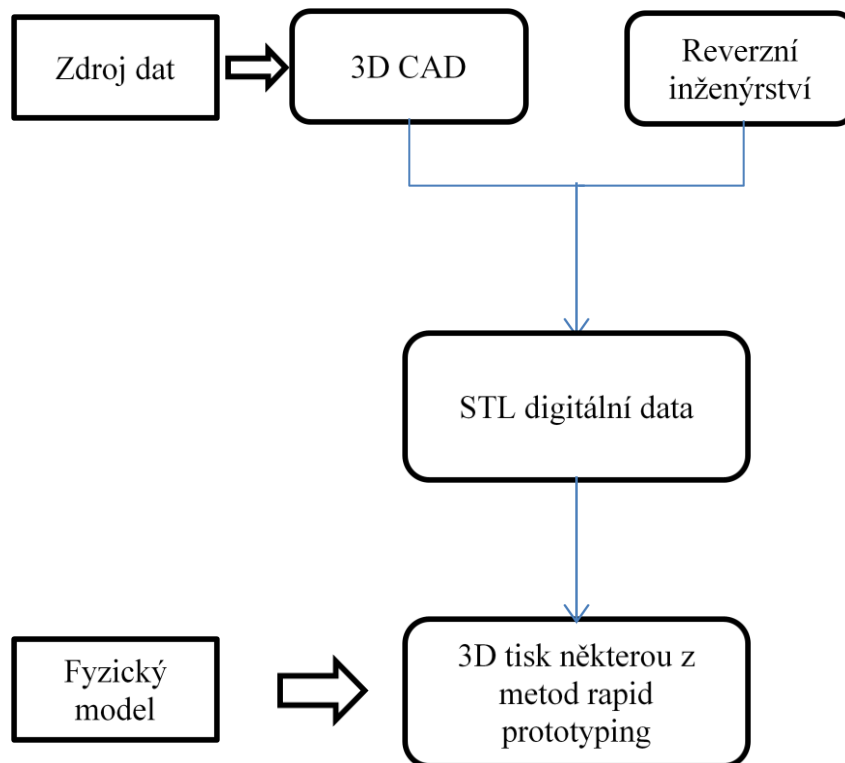
2.2.1 Vymezení pojmu

Dle Sedláka (2009, str. 200) je Rapid Prototyping „*opakované nanášení materiálu po vrstvách konstantní tloušťky*“. Z dat, která máme k dispozici z konstrukčního CAD programu, dochází pomocí RP k rychlému a přesnému vytvoření prototypové součásti, která je dle typu použité technologie tvořena z pryskyřice, termoplastu, vosku nebo kovového prášku. Na základě výsledného použití modelu je nutno zvolit vhodnou metodu 3D tisku pomocí metody RP. Díky metodě RP je možno výrazně zkrátit etapu vývoje, což příznivě ovlivňuje konkurenceschopnost výrobku na trhu (Sedlák, 2009).

V posledních letech se ve strojírenské praxi oblasti 3D modelování a 3D digitalizace dostává velké pozornosti, díky její nenáročnosti, rychlosti, efektivnosti a nízké ceně umožňuje rychlou výrobu velmi složitých prototypových součástí (Sedlák, 2009).

2.2.2 Základní fáze vzniku fyzického modelu

V diagramu na Obr. 2.1 je zobrazen průběh tvorby fyzického modelu. Zdroj dat se může získat vymodelováním v libovolném CAD softwaru (SolidWorks, Autodesk Inventor, Catia, atd.) nebo může být získán některou z metod reverzního inženýrství (Roupec, 2006).



Obr. 2.1: Průběh tvorby fyzického modelu.

(Upraveno dle: Roupec, 2006)

Reverzní inženýrství je proces, kterým je možno získat z fyzického modelu kopii v 3D digitální podobě, která se následně upraví do podoby trojúhelníkové sítě polygonů. Po přípravných operacích následuje výroba fyzického modelu pomocí komerčně dostupných metod rapid prototyping (Sedlák, 2009).

Preprocessing

Etapa preprocessingu zahrnuje všechny procesy, které je třeba zajistit před samotným výrobním procesem. Souvisí tedy s přípravou dat pro systémy RP, např. transformace dat ze systému CAD do formátu STL, kde je nahrazován geometrický tvar souborem rovinných plošek. U geometrických tvarů, které nemají nanesené vrstvy materiálu samonosné, je nutná tvorba podpůrné konstrukce vrstev, které zabezpečují, aby se model nezhroutil. Tyto podpůrné konstrukce nejsou nutné u všech metod RP (Ševčíková, 2011).

V etapě preprocessingu je také nutno vygenerovat horizontální řezy STL dat modelu a případných podpor, které umožňují definovat 2D obrysovou geometrii, která je základním vstupem pro systémy RP (Ševčíková 2011).

Processing

Processing zahrnuje vlastní výrobu modelu dostupnými metodami RP. Základní metody dle použitého materiálu na tvorbu modelu se podle Sedláka (2009) dělí na metody:

- Na bázi fotopolymerů.
- Na bázi práškových materiálů.
- Na bázi tuhých materiálů.

Postprocessing

Dle Roupce (2006) postprocessing, neboli dokončovací práce, obsahuje několik procesů, jejichž užití se liší na základě použité výrobní technologie:

- Základním procesem je odstranění podpůrného materiálu, který je přidáván při stavbě modelu, aby bylo možné stavět tvarově složité části. Podpory se odstraňují mechanicky (metody SLA, LOM, FDM) nebo chemicky (metoda FDM). Chemické odstranění podpor používané u technologie FDM probíhá vyplavením v zásaditém roztoku.
- Čištění je potřebné především u modelů vyráběných z prášků (LS).
- Vytvrzování modelu, jedná se o pomalý a zdlouhavý proces.

- Úprava povrchu je potřebná u většiny prototypů sloužících pro ověření vzhledu. Existuje několik postupů pro povrchové úpravy:
 1. Tmelení – nanášení tenké vrstvy polyuretanového tmelu a jeho následné odebírání brusným papírem.
 2. Leptání – u FDM je možno nástřikem speciálního rozpouštědla natavit tzv. schodky zapříčiněné vertikálním posunem stavěcí platformy.
 3. Broušení – pokud není vyžadována velká přesnost modelu, je možno vyrobit model větší, zaformovat ho a odlitek vybrousit.

Postprocessing je neoddělitelná součást výroby prototypu, která může významně ovlivnit výslednou cenu a čas výroby.

2.2.3 Technologie RP

Základní přehled komerčně dostupných technologií RP viz tab. 2.1.

Tabulka 2.1: Nejpoužívanější technologie Rapid Prototyping.

Základní technologie Rapid Prototyping	Zkratka	Materiál modelu
Stereolitografie	SLA,SL	Fotopolymer
Solid Ground Cutting	SGC	Fotopolymer, nylon
Selective Laser Sintering	SLS	Polyamid, nylon, vosk, kovové prášky
Direct Metal Laser Sintering	DMLS	Kovové prášky
Laminated Object Manufacturing	LOM	Papír s jednostranným pojivem
Fused Deposition Modeling	FDM	ABS, vosk, polykarbonat
Multi Jet Modeling	MDM	Termopolymer, akrylátový fotopolymer
Polyjet Matrix Printing	PLM	Akrylátový fotopolymer

(Zdroj: Sedlák, 2009)

Fused Deposition Modeling – FDM

Metoda FDM byla patentována Scottem Crumpem v roce 1989, patentu předcházelo založení společnosti Stratasys, Inc., kterou založil Scott Crump společně s manželkou Lisou Crump v roce 1988 (Stratasys, Inc. History, 2005). Dle Sedláka (2009, str. 211) „*Princip metody FDM spočívá v natavování termoplastického materiálu navinutého ve formě drátu na cívce, ze které je vtlačován do vyhřívané trysky pomocí kladek a následně nanášen po jednotlivých vrstvách na podložku. Součásti jsou vyráběny z ABS nebo ABS+ plastu, polykarbonátu, elastomeru, vosku, atd. Metoda vyžaduje stavbu podpor, které se po vyrobení součásti mechanicky nebo chemicky odstraní. Metoda nevyžaduje žádné speciální provozní podmínky, je poměrně nehlučná a materiály se kterými pracuje, jsou netoxické.*“

Nejprve je nutný import dat ve formátu *.stl. do softwaru CatalystEX, jež byl vyvinut společností Stratasys pro komunikaci s 3D tiskárnami. CatalystEX umožňuje snadné a rychlé otevření souborů s 3D návrhy, jejich editaci a přípravu pro tisk. Následně po parametrizaci modelu, je možno zadat příkaz k tisku (Sandback Technical Design Inc., ©2012).

Materiál pro tisk je vkládán do tiskárny ve dvou kazetách, v nichž je smotán ve formě cívky. Jedna kazeta obsahuje modelovací materiál a druhá podpurný materiál. Při tisku je v extruzivní trysce střídavě ohříván stavební materiál a materiál podpor na teplotu o 1°C vyšší, než je jeho teplota tavení. Při styku nataveného materiálu s povrchem dochází ke spojování vrstev, k jeho ochlazení okolním vzduchem a následnému tuhnutí. Extruzivní tryska se nejdříve pohybuje v osách X a Y, po dokončení vrstvy se posune o tloušťku vrstvy v ose Z směrem nahoru a dojde k tisku další vrstvy. Po ukončení tisku je součást i s podložkou vyjmuta z pracovního prostoru tiskárny. Následně je nutno odstranit materiál podpor mechanickou nebo chemickou cestou (Sedlák, 2009).

Prototypové součásti vyrobené touto metodou se používají při testování funkčnosti a designu nových případně inovovaných výrobků. Vzhledem k pevnosti používaných materiálů lze tyto modely vystavit zatížení, které odpovídají realitě (Sedlák, 2009, str. 211).

Polyjet Matrix Printing - PLM

Metoda PLM nanáší velmi slabé vrstvy akrylátových fotopolymerů 16 či 30 μm (Sandback Technical Desing, ©2012). Stavební materiál je v tekuté formě vytlačován tryskami do tiskové komory, kde dochází k vytvrzení UV zářením. Současně se stavebním materiálem je v jednotlivých vrstvách nanášen materiál podpor, je-li to pro tisk prototypu nutné. Pro stavbu podpor je používán rozpustný materiál, což umožňuje tisk velmi komplikovaných modelů. Díky velmi slabým vrstvám umožňuje tato technologie naprosto přesný tisk. Největší výhodou této technologie je tzv. dvoukomponentní tisk, jež umožňuje tisk dvou různých materiálů v jednom tiskovém procesu. Výsledkem tohoto procesu může být produkt, který je tvrdý a pevný, ale zároveň i pružný, svými vlastnosti se podobá pryži. Tiskové zařízení nevyžaduje nadstandardní bezpečnostní podmínky, materiály se kterými pracuje, jsou netoxické (Katedra výrobních systémů, FS TUL, © 2011).

2.3 VAKUOVÉ ODLÉVÁNÍ

Tato metoda patří mezi technologie RP. Jedná se o moderní technologii pro výrobu silikonových forem a prototypových dílů. Vakuové lití umožňuje výrobu tvarově velmi složitých, tenkostěnných modelů při přesném dodržení rozměrů master modelu, za nízkou cenu v porovnání se vstřikováním plastů (MCAE Systems s.r.o., 2013). Vakuové lití slouží k výrobě malých sérií prototypových dílů z polyamidových nebo polyuretanových materiálů, které se svými vlastnostmi velmi podobají materiálům sériových dílů. Lití se většinou provádí do silikonových forem vyrobených ze silikonových kaučuků, které se snadno zpracovávají a vytvrzují. Z praktického hlediska je důležitá zejména jejich pružnost, díky ní se z formy snadno uvolňují i komplikované odlitky. Další pozitivní vlastností je průsvitný vzhled, který umožňuje přesné rozříznutí formy dle označených dělicích rovin na master modelu. Silikony mají velice nízké smrštění, dobrou rozměrovou stabilitu, jsou velmi houževnaté a mají středně vysokou tvrdost. Formy ze silikonových kaučuků lze použít pro odlévací hmoty na bázi polyuretanů, epoxidů, polyesterů a silikonů. Dále se do těchto materiálů mohou odlévat i nízkotavitelné slitiny, sádra, keramika, atd. Silikon je dvousložkový materiál složený ze základní složky, která se po promíchání s vytvrzovací složkou vytvrdí při pokojové teplotě adiční reakcí. Proces vytvrzení lze urychlit temperováním nebo urychlovači (Roupec, 2006).

Při tvorbě silikonové formy bez vakuování může vzniknout problém se vzduchovými bublinami, které silikon obsahuje. Tento faktor má negativní vliv na kvalitu povrchu silikonové formy a při odlévání tenkostěnných odlitků může dojít i ke zhroucení stěny formy nebo ke vzniku nekvalitního odlitku. Na trhu se vyskytuje velká nabídka různých druhů silikonů, které se od sebe mohou odlišovat materiálovými charakteristikami (viskozita, tvrdost, pevnost v tahu, smrštitelnost, doba zpracovatelnosti), (Roupec, 2006).

2.3.1 Princip vakuového lití

- V první fázi je vyroben tzv. master model, k jehož výrobě používáme metodu FDM nebo již hotový díl, který chceme duplikovat.
- Povrch master modelu musí být náležitě upraven.
- Master model je nutno potřít separátorem, vhodně umístit do formy (např. ze skla nebo z plastu) a zafixovat ho pomocí modelíny nebo drátků, dále je nutné vytvoření vtokové soustavy (např. přilepením modelíny do místa, které je vhodné pro vtokovou soustavu).
- Zalití master modelu vyvakuovaným silikonem a opětovné vakuování zalitého modelu.
- Po ztuhnutí se jednodílná forma rozřízne, dojde tak ke zvýraznění dělicí roviny. Vyjmutím modelu je forma hotová. U dvojdílné formy je nutné udělat druhou část formy stejným způsobem.
- Do formy jsou odlévány materiály dle požadovaných vlastností. Materiály jsou odlévány buď za běžných pokojových podmínek, nebo ve vakuové lici komoře. Pro lití ve vakuu bývá použit speciální dvousložkový materiál (Roupec, 2006).

2.3.2 Materiály pro lití

Pro vakuové odlévání do silikonových forem jsou nejčastěji používány polyuretanové pryskyřice, jejichž materiálové vlastnosti se velmi podobají plastům, viz tab. 2.2. Podobnost materiálových vlastností plastu a pryskyřice záleží na typu použité pryskyřice a na množství vytvrzovacího činidla (Roupec, 2006).

Tabulka 2.2: Nejčastěji napodobované plasty.

PE (polyethylen)	Hračky, mikrotenové sáčky, elektrotechnická instalace
ABS (akrylonitrilbutadienstyren)	Spotřební průmysl
PP (polypropylen)	Textilní průmysl, obalový průmysl
PS (polystyren)	Izolace, spotřební průmysl
PA (polyamid)	Textilní průmysl
PMMA (polymethylmetakrylát)	Plexisklo
PC (polykarbonát)	Stavebnictví
POM (polyoxymethylen)	Strojírenství (vodící kroužky, pouzdra, atd.)
PEEK (polyetereterketon)	Strojírenství (tyče, trubky, ozubená kola, atd.)

Zdroj: (Roupec, 2006, str. 25)

Při výrobě plastových součástí často dochází ke kombinaci kladných vlastností různých druhů plastů pro dosažení požadovaných mechanických vlastností. Např. pro zvýšení tepelné odolnosti, rázové houževnatosti pevnosti v tahu a v ohybu a dalších vlastností (Roupec, 2006).

Polyuretanové pryskyřice jsou dvousložkové materiály skládající se ze základní složky, která se míchá s vytvrzovacím činidlem. Mísení probíhá nejčastěji v těchto poměrech: 100/100, 100/80, 100/60, 100/50, 100/40, atd. Po důkladném promíchání obou složek je doba zpracovatelnosti od 3 do 8 minut. Pro snížení viskozity, a tím zlepšení zabíhavosti materiálu do formy, lze licí materiál předeheat, tím ovšem dojde k podstatnému zkrácení doby zpracovatelnosti. Materiál s nízkou viskozitou není potřeba zahřívat, protože snadno zatéká do formy. Viskozita polyuretanových pryskyřic je velmi odlišná. Od pryskyřic s nízkou viskozitou (100 mPa.s), po pryskyřice s vyšší viskozitou (okolo 1300 mPa.s). Doba vytvrzení se obvykle pohybuje od 25 do 120 minut při teplotě temperování 70°C. Modul pružnosti se pohybuje v rozmezí hodnot od 500 do 4500 MPa. Hustota pryskyřic se pohybuje od 1,06 do 1,22 g/cm³ (ACR Czech, 2011). Tvrdost plastových materiálů se obvykle měří zkouškou tvrdosti podle Shorea, jež se řadí mezi dynamicko-elastické zkoušky. Jedná se o zkoušku odrazem, kdy se zjišťuje výška odskoku zkušební tělesa od měřené plochy. Touto metodou se zjišťuje tvrdost z velikosti odskoku závaží (kulička, diamantový hrot) spuštěného z určité výše na testovaný materiál. Působením závaží dojde k plastické deformaci a k částečnému pohlcení části energie závaží, které se těmito vlivy neodrazí do původní výšky (Bureš, 2002). Hodnota tvrdosti se spočítá jako poměr výšky odskoku a počáteční výšky zkušební tělesa. Výsledek se vyjadřuje v procentech. Čím je zkoušený materiál tvrdší, tím méně kinetické energie zkušební tělesa je přeměněno na elastickou energii zkoušeného materiálu. Zkušební těleso odskočí do větší výšky. Pro tvrdší plasty je používána stupnice Shore D, pro pryže Shore A. Tvrdost polyuretanových pryskyřic se obvykle pohybuje v rozmezí 74 až 85 Shore D (Roupec, 2006). Stupnice tvrdosti Shore viz Příloha č. 2.

Polymerizace

Polymerizace je chemická reakce, kterou z monomeru (malá molekula) nebo směsi monomerů vzniká polymer (vysokomolekulární látka), (Kučera, ©2005-2006).

Polyuretany

Veliká šíře potenciálních kombinací výchozích surovin a možnost selektivní katalýzy jednotlivých reakcí, které při syntéze polyuretanů nastávají, dovolují připravit velké množství různých typů polyuretanů. Je možno připravit měkké i tuhé pěnové materiály, elastomery, vlákna, filmy, nátěrové hmoty, polyuretanové licí pryskyřice, adheziva a další. Měkké pěny jsou používány např. v nábytkářském a automobilovém průmyslu (polštářování), pro laminování textilu nebo jako těsnicí pásy. Většina tuhých pěn je používána k izolačním účelům. Z tzv. integrálních pěn (pórovité jádro a nepórovitá kůra) jsou vyráběny např. tvarované podrážky bot nebo součásti automobilů. Polyuretanové elastomery se používají ve výrobě těsnění, pohonných řemenů, podešví, případně celých lyžařských bot. Pro podlahoviny, povrchy sportovních drah nebo povrchy startovacích drah letadel se mohou použít polyuretanové licí pryskyřice (Prokopová, 2007).

Elastomery

Dle Ducháčka (1997, str. 23) je „*Elastomer makromolekulární látka, která se po podstatné deformaci malým napětím a uvolněním tohoto napětí při pokojové teplotě rychle vrací k přibližně k původním rozměrům a tvaru.*“

3 ANALÝZA PROBLÉMU A SOUČASNÉ SITUACE

3.1 NÁVRH 3D MODELU

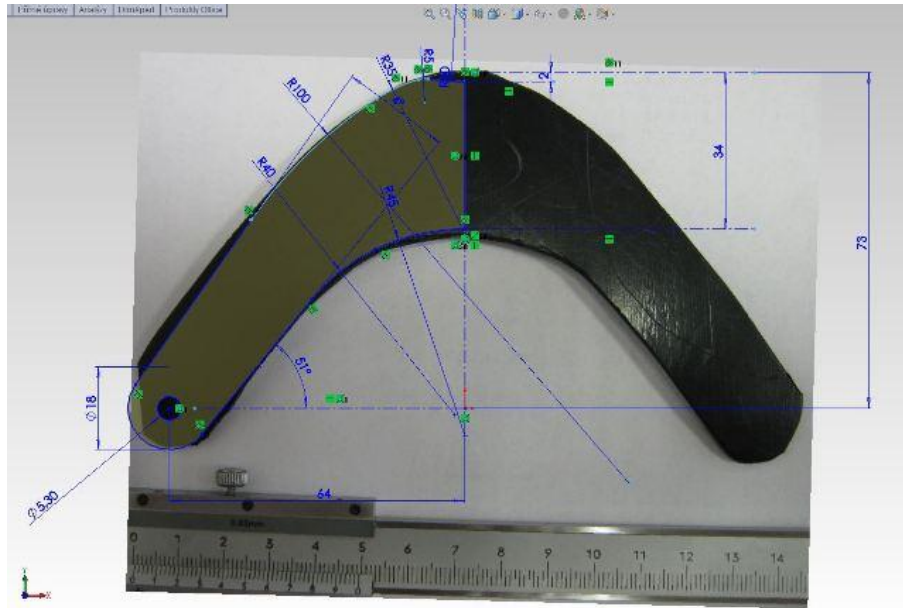
Návrh 3D modelu byl proveden v parametrické aplikaci SolidWorks ve spolupráci se společností Lanex a.s.

Podnětem pro tvorbu 3D modelu byl vývoj nových modelů horolezecké mačky se systémem upínání na univerzální plastové úchyty a na plastový úchyt s rychloupínací patou.

Návrh prototypové součásti byl vytvořen na základě předchozího fyzického modelu, který byl zastaralý, a bylo ho třeba inovovat. Byl vytvořen vzhledově jednoduchý prvek, ve kterém bylo třeba vycházet z rozměrů špice horolezecké mačky a obvodu půlkružnice, která objímá botu. Dalším kritériem byla možnost jednoduchého provlečení řemínku páskem.

3.1.1 Postup tvorby 3D modelu

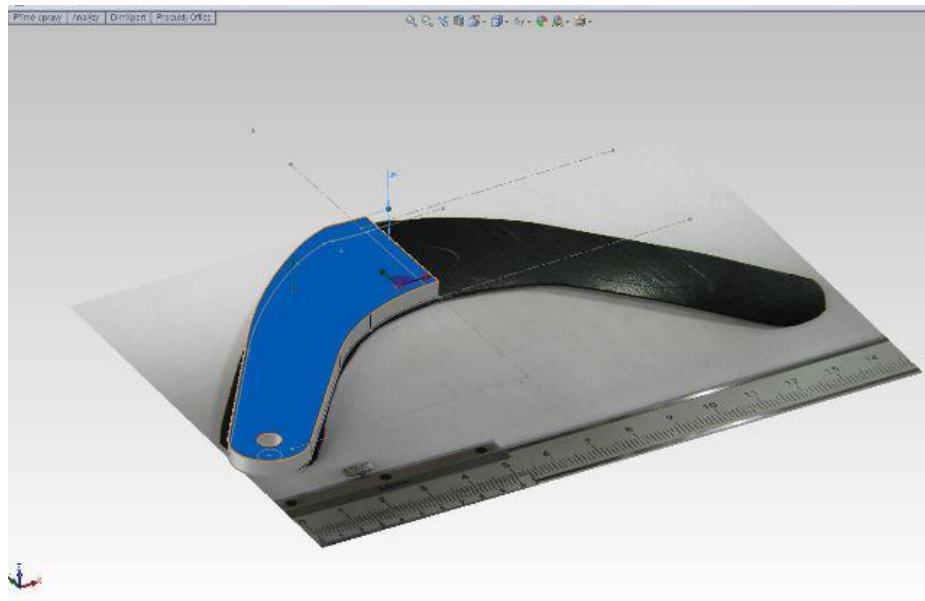
V první fázi byla nejprve vytvořena skica jedné poloviny modelu na základě vystřiženého obrysu, který měl požadované rozměry (obrys byl vložen jako obrázek). Skica byla následně okótována, viz obr. 3.1.



Obr. 3.1: Okótovaná skica.

(Dassault Systèmes SolidWorks, ©2013)

Ze skici byl následně vytvořen základní díl (hrubý model součástky) vytažením skici směrem od povrchu do požadované výšky viz obr. 3.2 (modře vyznačen).

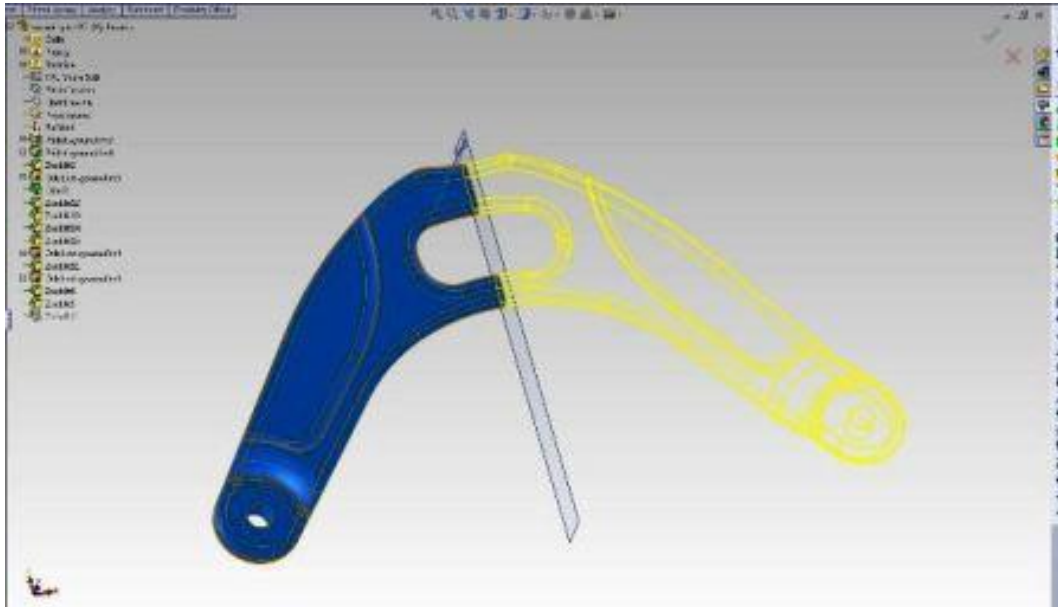


Obr. 3.2: Základní díl.

(Dassault Systèmes SolidWorks, ©2013)

Základní díl byl následně upravován tak, že se odebíraly a přidávaly části vytvářením výstupků, prohlubní a děr, další úpravy byly provedeny především příkazem zaoblit, viz příloha č. 1.

Na závěr byla polovina modelu zrcadlena, čímž vznikl kompletní model, viz obr. 3.3.



Obr. 3.3: Zrcadlení.

(Dassault Systèmes SolidWorks, ©2013)

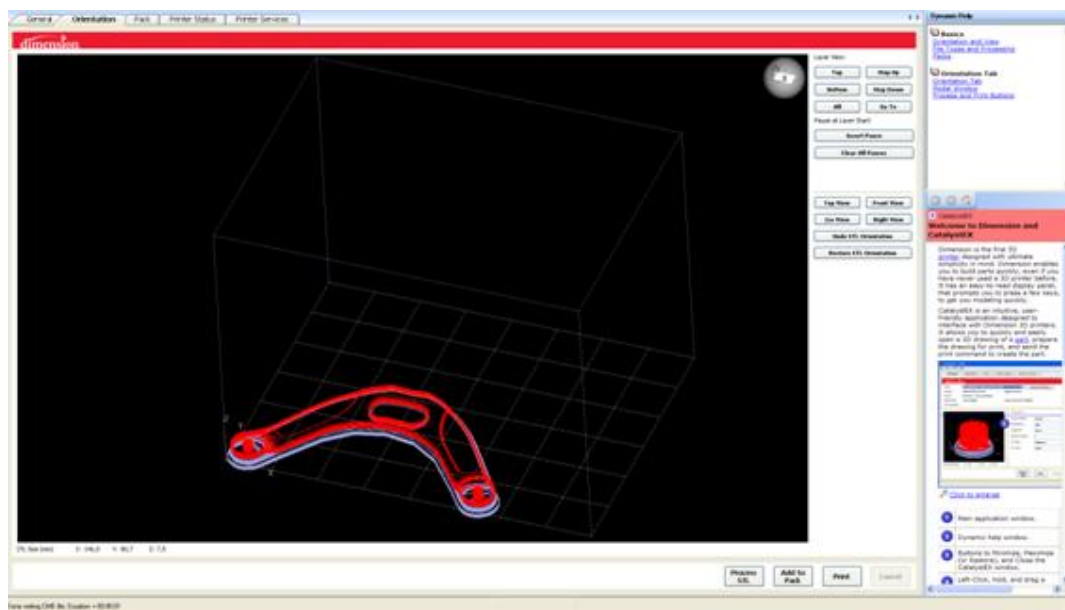
3.2 TISK MASTER MODELU

Před tiskem byl model převeden do trojúhelníkové sítě polygonů formátu *.stl. Následně byla provedena parametrizace v softwaru MiniMagics. V tomto softwaru došlo ke kontrole dat, zda-li je model správně vytvořen a je způsobilý k tisku. Následně byl 3D model importován do programu CatalystEX, který slouží jako obslužný software pro 3D tiskárnu Dimension uPrint. Tento program je určen především ke snadnému načtení vstupních dat a rychlému nastavení parametrů tisku.

Ihned po načtení vstupních dat potřebných k tisku, umožní program jejich nastavení v podobě několika důležitých náležitostí, jako jsou tloušťka vrstvy (0,254mm), výplň modelu (Solid), typ podpor (Sparse), počet kopií (1 ks), STL jednotky (palce, mm) a STL měřítko.

Dalším krokem je zvolení orientace modelu v tiskové komoře. Model můžeme libovolně natočit podle osy x, y, z. Orientace modelu byla zvolena tak, aby potřeba podpůrného materiálu byla co nejmenší.

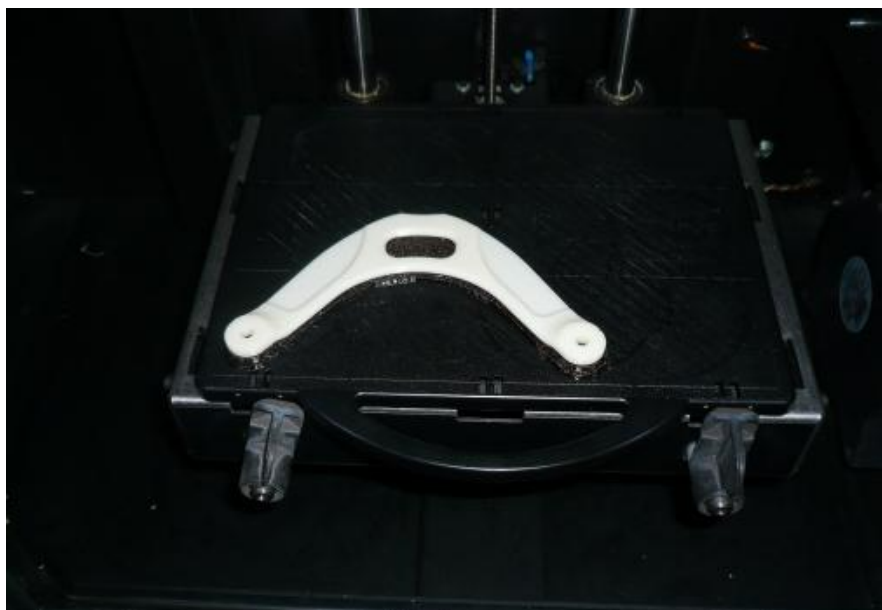
Po zvolení orientace modelu v komoře, následuje rozřezání modelu na jednotlivé vrstvy. Dále se dá nastavit přesná pozice modelu v tiskové komoře. V této fázi jsou zároveň přístupné informace o délce tisku a objemu spotřebovaného materiálu. Vyráběný model potřeboval pro svou konstrukci 10,41 cm³ materiálu.



Obr. 3.4: Umístění modelu v tiskové komoře.

(Zdroj: CatalystEX 4.0.1[®], ©2010)

Další fází je processing, tedy samotný tisk modelu metodou FDM v tiskárně uPrint. Tisk trval cca 51 minut. Teplota v tiskové komoře dosahuje teploty cca 74°C, přičemž teplota extruzivní trysky dosahuje teploty cca 293°C. Pro fixaci modelu k podložce je nejprve vytvořena základna z podpůrného materiálu. Na základnu jsou následně nanášeny vrstvy stavebního materiálu, do té doby, než je model hotov. Na obr. 3.5 je zachycen model v tiskové komoře ihned po dokončení tisku.



Obr. 3.5: Vytisknutý model s podporami v tiskové komoře.

(Zdroj: Autor práce, 2012)

3.3 PŘÍPRAVA MASTER MODELU PRO VYTVOŘENÍ FORMY

Ve fázi postprocessingu je nejprve nutno odstranit z modelu podpurný materiál. Odstranění se provádí nejdříve mechanicky a po té i chemicky namočením modelu do chemické lázně. Chemická lázeň se vytvoří smícháním vody a speciálního prášku Water Works Solube Concentrate P400SC v určitém poměru (42 l vody na 1 kg prášku). Celý proces čištění modelu probíhá při teplotě cca 65°C po dobu cca 2 hodin. Model namočený v chemické lázni je zobrazen na obr. 3.6.



Obr. 3.6: Chemické odstranění materiálu podpor.

(Zdroj: Autor práce, 2012)

Po tisku a odstranění podpor byly na povrchu modelu vidět jednotlivé nanášené vrstvy a dutinky. K jejich zahlazení byl použit nátěrový tmel Motip, který byl nanesen v několika vrstvách, aby při následném broušení jemnozrnným brusným papírem nedošlo k odebrání materiálu modelu, viz obr. 3.7. Broušení se provádí pod vodou. Na základní přebroušení byl použit brousicí papír s hrubostí zrna 600 a na jemné závěrečné broušení brousicí papír s hrubostí zrna 1000. Broušením se zaplní póry modelu tak, že je povrch po této úpravě hladký.



Obr. 3.7: Povrchové úpravy modelu.

(Zdroj: Autor práce; 2012)

3.4 TVORBA SILIKONOVÉ FORMY

3.4.1 Prostředky pro tvorbu silikonové formy

- Master model – vytvořen metodou FDM z *ABSplus* plastu.
- Plastelína – pomocná hmota pro fixaci modelu ve vhodné poloze, vhodná k ucpání otvorů, které nemají být zality silikonem.
- Skleněné destičky – jsou používány pro ohraničení prostoru formy. Celkově se jich použije pět, přičemž jedna je zespodu a čtyři po obvodu.
- Tavná pistol Patex – používá se k tvorbě pomocné formy k upevnění a utěsnění skleněných destiček, náplní pistole jsou tyčinky z termoplastu.
- Vysoce pevný silikonový kaučuk Silastic T-4 a vytvrzující složka Silastic T-4 Curing Agent. Tyto složky se míchají v poměru 10:1 hmotnostních dílů. Doba vytvrzování při 23°C je 12 hodin, tato doba může být urychlena pomocí tepla, fyzikální vlastnosti materiálu viz tab. 3.1.

Tabulka 3.1: Vlastností silikonového kaučuku Silastic T-4.

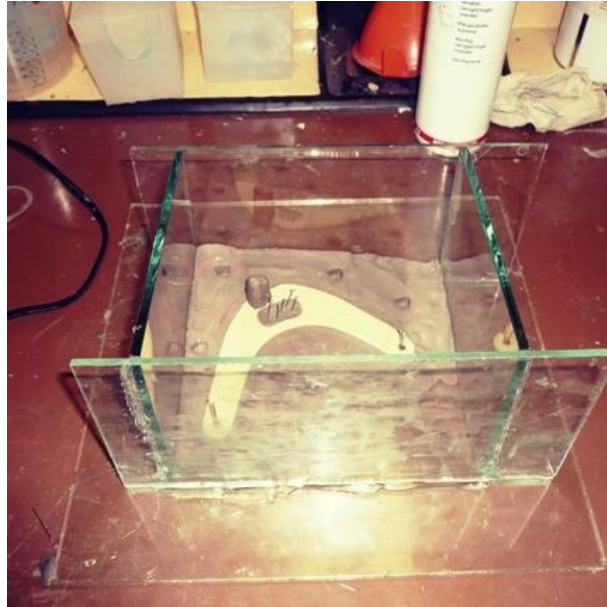
	Typ zkoušky	Jednotka	Hodnota
Tvrдость Shore	DIN 53505	Shore A	cca 40
Pevnost v tahu	EN ISO 527	MPa	6,7
Protažení	EN ISO 527	%	400
Lineární smrštění	Interní pokyny	%	<0,1

(Zdroj: KTK Blansko, ©2007)

- Laboratorní váhy na přesné odměření množství silikonu a tužidla.
- Vakuová licí komora MK Mini – zařízení sloužící pro odstranění vzduchových bublin ze silikonové směsi (bubliny by vytvrdnutí silikonovou formu znehodnotily), viz Příloha č. 3.
- Pomůcky na tvarování plastelíny, míchání silikonu, rozložení pomocné formy ze skel – skalpel, špachtle, 3 nádoby s požadovaným objemem, lžíce.
- Separátor – odmašťuje se s ním povrch master modelu, aby nedošlo k jeho přilepení k silikonu.

3.4.2 Postup tvorby silikonové formy

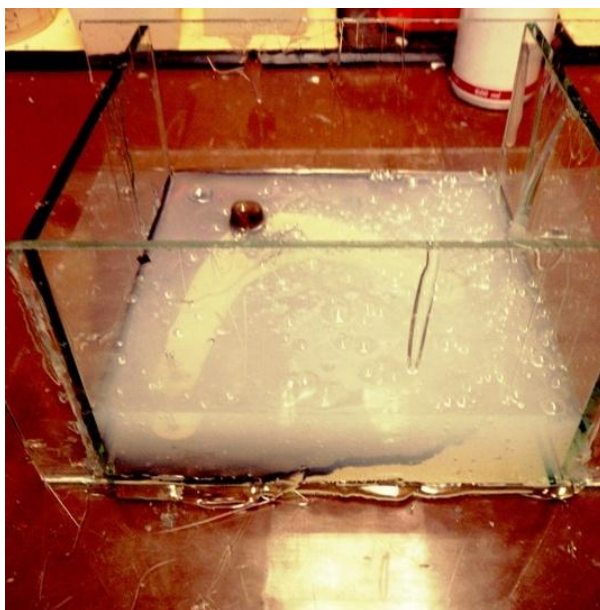
Nejdříve je třeba správně navrhout provedení formy. V tomto případě byla zvolena forma dvoudílná. Dále byla zvolena dělicí rovina tak, aby po nalití materiálu došlo ke vtoku materiálu do všech částí formy a nevznikaly v ní vzduchové bubliny, které by znehodnotily odlitek. Pro model je nutno vytvořit pomocnou formu, která byla vytvořena pomocí sklíčků a tavicí pistole. V dalším kroku byla provedena fixace modelu ve formě pomocí modelíny. Model byl umístěn do modelíny tak, aby poloha dělicí roviny byla dle návrhu, viz obr. 3.8. Následně bylo z modelíny vytvořeno 5 stabilizačních výběžků, které slouží ke správnému spojení obou částí formy, a vtoková soustava. Do otvorů v modelu bylo nutné umístit špendlíky kvůli správnému dosednutí obou částí formy. Model byl potřen separátorem, aby nedošlo k přilepení master modelu k formě.



Obr. 3.8: Fixace master modelu v pomocné formě.

(Zdroj: Autor práce, 2013)

Následně se spočítá množství silikonu, jež je třeba nalít do pomocné formy, aby došlo k úplnému zalití master modelu silikonem. Byl použit silikon Silastic T-4 a vytvrzující složka Silastic T-4 Curing Agent. Míchání silikonu s vytvrzovací složkou se provádí v poměru 10:1. Na zalití první části formy bylo spotřebováno 730g silikonu a 73g vytvrzovací složky. V první fázi bylo na laboratorních vahách ve 3 nádobách namícháno potřebné množství silikonu a vytvrzovací složky. Po smíchání byly nádoby vloženy do vakuové komory, aby byl silikon zbaven vzduchových bublin. Následně byl silikon nalit na master model a ponechán 24hodin vytvrdit, viz obr. 3.9.



Obr. 3.9: První část formy.

(Zdroj: Autor práce, 2012)

Po ztuhnutí byla pomocná forma rozebrána. Proběhlo oddělení silikonu od modelíny a vyjmutí master modelu, následovala tvorba druhé části formy. Model byl vložen do obtisku v první části formy a ze sklíček byla vytvořena pomocná forma. Dle výpočtu bylo třeba použít 450g silikonu a 45g vytvrzovací složky. Na laboratorních vahách bylo do dvou nádob naváženo potřebné množství obou složek. Následovalo promíchání složek v nádobách a vložení do vakuové licí komory. Po té byl master model zalit silikonem a ponechán 24 hodin k vytvrzení. Po vytvrzení byla pomocná forma rozebrána. Silikonová forma byla rozříznuta skalpelem v dělicí rovině, za normálních okolností by mělo dojít k lehkému oddělení obou částí, v tomto případě se tak nestalo, protože dělicí rovina a model nebyly potřeny separátorem. K rozložení formy došlo pomocí skalpelu, rozvíracích kleští a hrubé síly. Druhá část formy byla lehce poškozena, a tak bylo třeba opakovat tvorbu druhé části silikonové formy. Tentokrát byly master model a dělicí rovina potřeny separátorem, aby se silikonové části nespojily k sobě a bylo je možno po ztuhnutí oddělit bez použití hrubé síly. Na druhý pokus se vše podařilo, viz obr. 3.10.



Obr. 3.10: Rozebraná forma.

(Zdroj: Autor práce, 2012)

3.5 ODLÉVÁNÍ NOVÉ SOUČÁSTKY

Po vytvoření formy bylo provedeno testování, zda-li je forma funkční. Nejdůležitějším kritériem byla kontrola správnosti umístění dělicí roviny a vtokové soustavy.

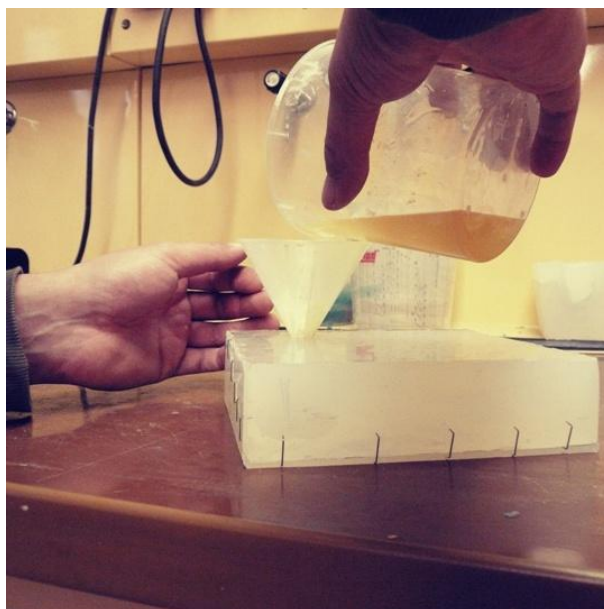
Do formy byla vtokovou soustavou nalita jakostní rychle tvrdnoucí velmi tekutá licí hmota se separátním plnivem Ebalta SG 2000. Vlastnosti materiálu viz tab. 3.2.

Tabulka 3.2: Vlastnosti materiálu Ebalta 2000

Název	Ebalta SG 2000
tvrdost	70-75 Shore D
Hustota směsi	1,1 kg/dm ³
mez pevnosti v tlaku	55-60 MPa
mez pevnosti v tahu	40-45 MPa
Pevnost v ohybu	70-75 MPa
Modul /ohyb/	1300 - 1500 MPa

(Zdroj: KTK Blansko spol. s r.o., 2012)

Nejprve bylo třeba na laboratorních vahách navážít správné množství pryskyřice a tužidla. Komponenty se míchají v poměru 1:1 hmotnostních dílů. Do nádoby bylo naváženo 20g pryskyřice a 20g tužidla, důkladně promícháno a nalito do formy, jejíž části byly předem pevně spojeny kovovými sponami, viz obr 3.11.



Obr. 3.11: Odlévání zkušebního odlitku.

(Zdroj: Autor práce, 2012)

Při prvním odlití ve formě zůstala vzduchová bublina, která znehodnotila vizuální vzhled odlitku. Před druhým odlitím byla forma zmenšena (byly oříznuty nepotřebné části) pomocí skalpelu. Opět proběhlo utěsnění formy. Jak je vidno na obr. 3.12, odlitek byl bez vizuálního defektu, po odstranění přebytečných částí byl identický s master modelem.



Obr. 3.12: Zkušební odlitek.

(Zdroj: Autor práce, 2012)

Forma byla následně ještě zmenšena o přebytečné části. Kvůli redukcím velikosti, které nebyly předem plánované, zbyly na formě pouze 2 stabilizační silikové výběžky viz obr. 3.12.



Obr. 3.12: Zmenšení formy.

(Zdroj: Autor práce, 2012)

3.6 VÝBĚR VHODNÉHO MATERIÁLU

V sériové výrobě se přední část upínání na mačku vyrábí vstřikováním vhodného materiálu do kovové formy. Ke vstřikování je třeba použití drahého stroje.

Při testovacím odlití do formy byl použit vysoce tekutý materiál, který má dobrou zabíhavost. Pro odlití prototypového dílu předního upínání mačky s potřebnými vlastnostmi byl použit polyuretanový elastomer typu TDI s obsahem 7% NCO, který má při zahřátí na teplotu polymerizace medovou konzistenci, tudíž by při odlití do původní formy nedošlo k vyplnění celého vnitřního prostoru, fyzikální vlastnosti materiálu viz tab. 3.3. Bylo tedy nutné vytvořit inovovanou silikonovou formu.

Tabulka 3.3: Fyzikální vlastnosti Polyuretanového elastomeru typu TDI s obsahem 7% NCO.

Název	Polyuretanový elastomer typu TDI s obsahem NCO 7%
Tvrдость	57 - 60 Shore D
Mez pevnosti v tahu	40 MPa
Hustota směsi	1,2 kg/m ³
Modul pružnosti v ohybu	800 MPa
Teplota polymerizace	110°C

(Zdroj: BH Form, 2013)

3.7 NÁVRH NOVÉ SILIKONOVÉ FORMY

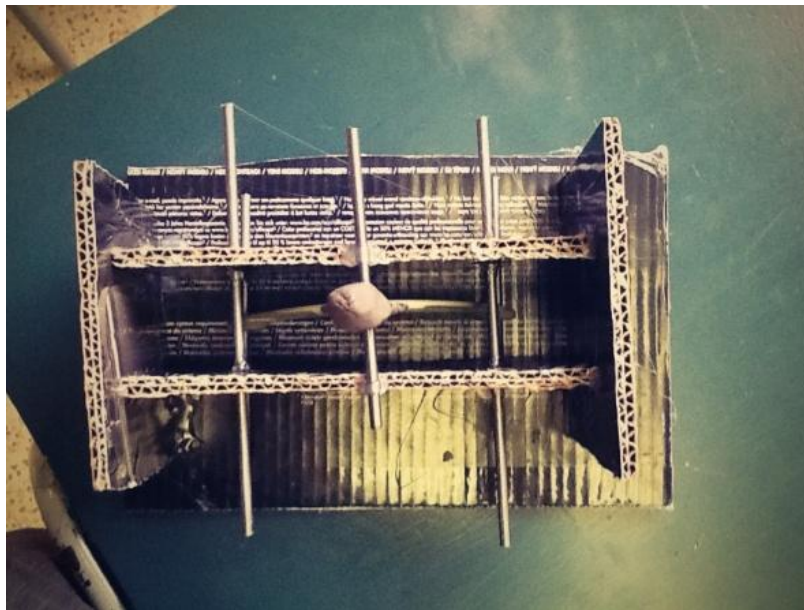
3.7.1 Prostředky pro tvorbu nové silikonové formy

- Master model – vytvořen metodou FDM z ABS*plus* plastu.
- Plastelína – vhodná pro tvorbu vtokové soustavy.
- Vícevrstvý krabicový karton – používá se pro ohraničení prostoru formy. Celkově se použije pět dílů, přičemž jeden je zespodu a čtyři po obvodu.
- 4 ks ocelové kulaté tyče o průměru 5mm.
- Tavná pistol Patex – používá se k tvorbě pomocné formy k upevnění a utěsnění kartonu, náplní pistole jsou tyčinky z termoplastu.
- Silikonový elastomer Silastic T-4 a vytvrzující složka Silastic T-4 Curing Agent. Tyto složky se míchají v poměru 10:1 hmotnostních dílů. Doba vytvrzování při 23°C je 12 hodin, tato doba může být urychlena pomocí tepla (KTK Blansko, ©2007).
- Laboratorní váhy na přesné odměření množství silikonu a tužidla.
- Vakuová licí komora MK-Mini – zařízení sloužící pro odstranění vzduchových bublin ze silikonové směsi (bubliny by vytvrzení silikonovou formu znehodnotily), viz příloha č. 3.
- Pomůcky na tvarování plastelíny, míchání silikonu, rozložení pomocné formy – skalpel, špachtle, 4 nádoby s požadovaným objemem, lžice.
- separátor – odmašťuje se s ním povrch master modelu, aby nedošlo k jeho přilepení k silikonu.

3.7.2 Postup tvorby nové silikonové formy

Při tvorbě nové silikonové formy byl použit odlišný přístup. Místo dvoudílné formy, se nová forma skládala pouze z jednoho kusu a na její tvorbu byl použit místo skel vícevrstvý krabicový karton, kterým lze proniknout napříč v případě potřeby. Místo špendlíků a silikonových výběžků pro stabilizaci byla použita kulatá ocelová tyč o průměru 5 mm. Forma byla navržena na rozměry modelu plus 30 mm přesahy na každé straně. Dělicí rovina v první formě svírala s rovinou podložky úhel cca 45°. V nové formě se tento úhel změnil na 90°, tím se docílí úplného zaplnění formy. Forma se po vytvrzení rozřízne v dělicí rovině a vytvoří se tak otvor pro vyjmutí master

modelu a následné vyjímání odlitků. Vtoková soustava se nachází v horní části silikonové formy. Ke správnému dosednutí formy slouží 2 ocelové tyče procházející stěnami pomocné formy umístěné v horní části modelu. K fixaci modelu v požadované pozici při tvorbě silikonové formy slouží také ocelové tyče procházející napříč stěnami modelu a skrz otvory, které budou použity k přinýtování upínacího pásku na rám mačky. Jedná se o elegantní variantu, jak zachovat tyto otvory, sníží se tím množství posprocessingových úprav po vytvrnutí odlitku, viz obr. 3.13. Jednotlivé díly kartonu se připevní tavnou pistolí, následně se do pomocné formy vloží master model a do předem připravených otvorů se umístí ocelové tyče, které master model zafixují v potřebné poloze. Po vložení tyčí se otvory utěsní tavnou pistolí, aby nedošlo k unikání silikonu.



Obr. 3.13: Tvorba nové formy.

(Zdroj: Autor práce, 2013)

Po přípravě pomocné formy se provede zalití formy vyvakuovaným silikonem stejně jako u formy předchozí viz obr. 3.14 a nechá se vytvrdit minimálně 12 hodin.



Obr. 3.14: Zalítí formy silikonem.

(Zdroj: Autor práce, 2013)

Po vytvrdnutí silikonu dojde k odstranění pomocné formy, vytažení ocelových tyčí a rozříznutí formy zalamovacím nožem v dělicí rovině. Následuje vyjmutí master modelu z formy. Master model byl při pokusu o vyjmutí zlomen, viz obr 3.15. Ke zlomení mater modelu došlo, protože nemá dostatečnou odolnost proti mechanickému namáhání. Forma je navržena pro odlévání jiného druhu materiálu. Při vyndávání modelu z formy je třeba použití kleští. Tento postup křehký *ABSplus* model nevydržel a došlo k jeho zlomení, obdobný problém nastal při pokusu o vyjmutí testovacího odlitku z dvousložkové pryskyřice Ebalta SG 2000.



Obr. 3.15: Zlomený master model.

(Zdroj: Autor práce, 2013)

3.7.3 Zkušební odlití funkčního prototypu

Materiál se musel začít nahřívat 24 hodin před odlitím na teplotu 110°C. Do formy byl nalit vtokovou soustavou, i přes medovou konzistenci materiál zatekl do všech dutin formy. Odvzdušnění bylo provedeno mírným roztažením a následným zavřením formy. Vznikl tak tenký přetok v dělicí rovině. Po cca 16 hodinách byl prototyp vytažen z formy, viz obr. 3.16, byly oříznuty přebytečné části a vtoková soustava.



Obr. 3.16: Prototyp s přetokem a vtokovou soustavou.

(Zdroj: Autor práce, 2013)

3.7.4 Testování funkčních vlastností prototypu

Další fází bylo přinýtování prototypového modelu na mačku a test při chůzi. Model dobře kopíruje tvar boty nehledě na její velikost. Provlékání řemínku okem je také bezproblémové. Model rozměrově vyhovuje daným požadavkům.

4 EKONOMICKO-TECHNICKÉ ZHODNOCENÍ

4.1 NÁKLADY NA TVORBU FUNKČNÍHO PROTOTYPU METODOU SILIKONOVÉ FORMY

3D tisk byl proveden na tiskárně uPrint na Vysokém učení technickém v Brně (VUT). Náklady na materiál a režijní náklady viz Tab. 4.1. Cena tisku master modelu na Technické univerzitě v Liberci z nejlevnějšího materiálu, který má podobné funkční vlastnosti jako materiál *ABSplus*, by byla 2.162 Kč, což je o 83% vyšší cena než na VUT.

Tabulka 4.1: Cena tisku metodou FDM.

Položka	Cena za jednotku [Kč]	Jednotka	Množství [ccm, Kč]	Cena celkem [Kč]
Cena materiálu	28,8	Kč/ccm	10,41	300
Správní režie	21,76%	% z ceny materiálu	300	65
Celkem		-		365

(Vlastní zpracování, 2013)

Silikonová forma byla vyrobena pomocí vakuové lící komory MK–Mini a Silikonu s vytvrzující složkou Silastic T–4. Náklady na tvorbu silikonové formy včetně její nepovedené části, která musela být vyrobena dvakrát, jsou vyjádřeny v Tab. 4.2.

Tabulka 4.2: Náklady na tvorbu silikonové formy s defektem.

Položka	Cena za jednotku [Kč]	Jednotka	Množství [kg, Kč]	Cena celkem [Kč]
Silikon (obě komponenty)	726	Kč/kg	1,8	1307
Správní režie	21,76%	% z ceny materiálu	1307	284
Celkem		-		1591

(Vlastní zpracování, 2013)

Náklady na tvorbu inovované silikonové formy, kterou bylo nutno vyrobit z důvodu rozlišných fyzikálních vlastností testovacího materiálu a materiálu pro odlití funkčního prototypu jsou vyjádřeny v Tab. č. 4.3.

Tabulka 4.3: Náklady na tvorbu inovované silikonové formy.

Položka	Cena za jednotku [Kč]	Jednotka	Množství [kg, Kč]	Cena celkem [Kč]
Silikon (obě komponenty)	726	Kč/kg	1	726
Správní režie	21,76%	% z ceny materiálu	726	158
Celkem		-		884

(Vlastní zpracování, 2013)

Náklady na odlití testovacího odlitku z jakostní rychle tvrdnoucí velmi tekuté licí hmoty se separátním plnivem Ebalta SG 2000 jsou vyjádřeny v Tab. 4.4.

Tabulka 4.4: Náklady na testovací odlitek z materiálu Ebalata SG 2000.

Položka	Cena za jednotku [Kč]	Jednotka	Množství [kg, Kč]	Cena celkem [Kč]
Materiál	470	Kč/kg	0,04	19
Správní režie	21,76%	% z ceny materiálu	19	4
Celkem		-		23

(Vlastní zpracování, 2013)

Náklady na odlití testovacího odlitku z elastické polyuretanové pryskyřice UR 3490 jsou vyjádřeny v Tab. 4.4. Materiál UR 3490 je svými vlastnostmi podobný materiálu Polyuretanový elastomer typu TDI s obsahem 7% NCO, jež je pouze prototypový materiál, jeho cena zatím není stanovena.

Tabulka 4.5: Náklady na testovací odlitek z materiálu UR 3490.

Položka	Cena za jednotku [Kč]	Jednotka	Množství [kg]	Cena celkem [Kč]
Celkem	1775	Kg	0,04	71

(Vlastní zpracování, 2013)

Celkové náklady na výrobu 1 dílu prototypové části předního upínání horolezecké mačky, včetně výroby dvou forem a testovacího odlévání je vyjádřena v Tab. 4.6.

Tabulka 4.6: Celkové náklady na výrobu 1 ks prototypového dílu.

Položka	Cena za jednotku [Kč]	Jednotka	Množství [ks, kg]	Cena celkem [Kč]
Master model	365	ks	1	365
Silikonová forma	1591	ks	1	1591
Inovovaná silikonová forma	884	ks	1	884
Odlévání 3ks materiálu Ebalta SG 2000	572	Kč/kg	0,12	69
Odlévání 1ks materiálu UR	1772	Kč/kg	0,04	71
Celkem		-		2980

(Vlastní zpracování, 2013)

Celkové náklady na výrobu 20 dílů prototypové části předního upínání horolezecké mačky, včetně výroby dvou forem a testovacího odlévání je vyjádřena v Tab. 4.7.

Tabulka 4.7: Náklady na výrobu 20 dílů metodou silikonové formy.

Položka	Cena za jednotku [Kč]	Jednotka	Množství [ks, kg]	Cena celkem [Kč]
Master model	365	ks	1	365
Silikonová forma	1591	ks	1	1591
Inovovaná silikonová forma	884	ks	1	884
Odlévání 3ks materiálu Ebalta SG 2000	572	Kč/kg	0,12	69
Odlévání 20ks materiálu UR 3490	1772	Kč/kg	0,8	1418
Celkem		-		4327

(Vlastní zpracování, 2013)

4.1.1 Náklady na výrobu silikonové formy za běžných podmínek

Náklady na výrobu funkčního prototypu metodou silikonové formy by mohly být sníženy, pokud by byla silikonová forma navržena správně na první pokus. Celkové náklady by pak byly sníženy o náklady na tvorbu jedné silikonové formy a o testovací odlitky z materiálu Ebalta SG 2000, jež do ní byly odlity, viz Tab. 4.8.

Tabulka 4.8: Náklady na tvorbu silikonové formy za běžných podmínek.

Položka	Cena za jednotku [Kč]	Jednotka	Množství (ks; ccm)	Cena celkem [Kč]
Master model	365	ks	1	365
Inovovaná silikonová forma	884	ks	1	884
Odlévání 1ks materiálu Ebalta SG 2000	572	Kč/kg	0,04	23
Odlévání 1ks materiálu UR 3490	1772	Kč/kg	0,04	71
Celkem		-		1343

(Vlastní zpracování, 2013)

Náklady na výrobu 20 ks, by pak byly taktéž sníženy o náklady na tvorbu jedné silikonové formy a o testovací odlitky z materiálu Ebalta SG 2000, viz Tab. 4.9.

Tabulka 4.9: Náklady na výrobu 20 dílů metodou silikonové formy za běžných podmínek.

Položka	Cena za jednotku [Kč]	Jednotka	Množství (ks; ccm)	Cena celkem [Kč]
Master model	365	ks	1	365
Inovovaná silikonová forma	884	ks	1	884
Odlévání 1ks materiálu Ebalta SG 2000	572	Kč/kg	0,04	23
Odlévání 20ks materiálu UR 3490	1772	Kč/kg	0,8	1418
Celkem		-		2690

(Vlastní zpracování, 2013)

4.2 NÁKLADY NA TVORBU FUNKČNÍHO PROTOTYPU METODOU POLYJET MATRIX

Náklady na tisk 1ks prototypového dílu z materiálu DurusWhite (Fotopolymer) na technické univerzitě v Liberci, jež disponuje 3D tiskárnou s technologií PLM, která dokáže tisknout pružné prototypy (díky schopnosti tisku ze dvou různých materiálů zároveň) jsou vyjádřeny v Tab. 4.10.

Tabulka 4.10: Náklady na tisk prototypového dílu metodou PLM.

Položka	Cena za jednotku [Kč]	Jednotka	Množství [ccm]	Cena celkem [Kč]
Cena celkem	238,84	ccm	10,41	2486

(Vlastní zpracování, 2013)

Celkové náklady na výrobu 20 dílů prototypové části předního upínání horolezecké mačky metodu FDM jsou vyjádřeny v Tab. 4.11.

Tabulka 4.11: Náklady na výrobu 20 dílů metodu PLM.

Položka	Cena za jednotku [Kč]	Jednotka	Množství [ccm]	Cena celkem [Kč]
Celkem	58,88	ccm	208,2	12259

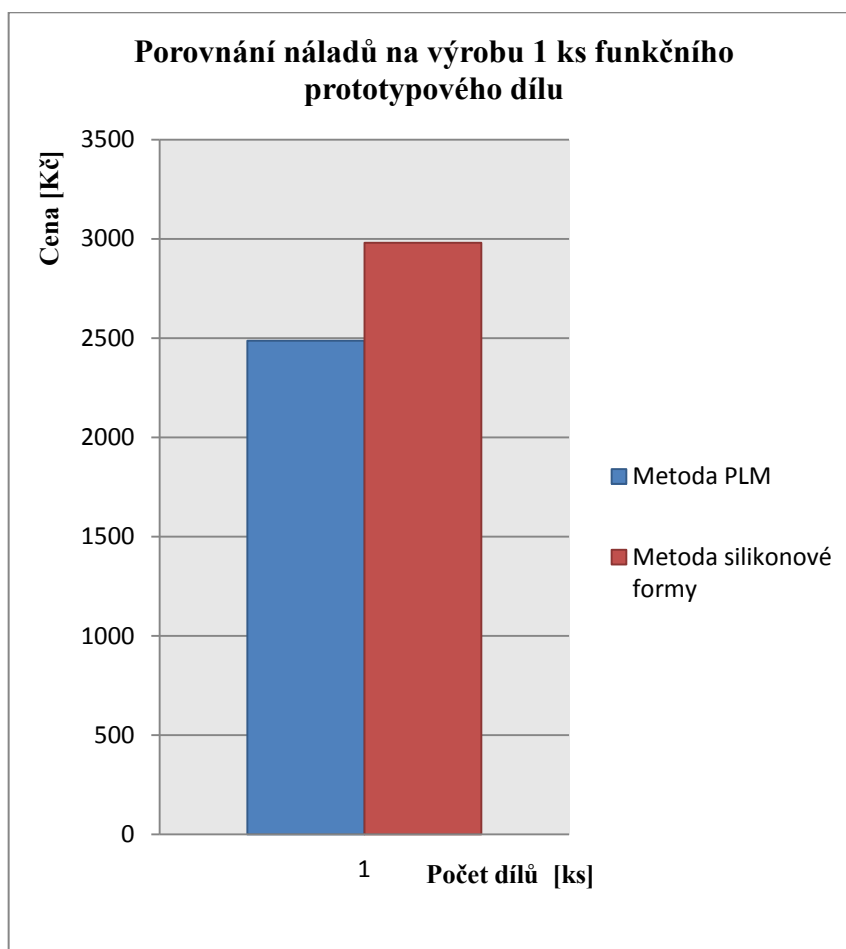
(Vlastní zpracování, 2013)

Při výrobě 20 dílů metodu PLM se po rozpočítání nákladů na 1 ks náklady čtyřnásobně snížily, tzn. 613 Kč/ks.

4.3 POROVNÁNÍ NÁKLADŮ MEZI JEDNOTLIVÝMI METODAMI VÝROBY

4.3.1 Výroba 1 ks prototypového dílu

V grafické závislosti na Obr. 4.1 jsou porovnány náklady na výrobu 1ks funkčního prototypového dílu metodou silikonové formy a metodou PLM.

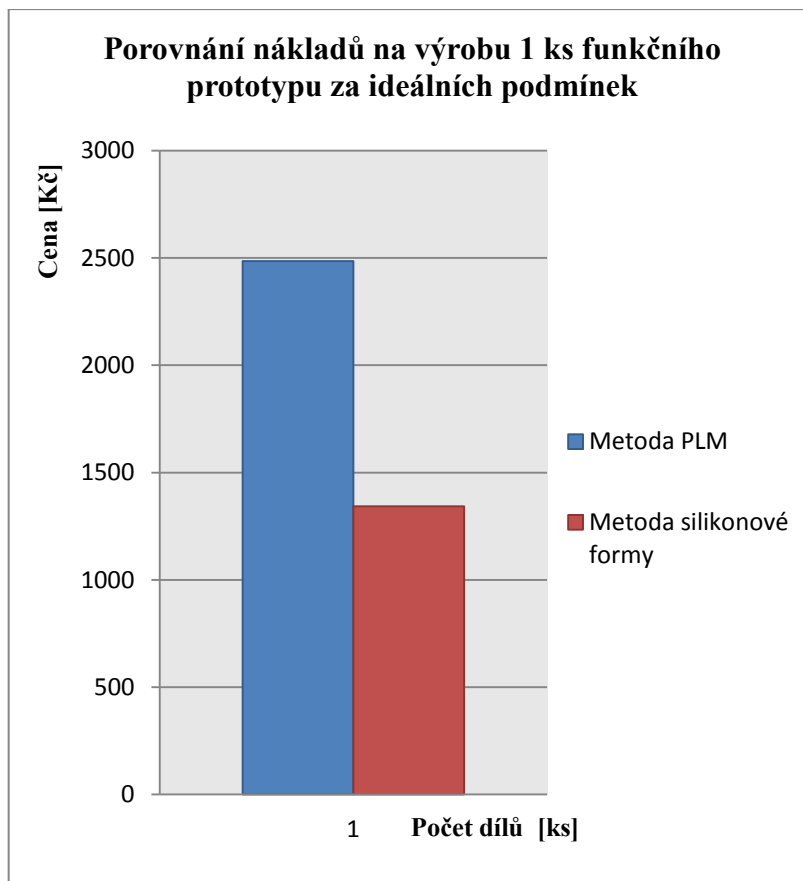


Obr. 4.1: Porovnání nákladů na výrobu 1 ks funkčního prototypového dílu.

(Zdroj: Vlastní zpracování, 2013)

V grafické závislosti na Obr. 4.2 je možno zjistit, že by náklady na výrobu 1 dílu metodou PLM byly o 16% nižší než náklady na výrobu 1 dílu metodou silikonové formy. Nutno podotknout, že silikonová forma byla vyrobena dvakrát, což výrazně zvýšilo náklady na výrobu 1 dílu touto metodou.

V grafické závislosti na Obr. 4.2 je možno porovnat náklady na tvorbu 1 ks funkčního prototypového dílu metodou silikonové formy za běžných podmínek a metodou PLM.



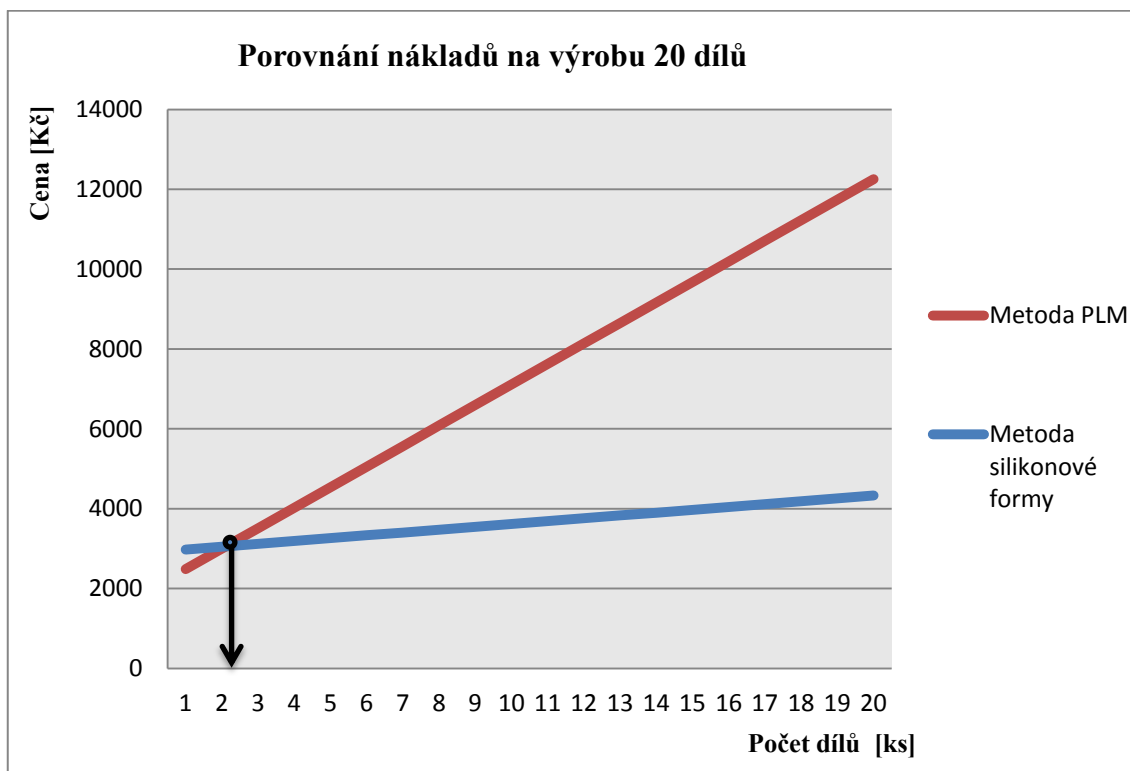
Obr. 4.2: Porovnání nákladů na výrobu 1 ks funkčního prototypu za běžných podmínek.

(Zdroj: Vlastní zpracování, 2013)

Z Grafu na Obr. 4.2 vyplývá, že náklady na výrobu 1 dílu metodou silikonové formy za běžných podmínek jsou o 45% nižší než náklady na výrobu 1 dílu metodou PLM.

4.3.2 Výroba 20 ks prototypových dílů

V grafické závislosti na Obr. 4.3 je možno porovnat celkové náklady na výrobu 20 dílů metodou silikonové formy a metodou PLM.

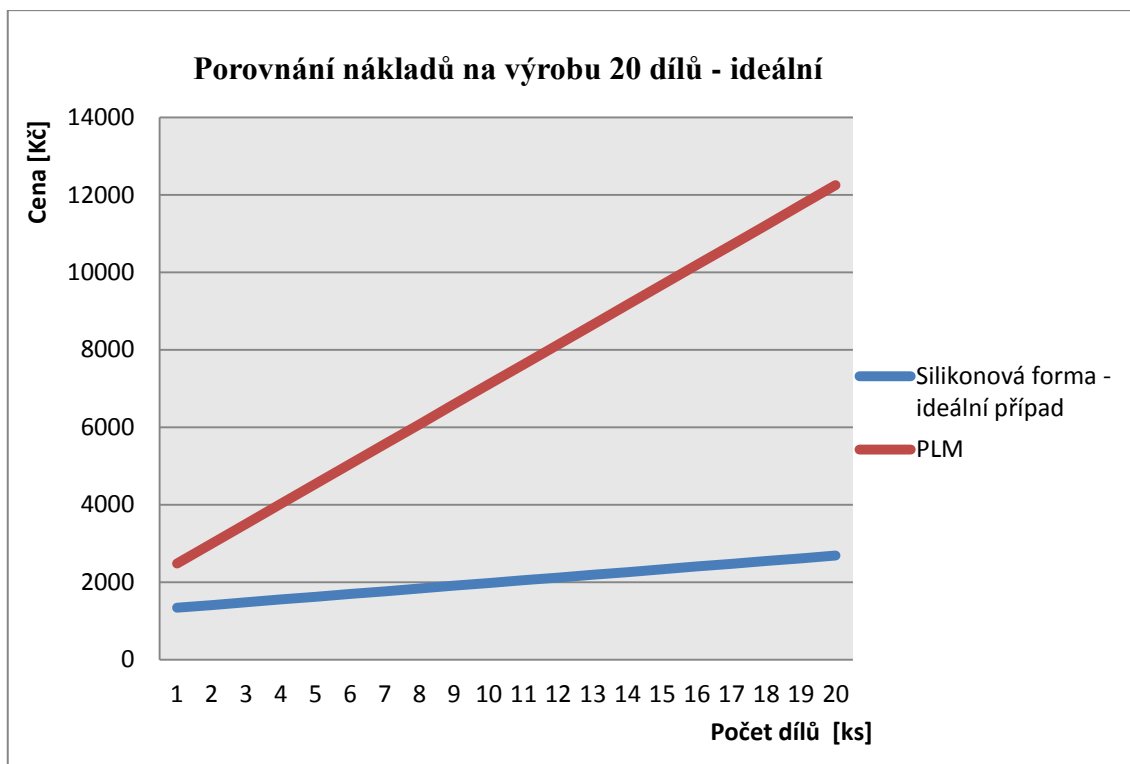


Obr. 4.3: Porovnání nákladů na výrobu 20 ks funkčních prototypových dílů.

(Zdroj: Vlastní zpracování, 2013)

V grafu na Obr. č. 4.3 jsou znázorněny křivky zachycující vývoj celkových nákladů v závislosti na počtu vyrobených dílů. V tomto případě se při výrobě více než 2 ks vyplatí použít metodu silikonové formy.

Za běžných podmínek by pravděpodobně došlo k výrobě pouze jedné silikonové formy, v tomto případě by byly náklady na výrobu 1 dílu metodou silikové formy nižší než náklady na výrobu 1 dílu metodou PLM, viz graf na Obr. 4.4.



Obr. 4.4: Porovnání nákladů na výrobu 20 ks funkčních prototypových dílů.

(Zdroj: Vlastní zpracování, 2013)

Z grafu na Obr. 4.4 je možno zjistit, že náklady na výrobu 20 ks pomocí silikonové formy jsou při správném navržení formy o 283% nižší, nehledě na skutečnost, že materiál použitý pro odlévání je vhodnější pro výsledné použití.

ZÁVĚR

Hlavním cílem této práce byla výroba prototypového dílu pomocí moderních technologií. K výrobě prototypu byla použita technologie Rapid Prototyping (RP), konkrétně metoda Fused Deposition Modeling (FDM), která sloužila pro výrobu master modelu. Z master modelu byla vytvořena silikonová forma. Forma sloužila pro odlití určitého počtu dílů z materiálu s požadovanými vlastnostmi. Nejdůležitějšími vlastnostmi materiálu byla dostatečná ohebnost a otěruvzdornost.

V teoretické části je uveden přehled komerčně nejdostupnějších metod RP. Podrobněji je popsána metoda FDM, která byla použita pro výrobu master modelu a metoda Polyjet Matrix Printing (PLM) vhodná pro výrobu funkčního prototypu. Další teoretická východiska se týkají problematiky tvorby silikonové formy a materiálů vhodných pro odlévání.

Konstrukce 3D modelu byla provedena v parametrické aplikaci SolidWorks. Po zkonstruování byla data převedena do formátu *.stl., následovala kontrola správnosti dat v softwaru MiniMagics a zadání parametrů tisku v softwaru určenému pro komunikaci s 3D tiskárnou zvaného CatalystEx.

Po tisku fyzického modelu na tiskárně uPrint následovaly povrchové úpravy modelu, aby byl model připraven pro použití jako vzor pro vytvoření silikonové formy. Tvorba formy byla postižena komplikacemi z nedostatku zkušeností v konstruování daného dílu. Forma musela být kvůli nevhodnosti umístění dělicí roviny vyrobena dvakrát. Po vytvoření silikové formy proběhlo testování správnosti provedení. První silikonová forma obstála v odlití zkušebního odlitku z velmi tekutého materiálu, avšak ne v odlití materiálu vhodného pro výrobu funkčního prototypového dílu. Následovalo vyhodnocení chyb a návrh inovované formy, ve které došlo k odlišnému umístění dělicí roviny. Testovací odlitek z velmi tekutého materiálu se nezdařil. Odlitek z materiálu s požadovanými výslednými vlastnostmi, byl ale plně funkční, bez vizuálních defektů. Funkční prototyp byl následně připnut na horolezeckou mačku a otestován chůzí, test proběhl bez problémů, prototypový díl splnil svůj účel.

V ekonomicko-technickém zhodnocení byly spočítány náklady na jednotlivé výrobní části, které byly následně graficky porovnány. Výsledkem tohoto zhodnocení bylo, že výroba jednoho kusu metodou PLM je výhodnější, jedná-li se o výrobu méně než tři kusů. Při výrobě více než dvou kusů je výhodnější výroba metodou silikonové formy.

Tato práce měla pro autora velký přínos, především kvůli vzniklým komplikacím v průběhu výroby funkčního prototypu. Problematické situace se vždy podařilo zdárně vyřešit. Všechny cíle práce byly splněny.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

ABOUT.COM, ©2013. *About.com: Do more* [online]. [cit. 2013-05-22].
Dostupné z: <http://www.about.com/#!/editors-picks/>

ACR CZECH, s.r.o., ©2011. *ACR Czech* [online]. [cit. 2013-05-21].
Dostupné z: <http://www.axson.cz/>

BH FORM, s.r.o., 2013. *Fyzikální vlastnosti Polyuretanového elastomeru typu TDI s obsahem 7% NCO*.

BUREŠ, Jiří, 2002. *Shore: Zkouška tvrdosti dle Shorea* [online]. [cit. 2013-05-21].
Dostupné z: <http://www.converter.cz/jednotky/tvrdost-shore.htm>

CatalystEX 4.0.1[®], ©2010. Stratalys Inc. Eden Prairie, MN. Všechna práva vyhrazena [online]. [vid. 2013-05-23]. Dostupné z:
<http://www.dimensionprinting.com/applications/rapid-prototyping.aspx>

DASSAULT SYSTÈMES SOLIDWORKS, corp., ©2013. *SolidWorks* [online].
Waltham, Massachusetts, USA. [cit. 2013-05-22].
Dostupné z: <http://www.solidworks.com/>

DASSAULT SYSTEMES, © 1995-2013. *Nápověda Solidworks* [online].
[cit. 2013-05-17]. Dostupné z:
<http://help.solidworks.com/2011/Czech/SolidWorks/sldworks/LegacyHelp/Sldworks/Overview/StartPage.htm>

DUCHÁČEK, Vratislav, 1997. Termoplastické elastomery: moderní polymerní materiály. *Chemické listy* [online]. Roč. 9, č. 1. [cit. 2013-05-21].
Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/1997_01_23-29.pdf

FRANK, Tomáš a Tomáš KUBLÁK, 2007. *Horolezecká abeceda*.
Vyd. 1. Praha: Epoque, 663 s. ISBN 978-808-7027-356.

GOOGLE, Inc., ©2012. *Google: Translate* [online]. [cit. 2013-05-13]. Dostupné z:
<http://translate.google.com/#en/cs/rapid%20prototyping>

KATEDRA VÝROBNÍCH SYSTÉMŮ, FS TUL, © 2011. *Katedra výrobních systémů, FS TUL* [online]. [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://www.kvs.tul.cz/>

KTK BLANSKO, spol. s. r.o., ©2007. *Ebalta: Řešení pro Vás* [online].
[cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://www.ebalta.cz/cz>

KUČERA, Radek, © 2005-2006. Pojem polymerizace. *ABZ: Slovník cizích slov* [online]. [cit. 2013-05-21]. Dostupné z:
<http://slovník-cizich-slov.abz.cz/web.php/slovo/polymerizace-polymerisace-polymerace>

LANEX, a.s., ©2012-2013. *Singing Rock* [online]. [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://www.singingrock.com/>

MCAE SYSTEMS, s.r.o., © 2013. *MCAE: 3D Digitální technologie* [online]. [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://www.mcae.cz/>

Pohora.cz, 2011. *Pohora.cz: Hory, outdoor, adrenalin* [online]. [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://www.pohora.cz/>

PROKOPOVÁ, Irena, 2007. *Makromolekulární chemie*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 207 s. ISBN 978-807-0806-623. Dostupné z: http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_isbn-978-80-7080-662-3/pages-img/001.html

PŠENČÍKOVÁ, Jana. 2005. *SolidWorks: Základy modelování*. Brno.

ROUPEC, Jakub, 2006. *Zařízení pro vakuové lití do silikonových forem*. Brno. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.

Sandback Technical Design, Inc., ©2012. *Sandback: 3D Printing & Prototype* [online]. [cit. 2013-05-22]. Dostupné z: <http://www.sandback.com/>

SEDLÁK, Josef, 2009. Aditivní technologie, reverzní inženýrství. PÍŠKA, Miroslav. *Speciální technologie obrábění*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s. 200-231. ISBN 978- 80-214-4025-8.

Stratasys, Inc., 2005. *International Directory of Company Histories* [online]. St. James Press, roč. 67 [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: <http://www.fundinguniverse.com/company-histories/stratasys-inc-history/>

ŠEVČÍKOVÁ, L., 2011. *Využití metody Fused Deposition Modeling pro lékařské účely*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta podnikatelská, 54 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/symbol	Jednotka	Popis
©	[-]	Copyright
°C	[-]	Celsiův stupeň - jednotka teploty
3D	[-]	Three Dimensional
ABS	[-]	Akrylonitrilbutadienstyren
CAD	[-]	Computer Aided Desing
CAM	[-]	Computer Aided Manufacturing
Ccm	[-]	Centimetr krychlový - jednotka objemu
DMLS	[-]	Direct Metal Laser Sintering
FDM	[-]	Fused Deposition Modeling
Kč	[-]	Koruna česká
Ks	[-]	kus
LOM	[-]	Laminated Object Manufacturing
MJM	[-]	Multi Jet Modeling
mm	[-]	Milimetr - jednotka délky
Např.	[-]	Na příklad
Obr.	[-]	Obrázek
P	MPa	Tlak
PA	[-]	Polyamid
PC	[-]	Polykarbonát
PE	[-]	Polyethylen
PEEK	[-]	Polyeteretrketon
PLM	[-]	Polyjet Matrix Printing
PP	[-]	Polypropylen
RP	[-]	Rapid Prototyping
SGC	[-]	Solid Ground Cutting
SLA	[-]	Stereolitografie
SLS	[-]	Selective Laser Sintering
STL	[-]	Stereolitography file
Tzn.	[-]	To zamená
σ	Kg.dm ³	Hustota

SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1.1: Přední díl upínání.	11
Obr. 1.2: Univerzální upínání mačky.....	12
Obr. 1.3: Upínání mačky, plastový úchyt špice a rychloupínací pata.	13
Obr. 1.4: Upínání mačky, kovová hrazdička a rychloupínací pata.	14
Obr. 2.1: Průběh tvorby fyzického modelu.....	16
Obr. 3.1: Okótovaná skica.	26
Obr. 3.2: Základní díl.....	26
Obr. 3.3: Zrcadlení.....	27
Obr. 3.4: Umístění modelu v tiskové komoře.....	28
Obr. 3.5: Vytisknutý model s podporami v tiskové komoře.....	29
Obr. 3.6: Chemické odstranění materiálu podpor.....	30
Obr. 3.7: Povrchové úpravy modelu.	31
Obr. 3.8: Fixace master modelu v pomocné formě.....	33
Obr. 3.9: První část formy.	34
Obr. 3.10: Rozebraná forma.	35
Obr. 3.11: Odlévání zkušební odliťku.....	36
Obr. 3.12: Zkušební odlitek.	37
Obr. 3.12: Zmenšení formy.....	37
Obr. 3.13: Tvorba nové formy.	40
Obr. 3.14: Zalítí formy silikonem.....	41
Obr. 3.15: Zlomený master model.....	42
Obr. 3.16: Prototyp s přetokem a vtokovou soustavou.....	43
Obr. 4.1: Porovnání nákladů na výrobu 1 ks funkčního prototypového dílu.....	48
Obr. 4.2: Porovnání nákladů na výrobu 1 ks funkčního prototypu za běžných podmínek.	49

Obr. 4.3: Porovnání nákladů na výrobu 20 ks funkčních prototypových dílů.....	50
Obr. 4.4: Porovnání nákladů na výrobu 20 ks funkčních prototypových dílů.....	51

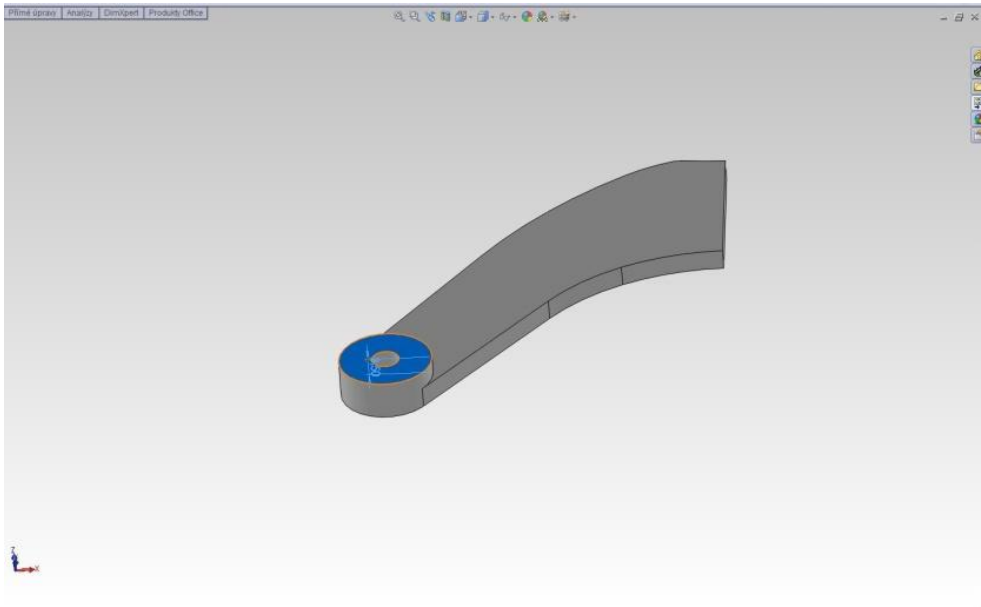
SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1: Nejpoužívanější technologie Rapid Prototyping	18
Tabulka 2.2: Nejčastěji napodobované plasty.	22
Tabulka 3.1: Vlastnosti silikonového kaučuku Silastic T-4.	32
Tabulka 3.2: Vlastnosti materiálu Ebalta 2000.....	35
Tabulka 3.3: Fyzikální vlastnosti Polyuretanového elastomeru typu TDI s obsahem 7% NCO.	38
Tabulka 4.1: Cena tisku metodou FDM.....	44
Tabulka 4.2: Náklady na tvorbu silikonové formy s defektem.....	44
Tabulka 4.3: Náklady na tvorbu inovované silikonové formy.	44
Tabulka 4.4: Náklady na testovací odlitek z materiálu Ebalata SG 2000.....	45
Tabulka 4.5: Náklady na testovací odlitek z materiálu UR 3490.	45
Tabulka 4.6: Celkové náklady na výrobu 1 ks prototypového dílu.	45
Tabulka 4.7: Náklady na výrobu 20 dílů metodou silikonové formy.	46
Tabulka 4.8: Náklady na tvorbu silikonové formy za běžných podmínek.	46
Tabulka 4.9: Náklady na výrobu 20 dílů metodou silikonové formy za běžných podmínek.	47
Tabulka 4.10: Náklady na tisk prototypového dílu metodou PLM.	47
Tabulka 4.11: Náklady na výrobu 20 dílů metodu PLM.	47

SEZNAM PŘÍLOH

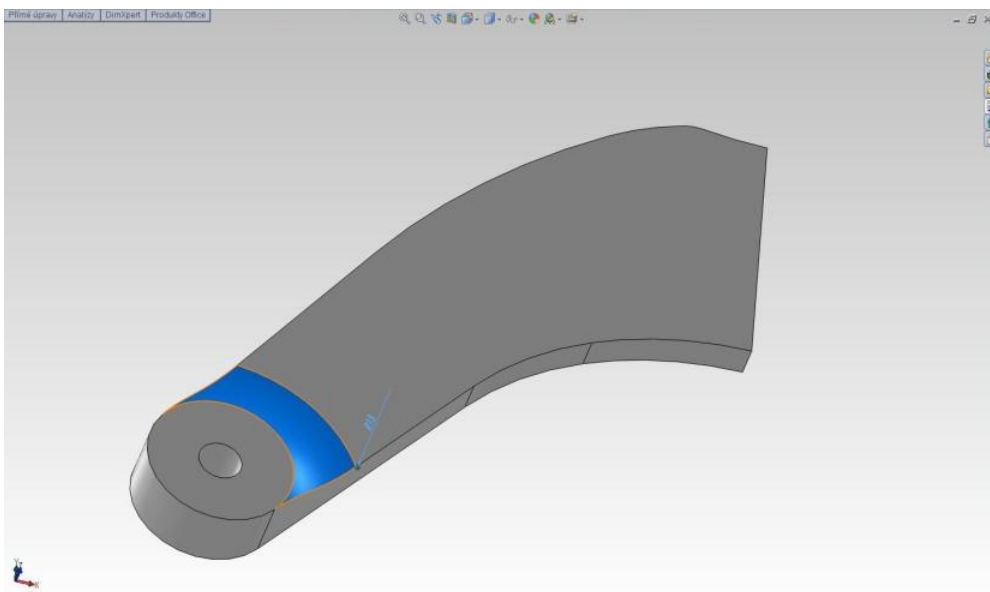
Příloha č. 1: Tvorba modelu v SolidWorks	I
Příloha č. 2 – Stupnice tvrdosti Shore.....	V
Příloha č. 3: Vakuová lící komora MK Mini	VI

Příloha č. 1: Tvorba modelu v SolidWorks



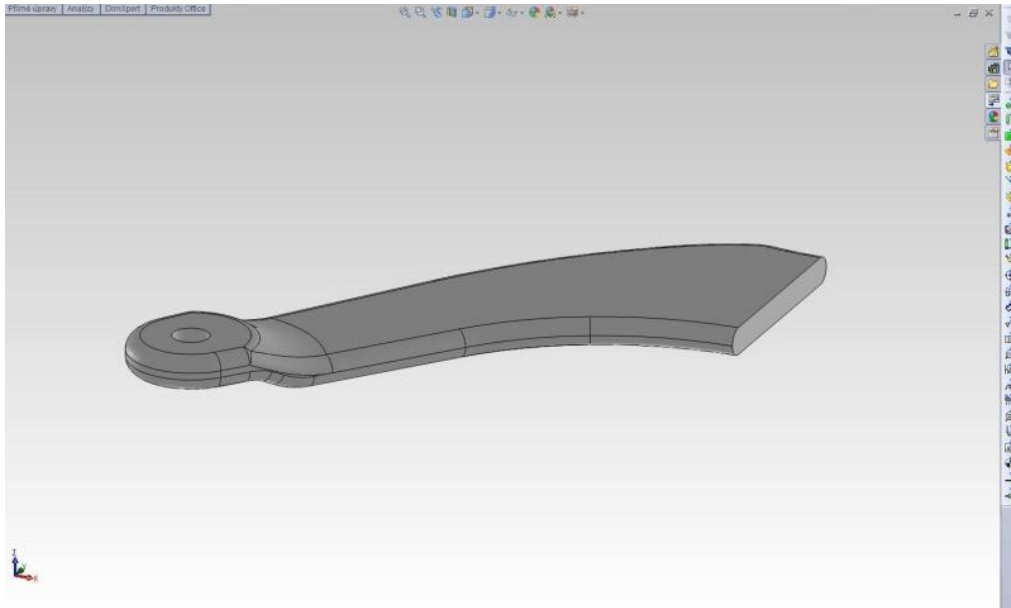
Obr. X: Přidat vysunutím

(Zdroj: Dassault Systèmes SolidWorks, ©2013)

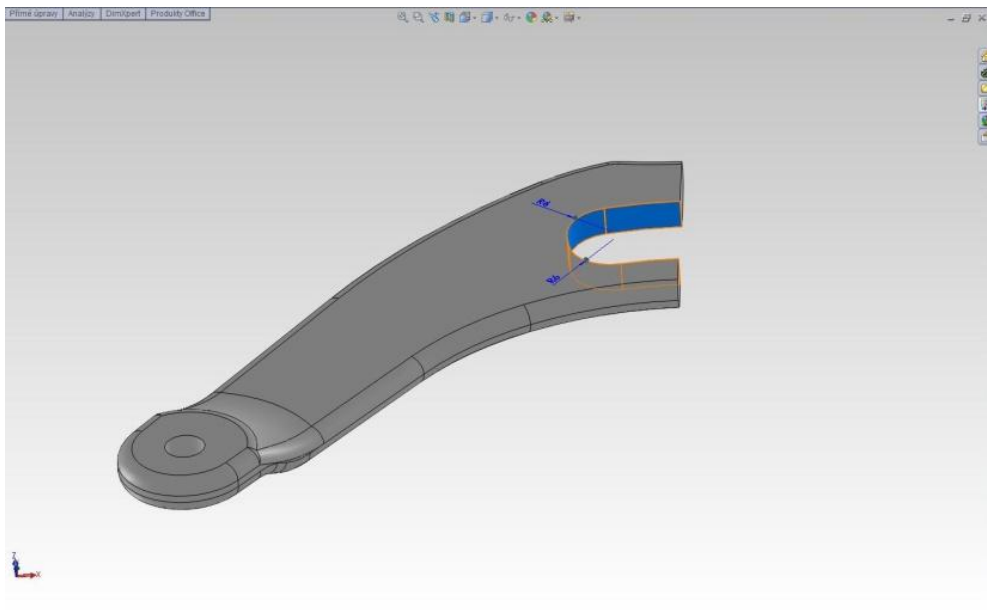


Obr. X: Zaoblit

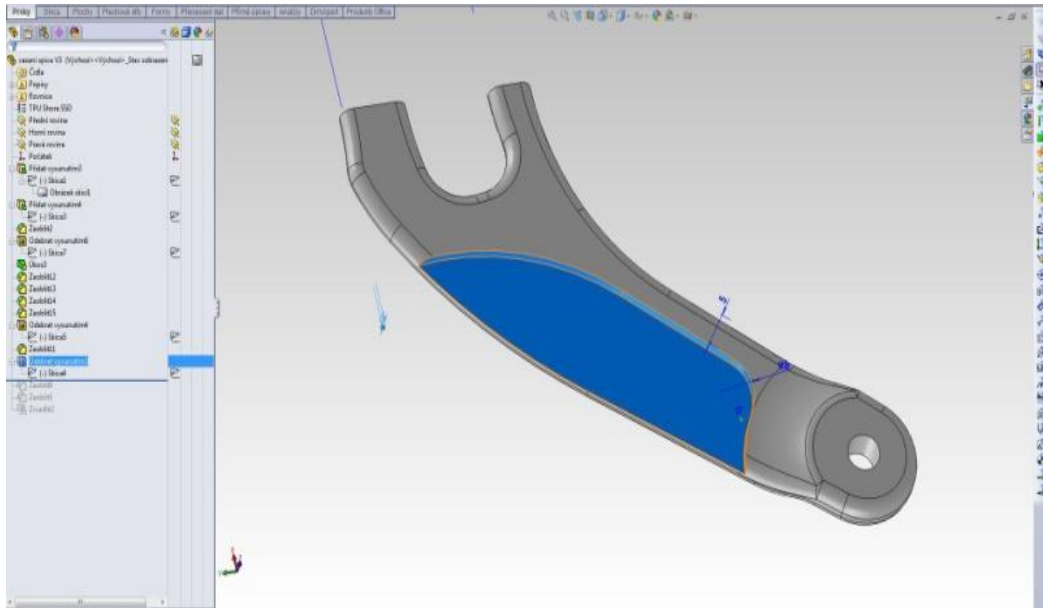
(Zdroj: Dassault Systèmes SolidWorks, ©2013)



Obr. X: Odebrat vysunutím, zaoblit
(Zdroj: Dassault Systèmes SolidWorks, ©2013)

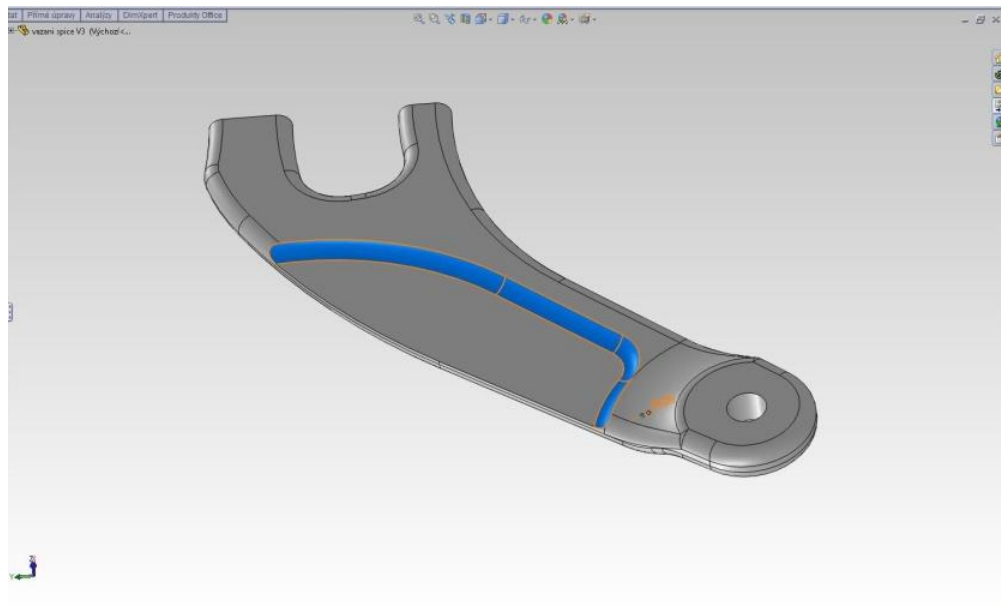


Obr. X: Odebrat vysunutím, zaoblit
(Zdroj: Dassault Systèmes SolidWorks, ©2013)



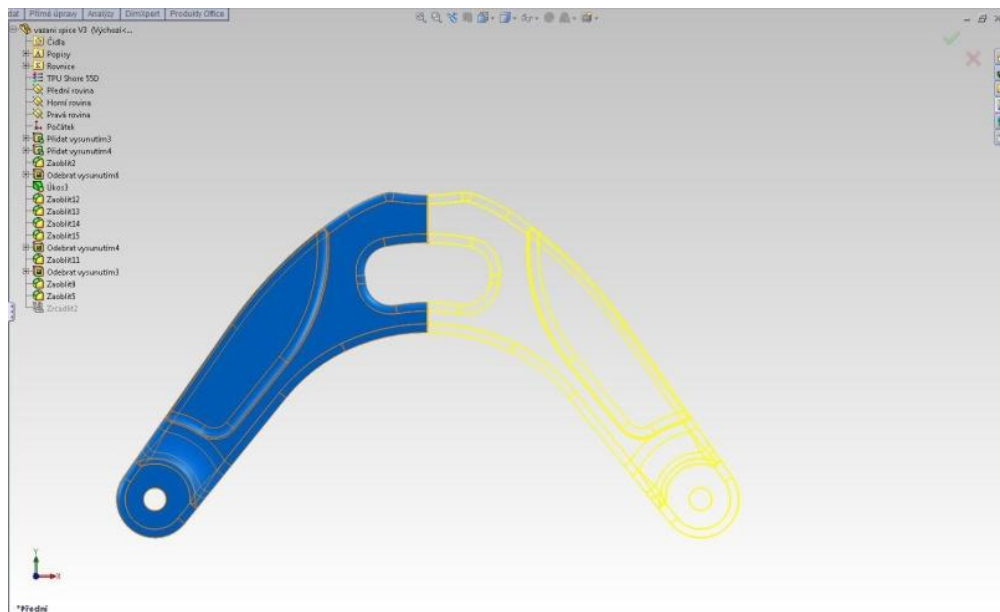
Obr. X: Odebrat vysunutím

(Zdroj: Dassault Systèmes SolidWorks, ©2013)



Obr. X: Zaoblit

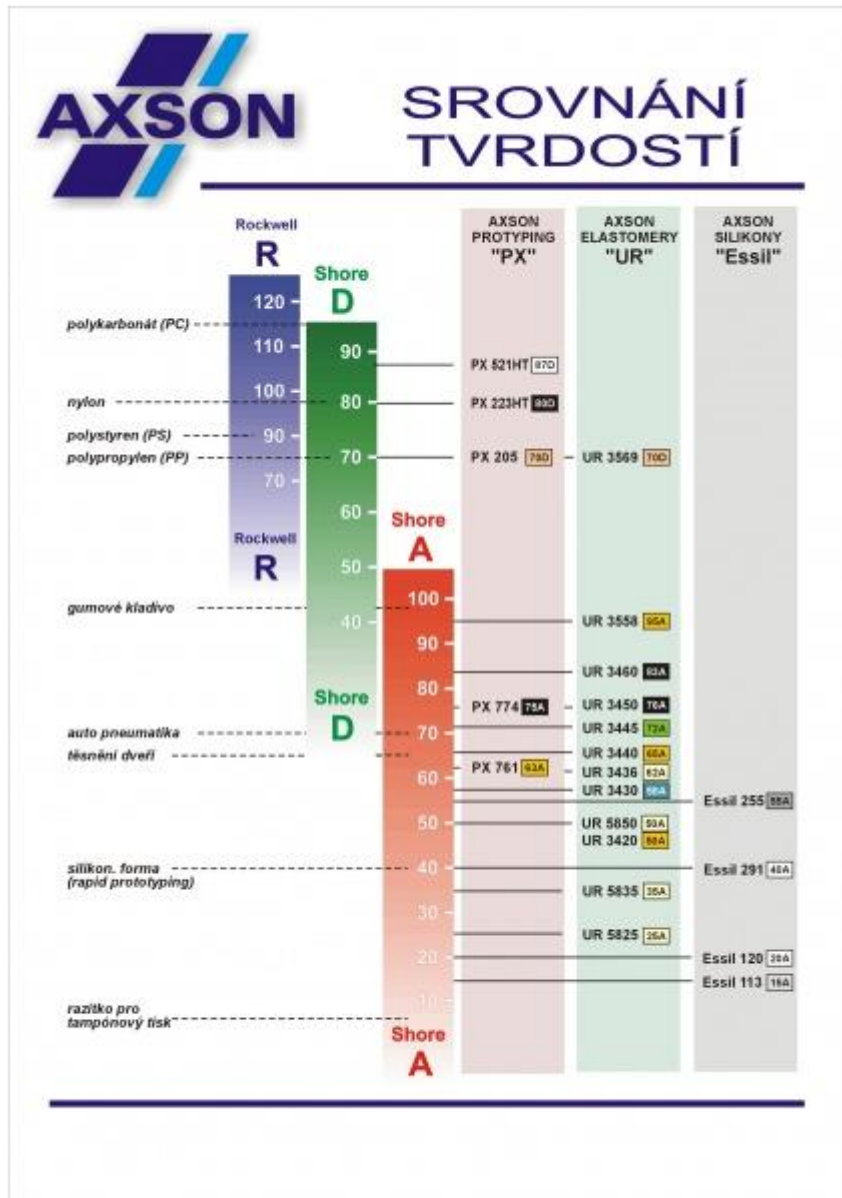
(Zdroj: Dassault Systèmes SolidWorks, ©2013)



Obr. X: zrcadlit

(Zdroj: Dassault Systèmes SolidWorks, ©2013)

Příloha č. 2: Stupnice tvrdosti Shore

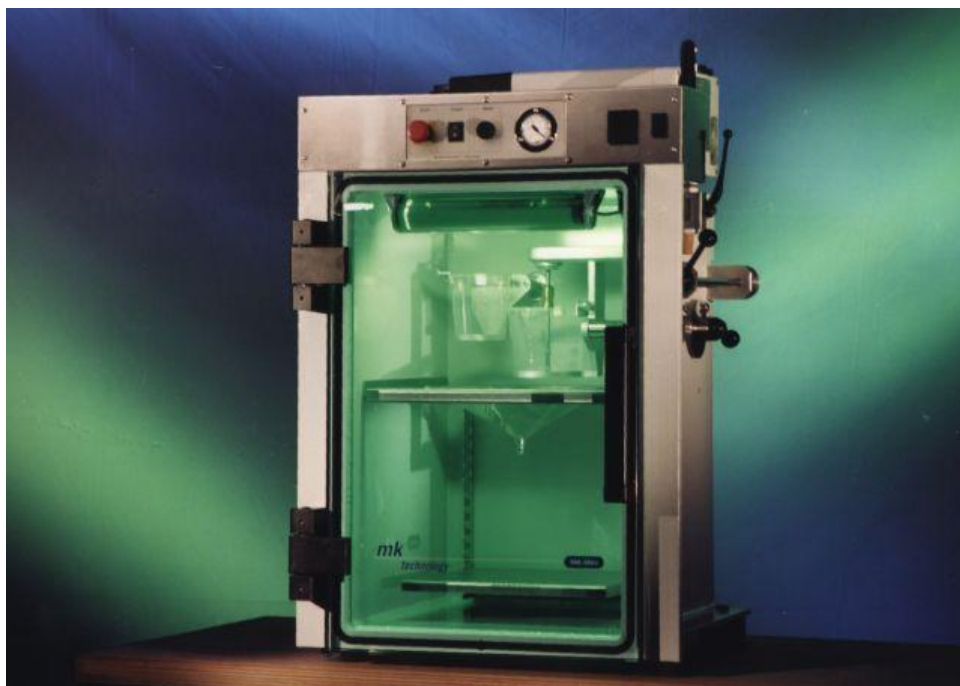


STUPNICE TVRDOSTI SHORE



(Zdroj: ACR Czech, 2011)

Příloha č. 3: Vakuová lící komora MK Mini



(Zdroj: MCAE SYSTEMS, ©2013)