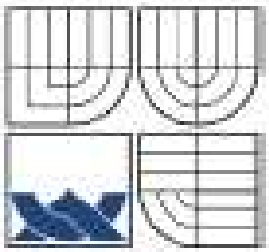
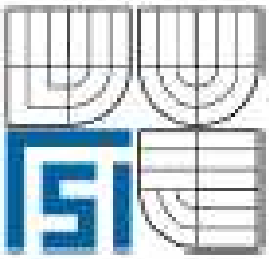


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

Technologie rychlého prototypování za použití metody FDM a současně technologie vytavitelného modelu

TITLE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE — VÁCLAV SMRČKA
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — DOC. ING. MILAN HORÁČEK,CSC.
SUPERVISOR

BRNO 2008

Zadání

Zadání

ABSTRAKT

Stanovení přesnosti voskových modelů je důležitým krokem v širším uplatnění metod rychlého prototypování v průmyslové výrobě odlitků. Výsledkem této práce je srovnání stupňů přesnosti voskových modelů, vyrobených ve formě silikonové a v matečné kovové formě, které se dále využijí v přesném lití. Výsledkem experimentu je zjištění, že modely vyrobené pomocí metod rychlého prototypování jsou pouze o jeden až dva stupně přesnosti horší něž modely vyrobené ve formě kovové.

KLÍČOVÁ SLOVA

Rychlé prototypování, voskové modely, přesnost, přesné lití

ABSTRACT

Determining accuracy of wax patterns is an important in wide implementing rapid prototyping methods in investment casting. This experiment is comparing wax pattern accuracy produced in classical metal die and silicone mould. It has been found out, that wax patterns produced by the silicone mould are ounly about one or two accuracy steps worse then wax patterns produced by classical metal die.

KEJ WORDS

Rapid prototyping, wax pattern, accuracy, investment casting

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SMRČKA, V. *Technologie rychlého prototypování za použití metody FDM a současně technologie vytavitelného modelu.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 77 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Milan Horáček, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Technologie rychlého prototypování za použití metody FDM a současně technologie vytavitelného modelu vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum 23.5.2008

Václav Smrčka

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji svému vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Milanu Horáčkovi, CSc. za jeho trpělivost, pomoc a cenné připomínky při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Jiřímu Horenskému za jeho ochotu, vstřícnost a pomoc při měření voskových modelů. Děkuji také Ing. Ondřeji Charvátovi a Ing. Petru Michalcovi za jejich pomoc. Děkuji všem dalším zainteresovaným pracovníkům společnosti MCAE SYSTEMS.

OBSAH

Abstrakt 4
Klíčová slova 4
Prohlášení 5
Poděkování 6
Obsah 7
1.0 Cíl práce 9
2.0 Teoretická část 10
2.1 Technologie přesného lití na vytavitelný model 10
2.1.1 Popis technologie 10
2.1.2 Přesnost technologie 12
2.2 Technologie rychlého prototypování 16
2.2.1 Popis technologie 16
2.2.2 Výhody Rychlého prototypování 17
2.2.3 Přínos rychlého prototypování do výroby 17
2.2.4 Rozdělení metod rychlého prototypování 18
2.2.5 Popis nejčastěji používaných metod 19
2.2.5.1 Metoda FDM – Fused deposition modeling 19
2.2.5.2 Stereolitografie SLA 23
2.2.5.3 Selective laser sintering SLS 25
2.2.5.4 Laminated manufacturing 27
2.2.6 Přesnost RP strojů 28
2.2.7 Využití prototypů v praxi 29
2.2.7.1 Návrh možného využití technologie ve slévárenství 29
2.2.7.2 Konkrétní příklady využití rychlého prototypování ve slévárenství 32
2.2.7.3 Využití rychlého prototypování v dalších oblastech 34
2.2.8 Silikonové materiály 37
3.0 Praktická část 39
3.1 Cíl experimentu 39
3.2 Metodika měření 39
3.2.1 Modely vyrobené do silikonové formy (RP) 39
3.2.1.1 Výroba ABS modelu 39
3.2.1.2 Příprava modelu pro výrobu silikonové formy 40
3.2.1.3 Výroba silikonové formy 41
3.2.1.4 Výroba voskových modelů 47
3.2.1.5 Postup měření 52
3.2.1.6 Výsledky měření 53
3.2.2 Modely vyrobené v kovové matečné formě 55
3.2.2.1 Výroba voskového modelu 55
3.2.2.2 Postup měření 57
3.2.2.3 Výsledky měření 57
3.3 Vyhodnocení výsledků 59
3.3.1 Modely vyrobené v silikonové formě 59
3.3.1.1 Porovnání rozměrů naměřených po 3 hodinách a po 24 hodinách a rozměrů ABS modelu 59
3.3.1.2 Smrštění modelů 61
3.3.1.3 Porovnání požadovaných tolerancí odlitku a dosažených tol. modelů 61
3.3.1.4 Změna rozměrů během výroby modelů 62

3.3.2 Modely vyrobené v kovové matečné formě 64
3.3.2.1 Porovnání rozměrů voskových modelů a rozměrů matečné formy 64
3.3.2.2 Smrštění modelů 65
3.3.2.3 Porovnání požadovaných tolerancí odlitku a dosažených tolerancí voskových modelů 66
3.3.3 Porovnání modelů z kovové formy a silikonové formy 67
3.3.3.1 Porovnání smrštění modelů ze silikonové a z kovové formy 67
3.3.3.2 Porovnání tolerancí modelů ze silikonové a kovové formy s tolerancemi předepsanými na výkrese 68
3.3.4 Vyhodnocení tolerancí dosažených u voskových modelů 70
3.3.4.1 Modely vyrobené do silikonové formy 70
3.3.4.2 Modely vyrobené do kovové formy 72
3.3.4.3 Stanovení stupně přesnosti IT u modelů 73
4.0 Závěr – návrh dalšího postupu práce 74
Seznam použité literatury a internetových odkazů: 75
Seznam tabulek 76
Seznam obrázků 76
Seznam grafů 77
Seznam příloh 77

1.0 Cíl práce

Cílem této práce je srovnání přesnosti voskových modelů vyrobených pomocí metod rychlého prototypování (forma silikonová) s modely vyrobenými v kovové matečné formě. Modely jsou následně využity při lití hliníkových slitin technologií vytavitelného vosku. Srovnáním přesností obou technologií zjistíme, zda jsme schopni pomocí metod rychlého prototypování vyrábět menší série modelů (odlitků) stejně přesných a kvalitních jako by byly vyrobené běžnými technologiemi.
Využitím metod rychlého prototypování je možné u menší série odlitků dosáhnout zrychlení a zlevnění celého výrobního procesu a tím i konečného odlitku.

2.0 Teoretická část

2.1 Technologie přesného lití na vytavitelný model

2.1.1 Popis technologie

Technologie přesného lití na vytavitelný model se skládá z několika částí:

a) Výroba matečné formy

Výroba modelového zařízení je první důležitou operací v technologickém sledu výroby přesných odlitků. Prvotním předpokladem pro výrobu přesného odlitku je přesný model s dokonalým povrchem a s přesně dodrženými rozměry. Ke zhotovení takového modelu je potřeba velmi přesně vyrobená forma. Tvar dutiny je shodný s budoucím tvarem součástky. **[1] (obr.:2-1)**

Matečnou formu lze vyrobit několika způsoby. Záleží na požadovaném počtu vyrobených modelů, složitosti modelu, přesnosti, …

Formu lze vyrobit:
- obráběním z oceli a Al slitin
- z nízko tavitelných slitin, zalitím kovového modelu odlitku
- ze slitin Zn, zalitím kovového modelu
- z plastických hmot
- ze sádry

(obr.: 2-1) Matečná forma vyrobená obráběním **[1]**

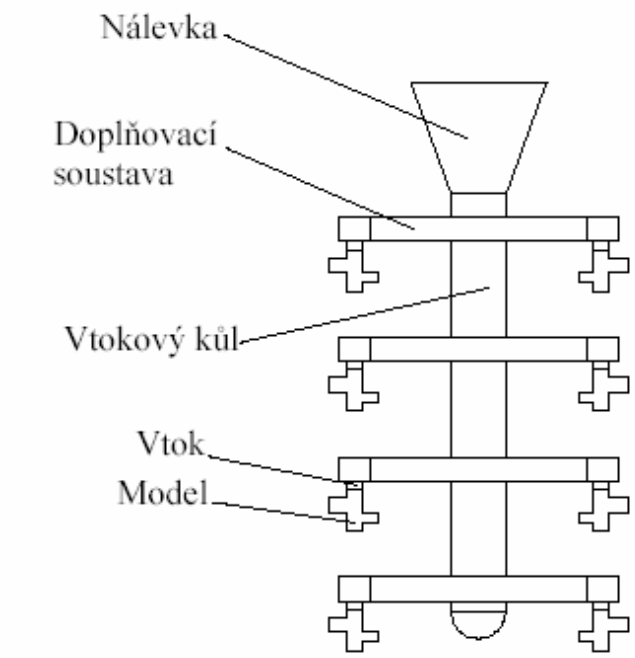
b) Výroba voskových modelů

Voskové modely se vyrábějí dvěma způsoby:

- na plničkách pracujících s tekutým voskem
- na vstřikolisech pracujících s voskem v kašovitém stavu

c) Sestavování modelů do stromečku

Stromeček je sestaven z vtokového kůlu, voskových modelů a rozváděcí soustavy. Případně lze v některých případech lepit modely přímo na vtokový kůl. Jednotlivé části se na sebe lepí.



(obr.:2-2) Jednotlivé části stromečku**. [1]**

d) Výroba skořepinové formy obalováním

Obalování spočívá v opakovaném namáčení modelových stromečků do pojiva a posypávání žáruvzdorným materiálem o vhodné zrnitosti a sušení jednotlivých obalů. Tento cyklus se opakuje tolikrát, dokud nemá obal požadovanou tloušťku. Počet vrstev bývá obvykle mezi pěti až patnácti dle požadované pevnosti formy.

- Jako pojiva formovacích hmot na skořepinové formy se používají především koloidní roztoky oxidu křemičitého, dále také organické sloučeniny hliníku, titanu, zirkonu a některé sloučeniny anorganické.

- Na výrobu skořepin se jako žáruvzdorné materiály používají hlavně kysličníky a křemičitany. Pro praktické průmyslové použití se z kysličníků využívá především Al_2O_3 – oxid hlinitý, ZrO_2 – oxid zirkoničitý. Z křemičitanů se využívá nejvíce mulitu, zirkonu, silimanitu a hlavně molochitu. Molochit není běžná surovina, je to v podstatě mullit (56%) ve sklovité obálce amorfního kysličníku křemičitého (44%)

e) Vytavování voskových modelů ze skořepinových forem

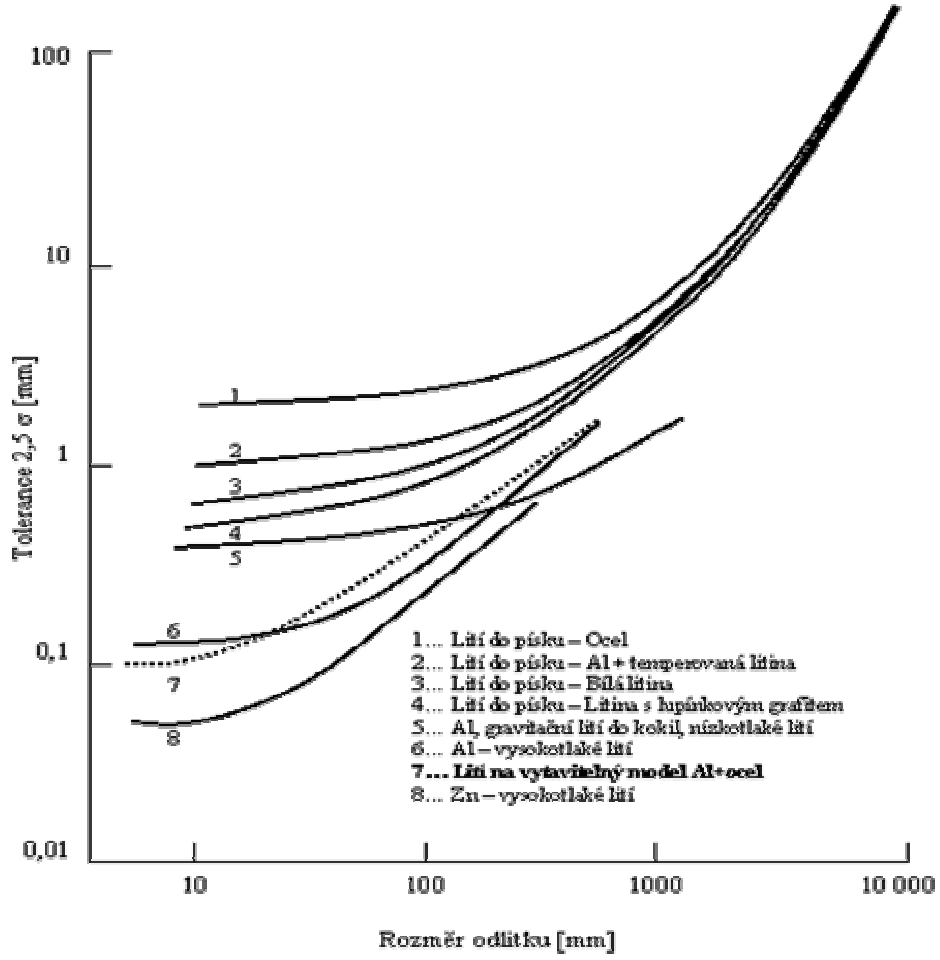
Ohřev vosku a jeho roztavení musí být velmi rychlý, aby nedošlo k jeho dilataci a popraskání formy vlivem rozdílné tepelné roztažnosti vosku a keramické formy.
Vytavení lze provést několika způsoby, nejčastěji se však používá autoklávu. Tam je vosk roztaven tlakovou parou.

f) Vypalování skořepinové formy

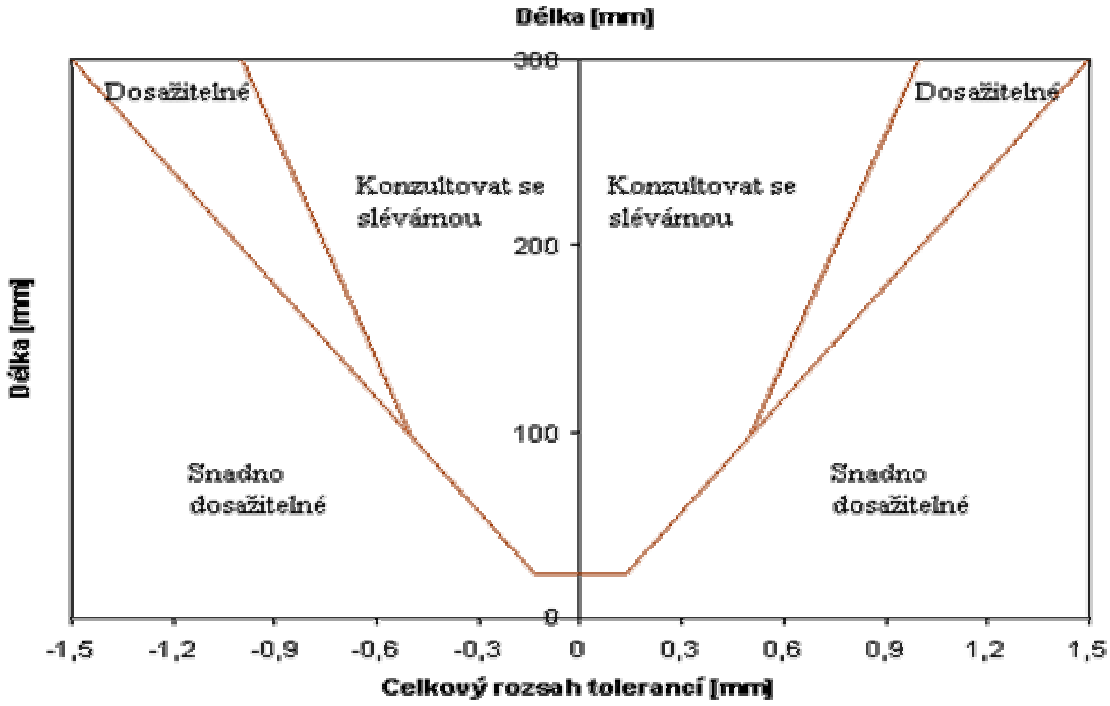
Důvodem vypalování (žíhání) keramických forem je to, že se převede amorfní forma vazné vrstvy SiO_2 na formu krystalickou. Dále se tak vypálí zbytky nevytaveného vosku a forma se přehřeje pro následné odlití.

2.1.2 Přesnost technologie

Metoda vytavitelného modelu je jednou z metod výroby přesných součástí z hlediska dosažitelnosti velmi úzkých rozměrových tolerancí**[2]** v porovnání s ostatními metodami výroby **(tab.:2-1)**. V dnešní době se dosahuje zhruba přesností viz. (**tab.:2-2)**.



(tab.:2-1) Porovnání technologií výroby odlitků z hlediska přesnosti**. [3]**

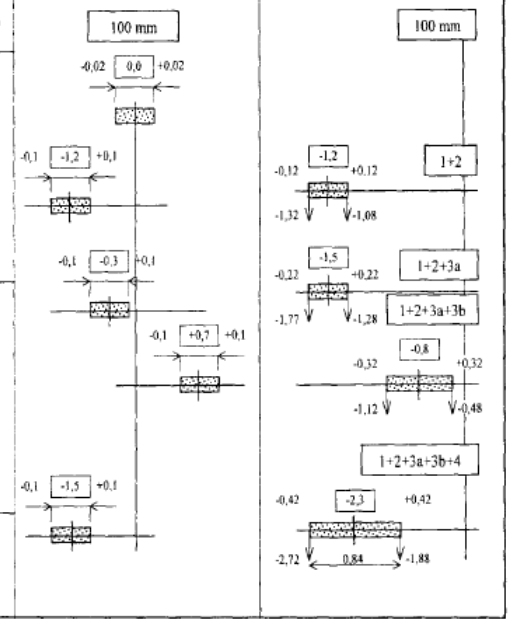


(tab.:2-2) Dosažitelnost tolerancí v závislosti na rozměru odlitku. **[3]**

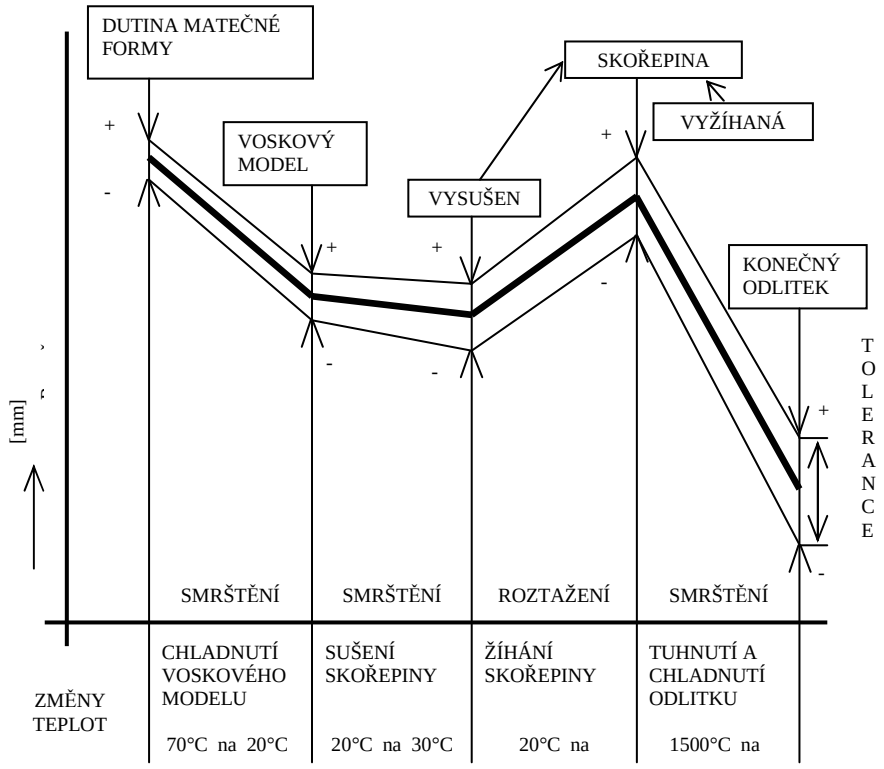
Bližší pohled na jednotlivé fáze technologie vytavitelného modelu nám nicméně ukáže, že dosažení úzkých rozměrových tolerancí není u této technologie snadné. Z tabulky (**tab.:2-3), (tab.:2-4)** je zřejmé že rozměrové změny se vyskytují prakticky ve všech fázích technologie vytavitelného modelu. Z tohoto pohledu jsou nejdůležitější fáze zhotovení voskového modelu, skořepinové formy a také fáze tuhnutí a chladnutí odlitku.Přitom rozměrové změny u poslední zmíněné fáze (tuhnutí a chladnutí) jsou dány chemickým složením slitiny a nemůžeme je tedy libovolně ovlivňovat/měnit (rozsah optimálních licích teplot je dán chemickým složením odlévané slitiny a její zabíravostí, která musí být volena s ohledem na konfiguraci odlitku).**[2]**

.

No. číslo	phase of technology operace	influences to contraction/expansion vliv na smršťování/roztažení	expected dimensional changes očekávané změny rozměru	examples of contraction/ /expansion typické hodnoty smrštění/roztažení	example příklad: individual influences (1, 2, 3a, 3b, 4)	example příklad: cumulated influences (1 + 2 + 3a + 3b + 4)
1.	die manufacture výroba matečné formy	manufacturing technology used technologie užitá při výrobě matečné formy	0 % (± Δ Man.)	0 % (± 0,02 mm)		
2.	wax pattern voskový model	type of wax injection time injection speed holding time injection pressure typ vosku doba odstřiku vosku rychlost vstřikování vstřikovací cyklus vstřikovací tlak	–W % (± Δ W)	–1,2 % (± 0,1)		
3a	shell mould drying sušení skořepiny	material of shell drying technology materiál skořepiny systém sušení	$-S_s$ % ($\pm \Delta S_s$)	–0,3 % (± 0,1)		
3b	shell mould firing žíhání skořepiny	material of shell firing technology materiál skořepiny systém žíhání	$+S_f$ % ($\pm \Delta S_f$)	+0,7 % (± 0,1)		
4	metal pouring lití kovu	chemical composition pouring temperature chemické složení lící teplota	–A % (± Δ A)	–1,5 % (± 0,1)		



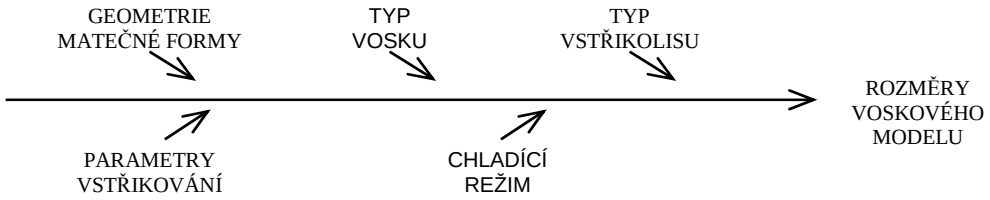
(tab.: 2-3) Rozměrové změny v průběhu výroby **[2]**



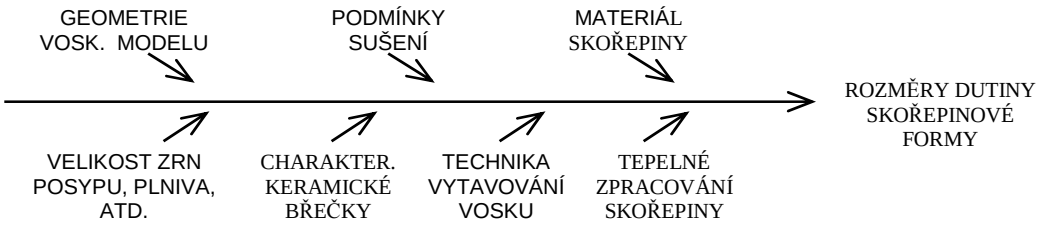
(tab.:2-4) Rozměrové změny v průběhu výroby **[3]**

Znalost chování voskového modelu při jeho výrobě je z hlediska přesnosti dosahovaných rozměrů konečného odlitku pouze jednou ze součástí nutné komplexní znalosti rozměrových změn v průběhu celého technologického toku. To znamená, že je nutná nejen znalost rozměrových změn při výrobě voskového modelu, ale i při výrobě skořepiny (obalování, vytavování vosku, schnutí a žíhání skořepiny) a dále po nalití tekutého kovu (odolnost formy vůči tlaku tekutého kovu a v průběhu tuhnutí) **(tab.:2-5).[2]** Nezanedbatelný je přitom dále faktor tvarový, kdy rozměrové změny je vždy třeba posuzovat třídimenzionálně (jiné hodnoty smrštění délky, šířky a tloušťky). **[2]**

FÁZE I [Dutina matečné formy – Voskový model]



FÁZE II [Voskový model – Dutina skořepiny]



FÁZE III [Dutina skořepiny - Odlitek]

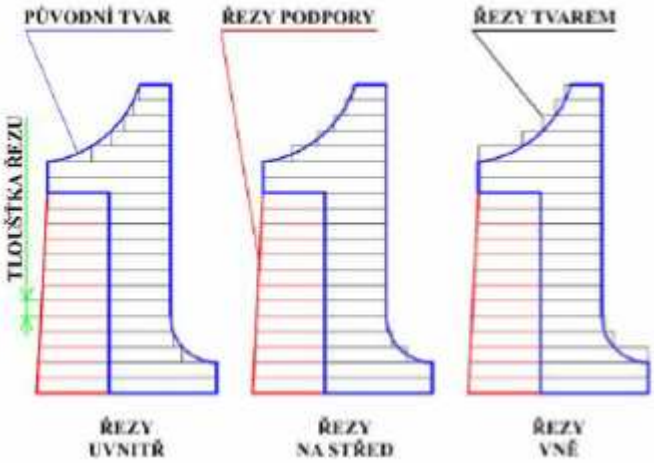
(tab.: 2-5) Faktory ovlivňující konečnou přesnost odlitku **[2]**

2.2 Technologie rychlého prototypování

2.2.1 Popis technologie

Na rozdíl od konvenčních metod obrábění, u kterých je materiál z výchozího polotovaru odebírán, u metod rychlého prototypování je materiál po vrstvách přidáván. 3D model součásti nakreslený v CAD programu je pro výrobu exportován do STL formátu a počítačem rozdělen na množství vrstev o tloušťce cca desetiny mm, které je poté možno považovat za dvourozměrné (2D). Model je poté na RP stroji po vrstvách vyroben kladením jednotlivých vrstev na sebe. Takto lze poměrně snadno vyrobit prostorové (3D) předměty značné geometrické složitosti, přičemž výrobní postup je ve většině případů na geometrii vyráběné součásti zcela nezávislý. **[5]**

(obr.: 2-3) Popis přípravy a výroby RP modelu **[6]**



(obr.: 2-4) Schéma řezů modelem **[6]**

2.2.2 Výhody Rychlého prototypování

RP je momentálně nejpokročilejší metodou pro rychlou a kreativní výrobu prototypů. Toho je dosaženo na RP strojích, které mohou vyrobit prototypy ve velmi krátkém čase. Závisí to především na složitosti prototypu a na použitém materiálu. Vše může být hotovo během několika hodin, maximálně dnů. Metoda rychlého prototypování je využitelná přímo ve strojních provozech. **[7]**

Mezi hlavní výhody tedy patří: **[5]**

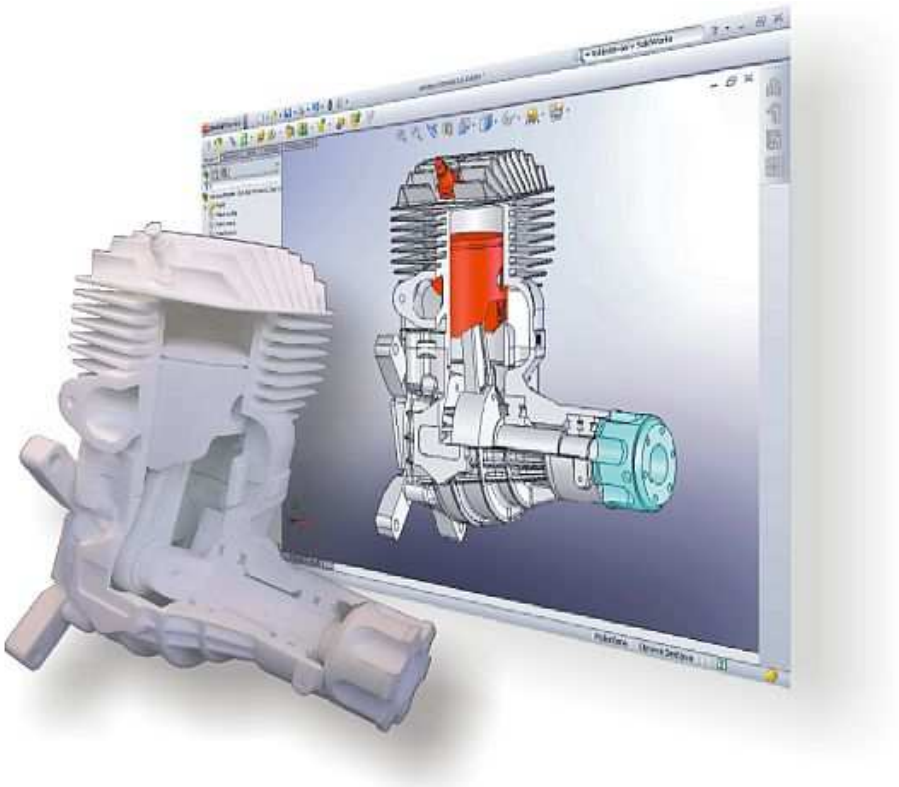
- Rychlost a nízká cena oproti jiným metodám.
- Možnost vyrobit téměř libovolný tvar.
- Automatická výroba modelu.

2.2.3 Přínos rychlého prototypování do výroby

Jeden z hlavních přínosů je usnadnění komunikace a konzultace případných konstrukčních změn mezi zákazníkem a konstruktérem, bez zbytečných problémů a nedorozumění, které občas mohou vzniknout při použití běžných 2D výkresů. Tímto se prototypy nyní stávají součástí projektů, čímž proces zrychlují, usnadňují a zlevňují.**[5]**

Hlavní využití modelů spočívá:**[5]**

- Pomáhá s vizualizací modelu, čímž zlepšuje komunikaci konstruktérů se zákazníkem.
- Pomáhá zkoušet a ověřovat vzhled a správnou funkci produktu.
- Pomáhá odhalovat a odstraňovat konstrukční chyby.
- Lze vyrobit i funkční součásti, případně nástroje.
- Zkracuje vývojový čas a tudíž i čas výroby.



(obr.: 2-5) RP model motoru **[8]**

2.2.4 Rozdělení metod rychlého prototypování

Metod na výrobu rychlích prototypů je mnoho a každá z nich pracuje na jiném principu, tudíž jednoznačně metody rozdělit nelze. Nabízejí se nám tři základní rozdělení.

a) Podle použitého materiálu na výrobu modelu. **[5]**
b) Podle výrobního postupu. **[5]**
c) Podle systému přidávání materiálu. **[5]**

ad a)

Tekuté materiály	Laserová stereolitografie	(USA, Japonsko, Francie, Německo)
Práškové materiály	Selektivní laserové slinování, Tryskové spojování, Tryskové tištění	(USA)
Polymerní materiály	Systém tavení polymerů vhodné k protlačování	(USA)
Papírové materiály	Systém vrstvení papíru	(USA, Japonsko)

ad b)

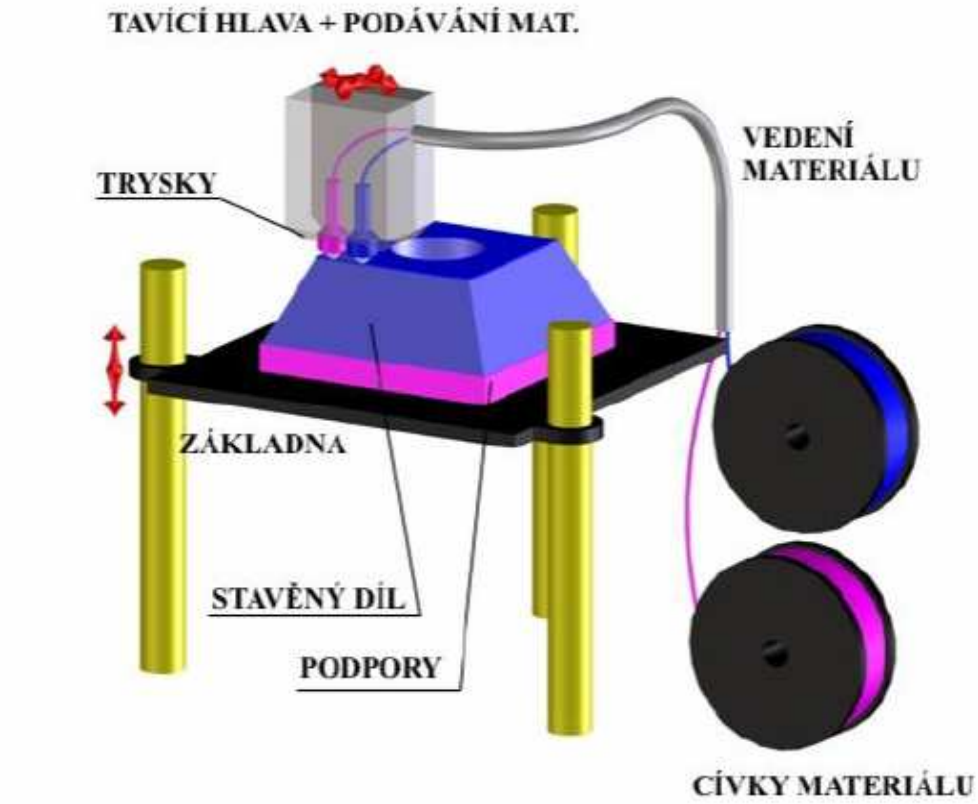
Systém přidáváni hladin při použití laseru s vytvrzováním bod po bodu.
Systém přidáváni hladin bez použití laseru s vytvrzováním bod po bodu.
Systém přidávání hladin zdola při použití laseru.
Systém přidávání hladin bez použití laseru.

ad c)

Po vrstvách.
Po kapkách.

2.2.5 Popis nejčastěji používaných metod

2.2.5.1 Metoda FDM – Fused deposition modeling

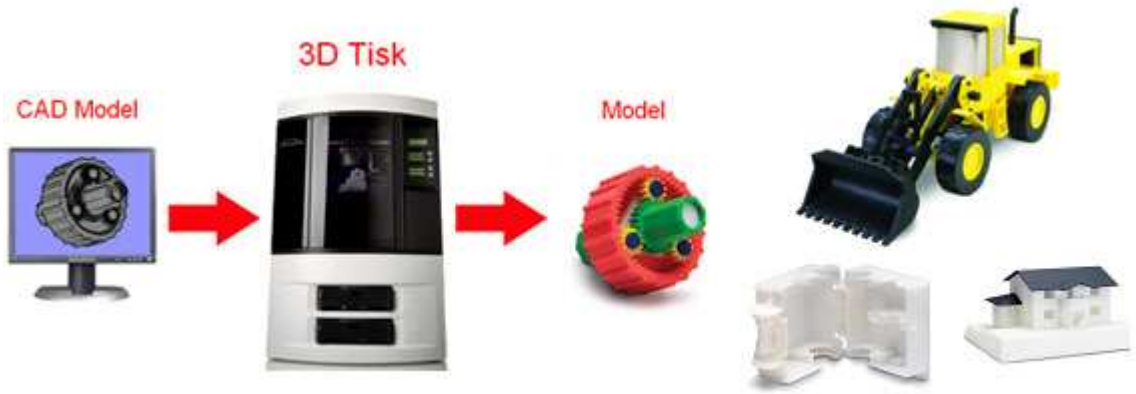


(obr.:2-6) Princip metody FDM **[6]**

Velmi zajímavým kompromisem odolnosti modelu, rychlosti a přesnosti tvorby je metoda Fused Deposition Modelling (FDM). Model se vytváří nanášením jednotlivých vrstev z různých netoxických termoplastů nebo vosků systémem krok po kroku. Materiál ve tvaru tenkého vlákna vychází z vyhřívané trysky, která se pohybuje v rovině XY nad pracovním prostorem. Ve trysce je ohříván na teplotu o 1°C vyšší než je jeho teplota tavení. Při styku s povrchem vytvářené součástky se vlákna vzájemně spojují a vytváří tak požadovanou ultratenkou vrstvu, která ihned ztuhne. Součástka se opět

vytváří na nosné desce, která se vždy po nanesení jedné vrstvy sníží o hloubku této vrstvy.**[9]**
Na podepření přečnívajících částí je k dispozici materiál na podpory. Ten se po dokončení modelu odstraní mechanicky, nebo je možné ho rozpustit.

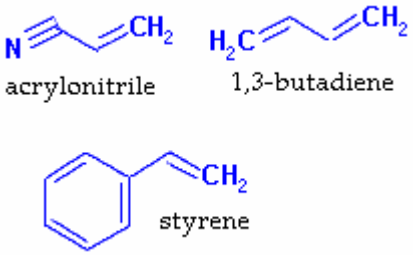
Zařízení pracující s technologií FDM mohou být využívána také v běžném kancelářském prostředí, neboť u nich byla odstraněna práce s toxickými materiály a s citlivými zařízeními pro laserové snímání. Touto metodou můžeme vytvářet součástky např. z polyamidu, polyetylénu nebo z vosku. Vytvořený model již nevyžaduje žádné obrábění **(obr.:2-7)**. **[9]**



(obr.:2-7) Postup výroby ABS modelu **[10]**

Charakteristika ABS materiálu

Acrylonitrile butadiene styrene ABS **[11]**



(obr.:2-8)ABS materiál **[11]**

Termoplast chemický vzorec $(C_8H_8 \cdot C_4H_6 \cdot C_3H_3N)_n$) používaný k výrobě lehkých, tuhých objektů jako potrubí, hudebních nástrojů, kostiček stavebnice lego atd. **(obr.:2-8)[11]**

Je to kopolymer složený z polymerizovaného styrenu a akrilonitrilu v přítomném polybutadienu. Množství jednotlivých složek se pohybuje mezi 15 až 30% butadienu a 40 až 65% styrenu. Výsledkem je dlouhý řetězec polybutadienových částí s kratšími částmi řetězce poly(styrene-co-acrilonitryle). Nitridové části v řetězci dávají orientaci, přitahují další a spojují řetězec dohromady. Dělají ABS materiál silnější něž je

polystyren. Styren je nositelem plasticity a lesku. ABS materiál může být používán při teplotách od -25 do +60°C. Materiál může být po použití opět recyklován. **[11]**

Vlastnosti:

ABS je derivát z acrilonitrilu, butadienu a styrenu. Acrilonitril je syntetický monomer vyrobený z propylenu a amonia, butadien je petroleum hydrocarbon získaný z butanu. A styrenový monomer je derivát uhlí průmyslově získáván z benzenu a etylenu z uhlí. Vlastnosti ABS jsou kombinací vlastností těchto jednotlivých materiálů. Pevnost a tuhost z acrylonitrlu a styrenu s tuhostí polybutadienu. Nejdůležitějšími mechanickými vlastnosti ABS jsou pevnost a tuhost i za vyšších teplot. **[11]**

Ačkoli ABS je používán převážně pro mechanické účely, má také dobré elektrické vlastnosti, což je dobrá stálost proti působení krátkých vln. Tyto vlastnosti jsou trochu ovlivněny teplotou a atmosférickou vlhkostí v přípustném provozním rozsahu teplot. Konečné vlastnosti budou ovlivněny rozměrem a podmínkami provozu konečného produktu. **[11]**

:: ABS P400 (Acrylonitrile Butadiene Styrene) Materiálové charakteristiky:

	English	**Metric**
Pevnost v tahu	5,000 psi	34.45 Mpa
Modul v tahu	360,000 psi	2,480 Mpa
Pevnost v ohybu	9,500 psi	65 Mpa
Modul v ohybu	380,000 psi	2,618 Mpa
Rázová práce	2.00 ft-lbs/in	107 J/m
Rázová pevnost	24.00 ft-lbs/in	1,282 J/m
Teplota deformace	203 ° F	95 ° C
Tvrdost (Shore D)	78 (D)	
Tažnost	>10%	
Využití materiálu	Kontaktní trvalé a přesné části pro funkční testy. Tam kde je funkce důležitější než konečný povrch. Tam kde je potřeba rychle a lacino měnit tvary. Vhodné pro první návrhy a vizualizace.	

(tab.:2-6) Mechanické hodnoty ABS materiálu **[12]**

Zařízení pro FDM

(obr.: 2-9) FDM stroje **[10]**

Hlavím dodavatelem FDM strojů je na Českém trhu firma MCAE Systém, s.r.o. V nabídce má několik strojů lišících se od sebe velikostí tištěného modelu a dosahovaných přesností. Menší z tiskáren jsou určeny pro umístění přímo do konstrukčních kanceláří. **[10]**

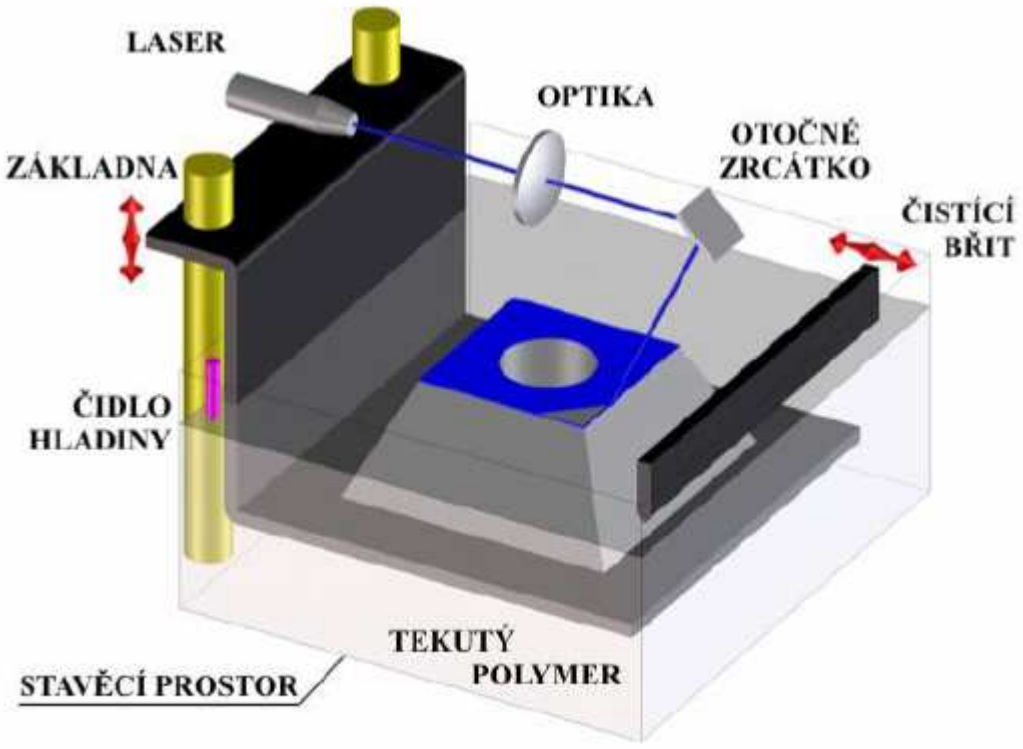
Velikost tištěných modelů se pohybuje od 203 x 203 x 305 mm do 600 x 500 x 600 mm. Tloušťka vrstev je od 0,127 jako nejtenčí z nabízených po 0,33 jako nejsilnější. Každá z tiskáren může tisknout ve dvou až třech tloušťkách. Jako stavební materiál je použit ABS plast, nebo u některých také polycarbonát. Materiál je dodávaný v několika barvách. **[10]**

Obsluha je podobná jako obsluha běžných textových tiskáren. Model se zpracuje pomocí software Catalyst, který je součástí dodávky a je nainstalován na všech pracovních stanicích, kde se s CAD modely pracuje. Vytvořený 3D model ve formátu STL je načten do softwaru Catalyst a orientován do polohy pro výrobu. Během velmi krátké doby software automaticky vygeneruje stavební vrstvy a všechny nutné podpory potřebné pro výrobu modelu a přenese data pro výrobu 3D modelu přes počítačovou síť přímo na 3D tiskárnu. **[10]**

Tiskárna s uživatelem komunikuje přes počítačovou síť a průběžně ho informuje o průběhu tisku. Rovněž při dokončení odešle uživateli zprávu např.: SMS, pager, internet. **[10]**

Cena FDM tiskárny se pohybuje v rozmezí 500000 až 1000000 Kč a cena ABS materiálu dodaného v kazetě, která se vkládá do tiskárny, je zhruba 5000 Kč za kilo.

2.2.5.2 Stereolitografie SLA



(obr.:2-10) Schéma SLA stroje **[6]**

3D tiskárna stereolitografického stroje je tvořena pracovní komorou, řídící jednotkou a opticko laserovým systémem. V pracovní komoře je nádoba s fotopolymerem (epoxidovou pryskyřicí) nad níž se pohybuje nůž zajišťující rovinost každé kladené vrstvy. Řídící jednotka (počítač) ovládá celý stroj, nastavení laseru a řízení celé výroby. Opticko laserový systém obsahuje plynový nebo pevnolátkový laser, soustavu čoček a zrcadel pro nasměrování světelného paprsku.

Stavba stereolitografického modelu je založena na postupném vykreslování 2D vrstev na hladinu pryskyřice laserovým paprskem. Na počátku tisku je platforma těsně pod hladinou pryskyřice a po každém vytvoření nové vrstvy se posune o zadaný krok směrem dolů. Před každým tiskem vrstvy zarovná hladinu pryskyřice nůž tak, aby byla zachována její konstantní tloušťka. Poté se celý proces opakuje až do dokončení celého modelu.

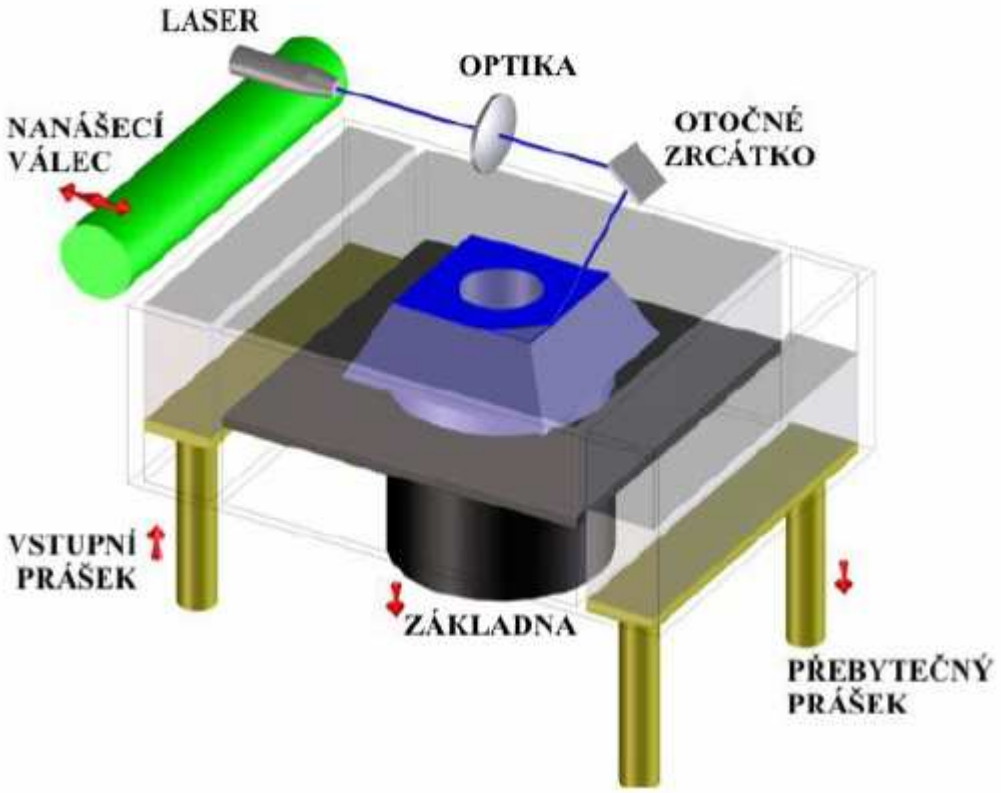
Tyto vrstvy mohou být silné 0,05 až 0,15 mm, což umožňuje zobrazení i těch nejmenších detailů. Přesnost těchto vrstev se pohybuje v rozmezí 0,05 – 0,2 mm/100 mm.

Uchycení modelu k platformě je dosaženo zmíněnými podporami, které model fixují v dané poloze a zabraňují jeho zborcení. Pro finální vytvrzení slouží UV komora, kde model získá požadovanou pevnost a opracovatelnost.

(obr.:2-11) SLA stroj **[13]**
(obr.:2-12) SLA model **[14]**

(obr.:2-13) SLA model **[15]**

2.2.5.3 Selective laser sintering SLS



(obr.:2-14) Schéma SLS stroje **[6]**

Technologie SLS je obdobou stereolitografie, avšak s několika podstatnými rozdíly. Jako stavební materiál je používán jemný prášek; podle typu aplikace může jít o polyamidy používané pro plastové výrobky pro přímou aplikaci, o kovové prášky sloužící k výrobě kovových prototypů nebo nástrojů či o práškový písek pro výrobu forem. **[16]**

Platforma se nepohybuje v materiálu, ale materiál je na ni nanášen v jednotlivých vrstvách pomocí posuvného nože, jenž obstarává rovnoměrnou tloušťku vrstvy. Ta může být silná od 0,1 mm do 0,2 mm. Pracovní komora je hermeticky uzavřena a naplněna inertním plynem (dusíkem) pro ochranu jakosti povrchu. Princip výroby je stejný jako u stereolitografie: laserovým paprskem (CO_2 laser o max. výkonu 20 W) jsou vykreslovány jednotlivé vrstvy modelu. Podstatnou výhodou oproti stereolitografu je absence podpor, jelikož model je pevně usazen v prášku, který jej obklopuje. **[16]**

Výhoda SLS modelů oproti STL spočívá v jejich vyšší pevnosti, která je srovnatelná s pevností sériových materiálů. Proto se modely používají zejména pro zkoušky, při kterých je potřeba ověřit funkčnost dílu v praxi. Díky použití prášku a větší tloušťce vrstev však nelze u SLS modelů vyrobit takové detaily jako u STL modelů z pryskyřice. Na druhou stranu doba trvání výroby je kratší. **[16]**

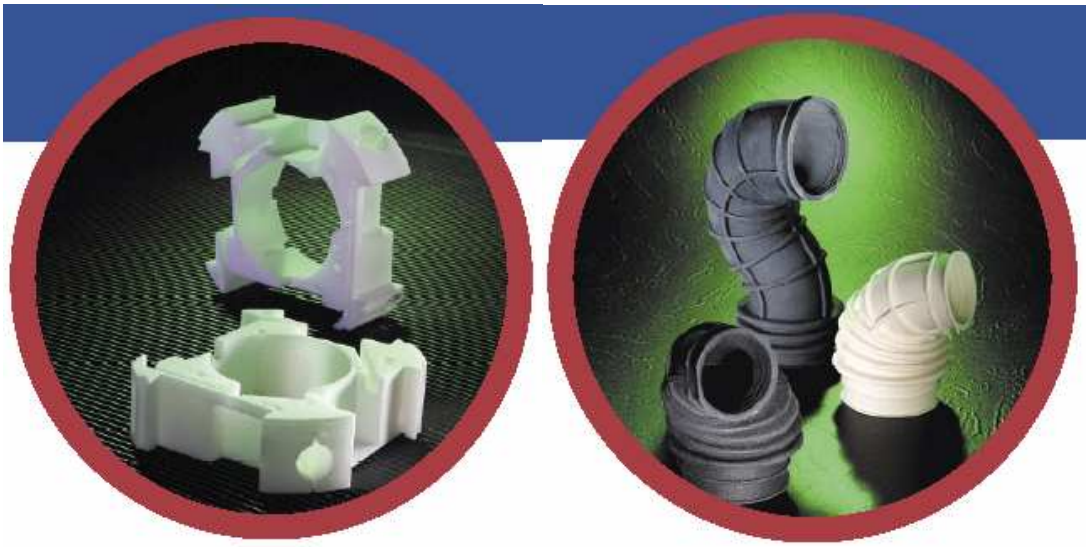
Rozdělení metody podle použitého materiálu:**[17]**

- **Laser sintering plastic** - můžeme volit z několika druhů plastů. Konkrétní materiál zvolíme podle způsobu využití hotového modelu. Například polystyrén můžeme použít přímo pro lití na spalitelný model. Nylon použijeme v případě, že potřebujeme dobrou pevnost, tvrdost, houževnatost. Použití pro funkční zkoušky, lícování součástí.

- **Laser sintering metal** – tyto modely mají dostatečnou pevnost, a proto je využíváme především jako formy pro výrobu plastových součástek vstřikováním a lisováním.

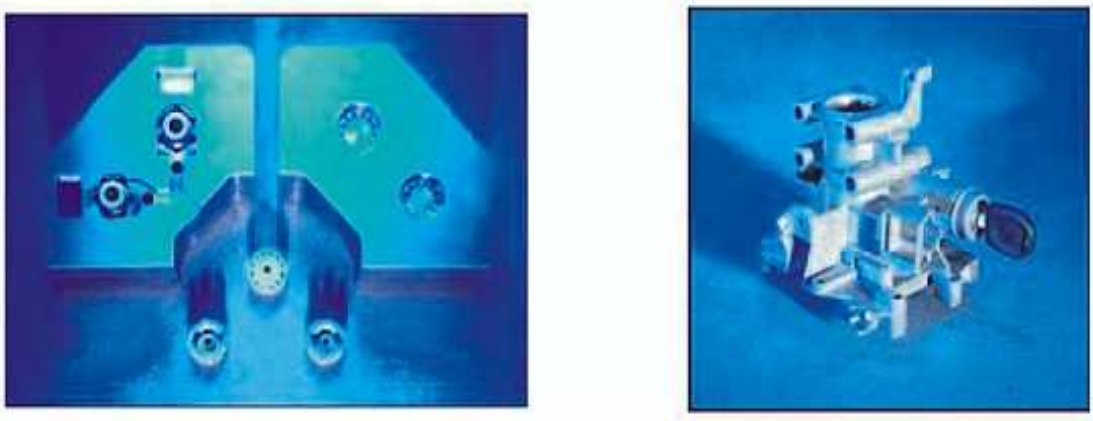
- **Laser sintering foundry sand** – jedna z nejnovějších metod. Ze slévárenského písku přímo vytvoří prototypovací zařízení klasickou formu pro lití.

- **Laser sintering ceramic** – výchozím materiálem je prášek, který je spojen pomocí tekutého pojiva. To je nanášeno pomocí tryskové hlavy která se pohybuje v rovině budoucí vrstvy. Takto lze vyrábět například keramická jádra pro technologii přesného lití.



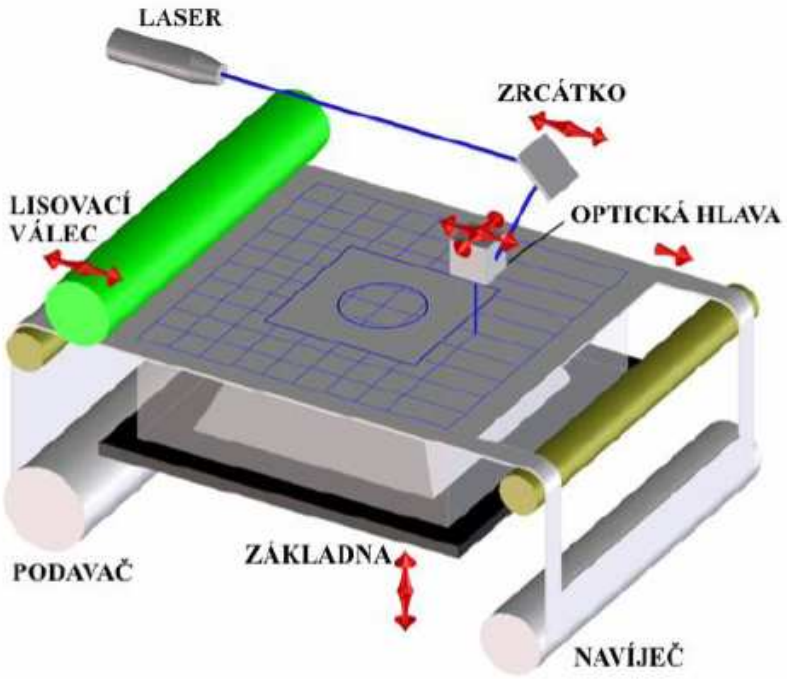
(obr.:2-15) SLS součást z PA **[12]**

(obr.:2-16) SLS součást z gumy **[12]**



(obr.:2-17) SLS součásti z oceli **[8]**

2.2.5.4 Laminated manufacturing



(obr.:2-18) Schéma LOM stroje **[6]**

Jedná se oproti jiným metodám o rychlé zhotovení prototypu. Metoda při níž se model sestavuje z plastových folií nebo z mnoha vrstev papíru napuštěného zpevňující hmotou, které jsou ořízntuty do správného tvaru laserem. Součástka je vytvářená na svisle se pohybující podložce. Celý proces modelování probíhá tak, že se na předchozí vyřezanou vrstvu natáhne papírová folie opatřená vrstvou polyetylénu, která se poté přitlačí soustavou vyhřívaných válců, čímž dojde ke slepení obou vrstev. 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. **[18]**

Vytvořené součástky mají podobné vlastnosti jako by byly vyrobené ze dřeva. K dosažení hladkého povrchu je nutné součástku ručně opracovat. Metoda je vhodná na výrobu velkých modelů, nevýhodou je velké množství odpadu. **[18]**

2.2.6 Přesnost RP strojů

Přesnost vyrobených modelů závisí přímo na použité metodě a na konkrétním výrobním zařízení, dále pak zejména na tloušťce nanesené vrstvy. Na trhu je mnoho firem, které nabízejí celou řadu RP tiskáren o různých přesnostech. **[19]**
Z uvedeného krátkého přehledu bude vidět, že u modelů menších rozměrů, se při použití těch přesnějších metod, můžeme přesností velmi přiblížit obrábění. Výsledná přesnost hotového výrobku je ovšem ovlivněna zpracováním modelu. To je povrchová úprava modelu, výroba silikonové formy, ….. až po smrštění kovu ve formě.

Přesnost metody FDM

Jednín z největších dodavatelů je americká firma Stratasis, kterou na našem trhu zastupuje MCAE Systéme. Ta nabízí FDM stroje, například tiskárnu Genesis, určenou především do vývojových kanceláři k vizualizaci. Na té je možné vyrobit modely o rozměrech 304x203x203 mm s přesností ± 0,25 mm. Na větších zařízeních řady FDM a Quantum, ty se od sebe liší velikostí vytvářeného modelu (od 254x254x254 do 600x500x600 mm). Přesnost těchto zařízení je ± 0,125 mm, přičemž tloušťka vrstvy je od 0,05 do 0,762 mm. Největší přesnost ±0,015 až ±0,127 mm se dosáhne na zařízení Quantum (podle velikosti modelované součástky). **[19]**

Přesnost metody SLA

Stroje pro tuto metodu dodává americká firma 3D Systems, kterou v ČR zastupuje firma 3D Tech. Ve své nabídce má několik strojů, které se od sebe liší maximální velikostí vyráběného modelu od 250x250x250 mm do 508x580x600 mm. Přesnost v horizontální rovině závisí na použitém laseru, pohybuje se od 0,06 do 0,28 mm. Vertikální přesnost závisí na vertikálním posuvu a pohybuje se od 0,00125 do 0,0025mm. Tloušťka vyrobené vrstvy je od 0,0254 do 0,127 mm. **[19]**

Přesnost metody SLS

Oproti Stereolitografii se jedná o méně přesnou metodu. Dosahované přesnosti se přímo odvíjí od tloušťky vrstvy (0,15 až 0,2 mm) přičemž přesnost se pohybuje někde v tomto rozmezí. **[20]**

2.2.7 Využití prototypů v praxi

Použití RP je v současné době limitováno především dvěma faktory - přesností výroby a materiály vhodnými pro tuto technologii.
Přesnost výrobního systému je dána tloušťkou jednotlivých vrstev a přesností výroby 2D tvaru jednotlivých vrstev.
Materiály používané pro RP jsou zatím především tekuté pryskyřice, vosky, papír a práškové materiály obsahující plasty, kovy nebo keramiku. Na vývoji nových materiálů vhodných pro RP se intenzívně pracuje. Používané materiály již mají dostatečnou pevnost a součásti z nich vyrobené lze následně obrábět - vrtat, frézovat atp.**[5]**

2.2.7.1Návrh možného využití technologie ve slévárenství

Použití RP v oblasti slévárenství je soustředěno především na tvorbu modelů a jader, která jsou pak použita klasickou cestou pro různé technologie lití. Pomocí některých metod RP, založených na sinteringu, je dnes možné vytvořit celou kompletní formu, připravenou pro lití.**[6]**

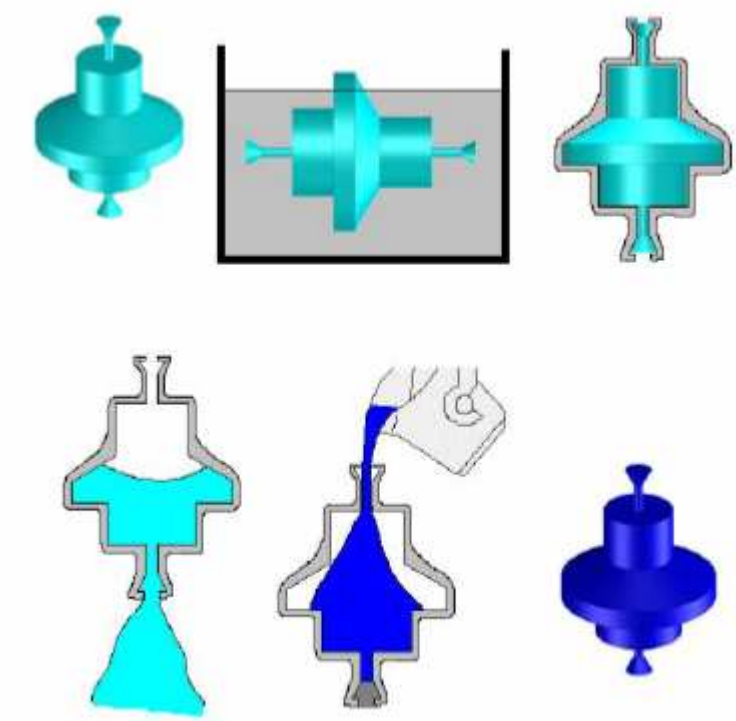
Využití RP v přesném lití

Metoda přesného lití patří mezi nejznámější technologie. Tato technologie je založena na existenci voskového modelu, který je základem pro vytvoření keramické skořepinové formy. Výroba voskových modelů je zdlouhavá a vyžaduje často použití další technologie (například obrábění), neboť tvary mohou být velmi komplikované a přesné. Pomocí některých metod RP, např. zařízení firmy Solidscape (USA), dnes můžeme přímo vyrobit voskové modely ze stejných nebo velice podobných voskových materiálů. Využitím RP pro výrobu voskových modelů dosáhneme velkých finančních a časových úspor.**[6]**

V přesném lití se nám nabízejí tři možnosti využití prototypů:

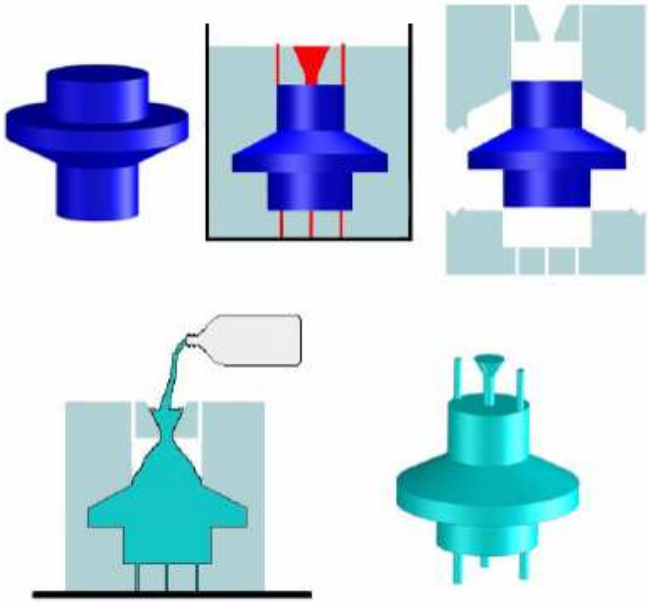
a) Vypálení RP modelu.
b) Pomocí RP modelu vytvoření silikonové formy na výrobu voskových modelů.
c) Vytvoření RP matečné formy na výrobu voskových modelů

ad a) První z možností je metoda, kdy se v RP systémech (SLA, FDM,…) vytvoří model, se kterým se pak pracuje jako s běžným voskovým modelem.**(obr.:2-19)** Model je vypálen a zůstane skořepinová forma připravená k odlití. Použitím vhodného polymeru se dosáhne velmi tvarově přesných detailů.**[6]**



(obr.:2-19) Schéma využití RP modelu, obalení, vypálení, odlití **[6]**

ad b) Druhým možným způsobem je vytvoření silikonové formy za pomoci RP modelu pro opakované zhotovení voskových modelů použitelných v přesném lití. **[6] (obr.:2-20)**



(obr.:2-20) Schéma vytvoření silikonové formy z RP modelu, odlití vosku **[6]**

ad c) Třetí alternativou pro výrobu modelů je vstřikování vosku do pevných forem. Nejjednodušší a nejrychlejší je výroba stereolitografických dutin, do kterých je možné přímo vstřikovat tekutý vosk. Na stereolitografu je vyrobena negativní skořepina modelu. Dutina spolu se systémem chlazení je umístěna do rámu a zalita specielní pryskyřicí, která dobře vede teplo a umožňuje tak rychlé tuhnutí odlitého vosku. Po vytvrzení pryskyřice je možné do dutiny vpravovat vosk a vyrábět přímo voskové modely určené k obalování. Tato technologie je výhodná opět při požadavku zkrácení časové náročnosti a požadavku výroby prototypových dílů. **[21]**

Využití rychlého prototypování při výrobě pískových forem a jader

Technologie rychlého prototypování je využitelná také tam, kde se vyrábí odlitky v běžných formovacích směsích, jako jsou směsi bentonitové, samovolně tuhnoucí směsi jako např. furanové atd. Zde se nabízejí dvě možná řešení.

a) přímá výroba formy na RP stroji
b) výroba formy za pomoci RP modelu

ad a) Přímá výroba formy na RP stroji

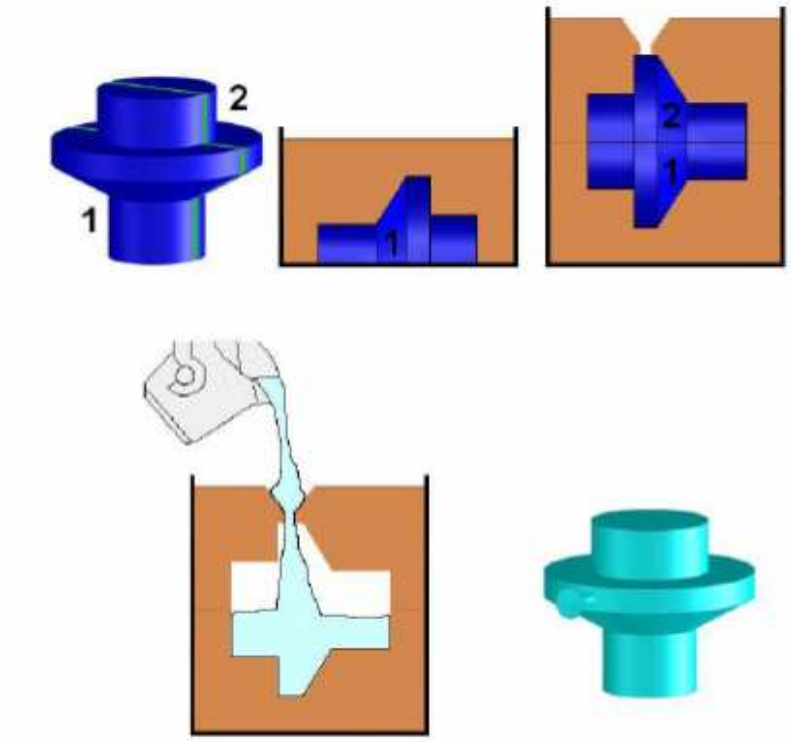
Tyto metody znamenají opravdu revoluční převrat ve výrobě forem. Jedním z představitelů této technologie je německá firma EOS. Jejich největší RP systém EOSINT S 750, pracující na základě metody SLS, umožňuje tvorbu kompletních pískových forem až do velikosti 720x380x380 mm. Nejsou vyžadovány žádné modely a jádra, neboť i extrémně složité formy jsou založeny na výrobě po vrstvách. To znamená, že konstrukce formy se velmi zjednoduší především v jejím konečném procesu montáže. EOSINT používá několik druhů písků, které mají podobné vlastnosti jako písky standardně používané. Tyto písky jsou vhodné pro pozdější zpracování např. hliníku a oceli. Jak již bylo řečeno, EOSINT pracuje na bázi spékání písku, a to postupně jednu vrstvu po druhé. Tímto způsobem je samozřejmě možné vytvářet podřezané a vnitřně zakřivené tvary, které bychom pomocí konvenčních metod nikdy nevytvořili. **[6]**

ad b) Výroba formy za pomoci RP modelu

V tomto případě je využito RP modelu, který nahrazuje klasické modely ze dřeva plastů,… Tím se dosáhne podstatného zrychlení přípravy výroby. Tento postup se uplatní u menších sérií, kdy se nevyplatí vyrábět klasický model.

Vytištěný RP model je rozdělen v dělící rovině na dvě poloviny, kdy každá polovina modelu slouží k vytvoření jedné poloviny pískové formy.**(obr.:2-21)** Je také možnost vytisknout obě poloviny zvlášť. Rovněž je také možné aplikovat RP metody pro zhotovení jader, kde je možnost aplikovat RP metody pro konstrukci forem – jaderníků. V případě využití technologie např. v letectví, kdy některé formy, mohou mít až 20 vnitřních jader. Vyrobit takovou formu klasickým způsobem je velmi časově náročné. Pomocí metod RP je při stavbě jader a dalších tvarových dílů možné čas snížit až o 50%. Nehledě k tomu, že při opravě nebo modifikaci máme k dispozici CAD data, které mohou být snadno opravena a proces se může opakovat. Opět je k dispozici řada

materiálů, z kterých je možno vyrobit jednotlivé tvarové díly RP modelů. Např. FDM používá univerzální ABS materiál, LOM papír, SL epoxidové polymery. **[6]**



(obr.:2-21) Schéma výroby formy pomocí RP modelu **[6]**

2.2.7.2 Konkrétní příklady využití rychlého prototypování ve slévárenství

Využití metody FDM při lití do pískových forem

Lití do pískových forem je relativně jednoduché a produkce pískových forem a odlitků poměrně rychlá. Nicméně zhotovení modelu k výrobě forem může být časově náročné. S využitím FDM metody se výroba pískových forem může velmi zproduktivnit a zkrátí se čas výroby prototypu. **[22]**
Nabízí se zde tři přístupy k výrobě formy: ztracený model, jádro a model a modelová deska. Ztracený model je jednoduchý representující samostatnou oblast výroby forem. Jádro a model representují základní systém. Modelová deska kombinuje jádro a model do jednoho celku. Obvykle se vyrábí ze dřeva, hliníku, nebo jiných materiálů. **[22] (obr.:2-22)**

(obr.:2-22) Modelová deska z Al slitiny **[22]**

K náhradě strojně vyráběných modelových desek musí modelové desky vyrobené metodou RP odolat chemikáliím v písku, abrazivnímu opotřebení a také silám vznikajícím při pěchování formy. **[22]**

(obr.:2-23) Modelová deska z ABS materiálu**[22]**

Na rozdíl od mnoha jiných rapid prototyping technologií FDM metoda s ABS materiálem všechny tato požadavky splnila.
Navíc při použití FDM metody se výrobní doba prvního odlitku zkrátí z týdnů na dny, a oproti konvenčním metodám výroby modelových zařízení. **[22]**

Přímá výroba voskových modelů pro výrobu kovových prototypů

Firma A.W.Bell's využívá technologie rychlého prototypování k přímé výrobě voskových modelů. Ty jsou použity při následné výrobě kovového prototypu metodou vytavitelného modelu. K výrobě voskových modelů používá tiskárnu Thermojets. Ta je schopna během několika hodin z CAD dat dodaných zákazníkem vyrobit voskový model. **[23]**

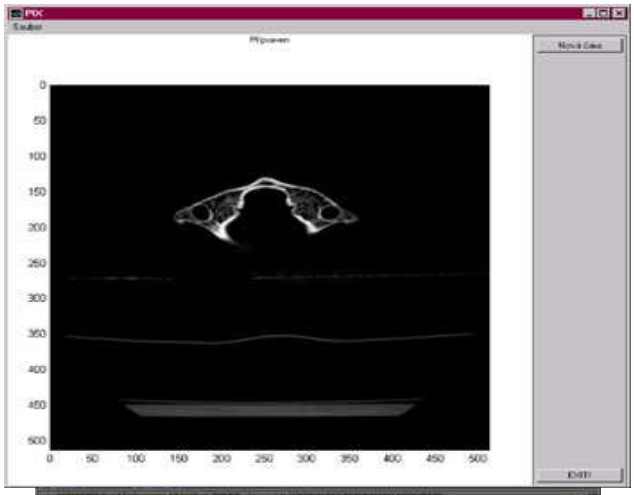
Voskový model je vytvářen řadou kontrolovaných trysek, které dokáží vytvořit bod o ploše 0,08 mm^2. Tato plocha je zarovnána horkým válcem na výšku 0,08mm. Podložka se sníží o výšku jedné vrstvy na níž je následně nanesena další. Tento proces se opakuje až do zhotovení nového modelu. Čas na zhotovení modelu o velikosti 154 x 192 x 200 mm je zhruba do 30 hodin. **[23]**

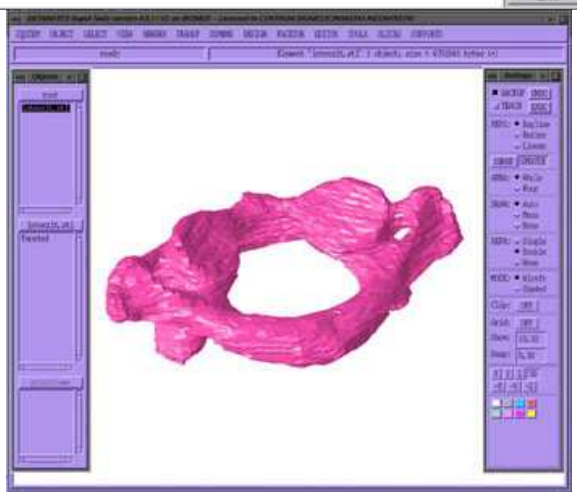
Části přesahující základní průřez nejsou problémem díky automaticky stavěným podporám. Počítač vestavěný v 3D tiskárně obsahuje algoritmus k tvorbě podpor ploch které by z horkého vosku nešly vytvořit. Tyto podpory se tisknou současně se základním matriálem. **[23]**

Velikost naší tiskárny nás při výrobě velkých modelů nelimituje. CAD model je nejprve rozdělen na části, které se do tiskárny vejdou. Jednotlivé části jsou poté vytisknuty zbaveny podpor a v přípravku precizně slepeny dohromady. Takovíto model je pevnostně srovnatelný s modelem z jedné části. Slepení modelu nemá žádný vliv na konečný odlitek. **[23]**

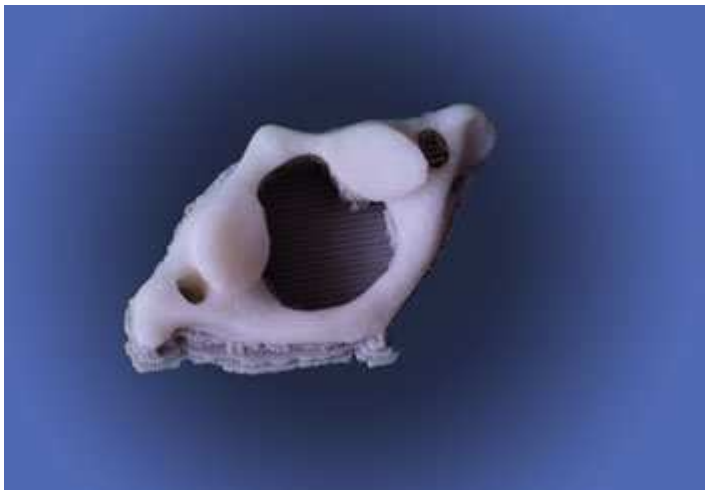
2.2.7.3 Využití rychlého prototypování v dalších oblastech

Technologie rychlého prototypování se v medicíně začleňují především do procesu vývoje implantátů, např. kloubních náhrad, dlah a výztuh, ale i technického vybavení lékařů. Návaznost RP technologií na počítačové modelování a rychlost zhotovení prototypu dovoluje konstruovat individuální náhrady. Některé technologie jsou použitelné i pro zhotovení funkčních prototypů (Fused Deposition Modeling) a vyvíjejí se i metody vhodné pro přímou výrobu individuálních implantátů.
V současnosti jsou již dostupná medicínská zobrazovací zařízení, která dovolují analyzovat situaci uvnitř těla pacienta neinvazivně. Jsou to počítačem podporovaná tomografie a mikrotomografie (CT), nukleární magnetická rezonance (MRI) nebo ultrazvuk. **(obr.:2-24)** Moderní programové prostředky umožňují data získaná ze zobrazovacích zařízení matematicky analyzovat a sestavit prostorový model objektů, které lékaře zajímají. Od zrekonstruovaného počítačového prostorového modelu je pouze krok k modelu vhodnému pro zpracování některou RP technologií.**(obr.:2-25)** Existují materiály, které lze sterilizovat ultrafialovým zářením a využít v průběhu operace. Prototypové modely mohou nalézt uplatnění jako názorná pomůcka ve výuce, při demonstracích na odborných seminářích nebo při seznámení pacienta s plánovaným chirurgickým zásahem.**(obr.:2-26) [24]**





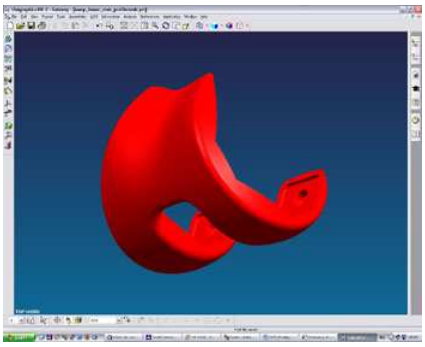
(obr.:2-24) CT snímek krčního obratle **[24]**
(obr.:2-25) 3D model krčního obratle **[24]**



(obr.:2-26) ABS model krčního obratle **[24]**

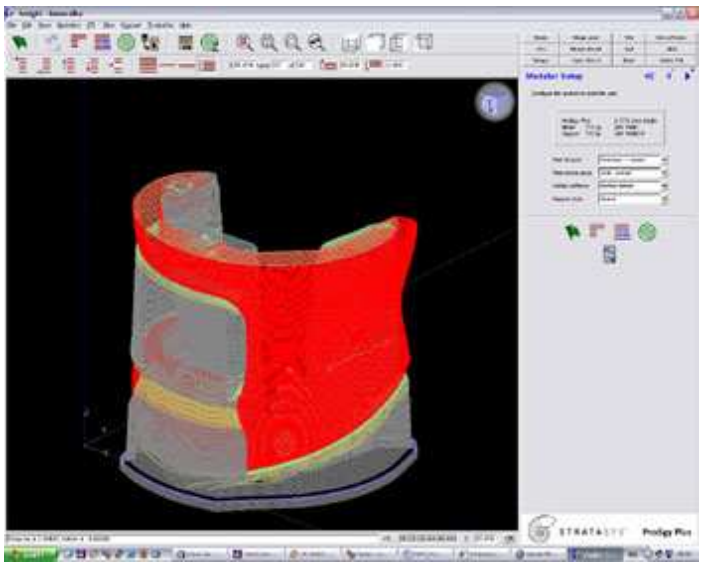
Příklad využití metody FDM při výrobě komponenty kolenního kloubu

Jako příklad uvedeme postup vyhotovení modelu femorální komponenty, která je jednou z částí náhrady kolenního kloubu. Nejdříve konstruktér vytvoří 3D model femorální komponenty náhrady kloubu například v CAD systému. **(obr.:2-27) [24]**



(obr.:2-27) Model komponenty kolenního kloubu **[24]**

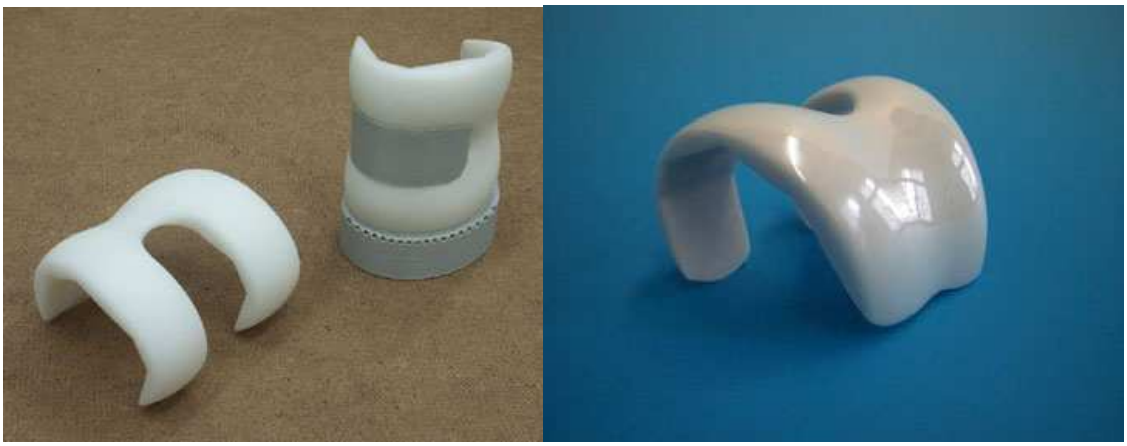
Pro další zpracování je CAD model exportován ve formě STL dat. Formát STL je standardním formátem, se kterým RP technologie pracují a do kterého umí počítačový model převést většina CAD systémů. Povrch tělesa je při popisu geometrie STL formátem reprezentován trojúhelníkovou sítí. Příprava výroby probíhá s pomocí programu Insight, který je dodáván firmou Stratasys společně se strojem Prodygy Plus. V programu Insight se STL model dané součásti řeže na vrstvy rovnoběžné s rovinou. Poté se generují podpory a dráhy vtlačovacích trysek. Do všech kroků může zasahovat uživatel. Kontrolovat a upravovat řezy modelem, kontrolovat, upravovat nebo přímo vytvářet podpory, u drah vtlačovacích trysek volit tloušťku čáry a způsob vyplňování ploch. **(obr.:2-28) [24]**



(obr.:2-28) Model komponenty kolenního kloubu **[24]**

Výsledkem práce s programem Insight je soubor s řídícím kódem pro stroj Prodigy Plus (SML data). Prodigy Plus podle řídícího kódu vyrobí plastový model součástky bez nutnosti zásahů obsluhy.

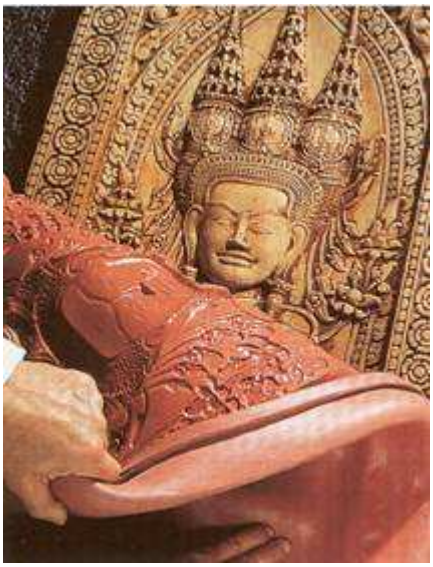
Tímto postupem zhotovený model femorální komponenty se uplatnil při výrobě keramické femorální komponenty totální náhrady kolenního kloubu. **(obr.:2-29)**. Prototypový model z ABS byl zaformován do silikonové pryže. Vzniklá dutina pak posloužila jako forma pro výrobu keramických polotovarů metodou izostatického lisování za studena. **(obr.:2-30) [24]**



(obr.:2-29) ABS model komponenty kolenního kloubu **[24]**
(obr.:2-30) Keramický model komponenty kolenního kloubu **[24]**

2.2.8 Silikonové materiály

Pro výrobu odlitků jsou v současnosti používány pružné formy ze silikonových kaučuků. Jedná se o dvousložkové kaučuky, kdy po smíchání pasty s katalyzátorem dochází k vulkanizaci v celé hmotě během několika desítek minut za tvorby silikonové pryže, která nemá adhezi k podkladu.**[25]**



(obr.:2-31) Silikonová forma a model **[25]**

Výhodou těchto materiálů je dokonalá reprodukce detailů originálu a snadné vyformování vytvořeného odlitku díky vysoké pružnosti formy **(obr.:2-31)**. **[25]**

Pro vyvolání vulkanizace je nutná přítomnost vhodného katalyzátoru. Výsledkem vulkanizace (vytvrzení) je sesíťovaný produkt, z viskózní kapaliny nebo pasty se tak stane elastický materiál – silikonová pryž. **[25]**

Zaklaní fyzikální vlastnosti silikonů[26]

- **Tepelná a oxidační stabilita**

Silikony se vyznačují velmi vysokou tepelnou a oxidační stabilitou, odolností vůči ultrafialovému záření, ozonu a elektrickému oblouku. Je to důsledek vysoké vazebné energie charakteristických skupin Si-O-Si (452 kJ/mol). Typické pracovní teploty vytvrzených silikonů jsou v rozmezí -60^{o}C až 200^{o}C i vyšší (350^{o}C).

- **Stabilita fyzikálních a dielektrických parametrů při různých teplotách**

Silikony jsou nepolární. Důsledkem této skutečnosti jsou nízké a stabilní hodnoty disipačního faktoru a permitivity v širokém rozsahu teplot a frekvencí. Materiály určené pro elektroniku mají vysoké dielektrické pevnosti (typicky 10 až 40 kV/mm) a objemové rezistivity (typicky cca 10^{15} ohm.cm).

- **Odolnost proti ohni a zplodiny hoření**

Silikony jsou obecně velmi odolné proti ohni. Typy používané zejména pro zapouzdřování mají vysoké hodnoty kyslíkového čísla (LOI), CTI a vysokou odolnost proti ohni. Produktem hoření silikonů je popel oxidu křemičitého. Uvolněné teplo při hoření silikonů je menší než u většiny jiných polymerů, dým je méně hutný a relativně netoxický, neboť je složen zejména z oxidu uhličitého a menšího podílu oxidu uhelnatého bez korozivních nebo vysoce toxických zplodin. Hodnota těchto atributů nabývá na důležitosti zejména v souvislosti se zpřísňujícími se nároky bezpečnostních požárních předpisů.

- **Chemická čistota a nízká absorpce vody**

Silikony mají velmi nízkou úroveň nečistot a to zejména pohyblivých iontů a absorbují velmi málo vodu. Jejich povrch je vysoce voděodpudivý.

- **Manipulace se silikony**

Silikony se řadí mezi nejméně toxické polymery. Jsou vysoce bezpečné a to jak při jejich výrobě tak i při aplikaci. Při použití v elektronice je nutno respektovat obvyklé bezpečnostní předpisy.

3.0 Praktická část

3.1 Cíl experimentu

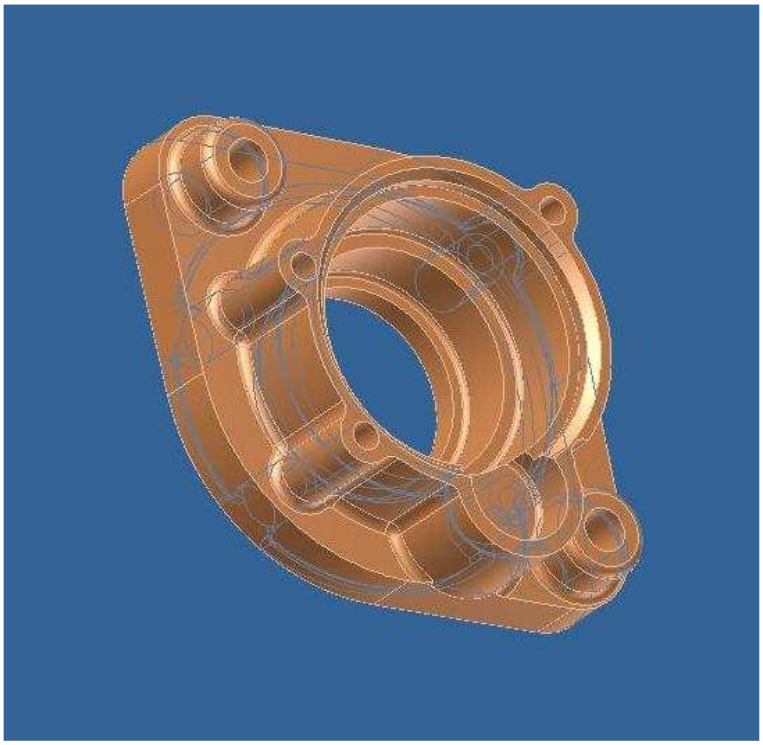
Cílem tohoto experimentu je porovnání rozměrových tolerancí voskových modelů odlitých do mnou vyrobené silikonové formy a modelů vyrobených do kovové matečné formy ve firmě Fimes a.s. Měřením by se mělo zjistit, zda je možné pomocí metod rychlého prototypování vyrobit menší série modelů v toleranci předepsané zákazníkem pro výrobu modelů v kovové matečné formě. Dále porovnat přesnost obou metod.

3.2 Metodika měření

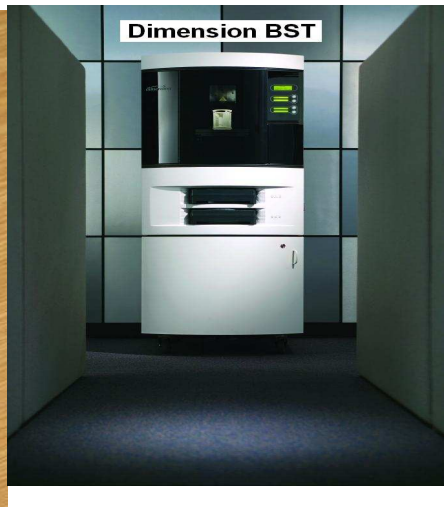
3.2.1 Modely vyrobené do silikonové formy (RP)

3.2.1.1 Výroba ABS modelu

Z firmy Fimes a.s jsme dostali 3D model součásti **(obr.:3-1)** nakreslený v programu Solid Works Ten jsme nechali vytisknout na FDM tiskárně **(obr.:3-2)**, tiskárna Dimension BST **(obr.:3-3)**, ve firmě MCAE systems. Tloušťka nanášené vrstvy byla 0,24 mm. Doba tisku modelu byla zhruba dvě a půl hodiny.



(obr.:3-1) 3D model součásti

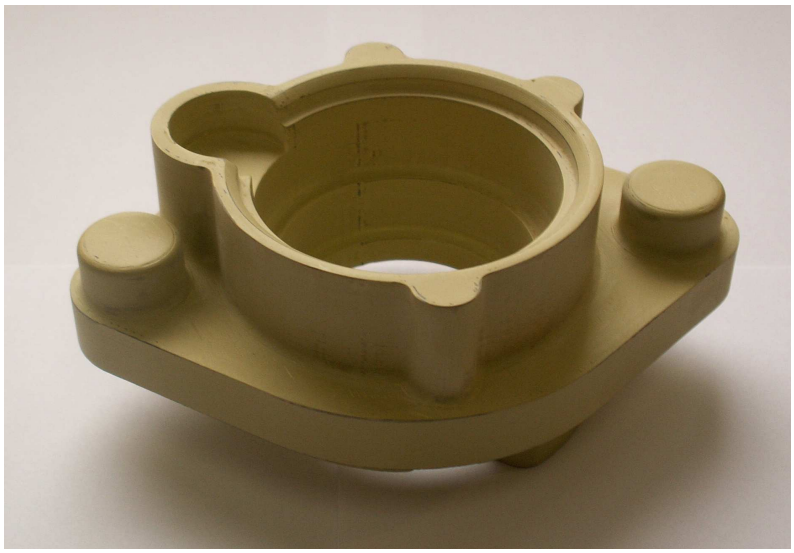


(obr.:3-2) ABS model součásti
(obr.:3-3) Tiskárna Dimension BST **[10]**

3.2.1.2 Příprava modelu pro výrobu silikonové formy

Na vytištěném modelu jsou patrné jednotlivé vrstvy a textura takového povrchu by se otiskla do odlitého vosku. Tomu se nechá zabránit nastříkáním modelu tmelem Motip Dupli BV a následným obroušením smirkovým papírem.

Tmel jsme nanášeli v několika vrstvách tak, aby se zalily všechny póry a zarovnala se textura povrchu. Mezi nanesením jednotlivých vrstev jsme nechali tmel zaschnout cca. 30 minut. Před broušením musí tmel tvrdnout nejméně 24 hodin. Tmel se vybrousil až na horní výběžky nerovností. Při broušení je důležité nezměnit tvar a rozměry modelu. Výsledkem je téměř hladký povrch. K broušení jsme použili brusné papíry o hrubosti 350 až 800. Takto lze téměř dokonale opracovat téměř celý model **(obr.:3-4)**. Problémová místa jsou pouze v rozích a v malých otvorech, kam se není možné dostat rukou.



(obr.:3-4) Zatmelený ABS model

3.2.1.3 Výroba silikonové formy

Silikonová forma se bude skládat v našem případě ze dvou dílů, po jejichž složení vznikne dutina, do níž bude odlit voskový model odlitku.

Příprava skleněného rámečku pro odlití silikonu

Ze skleněných destiček jsem vyrobil rámeček asi o dva centimetry větší než je půdorys ABS modelu. Destičky jsem k sobě slepil pomocí tavné pistole a přilepil je ke skleněné podložce **(obr.:3-5).**

(obr.:3-5) Hotový skleněný rámeček

Na modelu jsem si stanovil kudy bude probíhat dělící rovina tak, aby šel ABS model a pak i voskový model bez problémů vyjmout z formy. Dělící rovina nemusí být rovná plocha, může být různě zakřivená. Po promyšlení, co bude horní a spodní polovina, jsem horní polovinu modelu obalil plastelínou. Plastelínu jsem si nahřál na cca 40°C, aby se dala lépe tvarovat. Celé jsem zapěchoval do připraveného skleněného rámečku tak, že horní polovina tvořená momentálně plastelínou byla dole **(obr.:3-6)**. Důležité je mít plastelínu okolo modelu dobře vyhlazenou, aby následně byla dělící rovina hladká a aby na sebe poté obě dvě poloviny silikonové formy dobře dosedly. Jinak by se mohlo stát, že nám bude vosk zatékat do dělící roviny. Do takto připraveného rámečku jsem následně mohl odlít spodní polovinu silikonové formy.

(obr.:3-6) Model zaformovaný do plastelíny

Zámky dělící roviny

Jak jsem již psal, tak dělící rovina nemusí být rovinnou plochou. Jak jsem během výroby voskových modelů postupně zjistil, tak tvarová dělící rovina ničemu během výroby nevadí. Ovšem můj předpoklad, že komplikovaná dělící rovina nahradí zámky formy, se neukázal být zcela správný. Během výroby, jak se povrch formy postupně ušpinil a umastil, se stávalo stále obtížnější složit formu do přesné polohy.
Pro jednoznačné definování polohy obou půlek formy je tedy lepší vytvořit v dělící rovině zámky, např. ve tvaru trojúhelníkového profilu. Tím se zamezí vzájemnému pohybu spodní a horní poloviny.

Příprava silikonu pro odlití

Použily jsme silikon od firmy WACKER SILICONES Elastosil M4541 s tvrdidlem Wacker catalist T 51.

Fyzikální vlastnosti udávané výrobcem: Při vytvrzení s 5% tvrdidla za 3 dny a 50% vlhkosti.

Hustota	DIN 53479A, ISO 2781	g/cm3	1,16
Tvrdost Shore A	DIN 53505, ISO 868		30
Pevnost v tahu	DIN 53504v S3, ISO 37	Mpa	5
Prodloužení do lomu	DIN 53504v S3, ISO 37	%	400
Odolnost proti vzniku trhlin	ASTM D624,B	N/mm	>30
Délkové smrštění		%	<0,4
Koeficient délkové roztažnosti 0 - 150ºC		K-1	2,1x10-4

Mísící poměr obou složek je 100 dílů silikonu a 5 dílů tvrdidla.

Postup výroby silikonové formy

a) Výroba spodní poloviny formy
b) Výroba horní poloviny formy

ad a) Výroba spodní poloviny formy

Po hrubém výpočtu potřebného množství jsme použili na spodní polovinu 1200g silikonu a 60g tvrdidla. Do připraveného kelímku se na váze Shinko Denshi SJ 4200 (Max:4200g, Min:5g, rozlišitelnost 0,1g , přesnost 0,1g) odvážilo požadované množství silikonu a po následném vynulování vah se přililo zbývajících 60g tvrdidla.

Obě složky je nutné důkladně promíchat např.: dřevěnou latičkou. Do směsi je možné přidat i malé množství vody, čímž se docílí rychlejšího ztuhnutí. Množství vody odpovídá několika kapkám. Silikon tuhne vzdušnou vlhkostí a tím se urychlí jeho úplné ztuhnutí.

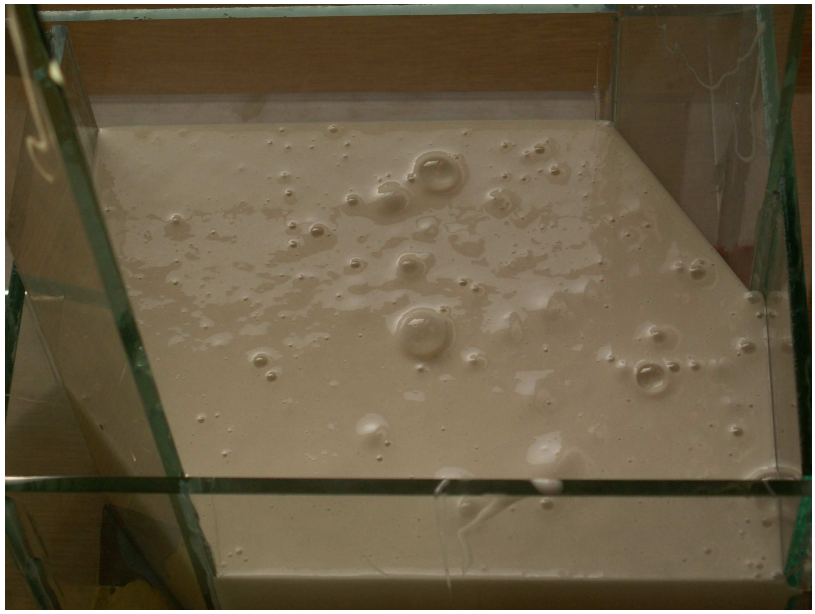
Smíchanou směs poté bylo nutné vakuovat **(obr.:3-7)**, aby se zbavila přebytečných plynů, které by se coby bublinky vyloučené na povrchu silikonové formy mohli obtisknout do voskového modelu a tím ho znehodnotit. Vakuování jsme provedli v zařízení MK technology Gmbh. Vakuum bylo -1 bar po dobu 4 minut. Při vakuování je nutné dávat pozor na vzdouvající se hladinu silikonu a na nožné přetečení přes okraj kelímku. Proto je lepší pro vakuování zvolit o něco větší kelímek. Jinak je nutné vakuovou komoru vždy před přetečením částečně zavzdušnit, což způsobí, že vakuování není tak dokonalé, jak by být mohlo.

(obr.:3-7) Vakuování silikonu

Po vakuování se již silikon může nalít do připravené formy a nechat zatvrdnout **(obr.:3-8)**. Po nalití ze silikonu vyplouvají na hladinu bubliny vzduchu, který se tam uzavřel při nalévání do formy **(obr.:3-9)**. Doba tvrdnutí může být rozdílná v závislosti na použitém silikonu a tvrdidle. V našem případě výrobce uvádí 24 hodin. Důležitá je rovněž i doba

zpracovatelnosti. To je doba od smíchání silikonu s tvrdidlem za kterou je nutné směs zpracovat. V našem případě 90 minut.

(obr.:3-8) Odlévání silikonové formy



(obr.:3-9) Vyplouvání vzduchových bublin

ad b) Výroba horní poloviny formy

Horní polovinu formy jsme připravili obdobně jako tu spodní. Po ztuhnutí vrchní půlky jsme rozebrali skleněný rámeček. Nožem jsme odloupli plastový spojovací materiál, který skleněné destičky držel u sebe. A ze spodní půlky modelu odstranili plastelínu. Důležité je nevyjímat model ze silikonu před odlitím druhé poloviny formy. Zajistí se tak přesná poloha obou částí formy a modelu.

Model jsme otočili silikonem dospod a opět ho zaformovali do skleněného rámečku. Případné mezery mezi sklem a silikonem, se utěsní trochou plastelíny. Do takto připraveného rámečku se odlila vrchní polovina formy.

Horní polovina formy. 12 x 16 x 4 cm. Objem 768 cm3 = 768g . Tvrdidla 38,4g. Vakuováno 4 min. Bez přídavku vody. Celé jsme to rozebrali po 48 hodinách. Vše již bylo vytvrzené. Silikonové půlky se k sobě lehce přilepily, ale pomocí specielních kleští se bez větších problémů rozebraly.

Při odlévání vrchní půlky je důležité nezapomenout na potřebný vtok. Já jsem ho udělal pomocí kůlu vymodelovaného z plastelíny. Její tvar jsem udělal podle trychtýře, který jsem zamýšlel použít jako vtok **(obr.:3-10)**.

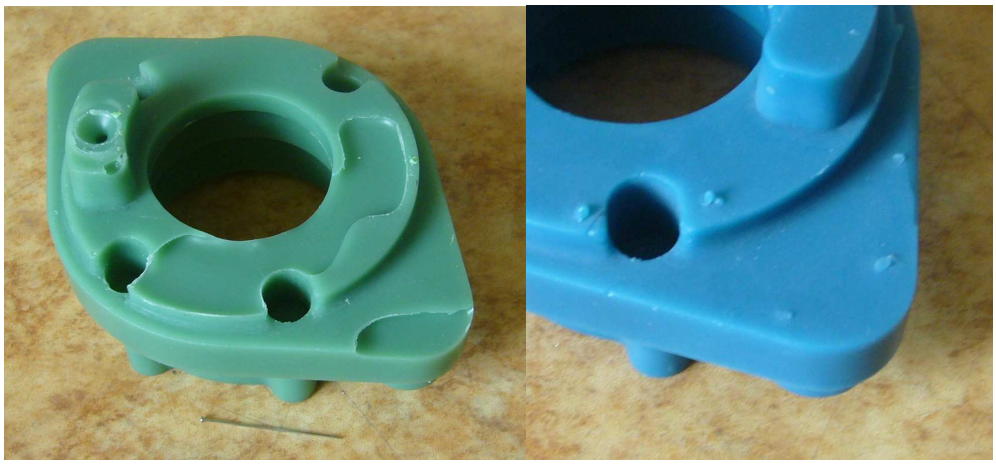
(obr.:3-10) Odlitá celá silikonová forma.

Cena použitého silikonu se pohybuje okolo 1Kč/1g. To znamená, že celá silikonová forma je za zhruba 2000Kč. Z toho plyne, že při výrobě je nutné uspořit co nejvíce materiálu a nedělat formu zbytečně velkou.

Výfukové otvory

Při výrobě formy jsem předpokládal, že při lití ve vakuu nebude ve formě žádný vzduch a tudíž nebudou žádné výfukové otvory potřeba. Tato představa se již při odlití prvního modelu ukázala jako naprosto mylná.
Výfukové otvory jsou velice důležitou součástí formy. Jelikož silikonová forma postrádá jakoukoli prodyšnost, tak jejich absence způsobila, že do nejzažších částí vosk nedotekl **(obr.:3-11)** i přesto, že odlití bylo prováděno ve vakuu.
Problém nedostatečného odvzdušnění se mi nakonec podařilo vyřešit vyvrtáním výfukových otvorů vrtačkou **(obr.:3-12)**. Použil jsem průměr vrtáku 3,5 mm a v silikonu vznikl otvor o průměru zhruba 1,5 mm. To je již zcela dostatečné. Otvory jsem umístil vždy na místa, kde se u předchozích několika modelů objevilo nezaběhnutí.

Tímto se odstranily najednou téměř všechny bubliny. Ty které zůstaly nebo se objevily nově, se odstranily dodatečným odvrtáním dalších výfukových otvorů.
Kupodivu silikon šel vrtat celkem dobře, i vzniklý otvor byl bez nějakých otřepů, nebo jiných zbytků silikonu.
Po výfukových otvorech na modelu zůstanou stopy **(obr.:3-13)** v podobě vyčnívajících válečků. Ty je možné snadno odstranit a vznikne tak zcela zdravý model. Vosk, který zůstal ve výfukových otvorech, lze bez problémů vytlačit.



(obr.:3-11) Nedoteklý model
(obr.:3-13) Stopy po výfukových otvorech

(obr.:3-12) Vrtačka

3.2.1.4 Výroba voskových modelů

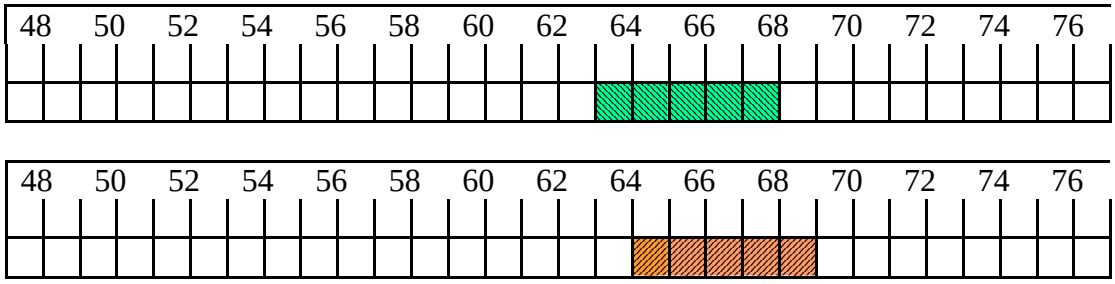
Použitý vosk

Použil jsem vosk od firmy Blayson typ A7-RT/26

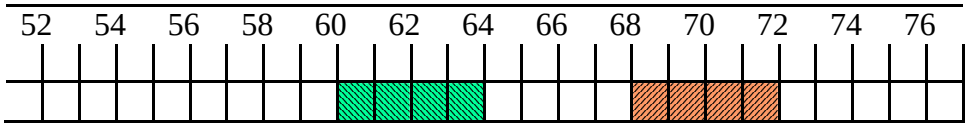
Charakteristika:**[23]**

- Rychle tavící se vosk při vytavování, minimalizuje tlak na skořepinu.
- Rozměrově velmi stabilní.
- Vosk není lepkavý, tudíž je velmi snadno vyjímatelný z formy.
- Vosk má velmi dobrou proudovou charakteristiku.
- Vosk se vrací do původního tvaru v případě zdeformování modelu.
- Vosk může být rekonstituován.

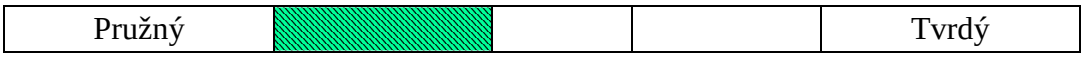
Teplota gelace /°C



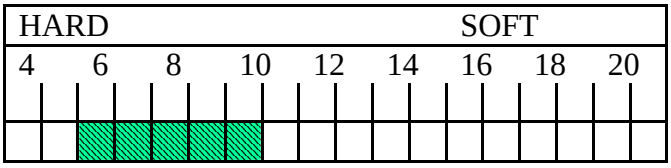
Teplota tuhnutí /°C
Doporučená teplota vstřikování /°C: Pastovitý stav/Tekutý stav



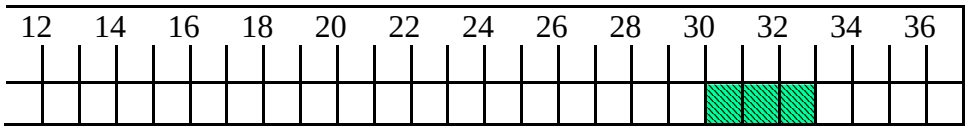
Mechanická pevnost



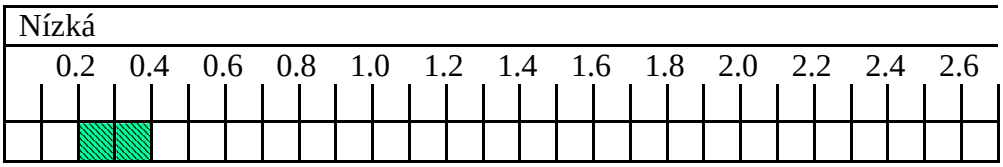
Penetration @ 50 g/10^{-1} mm



Obsah plniva %



Viskozita @ 90°C/Pa s



Tekutost

Nízká				Vysoká

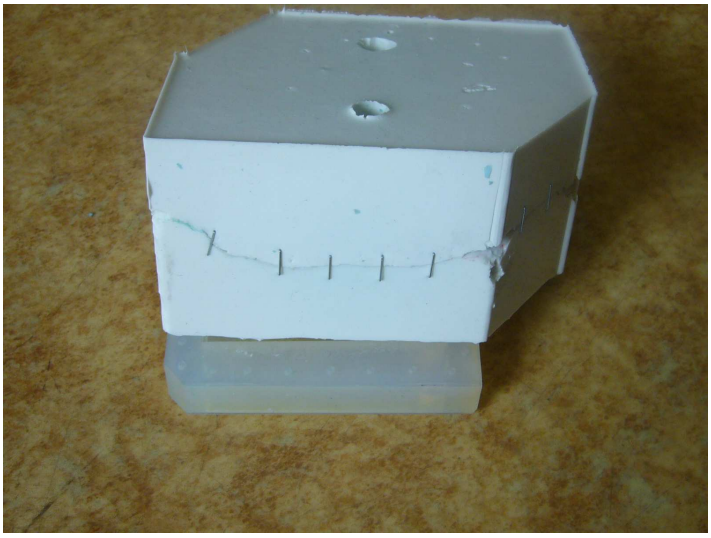
Typ plniva: XLPS 40 – 100 µm
Obsah popelovin: 0.03% Max
Volné délkové smrštění: 0.6 – 0.8 %
Doporučená maximální licí teplota je 100°C.

Popis výroby voskového modelu

Před odléváním vosku se musí forma nahřát. My jsme formu nahřívali na 80°C proto, aby vosk dokonale zaběhl a nedocházelo k jeho tuhnutí již během odlévání. Ohřátí se provádělo v předehřívací peci Memmert **(obr.:3-14)** vždy po dobu 60 minut. Po ohřátí je možné z formy odstranit zbytky vosku, který ulpěl na jejím povrchu. To jsem prováděl pomocí papírového ubrousku.

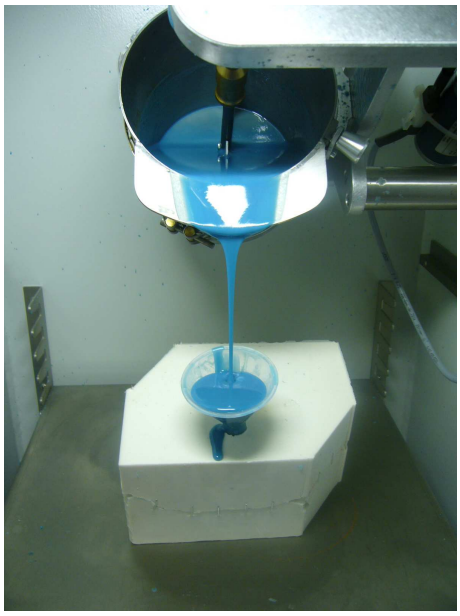
(obr.:3-14) Předehřívací pec

Dutinu formy je možné natřít silikonovým olejem. Zajistí se tím snadnější vyjímání modelu z formy. Je zde ovšem riziko, že výsledný povrch modelu na sobě bude mít malé bublinky tvořené nahromaděným olejem. V mém případě se forma olejem nenatírala, voskový model šel vyjmout bez problémů. Obě poloviny formy se musí spojit, aby nedošlo k jejich posunutí během odlévání, nebo následné manipulace s formou a tím k poškození voskového modelu. To se zajistilo pomocí kancelářských sponek **(obr.:3-15)**. Do každé plochy se nastřelily 3 až 4 sponky.



(obr.:3-15) Sesponkovaná forma

Jako vtok jsem použil trychtýř který jsem si nožem upravil na potřebnou délku. Odlévání se provádělo za teploty 70°C. Dokonalé roztavení vosku trvalo vždy zhruba 40 minut. Poté se vosk musel 40 minut vakuovat při podtlaku -1 bar. Roztavení a vakuování se provádělo ve stejném zařízení jako vakuování silikonu.
Po vložení předehřáté formy do pece se vosk opět vakuuje (-1 bar) po dobu 2 minut a pak při vakuu -0,7 baru odlije **(obr.:3-16)**. Důležité je zbytečně neprodlužovat dobu mezi vyjmutím formy z předehřívací pece a odlitím vosku, aby nedocházelo k jejímu chladnutí.



(obr.:3-16) Odlévání vosku do formy

Forma se po odlití již nechá zchladnout v lednici (**obr.:3-17)**. Zchlazení trvá dvě hodiny, ovšem u větších modelů je riziko, že ve středových částech bude voskový model stále teplý. Já jsem si dobu ochlazení stanovil experimentálně. Teplota v lednici byla 5ºC.

(obr.:3-17) Ochlazování v lednici

Ochlazení mé formy na vzduchu by díky, velice špatné tepelné propustnosti silikonu, trvalo 24 hodin. Takto dlouhá doba by celý můj experiment neúnosně protáhla.
Výroba jednoho modelu včetně natavení, vakuování a ochlazení trvá zhruba 4 až 5 hodin. Následné modely je pak možné mít za zhruba 3 hodiny díky tomu, že tavení a vakuování vosku se provede během ochlazení a předehřevu formy.
Při vyjímání vosku z formy je nutné formu postupně pomocí specielních kleští roztahovat tak, aby nedošlo k prasknutí modelu. V místech, kde se vosk lepí na stěny

formy se dutina musí natírat silikonovým olejem. Jedná se především o tenké a vysoké stěny. Na vyjímání modelů má i zásadní vliv druh použitého vosku. My jsme používali vosk A7-RT/26. Jedná se o vosk, který není extrémně pevný a tvrdý, ale je i mírně houževnatý a oproti jiným testovaným voskům je mastnější.
Zbylé experimentálně namíchané vosky s velkým množstvím plniva se vždy, i po natření formy silikonovým olejem, přilepily na povrch formy a modely nešly vyndat. Výhoda těchto vosků měla být v jejich malém smrštění. Ukázalo se ovšem, že pro naše použití jsou naprosto nevhodné.

Kvalita povrchu modelu

Po odstranění problémů s nezaběhnutými místy byl vyrobený model téměř bez jakýchkoli defektů, téměř srovnatelný s modely vstřikovanými do kovových forem. Jediné nedokonalosti paradoxně vznikaly na základě dokonalého obtisknutí se všech detailů z formy do modelu. Jsou to například stopy po vrstvách přenesených z ABS modelu, nebo malé kuličky vzniklé odlitím bublinek vzniklých v silikonové formě. To znamená, že pro výsledný povrch je důležité, věnovat pozornost již přípravě ABS modelu. Zejména úpravě povrchu broušením.

Rychlost výroby modelu

Rychlost výroby prototypu od dodání ABS modelu je zhruba čtyři dny. Výroba našeho modelu trvala zhruba 2 až 3 hodiny. Jeden den zabere nastříkání modelu tmelem, jeho dokonalé zatvrdnutí (24 h) a následné vybroušení. Výroba celé silikonové formy v případě že se skládá ze dvou dílů zabere 2 dny. A výroba prvního voskového modelu 4 hodiny. Takže čtvrtý den jsme schopni mít první voskový model.

Ovlivnit rychlost tvrdnutí silikonu se zřejmě moc nedá. Zrychlit by se výroba dala ve fázi odlévání voskového modelu zejména rychlost chladnutí. To by se muselo řešit zabudováním chlazení do formy. Dále by se dala zrychlit i fáze předehřevu. Nejlepší by bylo kdyby se chlazení dalo využít i jako interní ohřev. Například by se do formy mohla zalít kovová trubička, kterou by pak mohla proudit voda, nebo do formy zalít vyjímatelnou kovovou vložku, která by jistě transportovala teplo lépe než samotný silikon.

3.2.1.5 Postup měření

Měřené rozměry:
Na měřeném modelu jsme si zvolily tři rozměry **(obr.:3-18)**. Měřen je jedem vnější a vnitřní průměr a jedem délkový rozměr kolmý na dělící rovinu.

(obr.:3-18) Měřené rozměry

Metodika měření:
Měření jsme na každém modelu prováděli dvakrát, nejprve tři hodiny po odlití. To znamená jednu hodinu po vyjmutí modelu z formy. To aby se stabilizovaly teploty jednotlivých částí modelu a stabilizovaly rozměry. Druhé měření bylo po 24 hodinách po odlití, v tomto okamžiku jsem předpokládal, že model již bude mít konstantní teplotu a jeho rozměry se již nebudou dále měnit.
Rozměr jsem vždy prováděl na stejném místě modelu, to bylo důležité z důvodu eliminování geometrických chyb způsobených zejména ručním broušením povrchu. Při orientačním změření téhož rozměru, ale na různých místech modelu jsem zjistil že se od sebe jednotlivé hodnoty liší.

Měřící pomůcky:

Pro měření jsem použil digitální posuvné měřítko

Měřící rozsah	0 - 150 mm
Rozlišení	0,01 mm
Chyba měřidla	± 0,03 mm
Opakovatelnost	0,01 mm

3.2.1.6 Výsledky měření

Rozměry voskových modelů

a) **Po 3 hodinách po odlití (tab.:3-1).**
b) **Po 24 hodinách po odlití (tab.:3-2).**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	58,16	58,17	58,15	58,12	58,08	58,06	58,09	58,08	58,12	58,01
B	20,02	20	20,01	20	19,98	20,02	20,01	20,05	19,94	20,02
C	45,43	45,45	45,45	45,46	45,31	45,43	45,37	45,37	45,38	45,43

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Arit. průměr	Tolerance modelu Max-Min
58,05	57,76	57,99	58,03	57,97	58	57,98	57,99	57,98	58	58,0405	0,41
20,03	19,93	19,98	19,97	19,94	20	20	19,94	19,98	20	19,9925	0,12
45,36	45,26	45,4	45,36	45,35	45,4	45,34	45,28	45,43	45,5	45,3835	0,2

(tab.:3-1) Hodnoty naměřené po 3 hodinách (silikonová forma)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A [mm]	58,1	58,11	58,12	58,1	58,07	58,02	58,17	58,05	58,03	58,02
B[mm]	20,02	19,99	20	20,02	19,94	20,06	20,02	19,98	19,95	20,01
C[mm]	45,43	45,43	45,45	45,34	45,31	45,35	45,29	45,33	45,37	45,31

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Arit. průměr	Tolerance modelu Max-Min
57,98	57,9	58,03	58,02	57,87	58	57,98	57,94	57,91	58	58,019	0,3
20,02	19,95	20,03	19,98	19,92	20	19,95	19,94	19,96	20	19,983	0,14
45,4	45,28	45,38	45,38	45,24	45,3	45,32	45,26	45,44	45,5	45,355	0,21

(tab.:3-2) Hodnoty naměřené po 24 hodinách (silikonová forma)

Test na hrubé chyby

K vyloučení hrubých chyb měření ze základního souboru se použije Grubbsův test. Pomocí tohoto testu se zjistí, zda krajní hodnoty nejsou hrubou chybou.

Popis testu

Při tomto testu se výsledky seřadí podle velikosti tak, že $x_1<x_2... <x_n$ a vypočte se kritéria:

$$T_n = \frac{x_n - \bar{x}}{S_n} \qquad T_1 = \frac{\bar{x} - x_1}{S_n}$$

Hodnota S_n odpovídá populační směrodatné odchylce.

$$S_n = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\bar{x}-x_i\right)^2}$$

Hodnota T_n nebo T_1 se porovnává s kritickou hodnotou Grubbsova rozdělení T_a. Je-li T_1 nebo $T_n>T_a$, je výsledek odlehlý. V opačném případě, tj. je-li T_1 nebo $T_n <T_a$, je splněna nulová hypotéza a testovaný výsledek se nevylučuje.**[27]**

Výsledek testu

Testovaly se pouze hodnoty získané po 24 hodinách, které se dále využívaly při vyhodnocení celého procesu.

Rozměr	Sn	Tn	T1	Tkrit 0,95
A	0,07713	1,95774	1,931809	2,62
B	0,037027	2,079563	1,70146	2,62
C	0,06265	1,516365	1,8356	2,62

(tab.:3-3) Test hrubých chyb

Z provedeného testu vyplívá, že všechny naměřené hodnoty je možné použít. Soubor neobsahuje žádné hrubé chyby.

3.2.2 Modely vyrobené v kovové matečné formě

K měření jsme použili voskové modely vyrobené ve firmě FIMES a.s z Uherského Hradiště.

3.2.2.1 Výroba voskového modelu

Použitý vosk

Nejedná se o čistý vosk dodaný firmou, ale o směs. **(obr.:3-19)**.

(obr.:3-19) Vosk

Parametry vstřikování

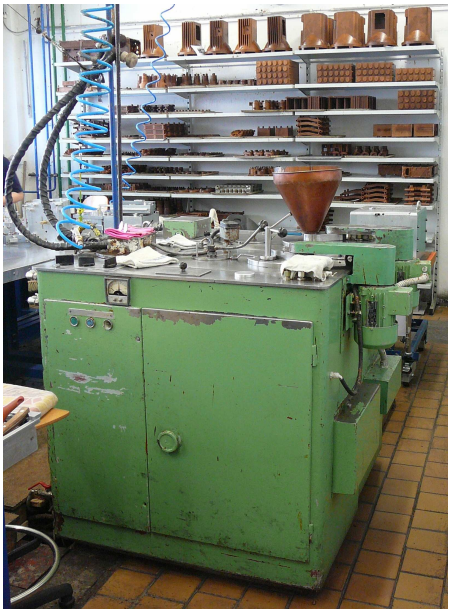
Vosk je do formy vstřikován při teplotách okolo 55°C (dle konfigurace součásti) a tlaku 0,2 – 0,3 MPa. Voskový model je z formy vytahován při dosažení dostatečné pevnosti, tj. asi 60 minut po vstřiku. **[2]**

Matečné formy jsou vyrobeny ze slitin hliníku (dural – Cu, Mg).

Vstřikovací zařízení

Voskové modely **(obr.:3-20)** se vyrábí na plničkách **(obr.:3-21)**.

(obr.:3-20) Voskové modely vyrobené v matečné formě



(obr.:3-21) Plnička

3.2.2.2 Postup měření

Na dvaceti modelech jsem změřil stejné rozměry jako na modelech vyrobených do formy silikonové. Měření jsem prováděl vždy na stejném místě, aby se do výsledků nevnášely geometrické nepřesnosti matečné formy.
Modely jsem měřil jen jednou v době, kdy jsem předpokládal, že se jejich rozměry nebudou již měnit. Modely byly staré dva až tři dny, takže jejich rozměry již byly stabilizované.

3.2.2.3 Výsledky měření

Rozměry voskových modelů

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A [mm]	58,48	58,51	58,42	58,41	58,41	58,44	58,43	58,42	58,44	58,46
B [mm]	20,14	20,08	20,12	20,11	20,12	20,11	20,11	20,11	20,12	20,1
C [mm]	45,3	45,31	45,32	45,33	45,32	45,3	45,33	45,32	45,35	45,3

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Arit. Průměr	Tolerance modelu Max-Min
58,43	58,5	58,42	58,48	58,46	58,4	58,45	58,48	58,46	58,4	58,448	0,1
20,12	20,12	20,15	20,13	20,11	20,1	20,06	20,13	20,12	20,1	20,114	0,09
45,32	45,3	45,31	45,33	45,33	45,3	45,07	45,33	45,27	45,3	45,3035	0,28

(tab.:3-4) Rozměry modelů z matečné formy

Test na hrubé chyby

Výsledek testu

Rozměr	Sn	T1	T2	Tkrit 0,95
A	0,028914	2,144315	1,314257	2,62
B	0,014529	2,282249	2,535832	2,62
C	0,017567	1,94747	2,606614	2,62

Po odstranění 17. hodnoty rozměru B,C viz. **(tab.:3-4)** je soubor hodnot bez hrubých chyb **(tab.: 3-5)**.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A [mm]	58,48	58,51	58,42	58,41	58,41	58,44	58,43	58,42	58,44	58,46
B [mm]	20,14	20,08	20,12	20,11	20,12	20,11	20,11	20,11	20,12	20,1
C [mm]	45,3	45,31	45,32	45,33	45,32	45,3	45,33	45,32	45,35	45,3

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Arit. Průměr	Tolerance modelu Max-Min
58,43	58,5	58,42	58,48	58,46	58,43	58,45	58,48	58,46	58,43	58,448	0,1
20,12	20,12	20,15	20,13	20,11	20,11		20,13	20,12	20,11	20,11684	0,07
45,32	45,3	45,31	45,33	45,33	45,3		45,33	45,27	45,33	45,31579	0,08

(tab.:3-5) Soubor bez hrubých chyb

3.3 Vyhodnocení výsledků

Rozměry matečné formy a odlitku

Výkresová hodnota odlitku		Matečná forma	
Rozměr	Tolerance	Rozměr	Tolerance
Ø 58	±0,37	Ø 58,75	±0,05
45	±0,32	45,60	±0,05
Ø 20	±0,2	Ø 20,26	±0,03

(tab.:3-6) Rozměry matečné formy a odlitku

Rozměry ABS modelu

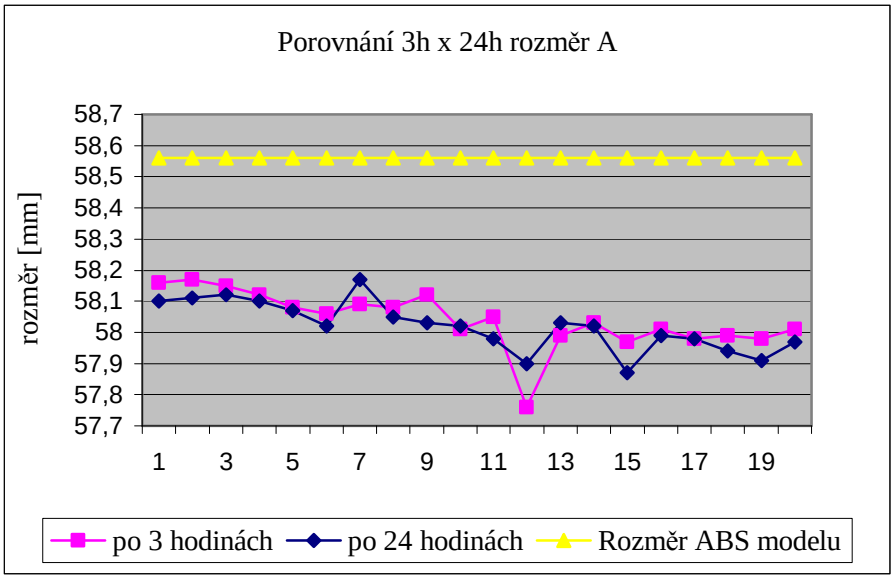
Rozměry ABS modelu		
A [mm]	B [mm]	C [mm]
58,56	20,3	46,08

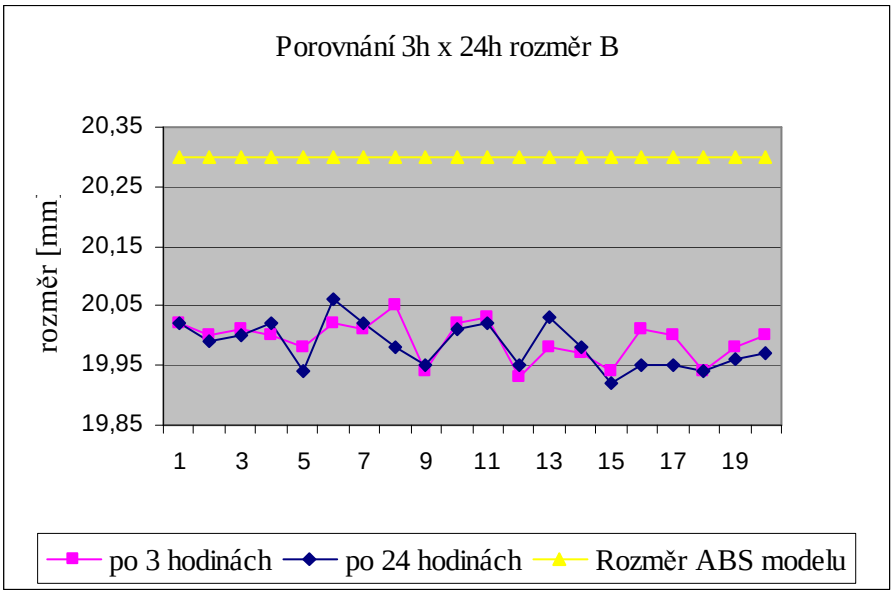
(tab.:3-7) Rozměry ABS modelu

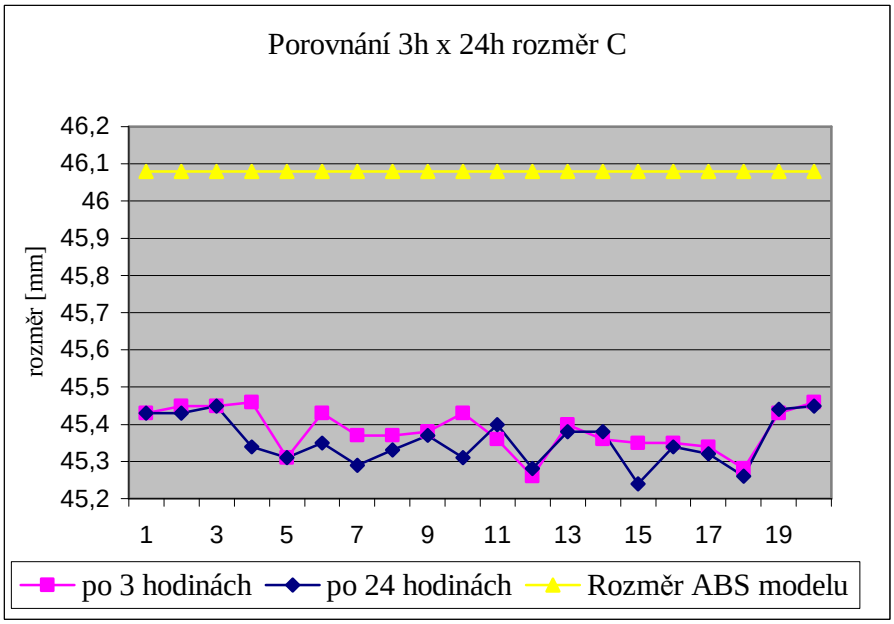
3.3.1 Modely vyrobené v silikonové formě

3.3.1.1 Porovnání rozměrů naměřených po 3 hodinách a po 24 hodinách a rozměrů ABS modelu

Rozměr ABS modelu viz **(tab.:3-7)**
Rozměry voskových modelů viz **(tab.: 3-1), (tab.:3-2)**







(graf: 3-1) *Porovnání rozměrů ABS modelu a voskových modelů*

3.3.1.2 Smrštění modelů

Smrštění rozměrů **(tab.:3-8)** jsem vypočetl v programu Microsoft Excel. Jedná se o smrštění aritmetického průměru rozměrů (A,B,C) voskových modelů **(tab.:3-2)** vůči rozměrům ABS modelu **(tab.:3-7)**.

$$\Delta X = \frac{X_{ABS} - X_{\mathrm{mod}\,el}}{X_{ABS}} * 100\% \ [\%]$$

ΔX … smrštění [%]
X_{ABS} … rozměr X na ABS modelu [mm]
X_{model} … aritmetický průměr hodnot rozměrů voskového modelu [mm]

	ABS model [mm]	Arit.průměr [mm]	Odchylka rozměrů [mm]	Smrštění rozměrů [%]
A	Ø58,56	58,019	0,541	0,9238
B	Ø20,3	19,983	0,317	1,5616
C	46,08	45,355	0,725	1,5734

(tab.:3-8) Smrštění voskových modelů (modely ze silikonové formy)

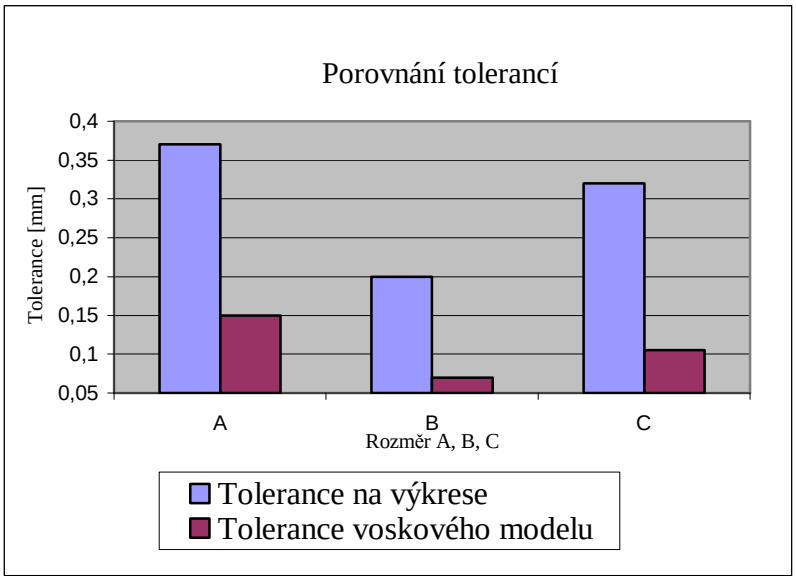
3.3.1.3 Porovnání požadovaných tolerancí odlitku a dosažených tolerancí modelů

Toleranci modelů **(tab.:3-9), (graf:3-2)** jsem určil jako maximální naměřená hodnota voskového modelu mínus minimální naměřená hodnota voskového modelu, to celé děleno dvěma.

$$Tolerance\,\mathrm{mod}\,el\mathring{u} \pm = \frac{X_{MAX} - X_{MIN}}{2} \quad [\mathrm{mm}]$$

	Výkresová hodnota odlitku [mm]	Tolerance na výkrese ±[mm]	Arit.průměr voskového modelu [mm]	Tolerance modelů ± [mm]
A	Ø58	0,37	58,019	0,15
B	Ø20	0,2	19,983	0,07
C	45	0,32	45,355	0,105

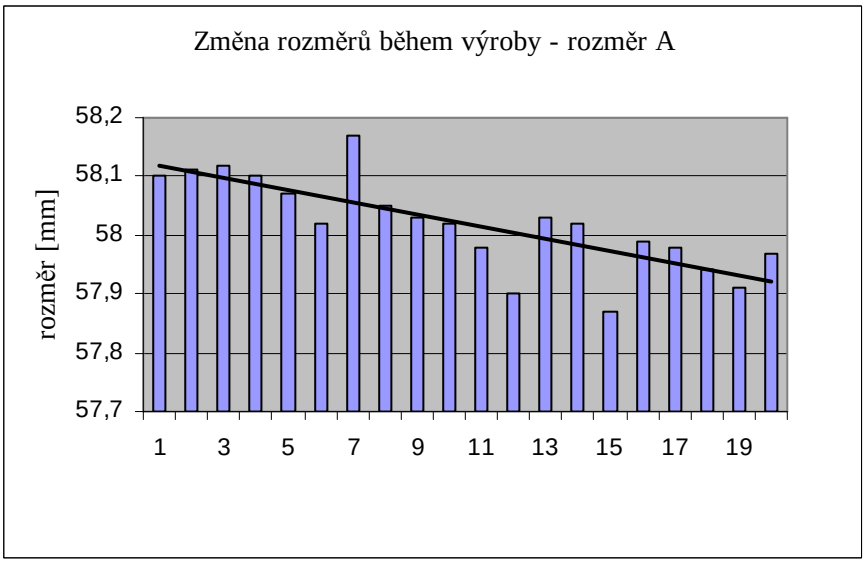
(tab.:3-9) Tolerance voskových modelů (ze silikonové formy)

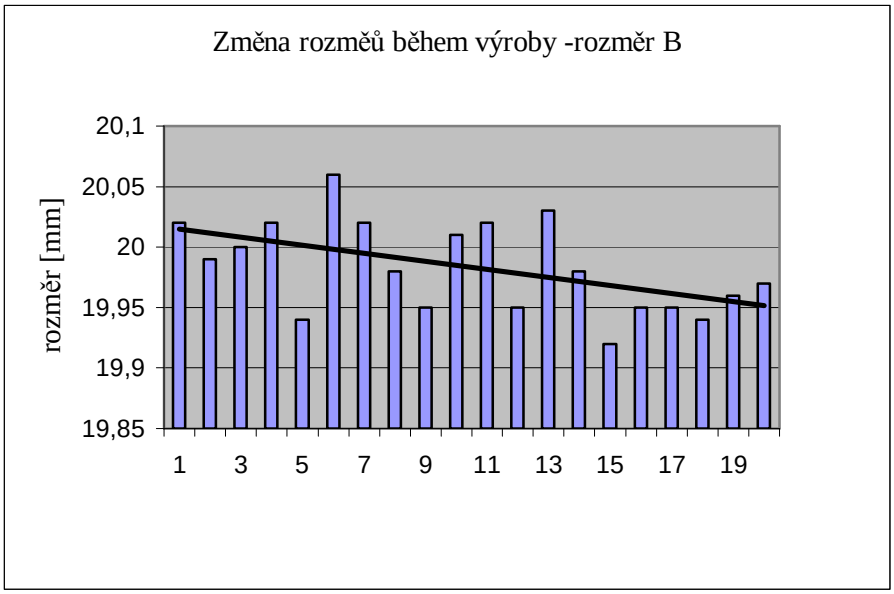


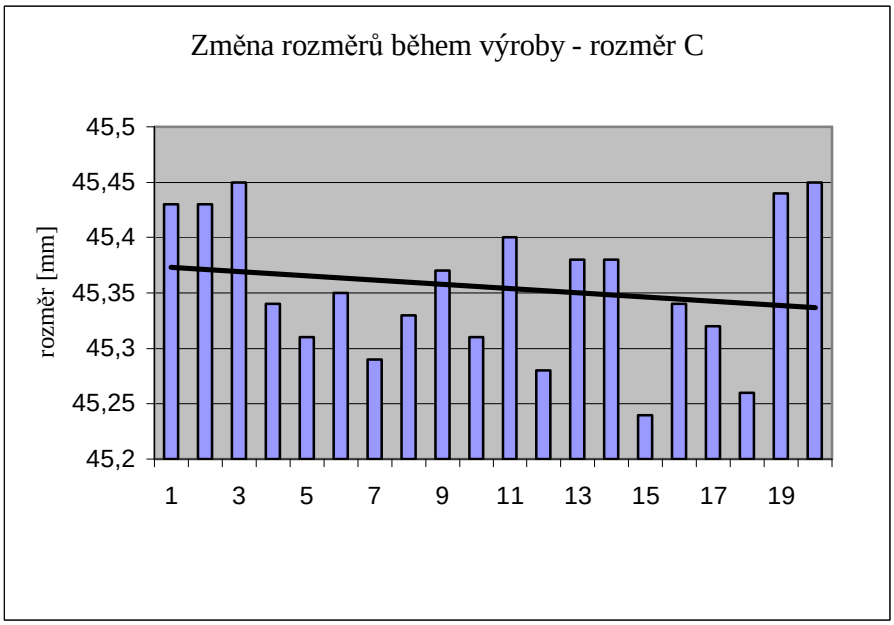
(graf:3-2) Porovnání tolerancí

3.3.1.4 Změna rozměrů během výroby modelů

Během výroby jsem si povšiml, že se všechny tři rozměry postupně zmenšují. Jejich klesající charakter je dobře patrný z grafů **(graf:3-3)**.
Výjimku tvoří pouze rozměr C u něhož se do dělící roviny dostával vosk a zachovat vždy stejné podmínky bylo problematické.
Zmenšování rozměrů pravděpodobně poukazuje na smršťování silikonové formy během výroby. Popírá to však náš předpoklad opotřebovávání (obrušování) silikonu a tím postupné zvětšování rozměrů modelu.
Zmenšování formy by bylo možné ověřit jejím průběžným měřením, ovšem změřit silikonovou formu je běžnými prostředky téměř nemožné. Řešením by mohlo být využití reverzního inženýrství a formu pokaždé neskenovat do počítače.





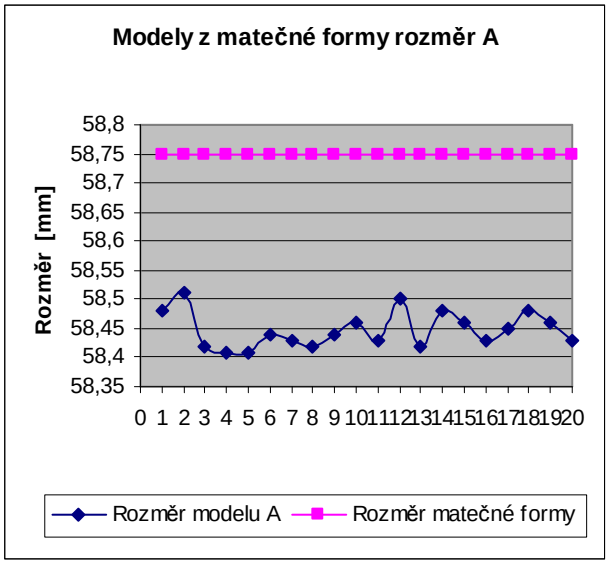


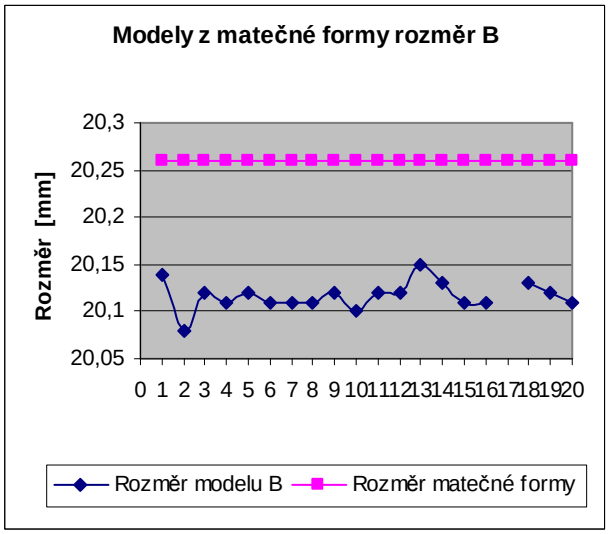
(graf:3-3) Změna rozměrů během výroby

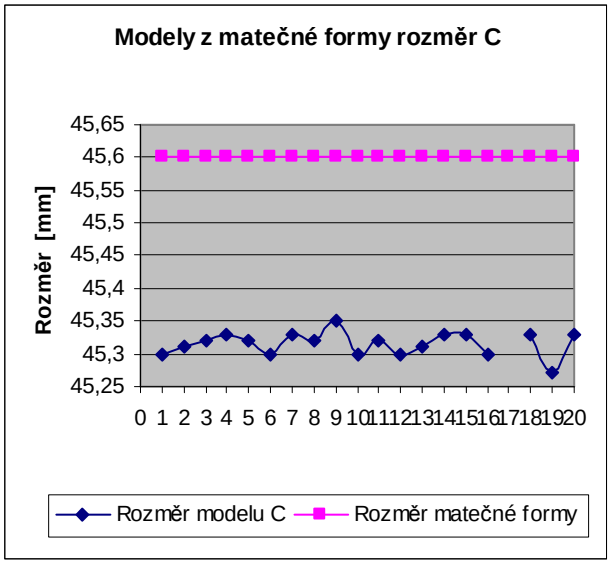
3.3.2 Modely vyrobené v kovové matečné formě

3.3.2.1 Porovnání rozměrů voskových modelů a rozměrů matečné formy

Rozměr matečné formy viz **(tab.: 3-6)**
Rozměry voskových modelů viz **(tab.:3-4)**







(graf:3-4) Porovnání rozměrů matečné formy a voskových modelů

3.3.2.2 Smrštění modelů

Smrštění rozměrů **(tab.:3-10)** jsem vypočetl v programu Microsoft Excel. Jedná se o smrštění aritmetického průměru rozměrů (A,B,C) voskových modelů **(tab.: 3-4)** vůči rozměrům matečné formy **(tab.:3-6)**.

$$\Delta X = \frac{X_{FORMA} - X_{\mathrm{mod}\,el}}{X_{FORMA}} * 100\% \ [\%]$$

ΔX … smrštění [%]
X_{FORMA} … rozměr X na matečné formě [mm]
X_{model} … aritmetický průměr hodnot rozměrů voskového modelu [mm]

	Rozměr matečné formy [mm]	Arit.průměr [mm]	Smrštění rozměrů [mm]	Smrštění [%]
A	58,75	58,448	0,302	0,514043
B	20,26	20,11684	0,143158	0,706604
C	45,6	45,31579	0,284211	0,623269

(tab.:3-10) Smrštění voskových modelů (modely z kovové formy)

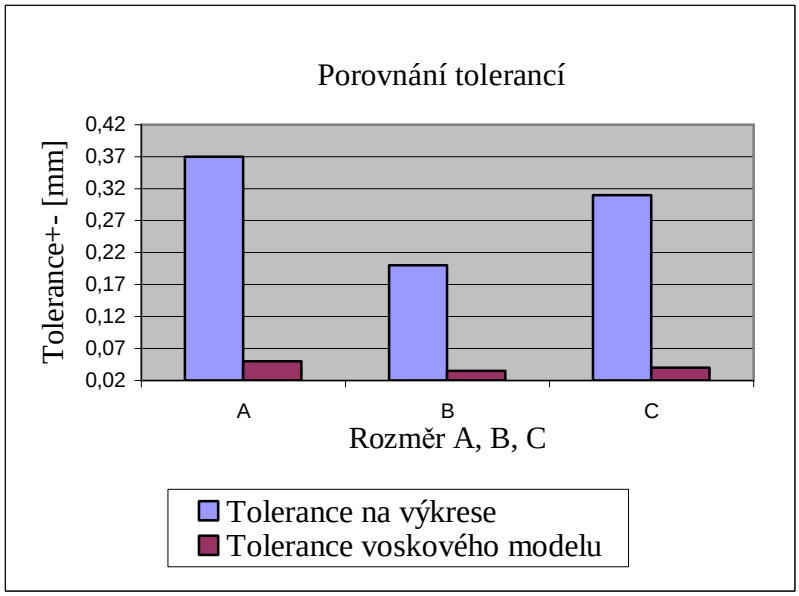
3.3.2.3 Porovnání požadovaných tolerancí odlitku a dosažených tolerancí voskových modelů

Toleranci modelů **(tab.:3-11), (graf:3-5)** jsem určil jako maximální naměřenou hodnotu voskového modelu mínus minimální naměřenou hodnotu voskového modelu, to celé děleno dvěma.

$$tolerance\pm = \frac{X_{MAX} - X_{MIN}}{2} \quad [\text{mm}]$$

	Výkresová hodnota odlitku	Tolerance na výkrese ±	Arit průměr modelů z matečné formy	Tolerance modelu +-
A [mm]	58	0,37	58,448	0,05
B [mm]	20	0,2	20,11684	0,035
C [mm]	45	0,32	45,31579	0,04

(tab.:3-11) Tolerance voskových modelů (z kovové formy)

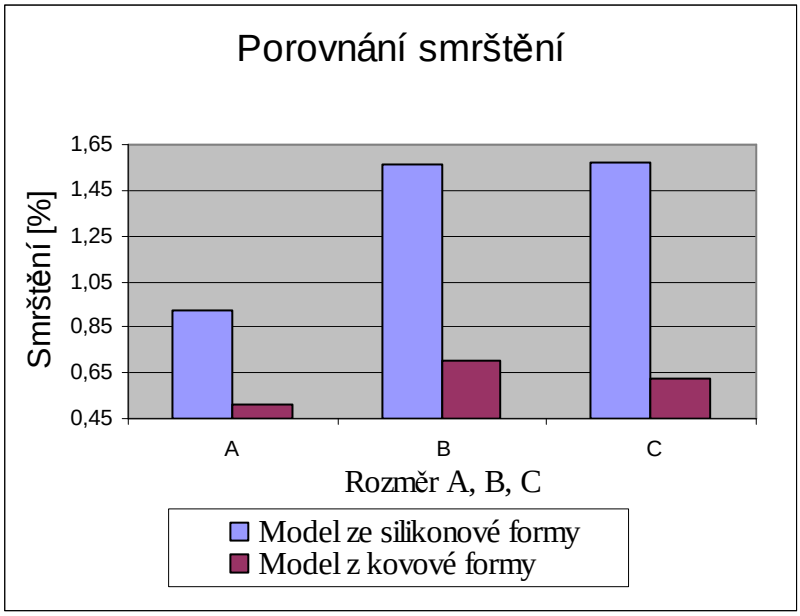


(graf:3-5) Porovnání tolerancí voskových modelů

3.3.3 Porovnání modelů z kovové formy a silikonové formy

3.3.3.1 Porovnání smrštění modelů ze silikonové a z kovové formy

U modelů ze silikonové formy má na změnu rozměrů vliv smrštění vosku během chladnutí a tuhnutí, ale také poddajnost silikonové formy. Proto odchylku rozměrů nelze považovat za smrštění pouze vosku.
V případě použití kovové matečné formy se na změně rozměrů podílí pouze smrštění vosku během chladnutí a tuhnutí, a tudíž odchylku rozměrů lze považovat za smrštění vosku.



(graf.:3-6) Porovnání smrštění modelů

Z grafu vyplívá, že při použití silikonové formy je odchylka zhruba dvojnásobná oproti kovové formě. Nejmenší odchylku má rozměr, který je bržděn. V našem případě je to rozměr A, jedná se o vnitřní průměr. U tohoto rozměru jsem v obou případech zjistil menší odchylku než u rozměrů zbývajících. To je zřejmě způsobeno odporem formy, která se deformuje (ochlazuje) pomaleji, než by se deformoval voskový model, ten mezi tím ztuhne natolik, že se již dále nedeformuje.

Znalost velikosti změny rozměrů lze uplatnit při konstrukci modelu součásti ke stanovení přídavku na smrštění voskového modelu.

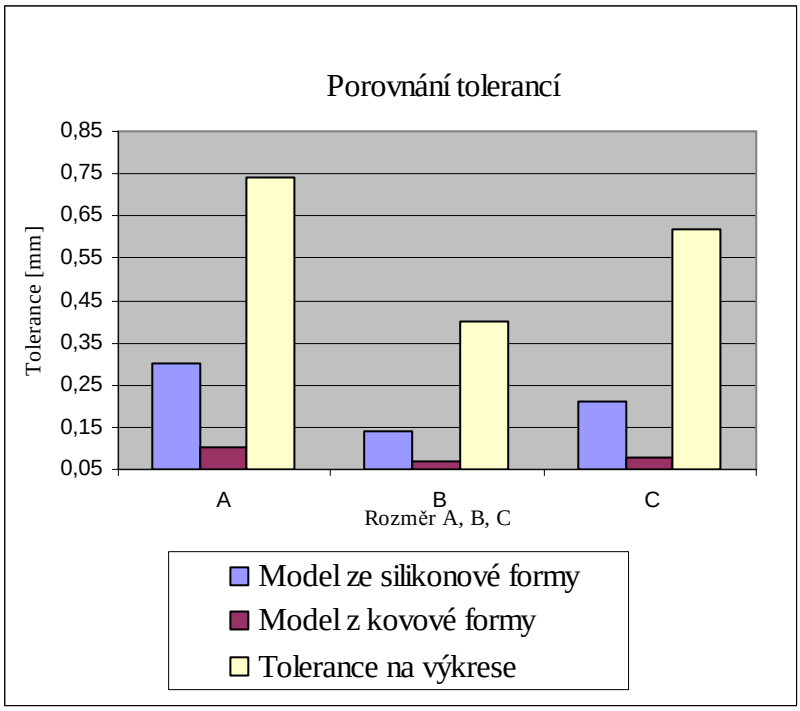
3.3.3.2 Porovnání tolerancí modelů ze silikonové a kovové formy s tolerancemi předepsanými na výkrese

Jelikož u voskových modelů není předepsán jejich jmenovitý rozměr a tolerance, tak se jmenovitý rozměr stanovil jako aritmetický průměr naměřených hodnot. Toleranční meze se vypočetly přičtením a odečtením tolerance odlitku, která je předepsaná na výkrese k aritmetickému průměru. Na grafech je možné posoudit, zda vyrobené voskové modely leží v toleranci předepsané pro hotový odlitek a do jaké míry leží i v toleranci modelů vyrobených v kovové matečné formě.

Tolerance předepsané na výkrese viz **(tab.:3-7)**
Porovnání dosažených tolerancí:**(tab.:3-12)**, **(graf.:3-7)**

	Tolerance modelů	
	Model ze silikonu	Model z mat. formy
A [mm]	0,3	0,1
B [mm]	0,14	0,07
C [mm]	0,21	0,08

(tab.:3-12) Porovnání tolerancí voskových modelů



(graf.:3-7) Porovnání tolerancí voskových modelů a odlitku

Z uvedeného grafu plyne, že při výrobě modelů v silikonové formě jsou tolerance několikrát vyšší než při výrobě ve formě kovové. Ovšem při požadavku malého počtu kusů jsme z vyrobené série schopni vybrat několik kusů, které budou stejně rozměrově přesné jako modely z kovové formy.

Do jaké míry se modely vešly do tolerance předepsané na výkrese vyjadřuje procentuelní vyjádření tolerance voskových modelů vůči toleranci předepsané na výkrese odlitku **(tab.:3-13)**.

Rozměr	Tolerance na výkrese ± [mm]	% Tolerance modelů ze silikonové formy z tolerance na výkrese	% Tolerance modelů z kovové formy z tolerance na výkrese
A	0,37	40,54054	13,51351
B	0,2	35	17,5
C	0,32	32,8125	12,5

(tab.:3-13) Porovnání tolerancí voskových modelů a odlitku

Z tabulky plyne, že tolerance u všech rozměrů ze silikonové formy jsou pod 41% z tolerance odlitku, ovšem jsou zhruba třikrát vyšší než tolerance modelů vyrobených ve formě kovové. To znamená že i při vnesení dalších nepřesností u následného zpracování by teoreticky mělo být možné vyrobit odlitky v požadovaných tolerancích.

3.3.4 Vyhodnocení tolerancí dosažených u voskových modelů

V této kapitole se zhodnotí stabilita procesu a to, do jaké míry vyrobené modely mohly být využitelné pro další zpracování a výrobě hotového odlitku. Na Gausovích křivkách je znázorněno rozložení a četnost jednotlivých rozměrů. Meze (-tol. a +tol.) znázorňují tolerance předepsané na výkrese odlitku. Z polohy Gausovi křivky v těchto tolerancích je patrné, do jaké míry modely splňují tolerance předepsané na výkrese odlitku.

Indexy způsobilosti Cp a Cpk vyjadřují stabilitu procesu. Čím je hodnota indexů vyšší, tím je proces stabilnější. Příčinou nestability je rozptyl jednotlivých rozměrů. Minimální hodnota indexu způsobilosti, která vyjadřuje stabilní proces je Cp=1,33 , to znamená, že oba procesy výroby modelů jsou značně nestabilní viz. **(tab.:3-14)**,**(tab.:3-15)**. U modelů z kovové formy je to způsobeno smrštěním vosku. U modelů z formy silikonové proces navíc ještě ovlivňuje pružnost formy. Řešením by mohlo být nahrazení vosk jiným, který vykazuje menší smrštění a silikonem, který má větší tvrdost.

index způsobilosti Cp - variabilita procesu

Cp=(USL-LSL)/6б
HMR - horní mezní rozměr
DMR - dolní mezní rozměr
б - směrodatná odchylka

index způsobilosti Cpk1,2- variabilita a nastavení procesu

Cpk1=(HMR-Xmodel)/3б
Cpk2=(Xmodel-DMR)/3б
(pozn.:z vypočtených hodnot Cpk1,2 bereme v úvahu menší hodnotu)
Xmodel – aritmetický průměr

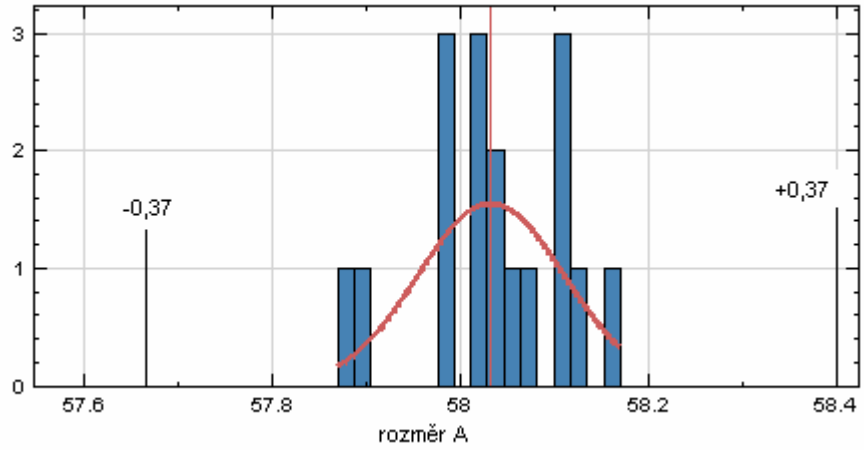
3.3.4.1 Modely vyrobené do silikonové formy

a) Rozměr A
b) Rozměr B
c) Rozměr C

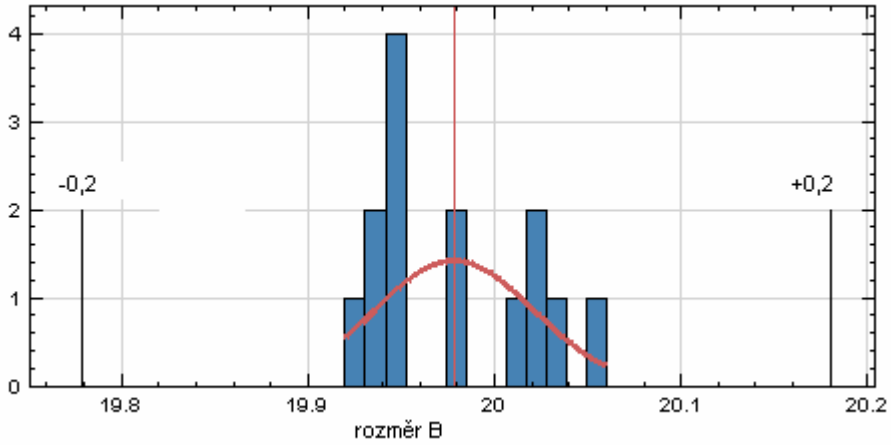
	б	HMR	DMR	Xmodel	Cp	Cpk1	Cpk2
A	0,07713	58,17	57,87	58,019	0,648258	0,65258	0,643936
B	0,037027	20,06	19,92	19,983	0,63017	0,693188	0,567153
C	0,06265	45,45	45,24	45,355	0,558661	0,505455	0,611867

(tab.:3-14) Index způsobilosti silikonová forma

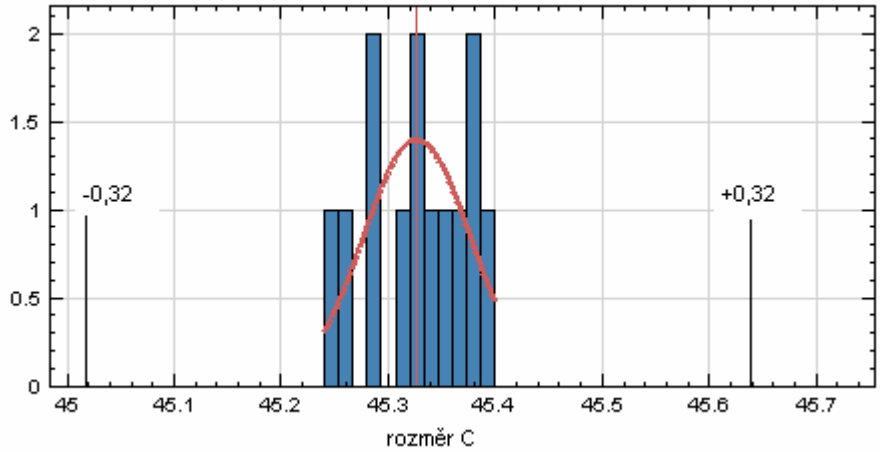
ad a) Porovnání rozměru A



ad b) Porovnání rozměru B



ad c) Porovnání rozměru C



(graf.:3-8) Gausovy křivky – silikonová forma

Z výše uvedených grafů je patrné, že rozměry modelů leží téměř rovnoměrně v celé oblasti pod Gausovou křivkou. To znázorňuje indexy způsobilosti Cp a Cpk které stabilitu procesu kvantifikují. Vypovídá o tom, že celý proces není příliš stabilní.

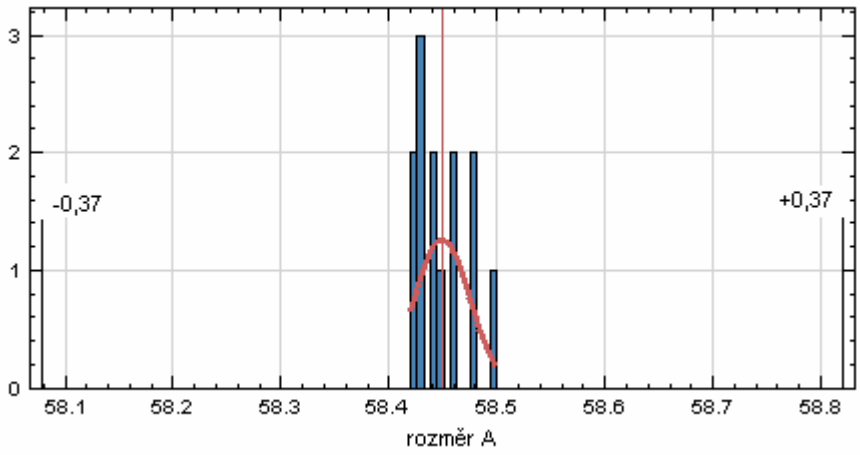
3.3.4.2 Modely vyrobené do kovové formy

a) Rozměr A
b) Rozměr B
c) Rozměr C

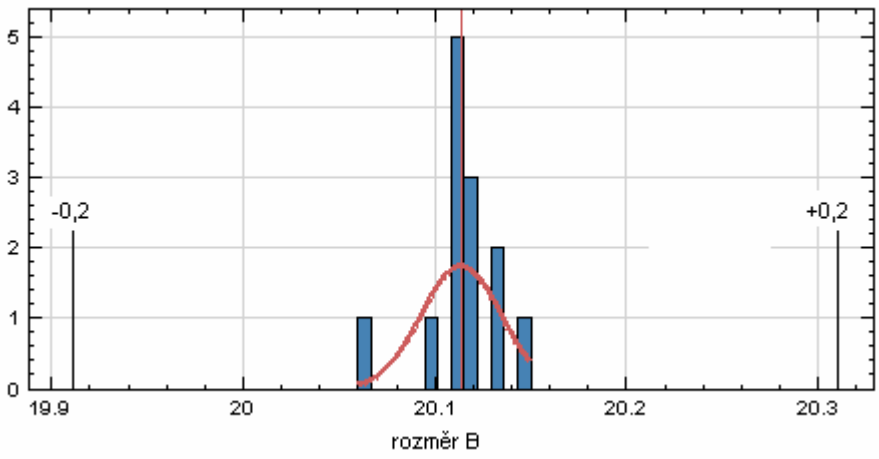
	б	HMR	DMR	Xmodel	Cp	Cpk1	Cpk2
A	0,028914	58,51	58,41	58,448	0,576429	0,714772	0,438086
B	0,014529	20,15	20,08	20,11684	0,803014	0,76075	0,845277
C	0,017567	45,35	45,27	45,31579	0,759014	0,649157	0,868871

(tab.:3-15) Index způsobilosti kovová forma

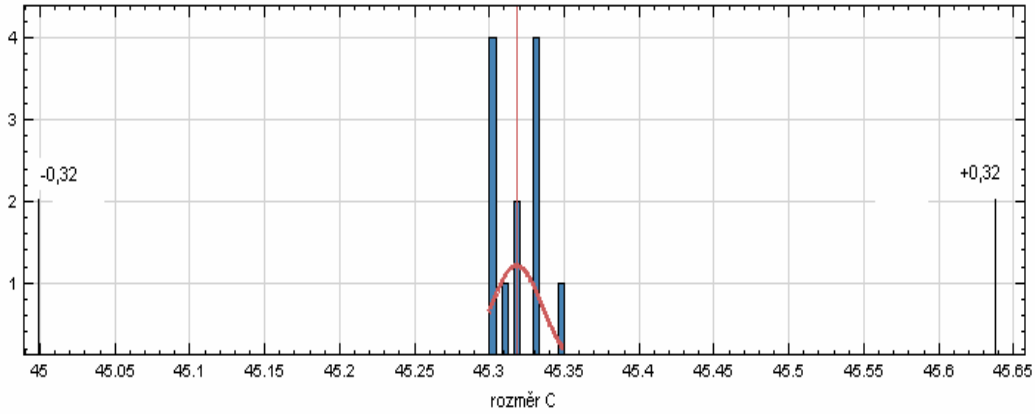
ad A) Porovnání rozměru A



ad B) Porovnání rozměru B



ad C) Porovnání rozměru C



(graf.:3-9) Gausovy křivky – kovová forma

3.3.4.3 Stanovení stupně přesnosti IT u modelů

Pro každý rozměr se stanovil stupeň přesnosti IT **[28]** a provedlo se porovnání odlitku, modelu z kovové formy a modelu ze silikonové formy **(tab.:3-16)**

	Rozměr		
	A	B	C
	Stupeň přesnosti IT		
Odlitek	14	14	14
Voskový model z kovové formy	10	10	10
Voskový model ze silikonové formy	12	11	12

(tab.:3-16) Stupeň přesnosti IT voskových modelů

Stupeň přesnosti se vždy stanovuje pro konkrétní rozměr. Z tabulky **(tab.:3-16)** je vidět, že modely vyrobené v kovové formě mají všechny rozměry ve stejném 10. stupni přesnosti, to je způsobeno tuhou a přesnou kovovou formou. Proti tomu modely vyrobené ve formě silikonové jsou ve dvou stupních 11. a 12. stupeň. Vyšší stupeň přesnosti a rozptyl je způsoben pravděpodobně použitím pružné silikonové formy, oproti klasické absolutně tuhé formě kovové.
Se zvětšujícím se rozměrem modelu se ovšem budou tolerance a pravděpodobně i stupeň přesnosti neustále zvětšovat viz. **(tab.:2-1).** Experimentálně ověřit tolerance u větších rozměrů bohužel v našich podmínkách nebylo možné.

4.0 Závěr – návrh dalšího postupu práce

Z experimentů vyplynulo, že pomocí metod rychlého prototypování lze rychle, během několika dní, vyrobit voskové modely použitelné pro výrobu odlitku s dostatečnou přesností. V našem případě se jednalo o jednoduchý a malý model vyrobený ve dvoudílné silikonové formě. V případě složitějšího modelu by ovšem nebyl problém vyrobit i silikonovou formu z více dílů a větších rozměrů.
Měřením voskových modelů se zjistilo, že při použití metody rychlého prototypování (silikonové formy) je u modelu možné dodržet tolerance předepsané na výkresu odlitku, který je ve 14. stupni přesnosti.**[28]** Modely ze silikonové formy byly vyrobeny v 11. a 12. stupni přesnosti IT. Při porovnání s modely vyrobenými v matečné kovové formě, které byly vyrobeny v 10. stupni, se jedná o 1 až 2 stupně horší přesnost.
V jaké přesnosti budou vyrobeny hotové odlitky, a zda se opravdu dodrží tolerance předepsané na výkrese by mělo být cílem dalšího experimentu.
Další věcí, které by se měla věnovat pozornost, je stanovení jmenovitého rozměru ABS modelu tak, aby se docílilo správného konečného rozměru odlitku. Na správnou hodnotu jmenovitého rozměru má v tomto případě vliv ne jenom smrštění vosku, ale také smrštění a jistá pružnost silikonové formy. Vosk se v tomto případě do formy nalévá gravitačně a za vysokých teplot, jelikož pružná silikonová forma neumožňuje použití například vstřikolisu a vosku v kašovitém stavu o podstatně nižší teplotě a menším smrštění. Teplota vosku je také závislá na tloušťce stěn silikonové formy, čím jsou stěny tenčí, tím musí být vyšší i teplota vosku, aby se zajistilo dokonalé zaběhnutí celého modelu.
Dále by se měla v budoucnu věnovat pozornost zrychlení celého procesu. Při dosavadních podmínkách lze vyrobit jednodušší silikonové formy do tří až čtyř dnů a poté maximálně dva až tři voskové modely za den. U složitějších forem se čas výroby formy zvyšuje vždy o jeden den s každým dílem formy navíc.
Metody rychlého prototypování se již postupně stávají významným pomocníkem při výrobě prototypů nebo malých sérií odlitků. I v případě výroby matečné kovové formy, kterou je možné také vyrobit ve velmi krátkém čase, se však jedná o metodu podstatně lacinější. Například kovová forma pro výrobu mnou měřených modelů stála necelých 30000 Kč a silikonová forma zhruba 3000 Kč. To přispívá k významnému snížení ceny prototypových výrobků.

Seznam použité literatury a internetových odkazů:

[1] URL:<http://u12123.fsid.cvut.cz/podklady/MPL/presne%20liti%20vytavytelny%20model.pdf>[cit.2008-2-2]
[2] Horáček M., Michalčík P., Wiedermann J.: Rozměrové změny v průběhu technologie vytavitelného modelu, Slévárenství, č. 1, 2005, s.7-18
[3] Milan Horáček. Edinburg 3. 27.2.2008. Osobní komunikace
[4] P. Hancock. A7-RT27[1].tds(IssueP1). 3.3.2008. Osobní komunikace
[5] URL:<http://mechanika.fsid.cvut.cz/old/ustav/experiment/rapid.html>[cit.2007-12-11]
[6] URL:<http://www.vu.vutbr.cz/digidesing/Moduly/Rapid%Prototyping%20-%20ing.%20Miloslav%20Dr%C3%A1pela.pdf>[cit.:2007-15-11]
[7] URL:<http://www.amazines.com/article_detail.cfm?articleid=256337>[cit.2007-25-11]
[8] URL:<www.hacker-model.com/cz/rapid_kov.html>[cit.2008-10-1]
[11] URL:<http://robo.hyperlink.cz/rapid/main08.html>[cit.2007-18-10]
[10] URL:<http://www.mcae.cz/>[cit.2007-17-10]
[11] URL:<http://robo.hyperlink.cz/rapid/main08.html>[cit.2007-1-11]
[12] URL:<http://www.arptech.com.au/specs.html>[cit.2007-10-11]
[13] URL:<http://www.ele.uri.edu/Courses/ele282/F07/Justin_2.pdf>[cit.2008-24-1]
[14] URL:<http://www.monolite.org/stereolitography.htm>[cit.2008-2-2]
[15] URL:<http://www.formkon.com/Prototyping/Stereolitography.html>[cit.2008-17-2]
[16] URL:<http://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-rapid-prototypingu>[cit.2007-4-12]
[17] URL:<http://robo.hyperlink.cz/rapid/main06.html>[cit.2007-18-10]
[18] URL:<http://robo.hyperlink.cz/rapid/main07.html>[cit.2007-18-10]
[19] URL:<http://robo.hyperlink.cz/rapid/main12.html>[cit.2007-18-10]
[20] URL:<http://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-rapid-prototyping>[cit.2008-1-2]
[21] URL:<http://www.3dtech.cz/default.asp?language=cs&section=12>[cit.2007-27-11]
[22] URL:<http://stratasys.com/uploadedFiles/North_America/Media/PG_Sand%20Casting.pdf>[cit.2008-2-2]
[23] URL:<http://www.awbell.com.au/rapid_prototyping_techniques.htm>[cit.2008-9-2]
[24] URL:<http://www.biomechanika.cz/index.php?pg=laborator-rapid-prototyping>[cit.2008-5-2]
[25] URL:<http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/res_silikonove_formy/index.htm>[cit.2008-2-2]
[26] URL:<http://www.elchemco.cz/main.htm>[cit.2008-25-2]
[27] URL:<http://sweb.cz/HPLC/Suma/Validace.htm#_3.6.3.1_Grubbsův_test>[cit.2008-10-4]
[28] Strojnické tabulky, Vydala Scientia, spol. s r.o., pedagogické nakladatelství, Radimova 37/50, 16900 Praha 6, v roce 1999, jako třetí doplněné vydání

Seznam tabulek

(tab.:2-1) Porovnání technologií výroby odlitků z hlediska přesnosti 12
(tab.:2-2) Dosažitelnost tolerancí v závislosti na rozměru odlitku. 13
(tab.: 2-3) Rozměrové změny v průběhu výroby 14
(tab.:2-4) Rozměrové změny v průběhu výroby 14
(tab.: 2-5) Faktory ovlivňující konečnou přesnost odlitku 15
(tab.:2-6) Mechanické hodnoty ABS materiálu 21
(tab.:3-1) Hodnoty naměřené po 3 hodinách (silikonová forma) 53
(tab.:3-2) Hodnoty naměřené po 24 hodinách (silikonová forma) 53
(tab.:3-3) Test hrubých chyb 54
(tab.:3-4) Rozměry modelů z matečné formy 57
(tab.:3-5) Soubor bez hrubých chyb 58
(tab.:3-6) Rozměry matečné formy a odlitku 59
(tab.:3-7) Rozměry ABS modelu 59
(tab.:3-8) Smrštění voskových modelů (modely ze silikonové formy) 61
(tab.:3-9) Tolerance voskových modelů (ze silikonové formy) 61
(tab.:3-10) Smrštění voskových modelů (modely z kovové formy) 65
(tab.:3-11) Tolerance voskových modelů (z kovové formy) 66
(tab.:3-12) Porovnání tolerancí voskových modelů 68
(tab.:3-13) Porovnání tolerancí voskových modelů a odlitku 69
(tab.:3-14) Index způsobilosti silikonová forma 70
(tab.:3-15) Index způsobilosti kovová forma 72
(tab.:3-16) Stupeň přesnosti IT voskových modelů 73

Seznam obrázků

(obr.: 2-1) Matečná forma vyrobená obráběním 10
(obr.:2-2) Jednotlivé části stromečku 11
(obr.: 2-3) Popis přípravy a výroby RP modelu 16
(obr.: 2-4) Schéma řezů modelem 17
(obr.: 2-5) RP model motoru 18
(obr.:2-6) Princip metody FDM 19
(obr.:2-7) Postup výroby ABS modelu 20
(obr.:2-8) ABS materiál 20
(obr.: 2-9) FDM stroje 22
(obr.:2-10) Schéma SLA stroje 23
(obr.:2-11) SLA stroj 24
(obr.:2-12) SLA model 24
(obr.:2-13) SLA model 24
(obr.:2-14) Schéma SLS stroje 25
(obr.:2-15) SLS součást z PA 26
(obr.:2-16) SLS součást z gumy 26
(obr.:2-17) SLS součásti z oceli 27
(obr.:2-18) Schéma LOM stroje 27
(obr.:2-19) Schéma využití RP modelu, obalení, vypálení, odlití 30
(obr.:2-20) Schéma vytvoření silikonové formy z RP modelu, odlití vosku 30
(obr.:2-21) Schéma výroby formy pomocí RP modelu 32
(obr.:2-22) Modelová deska z Al slitiny 33

(obr.:2-23) Modelová deska z ABS materiálu 33
(obr.:2-24) CT snímek krčního obratle 35
(obr.:2-25) 3D model krčního obratle 35
(obr.:2-26) ABS model krčního obratle 35
(obr.:2-27) Model komponenty kolenního kloubu 36
(obr.:2-28) Model komponenty kolenního kloubu 36
(obr.:2-29) ABS model komponenty kolenního kloubu 37
(obr.:2-30) Keramický model komponenty kolenního kloubu 37
(obr.:2-31) Silikonová forma a model 37
(obr.:3-1) 3D model součásti 39
(obr.:3-2) ABS model součásti 40
(obr.:3-3) Tiskárna Dimension BST 40
(obr.:3-4) Zatmelený ABS model 40
(obr.:3-5) Hotový skleněný rámeček 41
(obr.:3-6) Model zaformovaný do plastelíny 42
(obr.:3-7) Vakuování silikonu 43
(obr.:3-8) Odlévání silikonové formy 44
(obr.:3-9) Vyplouvání vzduchových bublin 44
(obr.:3-10) Odlitá celá silikonová forma 45
(obr.:3-11) Nedoteklý model 46
(obr.:3-13) Stopy po výfukových otvorech 46
(obr.:3-12) Vrtačka 46
(obr.:3-14) Předehřívací pec 48
(obr.:3-15) Sesponkovaná forma 49
(obr.:3-16) Odlévání vosku do formy 50
(obr.:3-17) Ochlazování v lednici 50
(obr.:3-18) Měřené rozměry 52
(obr.:3-19) Vosk 55
(obr.:3-20) Voskový model vyrobený v matečné formě 56
(obr.:3-21) Plnička 56

Seznam grafů

(graf: 3-1) Porovnání rozměrů ABS modelu a voskových modelů 60
(graf:3-2) Porovnání tolerancí 62
(graf:3-3) Změna rozměrů během výroby 63
(graf:3-4) Porovnání rozměrů matečné formy a voskových modelů 65
(graf:3-5) Porovnání tolerancí voskových modelů 66
(graf.:3-6) Porovnání smrštění modelů 67
(graf.:3-7) Porovnání tolerancí voskových modelů a odlitku 68
(graf.:3-8) Gausovy křivky – silikonová forma 71
(graf.:3-9) Gausovy křivky – kovová forma 73

Seznam příloh

Přiložené CD – Diplomová práce v PDF, Word