



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

NÁVRH TECHNOLOGIE VÝROBY FORMY NA ODLÉVÁNÍ DÍLU V MALOSÉRIOVÉ VÝROBĚ

DESIGN OF TECHNOLOGY FOR A MOULD MANUFACTURING FOR CASTING IN SHORT RUN
PRODUCTION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MIROSLAV PIVODA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JOSEF SEDLÁK, Ph.D.

BRNO 2010

ABSTRAKT

Cílem práce je teoreticky popsat základní metody Rapid Prototyping a pomocí jedné z nich vytvořit master model. Master model bude využit pro tvorbu silikonové formy, do níž bude odlita malá série voskových modelů pomocí vakuového licího systému. Ty se dále využijí ke zhotovení keramické formy, do které bude odlita z dostupných materiálů finální součást. Po zpracování bude posouzena vhodnost navržených technologií pro výrobu dané součásti.

Klíčová slova

Rapid Prototyping, master model, forma, vakuové odlévání, FDM.

ABSTRACT

The aim of thesis is to describe the basic methods called Rapid Prototyping in theory and using one of them to create master model. Master model will be used to create silicone mould where a limited series of wax models will be by means of vacuum casting chamber. They will also be used to make ceramic form in which the final part will be cast from freely accessible materials. After processing it the suitability of the proposed technologies for the production of the part in question will be assessed.

Key words

Rapid Prototyping, master model, mould, vacuum casting, FDM.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PIVODA, M. *Návrh technologie výroby formy na odlévání dílu v malosériové výrobě*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 55s. Vedoucí diplomové práce Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Návrh technologie výroby formy na odlévání dílu v malosériové výrobě vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

.....
Miroslav Pivoda

Poděkování

Děkuji tímto panu Ing. Josefu Sedlákov, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce a za jeho pozitivní přístup ke studentům. Dále Ing. Ondřeji Charvátovi za pomoc a rady při výrobě silikonové formy, pracovníkům firmy MCAE Systems s.r.o., Kuřim za možnost realizace skenování modelů a poskytnutí dat pro ekonomické hodnocení a panu Ing. Petru Ňuksovi z PBS Velká Bíteš a.s. za pomoc při výrobě hotových součástí.

OBSAH

Abstrakt.....	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah.....	7
Úvod.....	8
1. Rapid prototyping.....	9
1.1 Proces výroby.....	10
1.1.1 Preprocessing.....	10
1.1.2 Processing.....	11
1.1.3 Postprocessing.....	11
1.2 Přehled metod RP.....	12
1.2.1 Stereolitografie - SL.....	12
1.2.2 Selective Laser Sintering - SLS.....	13
1.2.3 Fused Deposition Modeling - FDM.....	14
1.2.4 Laminated Object Manufacturing - LOM.....	15
1.2.5 Solid Ground Curing - SGC.....	16
1.2.6 Three Dimensional Printing - 3DP.....	17
2. Vakuové lití do silikonové formy.....	18
2.1 Materiály.....	19
2.1.1 Materiály forem.....	19
2.1.2 Licí materiály.....	20
3. Experimentální část.....	23
3.1 Výroba master modelu.....	23
3.1.1 CAD model.....	23
3.1.2 Příprava dat pro tisk.....	24
3.1.3 Tisk na 3D tiskárně.....	28
3.1.4 Úprava master modelu.....	29
3.2 Výroba silikonové formy.....	30
3.3 Výroba voskových modelů.....	34
3.4 Výroba součásti metodou vytavitelného modelu.....	38
3.5 Vyhodnocení metodou reverzního inženýrství.....	44
4. Technicko - ekonomické hodnocení.....	48
Závěr.....	52
Seznam použitých zdrojů.....	53
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	55

ÚVOD

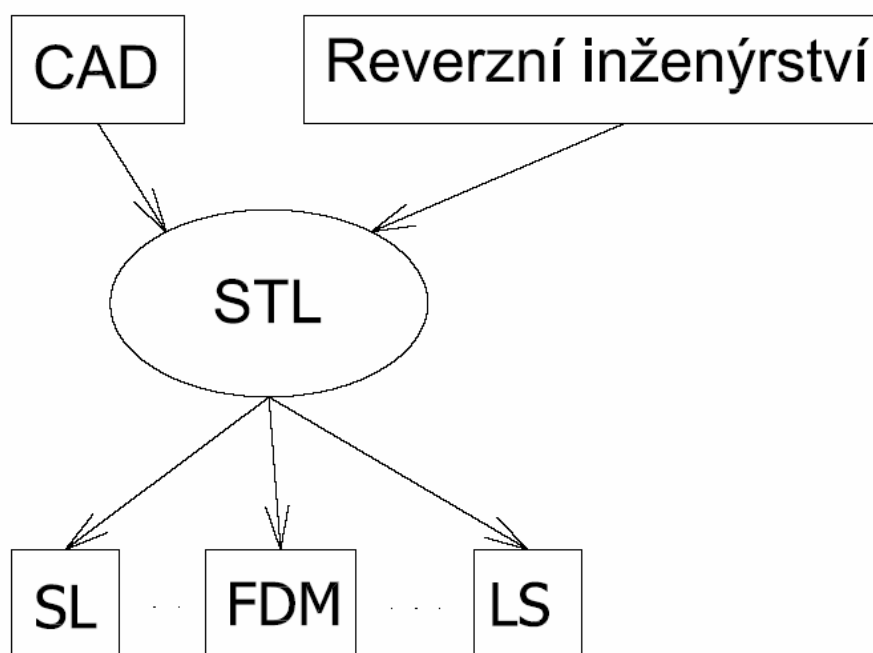
V moderním světě technologií jsou neustále vyvíjeny nové technologie a zdokonalovány ty stávající. V důsledku tohoto vývoje je možné téměř jakoukoliv součást či montážní celek vyrobit různými způsoby a různými technologiemi obrábění, tváření, odlévání, svařování či některou nekonvenční a mnoha dalšími. Technolog stojící na počátku výroby, tak musí zhodnotit všechny přednosti i nedostatky, které se mohou při výrobě vyskytnout a musí navrhnout technologii výroby tak, aby nejlépe v co možná nejkratším čase, za neoptimálnějších nákladů dosáhl co nejlepších výsledků.

Výroba tvarově jednoduchých součástí obvykle neklade velké nároky. U tvarově a případně i rozměrově složitých součástí je, i přes vývoj moderních strojů a nástrojů z nejlepších materiálů, pořád velmi náročnou výrobu optimálně navrhnout a hlavně realizovat. S rostoucí složitostí součástí rostou nejen výrobní náklady, ale i čas potřebný pro její výrobu.

Jednou z možných cest jak kvalitně a rychle vyrobit tvarově složitou součást je využít progresivních technologií. Mezi ně patří i metody Rapid Prototyping a vakuové lití do silikonových forem. V relativně krátkém čase je možné se pomocí těchto technologií dostat od počátečního návrhu až k hotové součásti. I zde je ovšem nutné znát základní principy jednotlivých metod a umět je využít ke svému prospěchu, tak aby to bylo výhodné. Případná neznalost či špatný návrh postupu by mohl dobře míněný plán okamžitě poslat do koše.

1. RAPID PROTOTYPING

Rapid Prototyping - RP, prostým překladem rychlé prototypování, je technologie zabývající se výrobou prototypů, modelů a dalších součástí. Hlavní předností je rychlost výroby. Pro tvorbu součástí jsou potřebná pouze data vytvořená v CAD systému (Solidworks, Catia, aj.) nebo získaná pomocí Reverzního inženýrství Obr. 1. Příprava výroby je jednoduchá a odpadá tak nutnost tvorby přípravků, programů a technologických postupů. Základem tvorby součástí pomocí technologie RP je přidávání materiálu po jednotlivých vrstvách, na rozdíl od klasických způsobů (soustružení, frézování), kdy se materiál naopak po jednotlivých vrstvách odstraňuje^{1,2,3}.



Obr. 1 Schéma RP.

Výhody:

- nízké výrobní náklady,
- krátké výrobní časy,
- možnost tvorby součástí různé geometrické složitosti,
- jednoduchá vstupní data.

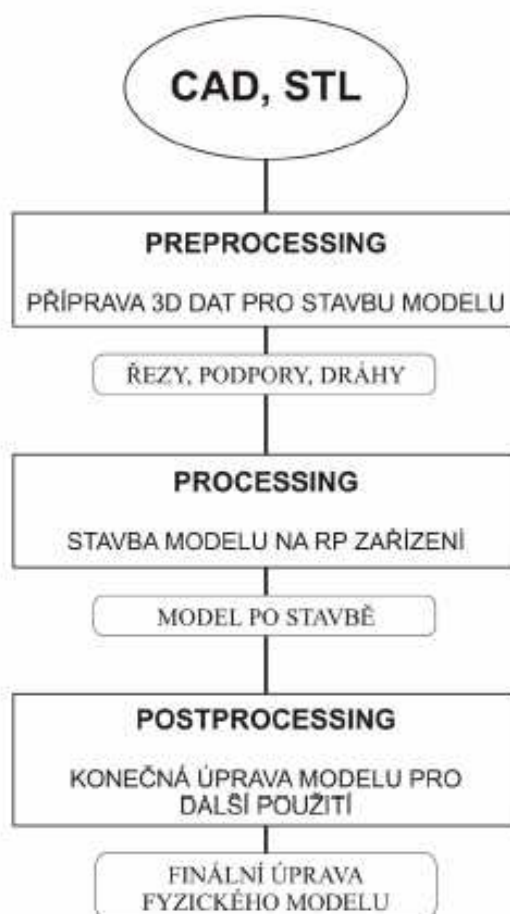
Nevýhody:

- vyšší pořizovací náklady na výrobní zařízení,
- úprava součástí před dalším využitím.

1.1 PROCES VÝROBY

Proces výroby Obr. 1.1 můžeme rozdělit na :

- preprocessing
- processing
- postprocessing



Obr. 1.1 Řetězec procesu¹.

1.1.1 PREPROCESSING

Preprocessing je přípravná část procesu. Základním krokem je tvorba modelu součásti v některém z CAD systémů a její převod do formátu STL. Jde o převedení objemového modelu na model polygonální, tj. model tvořený sítí trojúhelníků. Tato síť musí být dostatečně přesná (hustá) tak, aby co nejlépe vystihovala tvar součásti. Dalším krokem je rozdělení součásti na jednotlivé vrstvy. Tloušťka jednotlivých vrstev je stejná a je dána použitým materiálem. V případě, že to tvar součásti vyžaduje, je nutné navrhnout podpory. Posledním krokem je generování dráhy nástroje^{1,2,3}.

1.1.2 PROCESSING

Processing představuje výrobu součástí. Pro většinu RP zařízení je výroba automatizovaná a proto nepotřebuje dohled vyškolené osoby. Zhotovování součástí je různě časově náročné, může trvat několik hodin v závislosti na velikosti, tvarové složitosti a druhu použité technologie^{1,2,3}.

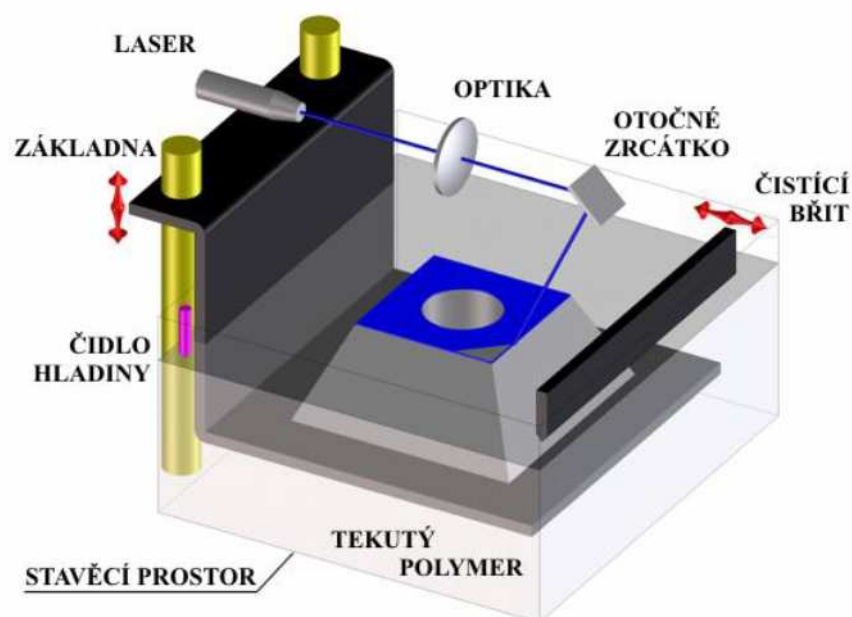
1.1.3 POSTPROCESSING

Postprocessing je poslední částí výroby. V této fázi výroby se obvykle provádí manuální operace jako odstraňování podpor a dokončovací operace. Mezi dokončovací operace patří očištění povrchu, broušení, pískování, impregnování atd. U některých metod jako je např. SL se musí součást nakonec vytvrdit v UV peci^{1,2,3}.

1.2 PŘEHLED METOD RP

1.2.1 STEREOLITOGRAFIE – SL

Stereolitografie Obr. 1.2.1 je vůbec první a tak i nejstarší z technologií RP. Jde o jednu z nepřesnějších metod. Model se vytváří postupným vytvrzováním fotopolymeru pomocí UV laseru. Ve vaně s tekutým fotopolymerem je ponořena nosná deska. Ta se na začátku procesu nachází těsně pod hladinou polymeru, ve vzdálenosti tloušťky jedné vrstvy. Paprsek laseru je veden optickou soustavou (soustava zrcadel) na základě dat získaných v preprocessingu. Paprsek dopadá na hladinu a fotopolymer se vlivem UV záření vytvrzuje a postupně tak vytváří první vrstvu budoucí součásti. Po dokončení jedné vrstvy se nosná deska posune o tloušťku jedné vrstvy a opět dochází k vytvrzení. Celý proces se takto opakuje až do vytvoření kompletní součásti. V místech, kde je to s ohledem na tvar součásti nutné, jsou použity podpory. Ty se po vytvoření odstraní a součást bez podpor se na závěr vytvrdí v UV peci. Tato metoda vyniká velkou přesností. Lze vytvářet součásti s milimetrovými otvory a miniaturními prvky^{1,2,4,7}.



Obr. 1.2.1 Schéma stereolitografie¹.

Výhody:

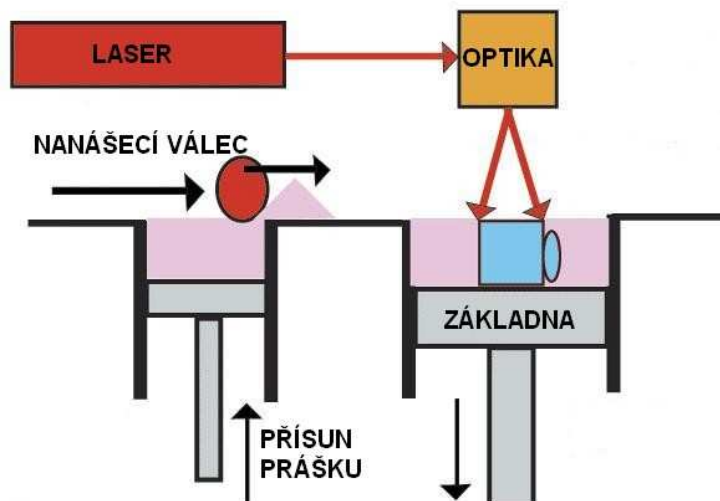
- vysoká přesnost,
- kvalitní povrch.

Nevýhody:

- nižší tepelná odolnost,
- nutnost dalších úprav – vytvrzování v peci.

1.2.2 SELECTIVE LASER SINTERING – SLS

Výchozí materiál u této metody je, na rozdíl od předchozí metody (SL), práškový. Ten je laserem spékán do požadovaného tvaru. Prášek je rovnoměrně nanášen na základnu pomocí rolujícího válce Obr. 1.2.2. Základna je umístěna v pracovním prostoru s inertní atmosférou, která má teplotu blízkou teplotě tavení horní vrstvy práškového materiálu. Tento přehřev se pozitivně projeví na zhotovovaném modelu. Laser působí na připravenou vrstvu, prášek je nataven a po ochlazení ztuhne. Základna sjede o tloušťku další vrstvy, válec nanese prášek a opět dojde k natavení laserem. Vytvořená vrstva se po ochlazení spojí s předchozí vrstvou. Okolní materiál slouží jako nosná konstrukce. Odpadá tak nutnost podpor. Po dokončení a vychladnutí je možné součást vyjmout a odstranit zbytek práškového materiálu, který na ní zůstal (ofoukání, kartáčování). U této metody lze využít širokého množství jakýchkoliv práškových materiálů (termoplasty, nízkotavitelné slitiny, ocelový prášek)^{1,2,4,7}.



Obr. 1.2.2 Schéma SLS⁵.

Výhody:

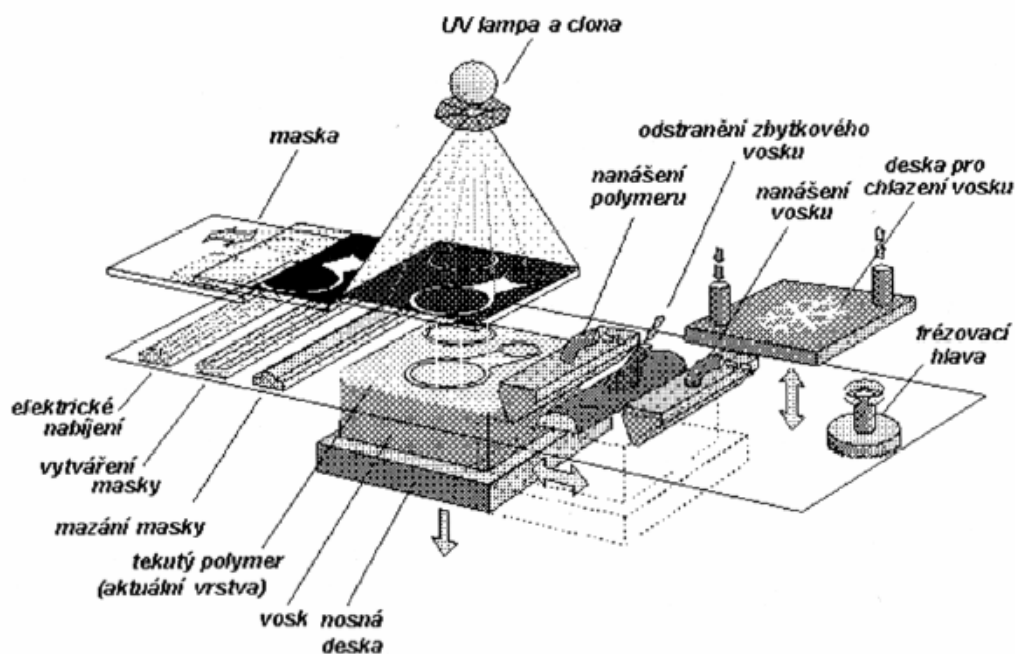
- velký rozsah materiálů,
- bez nutnosti podpor.

Nevýhody:

- větší rozměry zařízení,
- horší jakost povrchu.

1.2.4 SOLID GROUND CURING – SGC

Je to technologie vytvářející z jednotlivých vrstev součásti masky Obr. 1.2.4. Přes masky se ultrafialovým světlem vytvrzuje fotocitlivý polymer. Masky je nejčastěji tvořena skleněnou destičkou, na které je vyznačený tvar vytvářené vrstvy. Celá vrstva se v tomto případě vytváří naráz. Vytváření tělesa tedy probíhá ve dvou oddělených současně probíhajících cyklech. Nejdříve je vytvořena negativní maska a potom dojde k osvětlení fotopolymeru. Osvícený fotopolymer ztvrdne, neosvětlený tekutý fotopolymer je odsáván a vzniklý mezoprostor se vyplní voskem. V dalším kroku je povrch vytvořené vrstvy opracovaný na požadovanou výšku vrstvy a tím je připravený na nanesení další tenké vrstvy tekutého fotopolymeru. Vosková výplň zůstane ve vytvořeném tělese až do konce procesu vytváření, potom je chemickou cestou odstraněna^{1,2,4,7}.



Obr. 1.2.4 Schéma SGC⁷.

Výhody:

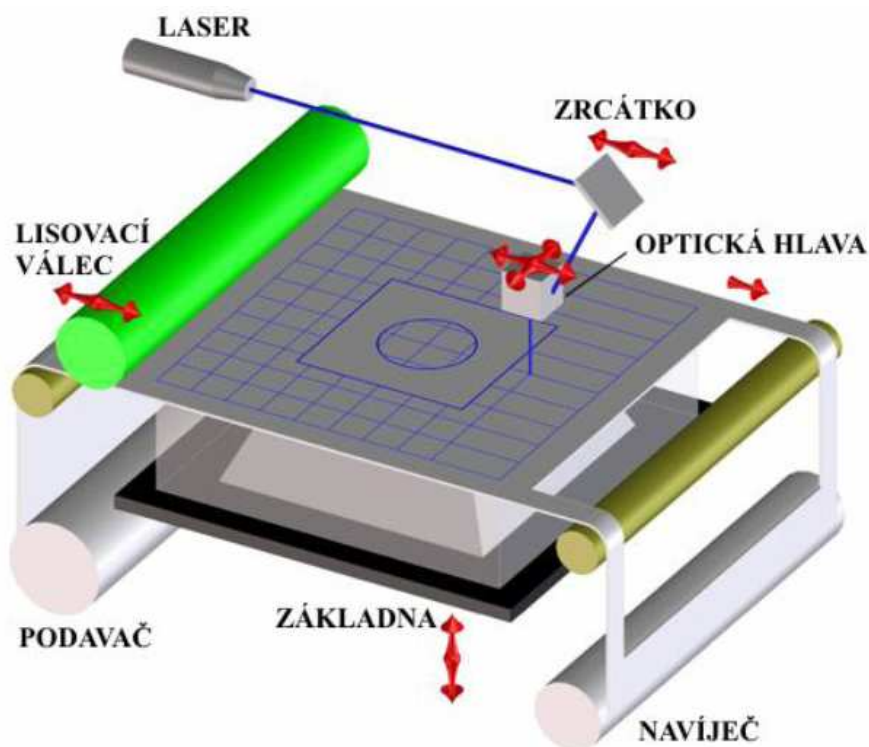
- minimální smrštění,
- kvalitní struktura součásti.

Nevýhody:

- rozměry zařízení,
- usazeniny vosku,
- větší odpad.

1.2.5 LAMINATED OBJECT MANUFACTURING – LOM

Oproti jiným metodám Rapid Prototypingu, které pracují „relativně“ pomalu, je pro rychlé zhotovení prototypu vhodná technologie výroby laminováním, při níž se součást sestavuje z plastových folií nebo z mnoha vrstev papíru napuštěného zpevňující hmotou, které jsou ořiznuty do správného tvaru laserem. Součástka je vytvářena na svisle se pohybující podložce. Celý proces modelování probíhá tak, že se na nanosenou a vyřezanou vrstvu natáhne papírová folie opatřená vrstvou polyetylénu, která se poté přitlačí soustavou vyhřívaných válců, čímž dojde ke slepení obou vrstev Obr. 1.2.5. Paprskem laseru je vyřezán požadovaný obrys vytvářené vrstvy. Přebytečná odřezaná folie je laserem rozdělena na čtverce a později odstraněna. Po vytvoření vrstvy se podložka sníží o tloušťku folie a postup se opakuje. Vytvořené součástky mají podobné vlastnosti jako by byly vyrobené ze dřeva. K dosažení hladkého povrchu je nutné součástku ručně opracovat^{1,2,4,7}.



Obr. 1.2.5 Schéma LOM¹.

Výhody:

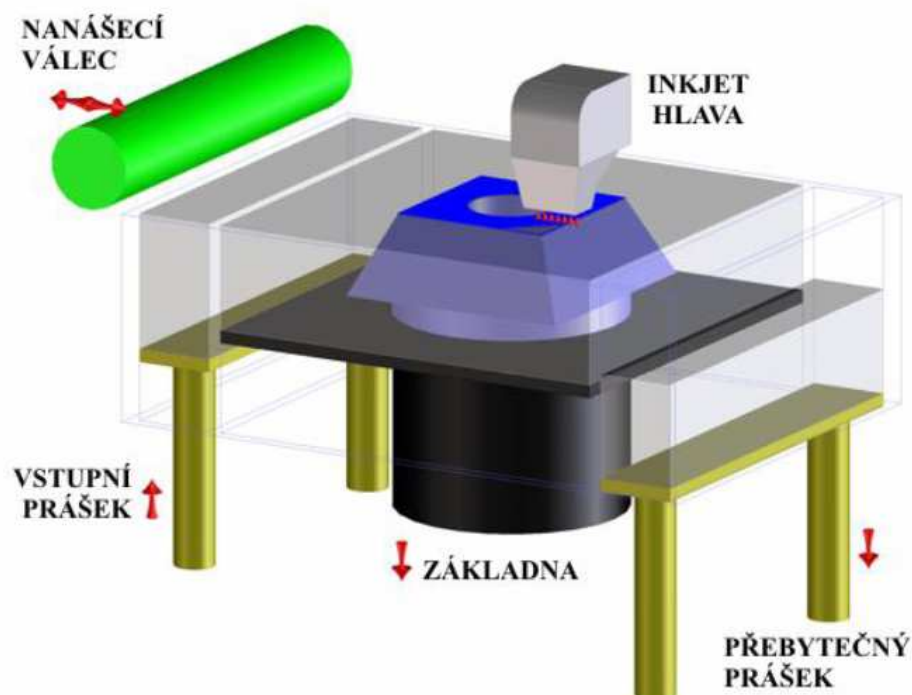
- vhodné pro velké součásti.

Nevýhody:

- velké množství odpadu.

1.2.6 THREE DIMENSIONAL PRINTING – 3DP

Tato technologie velmi připomíná SLS, ale na rozdíl od ní se laser nahradí inkjetovou hlavou Obr. 1.2.6. Výroba probíhá v komoře válcovitého tvaru s pohyblivým pístem. V tenké vrstvě je ze zásobníku na základnu rovnoměrně nanášen práškový materiál. Rotující válec nanáší tenkou vrstvu práškového materiálu a pohybuje se v prostoru mezi dvěma kazetami. Inkjetová hlava, která se pohybuje v rovině xy, vystřikuje pojivo na vybranou oblast jedné vrstvy práškového materiálu. Toto pojivo pak spojuje částice práškového materiálu a vytváří tuhou hmotu jedné vrstvy. Když je vrstva dokončena, posune se válec o tloušťku jedné vrstvy. Po zhotovení součásti se válec vysune a okolní zbylý materiál se odstraní od součásti. Součást je následně napuštěn tvrdidlem pro zvýšení pevnosti před dalším použitím^{1,2,4,7}.



Obr. 1.2.6 Schéma 3DP¹.

Výhody:

- vysoká rychlost,
- bezodpadová technologie,
- velký výběr barev.

Nevýhody:

- součásti jsou křehké,
- horší jakost povrchu.

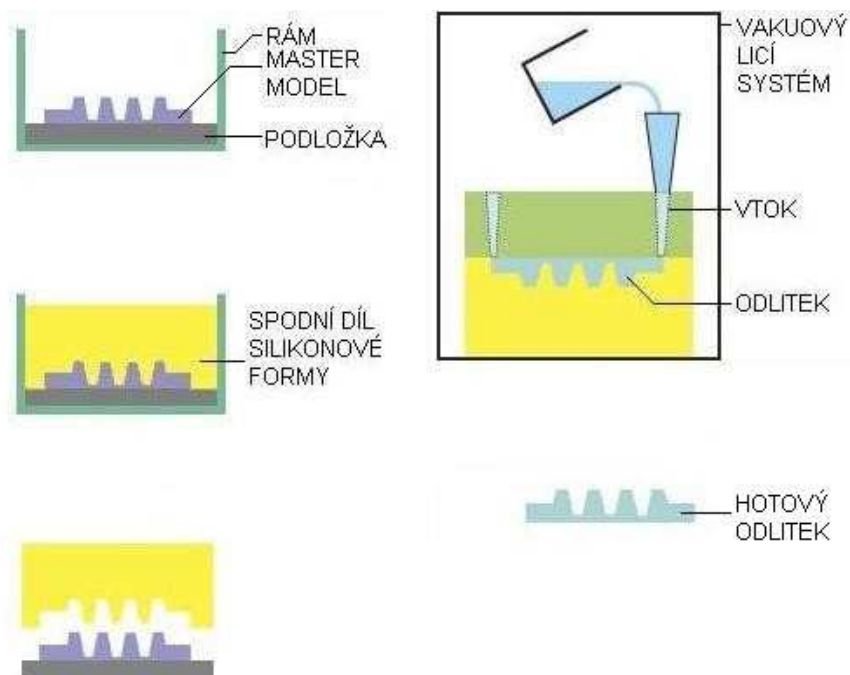
2 VAKUOVÉ LITÍ DO SILIKONOVÉ FORMY

Tuto technologii můžeme zařadit do skupiny technologií Rapid Tooling - RT. Tyto technologie slouží pro rychlou výrobu nástrojů - forem. Můžeme je rozdělit na následující způsoby:

- Rapid Soft Tooling - RST
- Rapid Hard Tooling - RHT

V případě výroby silikonové formy se jedná o RST. Jde o technologii přímo navazující na technologie RP. Návaznost na RP plyne z toho, že pro výrobu silikonové formy je jako základ nutný Master model, který je zhotoven právě některou z RP technologií. Forma je tak vyráběna nepřímou tzv. Indirect Soft Tooling. Před výrobou formy je nutné Master model upravit- tmelení, broušení, zalepení děr, které se budou po odlití vrtat. Upravený model se vhodně umístí do nádoby (rám-sklo, dřevo) . Poté se zalije silikonem a vytvoří se tak spodní díl formy. Silikon je nutné před použitím vakuovat, aby se zbavil bublinek vzduchu. Po zatuhnutí se spodní díl formy otočí a opět se i s master modelem umístí do rámu. Dělicí rovina se natírá separátorem, aby se od sebe daly oba díly formy bez problémů oddělit. K master modelu se vhodně přidělá vtok a takto připravený se opět zalije vakuovaným silikonem a tak se vytvoří druhý díl formy. Tento postup lze aplikovat na součást, kde jednu její stranu tvoří vodorovnou plochu. U tvarově složitějších součástek se master model s přidaným vtokem zalije celý. Dělicí rovina se potom vytvoří rozříznutím formy. Nebo může být forma tvořena z více částí, tak jako v prvním případě, ale při její tvorbě je nutné jednotlivé části modelu vhodně zakrytovat, tak aby se jednotlivé díly formy vytvořili přesně podle požadavků. Při umístování do rámu se master model může vhodně napolohovat např. pomocí tenkých drátků. Do takto vytvořené silikonové formy jsou pak ve vakuovém licím systému odlévány součásti (modely). Modely, které se do takto připravené formy odlévají, jsou většinou z různých druhů vosků či pryskyřic. Formu je nutné před odléváním ohřát na teplotu 70-80°C. Postup výroby silikonové formy a o dlévání ve vakuovém licím systému je zobrazen na Obr. 2.

Tato technologie je vhodná pro malé série výrobků. Toto omezení je dáno určitou trvanlivostí silikonové formy. Počet vyrobených součástí se může lišit podle tvarové složitosti modelu. Počet vyráběných kusů na jednu silikonovou formu se za dodržení určité rozměrové přesnosti pohybuje v jednotkách, maximálně desítkách kusů^{2,8,10,17,20}.

Obr. 2. Postup výroby silikonové formy¹¹.

2.1 MATERIÁLY

2.1.1 MATERIÁLY FOREM

Na výrobu forem pro odlévání ve vakuu jsou nejčastěji používány silikonové kaučuky. Snadno se zpracovávají i vytvrzují. Jejich použití je tedy velmi široké. Pro praktické použití silikonových kaučuků je zejména důležitá pružnost. Díky ní se snadno z forem uvolňují i tvarově komplikované odlitky. Další výhodou je dokonalá reprodukce detailů modelu. Ve většině případů není nutno pro snadné uvolnění z formy používat separátory. Z formy lze vyjmout i odlitek s negativním zkosením. Další výhodnou vlastností je průsvitný vzhled, který umožňuje rozříznutí formy přesně podle naznačených dělicích rovin na master modelu. Silikony mají velmi nízké smrštění, dobrou rozměrovou stabilitu, jsou velice houževnaté a mají středně vysokou tvrdost. Silikon je dvousložkový materiál složený ze základní složky, která se po smíchání s vytvrzovacím činidlem vytvrdí při pokojové teplotě. Při odlévání silikonové formy bez vakuování může nastat problém se vzduchovými bublinkami přítomnými v silikonu. To má negativní vliv na kvalitu povrchu a při odlévání tenkostěnných odlitků může dojít i ke zhroucení stěny formy. Na trhu je velká nabídka různých druhů silikonů, které se mohou lišit materiálovými charakteristikami (viskozita, tvrdost, pevnost v tahu, smrštitelnost, doba práce se směsí)^{8,9,16}.

Hlavní výhody forem ze silikonového kaučuku jsou:

- umožňují výrobu forem s negativními úkoly - forma je pružná,
- krátká doba výroby,
- komplikované dělicí roviny jsou relativně snadné pro výrobu,

- změny, úpravy a modifikace formy jsou lehce dosažitelné.

Hlavní nevýhody forem ze silikonového kaučuku jsou:

- malá tepelná vodivost formy prodlužuje výrobní cyklus,
- životnost forem je podstatně nižší než u forem ze slitin hliníku, nebo z oceli,
- rozměrové tolerance konečného produktu jsou obtížně reprodukovatelné.

2.1.2 LICÍ MATERIÁLY

K výrobě modelů se používají převážně vosky, a to výhradně voskové směsi, protože žádný jednoduchý vosk nespĺňuje všechny požadavky kladené na modelovou hmotu. Kromě kombinací vosků se používá i přísadků plastických hmot, které fungují jako plnivo, a kterými se zlepšují zejména mechanické vlastnosti modelové směsi. Vosková směs by měla mít následující vlastnosti:

- minimální smrštění při chladnutí a minimální roztažnost při ohřevu,
- dostatečnou pevnost a tvrdost a zároveň nepříliš velká křehkost,
- měla by nejpřesněji reprodukovat stěny formy,
- neměla by chemicky reagovat s materiálem keramické břečky,
- hotový model by měl mít vysokou smáčivost ve styku s keramickou břečkou,
- recyklovatelná a zdravotně nezávadná^{14,16,17}.

Podle původu se voskové směsi dělí na přírodní a syntetické.

Přírodní směsi

- cerezín - směs tvrdých metanových uhlovodíků; čistý je v podobě malých krystalků jehličkovitého tvaru. V porovnání s parafínem má vyšší teplotu měknutí a je odolnější vůči deformacím. Obsah popela do 0.03%. Nevýhodou je vedle poměrně nízké pevnosti, tvrdosti a plasticity značné lineární smrštění - až 3.5%.

- parafín - směs tvrdých nasycených uhlovodíků, měkne již při teplotě 30°C. Teplota tavení závisí na stupni jejich rafinace a pohybuje se v rozmezí 42-64°C. Obsah popela do 0,1%. Nevýhodou je křehkost a nízká pevnost.

- montánní vosk- směs voskových a pryskyřičných látek s podílem asfaltických látek. Jejich vzájemný poměr určuje kvalitu surového vosku. Používá se jako hlavní složka „tvrdých“ modelových směsí a dává jim charakteristické vlastnosti, tj. tvrdost, úzký interval tuhnutí a dostatečnou stabilitu za normální i zvýšené teploty. Se zvyšujícím se obsahem asfaltických látek se kvalita montánního vosku snižuje, protože tyto látky mají vyšší teploty tavení než vlastní modelová hmota (až 120 °C).

- romonta- směs monokarbidové kyseliny, hydrokyseliny a jejich esterů, montánní pryskyřice a asfaltických částí. Vosk romonta se používá v kombinaci s cerezínem, čímž vzniká velmi rychle tuhnoucí binární sloučenina. Rychlé

tuhnutí způsobuje, že modely praskají. Aby se prodloužil interval tuhnutí, přidává se do této směsi další složka – kalafuna^{14,17,20}.

- kalafuna- tvrdá složka smoly jehličnatých stromů. Pro směsi se nejčastěji používá borová kalafuna s obsahem popela do 0,04 % a teplotou měknutí minimálně 66 °C.

Syntetické směsi

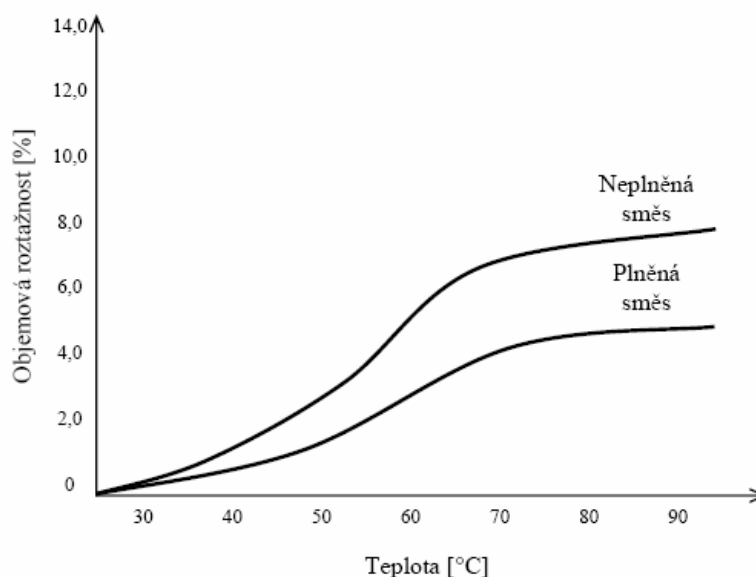
Syntetické vosky se skládají z těchto složek:

- pryskyřice,
- vosky a polymery,
- plnivo.

- pryskyřice- je amorfni v ideálním případě inertní látka. Ve směsi plní úlohu ztekucovadla. Lze je podle původu dělit na přírodní, částečně syntetické a plně syntetické. Většina pryskyřic není úplně inertní a oxiduje, a proto je nutné použití stabilizátoru.

- vosky a polymery - vosk je inertní krystalická látka. Kvalitní vosk nelze vyrobit pouze z ropného vosku, a proto je míchán ze směsi více vosků s polymery. Polymery zvyšují viskozitu a do značné míry ovlivňují fyzikální vlastnosti – dělí se podle původu na petrolejové, syntetické a přírodní.

- plnivo - ve srovnání s neplněnými se plněné směsi vyznačují zejména významně nižším smrštěním Obr. 2.1.2, což znamená vznik menší staženiny. Také při opačném procesu, tj. při zvětšování rozměrů se vzrůstající teplotou, vykazují plněné směsi ve srovnání s neplněnými podstatně nižší změny objemu, což je důležité pro vytavování vosků ze skořepiny, kdy hrozí jejich popraskání. Výběrem plniva lze také velmi podstatně ovlivnit tepelné, mechanické a chemické vlastnosti voskové směsi^{14,17,20}.



Obr. 2.1.2 Vliv plniva na objemovou roztažnost¹⁴.

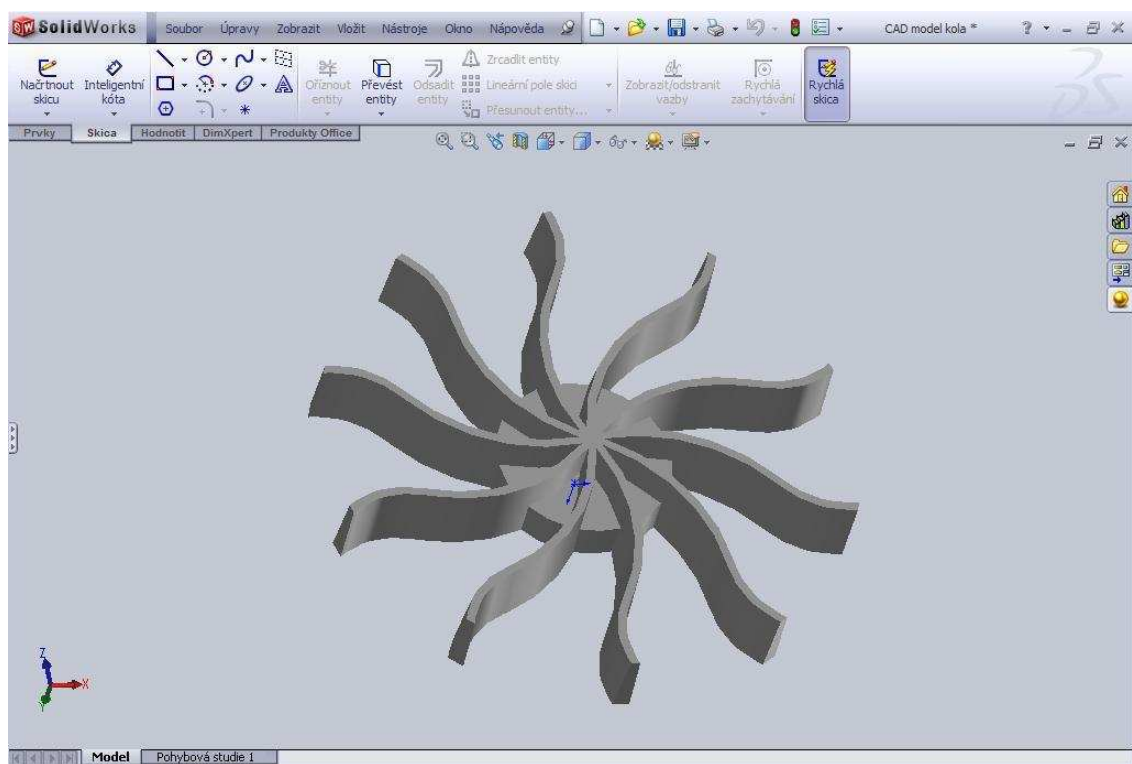
Dalším materiálem pro lití do silikonových forem jsou polyuretanové pryskyřice. Tyto pryskyřice mají vlastnosti velmi podobné plastům. To jak se svými vlastnostmi bude pryskyřice blížit vlastnostem daného plastu závisí na typu použité pryskyřice a na množství vytvrzovacího činidla. Polyuretanové pryskyřice jsou dvousložkové materiály. Základní složka se míchá s vytvrzovacím činidlem nejčastěji v těchto poměrech: 100/100, 100/80, 100/60, 100/50, 100/40, atd. Po důkladném smíchání obou složek se doba zpracovatelnosti pohybuje v rozmezí 3 až 8 minut. Pro snížení viskozity a tím zlepšení zatekavosti do formy lze licí materiál předehřát. Zkrátí se tím ale podstatně doba zpracovatelnosti. Proto je důležité porovnávat dobu zpracovatelnosti a viskozitu. Materiál s nízkou viskozitou není nutné zbytečně zahřívat. Snadno zateče do formy a nezkrátí se doba zpracovatelnosti. U některých materiálů je nutné zvažovat teplotu zahřátí, aby materiál neztuhl kvůli kratší době zpracovatelnosti dříve než úplně zateče do formy. Viskozita polyuretanových pryskyřic se velice liší. Od nízkoviskózních pryskyřic po pryskyřice s vyšší viskozitou. Polyuretanové pryskyřice mají určité zbarvení, ale lze je modifikovat podle potřeby přidáním pigmentu. Můžeme pak odlévat různě barevné díly^{8,12,13}.

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 VÝROBA MASTER MODELU

3.1.1 CAD MODEL

V CAD systému SolidWorks byl vytvořen model součásti čerpadlového kola Obr. 3.1.1, pomocí několika základních příkazů – vysunout, tažení po křivce, kruhové pole, aj. Pro jeho další využití je nutné ho uložit ve formátu *.stl. Tento datový formát využívají technologie RP. Při ukládání do *.stl je možné zvolit výstupní formát binární nebo ASCII. Dále je možné navolit jednotky a hustotu trojúhelníků.

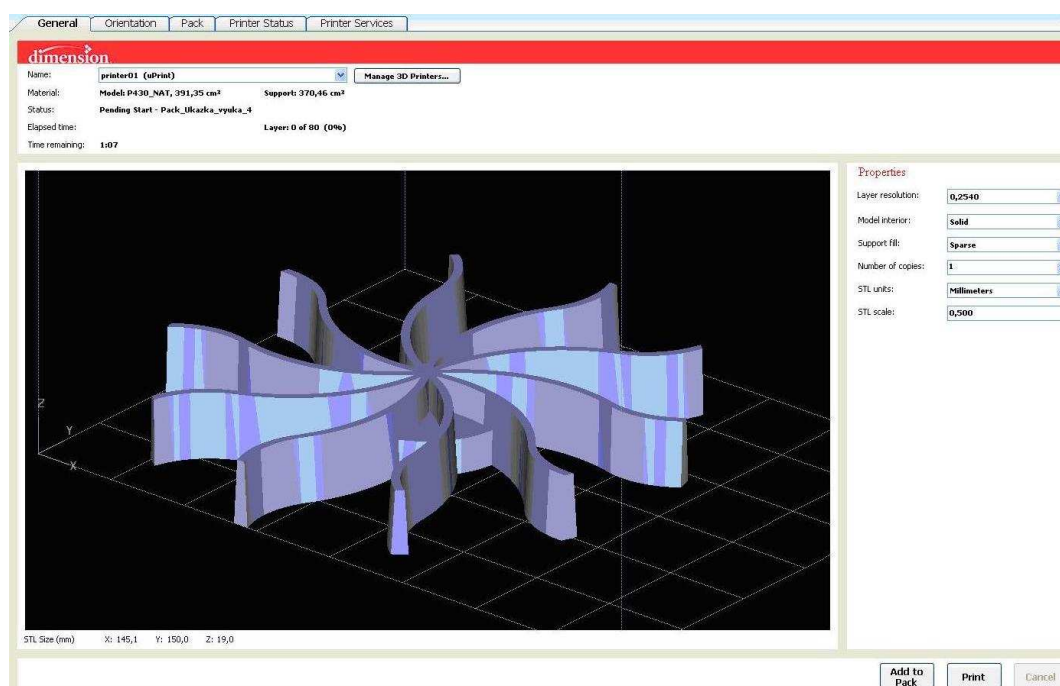


Obr. 3.1.1 CAD model.

3.1.2 PŘÍPRAVA DAT PRO TISK

Vytvořená STL data je třeba připravit pro tisk. K přípravě slouží program CatalystEX. Jde o jednoduchý program, který pracuje s STL daty. Model je načten do virtuální tiskárny. Zde si můžeme snadno nadefinovat parametry potřebné pro tisk a to zpravidla:

- tloušťku vrstvy,
- umístění modelu v pracovním prostoru tiskárny,
- nastavení měřítka,
- způsob vyplnění modelu,
- typ podpór.



Obr. 3.1.2a Catalyst-General.

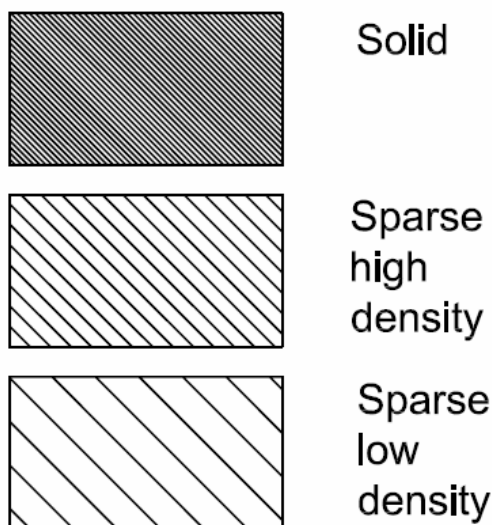
Soubor načtený do programu se zobrazí v záložce Hlavní - *General* Obr. 3.1.2a. Zde jsou nastaveny tyto vlastnosti:

- tloušťka vrstvy (*Layer resolution*) – 0,254mm

Tiskárna Dimension uPrint nabízí tloušťku vrstvy pouze 0,254mm. Obecně se doporučuje, u modelů větších rozměrů, volit i větší tloušťku vrstvy, z důvodu zkrácení výrobního času. Naopak u menších modelů a tvarově složitějších modelů zase tloušťka menší tak, aby byly co nejpřesnější.

- struktura modelu (*Model interior*) – vyplněný (*Solid*)

Máme na výběr ze tří možností vyplnění modelu Obr. 3.1.2b.



Obr. 3.2.1b Struktura modelu.

Vyplněný model - *Solid* - model je vyplněn celý, je pevný a stabilnější. Při tomto nastavení dochází k největší spotřebě materiálu.

Voština s vysokou hustotou - *Sparse high density* - snížení času na výrobu modelu i spotřeby materiálu. Model je lehčí, ale má nižší pevnost.

Voština s nízkou hustotou - *Sparse low density* - nejkratší čas výroby i nejmenší spotřeba materiálu.

- struktura podpor (*Support fill*) - voštiny (*Sparse*)

Opět je na výběr několik možností. Základní - *Basic* - může být využita pro většinu součástí. Udržuje konstantní vzdálenost mezi jednotlivými vrstvami. Voština - *Sparse* - minimalizuje množství použitého materiálu. Minimální - *Minimal* - využívá se pro malé součásti. Rozdělené - *Break-away* - podpory nejsou v okolí modelu tvořeny konstantní křivkou a tak je lze snadněji odstranit. Obruba - *Surround* - pro vysoké štíhlé modely, kdy podpora je kolem celého modelu.

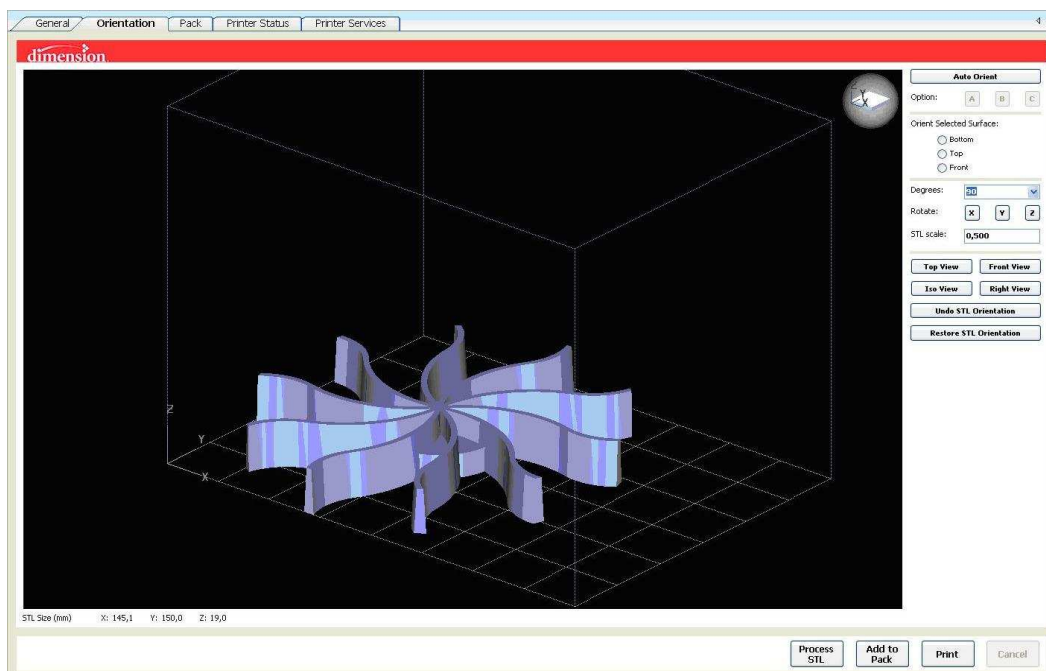
- počet kopií (*Number of copies*) – 1

- jednotky (*STL units*) – milimetry

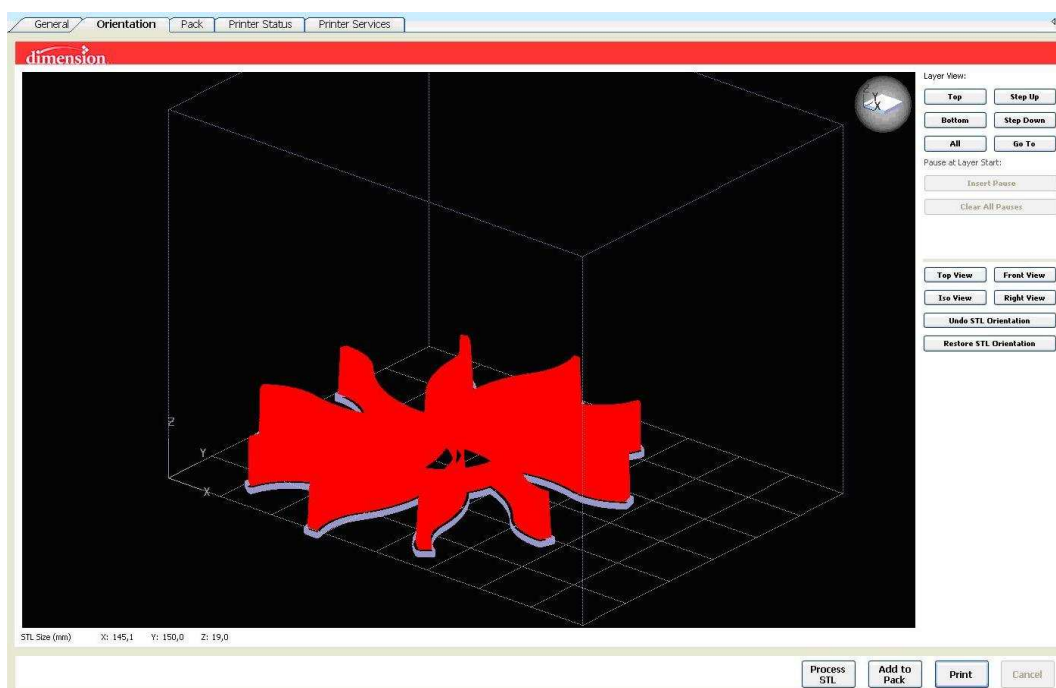
- měřítko (*STL scale*) – 0,500

Měřítko 1:2 bylo zvoleno s ohledem na úsporu nákladů a velikost pracovního prostoru tiskárny, kam by se skutečný model 1:1 nevešel.

Po nastavení parametrů tisku následuje přepnutí do záložky Orientace - *Orientation* Obr. 3.1.2c, kde je model vhodně umístěn v pracovním prostoru stroje. Model většinou orientujeme tak, aby bylo co nejméně využíváno podpor. Pro naorientování lze využít i tlačítko automatická orientace - *Auto orient* - kdy si program sám umístí součást do co nejvýhodnější polohy a tak ulehčí uživateli práci. Po naorientování se stisknutím tlačítka *Add to pack* spustí proces, při kterém si program sám generuje jednotlivé řezy (vrstvy) po kterých bude vlastní model vyráběn Obr. 3.1.2d.



Obr. 3.1.2c Catalyst-Orientation.

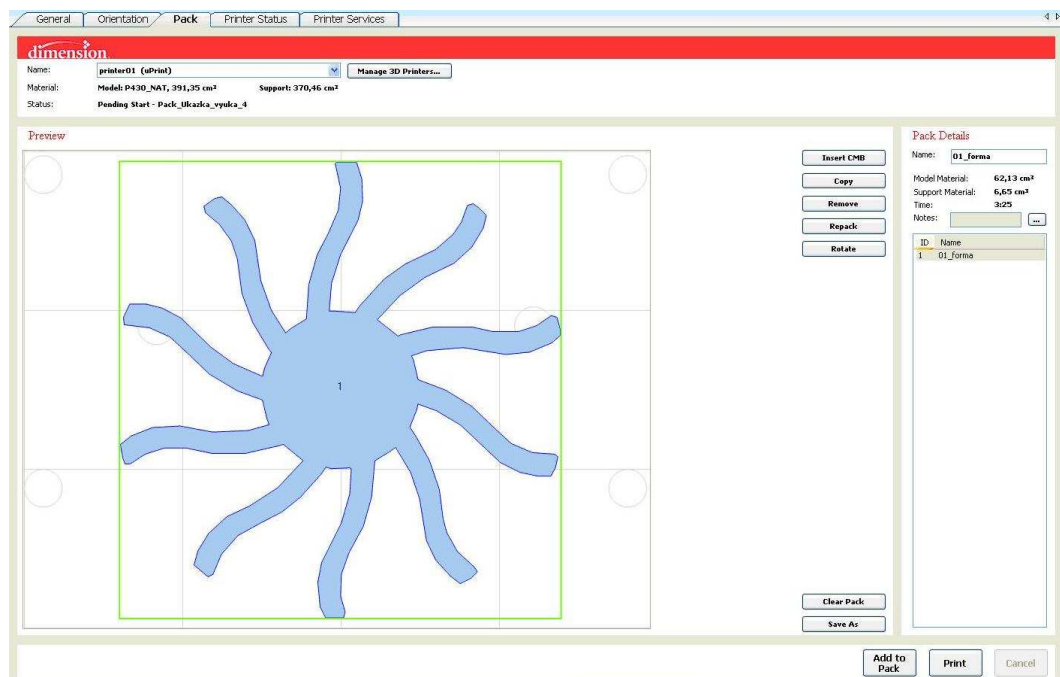


Obr. 3.1.2d Catalyst-Generování řezů.

Zároveň s generováním řezů je vypočítán objem modelu, objem podpor a čas výroby modelu:

- objem modelu 62,13 cm³,
- objem podpor 6,62 cm³,
- čas výroby 3 h 25 min.

Tyto data, která se využívají pro výpočet ceny modelu se zobrazí v záložce *Pack* Obr. 3.2.1e. Zde se také nastaví umístění modelu na podložce v pracovním prostoru tiskárny.



Obr. 3.1.2e Catalyst-Pack.

Po provedení všech těchto potřebných nastavení, jsou data odeslána na tiskárnu, kde je zahájena výroba.

3.1.3 TISK NA 3D TISKÁRNĚ

Pro tisk master modelu byla použita tiskárna Dimension uPrint Obr. 3.1.3a. Tiskárna pracuje na principu FDM popsaném v kapitole 1.2.3. Po zapnutí tiskárny je nutné několik minut počkat než se pracovní prostor zahřeje na teplotu 80 °C. Nejdříve se na podložku vytiskne tenká vrstva podpurného materiálu a na ní je pak po vrstvách vytvářen model. Tisk lze kdykoliv přerušit a znovu spustit. Jakmile je dokončena výroba, vyjme se podložka s modelem z pracovního prostoru tiskárny Obr. 3.1.3b. Model se i s podpory odstraní s podložky. Následně se podpory mechanicky odlomí, pokud to tvar modelu umožňuje nebo se chemicky odstraní v „pračce“, kde je roztok vody a hydroxidu sodného - v poměru 42:1, který podpory rozpouští.

Technické parametry:

- velikost modelovacího prostoru: 203 x 152 x 152 mm,
- tloušťka vrstvy: 0,254 mm,
- napájení zařízení: 230 V/50 Hz.



Obr. 3.1.3a Tiskárna uPrint

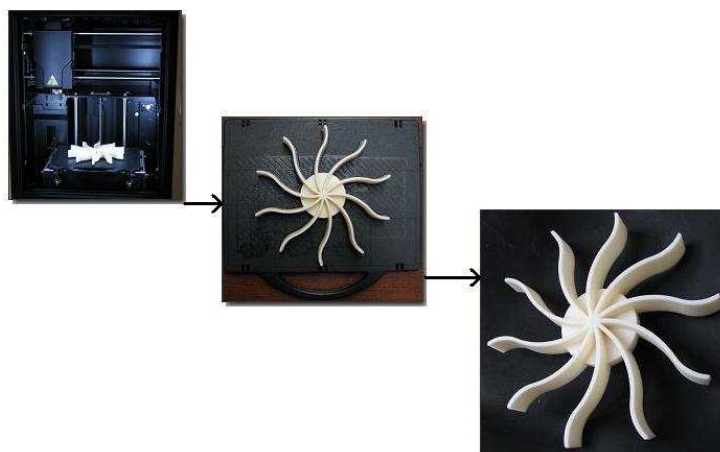
Materiál modelu:

ABS*plus* - akrylonitril butadien styrenu,

- teplotní rozsah použití -25-60°C,
- recyklovatelný,
- chemicky odolný vůči kyselinám, zásadám, neorganickým solím a vodě,
- není odolný vůči aldehydům, ketonům a esterům.

Tab.3.1.3 Mechanické vlastnosti ABS*plus*

pevnost v tahu	37 MPa
modul pružnosti při tahovém namáhání	1,915 MPa
poměrné prodloužení	3,1 %
pevnost v ohybu	61 MPa
modul pružnosti v ohybu	1,82 MPa



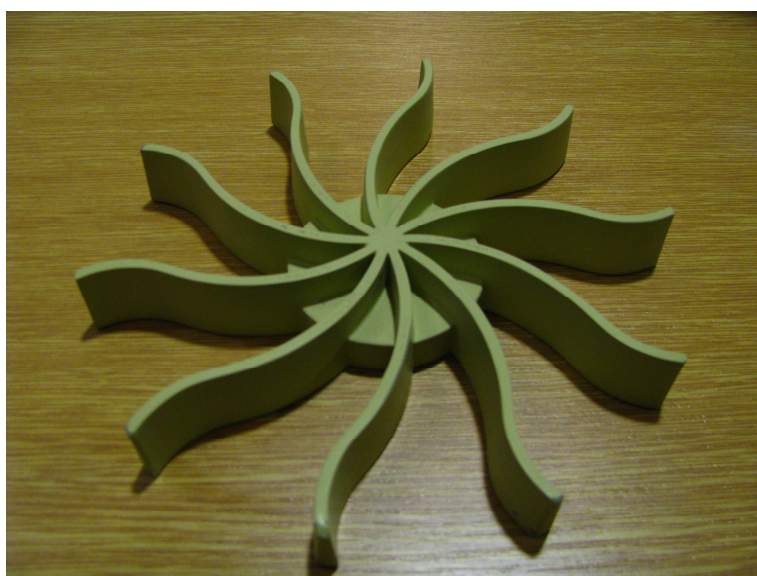
Obr.3.1.3b Výroba master modelu.

3.1.4 ÚPRAVA MASTER MODELU

Po vyjmutí z tiskárny a odstranění podpor, bylo nutné master model před dalším použitím upravit. Po tisku byly na modelu viditelné stopy po jednotlivých vrstvách vzniklé po tisku a drobné dutinky, které jsou pro další použití nežádoucí. Na úpravu byl použit nátěrový tmel MOTIP:

- teplota zpracování 15 - 25°C,
- nástřiková vzdálenost 25 - 30 cm,
- brousitelný/přelakovatelný po 2 hod.

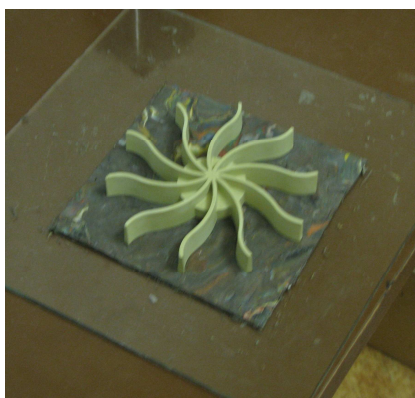
Tmel byl nanesen ve více vrstvách, tak aby při následném broušení nebyl odebírán materiál modelu. Broušení se provádí pod vodou. Na základní hrubé přebroušení byl použit brousící papír s hrubostí zrna 400 a 600. Pro jemné broušení brousící papír s hrubostí zrna 800. Zatmelený a vybroušený model Obr. 3.1.4 je připraven k dalšímu použití.



Obr.3.1.4 Zatmelený a vybroušený master model

3.2 VÝROBA SILIKONOVÉ FORMY

Zatmelený a vybroušený master model je využit pro tvorbu silikonové formy. Vzhledem ke tvaru master modelu bylo rozhodnuto, že dělicí rovina silikonové formy bude kopírovat jeho spodní vodorovnou podstavu. Forma tak bude mít dva díly. Úplné zalití master modelu s vtokem a následné rozřezání nebylo shledáno jako vhodné. Proto byly oba díly formy vyráběny samostatně. Při výrobě spodního dílu formy se na skleněnou podložku nanasla tenká vrstva modelovací hmoty. Do modelovací hmoty byl master model zatlačen tak, aby modelovací hmota co nejlépe přilnula k povrchu modelu Obr. 3.2a. Zabrání se tak případnému zatečení silikonu pod model, což by bylo nežádoucí.



Obr. 3.2a Zatlačený model.

Z dalších skleněných pásků byl sestaven rám Obr. 3.2b, který dá tvar spodnímu dílu formy. Jednotlivé pásky skla byly spojeny pomocí tavící pistole se skleněnou podložkou i mezi sebou. Jako náplň do tavící pistole byly použity tyčinky z termoplastu. Spojení skleněných pásků musí být důkladné, aby při zalití master modelu silikonem nedošlo k jeho protečení ven. Případné netěsnosti je nutné dostatečně utěsnit.



Obr. 3.2b Tvorba rámu.

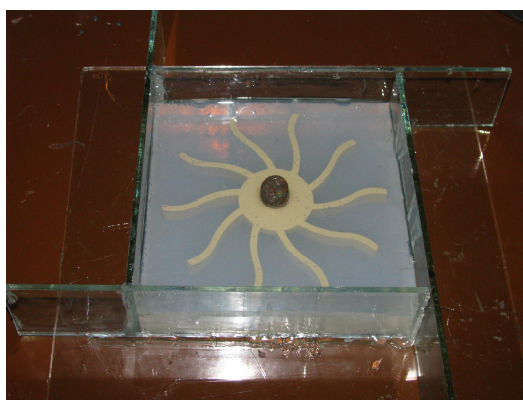
Po sestavení rámu následovala příprava silikonu. Po přeměření rozměrů rámu se přibližně určil objem spodního dílu formy. Z něho se pak vycházelo při vážení základní složky a tužidla. Obě složky byly spolu důkladně promíchány. Po dostatečném promíchání následoval proces vakuování ve vakuovém licím

systemu. Po vakuování se připravený master model silikonem ihned zalil Obr. 3.2c.



Obr. 3.2c Spodní díl formy.

Následovalo vytvrzování materiálu při pokojové teplotě. Po vytvrzení se rám rozebral. Spodní díl formy se otočil a opět se umístil na skleněnou podložku. Z dělicí roviny bylo nutné odstranit případné zbytky modelovací hmoty. Další úpravou dělicí roviny bylo vytvoření zářezů na okrajích, které budou sloužit k lepší orientaci horního dílu formy při jejím sestavování. Dělicí rovina byla dále natřena separátorem, který slouží k tomu, že po vytvrzení horního dílu je možné oba díly snadněji rozdělit. Z modelovací hmoty byl vytvořen váleček, který se umístil na master model a vytvořil tak v horním dílu vtok. Kolem takto připraveného spodního dílu se opět vytvořil ze skleněných pásků rám, který se spojil tavící pistolí. Stejně jako při tvorbě horního dílu se stanovilo množství základní složky a tužidla, které se opět promíchaly a následoval proces vakuování. Po vakuování se zalitím spodního dílu s master modelem vytvořil díl horní Obr. 3.2d.



Obr. 3.2d Horní díl formy

Po vytvrzení se rám rozebral. Z horního dílu se odstranila modelovací hmota a ze spodního se vyjmul master model. Takto vytvořená silikonová forma Obr. 3.2e je potom připravena k dalšímu použití.



Obr. 3.2e Silikonová forma.

Pro spodní i horní díl formy byl použit stejný materiál SILASTIC T-4.

Charakteristika:

- průhledný dvousložkový elastomer,
- vysoká elasticita,
- dobrá pružnost a houževnatost,
- nízká smršťivost.

Vlastnosti základní složky SILASTIC T-4:

- viskozita 70 000 m·Pa·s,
- specifická hmotnost 1,1.

Vlastnosti tužidla T-4:

- viskozita 300 m·Pa·s,
- specifická hmotnost 0,96.

Směsný poměr základní složky a tužidla 100:10.

Doba vytvrzení při teplotě 22°C - 12 h.

Vlastnosti po vytvrzení:

- tvrdost (Shore A) - 40,
- tažnost - 400 %,
- barva - průhledný,
- odolnost proti trhání - 27 kN/m,
- lineární smrštění - menší než 0,1%.

Tab. 3.2 Hmotnost složek a vakuovací podmínky

	Spodní díl	Horní díl
Základní složka	760 g	203 g
Tužidlo	76 g	20,3 g
Doba vakuování	45 min	35 min
Vakuovací podtlak	-1 Bar	-1 Bar

K natření dělicí roviny byl použit separátor na silikony T1-1:

- tekutý,
- velmi krátký čas k vyschnutí.

Vakuování probíhá ve vakuovém licím systému MK Mini od společnosti MK Technology GmbH Obr. 3.2f. Systém je opatřen licím kelímkem s ohřevem.

Technické parametry:

- 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 licího kelímku - 1,2 l,
- teplota ohřevu licího kelímku - max 150 °C.



Obr. 3.2f Vakuový licí systém.

3.3 VÝROBA VOSKOVÝCH MODELŮ

Pro odlévání voskových modelů do silikonové formy byl opět využit vakuový licí systém s licím kelímkem MK Mini popsaný v předchozí podkapitole 3.2. Do kelímku se nasypal vosk. Teplota ohřevu byla nastavena na 85 °C. Po natavení vosku byl spuštěn míchač a zahájeno vakuování vosku. Vakuovací podtlak byl -1 Bar. Doba vakuování byla 40 minut. Před vlastním odléváním je nutné připravit formu. V dělicí rovině byla sepnuta pomocí kancelářských sponek, tak aby případně nedošlo k oddělení horního dílu nebo zaběhnutí vosku mezi oba díly formy. Do horního dílu, v zakončení jednotlivých lopatek, byly vyvrtány otvory vrtákem o průměru 3 mm. Protože je forma velmi pružná výsledný průměr otvorů byl přibližně 1 mm. Tyto otvory slouží k odvzdušnění formy a zajistí snadnější zaběhnutí vosku do jednotlivých lopatek. Takto připravená forma se vložila do pece Obr. 3.3a, kde se předehřívala po dobu 30 minut na teplotu 80 °C.



Obr. 3.3a Elektrická pec.

Elektrická pec MKT-1 od firmy Memmert.

Technické parametry:

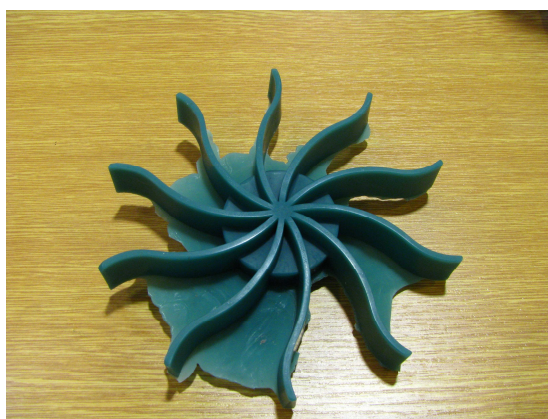
- vnitřní rozměry - 560 x 400 x 480 mm,
- vnější rozměry - 710 x 510 x 760 mm,
- rozsah teplot 30 - 220 °C,
- objem - 110 l,
- hmotnost - 55 kg,
- napájení/příkon - 230 V / 2 kW.

Po vyvakuování vosku se vakuování zastavilo. Z pece se vydělala nahřátá forma a do vtokového otvoru v horním dílu formy byl umístěn trychtýř, kterým byl do formy vosk naléván. Forma se umístila do pracovního prostoru vakuového licího systému. Opět se zahájilo vakuování na vakuovací podtlak -1 Bar. Na této hodnotě byla výdrž přibližně 2 - 3 minuty, aby bylo odsáno co největší množství vzduchu z pracovního prostoru. Následně byl podtlak snížen a hodnotu -0,9 Bar. Byl vypnut míchač. Do připravené formy byl odlit voskový model Obr. 3.3b.



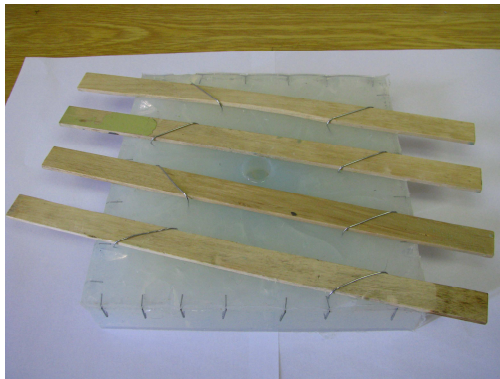
Obr. 3.3b Lití voskového modelu.

Po ztuhnutí se nejdříve oddělal horní díl formy a následně opatrným postupným drobným ohýbáním dílu spodního se postupně uvolňoval voskový model až do úplného vytažení. Při této operaci bylo nutná značná dávka trpělivosti, protože při neopatrné manipulaci může snadno dojít k ulomení jedné z lopatek. První odlitý voskový model měl viditelné nedostatky Obr. 3.3c. Vosk i přes zafixování formy v dělicí rovině zaběhl mezi oba díly formy, horní díl tak částečně přizvedl. Vytvořil tak blány mezi lopatkami a zvětšil tloušťku modelu. Tento jev byl zřejmě způsoben tím, že horní díl formy byl z důvodu úspory materiálu příliš tenký a při lití vosku do formy se ve středu modelu v důsledku většího množství materiálu přizvedl.



Obr. 3.3c První model.

Pro výrobu dalších modelů bylo nutné tento nežádoucí jev eliminovat. Přes horní díl byly položeny proužky dřeva, které byly přitaheny pomocí kancelářských sponek těsně na horní díl formy Obr. 3.3d a měly tak zabránit jeho přizvednutí a zatečení vosku mezi oba díly formy.



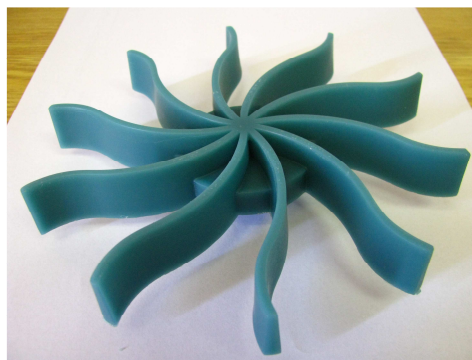
Obr. 3.3d Zafixovaná forma.

Po tomto zafixování. Bylo provedeno odlití dalšího kusu. Forma byla opět nahřata v peci a opakoval se i postup vakuování a odlévání vosku stejně jako u prvního dílu Obr. 3.3e.



Obr. 3.3e Lití do zafixované formy.

Po ztuhnutí byl model vyjmut z formy. Zhotovený model již neměl výrazné vady obr.3.3f. Vosk nezatekl mezi oba díl formy a tak nedošlo ke vzniku blan ani ke změně rozměrů. Poslední úpravou kterou bylo nutné provést je odříznutí zbylého vosku po vtoku. Takto připravený voskový model se mohl dále využít pro tvorbu keramické formy.



Obr. 3.3e Model bez vad.

Pro tvorbu voskových modelů byl používán vosk A7-RT/26 od firmy Blayson.

Charakteristika:

- rychle tuhoucí vosk,
- minimální přilnavost,
- dobrá tekutost,
- dobrá rozměrová stabilita,
- bez náklonnosti ke vzniku dutin,
- maximální doporučená teplota tavení 100 °C,
- při zpracování doporučeno stálé míchání.

Vlastnosti:

- bod tuhnutí 63 - 68 °C,
- bod skápnutí 64 - 69 °C,
- doporučená teplota vstřikování v tekutém stavu 68 - 72 °C,
- doporučená teplota vstřikování v prstovitém stavu 60 - 64 °C,
- obsah plniva 30 - 33 %,
- typ plniva XLPS 40 - 100 µm,
- obsah popela max 0,03 %,
- viskozita při 90 °C 0,2 - 0,4 Pa·s,
- střední tekutost,
- volná lineární kontrakce 0,6 - 0,8 %.

3.4 VÝROBA SOUČÁSTI METODOU VYTAVITELNÉHO MODELU

Tato technologie umožňuje vyrábět tvarově složité součásti. Jejich funkční plochy jsou vyrobeny s takovou přesností a jakostí povrchu, že není nutná jejich další úprava obráběním. U ostatních ploch, které je potřeba obrábět, jsou přídatky na obrábění relativně malé a spotřeba času na jejich odstranění a s tím spojené náklady, jsou zřetelně nižší než u jiných způsobů lití.

Základem této technologie je voskový model. Voskový model se připojí na vtokovou soustavu. U rozměrnějších modelů je vtoková soustava tvořena z různých druhů nálitků, které se vyrábí ve zvláštních formách a na model se připojí pájením nebo lepením. Méně rozměrné modely se sestavují do stromečků. Sestavení modelů a vtoková soustava musí dovolit bezproblémové vytékání vosku při vytavování modelů ze skořepiny. Tvar stromečku by měl být navržen tak, aby byl k připojeným modelům umožněn dobrý přístup, přičemž se nesmí při lepení či pájení poškodit modely, které jsou na stromečku již přilepeny. Z hlediska následující operace obalování by měli být modely na stromečku přilepeny dutinami dolů. Obalová hmota musí stékat, aby nedocházelo ke zvětšování tloušťky obalu. Při pájení se modely připojí na vtokovou soustavu tak, že se mezi vtok modelu a vtokový systém vloží pájedlo, model se přitlačí na pájedlo, které je přiloženo na místo vtokového systému, kde bude model připojen. Po natavení dosedacích ploch se pájedlo vytáhne a model se přitiskne k vtokovému systému. Při lepení se užívá pistole, které ke spojení modelu a vtokového systému používá roztavené lepidlo, které je nanášeno na stykové plochy. Po přilepení modelů na vtokovou soustavu následuje proces obalování.

Obalování spočívá v opakovaném namáčení modelových stromečků do obalové hmoty, posypávání žáruvzdorným materiálem o vhodné zrnitosti a sušení jednotlivých obalů. Tento cyklus se několikrát opakuje, dokud nemá obal požadovanou tloušťku. Počet vrstev bývá obvykle mezi pěti až patnácti dle požadované pevnosti formy. Velké a těžké odlitky mají oproti menším vrstev více. Před obalováním je nutné odstranit z povrchu voskových modelů prach a případné nečistoty, aby první obal k povrchu voskových modelů dokonale přilnul a nedošlo k jeho odloupení či popraskání. Při namáčení se čisté voskové modely ponořují do obalové hmoty při současném otáčení a naklánění tak, aby obalová hmota rovnoměrně pokryla celou plochu modelu a v drážkách a rozích se netvořily vzduchové polštáře. Potom se model (stromeček) z obalové hmoty vyjme a manipuluje se s ním tak, aby se obalová hmota rovnoměrně rozdělila a přebytečná odkapala. Následuje posypávání žáruvzdorným materiálem a sušení. Při sušení musí být zajištěno dostatečné proudění vzduchu.

Po aplikaci posledního obalu a dokonalém vysušení skořepiny se z ní musí voskový model odstranit. V této části procesu je možnost zjistit existující vady (praskliny) na formě, protože vosk má tendenci detekovat tyto chyby, obzvláště když je používán tmavý vosk, který prosákne skrz formu a zobrazí se jako skvrna na povrchu formy. Klíčovým bodem v této části procesu je rozdíl mezi menší tepelnou roztažností keramiky a větší tepelnou roztažností vosků. Protože kdybychom keramickou formu jednoduše vložili do pece za účelem vytavení vosku (bod tavení 60 – 90°C), tak by došlo k jejímu popraskání v návaznosti na tyto rozdílné teplotné roztažnosti. Ohřev vosku musí být proto

rychlý aby se zamezilo rozměrovým změnám modelu, které by způsobily popraskání skořepiny^{10,14,15,16,20}.

Vytavování voskových modelů lze provést několika způsoby:

- v autoklávu,
- za vysoké teploty - v peci za teploty 900 až 1000°C,
- za nízké teploty - vytavování se provádí v roztavené a přehřáté hmotě stejného složení jako má hmota modelů,
- dielektrickým ohřevem - skořepiny se zvlhčí vodou a pak se umístí v poli vysokofrekvenčních vln. Vlhká skořepina se rychle ohřeje, vosk se těsně u skořepiny odtaví a vytvoří se dilatační spára. Ta zabrání popraskání skořepiny rozpínajícím se voskovým modelem.

Poslední operací sloužící k přípravě skořepiny před odléváním je její žihání. Žihání skořepiny slouží k převedení amorfní formy vazné vrstvičky SiO₂ na formu krystalickou. Zároveň dochází k odstranění chemicky vázané vody a vypálení zbytků vosku. Teplota žihání bývá v rozmezí 900 – 1400 °C podle druhu použitého materiálu skořepiny. Po dokončení žihání je forma připravena k odlévání.

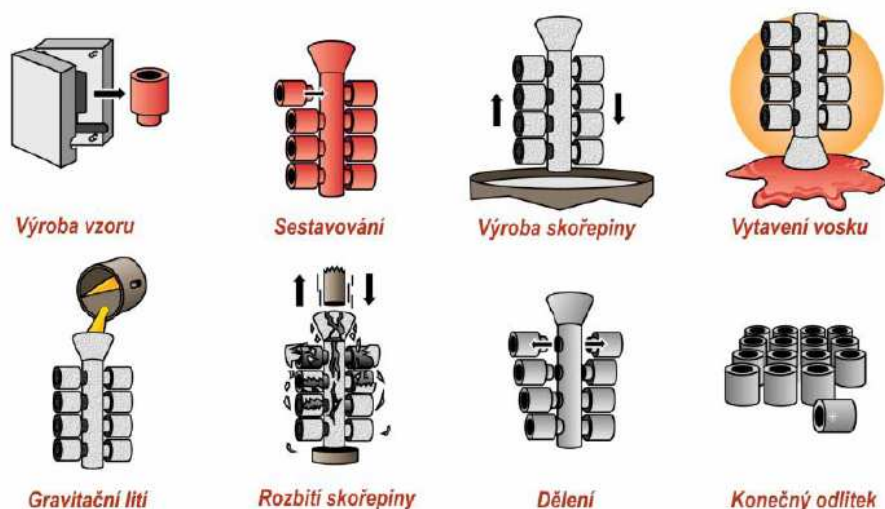
Odlévání se provádí buď na vzduchu (otevřené lití) nebo ve vakuu (vakuové lití). Před odléváním se forma předehřívá. Teplota předehřevu je závislá na tvaru odlitku, použitém materiálu odlitku a materiálu formy. Odlévání slitin s nejvyššími požadavky na kvalitu se provádí ve vakuu. Ve vakuových pecích se odlévají zejména speciální vysokolegované materiály.

Po odlití následují dokončovací operace. Typické pořadí dokončovacích operací je následné:

- odstranění většiny částí keramické skořepiny - obvykle mechanicky,
- odstranění odlitků z vtokové soustavy,
- odstranění zbylé keramiky - mechanicky nebo chemicky,
- odstranění vtoků z odlitků,
- tryskání a dokončování.

V některých případech bude dokončování obsahovat další operace jako tepelné zpracování, dodatkové obrábění a příprava odlitků pro expedici.

Celý postup výroby je zjednodušeně zobrazen na Obr. 3.4a^{10,14,15,16,20}.



Obr. 3.4a Princip metody¹⁵.

Pro výrobu hotových součástí byly použity čtyři voskové modely získané litím do silikonové formy. Na každý model byla přilepena jedna vtoková soustava. Výroba skořepiny probíhala výše popsaným postupem.

Obalování:

- pojivo: keramická břečka,
- posyp: molochit,
- počet obalů: 6 a ½.

6 a ½ obalů znamená, že model se 6krát ponoří a míchá v břečce a 6krát je na něj nanesen posyp. Poslední fáze je pouze ponoření a míchání v keramické břečce.

Vytavení vosku:

- v autoklávu,
- teplota - 180 °C,
- tlak - 10 Bar,
- doba cyklu - 20 minut.

Žíhání skořepiny:

- dvoustupňové ,
- teplota primárního předžíhání - 1000 °C,
- teplota žíhání - 800 °C,
- doba cyklu - 3 hodiny.

Hotová skořepina Obr. 3.4b po vytavení vosku a vyžíhání byla připravena pro odlévání hotových součástí.



Obr.3.4b Skořepina

Pro odlévání byly použity oba způsoby. Do dvou forem se odlévalo na otevřených pecích - otevřené lití, a do dvou forem ve vakuových pecích - vakuové lití. Pro každý způsob byly použity dva druhy materiálu. Celkem byly tedy zhotoveny čtyři finální součásti, každá z jiného materiálu vždy dvě stejným způsobem odlévání.

Otevřené lití

- indukční tavicí pec ISTOL 120,
- kelímek KORAL (Keravit),
- částečně pod ochranou atmosférou Ar - spodní profuk taveniny přes keramickou vložku v peci.

Materiály pro otevřené lití:

- ocel na odlitky ČSN 422940 Orb. 3.4c - chemické složení Tab. 3.4.1,
- teplota tavení - 1640 °C,
- teplota předehřevu skořepiny - 1150 °C.

Tab. 3.4.1

C	Mn	Si	Cr
max 0,07	max 2	max 2	17-21
Ni	Mo	P	S
9-13	2-2,5	max 0,045	max 0,035



Orb. 3.4c Odlitek - ČSN 422940

- Sedur 204 Obr. 3.4d - chemické složení Tab. 3.4.2
- vysokolegovaná bílá litina,
- teplota tavení - 1380 °C,
- teplota předehřevu skořepiny - 1030 °C.

Tab. 3.4.2

C	Mn	Si	Cr
3,6-3,8	0,6-0,8	0,6-0,9	19-21
Ni	Mo	P	S
0,2-0,4	1,6-2	max 0,05	max 0,05



Obr. 3.4d Odlitek - Sedur 204

Vakuové lití:

- vakuová indukční pec L+H ISK5/III,
- keramický kelímek Mg88i (MgO),
- vakuovací podtlak $3 \cdot 10^{-2}$ mBar.

Materiály pro vakuové lití:

- Inconel IN 713C Obr. 3.4e – chemické složení Tab. 3.4.3,
- teplota tavení -1360 °C,
- teplota předehřevu skořepiny - 1050 °C.

Tab. 3.4.3

C	Mn	Si	Cr	Ti
0,08-0,2	max 0,25	max 0,5	12-14	0,5-1
Al	Fe	B	Zr	Nb+Ta
5,5-6,5	max 2,5	0,005-0,015	0,05-0,15	1,8-2,8
Mo	Cu	Co	S	Ni
3,8-5,2	max 0,5	max 1	max 0,015	zbytek



Obr. 3.4e Odlitek - IN 713C

- Inconel IN 738LC Obr. 3.4f – chemické složení Tab. 3.4.4,
- teplota tavení -1400 °C,
- teplota přehřevu skořepiny - 1050 °C.

Tab.3.4.4

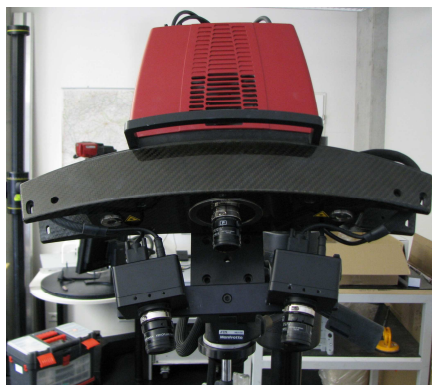
C	Mn	Si	Cr	Ti	Al	Ti+Al
0,09-0,13	max 0,2	max 0,3	15,7-16,3	3,2-3,7	3,2-3,7	6,5-7,2
Fe	B	Zr	Nb	Ta	Mo	W
max 0,35	0,007-0,012	0,03-0,08	0,6-1,1	1,5-2	1,5-2	2,4-2,8
Cu	Co	P	S	Ni	Bi	Pb
max 0,5	8-9	max 0,015	max 0,015	zbytek	max 0,0005	max 0,001



Obr. 3.4f Odlitek - IN 738LC

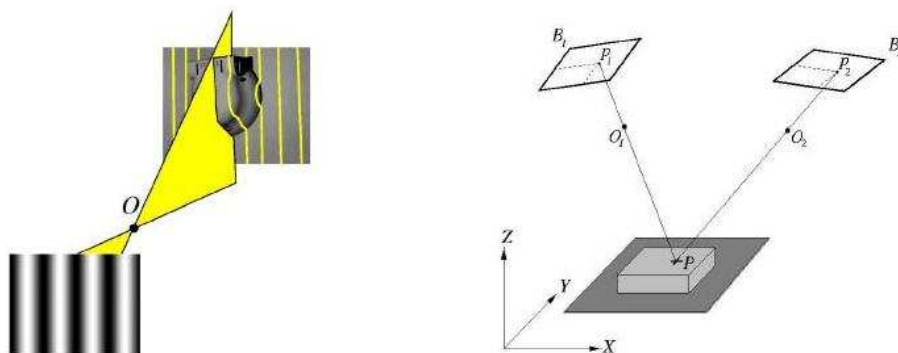
3.5 VYHODNOCENÍ METODOU REVERZNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Systém Atos II 400 (*Advanced Topometric Sensor*) Obr. 3.5a, použitý pro skenování modelů, je 3D skener pro optickou digitalizaci. Skenovací hlava obsahuje dvě kamery s čočkami. Tuto hlavu stačí namířit na skenovanou součást^{7,18,19,21}.



Obr.3.5a Atos II.

Systém využívá principu triangulační metody a digitálního image processingu. Princip triangulace Obr. 3.5b je ten, že na vhodně upravený povrch digitalizované součásti jsou postupně promítány proužky světla, které jsou snímány dvěma kamerami z různých úhlů. Pomocí značek (referenčních bodů), které jsou umístěny na snímané součásti, dojde k její digitalizaci v několika snímáních. Snímky není nutné pořizovat v pravidelných úsecích. Součást se natáčí, tak aby byla postupně nasnímána celá. Pomocí referenčních bodů si systém sám rychle vyhodnotí přesnou polohu snímku. Systém vypočte pozici pomocí měřicích senzorů a změřené hodnoty transformuje do souřadnicového systému snímané součásti. Referenční body musí být na jednom snímku minimálně tři, aby tento snímek dokázal systém vyhodnotit. V případě, že je na snímku bodů více je měření přesnější. Přesnost měření je obvykle 50 μm , v závislosti na kvalitě kalibrace optického systému. Kalibrace se provádí před začátkem měření^{7,18,19,21}.



Obr. 3.5b Princip triangulace součást¹⁹.

Po ukončení skenování se pomocí softwaru, který je dodáván společně se systémem, naskenovaná součást upraví – výsledným výstupem je STL soubor.

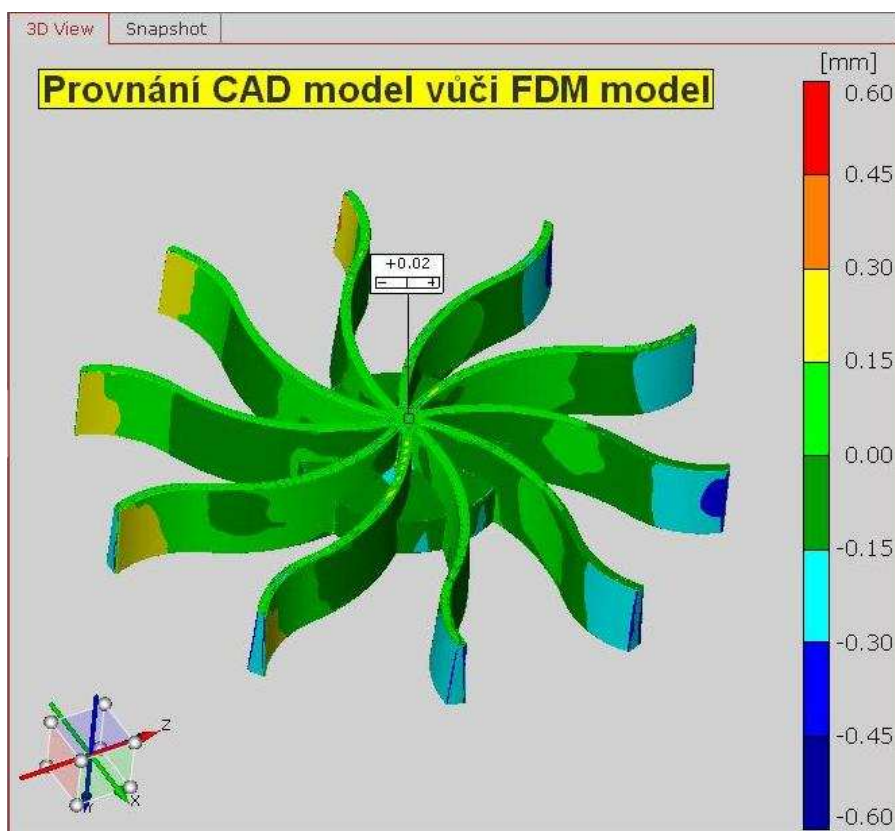
Pro porovnání byl naskenován:

- master model,
- zatmelený master model,
- voskový model.

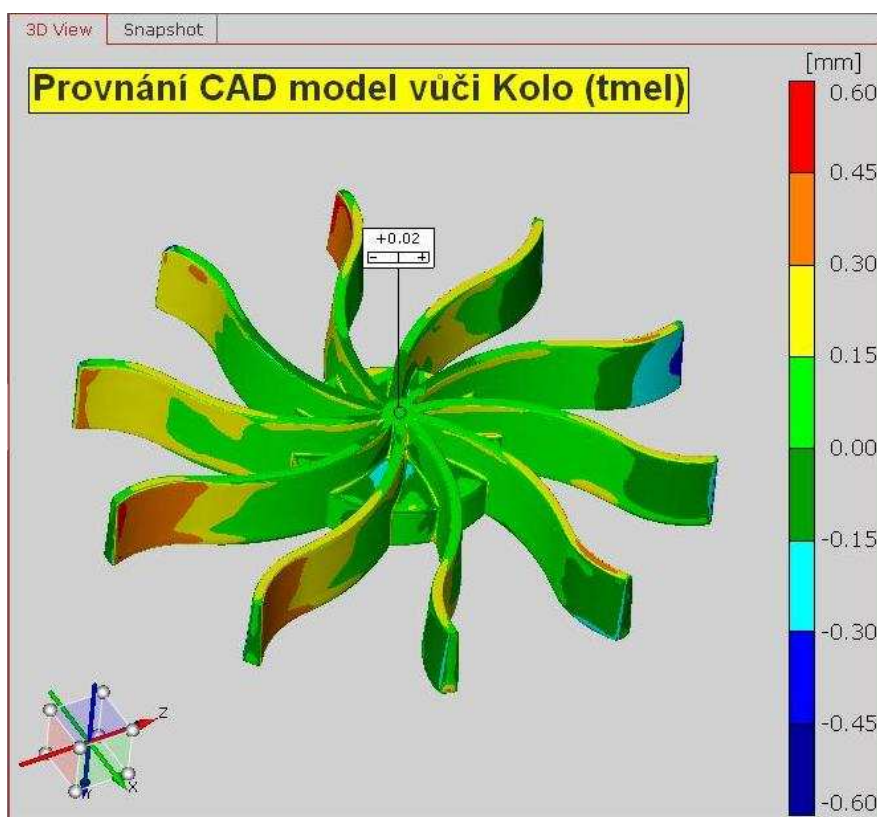
Parametry skenování:

- měřený objem - $1200 \times 960 \times 960 \text{ mm}^3$,
- výsledná vzdálenost měřených bodů - 0,94 mm,
- úhel kamer - 22° ,
- měřicí vzdálenost - 1120 mm.

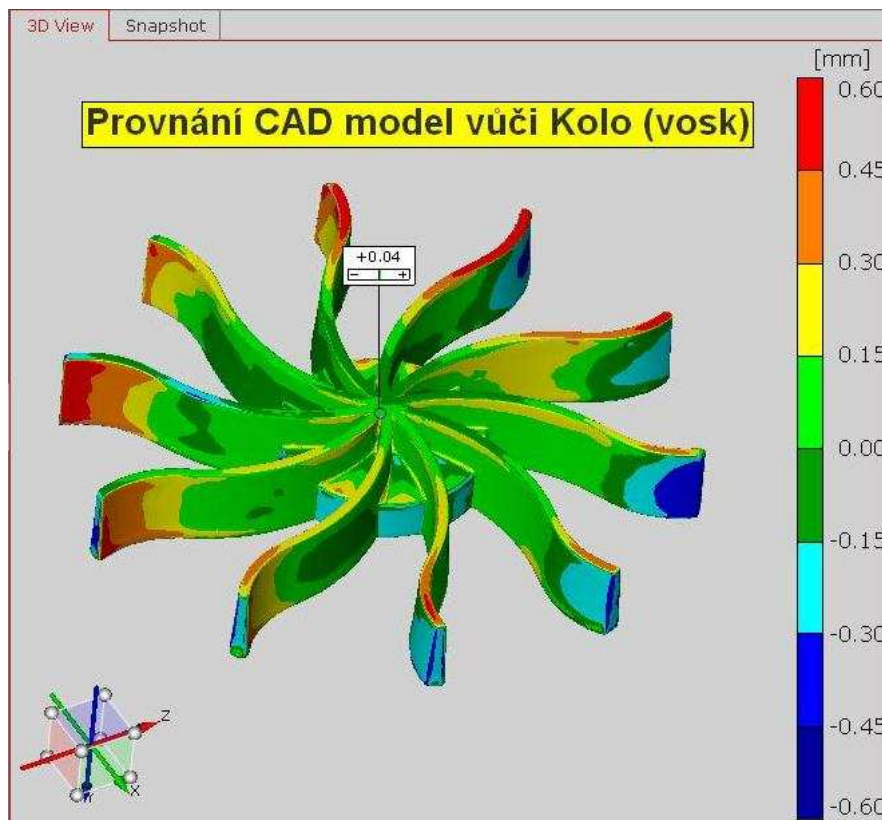
Porovnávání bylo provedeno v softwaru Atos Viewer v6.2.0-6. Jednotlivé naskenované modely byly porovnány s CAD modelem tak, aby byly přibližně zjištěny změny rozměrů, tak jak probíhala výroba. Výstupy z programu jsou zobrazeny na Obr.3.5c, 3.5d a 3.5e.



Obr. 3.5c Porovnání CAD model -FDM model



Obr. 3.5d Porovnání CAD model - FDM model zatmelený

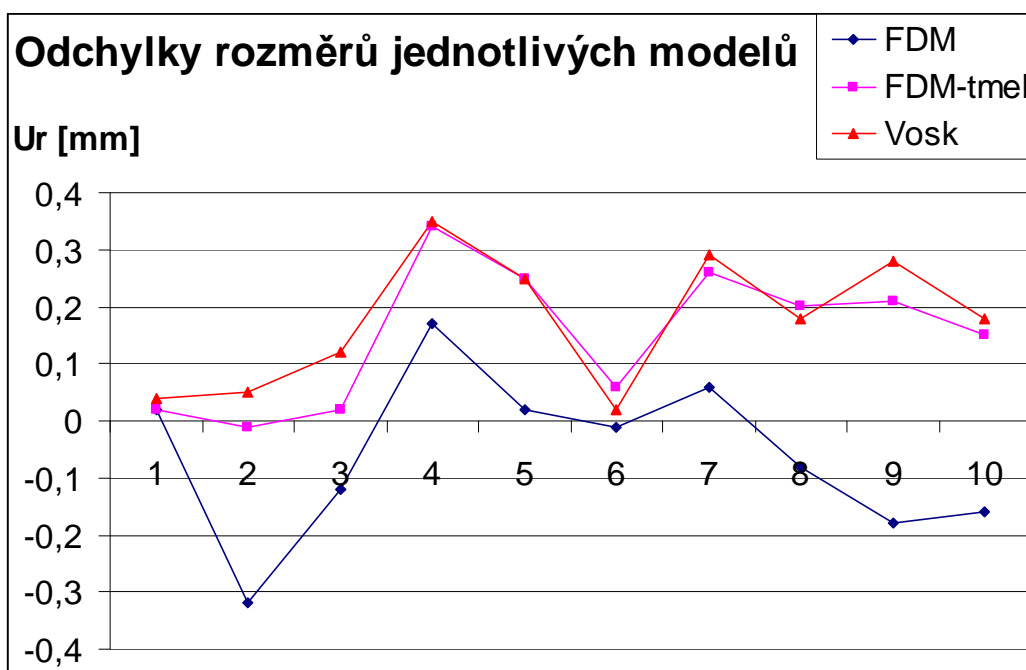


Obr. 3.5e Porovnání CAD model - voskový model

Na součásti bylo vybráno 10 bodů a v nich se měřila odchylka rozměrů od CAD modelu. Hodnoty měření v jednotlivých bodech jsou zaznamenány v Tab. 3.5. Z nich bylo sestaveno grafické vyhodnocení Obr. 3.5f.

Tab. 3.5 Odchyly rozměrů U_r [mm]

bod	FDM	FDM-tmél	Vosk
1	0,02	0,02	0,04
2	-0,32	-0,01	0,05
3	-0,12	0,02	0,12
4	0,17	0,34	0,35
5	0,02	0,25	0,25
6	-0,01	0,06	0,02
7	0,06	0,26	0,29
8	-0,08	0,2	0,18
9	-0,18	0,21	0,28
10	-0,16	0,15	0,18



Obr. 3.5f Odchyly rozměrů.

Z měření vyplívá, že změna rozměrů oproti CAD modelu je patrná již na master modelu před zatmelením. Nepřesnost tak vykazuje již tisk na 3D tiskárně. Tato nepřesnost může být způsobena při ukládání modelu do STL formátu. Při porovnání zatmeleného master modelu je odchylka v důsledku nanesení tmelu větší. Z toho plyne, že broušení master modelu mělo být provedeno důkladněji. Voskový model vykazuje podobné odchylky jako zatmelený master model. Jeho rozměry tak téměř master model kopírují a při jeho odlití do silikonové formy již k značným rozměrovým změnám nedochází.

4. TECHNICKO-EKONOMICKÉ HODNOCENÍ

Náklady na výrobu voskových modelů pomocí metod RP a vakuového lití do silikonové formy byly porovnány s výrobou voskových modelů pomocí vstřikování do kovové formy. Podklady k hodnocení byly získány od pracovníků firem MCAE Systems s.r.o., Kuřim a PBS Velká Bíteš a.s.

- náklady na výrobu silikonové formy - $N_S = 4000$ Kč,
- náklady na tisk master modelu - $N_M = 2300$ Kč,
(firma MCAE garantuje rozměrovou přesnost modelů do 5 kusů)
- náklady na výrobu voskového modelu - $N_V = 100$ Kč,
- náklady na výrobu kovové formy pro vstřikování - $N_K = 120000$ Kč,
- počet kusů modelů v sérii - n

Náklady byly spočítány pro výrobní série 10,100,1000,10000 a 100000 kusů.

Celkové náklady na výrobu voskových modelů pomocí metod RP a vakuového lití:

$$N_{C1} = (N_S \cdot \frac{n}{5}) + N_M + (N_V \cdot n)$$

Celkové náklady na výrobu voskových modelů vstřikováním do kovové formy:

$$N_{C2} = N_K + (N_V \cdot n)$$

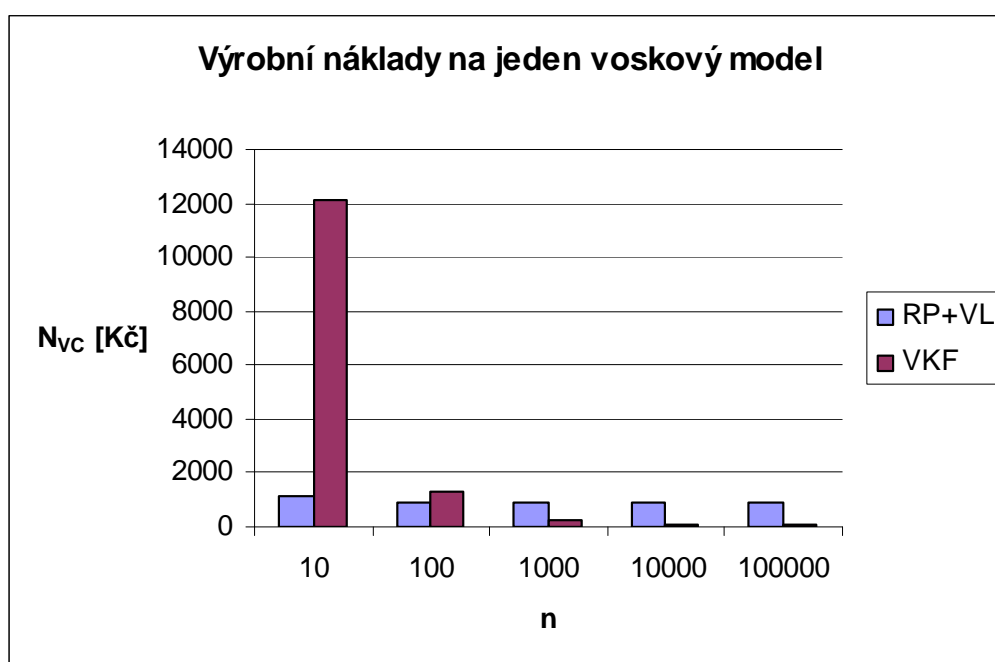
Náklady na výrobu jednoho voskového modelu:

$$N_{VC1} = \frac{N_{C1}}{n}$$

$$N_{VC2} = \frac{N_{C2}}{n}$$

Tab. 4.1 Náklady na výrobu voskových modelů

n	N_{VC1} [Kč]	N_{C1} [Kč]	N_{VC2} [Kč]	N_{C2} [Kč]
10	1130	11300	12100	121000
100	923	92300	1300	130000
1000	902,3	902300	220	220000
10000	900,23	9002300	112	1120000
100000	900,023	90002300	101,2	10120000



Obr. 4.1 Výrobní náklady na jeden voskový model.

Z výpočtů a grafu Obr. 4.1 vyplynulo, že u malého množství vyráběných voskových modelů se vyplatí využít metod RP a vakuového lití. Dále bylo nutné zjistit od jakého počtu kusů, by se již vyplatila výroba kovové formy. K určení kritického výrobního množství stačí dát do rovnosti oba vztahy pro výpočet celkových nákladů pro jednotlivé technologie a dostaneme počet kusů od, kterého se vyplatí vyrábět voskové modely vstřikováním do kovové formy.

Kritické výrobní množství:

$$N_{C1} = N_{C2}$$

$$\left(N_S \cdot \frac{n}{5}\right) + N_M + (N_V \cdot n) = N_K + (N_V \cdot n)$$

$$n_k = \frac{5}{N_S} (N_K - N_M)$$

$$n_k = \frac{5}{4000} (120000 - 2300)$$

$$n_k = 147,125 = 148$$

Od 148 kusů je tedy kovová forma pro výrobu voskových modelů výhodnější. Je to dáno tím, že silikonová forma má garantovanou přesnost jen do určitého množství odlitých voskových modelů a tak se musí v závislosti na této přesnosti zhotovovat několikrát. Přesnost voskových modelů vstřikovaných do kovové formy se s přibývajícím počtem kusů nijak výrazně nemění.

Dále bylo nutné vypočítat náklady na výrobu hotových součástí metodou vytavitelného modelu. Byly porovnány náklady na otevřené lití a vakuové lití. Pro oba materiály u obou způsobů je cena přibližně stejná. U menšího počtu vyráběných kusů (10,100) je nutné počítat s přírůzkou přibližně 20 %. Při velkém počtu kusů (100 000) by zřejmě byla poskytnuta sleva přibližně 5%.

- náklady na výrobu jednoho odlitku - otevřené lití - $N_O = 1\ 000$ Kč
- náklady na výrobu jednoho odlitku - vakuové lití - $N_{VAK} = 3\ 500$ Kč

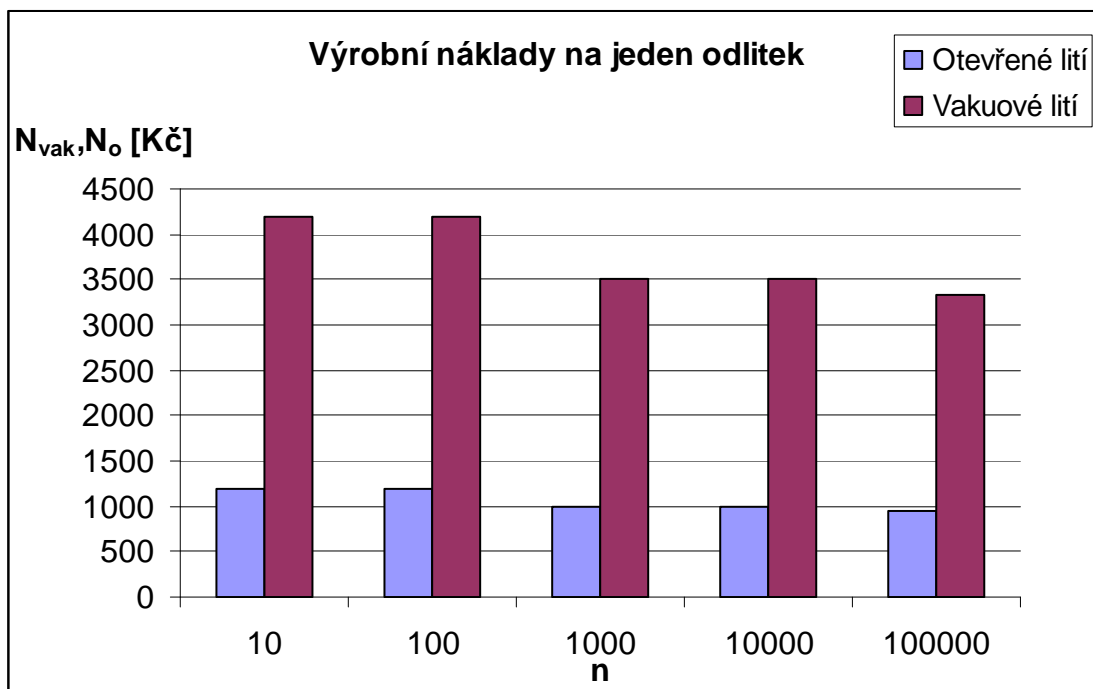
Celkové náklady na výrobu odlitků otevřené/vakuové lití:

$$N_{C3} = N_O \cdot n$$

$$N_{C4} = N_{VAK} \cdot n$$

Tab. 4.2 Náklady na výrobu odlitků

n	N_O [Kč]	N_{C3} [Kč]	N_{VAK} [Kč]	N_{C4} [Kč]
10	1200	12000	4200	42000
100	1200	120000	4200	420000
1000	1000	1000000	3500	3500000
10000	1000	10000000	3500	35000000
100000	950	95000000	3325	332500000



Obr. 4.2 výrobní náklady na jeden odlitek

Odlitky vyráběné pomocí vakuového lití jsou z dražších materiálů, obecně lze říct, že jsou přesnější a tak i jejich výroba je, oproti odlitkům vyráběným otevřeným litím, nákladnější Obr. 4.2.

Posledním krokem je srovnání celkových nákladů na jeden kus pro oba způsoby odlévání při započtení nákladů na výrobu voskových modelů.

Otevřené lití:

$$N_{CO1} = N_{VC1} + N_o$$

$$N_{CO2} = N_{VC2} + N_o$$

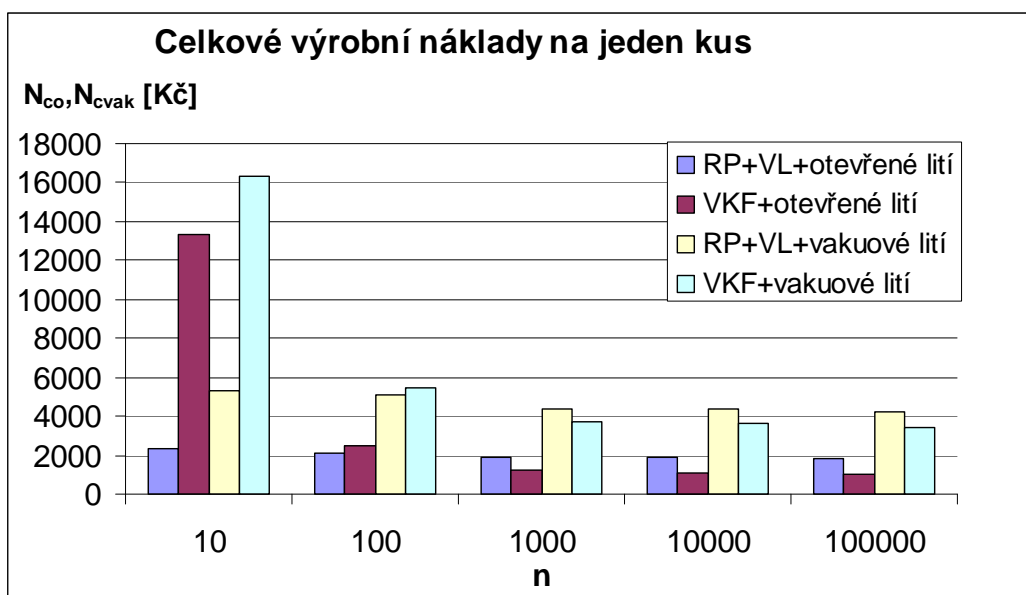
Vakuové lití:

$$N_{CVAK1} = N_{VC1} + N_{VAK}$$

$$N_{CVAK2} = N_{VC2} + N_{VAK}$$

Tab. 4.3 Celkové náklady na jeden kus

n	N_{CO1} [Kč]	N_{CO2} [Kč]	N_{CVAK1} [Kč]	N_{CVAK2} [Kč]
10	2330	13300	5330	16300
100	2123	2500	5123	5500
1000	1902,3	1220	4402,3	3720
10000	1900,23	1112	4400,23	3612
100000	1850,023	1051,2	4225,023	3426,2



Obr. 4.3 Celkové výrobní náklady.

V tomto případě Obr.4.3 platí již vysledované trendy z předchozích srovnání a to, že od daného počtu kusů je výhodnější vyrábět voskové modely vstříkováním do kovové formy a odlévání hotové součásti je obecně levnější způsobem otevřeného lití. Graf tak slouží především ke srovnání celkových nákladů.

ZÁVĚR

V této diplomové práci bylo provedeno ověření výroby navržené součásti metodami - Rapid Prototyping, vakuové lití do silikonových forem a metoda vytavitelného modelu. Dosažené výsledky jsou shrnuty v následujících bodech:

- byl proveden rozbor metod Rapid Prototyping a vakuového lití do silikonových forem,
- navržený master model byl vytvořen pomocí metody FDM,
- byla vytvořena silikonová forma,
- pomocí silikonové formy byly vytvořeny voskové modely,
- byly zhotoveny finální součásti,
- bylo provedeno technicko - ekonomické hodnocení.

Z dosažených výsledků lze vyvodit následující závěry:

- výroba je realizovatelná, ale je možné ji v případě některých změn zkvalitnit,
- metoda FDM je výhodná z hlediska rychlosti výroby master modelu, ale je nutná jeho úprava. Nabízí se možnost využít pro jeho tvorbu jinou RP technologii např. SL,
- při tmelení master modelu je nutné optimálně zvolit počet nástřiků a následně důsledně brousit, tak aby rozměrové změny byly co nejmenší,
- při výrobě horního dílu silikonové formy by bylo vhodnější použít větší množství materiálu, aby při lití nedošlo k situaci, která nastala u prvního modelu, kdy se horní díl přizvedl a vosk zatekl do dělicí roviny. Případně při stejném množství materiálu horní díl lépe zafixovat,
- výroba voskových modelů navrženým postupem se vyplatí jen u malých sérií výrobků. Dle hodnocení již od 148 ks je výhodnější volit pro výrobu voskových modelů kovovou formu pro vstřikování,
- cena odlitků pro vakuové lití je výrazně vyšší než u otevřeného a je proto na zvážení jaké materiály a jaký způsob odlití si zvolit.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. DRÁPELA, M. *Modul Rapid Prototyping*. [online]. [cit. 27.12.2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.vu.vutbr.cz/digidesign/Moduly/Rapid%20Prototyping%20-%20Ing.%20Milosvav%20Drápela.pdf>>.
2. PÍŠA, Z. *Rychlá výroba prototypů* [online]. [cit. 28.12.2009]. Dostupné na World Wide Web: <<http://esf.fme.vutbr.cz/aktivity/akt-05/mod-07/rpt.pdf>>.
3. GEBHARDT, A. *Rapid Prototyping*. CARL HANSER VERLAG, 2003, 377s. ISBN 3-446-21259-0.
4. NAVRÁTIL, R. *Rapid prototyping* [online]. Leden 2000 [cit. 25.3.2010]. Dostupné na World Wide Web: <<http://robo.hyperlink.cz/rapid/index.html>>.
5. *Selective laser sintering* [online]. [cit. 21.4.2010]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.kenwalt.com/prototype_casting_SLS.gif>.
6. *Fused deposition modelling* [online]. [cit. 29.4.2010]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.custompartnet.com/wu/images/rapid-prototyping/fdm.png>>.
7. PÍŠKA, M. a kolektiv. *Speciální technologie obrábění*. CERM 1.vyd. 246s. 2009. ISBN 978-80-214-4025-8.
8. ROUPEC, J. *Zařízení pro vakuové lití do silikonových forem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2006. XY s. Vedoucí diplomové práce Ing. David Paloušek.
9. *Silikonové formy-teoretická část* [online]. [cit. 25.4.2010]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/res_silikonove_formy/index.htm>.
10. CHARVÁT, O. *Možnosti aplikace metod Rapid Prototyping s použitím technologie vytavitelného modelu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2006. 121 s. Vedoucí diplomové práce Prof. Ing. Milan Horáček, CSc.
11. *Development of Vacuum Casting Mold* [online]. [cit. 18.2.2010]. Dostupné na World Wide Web: <<http://electroplating.accugas.com/example/example2.html>>.
12. Axson. *Firemní materiály* [online]. [cit. 2.5.2010]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.axson.cz/www/index.php>>.
13. Ebalta. *Katalog materiálů* [online]. [cit. 2.5.2010]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.ebalta.cz/ramy/katalog.html>>.
14. HORÁČEK, M. *Technologie vytavitelného modelu* [online]. [cit. 18.4.2010]. Dostupné na World Wide Web: <<http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/download/technologie-vytavitelneho-modelu.pdf>>.
15. KRACMAN, O. *Faktory ovlivňující přesnost odlitků u metody vytavitelného modelu* [online]. [cit. 24.4.2010]. Dostupné na World Wide Web: <http://stc.fs.cvut.cz/History/2008/Sbornik/S3/Kracman_Ondrej_12133.pdf>.
16. HERMAN, A. *Lití na vytavitelný model* [online]. [cit. 24.4.2010]. Dostupné na World Wide Web:

- <<http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/MPL/presne%20liti%20na%20vytavitelny%20model.pdf>>.
17. KOSOUR, V., *Technologie rychlého prototypování za použití metody FDM a současně technologie vytavitelného modelu*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008, 165 s., vedoucí diplomové práce Prof. Ing. Milan Horáček. CSc.
 18. NAVRÁTIL, R. *3D skenery* [online]. Leden 2000 [cit. 9.5.2010]. Dostupné na World Wide Web: <<http://robo.hyperlink.cz/3dskenery/index.html>>.
 19. GALANULIS, K., REICH, C., THESING, J., WINTER, D., *Optical Digitizing by ATOS for Press Parts and Tools* [online]. [cit. 9.5.2010]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.capture3d.com/file-sheetmetal-download.pdf>>.
 20. CHARVÁT, O., HORÁČEK, M. *Možnosti aplikace metod rapid prototyping s použitím technologie vytavitelného modelu*. In Slévárenské dny s doprovodnou výstavou a 4. mezinárodní Ph.D. konferencí. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 16.-17. října 2007. s. 7.
 21. GOM mbH. *Measuring systems* [online]. [cit. 10.5.2010]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.gom.com/EN/measuring.systems/atos/system/system.html>>.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
CAD	-	Computer Aided Design
RP	-	Rapid Prototyping
RT	-	Rapid Tooling
RST	-	Rapid Soft Tooling
RHT	-	Rapid Hard Tooling
SL	-	Stereolitografie
SLS	-	Selective Laser Sintering
FDM	-	Fused Deposition Modeling
LOM	-	Laminated Object Manufacturing
SGC	-	Solid Ground Cudiny
3DP	-	Three Dimensional Printing
3D	-	Three Dimension
VL	-	Vakuové lití
VKF	-	Vstřikování do kovové formy
n	ks	Počet kusů modelů v sérii
n_k	ks	Kritické výrobní množství
N_S	Kč	Náklady na výrobu silikonové formy
N_M	Kč	Náklady na tisk master modelu
N_V	Kč	Náklady na výrobu voskového modelu
N_K	Kč	Náklady na výrobu kovové formy pro vstřikování
N_{C1}	Kč	Celkové náklady na výrobu voskových modelů pomocí metod RP a vakuového lití
N_{C2}	Kč	Celkové náklady na výrobu voskových modelů vstřikováním do kovové formy
N_{VC1}	Kč	Náklady na výrobu jednoho voskového modelu
N_{VC2}	Kč	Náklady na výrobu jednoho voskového modelu
N_{C3}	Kč	Celkové náklady na výrobu odlitků - otevřené lití
N_{C4}	Kč	Celkové náklady na výrobu odlitků - vakuové lití
N_O	Kč	Náklady na výrobu jednoho odlitku - otevřené lití
N_{VAK}	Kč	náklady na výrobu jednoho odlitku - vakuové lití
N_{CO}	Kč	Celkové výrobní náklady - otevřené lití
N_{CVAK}	Kč	Celkové výrobní náklady - vakuové lití