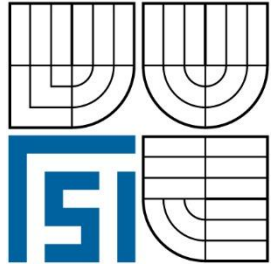


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA PROTOTYPOVÉHO DÍLU POMOCÍ TECHNOLOGIE RAPID PROTOTYPING

MANUFACTURE OF PROTOTYPE COMPONENT BY RAPID PROTOTYPING METHOD

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MAREK KŘUPKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. et Ing. VOJTĚCH KOSOUR

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Marek Křupka

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Výroba prototypového dílu pomocí technologie rapid prototyping

v anglickém jazyce:

Manufacture of a prototype component by rapid prototyping method

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pro prototypovou a malosériovou výrobu dílců lze s úspěchem využívat jednu z tzv. rapid prototyping technologií - odlévání voskových či plastových dílců ve vakuové komoře do silikonových forem. Tato technologie je na FSI VUT Brno dostupná a studentovi bude umožněno se s ní detailně prakticky seznámit.

Cíle bakalářské práce:

Práce podá celkový popis jednotlivých kroků celé RP technologie odlévání do silikonové formy ve vakuu na zvoleném dílci.

Seznam odborné literatury:

1. WOHLERS, T. Wohlers Report 2008. 1st ed. Colorado: Wohlers Associates, 2008. 240 p. ISBN 0-9754429-4-5.
2. BEELEY, PR. and SMART, RF. Investment Casting. 1st ed. Cambridge: The University Press, 1995. 486 p. ISBN 0-901716-66-9.
3. CHUA, CK., et al. Rapid Prototyping - Principles and Applications. 2nd ed. Singapore: Fulsland Offset Printing Pte, 2004. 411 p. ISBN 981-238-120-1.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Vojtěch Kosour

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 19.11.2010

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce popisuje výrobu prototypového dílu kliky jízdního kola pomocí FDM metody Rapid Prototyping. Nejprve jsou stručně shrnuty metody výroby dílu pomocí různých metod Rapid Prototyping. V hlavní části je popsán postup výroby od počátečního návrhu až po konečný voskový model, který může být použit k výrobě kovového dílu. V závěru práce je krátké porovnání standardní technologie výroby dílu s metodou výroby pomocí Rapid Prototyping.

Klíčová slova

Rapid Prototyping, 3D tiskárna, Fused Deposition Modelling, silikonová forma, voskový model, prototypový díl

ABSTRACT

This thesis describes the production of a prototype component of the bicycle crank with FDM Rapid Prototyping method. Initially, production methods of this component, using different ways of Rapid Prototyping are summarized. The main part of the thesis focuses on the production process from the initial design to the final wax model, which can be used to manufacture metal components. The conclusion compares the component production using standard technology with the one using Rapid Prototyping.

Key words

Rapid Prototyping , 3D printer, Fused Deposition Modelling, Silicon mould, wax pattern, prototype component

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KŘUPKA, Marek. Výroba prototypového dílu pomocí technologie Rapid Prototyping. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 43 s., CD. Vedoucí práce: Ing. et Ing. Vojtěch Kosour.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Výroba prototypového dílu pomocí metody Rapid Prototyping“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně, 26.5.2011

.....
Marek Křupka

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Et Ing. Vojtěchu Kosourovi za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

Abstrakt.....	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah.....	7
Úvod	8
1 TECHNOLOGIE VÝROBY MODELŮ POMOCÍ METOD RP	9
1.1 Základní metody RP	9
1.1.1 Stereolitografie (SLA)	10
1.1.2 Fused Deposition Modelling (FDM).....	12
1.1.3 Selective Laser Sintering (SLS)	13
1.1.4 Multi JET Modelling (MJM)	14
1.1.5 Laminated object manufacturing (LOM)	15
1.1.6 Three-dimensional printing (3DP).....	16
1.1.7 Solid Ground Curing (SGC).....	17
1.1.8 Ballistic Particle Manufacturing (BPM).....	18
1.2 Materiály pro RP	19
2 VÝROBA MASTER MODELU POMOCÍ FDM	20
2.1 Tvorba CAD dat.....	20
2.2 Preprocessing.....	21
2.2.1 Konverze dat do formátu STL	21
2.2.2 Načtení dat v programu CatalystEX.....	22
2.3 Processing	25
2.4 Postprocessing.....	26
2.4.1 Odstranění podpor	26
2.4.2 Broušení.....	27
3 VÝROBA VOSKOVÉHO MODELU	29
3.1 Výroba silikonové formy.....	29
3.1.1 Prostředky nutné ke zhotovení formy	29
3.1.2 Postup výroby	30
3.2 Výroba voskového modelu	35
4 SROVNÁNÍ SE STANDARDNÍ TECHNOLOGIÍ VÝROBY DÍLU.....	38
4.1 Omezení	39
4.2 Přednosti	39
Závěr	40
Seznam použitých zdrojů	41
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	43

ÚVOD

V současné době stoupají nároky zákazníka na propracovanost produktu, jak po kvalitativní, tak po designové stránce. Prototypový díl je možné vyrobit různými způsoby a různými technologiemi, ať už se jedná o obrábění, tváření, svařování, nebo odlévání. Každá metoda má své výhody a nevýhody a je více či méně vhodná na různé konkrétní realizace. Návrh prototypového dílu od počáteční myšlenky po konečný funkční výrobek je proto vykoupěn odpovídající cenou, která společně s časem potřebným ke zhotovení prototypu hraje u zákazníka výraznou roli. Jednou z možností, jak kvalitně prototypový výrobek zhotovit je pomocí vakuového lití do silikonové formy. Pro její výrobu je zapotřebí master model, který se vyrobí pomocí některé z metod Rapid Prototypingu. Za relativně nízké náklady v porovnání s ostatními metodami a za relativně krátkou dobu lze pomocí těchto metod získat hotový výrobek. Lití do silikonových forem slouží k výrobě odlitků v množství několika desítek kusů, než dojde ke znehodnocení formy. Tato nevýhoda ale není ve výrobě prototypového dílu příliš markantní, protože prototyp je vyroben za účelem odzkoušení funkčnosti, vyzkoušení mechanických vlastností, odstranění chyb a případně provedení inovace a není proto potřeba vyrábět velké množství kusů.



Obr. 1 Postup výroby kovového modelu pomocí metody Rapid Prototyping

1 TECHNOLOGIE VÝROBY MODELŮ POMOCÍ TECHNOLOGIE RAPID PROTOTYPING

1.1 Základní technologie RP

Rapid Prototyping (RP) v zásadě slouží k co nejrychlejší tvorbě prototypových dílů a modelů. Jeho vývoj začal v osmdesátých letech, kdy vznikla metoda stereolitografie.

Nyní se tvorba modelů a prototypů směřuje především do oblasti výroby forem a nástrojů. Na významu nabývá také oblast koncepčního konstruování, kdy se ověřují definované vlastnosti budoucího výrobku. Ukazuje se ovšem, že potřebou současných designérů a konstruktérů je pracovat spíše s modelem fyzickým, u kterého se dá snadněji měnit design, odstraňovat případné chyby, kontrolovat smontovatelnost, opravitelnost, ergonomie, nebo provádět funkční zkoušky. Všechny tyto výhody fyzického modelu mají ve finále za následek zrychlení celého procesu vývoje výrobku. Výroba modelů a prototypů klasickými technologiemi je ale velmi náročná a zdoluhavá. Jako nejvhodnější cesta splňující většinu požadavků konstruktéra se jeví RP, což je technologie rychlá a umožňuje přímou vazbu na vývojové prostředí, tedy na CAD/CAM systém.

Celý proces vzniku prototypu začíná u výkresu součásti, který může být buď nakreslený v některém z CAD systémů, nebo může být načtený prostorovým scannerem, ze kterého jsou data následně transformována do formátu STL, který se dále upravuje podle druhu zvolené metody tisku do takové podoby, aby z výstupních dat těchto programů bylo možné model vyrobit. Tento formát je standardní pro zařízení pro rychlou výrobu prototypů. Formát STL je zařazen i do systémů CAD, které vytvářejí plošné nebo objemové modely. Překladač do formátu STL při převodu vnitřních dat do výměnného formátu generuje síť trojúhelníků a aproximuje povrch modelu. Se zvětšováním počtu trojúhelníků klesá relativní velikost a tvar se více přibližuje žádanému tvaru. V mém případě jsem pro tvorbu STL souboru použil program Autodesk Inventor Professional 2011. Na rozdíl od konvenčních metod obrábění, u kterých je materiál z výchozího polotovaru odebírán, je u RP materiál přidáván po vrstvách. Součást je pro výrobu rozdělena pomocí

vhodného programu na velké množství jednotlivých vrstev o tloušťce řádově desetin mm.

V průběhu let se prosadilo hned několik technologií, které pracují na principu modelování pomocí postupného přidávání nebo vytvrzování vrstev materiálu. Mezi tyto technologie, které jsou souhrnně označovány termínem Rapid Prototyping patří: [1,2,6]

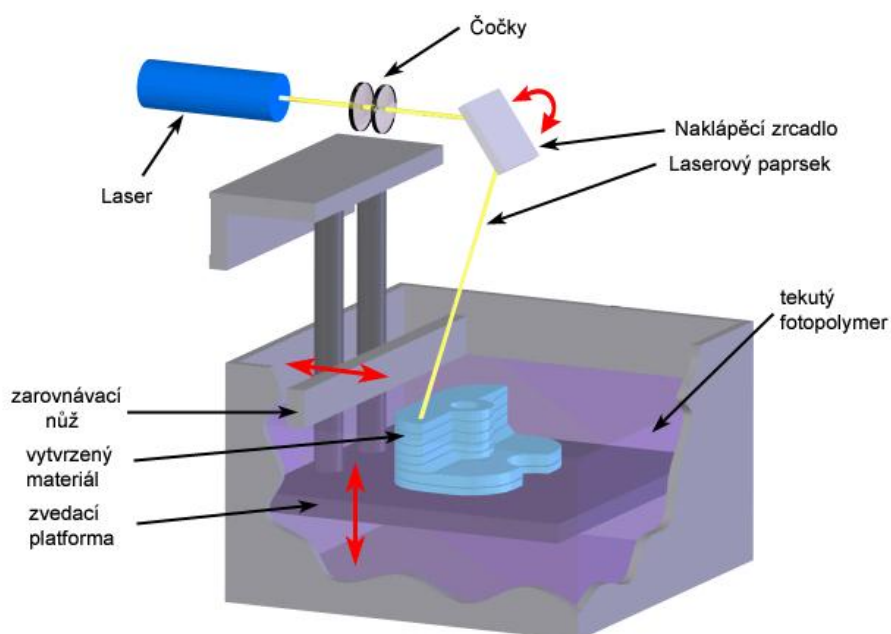
- Stereolitografie (SL)
- Fused Deposition Modelling (FDM)
- Selective Laser Sintering (SLS)
- Multi JET Modeling (MJM)
- Laminated Object Manufacturing (LOM)
- Solid Ground Curing (SGC)
- Three-dimensional printing (3DP)
- Ballistic Particle Manufacturing (BPM)

1.1.1 Stereolitografie (SLA)

Tato metoda je jednou z nejstarších metod výroby prototypu RP. V současné době se SLA rovněž řadí mezi nejpřesnější výroby prototypu. Tato přesnost se pohybuje okolo 0,05 - 0,2mm/100mm. Výhodou je např. možnost výroby forem pro lití a vstřikování, možnost výroby modelu s miniaturními otvory a prvky, nebo rychlý způsob převodu 3D modelu. SLA se rovněž hodně používá v automobilovém průmyslu při výrobě tzv. Data control modelu. Jedná se o nemobilní model auta, na kterém se zkouší různé technologické přípravy, nástroje linky apod. Stroj na výrobu modelu se skládá ze 3 hlavních částí. Tyto části jsou: pracovní komora, řídicí jednotka a opticko-laserový systém. Pracovní komora obsahuje epoxidovou pryskyřici, ve které se pohybuje platforma konající pohyb ve směru osy Z (svislý směr). Počítač je obsažen v řídicí jednotce, která řídí celý proces výroby. Opticko-laserový systém je složen z plynového, nebo pevnolátkového laseru, čoček a soustavy zrcadel, které slouží k usměrnění paprsku.

Stavba SLA modelu je založena na jednotlivém vytvrzování 2D vrstev, které jsou vzaty z předchozího 3D modelu. Tyto vrstvy jsou silné 0,05-0,15mm. O tuto hodnotu je po každém vytvrzení zvednuta platforma. Po každém

vytvrzení jednotlivé vrstvy nůž zarovná hladinu pryskyřice, aby byla dosažena tloušťka další vrstvy. Před zahájením celého procesu se musí model zbavit všech možných chyb. Jsou jimi např. převrácené trojúhelníky, díry v modelu, nebo špatně nadefinované hrany. Následuje volba nejvhodnější polohy modelu z důvodu dokončovacích operací. Model musí být dostatečně upnut k platformě. Toto upnutí zajistíme podporami. Podpory ovšem musí být uvažovány tak, aby se daly po celém procesu odstranit. Po vytvrzení všech vrstev se model vyjme z podpor a následuje očištění a další opracování v UV komoře, kde se modelu dodá požadovaná pevnost a opracovatelnost. [1,3]



Obr. 1.1 Princip stereolitografie (4)

Výhody: zhotovení objemnějších modelů, dostatečná přesnost, výborná jakost povrchu, široký výběr materiálu, plynulý průběh procesu, není potřeba obsluhy během procesu.

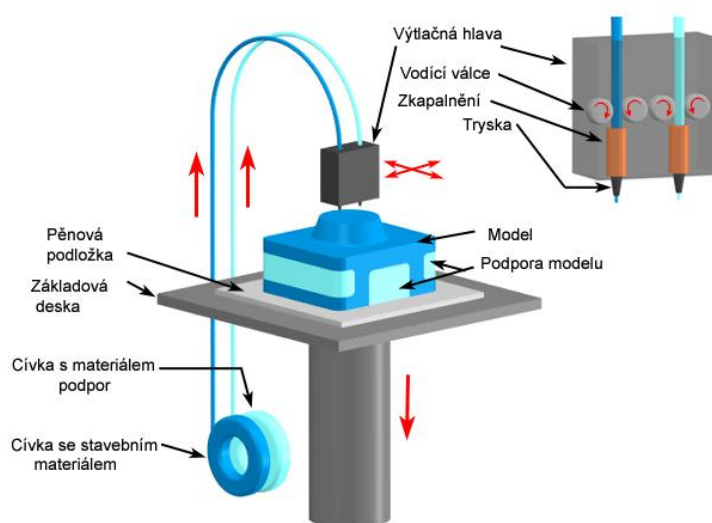
Nevýhody: metoda, která požaduje úpravu modelu po procesu a následné sušení [1]

1.1.2 Fused Deposition Modeling (FDM)

U této metody není použito žádného zdroje záření jako je laser nebo ultrafialový paprsek. Je založena na principu nanášení (vrstvení) termoplastického materiálu, který je vypouštěn z trysek tiskárny.

Při vytváření modelů pomocí technologie FDM, je nejdříve v počítači pomocí softwaru objekt včetně podpěr rozřezán na jednotlivé vrstvy a data o nich odešle přímo do tiskárny. Tam je materiál ve tvaru tenkého drátu o průměru kolem 1,5 mm vtlačován do vyhříváné trysky, která se pohybuje nad pracovním prostorem. V trysce je ohříván na teplotu o 1 °C vyšší než je jeho teplota tavení, ta se pohybuje kolem 260 °C. Při styku s povrchem vytvářené součástky se vlákna vzájemně spojují a vytváří tak požadovanou tenkou vrstvu (cca 0,2 až 0,5 mm), která ihned ztuhne. Součástka se opět vytváří na nosné desce, tato deska se vždy po dokončení jedné vrstvy spustí dolů o tloušťku této vrstvy. Zařízení obsahuje také druhou trysku, která nanáší opěrný materiál.

Zařízení pracující s technologií FDM mohou být využívána také v běžném kancelářském prostředí, protože obsluha je relativně jednoduchá, nevznikají žádné toxické plyny a nepoužívá laser. Vytvořený model má schodovitou strukturu povrchu a po odstranění podpěr vyžaduje povrchové dokončovací operace (broušení, tmelení, stříkání). Na principu technologie FDM pracuje většina tzv. 3D tiskáren. [1,2,6]



Obr. 1.2 Princip FDM metody (7)

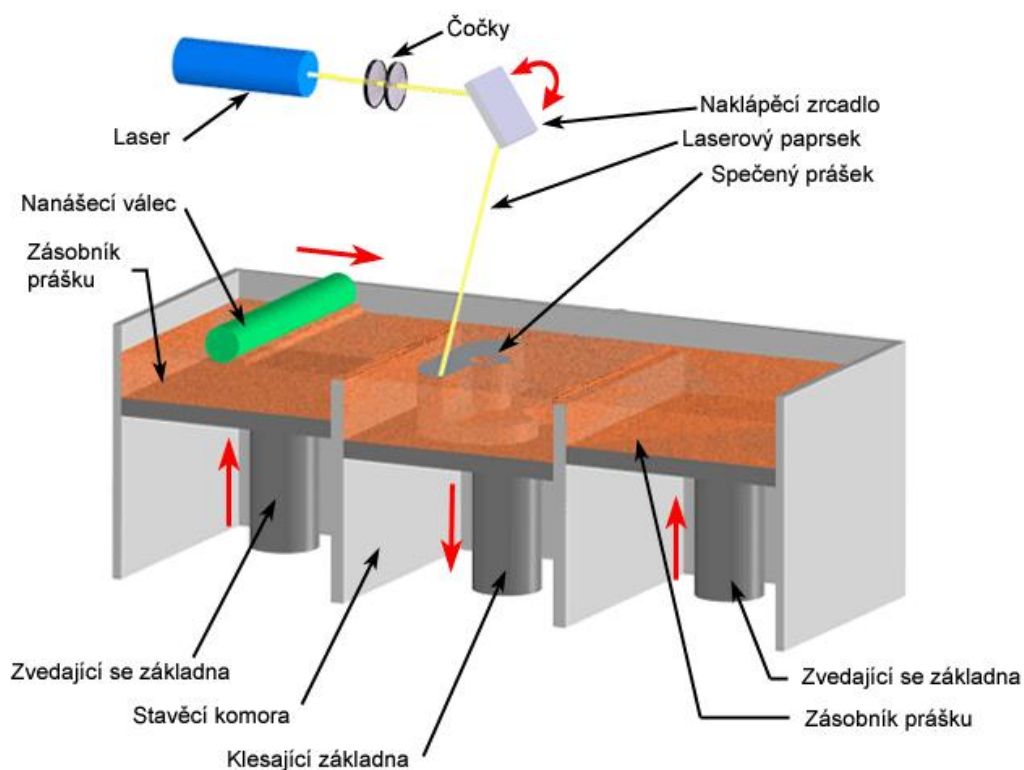
Výhody: zhotovení funkčních částí, minimální odpad, snadné odstranění podpor

Nevýhody: omezená přesnost, pomalý proces, možnost smrštění modelu [1]

1.1.3 Selective Laser Sintering (SLS)

Metoda Selective Laser Sintering má podobný charakter jako metoda STL a taky se řadí do skupiny výroby prototypu na kapalné bázi. Zatímco u STL je primárním materiálem tekutá pryskyřice, u SLS je to prášek. Pro kovové prototypy volíme kovové prášky a pro plastové prototypy volíme polyamidy.

Zařízení pro výrobu modelu touto metodou se skládá ze zásobníku prášku, který je pomocí zvedacího pístu a vyrovnávacího válce dopravován k místu vytvrzení. Po té laser přes optickou soustavu vytvrdí určitý tvar. Po tomto vytvrzení se o příslušnou tloušťku vrstvy posune základna směrem dolů a další proces může začít. Model je umístěn v nevytvrzeném prášku. Z tohoto důvodu není zapotřebí žádných podpor. Po celém procesu vytvrzení musí prášek vychladnout, abychom mohli model z prášku vyjmout. Z důvodu ochrany jakosti povrchu je celá komora uzavřena a naplněna inertním plynem. [1,8]



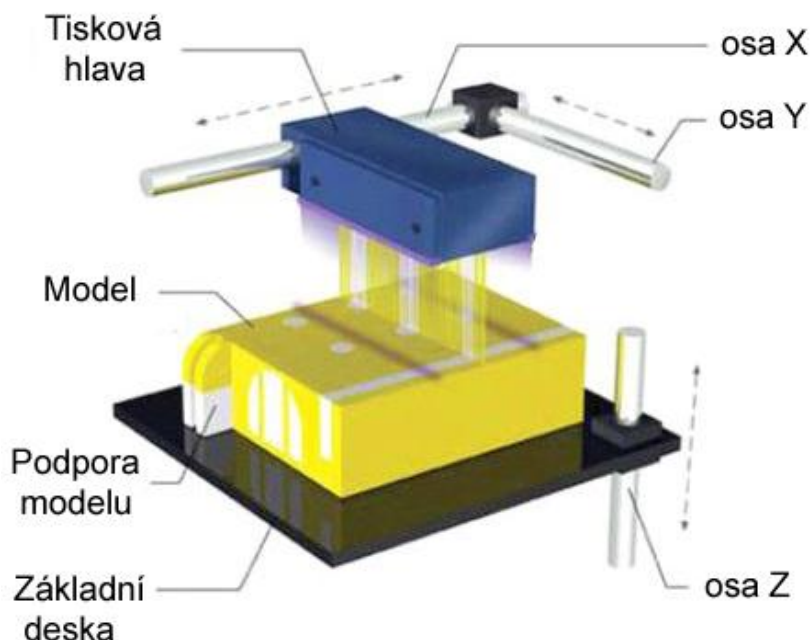
Obr. 1.3 Princip SLS metody (9)

Výhody: dobrá stabilita výrobku, velký rozsah použitých materiálů, není potřeba podpor, nejsou velké požadavky na konečné opracování.

Nevýhody: velké rozměry zařízení, špatná jakost povrchu [1]

1.1.4 Multi JET Modeling (MJM)

Touto technologií jsou nanášeny na sebe vrstvy termoplastu, který je se vypouští ze speciální tiskové hlavy. Tisková hlava je speciální proto, že nemá pouze jednu nebo dvě trysky, ale má jich hned několik set. Každá tryska je samostatně řízena počítačem, který ovlivňuje průtok materiálu. Model se opět vytváří na zvláštní nosné desce podobně jako u Stereolitografie. Protože jsou trysky vedle sebe, tak se tisková hlava pohybuje většinou pouze v jednom směru, ale pokud je vytvářený objekt větší jak šířka tiskové hlavy, tak je nutný i posuv do boku tak, aby bylo zajištěno pokrytí celé vrstvy. Termoplastický materiál je výhodný z důvodu okamžitého ztuhnutí ihned po dopadu na vytvořenou část. [2, 6]



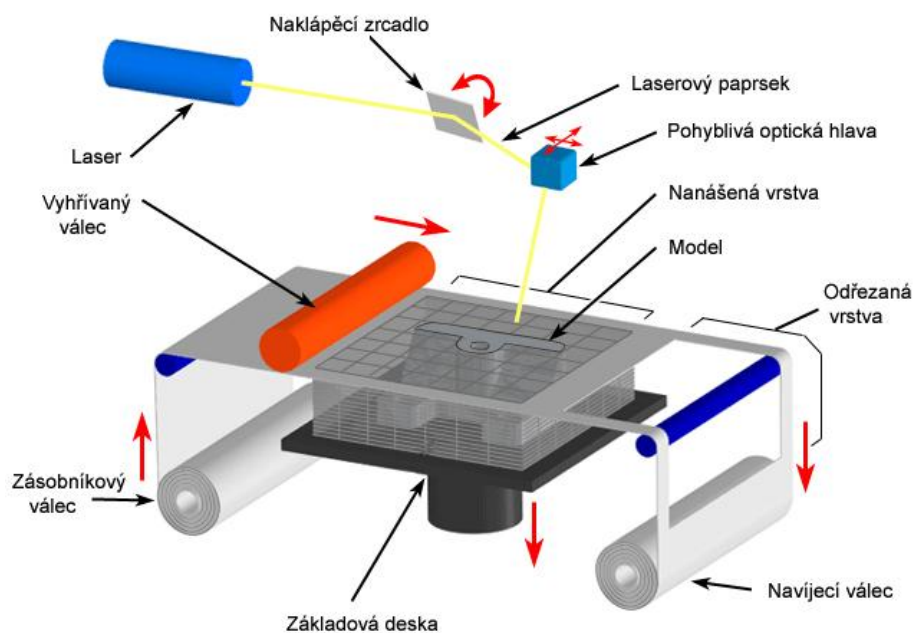
Obr. 1.4 Princip SLS metody (10)

Výhody: lehké a účinné použití, ekonomické, výhodné z časového hlediska

Nevýhody: výroba menších součástí, omezená volba materiálu, nízká přesnost.[1]

1.1.5 Laminated Object Manufacturing (LOM)

Tato metoda spočívá ve vrstvení fólie se zpevňující hmotou. Z válce je odvíjen materiál na základovou desku, na které laser vytvoří požadovaný tvar. Tento laser prochází skrz zrcadlo, které je naklápěcí, přímo na fólii. Toto zrcadlo pracuje se dvěma pracovními osami. Poté vyhřívaný válec přitlačí tuto vrstvu a dojde ke spojení. Zbytek fólie se navine na navijecí válec přes vodící válce. Po skončení tohoto procesu se základová deska posune o jednu výšku vrstvy směrem dolů a nový začíná znovu. [11]



Obr. 1.5 Princip LOM metody (12)

Výhody: Výroba modelu větších rozměrů.

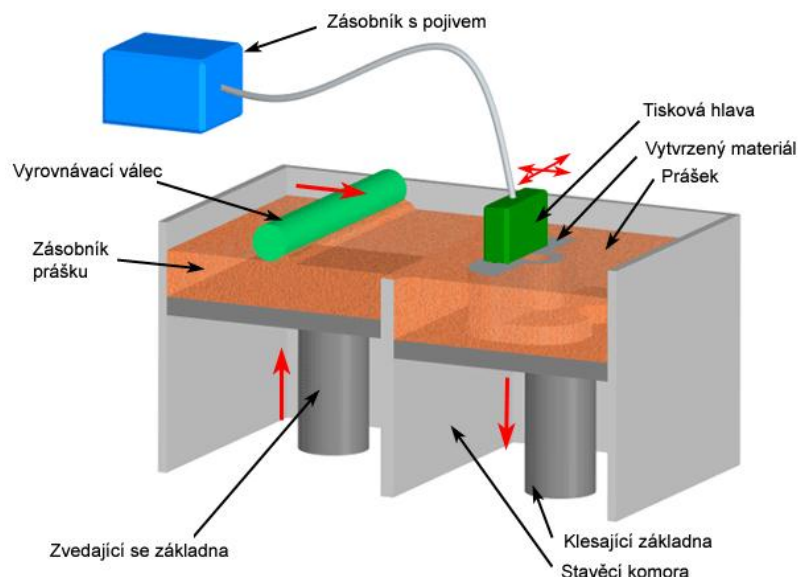
Nevýhoda: Velký odpad (malé procento využití pásu), přesnost [1]

1.1.6 Three-dimensional printing (3DP)

Tato metoda využívá pracuje na podobném principu jako metoda SLS s tím rozdílem, že místo laseru, který spékal tepelnou energií termoplastický prášek, se použije tryska s pojivem, které prášek dokáže také spojit.

Součást se vyrábí ve stavěcí komoře, kam se nanáší pomocí tiskové hlavy prášková vrstva, na kterou je vystřelováno z trysky tekuté pojivo. Pojivo spojí jednotlivá prachová zrna k sobě a dochází ke ztuhnutí a vytvrzení. Následuje pokles pracovní desky směrem dolů o tloušťku vrstvy, pak se opět nanese základní materiál a celý proces se opakuje, dokud není model hotový. V dokončovací fázi je nutné odsát nespojený prášek a očistit hotový prototyp.

Struktura povrchu takto vytvořených modelů je poměrně drsná a dochází k nechtěnému odrolování povrchové vrstvy. Nutné je mít dobré odsávací zařízení pro odsátí prášku z dutin modelu. Tuto metodu lze využívat i pro kancelářské použití a pro tvorbu velmi tvarově složitých součástí v různých barevných provedeních. Velmi časté použití metody 3DP je pro zhotovení keramických skořepin a forem na výrobu odlitků. [2, 6]



Obr. 1.6 Princip 3DP metody (13)

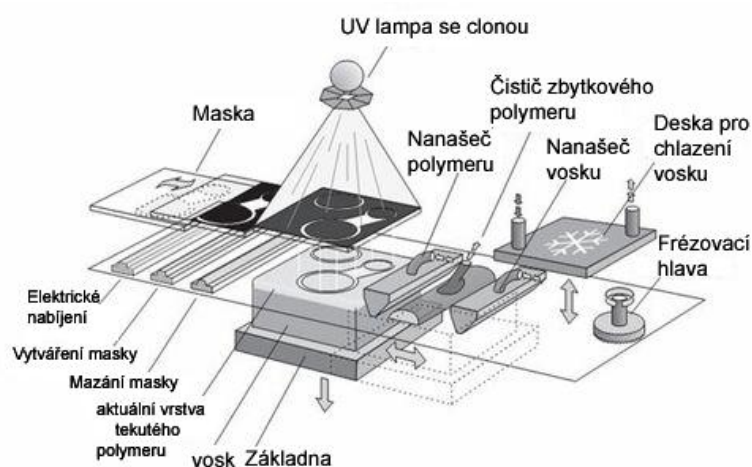
Výhody: vysoká rychlost, široký výběr použití, snadná aplikace, bezodpadová metoda, velký výběr barev.

Nevýhody: modely jsou křehké a nelze na nich provádět zkoušky, omezený výběr materiálu, špatná jakost povrchu. [1]

1.1.7 Solid Ground Curing (SGC)

Metoda využívá podobně jako technologie SLA vlastností fotopolymerní pryskyřice, která je v pracovní komoře ozářena ultrafialovým paprskem a tím dochází ke ztvrdnutí celé vrstvy naráz.

Technologii SGC tvoří tři zařízení: kopírka, SL zařízení a NC frézka. Vytváření tělesa probíhá ve dvou oddělených cyklech, které probíhají současně. Nejprve je vytvořena negativní maska elektrostatickým nanesením barvy na skleněnou destičku, současně se na vyráběnou součást nanese tekutá vrstva fotopolymerní pryskyřice, následuje přesun skleněné desky nad součást a spuštění UV záření. Osvícený fotopolymer ztvrdne, neosvětlený tekutý fotopolymer je odsáván vzduchem a znehodnocen. Vzniklý meziprostor je vyplněn tekutým voskem, který ztuhne. Vosk v okolí vytváří podpory. V dalším kroku je povrch celé vytvořené vrstvy zarovnan na požadovanou výšku vrstvy pomocí frézovací hlavy NC frézky a tím je připravený na nanesení další tenké vrstvy tekutého fotopolymeru. Vosková výplň je na konci procesu odstraněna chemickou cestou. [2, 6]



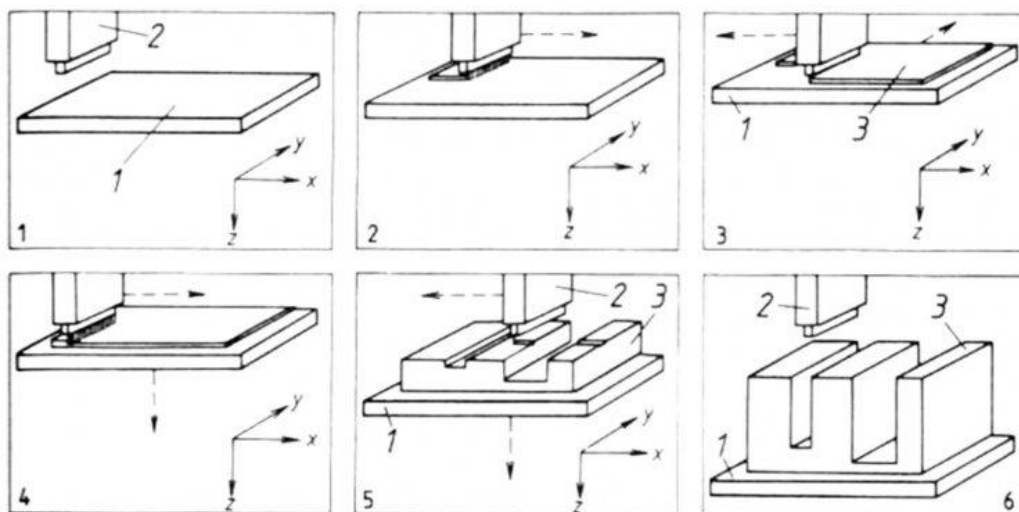
Obr. 1.7 Princip SGC metody (14)

Výhody: minimální smrštění modelu po procesu SGC, dobrá struktura a stabilita modelu, proces, který neprodukuje žádný zápach.

Nevýhody: velké rozměry zařízení, problém s usazeniny vosku, proces vytváří odpad, hlučnost zařízení [1]

1.1.8 Ballistic Particelle Manufacturing (BPM)

Technologie BPM spočívá v nástřiku kapek termoplastu pomocí jedné pracovní hlavy. Využívá principu inkoustových tiskáren. Je založena na tlakovém nanášení termoplastu ve formě kapek a jejich následném vytvrzení. Nanášení materiálu je docíleno tím, že jednotlivé malé kapky materiálu jsou vystřelovány z tlakové hlavy na pracovní plochu a tam ihned po dopadu vytvrzeny. Cíleným nanášením dalších kapek na už nanesený materiál se vyrobí celá trojrozměrná součást. Technologie BPM pracuje pouze s jednou tiskovou hlavou, která má 5 stupňů volnosti. Tato metoda umožňuje vytvářet modely bez podpůrné konstrukce. [15]



Obr. 1.8 Princip BPM metody (15)

1.2 Materiály pro RP

Podle principu metody se využívá také rozdílných materiálů pro výrobu konečného modelu. Tyto materiály se liší v jejich fyzikálních, chemických, tak i estetických vlastnostech.

Stereolitografické materiály

Modely tvořené SL používají ke zhotovení modelu fotopolymerní pryskyřici, která po vytvrzení umožňuje použití mechanických povrchových úprav jako je jemné broušení, pískování, leštění. [2, 16]

Materiály pro Selective Laser Sintering

Výhodou metody SLS oproti ostatním metodám RP je možnost zpracovávat větší spektrum materiálů. Principiálně mohou být zpracovávány všechny teplem tavitelné, případně teplem měknoucí práškové materiály. Standardně je využívána výroba součástí z termoplastických materiálů (polyamid, polyamid plněný skelnými vlákny, polykarbonát), speciální nízkotavitelné kovové slitiny z niklových bronzů a polymerů potažených ocelovým práškem. Nejčastěji se používá speciální práškový polyamid (bez nebo se skleněnou výplní), který se mechanickými vlastnostmi přibližuje vstříkovanému polyamidu. [1, 2, 16]

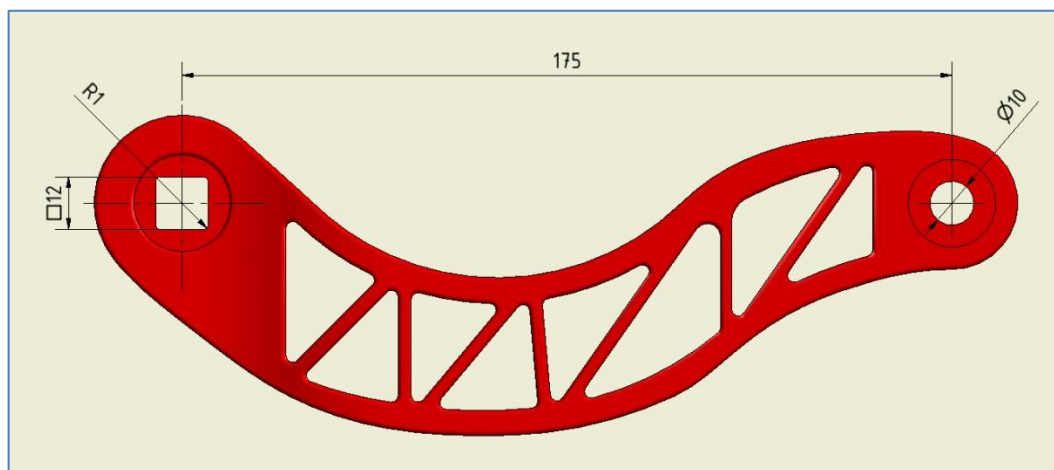
Materiály pro Fused Deposition Modelling (FDM)

Metoda FDM používá materiály na zhotovení prototypových součástí, které jsou inertní a netoxické. Jsou vhodné pro širokou oblast aplikací. Cívky drátu jsou umístěné v kazetách. Mezi nejčastěji používané materiály patří ABS (P400), ABSi (P500), Elastomer (E20) a vosk (ICW06), který se potom ve slévárnách používá v metodě lití pomocí vytavitelného modelu. Není třeba tvorba silikonové formy a model se pomocí RP vytvoří přímo. Materiály ABS a ABSi jsou dodávány v různých barvách nebo modifikacích barev podle přání zákazníka. Změna použitého materiálu může být provedena během několika minut. Součástky zhotovené z materiálu ABS jsou pevné a ve většině případů přímo vhodné pro testování jako funkční prototypy, pro smontování do sestav nebo na vytvoření finálního výrobku. [1,2,16]

2 VÝROBA MASTER MODELU POMOCÍ FDM

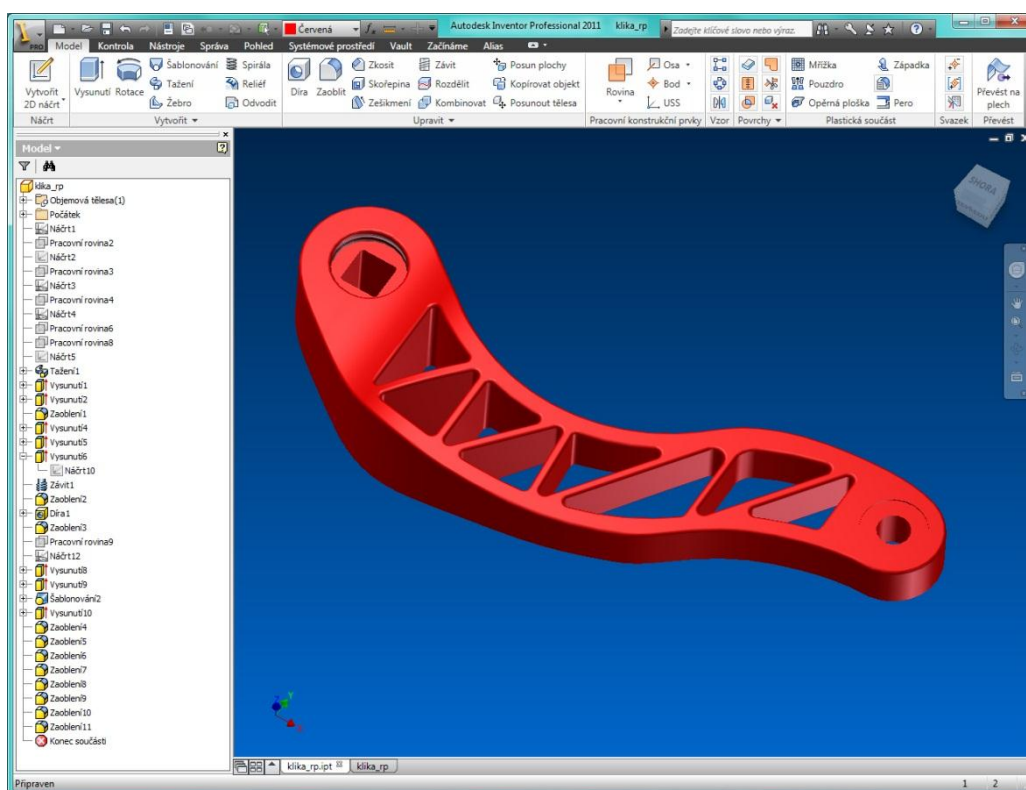
2.1 Tvorba CAD dat

Model je nejprve vytvořen na počítači. K tomuto účelu se využívá 3D modelovací software, jako je například Autodesk Inventor, ProEngineer nebo Catia. V případě této práce byl použit software Autodesk Inventor Professional 2011. Při tvorbě modelu se vycházelo z hlavní, určující vzdálenosti a tou je vzdálenost osy díry pro závit, ve kterém bude našroubován pedál a osy čtvercové díry, která slouží k nasunutí na středovou osu. Tato vzdálenost je 175mm. Další kritérium, které bylo nutné splnit, patří rozměr čtvercové díry Tato velikost je určena středovou osou firmy Kinex, která je běžně k dostání v tuzemských obchodech s cyklistickým vybavením. Strana čtverce má hodnotu 12 mm a rádius je 1mm. Další určující hodnotou je závit M14, na který lze našroubovat většina pedálů používaných na MTB kolech. Při tvorbě 3D modelu kliky byl ale závit na doporučení vynechán a byla vyrobena pouze díra o průměru 10mm.



Obr. 2.1-1 Určující hodnoty kliky

Mezi další funkční rozměry patří závit M22 pro krytku konce osy a dosedací plocha pro pedál o průměru 20mm. Další rozměry kliky byly voleny spíše s ohledem na design a možnosti odlévání.



Obr. 2.1-2 Pracovní prostředí v Autodesk Inventor Professional 2011

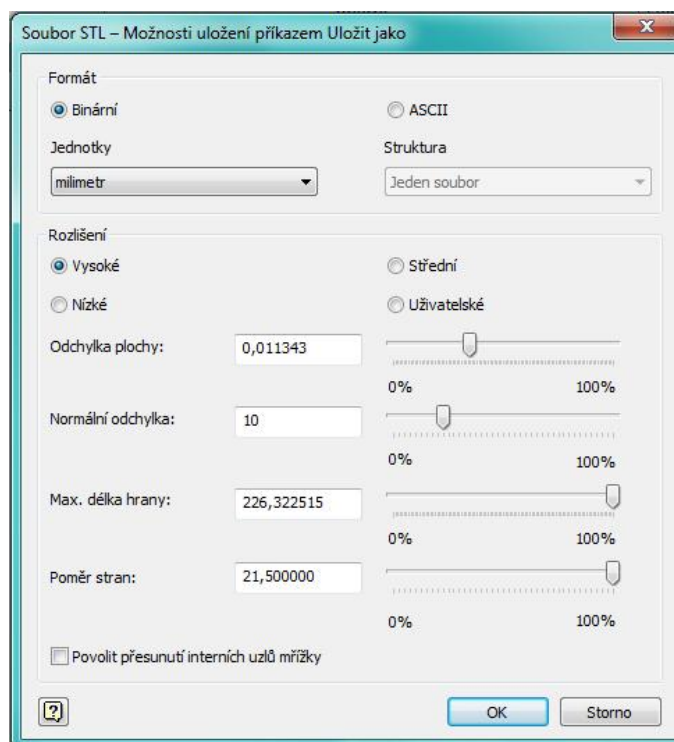
2.2 Preprocessing

Do části preprocessing se řadí všechny kroky, které souvisí s přípravou dat pro Rapid Prototyping. Patří sem transformace dat z CAD systémů do formátu STL, načtení dat v programu CatalystEX, ve kterém jsou potom nastaveny další parametry tisku, jako např. nařezání součásti na tenké vrstvy, volba polohy modelu při tisku a volba podpor, bez kterých by mohlo dojít ke zborcení, nebo deformaci. [18]

2.2.1 Konverze dat do formátu STL

Při konverzi do STL formátu dochází k náhradě geometrického tvaru součásti souborem rovinných trojúhelníkových plošek. Pro systémy RP je nutné, aby tato síť trojúhelníků dokonale uzavírala objem součásti. Formát STL je standardní formát v oblasti tvorby prototypů. Převod dat do tohoto formátu má dnes integrovaný prakticky každý software na trhu a jeho tvorba není pro uživatele nijak náročná. Takto bylo postupováno i v softwaru Autodesk Inventor Professional 2011. Bylo zvoleno maximální možné rozlišení, které program

nabízel pro kvalitní převod formátu tak, aby byly zachovány všechny detaily modelu a nedošlo k nežádoucímu zkreslení, které by mohlo vést k problémům při kompletaci prototypu. [17,18]



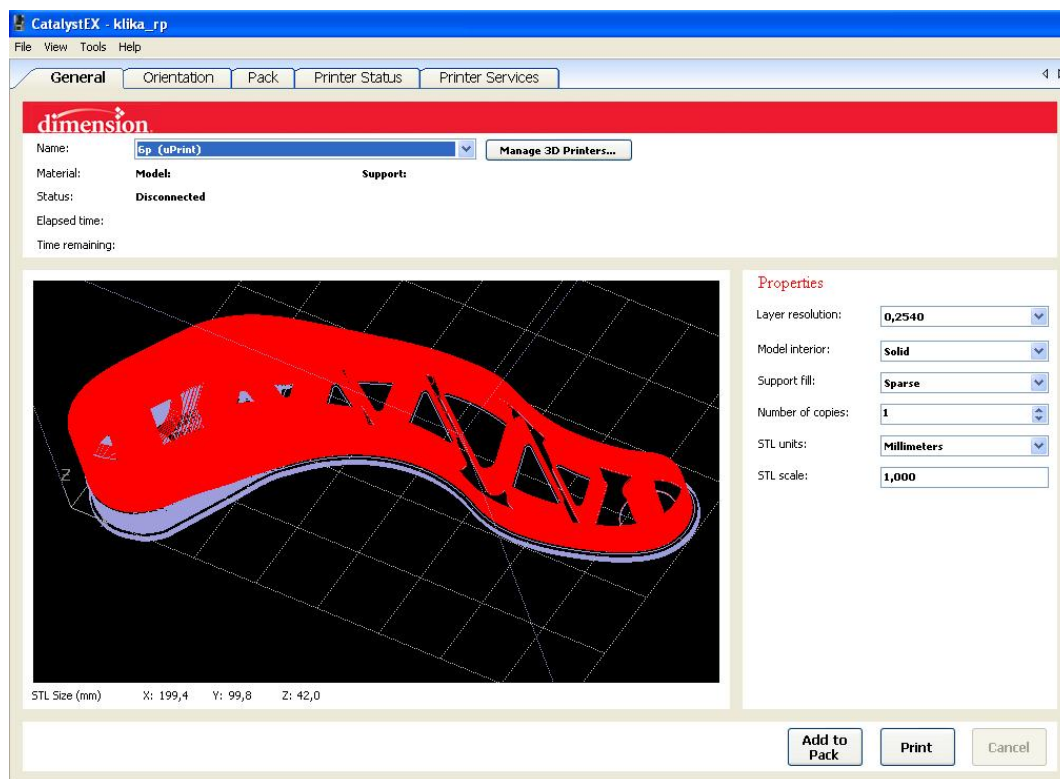
Obr. 2.2-1 Konverzní tabulka do formátu STL v Autodesk Inventor Professional 2011

2.2.2 Načtení dat v programu CatalystEX

Pro výrobu modelu na tiskárně uPrint bylo využito prostředí programu CatalystEX, který je dodáván k tiskárně jako příslušenství. Zde se načte STL soubor v takové pozici, v jaké byl vymodelován v Inventoru. V hlavním okně jsou zobrazeny jednotlivé záložky, které charakterizují model. Tento model se umístí na pracovní desku tiskárny. Další možnosti tisku, jako je tloušťka vrstvy, typ výplně, typ výplně podpory, poloha modelu při tisku a měřítko, je možné nastavit ve vlastnostech tisku.

Tloušťka vrstvy: Definuje průměr vytlačovaného materiálu, který je určen tryskou. U tiskárny uPrint, kterou byl model vytištěn, je průměr vytlačovaného materiálu, respektive tloušťka vrstvy, **0.2540 mm**. Pokud tento parametr není daný tiskárnou a dá se použít jiná tryska, tak se dá ovlivnit především povrch

modelu a čas výroby. Pokud by byla zvolena malá tloušťka, povrch by byl jemnější, ale doba výroby by tomu byla přímo úměrná.

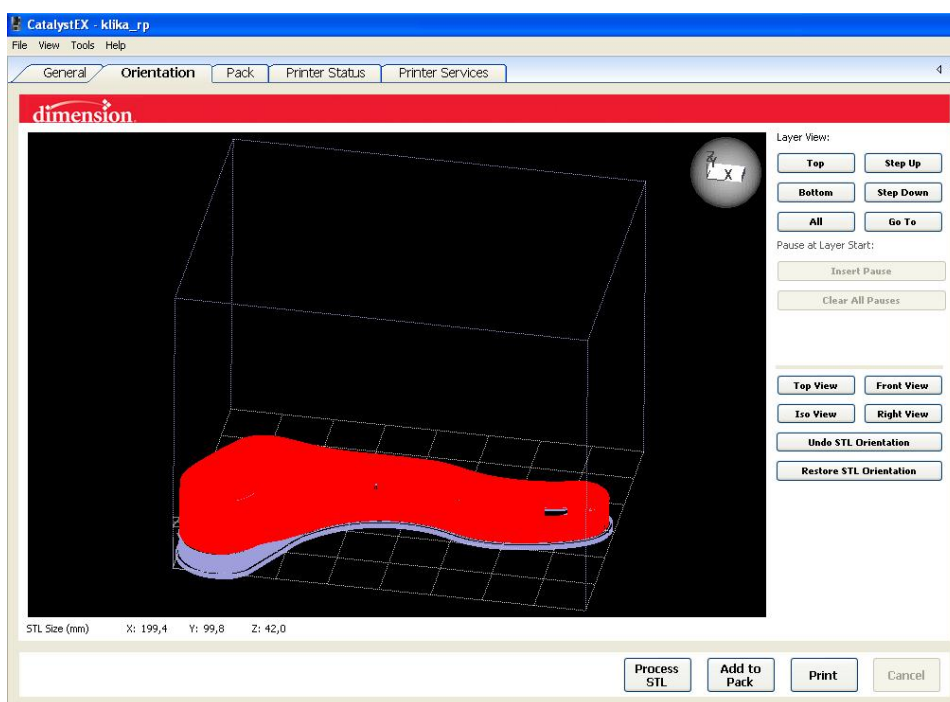


Obr. 2.2-2 Nastavení tloušťky vrstvy a typu výplně v pracovním prostředí CatalystEX

Typ výplně a typ výplně podpory: Toto kritérium určuje, jakým způsobem je model, respektive podpora vyplňována v jednotlivých vrstvách. U tohoto modelu byla zvolena **výplň jednotlivých vrstev pevná a podpora byla zvolena řídká.**

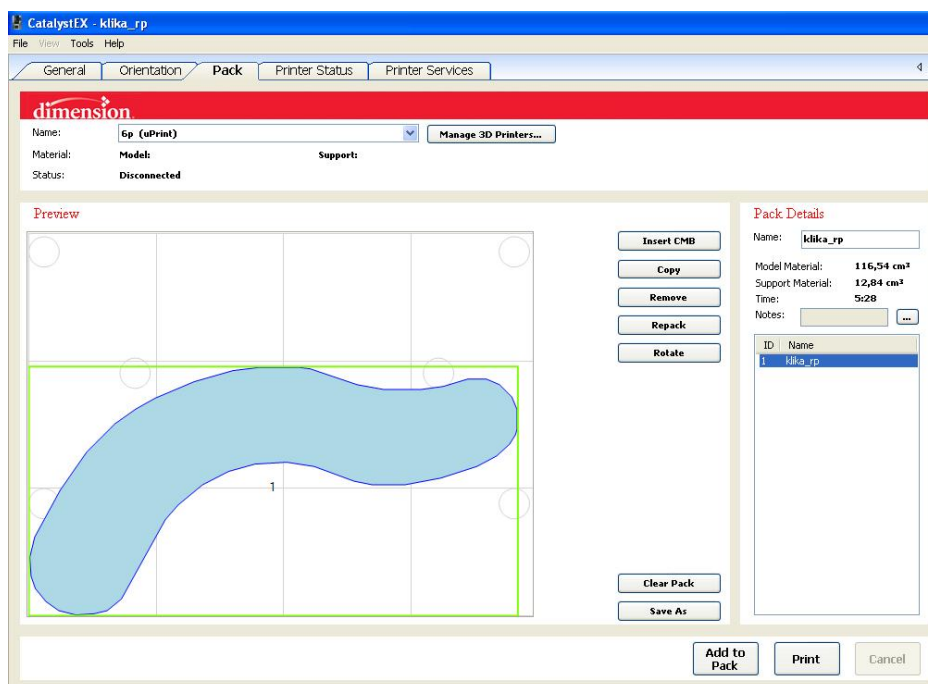
Měřítko a poloha při tisku:

Tyto dva parametry spolu úzce souvisí z toho důvodu, že se model v měřítku 1:1, při tisku na délku, do prostoru pracovní komory FDM tiskárny (viz. Tab. 2.1), která byla k dispozici, těsně nevhleze. Proto bylo zvoleno úhlové pootočení ve směru osy „z“ o hodnotu +20°



Obr. 2.2-3 Nastavení orientace při tisku v pracovním prostředí CatalystEX

Po nastavení výše uvedených vlastností se vypočítá spotřeba materiálu na vytištění modelu, která se dá v prostředí CatalystEX jednoduše zobrazit i s výpočtem času potřebného pro tisk. Tyto parametry jsou uvedeny v tabulce 2.2



Obr. 2.2-4 Výpočet času a spotřeby materiálu v pracovním prostředí CatalystEX

Tab.2.2 Název tabulky (zdroj)

Spotřeba materiálu na model	116,54 cm ³
Spotřeba materiálu na podpor	12,84 cm ³
Celková spotřeba materiálu	129,38 cm ³
Doba tisku	5 hodin 28 minut

Pro porovnání byl zpracován také výpočet tisku modelu v měřítku 1:2 a to ve dvou variantách. **Varianta číslo 1.** – tisk modelu na výšku: Při uvažování této varianty bylo použito více materiálu, jehož celková spotřeba by činila **24,56 cm³**. Výhodou této varianty by ale bylo dosažení lepší kvality povrchu. **Varianta číslo 2.** – tisk modelu na délku: V této variantě by došlo k ušetření spotřeby materiálu na úkor kvality povrchu. Tato spotřeba by byla **17,88 cm³**.

Tato připravená data se již jen odeslala do tiskárny a tiskárna ukázala, jestli je v zásobníku dostatek materiálu pro vytištění modelu.

2.3 Processing

Vytištění modelu proběhlo na tiskárně uPrint od firmy Stratasys. Parametry tiskárny jsou uvedeny v tabulce 2.3.

Tab.2.3 Parametry tiskárny uPrint (19)

Hmotnost	76 kg
Rozměry	635x660x787 [mm]
Modelovací prostor	203x152x152 [mm]
Modelovací materiál	ABS <i>plus</i>
Tloušťka vrstvy	0,254 [mm]
Napájení	220 – 240 VAC 50/60 Hz
Certifikáty	CE / ETL / RoHS / WEEE
Podporované operační systémy	Windows®XP / Windows Vista®
Softwarové vybavení	CatalystEX

Do tiskárny se vloží deska, na kterou se model bude tisknout. Poté se tisk spustí tlačítkem na ovládacím panelu. Tiskárna si desku automaticky zkalibruje a začne nahřívat prostor tiskárny na cca 80°C a poté zahřátí

tiskových hlav na teplotu cca 280°C. Tento proces trvá přibližně 15 minut. První se vytiskne vrstva z podpůrného materiálu, na kterou se tiskne model. Poté, co je model vytištěn, se vyjme nosná deska z pracovního prostoru a může začít tzv. Postprocessing.



Obr. 2.3 Tiskárna uPrint při tisku master modelu kliky

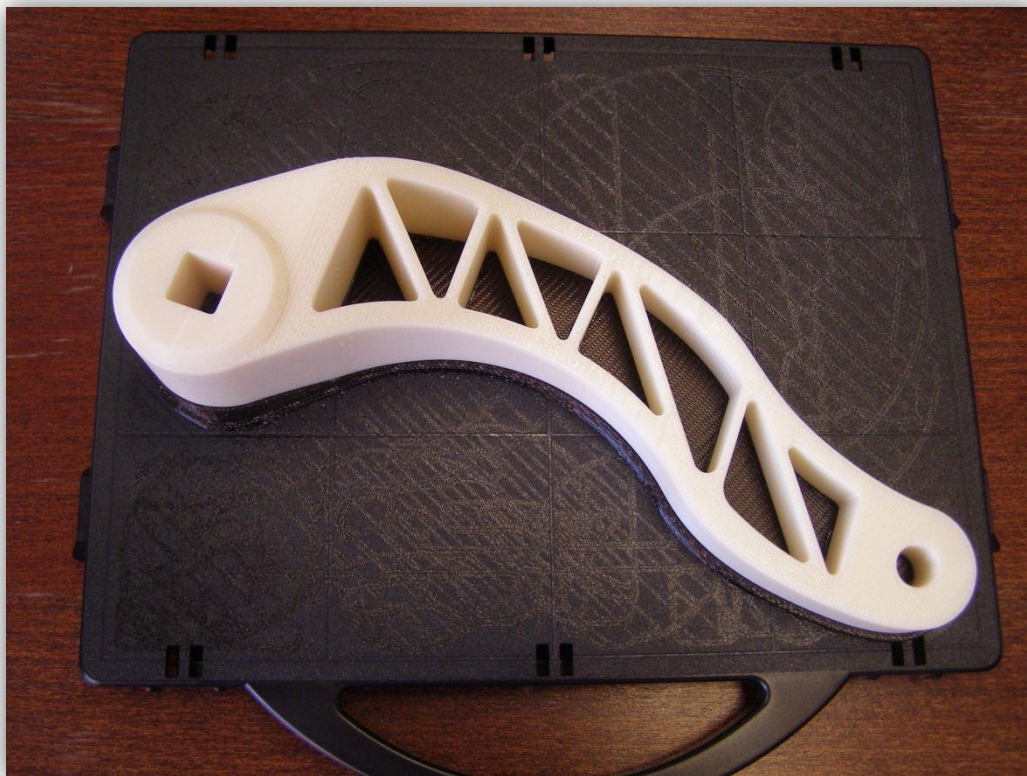
2.4 Postprocessing

Poslední část výroby master modelu se nazývá postprocessing. Do ní patří všechny kroky spojené s úpravami vytištěného modelu. Při tvorbě master modelu kliky na kolo bylo první nutné odstranit podpory a dále povrch mechanicky upravit. Na konci došlo ještě k povrchové úpravě modelu.

2.4.1 Odstranění podpor

Odstranění podpor byl první krok, který byl proveden po vyjmutí modelu z pracovní komory tiskárny. Odstranění bylo provedeno první mechanicky, prostým odlomením, což proběhlo, až na některé části, bez větších problémů.

Mechanicky se ovšem nepodařilo podpory dokonale odstranit, proto došlo k rozpuštění zbytku materiálu podpory v tekuté lázni.



Obr. 2.4 Model s podporou na podložce 3D tiskárny po vytisknutí

2.4.2 Broušení

Vzhledem k tomu, že výška vrstvy při použití tiskárny uPrint byla 0,254mm vznikla „schodečková“ struktura, která byla potřeba odstranit. Toto odstranění proběhlo mechanicky. Nejprve se použil rychleschnoucí nátěrový tmel ve formě spreje, který slouží k zarovnání malých nerovností. Nejprve bylo třeba tmel protřepat a poté nanášet ze vzdálenosti 25-35 cm od modelu. Takovým způsobem byly nanесeny tři vrstvy tohoto tmelu a po zaschnutí, které probíhalo 24 hodin se model vybrousil na suchu pomocí smirkového papíru o hustotě 150 zrn/cm². Takto proběhlo odstranění hrubé struktury a byly nanесeny další dvě vrstvy tmelu. Následné broušení již probíhalo pod vodou nejprve smirkovým papírem o hustotě 400 zrn/cm² a následně „na čisto“

smirkovým papírem o hustotě 600 zrn/cm². Takto upravený model má již dostatečně dobrou drsnost povrchu.



Obr. 2.4 Tmelení a následné broušení

3 VÝROBA VOSKOVÉHO MODELU

3.1 Výroba silikonové formy

Silikonových forem se využívá především pro výrobu několika kusů odlitků. Její životnost závisí na druhu použitého silikonu a na druhu odlévaného materiálu. S rostoucím počtem odlitých kusů roste opotřebení formy, a přesnost rozměrů. [18]

3.1.1 Prostředky nutné ke zhotovení formy

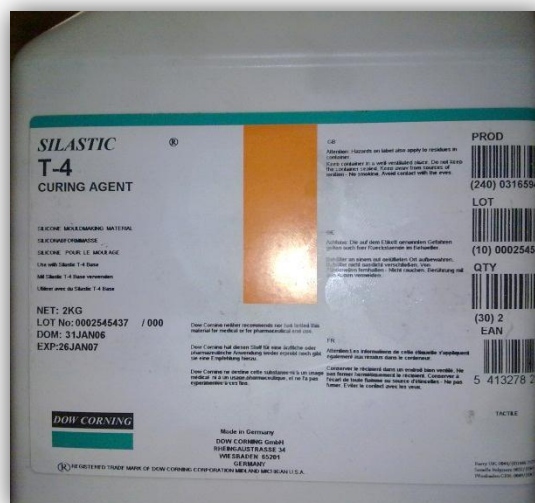
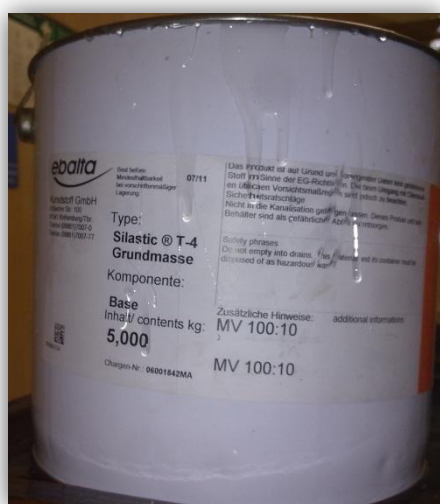
Master model: Model byl nejprve vytisknut na RP tiskárně a následně povrchově upraven. Popis tvorby modelu viz. kapitola DOPLNIT

Modelovací hmota: Pro tvorbu formy bylo nutné zajistit, aby silikon nezatekl tam, kde nebylo vhodné. K tomu byla využita modelína pro děti.

Skleněné desky: Pro vymezení vnějšího tvaru formy se bylo použito pět skleněných desek.

Tavná pistole: Ke spojování skleněných desek bylo použito tavné pistole s válcovými náplněmi z termoplastu, který rychle tuhne.

Silikonový elastomer: Pro tvorbu silikonové směsi byl použit silikon SILASTIC T-4 a tvrdidlo T-4. Ve Tvrdidle jsou obsaženy oleje, díky nimž nedochází k přilnutí vosku k povrchu formy.



Obr. 3.1-1 Použitý silikonový elastomer Silastic T-4 a tvrdidlo T-4

Váhy: Slouží pro navážení potřebného množství silikonu a tvrdidla. Byly použity digitální váhy Shinko Denshi Vibra SJ.



Obr. 3.1-2 Váhy Shinko Denshi Vibra SJ pro navážení silikonové směsi

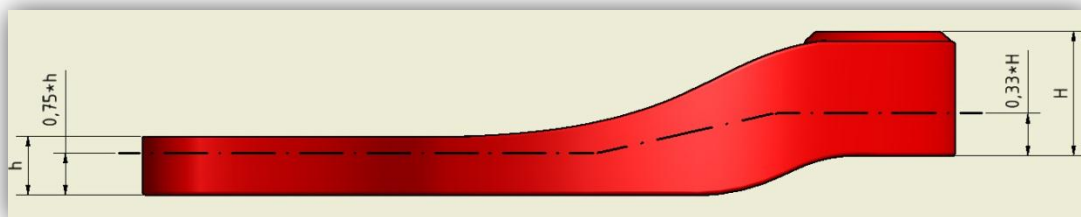
Vakuová licí komora: Vakuování proběhlo ve vakuovém licím systému MK Mini od společnosti MK Technology GmbH. Systém je opatřen licím kelímkem s ohřevem. Tato komora slouží k vyvakuování silikonového elastomeru a voskové směsi.

Separční prostředek: Je vyráběn výrobcem silikonu a slouží ke snadnějšímu oddělení horního a spodního dílu.

Kovové spony: Byly použity z důvodu zpevnění formy v dělicí rovině.

3.1.2 Postup výroby

Vybroušený model se použije pro tvorbu silikonové formy. Nejprve byl vytvořen pomocí skleněných desek vnější tvar formy. Tyto desky se uspořádaly do tvaru kvádrů s pomocí tavné pistole. Vzhledem ke tvaru modelu kliky bylo rozhodnuto, že forma bude dvoudílná a dělicí rovina formy bude dle obr. 3.1-1.



Obr. 3.1-3 Přibližné znázornění dělicí roviny

Následně se pomocí modelovací hmoty připravil tvar prvního dílu formy pro odlití. Modelovací hmota byla nejprve zahřata v peci cca na teplotu 30°C , aby změkla, což usnadňuje její formování. Nejprve se na skleněnou podložku nanasla přibližně centimetrová vrstva modelovací hmoty.



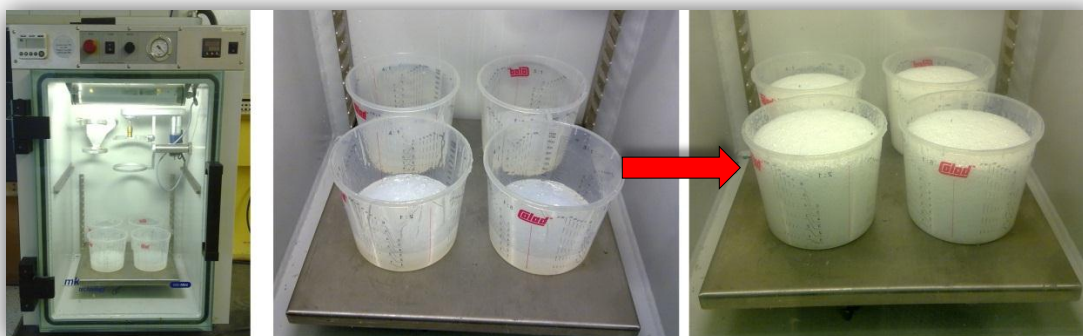
Obr. 3.1-4 Vnější tvar formy

Do modelovací hmoty byl model zatlačen tak, aby modelovací hmota co nejlépe přilnula k povrchu modelu. Následně se pomocí modelovací hmoty vytvořila dělicí rovina dle obrázku 3.1-3 a utěsnila se místa, která neměla být zaplavena silikonem. Další úpravou dělicí roviny bylo vytvoření zářezů v dělicí rovině. Tyto zářezy slouží k lepší orientaci spodního dílu formy při jejím sestavování. Poté se z modelovací hmoty vytvořily válečky, které se umístily na model a tím se vytvořil vtokový kanálek a dva výfukové.



Obr. 3.1-5 Zaformování modelu s vtokovým a výfukovými kanálky

Po sestavení rámu následovala příprava silikonové směsi. Po změření rozměrů rámu se přibližně určil objem vrchního dílu formy. Z něho se potom vycházelo při vážení základní složky silikonu a tvrdidla. Tato směs je v poměru 10:1, a to 10 hmotnostních dílů silikonu a jeden hmotnostní díl tvrdidla. Po dostatečném promíchání následoval proces vakuování. Ten spočíval ve vložení nádob se směsí do vakuové komory. Po důkladném uzavření se odsál vzduch a vzniklo vakuum, což se projevilo zvětšováním objemu a k jeho smršťování vlivem odplynění. Tím byla směs zbavena všech bublin, což by způsobovalo zhoršení vnitřní struktury a případná dutá místa v podobě bublin.



Obr. 3.1-6 Proces vakuování silikonové směsi

Proces vakuování trval 20minut. Ihned po vakuování se model zalil. Dále následovalo vytvrzení na vzduchu při pokojové teplotě 24hodin.



Obr. 3.1-7 Odlitá vrchní část formy

Po vytvrzení bylo nejprve třeba rozebrat skleněný rám, formu otočit a z dělicí roviny ostrým nožem odstranit zbytky modelovací hmoty a nepřesnosti, které byly způsobeny nerovně vyrobeným povrchem z modelovací hmoty. Dále byly do dělicí roviny přidány vodící kolíky, které měly za úkol mimo dodržení přesného dosednutí protikusu formy také zpevnění formy.



Obr. 3.1-8 Vrchní část s vodícími kolíky a znázorněnými dírami k předlévání

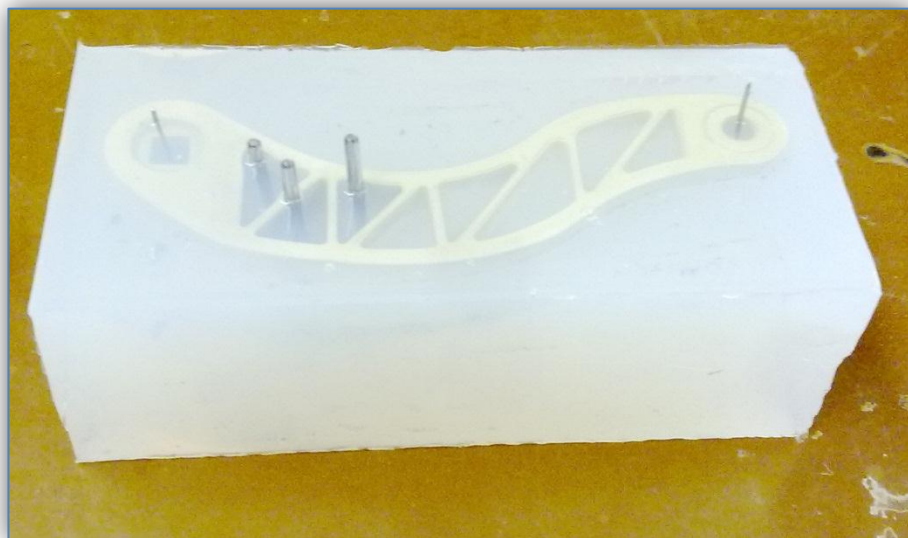
Dalším krokem bylo předlití třech děr (znázorněny v obrázku 3.1-8 červeně) vzhledem k jejich zápornému zkosení, které by bránilo rozebrání formy a vyjmutí master modelu. Předlití těchto děr probíhalo stejným způsobem, jako lití vrchního dílu formy popsaného výše.

Po 24 hodinách se forma rozebrala, důkladně se očistil master model od zbytků silikonu, a opět složila. Takto nachystaná vrchní polovina formy byla opět ohraničena skleněnými deskami. Proto, aby se spodní díl formy po ztuhnutí snadněji odděloval od spodního, byl použit separační prostředek dodávaný výrobcem silikonu.



Obr. 3.1-9 Nanášení separátoru na vrchní polovinu formy s předlitými dírami

Na takto připravenou vrchní část formy se již jen nalila připravená silikonová směs stejně jako při zhotovování vrchní části a předlévání děr. Po rozebrání skleněného rámu a vyjmutí kompletní silikonové formy byla forma připravena k odlévání voskového modelu.



Obr. 3.1-10 Hotová silikonová forma

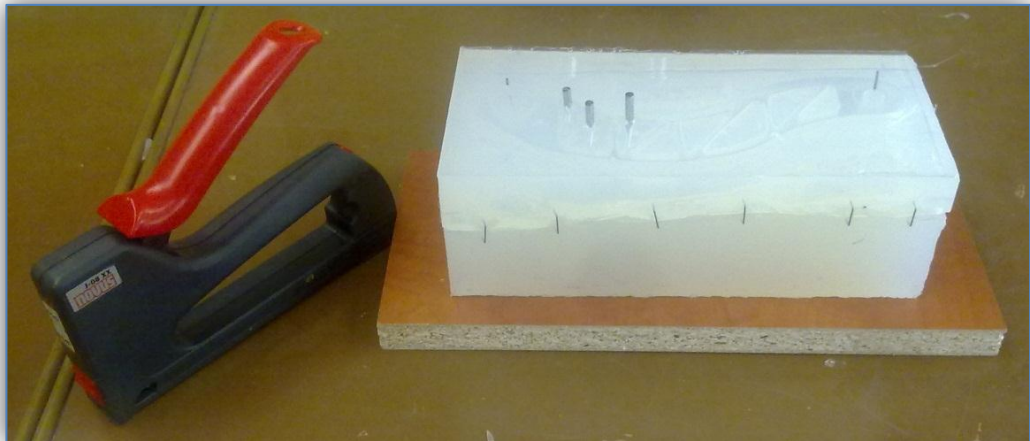
3.2 Výroba voskového modelu

Výroba voskového modelu spočívá v roztavení vosku do dutiny nachystané silikonové formy. Při odlévání voskového modelu kliky byl použit vosk s označení Core wax od firmy Bleyson, který je vyroben speciálně pro výrobu forem pomocí vytavitelného modelu. Tento vosk byl ve vakuové lici komoře rozpuštěn při teplotě 97°C a důkladně promíchán. Mimo vosku bylo třeba zahřát také rozebranou silikonovou formu na teplotu 80°C.



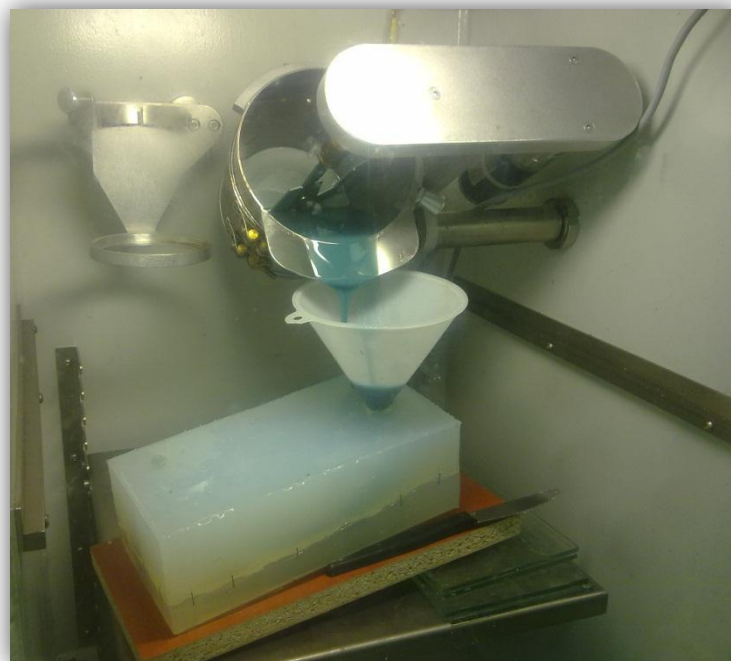
Obr. 3.2-1 Zahřívání formy

Zahřátí formy na tuto teplotu je aplikováno z toho důvodu, aby roztavený vosk neztuhl hned při prvním kontaktu s formou. Pokud by se tak stalo, mohlo dojít k zatuhnutí vosku již ve vtokové soustavě a vosk by nezatekl do míst, kde je to žádoucí, což by vedlo k vyrobení zmetkového kusu. Po zahřátí formy na požadovanou teplotu bylo potřeba všechny kusy formy složit a zajistit proti posunutí vodícími kolíky a nastřelovacími sponami



Obr. 3.2-2 Forma připravená k odlévání voskového modelu

Když je forma složená a zahřátá na požadovanou teplotu a vosk je v tekutém stavu důkladně promíchán, nasadí se na vtokový kanál vtokový trychtýř a je možné přistoupit k samotnému odlévání. Takto nachystaná forma se vložila do vakuové komory. Pro lepší zatékání vosku do formy byl zvolen náklon přibližně 15° . Následně se zapnulo odsávání vzduchu, aby vznikl podtlak -0.6 bar. Tím bylo dosaženo vysání vzduchu z formy a mohl být nalit roztavený vosk.



Obr. 3.2-3 Nalévání vosku ve vakuové komoře

Vosk při běžných podmínkách tuhne 24 hodin. Pokud je požadováno zkrácení doby čekání, je možné vložit formu s voskem do ledničky. Potom se tento čas zkrátí přibližně na 2 hodiny. Po uplynutí této doby se forma opět rozebere a vyjme se voskový model. Z něj následně ve slévárně pomocí metody vytavitelného modelu udělají koncový kovový model.

Tab.2.3 Parametry vakuovacího liciho systému MK Mini (20)

rozměry zařízení	640 x 600 x 1000 mm
rozměry pracovního prostoru	450 x 470 x 700 mm
hmotnost	250 kg
výkon	0,9 kW
napájení	230 V/50 Hz
objem liciho kelímku	1,2 l
teplota ohřevu liciho kelímku	max. 150°C



Obr. 3.2-4 Konečný voskový model

4 SROVNÁNÍ SE STANDARDNÍ TECHNOLOGIÍ VÝROBY DÍLU

Výroba voskových modelů pro technologii lití pomocí vytavitelného modelu se provádí, mimo výše popsanou metodou silikonové formy, vstřikováním vosku do formy, což je hlavní metoda výroby voskových modelů. Výroba se provádí na speciálních vstřikovacích lisách, které vstřikují roztavený vosk pod tlakem do formy. Teplota vosku při vstřikování je v rozmezí 55 – 90°C. Po ztuhnutí je model vyjmut z formy. Vstřikovací lisy jsou klasifikovány dle stavu vosku, který je stroj schopný vstřikovat. Existují tři základní typy strojů pracujících s voskem: tekutým, kašovitým a pevným. Vstřikovací stroj pracující s tekutým voskem obsahuje ohřívaný zásobník vosku, v němž je vosk promícháván. Vosk je dále přepravován ze zásobníku do vstřikovacího válce pomocí tlaku vytvořeného hydraulickým nebo pneumatickým válcem. Když je vstřikovací válec plný, dojde k uzavření ventilů na vstřikovací jednotce a tím k oddělení vstřikovací jednotky od zásobníku, stroj je pak připraven k vstřikování. Forma je vložena a upnuta do stroje. Po dosažení potřebného tlaku ke spojení formy stlačí vstřikovací válec dle předem nastaveného tlaku vosk do vstřikovací jednotky. Vstřikovací trysky se přesunou dopředu a spojí s formou, poté se otevře vnitřní ventil trysky, kterým bude roztavený vosk proudit do formy. Stroj po vstřiknutí vosku dále působí tlakem dle předem určené doby výdrže, vosk ztuhne a zchladne až do stavu, v kterém může být vyjmut z formy. Na konci cyklu vstřikovací jednotka sníží tlak, otevře se forma a vyjme se model. Tento vstřikovací stroj je nejvíce používán v dnešních slévárnách přesného lití na vytavitelný model. [21]



Obr. 4 Vstřikovací lis pro voskové modely (22)

4.1 Omezení

Hlavním omezením technologie vakuového lití do silikonové formy spočívá v omezení série výrobků, která se ekonomicky vyplatí. Výroba prototypového dílu vakuovým litím se vyplatí jen u malých sérií výrobků. Pro větší série se využívá vstřikovacího stroje pracujícího s tekutým voskem. Jeho výhodou je v čerpání vosku přes potrubí centrálního zásobovacího systému do stroje, což má za následek snadné udržení stavu vosku ve stroji a minimální podíl lidských zásahů. [21]

4.2 Přednosti

Vakuové lití patří mezi technologie Rapid Prototypingu, která umožňuje rychle získat funkční prototyp a tím urychlit proces vývoje nového výrobku. Vhodné využití této technologie je např. v malosériové výrobě náhradních dílů, pro které již nejsou dostupná původní výrobní zařízení.

Přednosti technologie vakuového lití

- Možnost odlévání tvarově složitých dílů, tenkostěnných dílů nebo dílů s negativními úkosy.
- Schopnost věrně kopírovat povrch master modelu
- Příznivé náklady na výrobu ve srovnání se vstřikováním voskových směsí – není nutné vyrábět kovové formy.
- Velmi rychlá výroba – v řádu dnů.
- Přesná výroba srovnatelná s přesností dílů vyrobených metodou vstřikování voskových směsí.
- Široké možnosti finální povrchové úpravy dílů.
- Prototypový díl je velmi rychle k dispozici
- Možnost odhalení chyb v konstrukci [23]

ZÁVĚR

V této práci byla řešena problematika výroby prototypového dílu kliky jízdního kola. Klika na jízdním kole slouží k převodu lidské síly na zuby převodníku, který pomocí řetězu pohání pastorek na zadním kole, čímž dochází k pohonu jízdního kola. Při konstrukci prototypového dílu kliky se vycházelo ze standardizované vzdálenosti, kterou je vzdálenost osy díry pro pedál a osy díry, do které patří středová osa. Tato středová osa je pevně zasazena do středové díry rámu jízdního kola. Spojení těchto dvou vzdáleností se u všech běžně dostupných klik dosahuje přímým tvarem a díky tomu vypadají všechny tyto komponenty na trhu v zásadě stejně. Cílem této práce bylo tedy vyrobit prototyp kliky, která by byla naprosto funkční, ale tvarově se odlišovala, což by pro konečného zákazníka mohlo být zajímavé. Tvar kliky byl nejdříve navrhnut v 3D modelovacím software Autodesk Inventor Professional 2011. Tato data byla poté využita pro výrobu prototypového dílu na 3D tiskárně FDM metodou Rapid Prototypingu. Tuto metodu jsem si vybral na základě rešerše, která zaujímá první část práce. Master model byl použit pro výrobu silikonové formy, která složila k výrobě voskového modelu. Voskový model byl nakonec odeslán do slévárny, kde byl zhotoven kovový model technologií odlévání pomocí vytavitelného modelu. Cíl práce, tedy vyrobit prototypový díl, byl splněn. Dále by mohla následovat numerická predikce vlastností, odzkoušení mechanických vlastností na fyzickém prototypu, optimalizace tvaru a poté případná sériová výroba dílu. Tyto další kroky ale překračují rámec bakalářské práce, proto se jimi nebylo zabýváno.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. CHUA, C.K., LEONG, K.F., LIM, C.S. *Rapid Prototyping: Principles and applications*, 2. Vyd. London: World Scientific Publishing, 2003. 448 s. ISBN 981-238-117-1[cit. 2011-04-18]
2. PÍŠA, Z. Výukový modul – Rapid Prototyping. [online]. VUT v Brně, Fakulta strojího inženýrství. [cit. 2011-04-18]. Dostupný z WWW: <<http://esf.fme.vutbr.cz/aktivity/akt-05/mod-07/rpt.pdf>>.
3. *Aplikace technologie Rapid Prototyping* [online]. 2001 [cit. 2011-04-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/aplikace-technologieirapid-prototyping>>.ISSN 1212-2572
4. *Custompart.net* [online]. 2009 [cit. 2011-04-18]. Stereolithography. Dostupný z WWW: <<http://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>>.
5. *Fused depocition modeling* [online]. 2205, 07-02-2208 [cit. 2011-04-18]. Dostupný z WWW: <http://home.att.net/~castleisland/fdm_int.htm>
6. NAVRÁTIL, R. Reverse Engineering v praxi. [online]. C2000, [cit.2011-04-18]. Dostupný z WWW: <<http://robo.hyperlink.cz/rapid>>.
7. *Custompart.net* [online]. 2009 [cit. 2011-04-18]. Fused Deposition Modeling (FDM). Dostupný z WWW: <<http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>>.
8. Technologie Rapid Prototypingu [online]. 2001 [cit. 2011-04-19]. Dostupný z WWW: <<http://mmspektrum.com/clanek/technologie-rapid-prototypingu>>. ISSN 1212-2572.
9. *Custompart.net* [online]. 2009 [cit. 2011-04-19]. Selective Laser Sintering. Dostupný z WWW: <<http://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-sintering>>.
10. *Design engineer life* [online]. 2009-2010 [cit. 2011-04-19]. Rapid Prototype Technologies. Dostupné z WWW: <<http://www.designengineerlife.com/wp-content/uploads/2010/06/RP-MultiJetModeling.jpg>>.
11. Nekonvenční metody obrábění [online]. 2001 [cit 2011-04-19]. Dostupný z WWW: < <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-10-DIL>>. ISSN 1212-257.
12. *Custompart.net* [online]. 2009 [cit. 2011-04-19]. Laminated Object Manufacturing (LOM). Dostupný z WWW: <<http://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing>>.

13. *Custompart.net* [online]. 2009 [cit. 2011-05-13]. 3D Printing. Dostupný z WWW: <<http://www.custompartnet.com/wu/3d-printing>>.
14. *Podklad č.11 do cvičení Technologie obrábění*. [online]. [cit. 2011-05-13]. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav Strojírenské technologie - Odbor technologie obrábění. [cit. 2011-05-13]. url: <<http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=podklady>>.
15. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008 [cit. 2011-05-13]. Nekonenční metody obrábění 10. díl. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonenncni-metody-obrabeni-10-dil>>.
16. MATERIALISE, *Materials for prototype manufacturing*. [online]. [cit. 2011-05-13]. URL: <http://www.materialise.be/materialise/view/en/91947-Materials.html#ppt_1467-614>.
17. *STL CAD fines for Rapid Prototyping*. [online]. 2009 [cit. 2011-05-13]. Dostupný z WWW: <http://www.engineersedge.com/stl_rapid_proto.htm 6>
18. DRÁPELA, Miloslav. *Modul Rapid Prototyping* [online]. [cit. 2011-05-13] URL:<<http://www.vu.vutbr.cz/digidesign/Moduly/Rapid%20Prototyping%20-%20Ing.%20Milosvav%20Dr%C3%A1pela.pdf>> .
19. *B3-D Mcad Consulting/Sales LLC 3D Digitizing. Dimension* [online]. 2009 [cit. 2011-05-14]. B3-D Mcad Consulting/Sales LLC 3D Digitizing, Reverse Engineering and Portable Inspection California. Dostupné z WWW: <<http://www.b3-d.com/Products/dimension/Dimension.htm>>.
20. *MCAE Systems* [online]. 2011 [cit. 2011-05-25]. MK Mini. Dostupné z WWW: <<http://www.mcae.cz/mk-mini>>.
21. HERMAN, Aleš. *Lití na vytavitelný model* [online]. [cit. 2011-05-25]. [cit. 2010-03-29]. <<http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/MPL/presne%20liti-%20na%20vytavitelny%20model.pdf>>.
22. *KDYNIUM a.s.* [online]. 2002 [cit. 2011-05-25]. Lisování voskových modelů. Dostupné z WWW: <http://www.kdynium.cz/cesky.asp?pid=p2d2>>.
23. *MCAE Systems* [online]. 2011 [cit. 2011-05-25]. Vakuové lití. Dostupné z WWW: <<http://www.mcae.cz/vakuove-liti>>.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol		Popis
RP	-	Rapid Prototyping
2D	-	Two-Dimensional
3D	-	Three-Dimensional
SLA	-	Stereolithography
FDM	-	Fused Deposition Modelling
SLS	-	Selective Laser Sintering
MJM	-	Multi Jet Modelling
LOM	-	Laminated Object Manufacturing
3DP	-	Three-Dimensional Printing
SGC	-	Solid Ground Curing
BPM	-	Ballistic Particle Manufacturing
CAD	-	Computer Aided Design
CAM	-	Communication Access Method
ABS	-	Acrylonitrille Butadiene Styrene
STL	-	Formát souboru pro RP
MTB	-	Mountain Bike