

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

NOVÉ SMĚRY V KONSTRUKCI A VÝROBĚ FOREM PRO VOSKOVÉ ODLITKY

NEW WAYS IN MANUFACTURING AND CONSTRUCTION OF MOULD FOR WAX CASTING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

PAVEL DOSTÁL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JAN ZOUHAR

BRNO 2008

ABSTRAKT

Cílem této práce je porovnání technologií silikonových a hliníkových forem pro výrobu odlitků zhotovených technologií přesného lití na vytavitelný model a kusové výroby. Vlastní práce se zabývá fyzickou výrobou silikonové formy ve vakuové lici komoře, obráběním hliníkové formy na CNC stroji a následným odlitím voskových modelů do těchto forem. Dále se zabývá fyzickou výrobou jednoho kusu dílu obráběním. Obsahuje zpracování rešeršní části o metodě vytavitelného lití, výrobě hliníkových a silikonových forem a v neposlední řadě z oblasti technologie Rapid Prototyping pro výrobu matečného modelu.

Klíčová slova

Voskový model, hliníková forma, silikonová forma, vakuový lici systém, Rapid Prototyping.

ABSTRACT

The aim of this work is to compare technology of silicon and aluminium moulds used to make castings using technology of cire perdue with single – piece work. The work itself deals with physical production of silicon mould in vacuum casting system, shaping aluminium mould using CNC machine and subsequent casting of wax models into these moulds. It also handles with physical production of one piece by shaping. It contains background research of the method lost wax casting manufacturing aluminium and silicon moulds and last but not least of Rapid Prototyping technology for producing master model.

Key words

Wax Pattern, Aluminium Mould, Silicon Mould, Vacuum Casting System, Rapid Prototyping.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DOSTÁL, Pavel. *Nové směry v konstrukci a výrobě forem pro voskové odlitky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 80 s., 9 příloh. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Zouhar.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Nové směry v konstrukci a výrobě forem pro voskové odlitky vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum:

.....
Pavel Dostál

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Janu Zouharovi za odborné vedení, cenné připomínky a rady při vypracování této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Ondřeji Charvátovi za odborné rady při výrobě silikonové formy. A v neposlední řadě bych rád poděkoval firmě Delcam Brno s.r.o. za týdenní odborné školení PowerMILLu a zdarma poskytnutou licenci.

OBSAH

ABSTRAKT	3
PROHLÁŠENÍ	4
PODĚKOVÁNÍ	5
OBSAH	6
ÚVOD	8
1 TECHNOLOGIE PŘESNÉHO LITÍ NA VYTAVITELNÝ MODEL	9
1.1 Úvod	9
1.2 Podstata a pojetí přesného lití	9
1.3 Formy na výrobu voskových modelů a jejich materiály	10
1.4 Výroba voskových modelů a jejich materiály	11
1.5 Sestavování voskových modelů	15
1.6 Výroba keramických forem a jejich materiály	16
1.6.1 Materiály keramických forem	16
1.6.2 Výroba skořepin	17
1.6.3 Vytavování voskové hmoty ze skořepin	19
1.6.4 Vypalování keramických skořepin	20
1.6.5 Tavení a odlévání	21
1.6.6 Dokončovací operace	21
1.6.7 Využití odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu	21
2 VAKUOVÉ ODLÉVÁNÍ DO SILIKONOVÝCH FOREM	22
2.1 Postup tvorby voskového modelu	22
2.2 Tvorba silikonové formy	22
2.3 Používané materiály pro silikonové formy	23
2.4 Separátory	24
2.5 Vakuový licí systém	25
3 RAPID PROTOTYPING	26
3.1 Úvod	26
3.2 Základní metody RP	27
3.2.1 Stereolitografie (SL)	28
3.2.2 Selective Laser Sintering (SLS)	29
3.2.3 Laminovací technologie	30
3.2.4 Solid Ground Cudiny (SGC)	32
3.2.5 Fused Deposition Modelling (FDM)	33
3.2.6 Model Maker 3D Plotting (3DP)	33
3.2.7 Balistic Particle Manufacturing (BPM)	34
3.2.8 Multi JET Modelling (MJM)	34
3.3 Přehled metod RP ve stádiu vývoje	35
3.3.1 Laser Engineered Net Shaping – LENS	35
3.3.2 Koncepce kontrolované automatické výroby – DesCAF	35
3.3.3 Quadra System	35
3.3.4 Electrosetting Material	36
3.3.5 CNC deposition Metod	36
3.4 Úprava vytisknutého modelu	36
3.5 Materiály používané pro RP	37
4 PŘESNÉ LITÍ DO FOREM VYROBENÝCH OBRÁBĚNÍM	41
4.1 Výroba voskových modelů	41

Voskové modely se vyrábějí dvěma způsoby:	41
5 VÝROBA OBĚŽNÉHO KOLA.....	44
5.1 Obrábění lopatek v PowerMILLu	44
5.1.1 Hrubování lopatky	44
5.1.2 Dokončení lopatky	46
5.1.3 Dokončení středu	46
5.2 Kusová výroba	47
5.3 Tvorba voskového modelu v silikonové formě	54
5.3.1 Tisk a úprava master modelu	54
5.3.2 Výroba silikonové formy	57
5.3.3 Výroba voskového modelu	62
5.4 Tvorba voskového modelu v hliníkové formě	63
5.4.1 Návrh hliníkové formy	63
5.4.2 Výroba hliníkové formy	63
TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	72
5.5 Kusová výroba	72
5.6 Technologie přesného lití na vytavitelný model s výrobou silikonové formy a následné odlití oběžného kola	73
5.7 Technologie přesného lití na vytavitelný model s výrobou hliníkové formy a následné odlití oběžného kola	73
ZÁVĚR	76
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	77
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	79
SEZNAM PŘÍLOH.....	80

ÚVOD

Žijeme v moderní uspěchané době. Jsou vyvíjeny a zdokonalovány stále lepší a lepší počítačem řízená obráběcí centra využívající nejmodernějších technologií řízení a výborných obráběcích nástrojů z nejnovějších materiálů. Ale i přes tyto výhody je stále velmi obtížné vyrobit tvarově složitý model nebo případně formu. Čím je výrobek složitější, roste čas potřebný na jeho výrobu, tím pádem stoupají výrobní náklady a daný výrobek se prodražuje. Řešení těchto problémů nabízejí nejmodernější technologie lití do silikonových forem. Při této metodě se využívá progresivní technologie Rapid Prototyping, která umožňuje relativně snadnou a hlavně rychlou výrobu reálného modelu z digitálně vytvořených vstupních dat z moderních CAD/CAM systémů. Tento model se v krátkém časovém sledu upraví (vytmelí a vybrousí) a je připraven pro výrobu silikonové formy.

Technologie Rapid Prototyping mají svoje počátky již v osmdesátých letech minulého století, kdy vznikla první metoda RP, která se jmenuje Stereolitografie. Tato metoda zavedla základní princip, který se používá u všech metod RP. Jde o nanášení jednotlivých vrstev materiálu na sebe, kdy každá vrstva materiálu odpovídá jednomu řezu digitálního modelu. Tento proces se provádí různými zařízeními, které využívají vlastní technologie a proto vzniklo několik desítek metod RP.

Vakuové odlévání voskových modelů do silikonových forem je nová moderní metoda, která umožňuje rychlé odlévání modelů bez úkosů, na rozdíl od metody lití do hliníkových forem. Tato progresivní metoda je rychlá a dostatečně přesná a i z těchto důvodů se během poměrně krátké doby používání pevně uchytila na současném trhu. Výroba a porovnání těchto forem mezi sebou a s kusovou výrobou je cílem této diplomové práce.

1 TECHNOLOGIE PŘESNÉHO LITÍ NA VYTAVITELNÝ MODEL

1.1 Úvod

Metoda vytavitelného modelu neboli také “lost wax“ nebo “investment casting“ dnes zastává klíčovou pozici na poli moderních technologií lití kovů. Lze ji začlenit mezi technologie near – net – shape (produkty blízké hotovým výrobkům), kdy se přeměna materiálu realizuje na tvary a rozměry blízké hotovým výrobkům. Termín near – net – shape nelze chápat pouze jako prostředek k zajišťování přímé, účinné a ekonomické cesty k výrobě hotové součásti, ale rovněž jako úsporu drahých materiálů a energií. (1, 3)

Při výrobě součástí se stále prosazují vyšší požadavky na jakost, kvalitu povrchu, rozměrovou přesnost, vnitřní čistotu, vyšší funkční parametry a to vše při silném tlaku na výrobní náklady. U některých strojírenských součástí se musí stále uplatňovat progresivní výrobní způsoby strojírenské metalurgie, které jsou schopny uvedené požadavky splňovat. Mezi progresivní způsoby lze zařadit také přesné lití vytavitelným modelem, jenž při efektivním uplatnění umožňuje podstatné úspory materiálu a snižuje použití dokončovacích výrobních operací. (3)

Výrobní proces je rozdělen do několika fází a to:

- 1) Výroba forem na modely
- 2) Výroba voskových modelů
- 3) Sestavování modelů do stromečků
- 4) Výroba skořepin – namáčení voskových modelů do keramické břechky
- 5) Výroba skořepin – posypávání voskových modelů žáruvzdorným materiálem
- 6) Vytavování voskových modelů
- 7) Vypalování skořepin
- 8) Tavení a odlévání
- 9) Odstraňování keramiky
- 10) Oddělování odlitků od vtokové soustavy – řezání
- 11) Oddělování vtoků z odlitků – broušení, leštění
- 12) Kontrola

1.2 Podstata a pojetí přesného lití

Přesné lití lze charakterizovat jako technologii, která umožňuje vyrábět tvarově složité součásti, u nichž se část funkčních ploch vyrábí již při lití s takovou rozměrovou tolerancí a s takovou drsností povrchu, že dokončování obráběním není nutné. U ostatních ploch, které je potřeba obrábět, jsou přídatky na obrábění relativně malé a spotřeba času na jejich odstranění a s tím spojené náklady, jsou zřetelně nižší, než u jiných způsobů lití. Přesné lití metodou vytavitelného modelu je tedy metoda, jenž umožňuje vyrábět odlitky tvarově velmi složité, s malými rozměrovými tolerancemi a s velmi dobrou jakostí povrchu. Používá se zejména tam, kde se

zřetelem na složitý tvar a obtížně obrobitelný materiál je výroba součástí jinou technologií mimořádně nákladná, nebo dokonce zcela nemožná. (2, 3)

1.3 Formy na výrobu voskových modelů a jejich materiály

Formy lze rozdělit

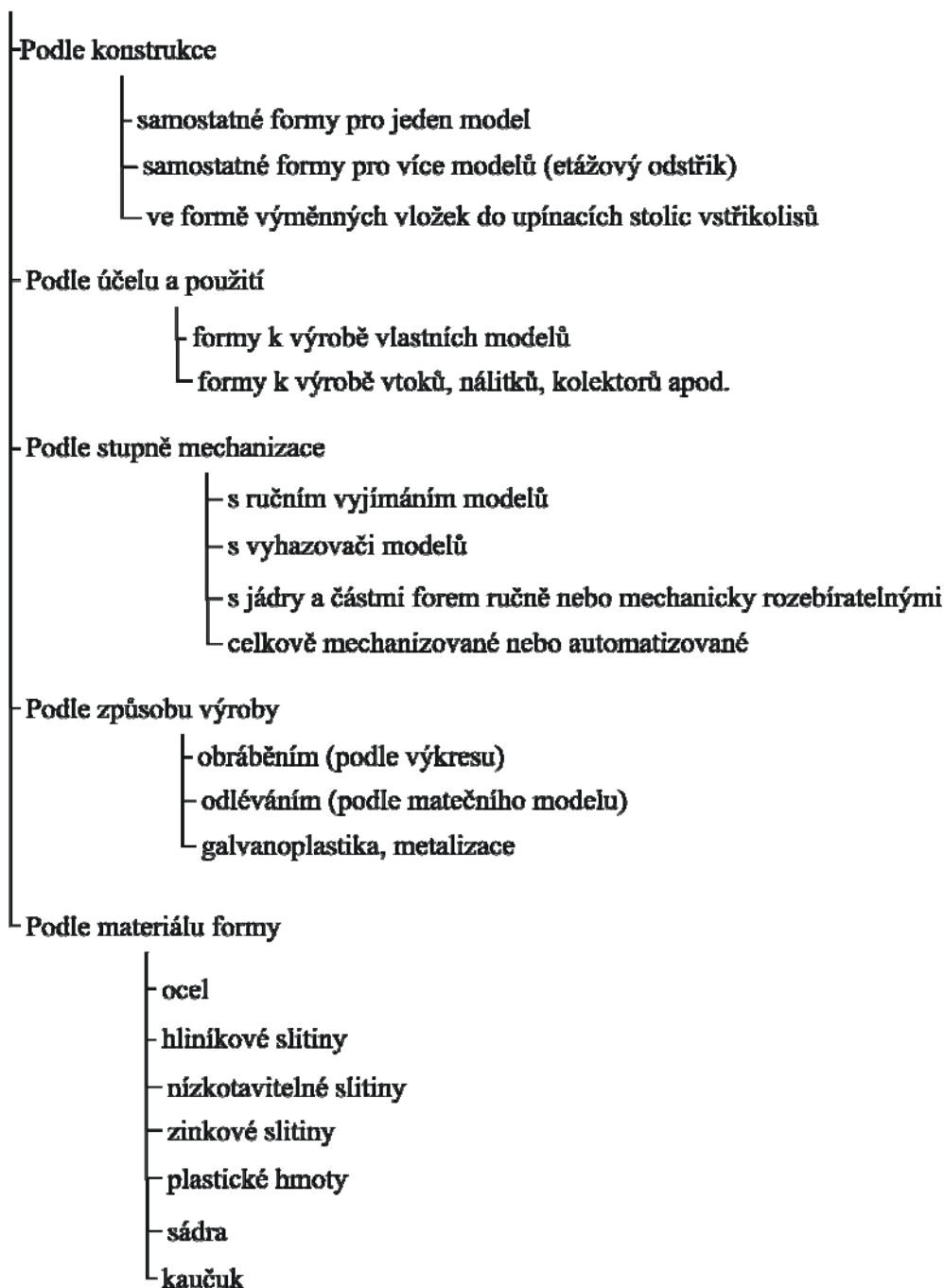


Diagram 1.1 Rozdělení forem

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 dodržnými rozměry. Ke zhotovení takového modelu je potřeba velmi detailně vyrobená forma. Tvar dutiny je shodný s budoucím tvarem součástky. Modelové zařízení je kritickým faktorem mezi výrobcem a jeho zákazníkem. Použití modelového zařízení má významný vliv na cenu a kvalitu odlitku. (3)

Požadavky na volbu modelového zařízení by měly obsahovat následující informace:

- odhadovaný celkový počet kusů
- počet kusů v dávce
- koncové použití odlitku
- požadavky na kvalitu odlitku.

Formy na vytavitelný model musí splňovat následující požadavky:

- umožnit výrobu kvalitních zdravých modelů s bezchybným povrchem, bez staženin, vzduchových bublin, propadlin a ostatních povrchových vad a požadovanou přesností rozměrů
- doba nutná k setrvání odstříknutých modelů ve formě má být co nejkratší.

1.4 Výroba voskových modelů a jejich materiály

Voskové modely se zhotovují z voskových směsí, protože samostatný vosk nesplňuje všechny požadavky kladené na modelovou hmotu. Moderní voskové směsi jsou sloučeniny více komponentů, jako je syntetický vosk, přírodní vosk – uhlovodík, přírodní vosk – ester, přírodní a syntetická pryskyřice, montánní vosk, organické plnivo a voda. Existuje více variant takových sloučenin, které splňují požadavky; vlastnosti kladené na voskové směsi, jako je bod tavení, tvrdost, viskozita, roztahování/smršťování. (1, 2, 3)

K výrobě voskových modelů existuje několik druhů voskových směsí lišící se použitelností a vlastnostmi.

1) Vosky na modely

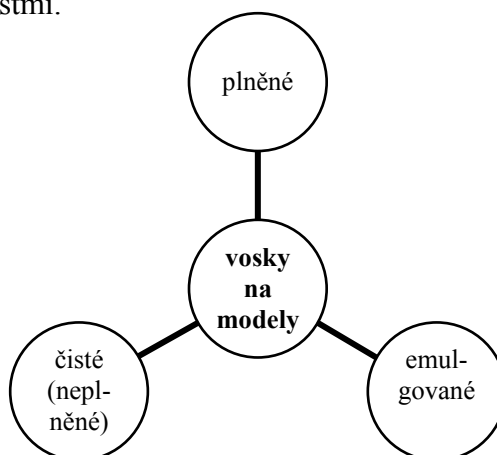


Diagram 1.2 Rozdělení vosků na modely

Neplněné modelové vosky

Jsou komplexní sloučeniny více vosků a pryskyřičných komponentů. Povrch modelů z těchto vosků je obvykle více lesklý. (1, 2, 3)

Emulgované modelové vosky

Mají základní materiály podobné jako výše uvedené vosky neplněné, ale jsou emulgovány vodou, obvykle mezi 7 až 12 %. Povrch modelů je mimořádně hladký. (1, 2, 3)

Plněné modelové vosky

Mají základní materiál podobný jako výše uvedené vosky, avšak do směsi je přidáváno míchané práškové plnivo, nerozpustné v základním vosku. Plnivo zvyšuje stabilitu směsi a snižuje její kavitaci. Povrch modelů je oproti emulgovaným voskům nepatrně hrubší. (1, 2, 3)

2) Vosky na vtoky, vtokové soustavy

Mají základní materiály podobné jako neplněné vosky, jsou smíšené pro zajištění požadavku na pevnost vtokové soustavy. (1, 2, 3)

3) Rekultivované vosky

Jedná se v podstatě o servis poskytovaný výrobcem vosků. Použité vosky ze slévárny jsou důkladně čištěny, míchány a uvedeny do původního stavu, poté jsou zpět vráceny do slévárny a znovu používány na vtokové soustavy a modely. (1, 2, 3)

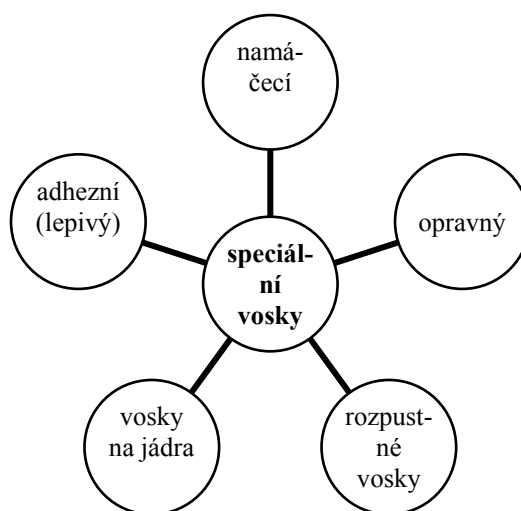
4) Speciální vosky

Diagram 1.3 Rozdělení speciálních vosků

Adhesní vosky

Jsou lepidivé vosky pro spojování modelů z podobných nebo nepodobných vosků. Primárně se používají pro spojování modelů a vtokových soustav. (1, 2, 3)

Namáčecí vosky

Jsou velmi tekuté, proto mají schopnost téci do hůře dostupných míst, kde zaplňují otevřené spoje. (1, 2, 3)

Opravné vosky

Opravné vosky tvrdé nebo měkké se používají pro opravu modelů a pro utěšňování vtokové soustavy. (1, 2, 3)

Vosky na jádra

Vosky na jádra se používají k utěšňování keramických jader vkládaných do modelu, zlepšují povrch a snižují možnost praskání. (1, 2, 3)

Vodou rozpustné vosky

Vodou rozpustné vosky se používají pro vytvoření vnitřních tvarů tam, kde by bylo obtížné aplikovat jiné prostředky. Používají se jádra vkládaná do dutiny formy před vstříknutím standardního vosku, následně (později) dojde k jeho rozpuštění, čímž dochází k dostatečnému zaplnění dutin. (1, 2, 3)

Hmota na výrobu voskových modelů by měla mít následující charakteristiky:

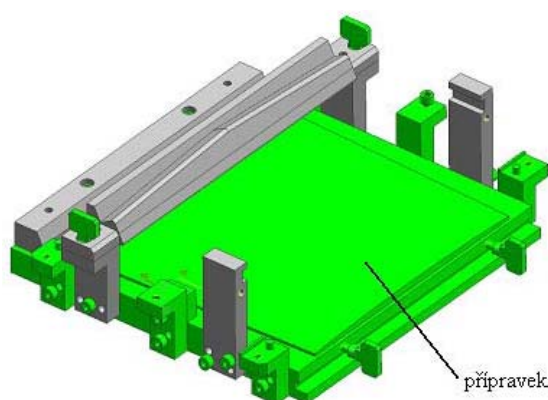
- dostatečnou pevnost, tvrdost a dostatečnou stabilitu,
- dostatečnou pružnost pro manipulaci,
- malé smrštění během tuhnutí a tím i malou roztažnost za vyšších teplot,
- nízké procento popelu,
- vhodnou viskozitu,
- musí odolávat oxidaci,
- nesmí se lepit na stěny kovové formy,
- nesmí reagovat s obalovými hmotami,
- musí přesně reprodukovat tvar formy,
- musí ztuhnout ve formě během krátké doby po vstříknutí,
- regenerace vosku – je důležitá z ekonomického a ekologického hlediska.



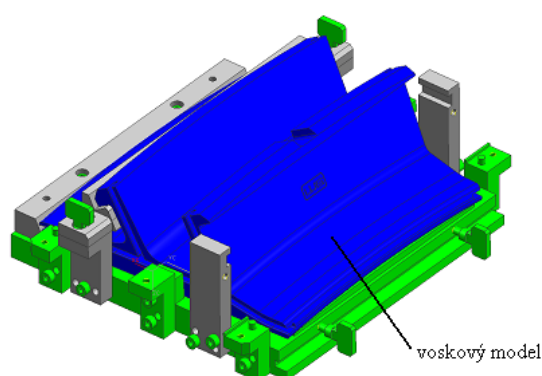
Obr. 1.1 Voskové směsi (3)

Většina používaných modelových hmot v současnosti výborně reprodukuje dutinu formy a zajišťuje kvalitní povrch modelu. Rozměry modelů se s dostatečnou přesností dají zajistit. Nejobtížnější je dodržení přesného geometrického tvaru, protože modelová hmota při tuhnutí mění rozměr. To se projevuje velmi nepříznivě u hmotných modelů a u modelů s rozdílnými tloušťkami stěn. Částečně se tvorbě deformací brání zvyšováním tlaku při vstřikování vosku do formy, nebo jak už bylo zmíněno, vkládáním voskových jader do formy před vstříknutím. (2)

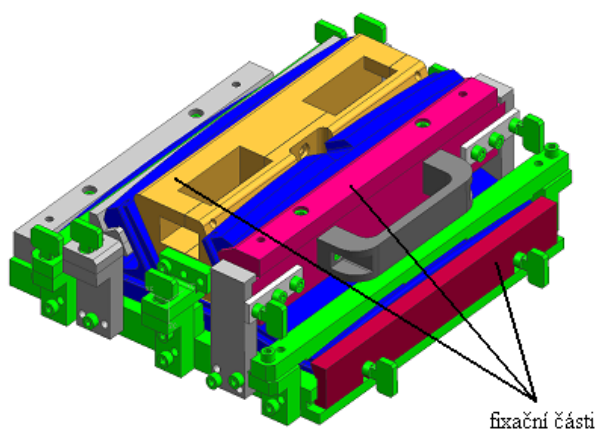
Trendem v této oblasti je tzv. chladicí přípravek (wax setter) viz obr. 1.2, 1.3, 1.4. Jedná se v podstatě o fixační přípravek, do kterého se vkládá voskový model ihned po vyjmutí z formy. Přípravek je konstruován tak, aby zabránil deformacím v kritických místech, popřípadě aby zajistil požadovanou předdeformaci na požadovaných místech modelu. Výroba přípravku je poměrně nákladná a náročná na přesné lícování dosedacích ploch. Materiálem je obvykle slitina hliníku. Model se do přípravku vkládá ihned po vyjmutí ze vstřikovacího lisu většinou na dobu 24 hodin. (1, 2, 3)



Obr. 1.2 Chladicí přípravek (3)



Obr. 1.3 Chladicí přípravek s voskovým modelem (3)



Obr. 1.4 Chladicí přípravek s voskovým modelem a fixačními částmi (3)

1.5 Sestavování voskových modelů

Modely se vyrábějí ve formách většinou jednotlivě a musí se připojit na vtokovou, popřípadě na nálitkovou soustavu. Podle počtu modelů v jedné lící soustavě se rozlišují:

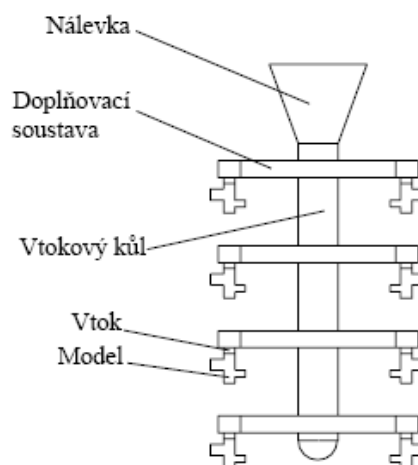
- sestavy jednotlivých modelů,
- sestavy více modelů do tzv. stromečků.

Sestavování jednotlivých modelů

Používá se v případě rozměrnějších odlitků. Jsou to převážně odlitky u nichž velké nároky na kvalitu nebo rozměrovou přesnost vylučují použití jiné technologie. Vtoková soustava s různými druhy nálitků se vyrábí ve zvláštních formách a na model se připojí pájením nebo lepením. (1, 2, 3)

Sestavování modelů do stromečku

Stromeček se skládá z většího počtu modelů, spojených jednotlivými vtoky s vtokovou soustavou. Jednotlivé části stromečku jsou na obr. 1.5. Modely se na vtokovou soustavu připojují buď lepením nebo pájením. Při pájení se modely připojí na vtokovou soustavu tak, že se mezi vtok modelu a vtokový systém vloží pájedlo, model se přitlačí na pájedlo, které je přiloženo na místo vtokového systému, kde bude model připojen. Po natavení dosedacích ploch se pájedlo vytáhne a model se přitiskne k vtokovému systému. Při lepení se užívá pistole, které ke spojení modelu a vtokového systému používá roztavené lepidlo, které je nanášeno na stykové plochy. Tvar stromečku by měl být navržen tak, aby byl k připojení modelů umožněn dobrý přístup, přičemž se nesmí při lepení či pájení poškodit modely, které jsou na stromečku již přilepeny. Z hlediska následující operace obalování by měli být modely na stromečku přilepeny dutinami dolů. Obalová hmota musí stékat, aby nedocházelo ke zvětšování tloušťky obalu v dutinách, která ovlivňuje nepříznivě posunutí tepelné osy následkem nahromadění žhavé keramiky. (2, 3)



Obr. 1.5 Jednotlivé části stromečku (3)

Vzdálenost mezi modely na stromečku nesmí být příliš malá, aby i po nanesení posledního obalu byla mezi jednotlivými modely mezera. Vzdálenost etáží musí být taková, aby bylo zajištěno dokonalé posypání obalů a sušení. Pro obalování a manipulaci se stromečkem (modelem) se používá rukojeti, která se zašroubuje do matice, zalité do nálitku nebo vtoku, pokud je v ose sestavy. Sestavení modelů a vtoková soustava musí dovolit bezproblémové vytékání vosku při vytavování modelů ze skořepiny. Není-li možné vhodnou polohou modelu na stromečku dosáhnout dokonalého odstranění vosku, je potřeba k modelu připojit pomocný výfuk, který umožní odstranění vosku z formy. V případě, že ani pomocný výfuk nestačí k dokonalému odstranění vosku je potřeba vytvořit na vtokové soustavě nebo modelu pomocné výtokové otvory. Aby bylo možno pomocné výtokové otvory vytvořit bez poškození odlitku, musí mít model výstupku vhodný tvar. Po vytavení vosku se pomocné výtokové otvory důkladně zatmelí. (2, 3)

1.6 Výroba keramických forem a jejich materiály

Keramická skořepina je ve výrobě odlitků metodou vytavitelného modelu rozhodujícím faktorem. Je to právě keramická skořepina, která dává této metodě možnost vyrábět širokou škálu odlitků a používat k výrobě velký výběr slitin. Voskové směsi mají vysoký koeficient tepelné roztažnosti, zatímco keramika má nízký koeficient tepelné roztažnosti; hodnota koeficientu tepelné roztažnosti slitiny je uprostřed mezi voskem a keramikou. Tyto rozdíly vytváří ve výrobě odlitků nerovnováhu, kterou je potřeba kontrolovat. Jedním z důsledků rozdílné tepelné roztažnosti vosku v porovnání s keramikou je to, že kdykoliv po výrobě skořepiny při zvýšení okolní teploty, může uzavřený voskový model způsobit praskání okolní křehké keramiky. Většina obaloven proto teplotu neustále monitoruje aby se zabránilo případným problémům. Při tuhnutí a chladnutí kovu ve formě může docházet vlivem smršťování kovu ke změnám geometrie odlitku, protože forma (skořepina) se smršťuje v mnohem menším poměru. Tento rozdíl může být příčinou vzniku vad v odlitku jako jsou trhliny vzniklé smršťováním. Kontrola pevnosti formy je důležitým faktorem ve výrobě odlitků metodou vytavitelného modelu. Forma musí být pevná, odolná proti případnému poškození (rozbití) při manipulaci a stejně tak musí být rezistentní proti rozpínání vosku při jeho vytavování, což je v rozporu s použitím měkkých forem, které se lépe vyvarují prasklinám nebo trhlinám na odlitku a jsou po odlití snadněji odstranitelné. Další charakteristika procesu se týká rozměrové změny – kontrakce. Kov se smršťuje při jeho chladnutí, forma z keramické skořepiny se smršťuje při vypalování, a voskový model se také smršťuje po vstříknutí. Výsledný rozměr odlitku proto není shodný s rozměrem voskového modelu. To znamená, že větší odlitky budou mít větší zmenšení, a tím pádem bude obtížnější dodržet jejich tolerance. (1, 2, 3)

1.6.1 Materiály keramických forem

Formovací hmoty pro výrobu skořepin se obecně skládají z plniva a pojiva.

Plniva

Základní vlastnosti keramických skořepin jsou dány v první řadě charakterem žáruvzdorného materiálu obalové hmoty, méně již kapalným pojivem. Pro výběr vhodného žáruvzdorného materiálu jsou směrodatné následující vlastnosti:

- tepelná roztažnost,
- teplota tavení,
- chemická netečnost vůči odlévaným kovům.

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%). Materiály používané jako plniva do břčky nebo jako posypové materiály mohou i nemusí být stejné. Keramické materiály jsou používány v široké škále kombinací. Zirkon se vyskytuje v podobě jemnozrnného písku, a v některých případech se používá jako jemný primární posyp stejně tak jako posypový materiál. (2, 3)

Pojiva

Pojiva (vazná kapalina) spolu se žáruvzdorným materiálem tvoří vlastní obalovou hmotu pro výrobu keramických skořepinových forem. Pojivo má mít následující vlastnosti:

- nesmí snižovat žáruvzdornost formy,
- musí být netečné při vypalování formy k žáruvzdornému materiálu i k roztavenému kovu,
- musí předat formě po ztuhnutí dostatečnou pevnost jak po vysušení, tak po vypálení.

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. Křemičitanová pojiva jsou buď na lihové nebo vodné bázi. Systém založený na vodní bázi používá k sušení vzduch a nejvíce se používá pro primární obaly. Vodní báze má oproti alkoholové bázi delší dobu sušení. Rychlost vypařování má vliv na kvalitu primárního obalu a nakonec tedy i na povrch odlitku. Pojiva na alkoholové bázi nemají výhodu pouze v rychlejší sušení ale také ve vytvrzování, které je zajištěno působením plynného prostředí – amoniakem. Tyto pojiva se používají hlavně pro sekundární obaly, zejména tam, kde se obalování aplikuje pomocí robota. Při použití břčky na alkoholové bázi a vytvrzování amoniakem se další obaly mohou nanášet během několika minut. Základem koloidních roztoků oxidu křemičitého je nejčastěji kombinace polymerních etylsylikátů s obsahem křemíku kolem 40%. Alkoholický roztok dává s vodou a vhodným hydrolyzačním katalyzátorem velmi stabilní kapalné pojivo pro žáruvzdorné materiály. Podstatou spojení jednotlivých zrn plniva do pevné obalové vrstvy (keramické skořepiny) je gelace pojiva. Gelovaná vrstva, sušením dehydratovaná, je tvořena amorfním SiO_2 a ten po vypálení formy přejde do krystalické formy. (1, 3)

1.6.2 Výroba skořepin

Charakteristickým znakem metody vytavitelného modelu je nedělená forma. Model použitý pro zhotovení formy se vždy zničí vytavením a je tedy pro každou

formu nutno použít nový model. Keramická jádra se vkládají do voskových modelů, nejčastěji zastříknutím při výrobě.

Obalování

Jak již bylo uvedeno, keramická skořepina se zhotoví okolo celého voskového modelu stromečku. Obalování spočívá v opakovaném namáčení modelových stromečků do obalové hmoty, posypávání žáruvzdorným materiálem o vhodné zrnitosti a sušením jednotlivých obalů. Tento cyklus se opakuje tolikrát, dokud nemá obal požadovanou tloušťku. Počet vrstev bývá obvykle mezi pěti až patnácti dle požadované pevnosti formy. Velké těžké odlitky budou pravděpodobně potřebovat více vrstev než odlitky menší. Před obalováním je nutné odstranit z povrchu voskového stromečku zbytky dělicího prostředku, jinak první obal k povrchu voskových modelů dokonale nepřilne; vyschlý obal pak vlivem pnutí popraská, odlupuje se a je příčinou defektů. Při namáčení se čisté voskové stromečky pozvolna ponořují do obalové hmoty při současném otáčení a naklánění tak, aby obalová hmota rovnoměrně pokryla stromeček a aby se neutvořily v koutech, rozích nebo drážkách vzduchové polštáře, nebo aby tam neulpěly vzduchové bublinky. Potom se stromeček (sestava) z obalové hmoty vyjme a manipuluje se s ním tak, aby se obalová hmota rovnoměrně rozdělila a přebytečná odkapala. Následuje posypávání žáruvzdorným materiálem, které se dříve provádělo mechanicky proudem volně padajících částic. Dnes se posypává fluidně, ponořením do vzduchem načeřeného posypového materiálu. Na první dva lící obaly, které rozhodují o kvalitě povrchu odlitku se používá jemný zásypový materiál se zrnitostí většinou 0,1 až 0,25 mm, na další obaly pak 0,25 až 0,5 mm. Po namočení a posypání dochází k tunutí obalu. Obaly tuhnou buď jen odpařením disperzního prostředí z kapalného pojiva, které vyvolá stavovou změnu soli v gel, nebo k této změně dojde působením chemického činidla (urychlení) a odpaření disperzního prostředí následuje později. První metoda je realizována sušením, druhá je základem tzv. rychloprocesů. Při sušení musí každý obal schnout v klimatizovaném prostoru při teplotě 20 až 24°C a při vlhkosti 50 až 70%. Při sušení musí být zajištěno dostatečné proudění vzduchu. Podstatného zkrácení doby sušení se dosáhne sušením v proudu vzduchu s rychlostí proudění alespoň 180 m/min. V mírně ohřátém vzduchu (25 až 27°C), proudícím rychlostí 250 m/min, lze zkrátit dobu sušení mezi jednotlivými obaly na 50 až 55s. Moderní metody pracují s tzv. chemickým tvrzením obalů (rychloprocesy). Jedná se o různé způsoby urychlování gelace. Značného zkrácení gelace je dosahováno použitím alkalicky reagujících látek (nejčastěji čpavku). Posypané obaly se pak suší krátkou dobu na vzduchu (volně), poté se vystaví krátkou dobu působení plynného čpavku. Následuje odstranění čpavkových par z obalu působením proudu vzduchu, nové namočení, odkapávání, posypání atd. až má skořepina potřebnou tloušťku. Pak se suší dle rozměrů skořepiny 3 až 8 hodin. Nevýhodou vytvrzování obalů čpavkem je toxicita par čpavku. (1, 2, 3)

Keramická jádra

Výroba keramických forem na odlitky s otvory a drážkami metodou vytavitelného modelu je omezena průměrem a délkou otvorů, šířkou a hloubkou drážek. Výroba odlitků s úzkými dlouhými otvory a úzkými hlubokými drážkami je obtížná, příčinou je nedokonalé vyplnění úzkých otvorů a drážek formovací hmotou při obalování modelu. Obalová hmota nahromaděná v otvorech a drážkách nemůže ve stanovené době sušení dobře uschnout, to má pak za následek rozpadání formy při

vypalování vosku. Tyto deficity odstraňují vkládaná keramická jádra, která proti jádrům vytvořeným obalováním mají přesnější rozměry, povrchy odlitků v dutinách, drážkách a otvorech jsou hladší a jsou odolná proti erozi kovem. Keramická jádra umožňují vyrábět tak přesné odlitky, které mají takové tvary dutin a otvorů, jež by nebylo možné obráběním vyrobit vůbec a nebo jen velmi obtížně. Jádra jsou umísťována do dutiny formy na voskový model před vstříknutím vosku, stanou se tak součástí keramické formy během vytváření voskového modelu, později musí být bezproblémově odstranitelná z odlitku. Preferovanou výrobou keramických jader je injekční vstřikování. Keramika ve formě těsta je vstřikována pod tlakem do dutiny. To je následováno vypalováním při vysoké teplotě, kde dochází ke zhutňování (sintrování) materiálu. Jednou z největších oblastí použití keramických jader je letecký a energetický průmysl. Především v leteckém průmyslu se keramická jádra používají pro vytvoření vnitřního chladicího kanálku v lopatce turbíny. (2, 3)

1.6.3 Vytavování voskové hmoty ze skořepin

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

- v autoklávu,
- za vysoké teploty – v peci za teploty 900 až 1000 °C tak, že se spojí vytavení vosku s vypálením skořepiny. Ztráty vosku jsou 10 až 15 %; vosková směs je částečně znehodnocována,
- za nízké teploty – vytavování se provádí v roztavené a přehřáté hmotě stejného složení jako má hmota modelů,
- dielektrickým ohřevem – skořepiny se zvlhčí vodou a poté se umístí v poli vysokofrekvenčních oscilací. Vlhká skořepina se rychle ohřeje, vosk se těsně u skořepiny odtaví a vytvoří se dilatační spára, jenž zabrání popraskání skořepiny rozpínajícím se voskovým modelem,
- horkým vzduchem – proud horkého vzduchu se zavádí do středu vtoku. Ten se protaví dříve, než se celý model ohřeje a k odtavování pak dochází z vnitřku.

V současnosti se v drtivé většině používá vytavování v autoklávu. Vytavení modelů se provádí tepelným šokem přehřátou párou v zařízení, které se nazývá autokláv nebo boilerkláv. Protože teplota páry záleží na jejím tlaku, používají se zařízení, která pracují s tlaky od 0,3 až 0,6 MPa při teplotě páry od 135 do 165 °C. Skořepiny jsou v autoklávu umístěny tak, aby z nich vosk mohl volně vytékat. Vytavený vosk se zachycuje ve sběrné nádobě a po regeneraci se znovu používá. Výhodou tohoto způsobu odstraňování modelů jsou menší ztráty na modelovém

vosku, menší množství popraskaných skořepin a možnost pracovat s tenčími skořepinami. (1, 2, 3)

1.6.4 Vypalování keramických skořepin

Keramické formy je nutno před odléváním vypálit. Výsledné formy jsou pak schopny odolávat velmi vysokým teplotám a při pečlivém výběru skladby keramické břečky a posypového materiálu mohou být používány pro velmi širokou oblast slitin. Existují tři důvody pro vypalování forem před odléváním:

- odstranění zbytků voskových materiálů a těkavých látek zbylých po vytavování,
- zhutnění struktury keramiky – dosažení potřebné pevnosti skořepiny,
- předebrátí formy před litím na stanovenou teplotu.

Prvním požadavkem je tedy odstranění zbytků vosku po procesu vytavování a odstranění volných těkavých látek. Alkohol je odstraněn při teplotách nižších jak 100 °C, ale vodu obsaženou v gelované struktuře křemičitého pojiva nelze při teplotě 100 °C kompletně odstranit. Ke kompletnímu odstranění vody je zapotřebí teploty okolo 1000 °C. Dalším důvodem vypalování (žíhání) keramických skořepin je to, že se převede amorfni forma vazné vrstvy SiO₂ na formu krystalickou - zhutnění struktury keramiky. Vosky by měly být lepší kvality a neměly by obsahovat více jak 0 - 1% zbytků popela. Vypalování potřebuje kyslík, a je proto důležité zajistit jeho dostatek ve vypalovacích pecích k odstranění jakéhokoli zuhelnatěného vosku. Odporové pece mají výhodu v použití účinné ventilace, která je zdrojem volně proudícího vzduchu. Mnohem obtížnější je dosažení požadované úrovně kyslíku u plynových pecích, protože plynový hořák má tendenci volný kyslík pohltit. Vypalovací atmosféru je potřeba pravidelně kontrolovat, obzvlášť pro odlitky z oceli a vysoce legovaných slitin, protože na povrchu formy je potřeba zabránit reakci kovu se zbytkovým uhlíkem z nedostatečného vypálení vosku. Minimální teplota při vypalování by měla být přes 500 °C, avšak výhodnější je zvýšit tuto teplotu na 800 °C k zajištění rychlého odstranění zbytků. To je problém u plynových pecí - dodržení přijatelné atmosféry kyslíku při vyšších vypalovacích teplotách. Je to jedním z důvodů použití dvoufázového vypalovacího procesu; můžeme buď vypálit formu při vysoké teplotě a pak okamžitě odlévat bez ochlazení, nebo můžeme nejprve při nižší teplotě odstranit zbytky, ochladit, a znovu ohřát na vyšší teplotu požadovanou pro odlévání. Při druhém vypalování není vyžadována okysličovací atmosféra a může proběhnout v jednoduché peci. Dvojité vypalování s meziochlazením má výhodu v možné vizuální kontrole. Pro inspekci trhlin a prasklin se používá kapilární barevné metody. Vypalování forem při teplotách 500 – 800 °C není dostačující ke zhutnění struktury keramiky a tím formy nejsou inertní proti roztavenému kovu. Většina sléváren vypaluje formy při teplotách 950 – 1100 °C pro dosažení inertnosti a vysoké stability. Vyšší teploty vypalování okolo 1500 °C jsou používány v procesu usměrněného tuhnutí, kde musí roztavený kov po určité době zůstat tekutý. Speciální slitiny mohou požadovat ještě vyšší teplotu formy, ale použití keramiky na základě křemičitanů je omezeno teplotou okolo 1550 °C – která se blíží bodu tavení křemičitanu. V jiných případech, obzvlášť u slitin s nízkým bodem tavení, je maximální teplota vypalování ohraničena hodnotou 850 °C, je to v první řadě k omezení zvyšování pevnosti formy při vypalování. Příliš vysoká

pevnost skořepiny zde může být příčinou trhlin a prasklin vznikajících při smršťování odlitku. (1, 2, 3)

1.6.5 Tavení a odlévání

Tavení a odlévání kovů je pro výrobu kvalitních přesných odlitků jedním z nejdůležitějších procesů celé technologie. Je to do jisté míry proto, že při výrobě technologií přesného lití na vytavitelný model je používána široká škála výrobků a slitin. Odlévá se zpravidla ihned do žhavých skořepin. Bezprostředně po vytažení z vypalovací (žíhací) pece. Jak již bylo uvedeno, zmenší se tím teplotní šok při lití, omezí se vznik vnitřních pnutí ve skořepinách a sníží se nebezpečí praskání. Před litím se do žhavých skořepin většinou vkládají keramické filtry předeřhřáté na teplotu skořepiny. Ve většině sléváren přesného lití na vytavitelný model se používá elektrických indukčních pecí jádrových, bezjádrových nebo vakuových pecí. Tavení a odlévání slitin s nejvyššími požadavky na kvalitu se provádí ve vakuu. Ve vakuových pecích se odlévají zejména speciální vysokolegované materiály. Malé agregáty s kapacitou několika kilogramů jsou používány pro vysoce kvalitní dentální odlitky a pro odlitky určené pro bižutérii, zatímco větší agregáty jsou používány ve většině sléváren pro velké objemy. (3)

1.6.6 Dokončovací operace

Dokončovací operace jsou jedny z nejpracnějších operací v technologii přesného lití na vytavitelný model.

Typické pořadí dokončovacích operací je následné:

- odstranit převážnou část keramické skořepiny, obvykle mechanicky,
- odstranit odlitky z vtokové soustavy,
- odstranit zbylou keramiku mechanicky a/nebo chemicky,
- odstranit vtoky z odlitků,
- tryskání a dokončování.

V některých případech může dokončování obsahovat další operace jako tepelné zpracování, dodatkové obrábění a příprava odlitků pro odeslání. (3)

1.6.7 Využití odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu

Odlitky komponentů proudových motorů jako jsou lopatky a statorové díly patří ke stěžejním produktům. Metoda vytavitelného modelu je však širokým použitím pro jiné aplikace. Typické aplikace odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu jsou: letectví, automobilový průmysl, zbrojní průmysl, raketová technika, lékařské nástroje, implantáty, ortopedické produkty, jaderná energie, hydraul. a pneu. komponenty, energetika, potravinářství, petrochemické zařízení, armatury, příslušenství lodí, části jízdních kol, hudební nástroje, golfové hole, zemědělská technika.

2 VAKUOVÉ ODLÉVÁNÍ DO SILIKONOVÝCH FOREM

2.1 Postup tvorby voskového modelu

Vakuové lití do silikonových forem se hodí pro malé série max. 20 až 30 kusů voskových modelů. Lití se provádí do forem, které se vyrábí zalitím "master modelu" do silikonového nebo polyuretanového materiálu. Master model lze získat z již existující součásti nebo z prototypového modelu vyrobeného některou z Rapid Prototyping technologií popsanych v kapitole 3. Před samotným zalitím master modelu do silikonu musíme provést několik úprav, které vedou k lepším a přesnějším výsledkům. Například dělicí rovina se musí opatřit separačním přípravkem, model se musí dokonale vybrousit, díry které se mohou po odlití obrobít je vhodné zalepit, a spoustu dalších. K master modelu se musí přilepit vtokový kanálek a za pomoci tenkých drátů vhodně umístit model do prostoru formovací nádoby. Před zalitím master modelu silikonem je nutné silikon zavakuovat a tím ho zbavit bublinek vzduchu, které obsahuje. Po zalití silikonem se musí vakuování opakovat. Po ztuhnutí silikonu se forma vyjme z formovací nádoby. Jelikož předtím byla dělicí rovina ošetřena separátorem, pohodlně se rozebere. Následuje vyjmutí modelu a tím je forma hotová. Do ní jsou ve vakuu odlévány voskové modely. (4, 5)

Postup tvorby dílu v bodech:

- 1) úprava master modelu
- 2) vakuování silikonu
- 3) zalití master modelu silikonem
- 4) opakované vakuování formy s master modelem
- 5) vytvrzení silikonové formy
- 6) rozložení formy a vyjmutí master modelu
- 7) odlití modelu ve vakuu
- 8) vyjmutí modelu

2.2 Tvorba silikonové formy

Vyrobený master model se použije pro tvorbu silikonové formy. Po zatmelení a dobroušení do dokonale hladkého povrchu následuje zaformování. Na modelu se utěsní místa, která nemají být zaplavena silikonem a model se vloží do připravené, většinou hranaté nádoby, která má vnější tvar budoucí formy. Tato nádoba se většinou vyrábí z poskládání skel různých velikostí do požadovaného tvaru. Nesmí se také zapomenout na vložení vtokových a výfukových kanálků. Důkladně se rozmíchá silikon – kaučuková směs a nalije se do nalévací nádoby vakuového licího stroje. Po té se do vakuovacího stroje vloží připravená forma a po důkladném uzavření se z komory odsaje vzduch, vznikne vakuum. Velkou výhodou je, že vzduch se odsaje nejen z pracovní komory, ale také z tekuté směsi. Tím se zbavíme všech vzduchových bublin, které jsou v licím materiálu a tak by byly i ve formě, což by způsobovalo zhoršení vnitřní struktury a dutá místa v podobě bublin na povrchu formy. Až je forma odlitá, vpustí se vzduch do komory a forma se vyjme a následně nechá vytvrdnout na vzduchu asi 24 hodin. (13)

2.3 Používané materiály pro silikonové formy

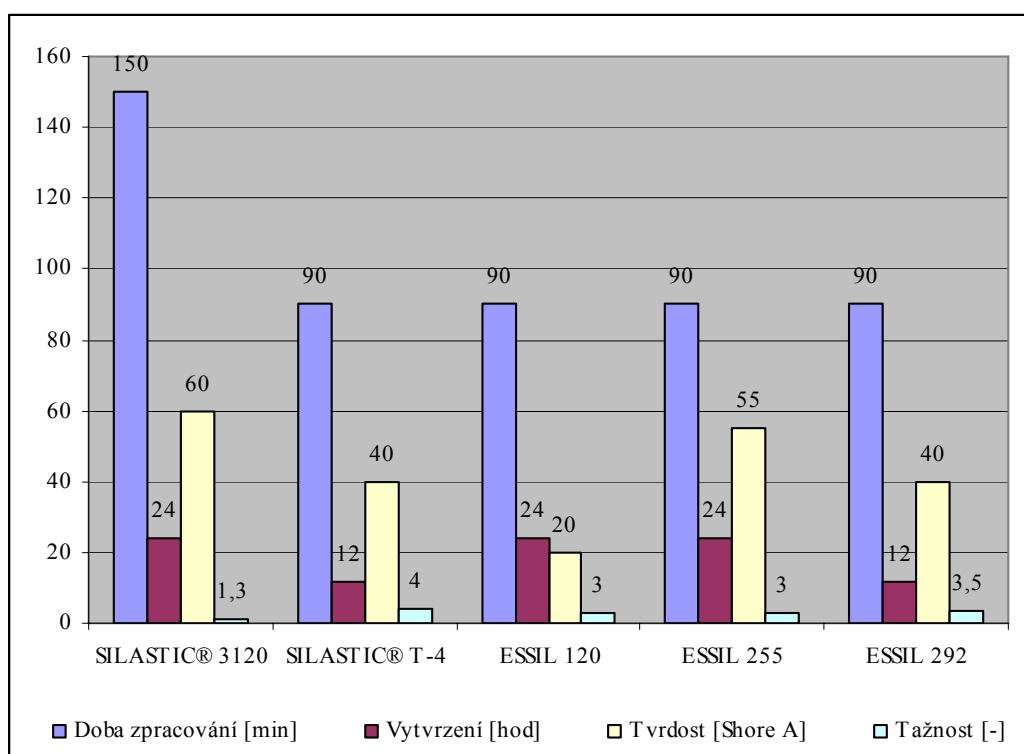
Na výrobu forem pro odlévání ve vakuu jsou nejčastěji používány silikonové kaučuky. Snadno se zpracovávají i vytvrzují a jejich konečné vlastnosti uspokojují i náročné požadavky uživatelů. Mimo výroby forem jsou vhodné i na výrobu dalších výrobků. Jejich použití je tedy velmi široké. Pro praktické použití silikonových kaučuků je důležitá zejména pružnost. Díky ní se snadno z forem uvolňují i tvarově komplikované odlitky. Z formy lze vyjmout i odlitek s negativním zkosením. Další výhodnou vlastností je průsvitný vzhled, který umožňuje rozříznutí formy přesně podle naznačených dělicích rovin na master modelu. Silikony mají velmi nízké smrštění, dobrou rozměrovou stabilitu, jsou velice houževnaté a mají středně vysokou tvrdost. Formy ze silikonových kaučuků jsou použitelné pro odlévací hmoty na bázi polyuretanů, epoxidů, polyesterů ale i silikonů. Dále je možno do těchto materiálů odlévat i nízkotavitelné slitiny, vosky, sádku, keramiku, atd. (8, 14)

Silikon je dvousložkový materiál složený ze základní složky, která se po smíchání s vytvrzovacím činidlem vytvrdí při pokojové teplotě adiční reakcí. Vytvrzení lze urychlit temperováním nebo urychlovači. Při odlévání silikonové formy bez vakuování může nastat problém se vzduchovými bublinkami přítomnými v silikonu. To má negativní vliv na kvalitu povrchu a při odlévání tenkostěnných odlitků může dojít i ke zhroucení stěny formy. Na trhu je velká nabídka různých druhů silikonů, které se mohou lišit materiálovými charakteristikami (viskozita, tvrdost, pevnost v tahu, smrštitelnost, doba práce se směsí). Např. pro transparentní odlitky se doporučuje tzv. forma suchá, která na povrchu není tolik mastná a dovoluje snadnější vyjmutí transparentního odlitku. Na druhou stranu forma z tohoto silikonu má menší životnost, než forma ze silikonu pro běžné odlitky. Výrobci a prodejci silikonů uvádí 100 až 200 vyrobených odlitků z jedné formy. (8, 15)

Pro kvalitní zatečení silikonu okolo master modelu se doporučuje používat zpomalovač reakce. Tím se prodlouží doba zpracovatelnosti. Zvláště u složitých modelů je to výhodné, protože silikon stačí kompletně zatéci okolo celého master modelu. V tabulce a grafu 1.3 jsou uvedeny příklady vybraných materiálů od firem Ebalta (SILASTIC® 3120, SILASTIC® T-4) a Axson (ESSIL 120, ESSIL 255, ESSIL 292).

Tab. 2.1 Vybrané materiály pro silikonové formy (15, 16)

	Poměr míchání	Doba zpracování [min]	Vytvrzení [hod]	Tvrdost [Shore A]	Tažnost [-]
SILASTIC® 3120	100 : 10	150	24	60	1,3
SILASTIC® T-4	100 : 10	90	12	40	4
ESSIL 120	100 : 5	90	24	20	3
ESSIL 255	100 : 10	90	24	55	3
ESSIL 292	100 : 10	90	12	40	3,5



Graf 2.1 Vybrané materiály pro silikonové formy (15, 16)

2.4 Separátory

Přestože silikonové kaučuky nemají k naprosté většině materiálů žádnou adhezi, nelze na tuto skutečnost jednoznačně spoléhat, protože většinou není známo jakými úpravami materiál modelu prošel. V některých případech může dojít k přichycení („přivulkanizování“) silikonového kaučuku k povrchu modelu. Není-li naprosto jasně známo, že je povrch modelu inertní vůči použitému kaučuku, je třeba provést orientační zkoušku s malým množstvím katalyzované pasty na takovém místě modelu, které není pohledově příliš exponované. Pokud se ukáže, že povrch modelu není inertní a oddělení kaučuku od povrchu modelu působí potíže, je nutno použít izolační (separační) nátěr. K tomuto účelu se používají – zředěné mazlavé mýdlo, roztoky parafinu, vazelína, vodné roztoky metylcelulózy, akrylátové laky nebo nitrolaky. Výběr se řídí charakterem materiálu modelu, protože izolační nátěr musí být z modelu či originálu odstranitelný a jeho aplikaci nebo odstraňováním nesmí dojít k jeho poškození. Izolační nátěr musí být tak tenký, aby nezakryl jemné detaily povrchu. Při zhotovování vícedílných forem je nutno separační nátěr aplikovat na dělicí rovinu, tj. na ty plochy již zvulkanizované části formy, na něž bude nanášena další pasta. Jinak by nebylo možno jednotlivé části formy po vulkanizaci kaučuku od sebe oddělit. Separální nátěr se někdy používá i k úpravě povrchu komplikovaných modelů, aby se usnadnilo snímání formy. (17)

2.5 Vakuový lící systém

Vakuové lící systémy jsou zařízení, které umožňují efektivní, rychlou a velmi přesnou výrobu komplexních plastových a voskových prototypových dílů. Technologie vakuového lití do silikonových forem uspoří při výrobě prototypových a malosériových dílů až 90% ceny a času ve srovnání s klasickou výrobou pevných kovových forem. Bohatá nabídka lících polyuretanových pryskyřic dovoluje rychle vyrobit prototypové modely přesně podle požadovaných fyzikálních vlastností, různých povrchových textur a barev. Vyrobené díly mohou být použity pro ověření prototypových návrhů, mechanické testování, kontrolu funkčnosti a designu. Vakuové lící systémy jsou dodávány v různých velikostech, podle toho jak velké kusy chceme odlévat.



Obr. 2.1 Vakuový lící systém

3 RAPID PROTOTYPING

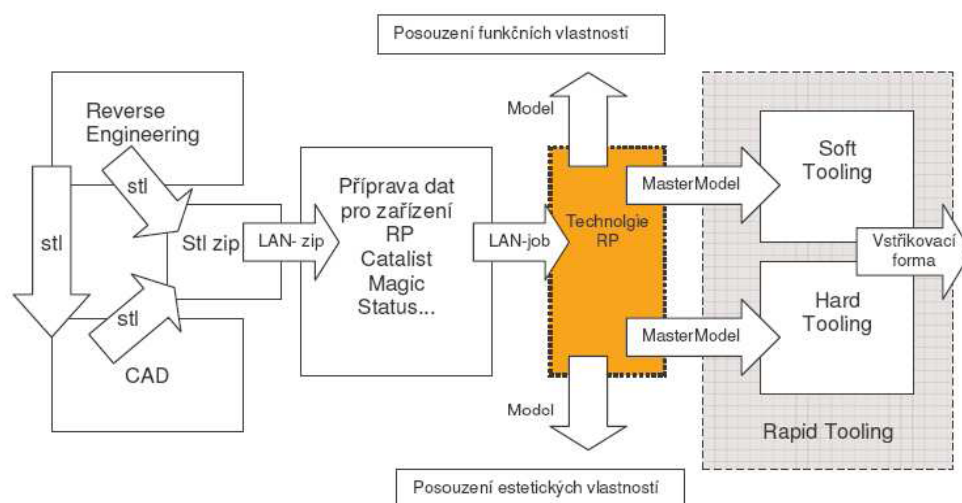
3.1 Úvod

Rapid Prototyping (RP) v zásadě slouží k co nejrychlejší tvorbě prototypů a modelů (nástroje, prototypové formy, atd.). Vyvíjí se již od osmdesátých let, kdy vznikla metoda stereolitografie. Nyní se tvorba modelů a prototypů (prezentačních i funkčních) směřuje především do oblasti výroby forem a nástrojů. Na významu nabývá také oblast koncepčního konstruování, kdy se ověřují definované vlastnosti budoucího výrobku. Ve specifických případech se modely vybudované pomocí RP využívají k simulacím nebo různým typům zkoušek (obtékání, namáhání, atd.). Velké úsilí je věnováno zdokonalení softwarových i hardwarových technologií, které by umožnily provádět celý vývojový proces výrobku na digitálním modelu přímo v CAD systému (vizualizace, rendrování, virtuální realita, MKP, dynamické analýzy, atd.). Ukazuje se ovšem, že potřebou současných designérů a konstruktérů je pracovat spíše s modelem fyzickým, u kterého se dá snadněji měnit design, odstraňovat případné chyby, kontrolovat smontovatelnost, opravitelnost, ergonomie nebo provádět funkční zkoušky. Všechny tyto výhody fyzického modelu mají ve finále za následek zrychlení celého procesu vývoje výrobku. Výroba modelů a prototypů klasickými technologiemi je ale velmi náročná a zdoluhavá. Jako nejvhodnější cesta splňující většinu požadavků konstruktéra se jeví RP, což je technologie rychlá a umožňuje přímou vazbu na vývojové prostředí, tedy na CAD/CAM systém. Přednosti metod RP se využijí nejen v automobilovém, leteckém a elektrotechnickém průmyslu, ale i ve výrobě spotřebního zboží. Ve všech oblastech se docílilo zkrácení vývojových časů, snížení nákladů a zvýšení kvality výrobku. Nejlepší výsledky v ušetřeném čase dosahují metody RP při aplikaci ve vývoji celých montážních skupin. V kombinaci s metodami přesného lití kovů poskytují metody RP možnost rychlejší a levnější výroby kovových funkčních součástí. (4)

V praxi se při výrobě prototypu může postupovat klasickými metodami jako je lití do formy nebo obrábění polotovaru. Přestože i tyto metody dnes už nabízejí propojení s CAD/CAM systémy jejich použití je technologicky velmi náročné a zdoluhavé. Proto je velmi vhodné využít pro tvorbu modelů některou z metod RP. Celý proces vzniku prototypu začíná u výkresu součásti, který může být buď nakreslený v některém z CAD systémů nebo může být načtený prostorovým scannerem, ze kterého jsou data následně transformována do formátu *.stl, který se dále upravuje podle druhu zvolené metody tisku do takové podoby, aby z výstupních dat těchto programů bylo možné model vyrobit. Tento formát je standardní pro zařízení pro rychlou výrobu prototypů. Formát *.stl je zařazen i do systémů CAD, které vytvářejí plošné nebo objemové modely. Překladač do formátu *.stl při převodu vnitřních dat do výměnného formátu generuje síť trojúhelníků a aproximuje povrch modelu. Počet a velikost trojúhelníků určuje, jak přesně bude vyroben pozdější prototyp. Se zvětšováním počtu trojúhelníků klesá relativní velikost a tvar se více přibližuje žádoucímu tvaru. Nastavení parametrů se v systémech CAD liší. Pro tvorbu STL souboru lze například použít program SolidWorks 2007. Při převodu vnitřního formátu do formátu *.stl dochází k chybám. Nejběžnější chybou je neshoda bodů, které náleží k sobě. Všechny přiléhající trojúhelníky sdílejí společné vrcholy. Na rozdíl od konvenčních metod obrábění, u kterých je materiál z výchozího polotovaru

odebírán, je u RP materiál přidáván po vrstvách. Součást je pro výrobu rozdělena pomocí vhodného programu na velké množství jednotlivých vrstev o tloušťce řádově desetin mm. Programy na prohlížení a úpravu digitálního modelu z různých vstupních formátů jsou např.:

- **Magics** – program od firmy Materialise
- **Spinfire Profesional** – program od firmy Actify
- **Wiew Expert** – program od firmy DeskArtes
- **RapidForm** – program od firmy Rapid Form



Obr. 3.1 Etapy rychlé výroby prototypů (8)

Jednotlivé vrstvy vytvořené těmito programy mají svůj specifický tvar, který je následně vyroben v zařízeních využívajících některé z metod RP, které budou názorně ukázány a vysvětleny. Metody RP se liší nejen použitím materiálů a výrobních zařízení, ale také v tvorbě opěrného systému, který je důležitou součástí většiny vyráběných modelů. Tímto způsobem lze vyrábět i tvarově složité modely, jejichž výsledné mechanické vlastnosti jsou závislé na použité technologické metodě RP a materiálu, který byl využitý při tvorbě tohoto modelu. (4, 5, 6)

3.2 Základní metody RP

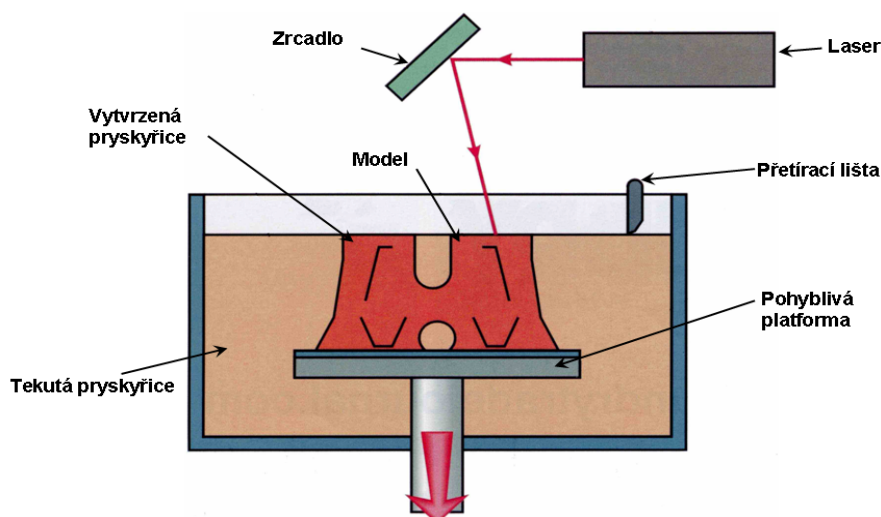
V průběhu let se prosadilo hned několik technologií, které pracují na principu modelování pomocí postupného přidávání nebo vytvrzování vrstev materiálu. Mezi tyto technologie, které jsou souhrnně označovány termínem Rapid Prototyping patří:

- Stereolitografie (SL)
- Selective Laser Sintering (SLS)
- Laminated Object Manufacturing (LOM)
- Solid Ground Curing (SGC)
- Fused Deposition Modelling (FDM)

- Metody Model Maker 3D Plotting (3DP)
- Ballistic Particle Manufacturing (BPM)
- Multi-Jet Modelling (MJD)

3.2.1 Stereolitografie (SL)

Tato metoda dala základ vzniku technologie RP již kolem roku 1987. Patří mezi nejstarší, ale i mezi nejpřesnější metody, které jsou dnes k dispozici. Základním principem je vytvrzování fotopolymeru (plastické hmoty citlivé na světlo) laserovým paprskem. V počítači se vytvořený model pomocí softwaru rozdělí na jednotlivé vrstvy, tyto data jsou odeslána do stereografického zařízení. V hermeticky uzavřeném prostoru je umístěna nádoba naplněná tekutým fotopolymerem. Prostor je uzavřený z důvodu vzniku škodlivých výparů, které vzniknou působením laseru s tekutinou, a také z důvodu velké citlivosti fotopolymeru na světelný paprsek (i sluneční), při kterém dochází k tvrdnutí. Laserový paprsek je přes speciální optiku a zrcadlo směřován přesně na místa určená daty z počítače, kde okamžitě dochází k vytvrzení první tenké vrstvy fotopolymeru na pracovní desce. Po dokončení celé vrstvy se pracovní deska posune pomocí hydrauliky směrem dolů přibližně o velikost jedné vrstvy. Shodnost tloušťek jednotlivých vrstev je zajištěna stírací lištou, která setře přebytečnou tekutinu. Tloušťky jednotlivých vrstev se pohybují okolo 0,05 do 0,15 mm. Po setření vrstvy následuje opět vytvrzování laserem, to se opakuje dokud není model kompletní. Ve většině případů není nutné vytvářet podpěry, ty vytváříme pouze když se jedná o slabostěnnou část téměř rovnoběžnou s pracovní deskou. Použitím podpěry odstraníme nežádoucí jevy, které by jinak vznikly, mohlo by např. dojít ke zvlnění prvních vrstev nebo k celkové deformaci modelu.



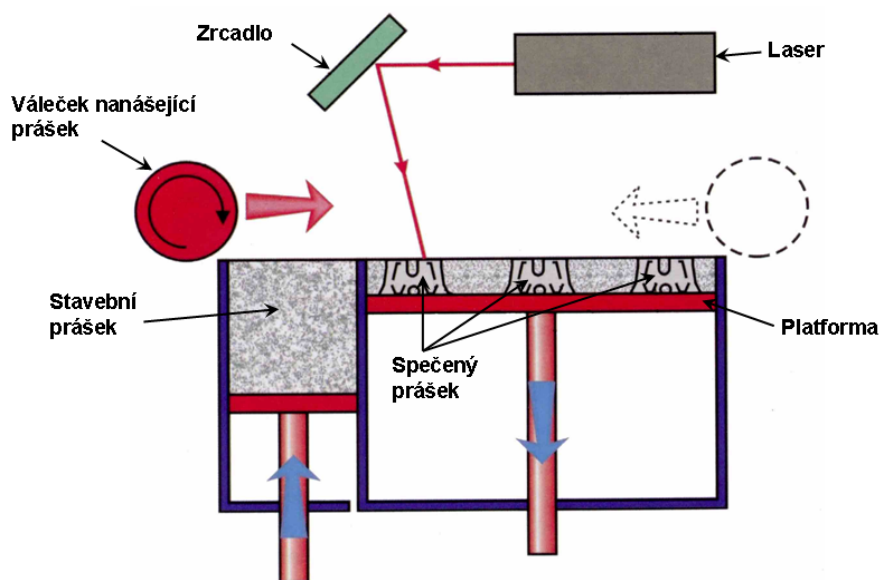
Obr. 3.2 Princip metody stereolitografie (10)

Použití laserového paprsku umožňuje vytváření velmi malých modelů s množstvím detailů, které nejsou pro tuto metodu problém. Můžeme vytvářet nejen modely, ale také při použití správných materiálů formy pro vstřikování. Časová

nenáročnost výroby je jeden z hlavních argumentů, proč dát přednost metodě SL před konvenčními metodami výroby modelů. Nevýhodou stereolitografie je relativně pomalý proces dokončovacího vytvrzení polymeru v UV pecích, který může trvat u některých materiálů i několik desítek hodin, v závislosti na velikosti modelu. Problémem je také malá tepelná odolnost modelu a nutnost speciální komory pro skladování z důvodu borcení samotnou vahou modelu. (8, 9)

3.2.2 Selective Laser Sintering (SLS)

Základní princip této metody spočívá v nanášení jednotlivých vrstev práškového materiálu, po kterém následuje spékání prášku laserovým paprskem přesně v místech, jejichž polohu získalo zařízení z dat zpracovaných počítačem. Podle souřadnic vypočtených bodů navádí skenovací hlava laserový paprsek nad povrch prášku, který je nasypaný v hermeticky uzavřené pracovní komoře. V ní je udržována teplota těsně pod bodem tavení prášku, tím pádem pak stačí zvýšit teplotu dopadajícího paprsku a dochází v místě působení ke spékání nebo roztavení prášku, a tím se docílí kratších časů výroby modelu. Nejčastěji používaný laser je CO₂ o výkonu až 200 W, který se pohybuje rychlostí až 3 m/s a dokáže spojit až 15 mm³ stavebního materiálu za sekundu. Pak následuje pokles základní desky o tloušťku vrstvy a pomocí nanášecího zařízení je vytvořena další vrstva prášku, která se uhlazovacím válcem zarovná na požadovanou tloušťku, která se pohybuje v rozmezí 0,1 až 0,5 mm, potom znovu dochází ke spékání materiálu pomocí laseru. Okolní neosvětlený materiál slouží jako nosná konstrukce. (4, 5, 6)



Obr. 3.3 Princip metody SLS (10)

Modely vyráběné touto novější metou jsou na rozdíl od metody Stereolitografie mnohem pevnější, ale mají hrubší pórovitý povrch. V současné době se používá široké

spektrum termoplastických materiálů (polyamid, polyamid plněný skelnými vlákny, polykarbonát, polystyren, atd.) nebo speciálních nízkotavitelných kovových slitin z niklových bronzů a polymerů potažených ocelovým práškem. Principiálně je možné použít jakýkoliv prášek, který se působením tepla taví nebo měkne. (5)

Podle druhu použitého modelovacího materiálu je možno v rámci této technologie rozlišovat metody:

- Laser Sintering - Plastic
- Laser Sintering - Metal
- Laser Sintering - Foundry Sand
- Laser Sintering - Ceramic (Direct Shelt Production Casting)

Laser Sintering – Plastic

Podle toho jaké chceme výsledné mechanické vlastnosti modelu, je nutné volit vhodný plastický materiál. Pro použití ve slévárenství je vhodný polystyren, ze kterého se dají vyrobit i tvarově velmi složité modely. Ty jsou následně zaformovány do slévárenské formy a po nalití tekutého kovu se vytaví. Pokud chceme využít prototyp k funkčním zkouškám, a tím pádem chceme, aby prototyp měl výborné mechanické vlastnosti jako např. tvrdost, teplotní odolnost, houževnatost, tak použijeme k vytvoření modelu nylonový materiál. (4, 6)

Laser Sintering - Metal

Modely se touto metodou vyrábějí ze speciálních nízkotavitelných kovových slitin z niklových bronzů a polymerů potažených ocelovým práškem. Hlavní využití je ale pro výrobu forem, které pak slouží pro vstřikování plastových dílů. Tyto formy mají dostatečnou pevnost a dobré mechanické vlastnosti. (4, 6)

Laser Sintering - Foundry Sand

Metoda vytváří pomocí speciálně upraveného slévárenského písku, který se laserovým paprskem spéká do té doby, než vznikne dokonalá slévárenská forma, která obsahuje vtokovou soustavu, výfuky, rozvodné kanálky a jádra. Jedná se o jednu z nejmodernějších metod Laser Sinteringu. (4, 6)

Laser Sintering - Ceramic

Hlavním materiálem je zde keramický prášek, který se spojuje pomocí tekutého pojiva. K tomu využívá Ink-Jet tryskovou hlavu, která se pohybuje po souřadnicích získaných z počítače. Metoda je vhodná pro výrobu keramických součástí nebo ve slévárenství nachází uplatnění při výrobě forem a jader. (4, 6)

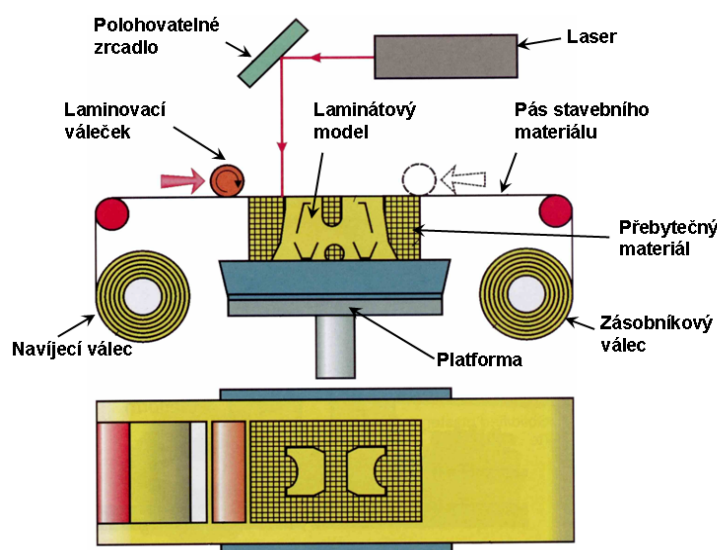
3.2.3 Laminovací technologie

Základním stavebním materiálem je laminátová nebo papírová fólie, která se bude za pomoci tepelných (laser) nebo mechanických (nůž) účinků ořezávat na požadovaný tvar. V současnosti se používají dvě laminovací technologie:

- Laminated Object Manufacturing (LOM)
- Selective Adhesive and Hot Press (SAHP)

Laminated Object Manufacturing (LOM)

Přes pracovní desku je odvíjena buď laminátová nebo papírová fólie napuštěná polyetylenem nebo jinou spojovací hmotou. Fólie je k podložce přiválcována soustavou vyhřívaných válců, následuje vyříznutí přesného obrysového tvaru pomocí laserového paprsku. Laserový paprsek vyřízne také obdélník (nebo čtverec) větší než je rozměr vyráběné součásti a rozřeže nepotřebný materiál v tomto obdélníku na malé čtverce, aby po dokončení šly snadno rozebrat a odstranit. Následuje navinutí použité části fólie na jeden z válců a tím pádem se dostane nová fólie nad pracovní prostor. Poté dochází opět ke spojení jednotlivých vrstev vyhřívanými válci. Celý proces se opakuje dokud není model hotový. Vytvořené součástky připomínají svým tvarem povrchu strukturu dřeva.



Obr. 3.4 Princip metody LOM (10)

K dosažení dokonale hladkého povrchu je nutné součástku brousit, tmelit a stříkat. Při řezání dochází k uvolňování velkého množství plynů, proto je nutné odsávání a následná filtrace. Metoda je vhodná na výrobu velkých modelů, nevýhodou je ale vznik velkého množství odpadu. Problém také nastává při tvorbě kanálků nebo složitých součástí, kde je obtížnější dostat přebytečný materiál ven z modelu. (5, 6)

Selective Adhesive and Hot Press (SAHP)

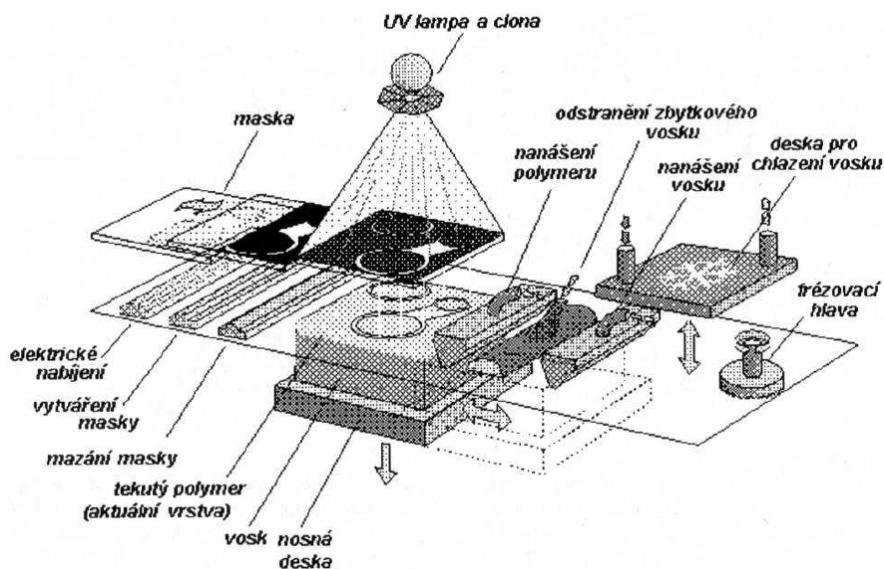
Tato metoda je obdobná jako metoda LOM, ale s tím rozdílem, že pro vyřezávání obrysů jednotlivých vrstev se používá čepel ze slinutých karbidů místo laserového paprsku. Pomocí laserové tiskárny se na běžný papír vytisknou křivky, které jsou obrysem modelu v jednotlivých vrstvách. Přitlačením ohřívané desky na papír, který má na sobě vrstvu lepidla, dochází ke spojení s předcházející vrstvou. Následuje vyříznutí obrysových částí čepelí nože upevněného na otočném pohyblivém držáku, který umožňuje pohyb podobný pohybu řezacího plotru. Tuto metodu lze využít nejen v laboratořích a dílnách, ale i běžném kancelářském prostředí. Velikost výsledného modelu je omezena laserovou tiskárnou, která dokáže tisknout papíry jen do určité velikosti. Výhodou je použití netoxických materiálů a levná údržba

výrobního zařízení. Obě metody vedou řez kolmo k povrchu vrstvy, tím dochází ke schodovité struktuře vnějšího povrchu. Snahou je tento nechtěný jev odstranit zešíkmením řezu, který vytváří lepší povrchovou strukturu a tím je model i vzhledově hezčí. (4, 5, 6)

3.2.4 Solid Ground Cudiny (SGC)

Metoda využívá podobně jako technologie SL vlastností fotopolymerní pryskyřice, která tvrdne po ozáření světelným paprskem. Skleněná maska s předlohou je v pracovní komoře ozářena ultrafialovým paprskem a tím dochází ke ztvrdnutí celé vrstvy náraz. Technologii SGC tvoří tři zařízení: kopírka, SL zařízení a NC frézka. Vytváření tělesa probíhá ve dvou oddělených cyklech, které probíhají současně. Nejdříve je vytvořena negativní maska elektrostatickým nanášením barvy na skleněnou destičku, současně se na vyráběnou součást nanese tekutá vrstva fotopolymerní pryskyřice, následuje přesun skleněné desky nad součást a spuštění UV záření. Osvícený fotopolymer ztvrdne, neosvětlený tekutý fotopolymer je odsáván vzduchem a znehodnocen. Vzniklý mezoprostor je vyplněn tekutým voskem, který ztuhne. Vosk v okolí vytváří podpory. V dalším kroku je povrch celé vytvořené vrstvy zarovnan na požadovanou výšku vrstvy pomocí frézovací hlavy NC frézky a tím je připravený na nanášení další tenké vrstvy tekutého fotopolymeru. Vosková výplň zůstane ve vytvářeném tělese až do konce procesu výroby, potom je chemickou cestou (např. pomocí kyseliny citrónové) odstraněna. (5, 6)

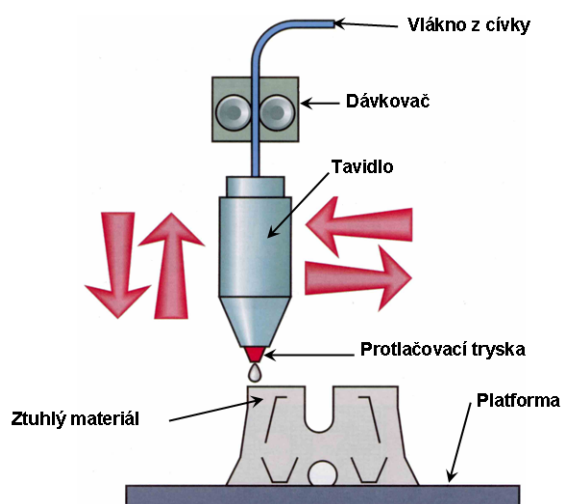
Výhodou této metody je možnost výroby velmi tvarově složitých součástí s nevýraznou schodovitou strukturou povrchu a možností vyrábět v jedné pracovní komoře více součástí najednou bez podpěr. V dnešní době je ale stále malý výběr použitelných materiálů. Nutností je také hermeticky uzavřená komora, z důvodu použití fotopolymerní pryskyřice citlivé na světelný paprsek. (5)



Obr. 3.5 Princip metody SGC (9)

3.2.5 Fused Deposition Modelling (FDM)

Tato metoda nepoužívá žádný zdroj záření jako je laser nebo ultrafialový paprsek. Je založena na principu nanášení (vrstvení) termoplastického materiálu, který je vypouštěn z trysek tiskárny. Při vytváření modelů pomocí technologie FDM, je nejdříve v počítači pomocí softwaru objekt včetně podpěr rozřezán na jednotlivé vrstvy a data o nich odešle přímo do tiskárny. Tam je materiál ve tvaru tenkého drátu o průměru kolem 1,5 mm vtlačován do vyhřívané trysky, která se pohybuje nad pracovním prostorem. V trysce je ohříván na teplotu o 1 °C vyšší než je jeho teplota tavení, ta se pohybuje kolem 260 °C. Při styku s povrchem vytvářené součástky se vlákna vzájemně spojují a vytváří tak požadovanou tenkou vrstvu (cca 0,2 až 0,5 mm), která ihned ztuhne. Součástka se opět vytváří na nosné desce, tato deska se vždy po dokončení jedné vrstvy spustí dolů o tloušťku této vrstvy. Zařízení obsahuje také druhou trysku, která nanáší opěrný materiál. Zařízení pracující s technologií FDM mohou být využívána také v běžném kancelářském prostředí, protože obsluha je relativně jednoduchá, nevznikají žádné toxické plyny a nepoužívá laser. Vytvořený model má schodovitou strukturu povrchu a po odstranění podpor vyžaduje povrchové dokončovací operace (broušení, tmelení, stříkání). Na principu technologie FDM pracuje většina tzv. 3D tiskáren. (4, 5, 6, 12)

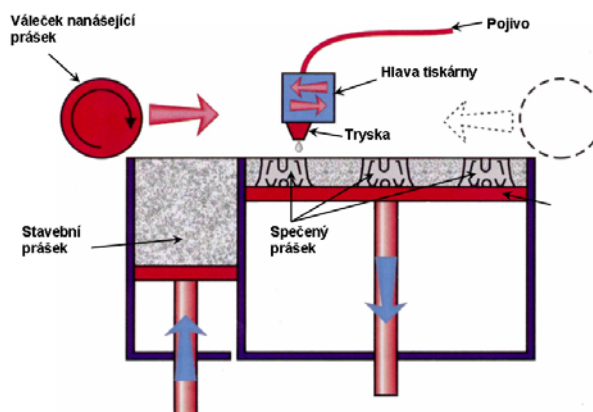


Obr. 3.6 Princip metody FDM (10)

3.2.6 Model Maker 3D Plotting (3DP)

Tato metoda využívá podobného principu jako metoda SLS s tím rozdílem, že místo laseru, který spékal tepelnou energií termoplastický prášek, se použije tryska s pojivem, které prášek dokáže také spojit. Součást se vyrábí v pracovní komoře, kam se nanáší pomocí dávkovacího zařízení prášková vrstva (např. kysličníku hlinitého), na kterou je vystřelováno z trysky tekuté pojivo. Pojivo spojí jednotlivá prachová zrna k sobě a dochází ke ztuhnutí a vytvrzení. Následuje pokles pracovní desky směrem dolů o tloušťku vrstvy, pak se opět nanese základní materiál a celý proces se opakuje dokud není model hotový. V dokončovací fázi je nutné odsát nespojený prášek a očistit prototyp. Struktura povrchu takto vytvořených modelů je poměrně drsná

a dochází k nechtěnému odrolování povrchové vrstvy. Nutné je mít dobré odsávací zařízení pro odsátí prášku z dutin modelu. Tuto metodu lze využívat i pro kancelářské použití a pro tvorbu velmi tvarově složitých součástek v různých barevných provedeních. Velmi časté použití metody 3DP je pro zhotovení keramických skořepin a forem na výrobu odlitků. (5, 6)



Obr. 3.7 Princip metody 3DP (10)

3.2.7 Ballistic Particle Manufacturing (BPM)

Vstřikování stavebního materiálu je zajištěno piezoelektrickým trysovým systémem. Používají se dvě trysové hlavice, jedna je pro základní materiál – nízkotavitelný termoplast a druhá tryska je pro podpurný materiál – vosk. Trysová hlava je namontována na 5ti – osm polohovacím zařízení, které zajišťuje vstřikování pojiva na povrch prototypové součástky. Trysky nanášejí ze zásobníků mikroskopické kapky roztaveného pojiva na požadované místo a okamžitě po dopadu tuhnou. Následuje ofrézování celé vytvořené vrstvy na požadovanou tloušťku, poté se opět může nanášet další vrstva termoplastu. Metoda BPM vyžaduje tvorbu podpěr pro převislé plochy nebo nespojené části modelu, to umožňuje právě vosk, který je nanášen v okolí modelu. Po dokončení modelu dochází k roztavení voskového podpurného materiálu. Tato metoda dokáže snadno vytvářet tenkostěnné modely, je nenáročná jak na finance, tak i na obsluhu a údržbu. Nevznikají žádné toxické odpady ani plyny. (5, 6)

3.2.8 Multi JET Modelling (MJM)

Touto technologií jsou nanášeny na sebe vrstvy termopolymeru, který je vypouštěn ze speciální tiskové hlavy. Tisková hlava je speciální proto, že nemá pouze jednu nebo dvě trysky, ale má jich hned několik set, např. tisková hlava od firmy ThermoJet má 352 trysek uspořádaných rovnoběžně vedle sebe. Každá tryska je samostatně řízena počítačem, který ovlivňuje průtok materiálu. Model se opět vytváří na zvláštní nosné desce podobně jako u Stereolitografie. Protože jsou trysky vedle sebe, tak se tisková hlava pohybuje většinou pouze v jednom směru, ale pokud je vytvářený objekt větší jak šířka tiskové hlavy, tak je nutný i posuv do boku tak, aby

bylo zajištěno pokrytí celé vrstvy. Termoplastický materiál je výhodný z důvodu okamžitého ztuhnutí ihned po dopadu na vytvořenou část. (5, 6)

3.3 Přehled metod RP ve stádiu vývoje

I když je na trhu k dispozici velké množství technologických metod pro výrobu prototypových součástí pomocí RP, tak i nadále pracují odborníci na výzkumu, vývoji a ověřování dalších nových metod. Výzkum je zaměřen na nové technologie, které nabízejí nová řešení. Smyslem vyvíjení těchto technologií je zkrácení výrobního času, použití nových materiálů, zvýšení kvality povrchu dokončené součásti a také nízká cena, která je i nadále jedním z hlavních faktorů ovlivňujících tento vývoj. (5)

V současnosti se pracuje na vývoji těchto metod:

3.3.1 Laser Engineered Net Shaping – LENS

Technologii má v licenci americká společnost Optomec Design Corp. Hlavní strategií této firmy je přímá výroba kovových funkčních modelů v malých sériích, při použití různých kovových a keramických materiálů. Tato metoda se nadále vyvíjí v univerzitních laboratořích v USA a v Evropě. Princip spočívá v použití velmi výkonného laserového paprsku na roztavení kovového prášku, který je tryskán pod laserový paprsek pomocí dávkovacího zařízení, které je po obvodu hlavice laseru. Laser dosahuje výkonu až 1,4 KW. Rozdíl od ostatních metod spočívá v posuvu pracovní desky místo laserového paprsku, jak bylo zvykem u ostatních metod. Jediný pohyb, který vykonává nanášecí hlava je posuv směrem nahoru po dokončení každé vrstvy. Kovový prášek je chráněn proudem inertního plynu, který se obvykle používá na ochranu roztaveného kovu před atmosférickým kyslíkem pro zachování lepších mechanických vlastností. Výhodou této technologie je použití velkého množství druhů materiálu, modely jsou vyrobeny např. z nerezové oceli, titanu, hliníku, mědi atd. Na výběr je ze dvou druhů forem materiálu. Možné je koupit buď práškový materiál anebo tenký drát. Výsledný výrobek má často lepší vlastnosti než výrobek vyráběný běžnými metodami. (5)

3.3.2 Koncepce kontrolované automatické výroby – DesCAF

Tato technologická metoda je rozvíjena společností Light Sculpting Inc. Využívá podobné technologie jako metoda SGC, také je zde ozařován fotopolymer pomocí UV paprsku, ale rozdíl je ve vytváření masky. Nenanáší se práškovou barvou obrysy elektrostaticky na skleněnou desku, ale jednotlivé předlohy vrstvy se tisknou pomocí laserové tiskárny, pak následuje ozáření fotopolymery a jeho vytvrzení. Současné vytváření masky a jednotlivých vrstev vede k rychlejší výrobě a tím ke snížení časové náročnosti na vyrobení modelu (5).

3.3.3 Quadra System

Na trh s touto metou přišla izraelská společnost Object Geometrie Ltd. Technologie jako základní stavební materiál opět využívá fotopolymer. Ten je tryskán

ze vstřikovací hlavy na součást, trysková hlava nanáší současně základní materiál a také podpěrný materiál. Po dokončení nanášení je celá vrstva osvětlena UV lampou a tím dojde k vytvrzení fotopolymery. Snadné odstranění podpěrného materiálu je ošetřeno již v programové části výroby modelu, kdy program dokáže navrhnout podpěry tak aby se spojily se základním materiálem jen částečně a bylo jednoduché je po dokončení oddělit. (5)

3.3.4 Electrosetting Material

Technologii RP Electrosetting Material vyvíjí laboratoř Navy Tailor Laboratory. Využití elektrostatiky při výrobě modelů názorně ukazuje právě tato metoda. Do kapalné lázně je ponořena speciálně tvarovaná elektroda, která využívá elektrostatického pole pro změnu kapalného skupenství na pevné v místě svého použití. K tomu jsou vhodné materiály jako epoxid nebo silikon, které tuto změnu skupenství umožňují. (5)

3.3.5 CNC deposition Metod

Technologie CNC deposition metod je vyvíjena na VUT. Principiálně je velice podobná technologii FDM. Hlavní část zařízení je tvořena tiskovou hlavou s revolverovou tryskou upnutou do vřetene CNC frézky. Stavebním materiálem je slévárenský vosk. Hlavní uplatnění nachází ve slévárenství pro výrobu mastermodelů pro technologii vytavitelného modelu. Revolverová tryska slouží ke kladení vrstev různé tloušťky. (5)

3.4 Úprava vytisknutého modelu

Žádná z technologií RP nevytváří povrch v dostačující kvalitě pro tvorbu silikonové formy. Hotový model se vyznačuje schodovitou (stair-stepping) strukturou povrchu a obsahuje například i stopy po podporách. Povrchová úprava spočívá v broušení, tmelení a lakování. Všechny tyto činnosti mají vliv na konečnou přesnost modelu. Pokud jsou na modelu některé rozměry tolerovány (rozteče otvorů, rovinnost ploch a další) je nutné využít pro dokončovací operace CNC obrábění. Při výrobě master modelu pro silikonové formy lze postup po vyjmutí modelu z tiskárny shrnout do následujících bodů:

- součást se odloupne z podložky,
- odlamováním se odstraní podpory,
- povrch součásti se zlehka obrousí brusným papírem hrubosti 400,
- pokud povrch obsahuje větší nerovnosti, zatmelí se dvousložkovým, polyesterovým tmelem,
- tmelené povrchy se vybrousí brusným papírem hrubosti 400,
- součást se stříká výplňovým tmelem,
- výplňový tmel se brousí pod vodou brusným papírem hrubosti 600 – 1000 tak dlouho, dokud se neobjeví náznak schodovité struktury,
- vysušený model se stříká vrchním akrylátovým tmelem – provede se vizuální kontrola povrchu. (4, 5)

3.5 Materiály používané pro RP

Každá z metod RP používá jiné materiály pro konečné modely, které se liší ve vlastnostech jak estetických, tak i mechanických.

Stereolitografické materiály

Model zhotovený technologií SL většinou slouží pro výrobu nástrojů nebo formy. Materiál použitý pro zhotovení součástky je fotopolymerní pryskyřice, která po vytvrzení umožňuje širokou škálu mechanických povrchových úprav (od jemného broušení přes pískování až k dokonalému vyleštění). (5, 11)

Příklady některých používaných materiálů:

Rigi2200

Pevný materiál používaný pro tolerované, malé a detailní modely, vhodný pro vizuální a estetické aplikace. (11)

Poly1500

Materiál srovnatelný s inženýrskými plasty, vhodný pro přesné funkční modely. Materiál má velkou použitelnost, např.: strojírenský, elektrotechnický a zdravotnický průmysl a spoustu dalších. (11)

Tusk2700(W)

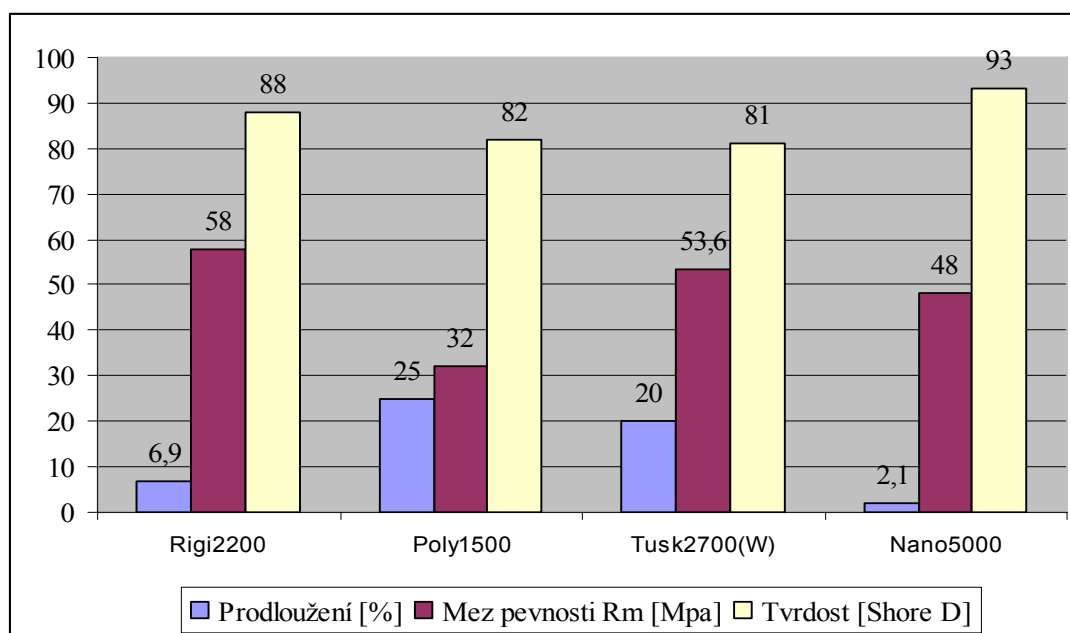
Tento materiál je používán pro pevné, vodě odolné prototypy s vlastnostmi podobným ABS materiálům. Modely vyrobené tímto materiálem se hodí pro analýzu vodního toku, zkoušky v aerodynamickém tunelu. (11)

Nano5000

Nano5000 se hodí pro chemicky a ohnivzdorné prototypy. Tyto modely se vyznačují velmi vysokou tuhostí. (např. díly pro motorová vozidla, zkoušky v aerodynamickém tunelu, světelné reflektory, rotory čerpadel). (11)

Tab. 3.1 Porovnání vlastností vybraných materiálů pro Stereolitografii (11)

materiál	prodloužení [%]	mez pevnosti Rm [MPa]	tvrdost [Shore D]
Rigi2200	6,9	58	88
Poly1500	25	32	82
Tusk2700(W)	20	53,6	81
Nano5000	2,1	48	93



Graf 3.1 Porovnání vlastností vybraných materiálů pro Stereolitografii (11)

Materiály pro Selective Laser Sintering

Výhodou metody SLS oproti ostatním metodám RP je možnost zpracovávat větší spektrum materiálů. Principiálně mohou být zpracovávány všechny teplem tavitelné, případně teplem měknoucí práškové materiály. Standartně je využívána výroba součástí z termoplastických materiálů (polyamid, polyamid plněný skelnými vlákny, polykarbonát), speciální nízkotavitelné kovové slitiny z niklových bronzů a polymerů potažených ocelovým práškem. Nejčastěji se používá speciální práškový polyamid (bez nebo se skleněnou výplní), který se mechanickými vlastnostmi přibližuje vstříkovanému polyamidu. (4, 5, 11)

Příklady některých používaných materiálů:

Polyamid (PA)

Práškový materiál, který dovoluje vyrábět plně funkční prototypy s vysokou mechanickou a teplotní vodivostí. (11)

Polyamid – sklo (PA – GF)

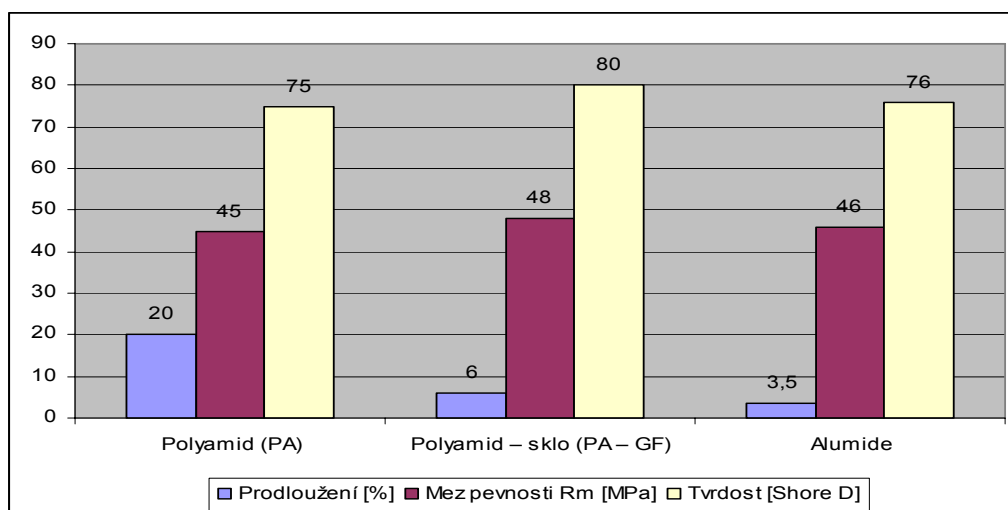
PA materiál s příměsí skla. Má vysokou teplotní odolnost a je typickým představitelem při využívání testů funkčních prototypů s vysokým tepelným zatížením. (11)

Alumide

Tento materiál je směs hliníkového prášku s práškovým polyamidem, který dává kovový vzhled. Model vytvořený tímto materiálem je neporézní a má vysokou teplotní odolnost. (11)

Tab. 3.2 Porovnání vlastností vybraných materiálů pro Selective Laser Sintering (11)

materiál	Prodloužení [%]	mez pevnosti Rm [MPa]	tvrdost [Shore D]
PA	20	45	75
PA – GF	6	48	80
Alumide	3,5	46	76

**Graf 3.2** Porovnání vlastností vybraných materiálů pro Selective Laser Sintering (11)

Materiály pro Fused Deposition Modelling (FDM)

Metoda FDM používá materiály na zhotovení prototypových součástí, které jsou inertní a netoxické. Jsou vhodné pro širokou oblast aplikací. Cívky drátu jsou umístěné v kazetách.

Příklady některých používaných materiálů:

ABS

Arylonitril-butadien-styren (P400). Oblast výroby funkčních prototypů a vzorků. (11)

ABSi

Methyl-methakrylát - ABS (P500), dovolující sterilizaci gama paprsky pro aplikace v medicíně. (11)

Eleastomer (E20)

Je používán pro oblast, kde je požadována pružnost prototypové součástky (modelu), jako například při výrobě různých těsnění a pružných spojovacích prvků, při aplikaci v obuvnickém nebo automobilovém průmyslu. Má vlastnosti podobné polyetylenu a polypropylenu. (11)

Vosk (ICW06)

Najde uplatnění v mnohých slévárnách na rychlou výrobu modelů pro zaformování do keramické skořepiny (metoda vytavitelného modelu). (11)

Materiály ABS a ABSi jsou dodávány v různých barvách nebo modifikacích barev podle přání zákazníka. Změna použitého materiálu může být provedena během několika minut. Součástky zhotovené z materiálu ABS jsou pevné a ve většině případů přímo vhodné pro testování jako funkční prototypy, pro smontování do sestav nebo na vytvoření finálního výrobku.

4 PŘESNÉ LITÍ DO FOREM VYROBENÝCH OBRÁBĚNÍM

Formy vyrobené obráběním jsou používány tam, kde jsou požadavky na velkosériovou produkci, dlouhou životnost a pro výrobu odlitků požadující nejvyšší přesnost. Modely vyráběné v těchto formách jsou nejpřesnější, avšak jedná se o technologii nejvíce nákladnou. Výroba forem pro jednoduché modely bez vnitřních dutin je relativně nenáročná. Modely s vnitřními dutinami nebo tvarovým členěním, jejichž osy jsou například mimo dělicí rovinu, musí obsahovat výsuvná jádra, která vyžadují přesnou výrobu a náročné lícování ve formě. (2, 3)

Pro výrobu forem obráběním se používá ocel a slitiny hliníku. Výhody hliníku oproti oceli jsou:

- hliník je možno obrábět jednodušeji a rychleji, to znamená že hliníkové formy budou méně nákladné,
- výroba voskových modelů je znatelně rychlejší, protože hliník má lepší tepelnou vodivost,
- formy se snadněji instalují na lisovací stroj a celkově je manipulace lepší díky nižší hmotnosti hliníku.

Výhody oceli oproti hliníku jsou:

- ocel je méně náchylná k deformaci a poškození než hliník,
- oprava je všeobecně jednoduchá, vzhledem k tomu, že ocel je snadněji svařitelná v porovnání s hliníkem,
- spojovací hrany jsou méně náchylné na poškození. (1, 2)

4.1 Výroba voskových modelů

Voskové modely se vyrábějí dvěma způsoby:

- vstřikováním do formy
- gravitačním litím do formy

Gravitační lití modelů

Je používáno už jen velice zřídka, a to většinou při výrobě pomocných modelů, jako jsou např. vtokové kanály apod. (3)

Vstřikování do formy

Výroba voskových modelů vstřikováním vosku do formy je hlavní metodou výroby voskových modelů. Výroba se uskutečňuje na speciálních vstřikovacích lisech, které vstřikují roztavený vosk pod tlakem do formy. Teplota vosků při vstřikování je v rozmezí 55 – 90 °C. Po ztuhnutí je model vyjmut z formy. Vstřikovací lisy jsou klasifikovány dle stavu vosku, který je stroj schopný vstřikovat. Existují tři základní typy strojů pracující s voskem: (3)

- tekutým
- kašovitým

- pevným

Vstřikovací stroj pracující s tekutým voskem

Tento stroj obsahuje ohříváný zásobník vosku, v němž je vosk promícháván. Vosk je dále přepravován ze zásobníku do vstřikovacího válce pomocí tlaku vytvořeného hydraulickým nebo pneumatickým válcem, a také pomocí vlastní váhy vosku (napájení samospádem). Když je vstřikovací válec plný, dojde k uzavření ventilů na vstřikovací jednotce a tím k oddělení vstřikovací jednotky od zásobníku, stroj je pak připraven k vstřikování. Forma je vložena a upnuta do stroje. Po dosažení potřebného tlaku ke spojení formy stlačí vstřikovací válec dle předem nastaveného tlaku vosk do vstřikovací jednotky. Vstřikovací trysky se přesunou dopředu a spojí s formou, poté se otevře vnitřní ventil trysky, kterým bude roztavený vosk proudit do formy. Stroj po vstřiknutí vosku dále působí tlakem dle předem určené doby výdrže, vosk ztuhne a zchladne až do stavu, v kterém může být vyjmut z formy. Na konci cyklu vstřikovací jednotka sníží tlak, otevře se forma a vyjme se model. Tento vstřikovací stroj je nejvíce používán v dnešních slévárnách přesného lití na vytavitelný model. Výhodou vstřikovacího stroje pracujícího s tekutým voskem je jednoduchost, která spočívá v čerpání vosku přes potrubí z centrálního zásobovacího systému do stroje, což má za následek snadné udržení stavu vosku ve stroji a minimální podíl lidských zásahů. Nevýhodou u těchto strojů pracujících s tekutým voskem je to, že při použití příliš horkých vosků se zvyšuje pracovní cyklus a tím se zvyšuje možnost výskytu staženin. Tento problém se dá zredukovat přidáváním různých plniv, které snižují staženiny ve vosku. Použití příliš studených vosků může být příčinou vzniku vzduchových bublin ve voskovém modelu. (1, 2, 3)

Vstřikovací stroj pracující s kašovitým voskem

Dnes jsou na trhu 2 typy strojů pracujících s kašovitým voskem. První je typ “kanystr“. Kanystr nebo válec, je naplněn tekutým voskem a následně vložen do temperovací pece do té doby než vosk dosáhne určitého stavu pomocí předem nastavené teploty. Po splnění této podmínky je kanystr vložen do vstřikovacího stroje, který má stejnou teplotu jako temperovací pec. Kanystr je v podstatě vstřikovací válec, obsahující vstřikovací píst spojený s hydraulickým válcem, který je permanentně spojen se strojem. Po vložení kanystru do stroje a zapnutí příslušného ovládacího prvku začne hydraulický válec stlačovat vosk v kanystru, odkud se vosk dostává do vstřikovacích trysek a dále do formy. Druhý typ je hybridní stroj, který má dvě části zásobníku. Horní část zásobníku slouží k udržování tekutého vosku. Spodní část zásobníku obsahuje tepelný výměník, který vosk ochlazuje a zpět ho vrací do horního zásobníku, kde je vosk smíchán s teplejším voskem, aby tak docházelo k vytvoření hladké pasty. Tento typ stroje musí být spojen se zásobovačem tekutého vosku, který udržuje horní zásobník stroje na požadované úrovni tak, aby celý zásobník stroje pracoval správně. Nevýhodou obou strojů je požadavek na temperovací pec. (1, 2, 3)

Vstřikovací stroj pracující s tuhým voskem

Tento stroj používá předpřipravené ohřáté voskové polotovary, které jsou vkládány do vstřikovací komory. Polotovar je dále lisován pod tlakem přes vstřikovací sestavu a vstřikovací trysku do formy. Nevýhodou těchto strojů je ztráta přibližně 20% materiálu polotovaru pro zhotovení přijatelného voskového modelu. Dle typu upínání lze vstřikovací stroj rozdělit na 3 typy. Jedná se o čtyř-stojanový horizontální typ. Forma u tohoto typu musí být permanentně upevněná (přišroubovaná ke stolu). Tato

konfigurace se používá z toho důvodu, že k vyjmutí modelu z formy je použito automatických vyhazovačů. Dalšími typy jsou vertikální čtyřstojanový typ a C-rám, který je nejvíce rozšířený. Formy zde mohou být buď permanentně připevněné nebo lze s formami manipulovat za účelem rozmontování. Rozhodujícími parametry pro výrobu kvalitních voskových modelů, bez ohledu na typ stroje jsou:

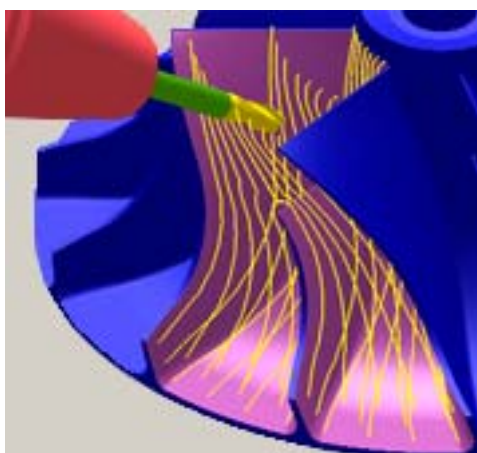
- teplota vosku ve vstřikovacím stroji – měla by být konstantní v celém stroji, tzn. teplota vosku v zásobníku by měla být stejná jako teplota vosku v trysce,
- teplota vstřikovací trysky – viz teplota vosku ve vstřikovacím stroji,
- teplota formy,
- vstřikovací tlak – měl by být dostatečně vysoký k zajištění kvalitního povrchu voskového modelu,
- průtoková rychlost – je nejdůležitějším parametrem při vstřikování slabostěnných modelů nebo modelů s nepravidelnými tvary. Průtoková rychlost by měla být tak vysoká, aby vosk dostatečně rychle vyplnil formu, ale zároveň by měla být dostatečně pomalá k zabránění turbulence a vzniku vzduchových bublin,
- doba vstřikování a doba výdrže – měla by být dostatečná k zajištění kvalitního povrchu voskového modelu.

5 VÝROBA OBĚŽNÉHO KOLA

5.1 Obrábění lopatek v PowerMILLu

Tento software disponuje přímo funkcí obrábění lopatek pro pětiosé souvislé obrábění. Na obrázku 5.1 je zobrazeno úvodní dialogové okno ze kterého je patrné, že jsou k dispozici tři strategie obrábění:

- hrubování lopatky
- dokončení lopatky
- dokončení středu



Obr. 5.1 Lopatky v PowerMillu

Karta Lopatky v dialogovém okně Obráběcí strategie obsahuje strategie obrábění oblasti a dokončovací strategie potřebné k obrobení disku s integrovanými lopatkami nebo rotoru. Strategie obrábění lopatky fungují pouze v následujících případech:

- použití kulových nástrojů (s kulovým hrotem, kónicky kulové, kotoučové nástroje s kulovým hrotem),
- válcovitý souměrný střed lopatky obsahuje jednu neříznutou plochu,
- válcovitou souměrnou hranu lopatky obsahuje jednu neoříznutou plochu, která musí odpovídat profilu lopatky a popřípadě i mezilopatky,
- rotor obsahuje alespoň dvě lopatky,
- pokud je použita rozdělovací lopatka, musí být radiálně roztažena tak, jako levá a pravá lopatka,
- rádius musí být ve stejné hladině (nebo ve stejné sadě) jako lopatka.

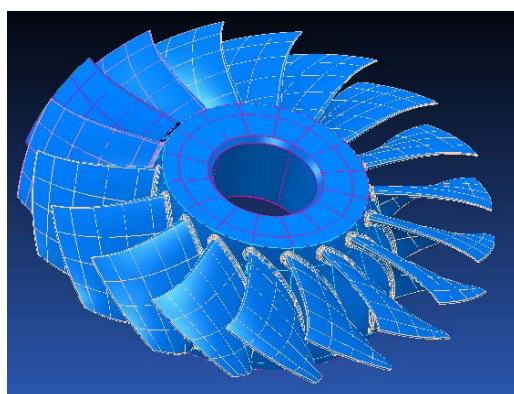
5.1.1 Hrubování lopatky

Tato funkce umožňuje rychlé odebrání materiálu při obrábění lopatky. Vybrušování oblasti lopatky probíhá pouze do té míry, při které může provést úplné obrobení.

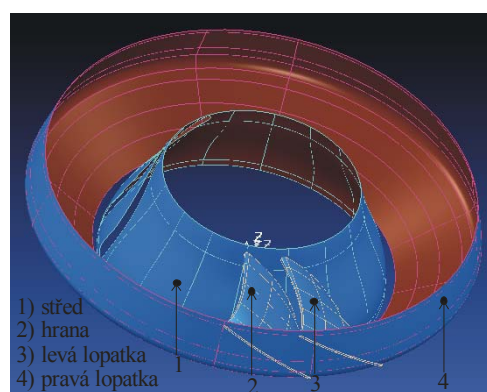
Levá strana tohoto dialogového okna nabízí standartní možnosti nastavení, které jsou stejné pro ostatní dráhy. V pravé části tohoto okna definujeme kolo. Definují se zde různé části lopatky nebo rotoru a počet lopatek, které chceme obrobit. Nejprve je třeba definovat geometrii, která představuje jednotlivé komponenty kola nebo rotoru. Každá komponenta musí být seskupena do jedné hladiny nebo sady. Na obrázku 5.3 vidíme příklad oběžného kola a na obrázku 5.4 vidíme, jakým způsobem může být reprezentováno v PowerMillu. (19, 20)

Definice kola – definuje různé části lopatky nebo rotoru a počet lopatek, které chceme obrobit. Nejprve je třeba definovat geometrii, která představuje jednotlivé komponenty lopatky. Každá komponenta lopatky musí být seskupena do jedné hladiny nebo sady.

Střed – z rozevíracího seznamu vybereme hladinu nebo sadu definující geometrii středu. *Hrana* – z rozevíracího seznamu vybereme hladinu nebo sadu definující počáteční neobrobenou geometrii. *Rádus* – z rozevíracího seznamu vybereme hladinu nebo sadu definující geometrii rádus. Všechny rádus musí také být umístěny v hladině nebo sadě definující lopatky.



Obr. 5.2 Oběžné kolo



Obr. 5.3 Definování oběžného kola

Levá lopatka – z rozevíracího seznamu vybereme hladinu nebo sadu definující geometrii levé lopatky. Levá lopatka musí být umístěna po směru hodinových ručiček od pravé lopatky, takže levá lopatka je nalevo při pohledu do mezery, která bude obrobena ve směru centrální osy a s osou Z aktivní pracovní roviny směřující vzhůru. *Pravá lopatka* – z rozevíracího seznamu vybereme hladinu nebo sadu definující geometrii pravé lopatky. *Mezilopatka* – z rozevíracího seznamu vybereme hladinu nebo sadu definující geometrii rozdělovací lopatky. *Střed* – z rozevíracího seznamu vybereme hladinu nebo sadu definující geometrii středu.

Obrábět – počet lopatek, které chceme obrobit.

Jedna lopatka – obrobení oblasti mezi dvěma lopatkami.

Všechny lopatky – obrobení oblasti celého kola.

Celkový počet – celkový počet lopatek na kole. Tato možnost je dostupná pouze v případě, že je možnost Obrábět nastavena na hodnotu Všechny lopatky. (19, 20)

Kompletní nastavení strategie hrubování lopatky není složité a popis funkcí obsažených v této strategii je obsažen v příloze č. 1.

5.1.2 Dokončení lopatky

Funkce dokončení lopatky dokončuje obrábění lopatky nebo rotoru. Zda-li je toto obrábění prováděno v jednu chvíli na jedné lopatce nebo na jedné kapse závisí na vybrané operaci – operace obrábění. Větší část tohoto dialogového okna funguje stejně jako dialogové okno Hrubování lopatky.

Definice kola – definuje různé části kola nebo rotoru a počet lopatek, které chceme obrobit.

Elevace osy nástroje – definuje počáteční a cílovou osu nástroje.

Obrábění – definuje profil offsetu, pořadí a směr obrábění. Jediná další možnost v této části je Operace.

Operace – definuje obráběné plochy lopatek

Obrobit levou lopatku – budou obrobena všechny plochy levé lopatky. Pokud je tato možnost zkombinována s vlastností Obrábět nastavenou na hodnotu Všechny lopatky, budou všechny lopatky obrobena úplně.

Obrobit všechny plochy – obrobí všechny plochy v kapse.

Obrobit mezilopatku – obrobí všechny plochy rozdělovací lopatky

Levá lopatka a mezilopatka – obrobí všechny plochy levé lopatky a všechny plochy rozdělovací lopatky.

Pravá lopatka a mezilopatka - obrobí všechny plochy pravé lopatky a všechny plochy rozdělovací lopatky.

Pokud je možnost Obrábět na hodnotu Všechny lopatky, pak možnosti Obrobit levou lopatku a Obrobit všechny plochy produkují dráhy nástroje obklopující celé kolo (za předpokladu, že kolo nemá žádné rozdělovací lopatky). Opravdové dráhy nástroje, vedení a spoje budou však vypadat jinak.

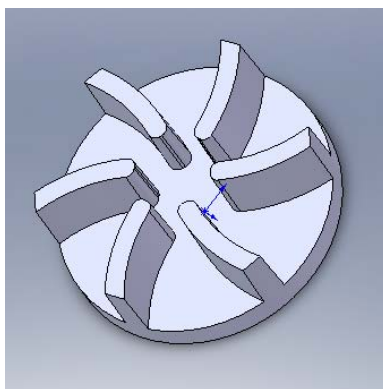
5.1.3 Dokončení středu

Tato funkce dokončuje obrábění středu mezi dvěma lopatkami. Funguje obdobně jako funkce Hrubování lopatky a Dokončení lopatky. Jediný rozdíl spočívá v tom, že vlastnost Obrábět poskytuje výběr z možností Jedna kapsa a Všechny kapsy.

5.2 Kusová výroba

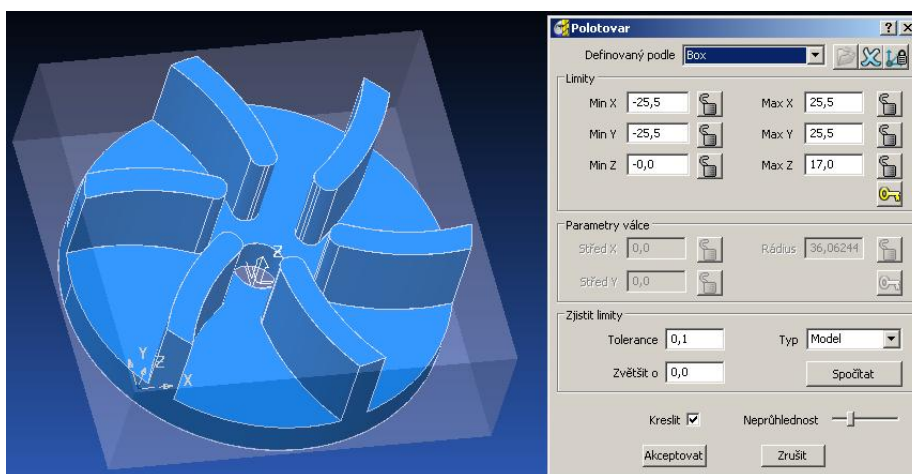
Při kusové výrobě bylo vhodně využito programovacího softwaru PowerMill, firmy Delcam, verze 8.009 SP6 a znalostí, kterých mi bylo během týdenního školení zdarma poskytnuto touto společností na jejím brněnském pracovišti.

1) Pro vytvoření funkčního programu bylo nejdříve třeba vytvořit model obráběné součásti. Bylo využito softwaru SolidWorks 2007. Na obrázku 5.6 je znázorněn již vymodelovaný díl oběžného kola.



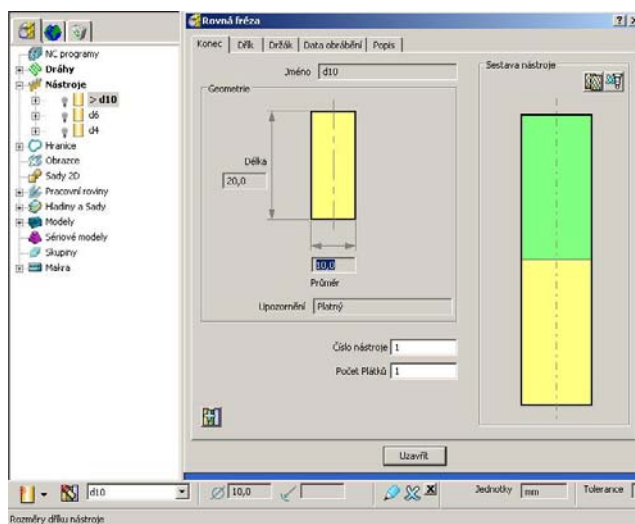
Obr. 5.4 Vymodelované oběžné kolo

2) V tomto kroku byl proveden import modelu do PowerMILLu a následně byl definován polotovár. Následovalo vytvoření pracovní roviny. Souřadný systém byl posunut na levý horní roh polotovaru – obr. 5.7. Ideálním polotovarem pro tuto součást je kruhová tyč, avšak nám možnosti dovozovaly použít pouze polotovár čtvercový.



Obr. 5.5 Definování polotovaru

3) Dále bylo nutné definovat reálné nástroje, kterými se bude obrábět. Pro tuto výrobu byly nutné tři frézy a to čtyřzubá fréza s průměrem 10 mm a 6 mm pro hrubovací operace a fréza s průměrem 4 mm též čtyřzubá pro hrubování a následné dokončení. Vytvoření těchto nástrojů je jednoduché a intuitivní.

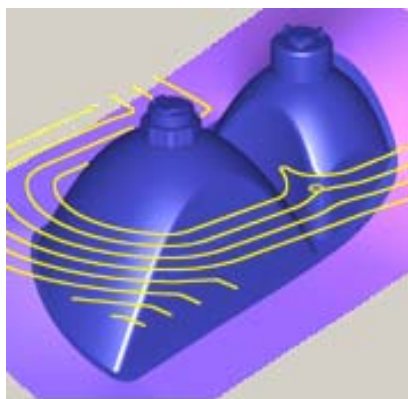


Obr. 5.6 Definování řezných nástrojů

4) Nyní už je možné přistoupit k obráběcím strategiím. Polotovár již byl se zarovnaným čelem, proto jako první byla zvolena strategie hrubování. Při hrubování se preferuje co největší objem odebrané třísky v co nejkratším čase. Obráběcí strategie jsou uvedeny v pořadí, v jakém byla součást vyráběna. Pro obráběcí strategie byly zvoleny následující parametry:

Hrubování offsetem

Tato strategie je založena na profilu okolo součástky na každé výšce Z, která je postupně offsetována po bloku materiálu. Pokud je tato strategie správně použita, pomůže dramaticky minimalizovat opotřebení nástroje i stroje. (19, 20)

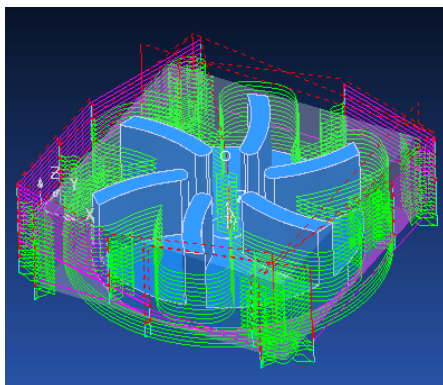
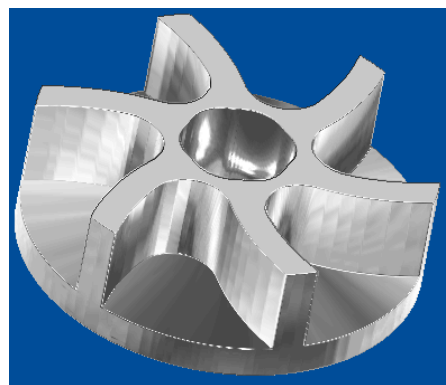


Obr. 5.7 Hrubování offsetem

Tab. 5.1 Parametry obrábění

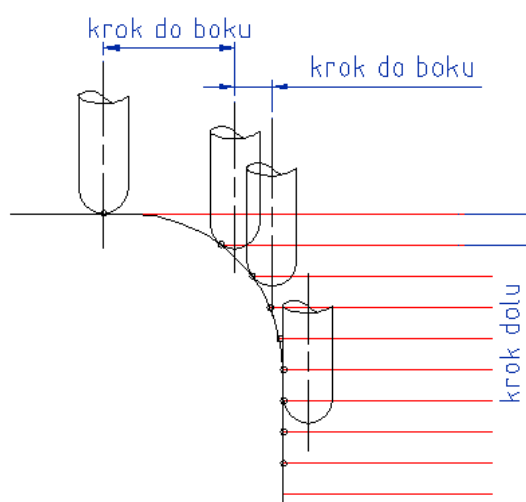
Nástroj	fréza s rovným čelem $\varnothing 10$ mm
Tolerance	0,05 mm
Přídavek axiální	0,2 mm
Přídavek radiální	0,2 mm
Krok	4 mm
Krok dolů	1 mm
Směr obrábění	sousledný
Otáčky vřetene	5500 ot.min ⁻¹
Posuvová rychlost	800 mm.min ⁻¹
Sjezdová rychlost	80 mm.min ⁻¹
Řezná rychlost	173 m.min ⁻¹
Posuv na zub	0,145455 mm
Čas obrábění dle PowerMILLu	23 minut 23 sekund
Skutečný čas obrábění	37 minut 7 sekund

Fotografie z výroby je umístěna v příloze 2.

**Obr. 5.8a** Hrub. Offsetem - dráhy**Obr. 5.8b** Hrub. offsetem – simulace

Konstant Z dokončení

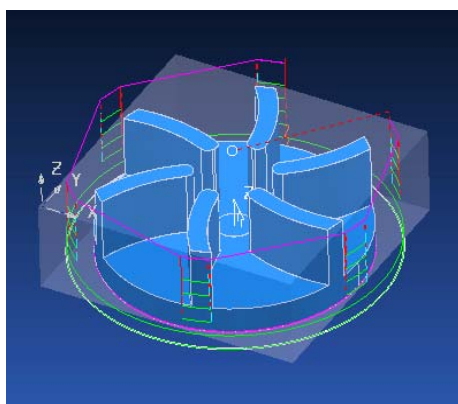
Strategie konstant Z projektuje každou trasu na součástce horizontálně ve fixovaných výškách nastavených s pomocí funkce Krok dolů. Jak se povrch součástky stává mělkím, aktuální hodnota krok se neustále zvyšuje až přestane na rovných plochách existovat. Ve formuláři Konstant Z je možné nastavit proměnlivý krok dolů s pomocí tolerance drsnosti povrchu dohromady s maximální a minimální hodnotou Krok dolů. Tato metoda poskytuje proměnou hodnotu krok ve vztahu k úhlu modelu. Ve velmi mělkých nebo plochých oblastech však není účinná. (19, 20)



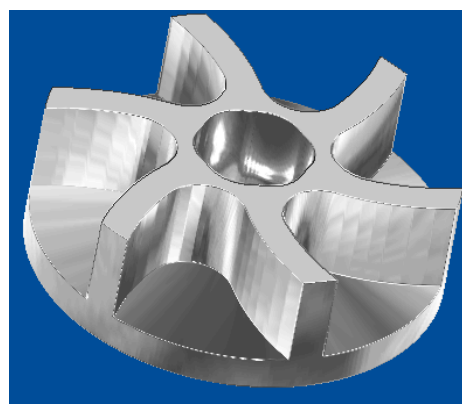
Obr. 5.9 Schéma funkce Konstant Z dokončení (20)

Tab. 5.2 Parametry obrábění

Nástroj	fréza s rovným čelem ø10 mm
Tolerance	0,005 mm
Přídavek axiální	0 mm
Přídavek radiální	0 mm
Krok dolů	min. 3 mm
Směr obrábění	sousledný
Otáčky vřetene	5500 ot.min ⁻¹
Posuvová rychlost	500 mm.min ⁻¹
Sjezdová rychlost	50 mm.min ⁻¹
Řezná rychlost	173 m.min ⁻¹
Posuv na zub	0,090909 mm
Čas obrábění dle PowerMILLu	3 minuty 16 sekund
Skutečný čas obrábění	4 minuty 36 sekund



Obr. 5.10a Konstant Z dokončení



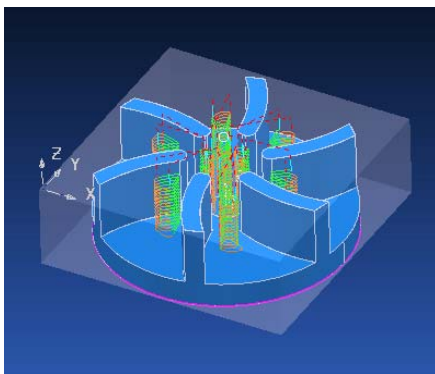
Obr. 5.10b Konstant Z dokončení

Hrubování offsetem – zbytkové obrábění

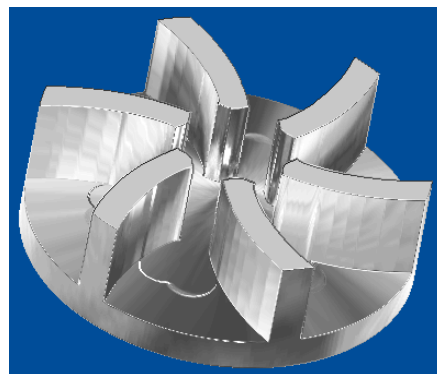
Zbytkové obrábění je lokalizované odebrání materiálu, které není přístupné předchozím nástrojům. Zbytkové obrábění je založeno na předem definované referenční dráze. V našem případě byla jako referenční dráha použita předem definovaná strategie hrubování offsetem. (19, 20)

Tab. 5.3 Parametry obrábění

Nástroj	fréza s rovným čelem ø6 mm
Tolerance	0,005 mm
Přídavek axiální	0,1 mm
Přídavek radiální	0,1 mm
Krok	2 mm
Krok dolů	0,7 mm
Směr obrábění	sousledný
Referenční dráha	Hrubování offsetem
Otáčky vřetene	5500 ot.min ⁻¹
Posuvová rychlost	700 mm.min ⁻¹
Sjezdová rychlost	70 mm.min ⁻¹
Řezná rychlost	104 m.min ⁻¹
Posuv na zub	0,127273 mm
Čas obrábění dle PowerMILLu	9 minut 36 sekund
Skutečný čas obrábění	12 minut 55 sekund



Obr. 5.11a Zbytkové obrábění



Obr. 5.11b Zbytkové obrábění

Hrubování offsetem – zbytkové obrábění

Tab. 5.4 Parametry obrábění

Nástroj	fréza s rovným čelem ø4 mm
Tolerance	0,005 mm
Přídavek axiální	0,1 mm
Přídavek radiální	0,1 mm
Krok	1,5 mm
Krok dolů	0,7 mm
Směr obrábění	sousledný
Referenční dráha	Dohrubování d6

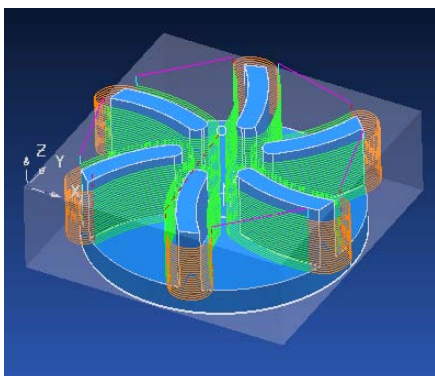
Otáčky vřetene	5500 ot.min ⁻¹
Posuvová rychlost	700 mm.min ⁻¹
Sjezdová rychlost	70 mm.min ⁻¹
Řezná rychlost	104 m.min ⁻¹
Posuv na zub	0,127273 mm
Čas obrábění dle PowerMILLu	5 minut 13 sekund
Skutečný čas obrábění	7 minut 5 sekund



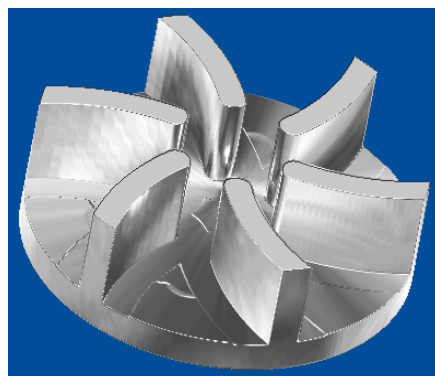
Obr. 5.12 Zbytkové obrábění

Konstant Z dokončení**Tab. 5.5** Parametry obrábění

Nástroj	fréza s rovným čelem ø4 mm
Tolerance	0,005 mm
Přídavek axiální	0 mm
Přídavek radiální	0 mm
Krok dolů	min. 0,5 mm
Směr obrábění	sousledný
Referenční dráha	Dohrubování d6
Otáčky vřetene	5500 ot.min ⁻¹
Posuvová rychlost	400 mm.min ⁻¹
Sjezdová rychlost	40 mm.min ⁻¹
Řezná rychlost	69 m.min ⁻¹
Posuv na zub	0,072727 mm
Čas obrábění dle PowerMILLu	21 minut 26 sekund
Skutečný čas obrábění	34 minut 58 sekund



Obr. 5.13a Dokončení tvaru lopatek



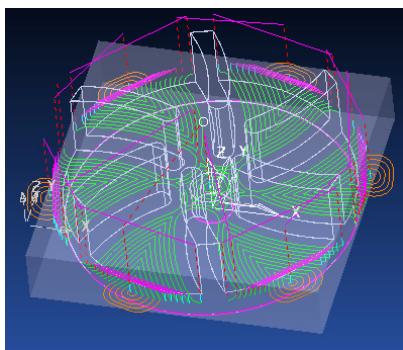
Obr. 5.13b Dokončení tvaru lopatek

Dokončení ploch offsetem

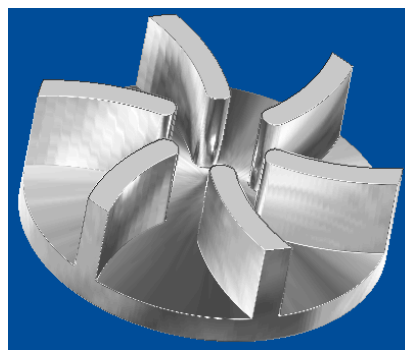
Volba dokončovací strategie vychází nejen z tvarů a rozměrů modelu, ale i z požadované drsnosti povrchu jednotlivých ploch obrobku. Zvolená hrubovací strategie je z pravidla aplikována na celek, což u dokončovacího obrábění většinou nelze. K dosažení parametrů definovaných technickým výkresem je mnohdy nutno aplikovat jednu strategii pouze na vybrané plochy, plochu nebo její část. (19, 20)

Tab. 5.6 Parametry obrábění

Nástroj	fréza s rovným čelem ø4 mm
Tolerance	0,005 mm
Přídavek axiální	0 mm
Přídavek radiální	0 mm
Krok	0,8 mm
Směr obrábění	sousledný
Otáčky vřetene	5500 ot.min ⁻¹
Posuvová rychlost	400 mm.min ⁻¹
Sjezdová rychlost	40 mm.min ⁻¹
Řezná rychlost	69 m.min ⁻¹
Posuv na zub	0,072727 mm
Čas obrábění dle PowerMILLu	12 minut 5 sekund
Skutečný čas obrábění	19 minut 14 sekund



Obr. 5.14a Dokončení ploch offsetem



Obr. 5.14b Dokončení ploch offsetem

Po nadefinování všech obráběcích strategií následovala kontrola všech vygenerovaných drah na bourání a kolize. Jakmile byly všechny dráhy zkontrolovány a test proběhl v pořádku byl vygenerován NC kód postprocesorem a byl odeslán do CNC stroje. Ve stroji se provedlo načtení kódu, následovalo nastavení potřebných parametrů a nakonec kontrola simulací. Poté se přešlo na reálnou výrobu součástí.

Při obrábění bylo zjištěno, že časy, které byly vypočteny PowerMILlem byly cca o 25 až 40 procent nižší, než tomu bylo ve skutečnosti. Na tuto skutečnost je dobré brát ohled a při simulaci časy násobit koeficienty 1,25 až 1,4 podle zvolené strategie pro dosažení přesnějších odhadů časů před výrobou.

5.3 Tvorba voskového modelu v silikonové formě

5.3.1 Tisk a úprava master modelu

V našem případě bylo použito pro tisk 3D modelu tiskárny Dimension firmy Stratasys. Práce s tímto zařízením začíná obslužným programem Catalyst. Zařízení pro které jsou data připravována je tiskárna Dimension BST 768.

Tiskárna pracuje na principu Fused Deposition Modeling (FDM) viz. kapitola 3.2.5. Model je takto postaven během několika minut až hodin s použitím nezbytného množství materiálu.

Tab. 5.7 Technické parametry Dimension BST 768

Velikost tiskového prostoru (X, Y, Z)	Maximálně 203 x 203 x 305 mm
Tloušťka vrstev	0,24 a 0,33 mm
Modelovací Materiál	ABS plast v barvě bílé (standart), modré, žluté, černé, červené, zelené a kovově šedé. Kazeta s ABS modelovacím materiálem (922 cm ³). Kazeta s materiálem podpory (922 cm ³)
Komunikace přes počítačovou síť	TCP/IP 10/100 base T connection
Kompabilita	Windows NT 4.0, Windows 2000, Windows XP



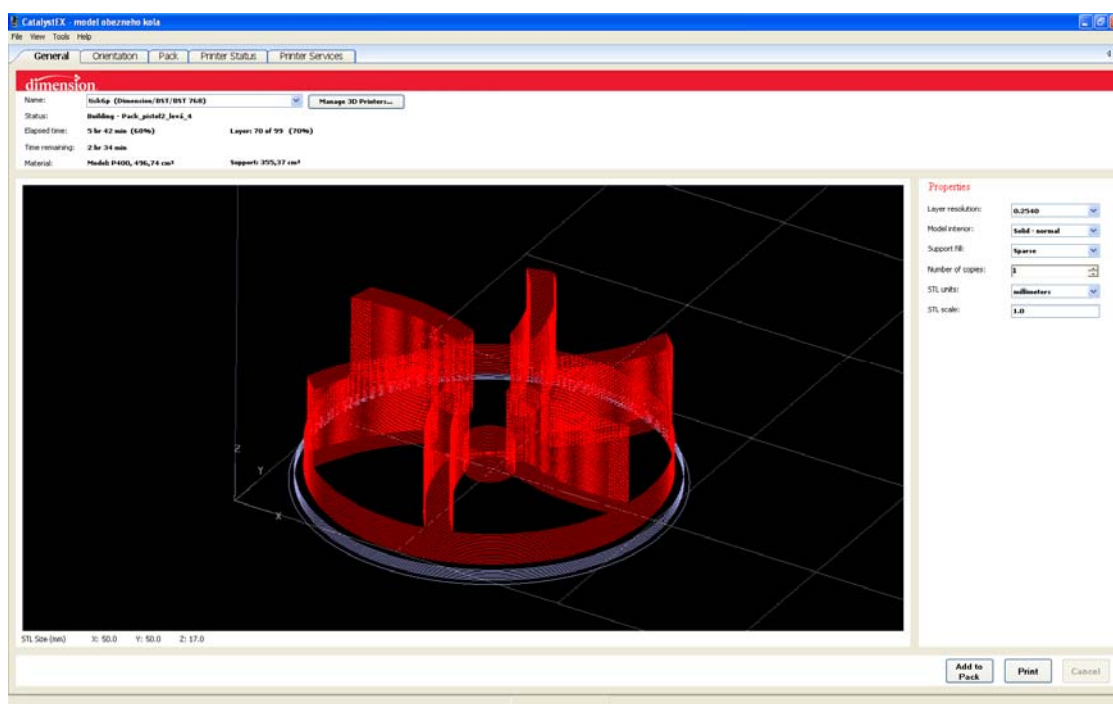
Obr. 5.15 Dimension BST 768 (20)

Pro samotný tisk modelu je důležité mít připravená vhodná data. Program Catalyst pracuje s daty ve formátu STL (stereolithography). Tento formát byl vyvinut pro snadný překlad 3D modelů pro výrobu metodami rapid prototyping.

Práce s programem Catalyst začíná načtením dat ve formátu *.stl. Při načítání malých dílů se program ujistí, zda není součást vytvořena v palcích a nemá provést konverzi. Model je načten do virtuální tiskové komory a zapoložován pomocí souřadného systému. Umístění v ose Z je automaticky posunuto na nejspodnější plochu. Pro další orientaci v prostoru slouží předdefinované pohledy nebo volné rotování a posouvání modelu pomocí prostředního tlačítka myši a klávesy Ctrl. Pro jiné nastavení polohy modelu v prostoru slouží záložka Orientation. Zde je možno volit z automatické pozice určené programem nebo ručního zapoložování.

Vhodné ustavení modelu je závislé na několika parametrech:

- velikosti modelu,
- poloze převislých částí,
- předpokládanému zatížení,
- designových parametrech plochy součásti.



Obr. 5.16 Prostředí softwaru Catalyst

Po nastavení polohy následuje volba parametrů tisku. Parametry nalezneme v záložce General. Parametry se nachází v okně Properties. *Layer resolution* – nastavení tloušťky tiskové vrstvy. Lze nastavit tloušťku 0,2540 nebo 0,3302. Menší tloušťka je doporučena pro modely s detaily a pro lepší optické parametry. Větší pro součásti velkých rozměrů pro zkrácení času stavby. *Model interiér* – parametr určující

vnitřní strukturu modelu. *Solid normal* vyplní celý model materiálem. *Spase* vytvoří ve vnitřních prostorách modelu voštinu. Toto přispívá ke značné úspoře materiálu a tiskového času. *Support fill* – ovlivňuje strukturu podpor. Možnosti jsou stejné jako u Modelu. Další volby jsou počet kopií modelu který se vytváří – *Number of copies*. Jednotky ve kterých je model (mm/inch) – *STL units*. Posledním parametrem lze určit měřítko modelu – *STL Scale*.

Po určení všech parametrů je příprava modelu hotova. Samotné zpracování je započato příkazem *process STL*. Při tomto procesu je model nařezán na vrstvy, následně jsou vygenerovány podpory a vytvořena dráha tiskové hlavy. Dráhy jsou zapsány do souboru *.CMB. Vygenerovaný CMB soubor je dále nutno umístit do prostoru podložky. V záložce *Pack* je možno provést umístění. Model je zde zobrazen jako kontura, kterou lze umístit do jakékoli polohy na podložce. Dalšími možnostmi je kopírování, mazání a vyčištění celého prostoru. Jakmile je provedeno rozmístění modelu na podložce, odešle se celý soubor do tiskárny příkazem *Print*.

K monitorování stavu tisku slouží záložka *Printer Status*. Zde jsou informace o době tisku, která již proběhla – *Elapsed time* a o době zbývajících k dokončení modelu – *Time remaining*. Je zde také informace o zbývajícím a materiálu v zásobníku, jak pro stavěcí materiál, tak pro materiál podpor. Fronta tiskových úloh *Build Queue* umožňuje sledovat pořadí a informace o jednotlivých úlohách nahraných v tiskárně.

Těmito funkcemi a kroky se řídí uživatelská část práce s programem Catalyst. Program nabízí další možnosti, které jsou určeny k administrátorským úkonům.

Pro tisk master modelu byly zvoleny následující vlastnosti:

Typ materiálu byl zvolen ABS jelikož nebude velké mechanické zatěžování. Hodnota tloušťky vrstvy byla nastavena na hodnotu 0,254 mm, protože jsou potřeba velké detaily. Hrubý povrch by byl obtisknut do silikonové formy a tím by nebyla zcela přesná. Z důvodu malé velikosti master modelu nebylo třeba volit dutý materiál.



Obr. 5.17 Vytisknutý master model

Vytisknutý master model byl dále vybroušen a upraven podle postupu, který je uveden v kapitole 3.4.

**Obr. 5.18** Vytmelený master model**Obr. 5.19** Vybroušený master model

5.3.2 Výroba silikonové formy

První část postupu je výroba formy „skleněného boxu“ s ABS modelem, pro tvorbu silikonové formy. Prakticky se vytvoří boxy dva: pro horní a spodní díl formy. Jedná se o modelářský úkon, při kterém je nutno vyformovat z plastelíny dělicí rovinu budoucí formy (obr. 5.21), vložit master model a připravit negativ pro vtokovou dutinu. (23)

**Obr. 5.20** Skleněný box pro spodní díl silikonové formy

Druhou částí je příprava materiálu budoucí formy. Materiál formy je tvořen silikonovou hmotou a tužidlem. Aby forma měla vlastnosti garantované výrobcem, je nutné tyto dva komponenty smíchat v daném poměru. V experimentu byly použity tyto dvě složky:

- Kondenzační silikonkaučuk Elastosil M 4541
- Tvrdidlo T 56

Výrobce těchto produktů uvádí mísící poměr 100:5. Odměrování proběhlo na digitálních laboratorních váhách. Hrubým výpočtem bylo zjištěno, že je třeba 112 cm^3 směsi, což odpovídá 112 g směsi. Na obrázku 4.16 můžeme vidět, jak probíhalo odvažování.

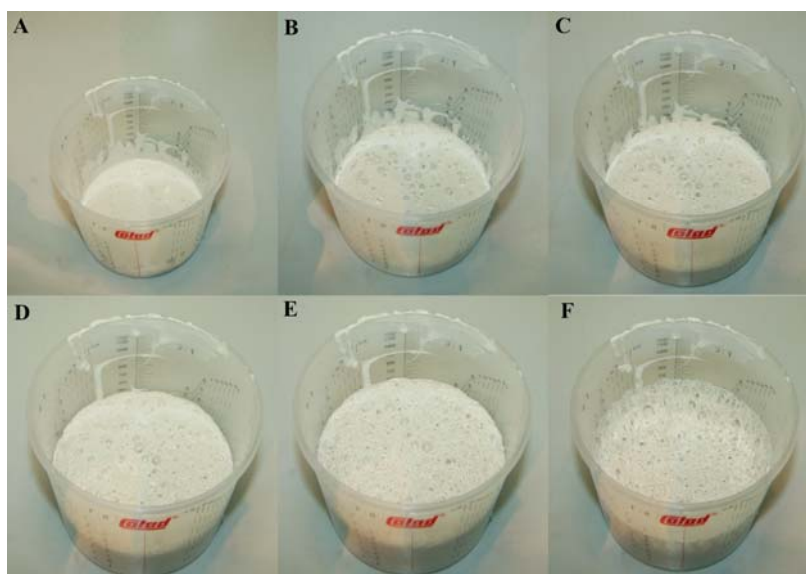
Po smíchání byla směs vložena do vakuového licího systému a postupně byla vyvakuována pro zbavení hmoty vzduchu (bublin). Při tomto procesu dochází k tzv. varu, kdy bubliny vyplouvají na hladinu. Vakuace musela být několikrát přerušena krátkým otevřením vzduchového ventilu, při kterém došlo k absorpci bublin z hladiny. Tímto způsobem došlo k úbytku maximálního množství vzduchu ze směsi, čímž se docílilo kvalitně odplyněné struktury. (23)



Obr. 5.21 Odvažování silikonové směsi



Obr. 5.22 Model s dělicí rovinou

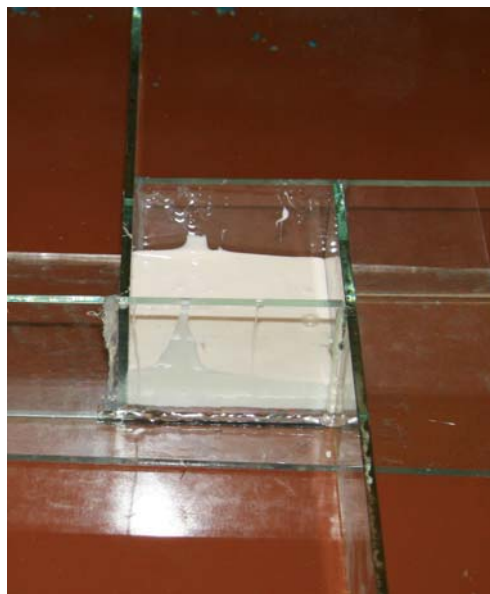


Obr. 5.23 Vakuování silikonové směsi

Při nekvalitním odplynění vznikají póry na stěnách formy, do kterých při následném lití zatéká vosk. Tyto zatekliny mají za následek znehodnocení voskového modelu a tedy vznik zmetků. Složení silikonu někdy ovlivňuje čas, během kterého je možno ponechat silikon pod vakuem. Dále musí být dodržena doba zpracování. To znamená čas od smíchání silikonu s tužidlem do doby odlití formy. (23)



Obr. 5.24 Vakuový licí systém



Obr. 5.25 Spodní díl formy

Další částí bylo odlití spodního dílu silikonové formy. Po dostatečném vyvakuování formovací směsi, kdy už nevznikají bubliny (vakuovalo se 5 min) bylo vakuum odstraněno, směs byla vyjmuta z vakuovací komory a odlévalo se do skleněného boxu za atmosférického tlaku.



Obr. 5.26 Hotový spodní díl formy



Vytvrzení směsi probíhalo za normální pokojové teploty 8 hodin. Poté bylo možné rozebrat skleněný box, odstranit plastelinu a vyjmout polovinu silikonové

formy. Dále bylo provedeno začištění formy – odstranění útržků silikonu a tím byla hotova spodní polovina silikonové formy.

Jakmile byla hotova spodní část formy, přistoupilo se k výrobě druhé, a to vrchní části. Opět byl vytvořen skleněný box, ale nyní už podle hotového spodního dílu, který byl do boxu vložen, a to přesně obráceně, než při jeho výrobě. Ve formě zůstal i master model – jen plastelína byla odebrána. Všechny silikonové plochy byly očištěny a nanasl se na ně separátor, který zajistil, že k sobě obě poloviny formy nepřilnuly a byly od sebe bezproblémově odděleny. Při přípravě tohoto dílu formy musel být z plastelíny vymodelován vtok a vhodně vložen do budoucí formy na master model aby byla zajištěna vtoková soustava pro odlévání vosků. Poté byla opět namíchána silikonová směs a provedlo se její odvakuování. Za atmosférického tlaku byl odlit vrchní díl formy.



Obr. 5.27 Příprava pro odlití vrchního dílu formy

Po vytvrzení byl rozebrán skleněný box. Následně pomocí speciálních kleští byly od sebe odděleny obě části formy a poté byl vyjmut master model. Následovalo odstranění plastelíny – vtoková soustava byla vyčištěna a provedlo se začištění a odstranění otřepů. Nakonec byla silikonová forma složena. Tím je celá forma hotova a připravena pro odlévání voskových modelů.



Obr. 5.28 Dokončená forma

Na výrobu této formy bylo použito silikonkaučuku Elastosil M 4541 a tvrdidla T 56 dodány firmou Trans Tech Tooling s.r.o. a měly tyto vlastnosti:

Obecné:

Elastosil M 4541 je dobře odlévatelný dvousložkový silikonkaučuk s kondenzačním vytvrzováním při pokojové teplotě a je:

- dobře tekutý a odplyňující,
- se střední tvrdostí Shora A asi 30,
- velmi průtažný a pružný,
- vysoce odolný proti vzniku trhlin,
- velmi dobře odolný pro odlévání zejména polyuretanů a polyesterů. Formy mají mimořádně dlouhou životnost.

Použití:

Elastosil M 4541 je víceúčelový materiál vhodný zejména na formy pro reprodukci modelů s velkými negativními úkosy. Je vhodný pro formy na odlévání polyesterových a polyuretanových pryskyřic.

Charakteristika produktu:

Barva:	bílá
Hustota při 23 °C:	1,17 g/cm ³
Viskozita při 23 °C dle Brookfielda:	30000 MPa.s
Viskozita s 5% tvrdidla T 51 při 23 °C dle Brookfielda:	25000 MPa.s

Fyzikální vlastnosti:

Tyto vlastnosti jsou k dosažení při vytvrzení s 5% tvrdidla T 51 po 4 dny při 23 °C a 50% relativní vlhkosti.

Hustota:	1,16 g/cm ³
Tvrdost Shore A:	30
Pevnost v tahu:	5 N/mm ²
Protažení do lomu:	400 %
Délkové smrštění:	< 0,4 %

Zpracování:

Pokud se bude do formy odlévat epoxidová nebo polyuretanová pryskyřice, použijí se k vytvrzování Elastosilu M 4541 tvrdidlo T 21 s dlouhou dobou zpracování a vytvrzování. Pro formy na odlévání polyesterů, sádry, betonu, umělého kamene, vosků nebo nízkotavitelných kovů se k vytvrzování používá tvrdidlo T 51 s dlouhou dobou zpracování a vytvrzování anebo tvrdidlo T 56 s krátkou dobou zpracovatelnosti a vytvrzování.

Skladování:

Elastosil M 4541 a tvrdidla jsou použitelné při skladování v původních neotevřených obalech v rozmezí teplot 5 – 30 °C minimálně 12 měsíců. Období použitelnosti je vyznačeno na etiketě od výrobce. U materiálů, u nichž došlo

k překročení stanovené doby použitelnosti tato skutečnost ještě neznamená, že jsou nepoužitelné, ale je třeba je nejdříve prakticky odzkoušet.

Bezpečnostní informace:

Elastosil M 4541 je silikonkaučuk s kondenzačním typem vytvrzování obsahuje pouze složky, které byly po mnoho let testovány a jsou netoxické a neagresivní. Proto není vyžadováno žádné speciální zacházení. Nutno dodržovat všeobecné hygienické předpisy pro pracující v průmyslu. Tvrdidlo T 56 obsahuje organotin a je hořlavé – bod vzplanutí je vyšší jak 50 °C a ve styku s očima a pokožkou může způsobit podráždění.

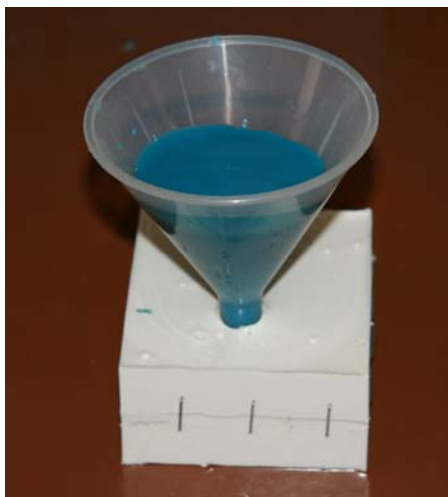
5.3.3 Výroba voskového modelu

Vosk byl v granulovaném stavu nasypán do tavicí misky, která byla upevněna do držáku ve vakuovací komoře licího systému. V další fázi byl vosk roztaven na teplotu 75 °C a asi 20 minut vakuován. Než byl vosk nataven na tuto teplotu a vyvakuován, forma byla vložena do pece na cca 60 minut při 80 °C a poté byla vyjmuta a pojištěna v dělicí rovině sponami, aby se nerozdělávala. Vakuování vosků je stejné jako vakuování silikonových směsí, jen proces odplynění probíhá bouřlivěji než u silikonu. Z tohoto důvodu bylo velmi důležité hlídat hodnotu vakua v komoře a při nebezpečí roztržiku vosku otevřít vzduchový ventil. Následně byla vložena forma do vakuovací komory. Zásada při plnění vosku do silikonové formy je plnit od spodu nahoru, to znamená, že forma by měla být horizontálně nakloněna. Dosáhne se tak postupného vyplouvání zbylých mikrobublinek z formy. Licí hladina by měla být umístěna těsně nad trychtýřem, aby nedocházelo k sycení proudu vosku vzduchem. Komora byla utěsněna a znovu probíhalo vakuování na -1 bar, ale nyní už pouze asi 5 minut aby forma nezchladla. Poté bylo sníženo vakuum na -0,7 baru, aby se uklidnily vzduchové bubliny a bylo provedeno odlití modelu. Následně byl otevřen vzduchový ventil a atmosférický tlak dotlačil vosk do formy. (23)

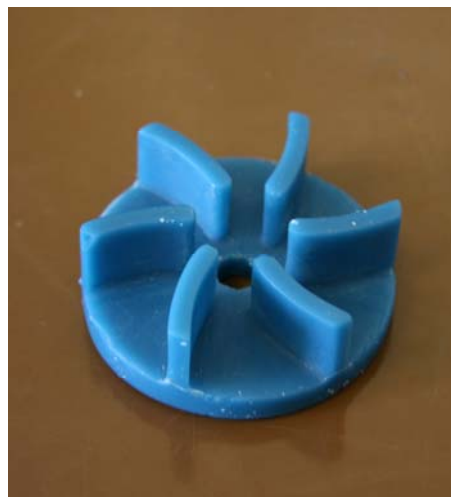


Obr. 5.29 Odlévání voskového modelu

Po odlití byla forma vyjmuta z komory a nechala se 120 minut vychladnout. Tento proces se může urychlit sníženou teplotou – např. vložení formy do ledničky. Poté byl ztuhlý voskový model z formy vyjmut a proces se po očištění formy může opakovat. Voskové modely se očistí a oddělí se vtok. Tím jsou připraveny pro následné zpracování technologií vytavitelného modelu.



Obr. 5.30 Chladnutí modelu



Obr. 5.31 Výsledný voskový model

Při výrobě tohoto voskového modelu nebyly ve formě použity odvzdušňovací kanálky a i přesto byl výsledný model kvalitní, bez pórů a povrchových vad. Kdyby obsahoval povrchové vady – vzduchové bubliny, které by vadily při následné výrobě, byly by ve formě dodatečně vyrobeny odvzdušňovací kanálky, které by nám zajistily potřebnou kvalitu povrchu voskového modelu.

5.4 Tvorba voskového modelu v hliníkové formě

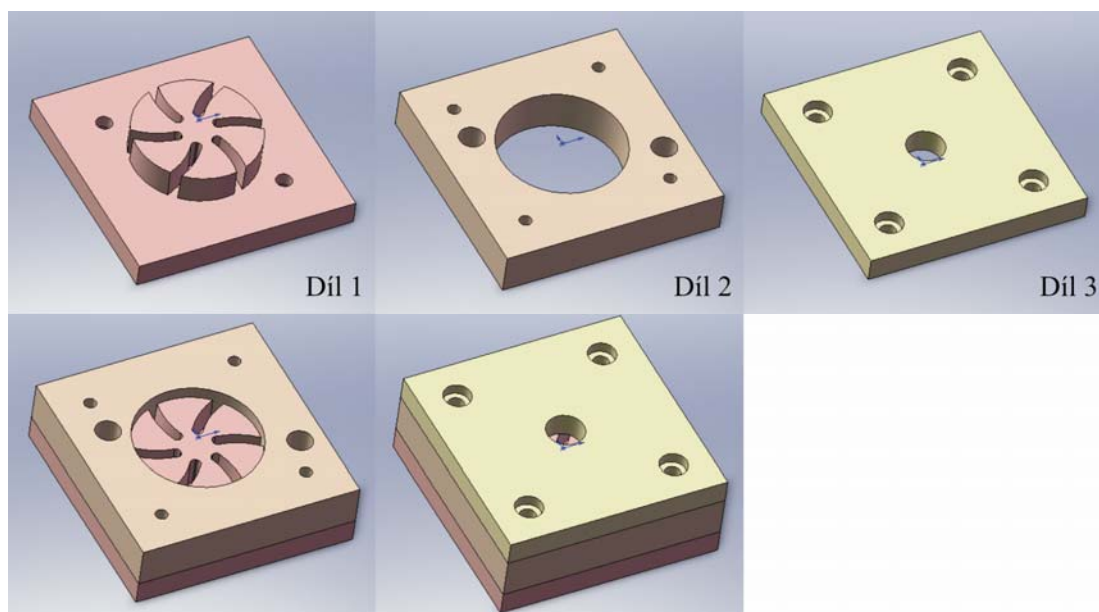
5.4.1 Návrh hliníkové formy

Pro návrh hliníkové formy byl použit software SolidWorks 2007. Nutnou podmínkou pro výrobu forem z hliníkových materiálů je tvorba úkosů. Při absenci úkosů by byl voskový model z této formy nevyjmutelný. Hodnota úkosů u této formy byla zvolena $1,5^\circ$. Z důvodu, aby bylo možné vyfrézovat ostrou hranu pro lopatku, musela být forma řešena ze třech dílů, které se následně pomocí kolíků a šroubů sestavily do konečné podoby. Forma byla vyrobena z duralu.

5.4.2 Výroba hliníkové formy

Forma se skládá ze tří hlavních částí (obr. 5.33). V této části se budeme zabývat výrobou dílu 1, jelikož díly 2 a 3 jsou jednoduché a nebylo třeba pro ně vytvářet program v PowerMillu, ale pouze v řídicím systému NC stroje. Jakmile byl vytvořen model, byl proveden import modelu do PowerMillu. Definování polotovaru, souřadného systému pro obrábění a definování řezných nástrojů bylo stejné jako

v kapitole (5.2) Pouze byly použity jiné parametry. Polotovar byl již se zarovnaným čelem, proto bylo možné v prvním kroku přistoupit k hrubování. V následujícím postupu budou popsány strategie a jejich definování v pořadí, v jakém bylo prováděno obrábění. Strategie, u kterých není uveden jejich popis, jsou již popsány v kapitole 5.2.

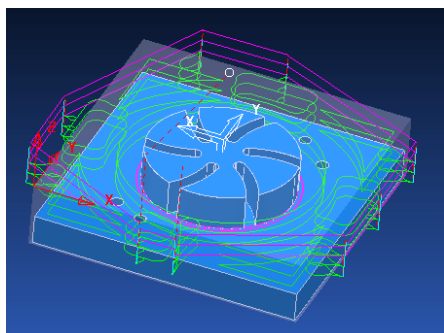


Obr. 5.32 Návrh formy

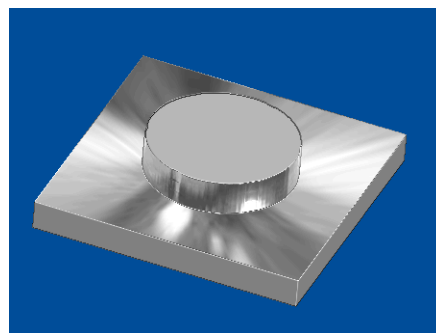
Hrubování offsetem

Tab. 5.8 Parametry obrábění

Nástroj	fréza s rovným čelem $\varnothing 20$ mm
Tolerance	0,05 mm
Přídavek axiální	0,2 mm
Přídavek radiální	0,2 mm
Krok	16 mm
Krok dolů	5 mm
Směr obrábění	sousledný
Otáčky vřetene	3000 ot.min ⁻¹
Posuvová rychlost	300 mm.min ⁻¹
Sjezdová rychlost	30 mm.min ⁻¹
Řezná rychlost	188,496 m.min ⁻¹
Posuv na zub	0,05 mm
Čas obrábění dle PowerMILLu	13 minut 23 sekund
Skutečný čas obrábění	17 minut 56 sekund



Obr. 5.33a Hrub. Offsetem - dráhy

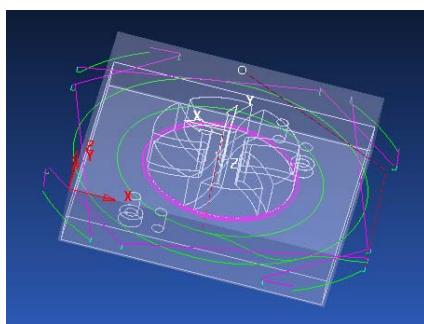


Obr. 5.33b Hrub. Offsetem - simulace

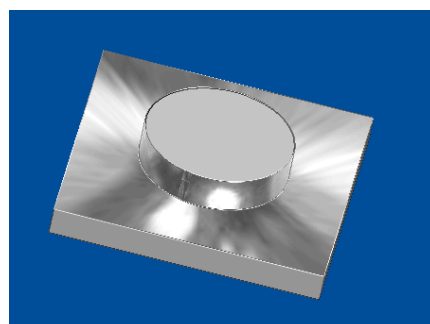
Dokončení ploch offsetem

Tab. 5.9 Parametry obrábění

Nástroj	fréza s rovným čelem ø20 mm
Tolerance	0,005 mm
Přídavek axiální	0 mm
Přídavek radiální	0 mm
Krok	15 mm
Směr obrábění	sousledný
Otáčky vřetene	4000 ot.min ⁻¹
Posuvová rychlost	300 mm.min ⁻¹
Sjezdová rychlost	30 mm.min ⁻¹
Řezná rychlost	251,327 m.min ⁻¹
Posuv na zub	0,0375 mm
Čas obrábění dle PowerMILLu	3 minuty 23 sekund
Skutečný čas obrábění	1 minuta 56 sekund



Obr. 5.34a Dokončení ploch offsetem



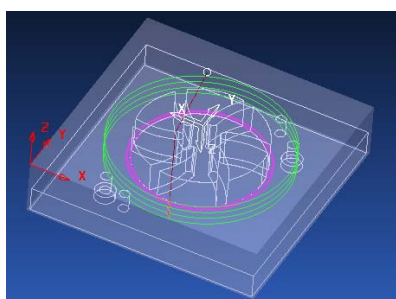
Obr. 5.34b Dokončení ploch offsetem

Konstant Z dokončení

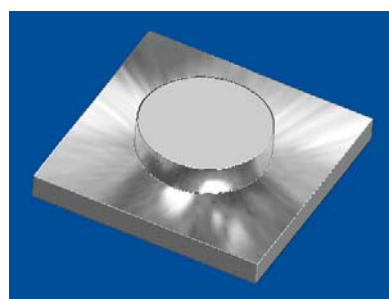
Tab. 5.10 Parametry obrábění

Nástroj	fréza s rovným čelem ø20 mm
Tolerance	0,005 mm

Přídavek axiální	0 mm
Přídavek radiální	0 mm
Krok dolů	min. 3 mm
Směr obrábění	sousledný
Otáčky vřetene	4000 ot.min ⁻¹
Posuvová rychlost	400 mm.min ⁻¹
Sjezdová rychlost	40 mm.min ⁻¹
Řezná rychlost	251,327 m.min ⁻¹
Posuv na zub	0,05 mm
Čas obrábění dle PowerMILLu	2 minuty 18 sekund
Skutečný čas obrábění	1 minuta 32 sekund

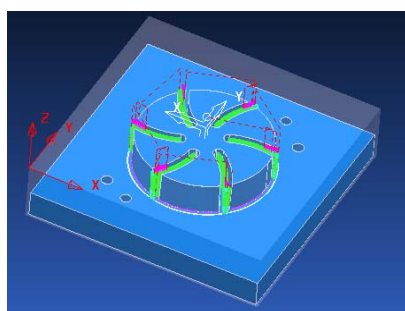


Obr. 5.35a Konstant Z dokončení

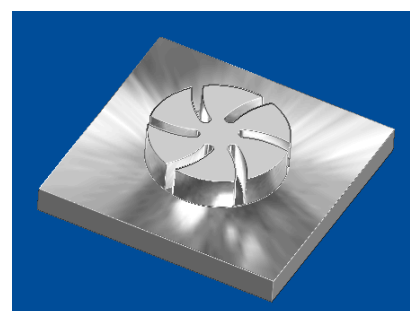


Obr. 5.35b Konstant Z dokončení

Hrubování offsetem



Obr. 5.36a Hrub. Offsetem - dráhy



Obr. 5.36b Hrub. Offsetem - simulace

Tab. 5.11 Parametry obrábění

Nástroj	fréza s rovným čelem ø3 mm
Tolerance	0,005 mm
Přídavek	0,1 mm
Krok	0,6 mm
Krok dolů	0,3 mm
Směr obrábění	sousledný
Otáčky vřetene	5500 ot.min ⁻¹

Posuvová rychlost	200 mm.min ⁻¹
Sjezdová rychlost	20 mm.min ⁻¹
Řezná rychlost	51,8363 m.min ⁻¹
Posuv na zub	0,018182 mm
Čas obrábění dle PowerMILLu	1hodina 48 minut 20 sekund
Skutečný čas obrábění	1hodina 50 minut 7 sekund

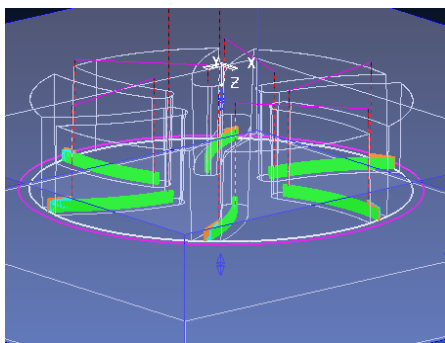
Dokončení optimalizovaným konstant Z:

Tato strategie v sobě spojuje strategie Konstant Z a 3D Offset. Tam, kde je model strmý, je použita strategie Konstant Z a pro ostatní oblasti je použita 3D Offset. Pokud je zatržena volba Uzavřít Offsety, budou oblasti 3D Offset nuceny směřovat z venku dovnitř nebo opačně, pokud tato volba zatržena není. Obrábění 3D Offset definuje krok relativně ke 3D tvaru povrchu, což poskytuje konzistenci jak na rovných plochách, tak na prudkých stěnách.

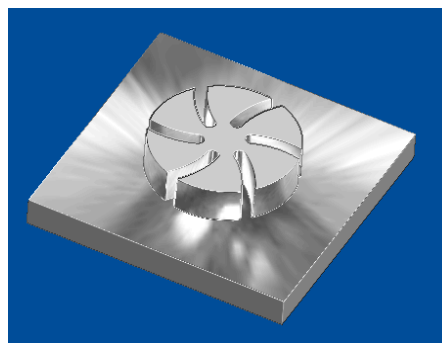
Tab. 5.12 Parametry obrábění

Nástroj	fréza kulová ø3 mm
Tolerance	0,005 mm
Přídavek	0 mm
Krok	0,2 mm
Směr obrábění	sousledný
Otáčky vřetene	5500 ot.min ⁻¹
Posuvová rychlost	150 mm.min ⁻¹
Sjezdová rychlost	15 mm.min ⁻¹
Řezná rychlost	51,8363 m.min ⁻¹
Posuv na zub	0,013636 mm
Čas obrábění dle PowerMILLu	5 hodin 3 minuty 11 sekund
Skutečný čas obrábění	3 hodiny 23 minut 20 sekund

Dokončení optimalizovaným konstant Z



Obr. 5.37a Dok. opt. konst. Z - dráhy



Obr. 5.37b Dok. opt. konst. Z - simulace

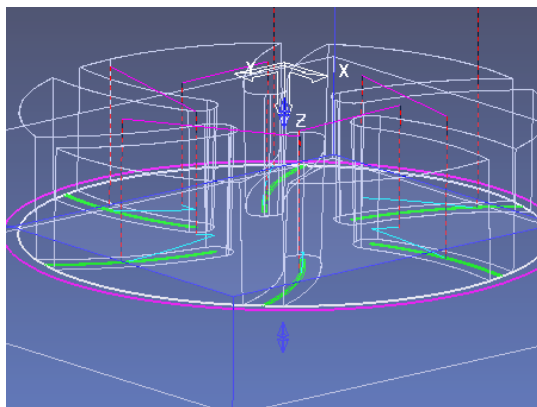
Jelikož předchozí technologie byla prováděná kulovou frézou o průměru 3 mm, nebylo možné dokončovací technologií obrobit hrany drážek pro lopatky až dolů – zůstaly by neobrobené plochy s výškou rádiusu této frézy. Z tohoto důvodu byla tato technologie definována znovu, avšak jen to výšky 1,5 mm nad dno drážek s rovnou frézou.

Tab. 5.13 Parametry obrábění

Nástroj	fréza s rovným čelem $\varnothing 3$ mm
Tolerance	0,005 mm
Přídavek	0 mm
Krok	0,07 mm
Směr obrábění	sousledný
Otáčky vřetene	5500 ot.min ⁻¹
Posuvová rychlost	200 mm.min ⁻¹
Sjezdová rychlost	20 mm.min ⁻¹
Řezná rychlost	51,8363 m.min ⁻¹
Posuv na zub	0,018182 mm
Čas obrábění dle PowerMILLu	1 hodina 23 minut 5 sekund
Skutečný čas obrábění	55 minut 48 sekund

Dokončení ploch offsetem

Touto strategií byly dokončeny plochy na dnech drážek pro lopatky.



Obr. 5.38 Dok. ploch offsetem - dráhy

Tab. 5.14 Parametry obrábění

Nástroj	fréza s rovným čelem $\varnothing 3$ mm
Tolerance	0,005 mm
Přídavek	0 mm
Krok	0,2 mm
Směr obrábění	sousledný
Otáčky vřetene	5500 ot.min ⁻¹

Posuvová rychlost	200 mm.min ⁻¹
Sjezdová rychlost	20 mm.min ⁻¹
Řezná rychlost	51,8363 m.min ⁻¹
Posuv na zub	0,018182 mm
Čas obrábění dle PowerMILLu	8 minut 23 sekund
Skutečný čas obrábění	5 minut 9 sekund



Obr. 5.39 Dokončování dílu 1

Po dokončení této strategie byla součást vyjmuta a očištěna. Díry pro šrouby nebyly úmyslně vrtány – svrtání s dílem 2 a 3 bylo provedeno až na konci výroby.

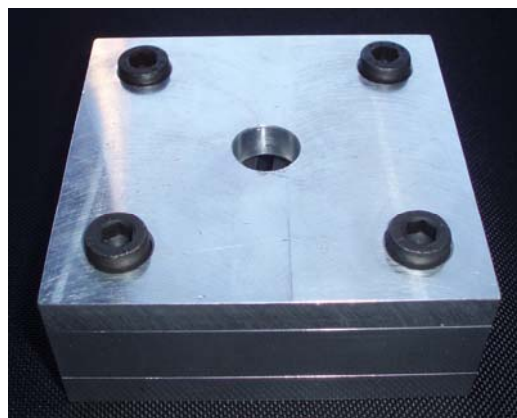


Obr. 5.40 Hrubování dílu 2

Poté byl upnut polotovar pro díl 2 a přímo na stroji byl vytvořen program. Tento program obsahoval pouze obrobení středové díry a dvou dír pro kolíky. Středová díra byla obráběna rovnou frézou o průměru 20 mm. Na průměr 50 mm se spirálovitě rozjíždělo od středu polotovaru. Abychom odlehčili zatížení při zavrtávání, byla nejdříve díra předvrtána vrtákem o průměru 7 mm. Díry pro kolíky byly též frézovány. Tím byl díl 2 hotový a přešlo se k výrobě poslední části.

Otvory pro šrouby byly svrtány dohromady s dílem 2. Následně byl vyvrtán nalévací otvor a zahloubení pro šrouby. Následovalo svrtání dílu 1 a 2 a poté řezání závitů v dílu 2.

Tím byla forma obrobená. Provedlo se už pouze důkladné odmaštění, odjehlení a vysušení. Poté byly nalepeny kolíky do středního dílu a spojení částí formy pomocí šroubů. Tím byla forma připravena pro odlévání voskového modelu.



Obr. 5.41 Dokončená forma



Obr. 5.42 Odlitý voskový model



Obr. 5.43 Model odlitý do silikonové formy



Obr. 5.44 Model odlitý do hliníkové formy

TECHNICKO – EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Cílem této kapitoly je porovnání všech tří technologií, kterými se dospělo k finálnímu výrobku a to:

- 1) Kusová výroba
- 2) Technologie přesného lití na vytavitelný model s výrobou silikonové formy a následné odlití oběžného kola
- 3) Technologie přesného lití na vytavitelný model s výrobou hliníkové formy a následné odlití oběžného kola

Při tomto zhodnocení jsou uvažovány tři série a to:

- a) 10 kusů výrobků
- b) 100 kusů výrobků
- c) 1000 kusů výrobků

5.5 Kusová výroba

Cenová kalkulace výroby této součásti byla provedenou firmou Uniplet a.s., Průmyslová 159, 674 01 Třebíč.

Použitý polotovar:

Polotovar: Tyč kruhová KR 56-20mm

Materiál: EN AW-6082 AlMgSi1

Cena za 1kus polotovaru: 73 Kč

Cena práce na výrobu tohoto dílu byla uvedenou firmou vyčíslena na 800 Kč/kus. Tato cena je již konečná, včetně režii, kterou si firma účtuje (včetně DPH).

Tab. 6.1 Přehled výrobních cen

Výrobní cena 10 kusů:	8 000 Kč
Výrobní cena 100 kusů:	68 000 Kč (15% sleva)
Výrobní cena 1000 kusů:	640 000 Kč (20% sleva)

Tab. 6.2 Přehled nákladů na danou sérii

Celková cena 10 kusů:	8 730 Kč
Celková cena 100 kusů:	75 300 Kč
Celková cena 1000 kusů:	713 000 Kč

Tab. 6.3 Konečná cena jednoho kusu výrobku při dané sérii

Při výrobě 10 kusů	873,-
Při výrobě 100 kusů	753,-
Při výrobě 1000 kusů	713,-

5.6 Technologie přesného lití na vytavitelný model s výrobou silikonové formy a následné odlití oběžného kola

Cenovou nabídku na výrobu silikonové formy provedla firma MCAE Systems, s.r.o., Knínická 1771, 664 34 Kuřim, Brno – venkov. Za výrobu této formy by si účtovala tato společnost 4500 Kč včetně DPH.

Tab. 6.4 Přehled materiálů a cen

Cena 1cm ³ ABS materiálu	13,-
Cena master modelu včetně tmelení a broušení	1720,- (z toho 220,- materiál)
Elastosil M4541 5 Kg	4177,-
Katalizátor T56	393,-
Množství potřebné na vyrobení formy	235,5 g
Cena silikonové směsi na jednu sil. formu	216,-
Cena voskového modelu	5,- (60,- 1kg vosku)
Cena jednoho odlitku při výrobě 10 kusů	150,-
Cena jednoho odlitku při výrobě 100 kusů	80,-
Cena jednoho odlitku při výrobě 1000 kusů	72,-
Materiál odlitku	AlSi7Mg0,6 (En Ac 42200)

Tab. 6.5 Konečná cena jednoho kusu výrobku při dané sérii

Při výrobě 10 kusů (1 forma)	777,-
Při výrobě 100 kusů (5 forem)	254,-
Při výrobě 1000 kusů (25 forem)	233,-

5.7 Technologie přesného lití na vytavitelný model s výrobou hliníkové formy a následné odlití oběžného kola

Při ekonomickém hodnocení výroby této formy byly použity cenové kalkulace, které byly ochotně poskytnuty firmou Uniplet a.s., Průmyslová 159, 674 01 Třebíč.

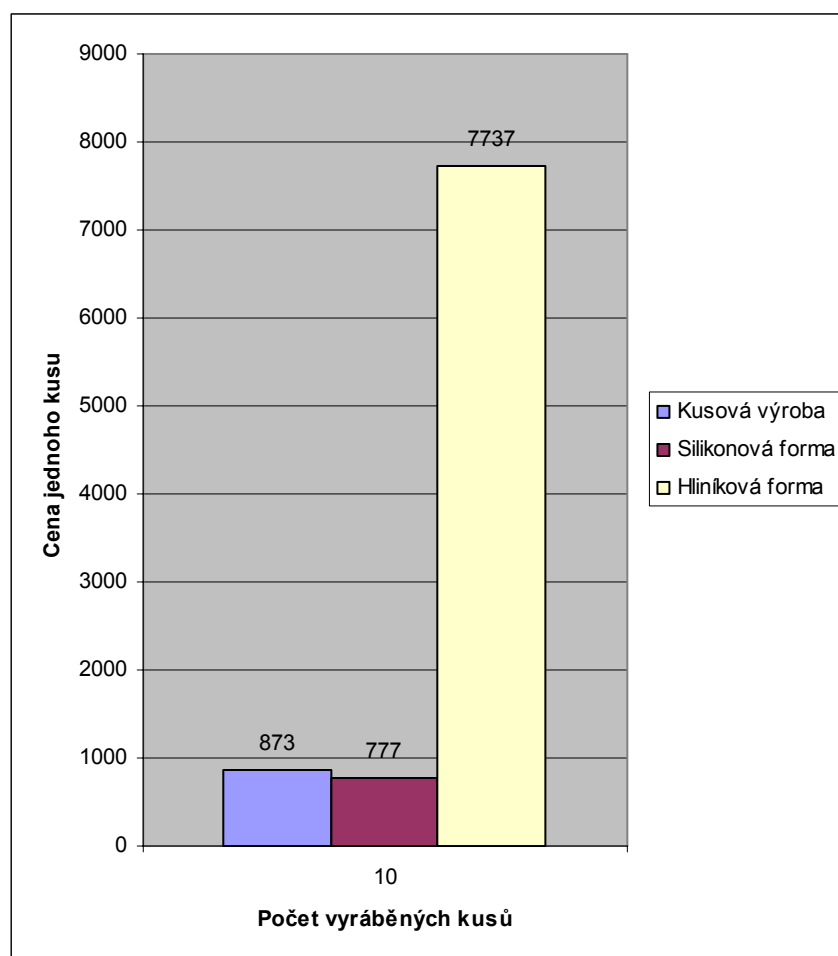
Tab. 6.6 Přehled materiálů a cen

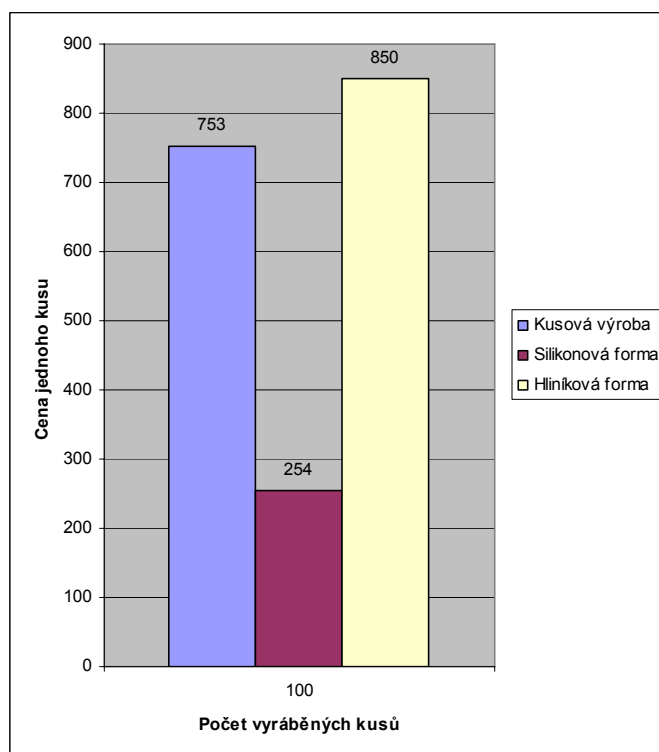
Materiál formy	AlMgSi0,5
Celková cena polotovaru na jednu formu	371,-
Cena výroby vrchního dílu	1200,-
Cena výroby středního dílu	2500,-
Cena výroby hlavního dílu	9000,- (z toho 1000,- CNC program)
Celkem cena práce s režii	76 200,-
Celková cena formy	76 571,-
Cena voskového modelu	5,- (60,- 1kg vosku)
Cena jednoho odlitku při výrobě 10 kusů	150,-
Cena jednoho odlitku při výrobě 100 kusů	80,-
Cena jednoho odlitku při výrobě 1000 kusů	72,-
Materiál odlitku	AlSi7Mg0,6

Tab. 6.7 Konečná cena jednoho kusu výrobku při dané sérii

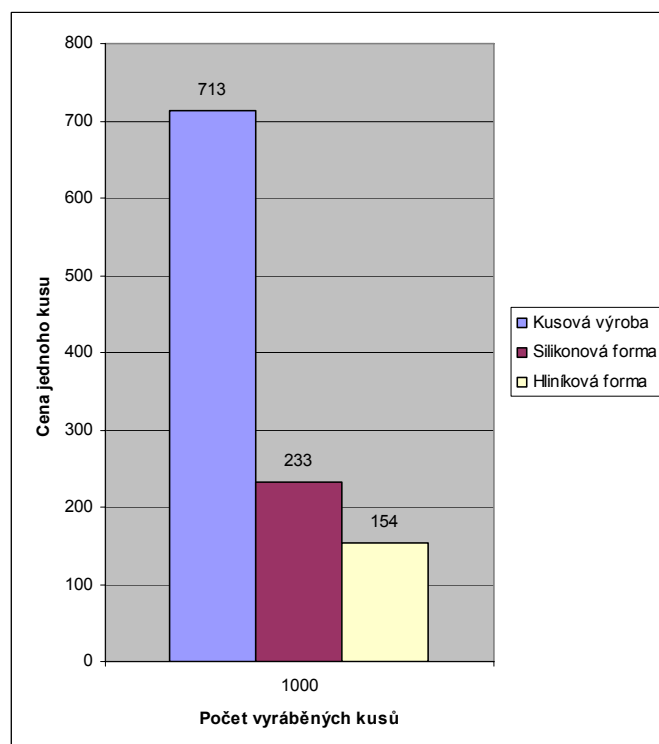
Při výrobě 10 kusů	7737,-
Při výrobě 100 kusů	850,-
Při výrobě 1000 kusů	154,-

Ceny odlití finálních výrobků byly zpracovány firmou FIMES, a. s., Sokolovská 573, 686 01 Uherské Hradiště.

**Graf 6.1** Cena jednoho kusu výrobku při dané technologii pro sérii 10 kusů výrobků



Graf 6.2 Cena jednoho kusu výrobku při dané technologii pro sérii 100 kusů výrobků



Graf 6.3 Cena jednoho kusu výrobku při dané technologii pro sérii 1000 kusů výrobků

ZÁVĚR

Tato práce zpracovává problematiku nového směru v technologii přesného lití na vytavitelný model, a to odlévání voskových modelů do silikonových forem a také již řadu let používanou technologii odlévání voskových modelů do hliníkových forem. Aby bylo možné porovnat tyto dvě technologie a jejich ekonomický dopad na výrobu součástí, bylo nutné tyto formy vyrobit. Při výrobě silikonové formy bylo využito moderní technologie Rapid Prototyping – na 3D tiskárně byl vytisknut model, který po zpracování byl zalit silikonovou směsí a tím byla forma po jejím vytvrzení hotova. Dále byl ve vakuovacím licím systému odlit voskový model. Poté byla obrobena hliníková forma a jeden kus oběžného kola na CNC frézce s využitím programovacího softwaru PowerMILL a následně se odléval voskový model vstřikováním do formy. Po této výrobě bylo osloveno několik firem, které ochotně poskytli cenové údaje o výrobě. Bylo možné vypracovat ekonomické zhodnocení mezi použitím těchto dvou technologií pro odlévání a také kusovou výrobou. Tyto tři technologie byly srovnány při výrobě 10, 100 a 1000 kusů výrobků.

Bylo zjištěno, že odlévání do silikonových forem je výhodné nejen pro malosériovou výrobu, ale již u deseti kusů výrobků je tato technologie finančně výhodnější, než kusová výroba na CNC strojích. Při tomto počtu kusů se jako krajně nevhodná metoda jeví lití do hliníkové formy, což ale bylo předpokládáno. Při sto kusech výrobků už je technologie lití do silikonových forem cenově na třetinových nákladech, než zbývající dvě technologie, které si jsou vynaloženými náklady již hodně blízko. Při jednom tisíci kusů hotových dílů už je nejvýhodnější hliníková forma. Zde už nepřipadá v úvahu kusová výroba obráběním na CNC strojích.

Odlévání voskových modelů do silikonových forem je nová progresivní metoda, která má po velmi krátké době své existence poměrně značné zastoupení mezi výrobci voskových modelů. Při experimentu bylo zjištěno, že již při deseti kusech výrobků je tato technologie finančně přijatelnější, než vyrábění součástky na CNC stroji. Časy na výrobu této dávky jsou si velmi podobné, i když na první pohled ne zcela patrné. Zhotovení formy touto metodou je jednoduchý proces, při kterém je velmi malá pravděpodobnost výroby zmetku a když už tak nastane, tak finanční škoda je daleko menší než když např. zlomíme frézu. Délka výroby této formy je závislá na době tisku modelu a hlavně na délce vytvrzování formy. Doba vytvrzování je závislá na vlhkosti vzduchu a druhu použité silikonové směsi. Tato technologie má velkou budoucnost v malosériové výrobě – zhotovení cca 20 – 500 kusů výrobků. Je dostatečně přesná a rychlá. Odhaduji, že vývoj této technologie bude směřovat do oblasti použitelných materiálů pro výrobu formy a rychlosti jejich vytvrzování.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. BEELEY, P.R., SMART, R.F. *Investment casting*, 1. vyd. London: The Institute of Materials, 2002. 357 s. ISBN 0-901716-66-9.
2. DOŠKÁŘ, J., GABRIEL, J., HOUŠŤ, M., PAVELKA, M. *Výroba přesných odlitků*, 1. vyd. Praha: SNTL, 1976. 315 s. ISBN 981-238-117-1.
3. HERMAN, A. *Liti na vytavitelný model*. [online]. ČVUT Praha, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie. [cit. 2008-03-26]. URL: <<http://u12123.fsid.cvut.cz/podklady/MPL/presne%20liti%20na%20vytavitelny%20model.pdf>>.
4. CHUA, C.K., LEONG, K.F., LIM, C.S. *Rapid Prototyping: Principles and Applications*. 2. vyd. London: World Scientific Publishing, 2003. 448 s. ISBN 981-238-117-1.
5. PÍŠA, Z. *Výukový modul - Rapid Prototyping*. [online]. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství. [cit. 2008-02-14]. URL: <<http://esf.fme.vutbr.cz/aktivita/akt-05/mod-07/rpt.pdf>>.
6. NAVRÁTIL, R. *Reverse Engineering v praxi*. [online]. c2000, [cit. 2008-02-23]. URL: <<http://robo.hyperlink.cz/rapid/>>.
7. MURRAY, J. D., VANRYPER, W. *Encyklopedie grafických formátů*. 2. vyd. Praha: Computer Press, 1997. 922 s. ISBN 80-7226-033-2.
8. ROUPEC, J. *Zařízení pro vakuové lití do silikonových forem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2006. 100 s. Vedoucí diplomové práce Ing. David Paloušek.
9. *Podklad č.11 do cvičení Technologie obrábění*. [online]. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav Strojírenské technologie - Odbor technologie obrábění. [cit. 2007-04-20]. URL: <<http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=podklady>>.
10. HORÁČEK, M., Roučka J., Piša Z. *Rapid Prototyping (RP)* [online]. c2005 [cit. 2008-03-17]. URL: < http://esf.fme.vutbr.cz/aktivita/akt-05/mod-07/rp_rtv_mold-ing_1.pps >.
11. MATERIALISE, *Materials for prototype manufacturing*. [online]. [cit. 2008-03-04]. URL: <http://www.materialise.be/materialise/view/en/91947-Materials.html#ppt_1467-614>.
12. STRATASYS, *Rapid Prototyping*. [online]. [cit. 2008-02-25]. URL: <http://intl.stra-tasys.com/fdm_products.aspx?id=2310>.

13. DÍTĚ, P. *Prototypová malosériová výroba s využitím Rapid Toolingu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2006. 44 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Daniel Koutný.
14. HORÁČEK, M. *Rapid Prototyping (RP)* [prezentace]. c2005 [online]. [cit. 2008-03-17]. URL: <http://esf.fme.vutbr.cz/aktivity/akt-05/mod-07/rp_prehled.pps>.
15. AXSON, *Katalog materiálů*. [online]. [cit. 2008-03-17]. URL: <www.axson.cz>.
16. EBALTA, *Katalog materiálů* [online]. [cit. 2008-03-18]. URL: <<http://www.ebalta.cz/ramy/katalog.html>>.
17. *Silikonové formy - teoretická část*. [online]. [cit. 2008-03-20]. URL: <http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/res_silikonove_formy/index.htm>.
18. Transtech Tooling, s. r. o., Kondenzační silikonkaučuky 2. [online]. [cit. 2008-04-14]. URL: <<http://www.tooling.cz/index.php?typ=TGA&showid=58>>.
19. DELCAM, *PowerMILL Tréninkový kurs*. Brno: Delcam Brno plc, 2008. 267 s.
20. DELCAM, *PowerMILL 8.0 Novinky v aplikaci*. 1. vyd. Brno: Delcam Brno plc, 2008. 157 s.
21. *4. výukový modul: CAD/CAM* [online]. [cit. 2008-04-26]. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav Strojírenské technologie - Odbor technologie obrábění. URL: <http://esf.fme.vutbr.cz/inter_prikklady/cadcam/inter_cv/3_power-mill/03_prik-lad.pdf>.
22. DIMENSION, *Katalog výrobků*. [online]. [cit. 2008-04-26]. URL: <<http://www.di-mensionprinting.com/3d-printers/printingproductspecs768series.-aspx>>.
23. CHARVÁT, O. *Možnosti aplikace metod Rapid Prototyping s použitím technologie vytavitelného modelu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2006. 121 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Milan Horáček, CSc.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
3D		Three Dimensional
3DP		Three Dimensional Printing
ABS		Akrylonitrilbutadienstyren
BMP		Balistic Particle Manufacturing
CAD		Computer Aided Design
CAM		Computer Aided Manufacturing
CNC		Computer Numerical Control
DPH		Daň z přidané hodnoty
FDM		Fused Deposition Modelling
MJM		Multi Jet Modelling
MKP		Metoda konečných prvků
NC		Numerical Control
PA		Polyamid
PC		Polykarbonát
PE		Polyethylen
RP		Rapid Prototyping
SGC		Solid Ground Cudiny
SL		Stereolitografie
SLS		Selective Laser Sintering
STEP		Standard Template for Electronic Publishing
STL		Streolitography file
Rm	[MPa]	Mez pevnosti
ø	[mm]	Průměr
ρ	[g·cm ⁻³]	Hustota
d	[mm]	Průměr frézy
f	[mm·min ⁻¹]	Posuvová rychlost
f _z	[mm]	Posuv na zub
n	[min ⁻¹]	Otáčky
t	[mm]	Tolerance
v _c	[m·min ⁻¹]	Řezná rychlost

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Popis funkcí v PowerMILLu při obrábění lopatek
Příloha 2	Obrábění oběžného kola
Příloha 3	Ukázka programu pro obrábění oběžného kola
Příloha 4	Silikonová forma, master model, voskový model
Příloha 5	Výroba formy
Příloha 6	Ukázka programu pro obrábění formy

Příloha 1 - Popis funkcí v PowerMILLu při obrábění lopatek

Obrábět – počet lopatek, které chceme obrobit.

Jedna lopatka – obrobení oblasti mezi dvěma lopatkami.

Všechny lopatky – obrobení oblasti celého kola.

Celkový počet – celkový počet lopatek na kole. Tato možnost je dostupná pouze v případě, že je možnost Obrábět nastavena na hodnotu Všechny lopatky.

Spočítat – automaticky vypočítá počet lopatek na kole.

Elevace osy nástroje – tyto možnosti jsou dostupné pouze v případě, že je možnost Osa nástroje nastavena na hodnotu Automaticky.

Z – definuje počáteční a cílovou osu nástroje.

Radiální vektor – radiální osa nástroje kolmá k ose Z.

Normála středu – osa nástroje kolmá na střed. Tato možnost poskytuje průběžně se měnící úhel vyvýšení.

Normála hrany – osa nástroje kolmá na hranu. Tato možnost poskytuje průběžně se měnící úhel vyvýšení.

Normála offsetu – osa nástroje kolmá na aktuální offset dráhy nástroje. Tato možnost poskytuje průběžně se měnící úhel navýšení.

Průměrná normála středu – osa nástroje, která tvoří průměrnou velikost úhlu, který by vznikl v případě výběru možnosti Normála hrany. Tato možnost poskytuje konstantní cílový úhel vyvýšení. Pokud je to možné, bude aplikace PowerMill tento úhel udržovat. V opačném případě se aplikace podle potřeby odchýlí.

Průměrná normála Offsetu – osa nástroje, která tvoří průměrnou velikost úhlu, který by vznikl v případě výběru možnosti Normála offsetu. Tato možnost poskytuje konstantní cílový úhel vyvýšení. Pokud je to možné, bude aplikace PowerMill tento úhel udržovat. V opačném případě se aplikace podle potřeby odchýlí.

Úhel – úhel vyvýšení. Tato možnost je dostupná pouze v případě, že je možnost Z nastavena na hodnotu Radiální vektor.

Obrábění – definuje profil offsetu, pořadí a směr obrábění.

Offset – definuje způsob jakým vyrovnat přechod z profilu středu do profilu hrany.

Vypnout – obrobí pouze poslední řez nejbližší ke středu. Tato možnost je ekvivalentní výběru strategie Dokončení středu.

Offset dolů – provede offset profilu hrany. Offsets pokračují dále jako offsety hrany, dokud se nedosáhne profilu středu.

Offset nahoru – provede offset profilu středu.

Protnout – začne offsetováním profilu hrany a pomalu migruje offset tak, že na konci offsetuje profil středu.

Obrábění kapsy – pokud je zaškrtnuto, aplikace PowerMill v jednu chvíli obrobí pouze jednu kapsu. Pokud není zaškrtnuto, aplikace PowerMill v jednu chvíli obrobí jednu

úroveň. Tato možnost je dostupná pouze v případě, že je možnost Obrábět nastavena na hodnotu Všechny lopatky.

Směr – určuje strategii obrábění.

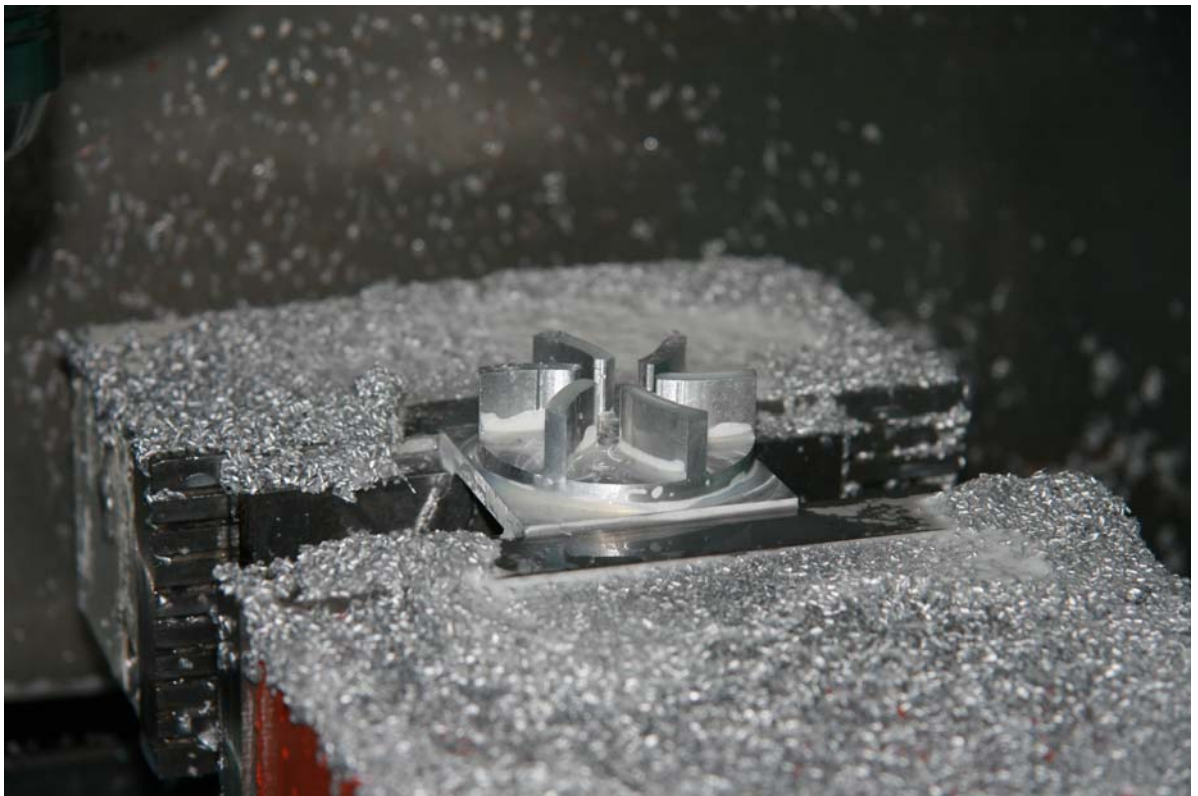
Sousledný – vytvoří dráhy nástroje pouze za pomoci sousledného frézování.

Nesousledný – vytvoří dráhy nástroje pouze za pomoci nesousledného frézování.

Oba – odpovídajícím způsobem vytvoří dráhy nástroje pomocí jak sousledného tak nesousledného frézování.

Příloha 2 – Obrábění oběžného kola



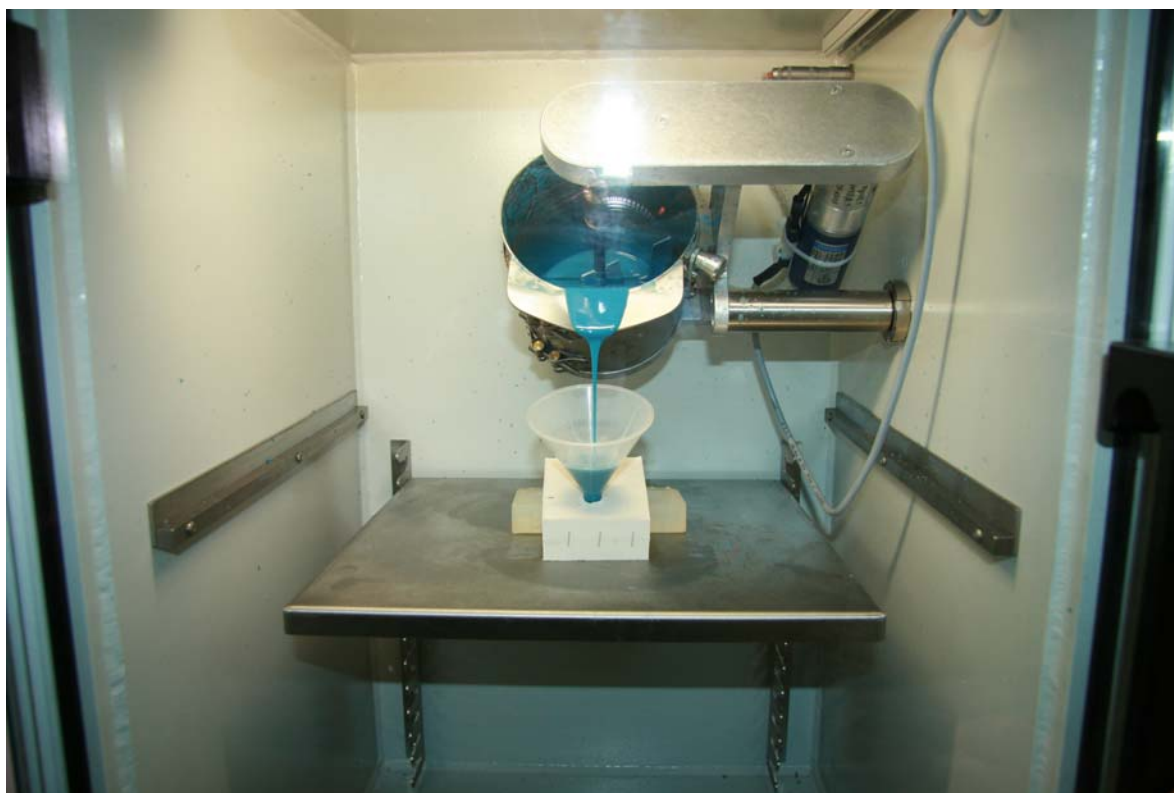


Příloha 3 – Ukázka programu pro obrábění oběžného kola

```
10 BEGIN PGM T10VC MM
11 ; Job Number : T10
12 ; Date : 11.04.08 - 09:32:42
13 ; Programmed by : dusta
14 ; DP Version : 1490 Option File : 02Heid530_zaklad
15 BLK FORM 0.1 Z X-25.5 Y-25.5 Z0.0
16 BLK FORM 0.2 X25.5 Y25.5 Z17.
17 ; TOOL NO. : 1
18 ; TOOL TYPE : ENDMILL
19 ; TOOL ID : d10
20 ; TOOL DIA. 10. LENGTH 40.
21 TOOL CALL 1 Z S5500 DL+0.0 DR+0.0
22 Q1= 80 ; PLUNGE FEEDRATE
23 Q2= 800 ; CUTTING FEEDRATE
24 Q3= 800 ; SKIM FEEDRATE
25 CYCL DEF 32.0 TOLERANCE
26 CYCL DEF 32.1 T0.05
27 ; =====
28 ; Toolpath : hrub offsetem_d10
29 ; Allowance : +0.200
30 ; =====
31 L X0.0 Y0.0 FMAX M03
32 L Z21.000 FMAX M8
33 L X1.275 Y-1.496 FMAX
34 L Z19.000 FMAX
35 L Z16.020 FQ1
36 L X1.496 Y-1.053 FQ2
37 L X2.182 Y-0.007 FQ2
38 L X1.496 Y1.057 FQ2
39 L X1.098 Y1.885 FQ2
40 L X0.499 Y1.841 FQ2
41 L X-0.499 Y1.837 FQ2
42 L X-1.084 Y1.893 FQ2
43 L X-1.496 Y1.053 FQ2
44 L X-2.182 Y0.007 FQ2
45 L X-1.496 Y-1.058 FQ2
46 L X-1.098 Y-1.885 FQ2
47 L X-0.499 Y-1.841 FQ2

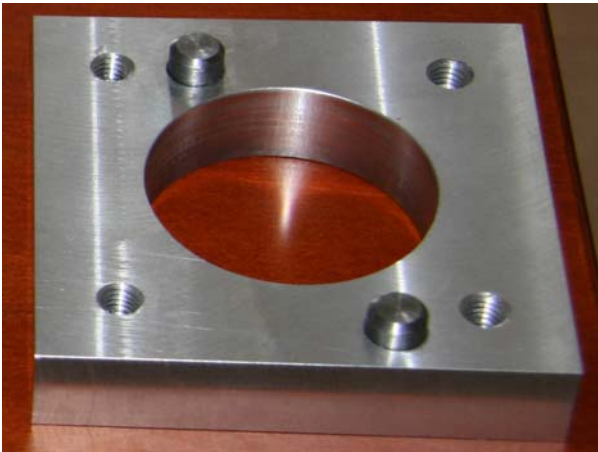
.
.
.
8933 L X-5.533 Y29.485 FQ2
8934 L Z21.000 FMAX
8935 L M9
8936 CYCL DEF 32.0 TOLERANCE
8937 CYCL DEF 32.1
8938 L Z-1 R0 FMAX M91
8939 TOOL CALL 0
8940 L M30
8941 END PGM T10VC MM
```

Příloha 4 – Silikonová forma, master model, voskový model



Příloha 5 – Výroba formy





Příloha 6 – Ukázka programu pro obrábění formy

```
10 BEGIN PGM hrub_d3 MM
11 ; Job Number : hrub_d3
12 ; Date : 22.04.08 - 09:59:16
13 ; Programmed by : dusta
14 ; DP Version : 1490 Option File : 02Heid530_zaklad
15 BLK FORM 0.1 Z X0.0 Y0.0 Z-22.
16 BLK FORM 0.2 X92. Y92. Z0.0
17 ; TOOL NO. : 3
18 ; TOOL TYPE : ENDMILL
19 ; TOOL ID : d3
20 ; TOOL DIA. 3. LENGTH 30.
21 TOOL CALL 3 Z S1500 DL+0.0 DR+0.0
22 Q1= 500 ; PLUNGE FEEDRATE
23 Q2= 1000 ; CUTTING FEEDRATE
24 Q3= 3000 ; SKIM FEEDRATE
25 CYCL DEF 32.0 TOLERANCE
26 CYCL DEF 32.1 T0.005
27 ; =====
28 ; Toolpath : hrub_d3
29 ; Allowance : +0.100
30 ; =====
31 L X46.000 Y46.000 FMAX M03
32 L Z10.000 FMAX M8
33 L X69.271 Y52.036 FMAX
34 L Z0.500 FMAX
35 L X69.450 Y52.011 Z0.468 FQ1
36 L X69.969 Y51.928 Z0.376
37 L X70.488 Y51.835 Z0.283
38 L X71.007 Y51.732 Z0.189
39 L X71.180 Y51.682 Z0.157
40 L X71.321 Y51.624 Z0.131
41 L X71.526 Y51.511 Z0.089
42 L X71.611 Y51.451 Z0.071
43 L X71.699 Y51.380 Z0.051
44 L X71.805 Y51.278 Z0.025
45 L X71.872 Y51.204 Z0.008
46 L X71.921 Y51.141 Z-0.007
47 L X71.501 Y52.736 Z-0.297
48 L X71.079 Y54.335 FQ2
.
.
.
25794 L X65.465 Y28.158
25795 L Z10.000 FMAX
25796 L M9
25797 CYCL DEF 32.0 TOLERANCE
25798 CYCL DEF 32.1
25799 L Z-1 R0 FMAX M91
25800 TOOL CALL 0
25801 L M30
25802 END PGM hrub_d3 MM
```