

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# NÁVRH TECHNOLOGIE VÝROBY VSTŘIKOVACÍ FORMY PRO PŘESNÉ LITÍ

DESIGN OF INJECTION MOLD PRODUCTION TECHNOLOGY FOR PRECISION CASTING

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Fendrich

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.

BRNO 2020

# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Bc. Tomáš Fendrich**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Strojírenská technologie a průmyslový management  
Vedoucí práce: **Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.**  
Akademický rok: 2019/20

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

## **Návrh technologie výroby vstříkovací formy pro přesné lití**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Zadaná problematika se týká návrhu technologie výroby vstříkovací formy pro přesné lití. Téma práce je aktuální a navazuje na potřeby průmyslové praxe. Úvodem diplomové práce bude zmíněna problematika obrábění hliníku a hliníkových forem, následovat bude návrh designu a konstrukce vstříkovací formy. Pro výrobu vstříkovací formy bude v diplomové práci navržena technologie obrábění zahrnující volbu obráběcích strojů, řezných nástrojů a řezných podmínek. Pro ověření správnosti návrhu a funkčnosti vstříkovací formy bude vyroben zkušební vzorek z voskové směsi.

### **Cíle diplomové práce:**

Analýza problematiky obrábění hliníkových forem.  
Design vstříkovací formy pro výrobu přesných odlitků.  
Návrh technologie výroby vstříkovací formy.  
Ověření funkčnosti formy vstříknutím voskové směsi.

### **Seznam doporučené literatury:**

DAVIM, J. Paulo, ed. Surface integrity in machining. London: Springer, 2010. 215 s. ISBN 978--84882-873-5.

GRZESIK, Wit. Advanced machining processes of metallic materials: theory, modelling and applications. Second edition. Boston: Elsevier. 2017. ISBN 978-0-444-63711-6.

TSCHÄTSCH, Heinz. Applied machining technology. Dordrecht: Springer, c2009, xvii, 398 s. ISBN 978-3-642-01006-4.

HUMÁR, Anton. Materiály pro řezné nástroje.[/I] Brno : MM Publishing Praha, 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.

Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. AB SANDVIK COROMANT - SANDIK CZ s.r.o. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting - A Practical Handbook. ISBN 91-972299-4-6.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Diplomová práce se věnuje návrhu a výrobě hliníkové vstřikovací formy pro přesné lití. V práci je stručně popsána technologie přesného lití společně s popisem typů forem, jejich vnitřního uspořádání a nejčastěji používaných materiálů. Další část práce je věnována analýze problematiky obrábění hliníkových forem. Důraz byl kladen především na ty operace, které budou použity při výrobě formy. V praktické části práce je detailně popsán postup návrhu modelu a formy a také proces návrhu technologie výroby. Konstrukce je prováděna pomocí programu SolidWorks, technologie výroby v programu SolidCam. Závěrem práce je forma sestavena a je provedeno ověření funkčnosti formy pomocí zkušebního vstřiku a ekonomické zhodnocení.

### Klíčová slova

Přesné lití, forma, vosková směs, SolidWorks, SolidCAM, frézování

## ABSTRACT

The diploma thesis deals with the design and production of an aluminum injection mold for investment casting. The work briefly describes the technology of investment casting together with a description of the types of molds, their internal arrangement and the most commonly used materials. Another part of the work is devoted to the analysis of aluminum molds machining. Emphasis was placed mainly on those operations, that will be used in production of mold. The practical part describes in detail the process of designing the model and mold, as well as the process of designing production technology. The construction is performed using the program SolidWorks, production technology using the program SolidCam. At the end of the work, the mold is assembled and the functionality of the mold is verified by means of test injection and economic evaluation is made.

### Key words

Investment casting, injection mold, wax blend, SolidWorks, SolidCam, milling

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

FENDRICH, Tomáš. *Návrh technologie výroby vstřikovací formy pro přesné lití [online]*. Brno, 2020 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125367>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Tomáš Zlámal.



## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Návrh technologie výroby vstříkovací formy pro přesné lití* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

25.6.2020

-----  
Datum

-----  
Bc. Tomáš Fendrich

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto svému vedoucímu Ing. Tomáši Zlámalovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále bych rád poděkoval spolupracovníkům Zdeňkovi Vondráčkovi a Milanu Srbovi za pomoc při návrhu modelu a technologie výroby.

**OBSAH**

Abstrakt.....	3
Prohlášení.....	4
Poděkování.....	5
Obsah.....	6
Úvod.....	8
1 Technologie přesného lití.....	9
1.1 Možnosti přesného lití.....	9
1.2 Princip technologie.....	9
1.3 Voskový model.....	10
1.3.1 Možnosti získání modelu.....	11
1.3.2 Směsi pro výrobu modelů.....	12
1.3.3 Vstřík vosku.....	13
1.3.4 Modelové stromečky.....	14
1.4 Keramické skořepiny.....	15
1.4.1 Materiály skořepin.....	16
1.4.2 Výroba skořepin.....	16
1.5 Žihání skořepin.....	17
1.6 Odlévání.....	18
1.7 Dokončovací operace a kontrola.....	18
2 Vstřikovací formy pro přesné lití.....	20
2.1 Dělení forem.....	20
2.2 Násobnost formy.....	21
2.3 Vtokový systém forem.....	22
2.4 Vyhazovací systém forem.....	22
2.5 Odvzdušnění forem.....	23
2.6 Materiály vstřikovacích forem.....	24
2.7 Smrštění.....	26
3 Technologie výroby vstřikovacích forem.....	29
3.1 Třískové obrábění.....	29
3.1.1 Technologie frézování.....	29
3.1.1.1 Kinematika frézování.....	30
3.1.1.2 Rozdělení frézování.....	31
3.1.2 Technologie vrtání.....	32
3.1.2.1 Kinematika vrtání.....	33
3.1.3 Technologie výroby závitů.....	33

3.2 Strategie frézování formy .....	34
3.2.1 Frézování povrchu .....	34
3.2.2 Frézování obvodu .....	35
3.2.3 Frézování dutin .....	35
3.2.4 Frézování rohů.....	37
3.3 Obrábění hliníkových slitin .....	38
3.3.1 Nárůstek .....	38
3.3.2 Obrobitelnost hliníkových slitin .....	38
3.3.3 Vlastnosti hliníkových slitin při obrábění .....	39
3.3.4 Nástroje pro obrábění hliníkových slitin .....	39
4 Návrh a konstrukce vstřikovací formy .....	41
4.1 Popis použitého softwaru .....	42
4.2 Konstrukce modelu.....	42
4.3 Konstrukce formy .....	44
5 Návrh výrobní technologie a výroba vstřikovací formy.....	50
5.1 Popis použitého softwaru .....	50
5.2 Popis obráběcího centra .....	51
5.3 Materiál polotovaru .....	52
5.4 Použité obráběcí nástroje.....	52
5.5 Návrh technologie výroby.....	57
5.6 Sestavení formy .....	63
6 Ověření funkčnosti formy .....	66
6.1 Popis vstřikovacího stroje a vstřík směsi.....	67
6.2 Rozměrová kontrola modelu .....	68
7 Ekonomické zhodnocení .....	71
Závěr.....	72
Seznam použitých zdrojů.....	74
Seznam použitých symbolů a zkratk.....	80
Seznam příloh.....	82

## ÚVOD

Technologie odlévání patří již dlouhé roky mezi nejdůležitější výrobní technologii vůbec. Umožňuje produkci výrobků nejrůznějších tvarů při použití nepřeberného množství materiálů. Jejich uplatnění je téměř v každém odvětví.

Metoda přesného lití vyčnívá nad konvenční technologií gravitačního lití především v možnostech dosažitelné přesnosti odlitku. Tím často odpadá nutnost odlitek obrábět, čímž se značně urychlí produkce a sníží náklady. V současné době, kdy velká konkurence nutí výrobce snižovat ceny produktů na absolutní minimum je tato úspora nákladů zásadnější, než kdy jindy.

Od dob, kdy se formy na voskové modely vyráběli ručně uplynulo již spoustu času a moderní technologie v podobě modelovacích programů a víceosých obráběcích center nám umožňují detailně navrhout model a následně vyrobít formu, která bude splňovat ty nejužší tolerance. Především tyto počítačové modeláře posunuli technologii výroby forem mílovými kroky dopředu. Možnosti, které nabízejí současným konstruktérům jsou nesrovnatelné s podmínkami jen pár desítek let zpět, kdy prakticky jedinou pomůckou bylo pravítko a tužka. Společně s počítačovou podporou se nevyhnuli inovaci i frézovací nástroje, které umožňují použití vysokých řezných rychlostí a posuvů a tím zkracují výrobní čas na minimum. Propojení CAD/CAM technologií s programovatelným CNC strojem a použití nejmodernějších nástrojů ze slinutých karbidů jsou zárukou přesné a kvalitní formy.

I když je současná technologie výroby forem na míle daleko od jejího počátku, stále nejsou vyčerpány možnosti inovací postupů a zpřesnění výroby a v budoucích letech lze očekávat její další vývoj.

## 1 TECHNOLOGIE PŘESNÉHO LITÍ

Přesné lití neboli metoda vytavitelného modelu zaujímá důležité postavení ve slévárenském odvětví a slouží k vytvoření velice přesných odlitků. V porovnání s konvenční technologií odlévání do pískových forem je možné zajistit mnohem přesnější rozměry odlitků, a tím minimalizovat náklady na jejich následné opracování. [1, 3]

Technologie přesného lití je díky svým vlastnostem používána na složité odlitky, jejichž výroba odlišnou metodou by byla velice nákladná nebo nemožná. Další nespornou výhodou této metody je možnost odlévat široké spektrum materiálů. Tyto vlastnosti činí technologii přesného lití v dnešní době velmi hojně využívanou a nenahraditelnou. [1, 3]

### 1.1 Možnosti přesného lití

Jak již bylo zmíněno výše, metoda přesného lití umožňuje vytvářet odlitky v některých případech pouze se setinovými odchylkami od výsledného výrobku. V tabulce 1. lze vidět stručné popsání hranic metody od možné odchylky rozměrů až po používané materiály. Tabulka 2. znázorňuje srovnání s ostatními, méně přesnými, metodami lití.

Tabulka 1. Možnosti přesného lití [4–5].

<b>Rozměry</b>	100–200 mm (max. 1 000 mm)
<b>Hmotnost</b>	0,1–50 kg (max. 200 kg)
<b>Tloušťka stěny</b>	Slitiny železných kovů 0,50 mm, neželezné kovy 0,30 mm
<b>Drsnost povrchu</b>	Ra 3,2 μm
<b>Materiál</b>	Ocel, slitiny Co, Ni, Al, Ti, Mg, legované litiny

Tabulka 2. Srovnání technologií [4].

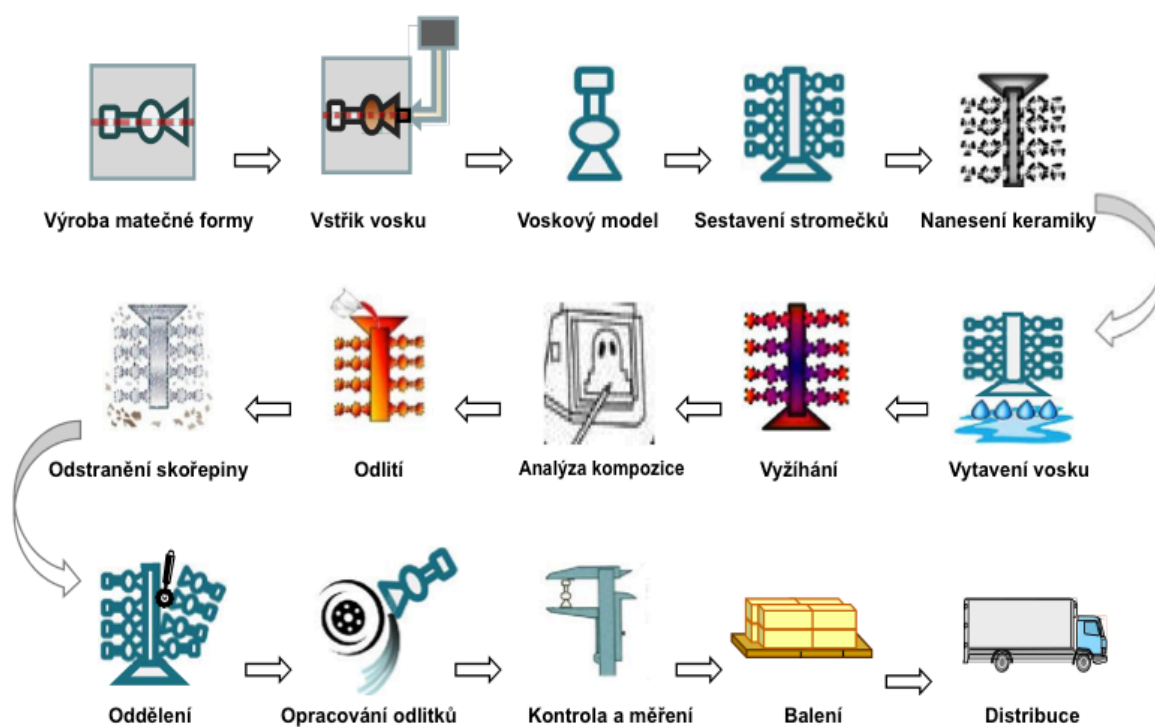
<b>Lití do písku</b>	1–2 mm
<b>Kokilové lití</b>	0,10–0,30 mm
<b>Tlakové lití</b>	0,05–0,20 mm
<b>Přesné lití</b>	0,03–0,10 mm

### 1.2 Princip technologie

Proces technologie přesného lití je rozdělen do několika částí (obrázek 1.), které jsou v dalších kapitolách podrobněji rozepsány.

První fází výroby je zvolení součásti, která bude metodou zhotovena. Na základě výkresu je poté vyrobena matečná forma. Formy mohou být vyrobeny různými způsoby z širokého spektra materiálů, ale nejčastěji jsou používány hliníkové vyrobené pomocí obrábění. Pomocí speciálních vstříkovačů je následně do formy zanesena vosková směs. Po jejím vychladnutí je získán voskový model. K modelu je následně přiletována vtoková soustava, která zároveň slouží k uchycení modelů na vtokový kužel, čímž jsou vytvořeny typické voskové stromečky. Následuje obalování stromečků v pojivové břečce a současně nanášení žáruvzdorného materiálu v několika vrstvách, dokud není dosažena potřebná tloušťka skořepiny. Obalené stromečky se následně vysuší a poté jsou

umístěny do autoklávů, kde je z nich při zvýšeném tlaku a teplotě vytavena vosková směs. Tímto způsobem je vytvořena keramická skořepina, která může být uschována pro pozdější lití nebo převezena do jiné slévárny. Další částí technologie je samotné odlévání kovu. Skořepiny musí být před odlitím vyžehány na vysokou teplotu (1 100–1 300 °C). Žiháním jsou odstraněny poslední zbytky voskové směsi a zároveň slouží jako opatření proti teplotnímu šoku při odlévání žhavého kovu. Po odlití a vychladnutí odlitků je z nich v tryskacích zařízeních odstraněna keramická skořepina. Poté dojde k oddělení jednotlivých odlitků od vtokové soustavy a obroušení zbývající skořepiny na pásových bruskách. Následně mohou být odlitky znovu otryskány, pro dokonalé očištění. Závěrem jsou odlitky podrobeny rozměrové kontrole a následuje jejich distribuce k zákazníkovi nebo uložení na sklad. [2, 3]



Obrázek 1. Postup technologie [5].

### 1.3 Voskový model

Zásadním předpokladem pro dosažení rozměrově správného odlitku je bezchybný voskový model. Model musí mít hladký povrch bez jakýchkoliv bublinek či nerovností. Jakákoliv odchylka se projeví jako zmetkový odlitek, proto je voskový model pro celou technologii stěžejní a na jeho výrobu jsou kladeny vysoké nároky. [3]

### 1.3.1 Možnosti získání modelu

Voskový model pro přesné lití je v drtivé většině případů zhotoven vstřikem vosku do formy. Forem pro voskové modely je více typů a volba té správné závisí především na velikosti série vyráběného odlitku. Podle způsobu výroby odlišujeme dva hlavní typy forem. Formy vyrobené podle **matečného modelu** a formy vyrobené **obráběním**. [2, 7]

Nutná podmínka pro formy podle matečného modelu je již existující model, na základě kterého je forma zhotovena. Tento typ forem se vyznačuje především nižší cenou a menší náročností na jejich výrobu, ale horší životností. Se stoupajícími nároky na množství a kvalitu odlitků uplatnění tohoto typu forem klesá.

- **Formy ze sádry**

Matečný model je u tohoto způsobu výroby forem zalit sádrou. Po ztuhnutí je model vyjmut a následuje odlévání. Životnost formy je velice krátká. [8, 9]

- **Formy z plastických hmot**

Podobně jako u forem ze sádry jsou formy vyrobeny zalití modelu plastickou hmotou. Po vytvrzení je model vyjmut a forma připravena k lití. Plastická hmota špatně odvádí teplo z voskového modelu a doba chladnutí vosku je proto dlouhá. Tyto formy nachází využití především v uměleckém odvětví. [8, 9]

- **Formy vyráběné metalizací**

Forma je zhotovena pomalým nanášením vrstvy kovu na model. Díky nízké tavicí teplotě je nejčastěji využíván zinek. Částice zinku se spojují a vytváří celistvou vrstvu. Forma vyrobená touto metodou má vysokou kvalitu výsledného obtisku. Nevýhodou je nemožnost modifikace při případné změně rozměrů odlitku. [8, 9]

- **Formy vyráběné obráběním**

Jsou jednoznačně nejčastěji využívaný typ forem (obrázek 2.). Vyznačují se vysokou přesností, odolností a možností modifikace. Vysoká přesnost formy je spojena s vysokými časovými nároky na její výrobu. Je proto velice důležité zvážit, zdali je série vyráběných odlitků dostatečně veliká, aby se pokryly náklady na výrobu formy. [8, 9]



Obrázek 2. Hliníková forma.

Návrh forem je zhotoven pomocí počítačových CAD programů. Samotné zhotovení se provádí na obráběcích CNC centrech s možností využití dalších technologií. Nejčastěji používané materiály jsou ocel a hliník. Problematika forem je následně podrobněji řešena v kapitole 2.



### 1.3.2 Směsi pro výrobu modelů

Jak již bylo řečeno, modely pro přesné lití jsou zhotoveny z vosku, přesněji řečeno z voskových směsí (obrázek 3.). Představa shodnosti vosku použitého pro model se včelím voskem je značně mylná. Voskové směsi obsahují spoustu složek od parafínových po syntetické vosky, které jsou navíc doplněny nejrůznějším plnivem. Jednotlivé komponenty voskových směsí ovlivňují její výsledné vlastnosti a mají vliv na kvalitu voskového modelu. [7, 9]



Obrázek 3. Voskové směsi [10].

Hlavními požadavky na voskové směsi používané pro utváření modelů jsou jejich tvarová stálost, rychlé tuhnutí, hladký povrch, nízká viskozita, nezávadnost k životnímu prostředí a další. Ovlivnění jednotlivých vlastností je dosaženo správnou volbou komponent dané směsi. [9]

- **Parafínový vosk**

Je to směs alifatických uhlovodíků charakterizovaná rovnými uhlíkovými řetězci, které jsou rozpustné v teplém alkoholu a do směsí se přidávají z důvodu tvorby hladkého povrchu. Teplota tavení parafínů se pohybuje mezi 32–66 °C. [13]

- **Pryskyřice**

Pryskyřice se ve voskových směsích vyskytuje ve třech typech, a to syntetická, uhlovodíková a přírodní. Každý typ pryskyřice má své jedinečné vlastnosti a výhodu používání. Teplota tavení pryskyřic se pohybuje mezi 20–190 °C. [13]

- **Stearin**

Stearin je směs kyseliny stearové a kyseliny palmitové. Jeho rozmezí teploty tání je 60–70 °C. Na rozdíl od parafínu je biologicky rozložitelný a jeho použití je ekologičtější. [11]

- **Mikrokrytalický vosk**

Mikrokrytalický vosk je látka na bázi uhlovodíků. Na rozdíl od parafínů se vyznačuje strukturou z větvených uhlovodíkových molekul. Jeho teplota tavení se pohybuje od 60–90 °C. [13]

- **Montánní Vosk**

Je to směs voskových a pryskyřičných látek s podílem asfaltických látek. Používá se pro zlepšení tuhosti, zvýšení stability za nízkých i vysokých teplot a zúžení teplotního intervalu tuhnutí. [12]

- **Polymery**

Látky na polymerové bázi pozitivně ovlivňují fyzikální vlastnosti směsí, snižují viskozitu a zvyšují jejich pevnost v tuhém stavu. Nejčastěji používanými typy jsou polymery EVA (etylvinil acelát). Teplota tavení je 50–200 °C. [13]

- **Plniva**

Hlavní důvod využití plniv je zlepšování vlastností směsí. Zmenšují teplotní roztažnost, omezují vznik staženin a zpevňují vosk. Nejčastěji používaná plniva jsou. [13]

- a) **Zesítěný polystyren XLPS**

Jedná se o organické plnivo vyznačující se dobrou tepelnou stabilitou. Modely využívající toto plnivo jsou rozměrově stálé a pevné.

- b) **Bisfenol A (BPA)**

Organická sloučenina, hojně používaná ve spotřebním a potravinářském průmyslu. Díky BPA mají modely dobrou pevnost, tepelnou odolnost a stálost proti otřesům. Pozn. Bisfenol je ale toxický, díky čemuž se v současné době od využití tohoto typu plniv odstupuje. [14]

- c) **Voda**

Používání vody jako plniva je odůvodněno především nízkou cenou ve srovnání s ostatními látkami. Voda zlepšuje povrch modelu a snižuje tvorbu bublin. Z důvodů odpařování vody musí být teplota směsi pečlivě kontrolována, aby nedocházelo ke generování zmetkových modelů. [13]

### 1.3.3 Vstřík vosku

Voskové modely jsou zhotoveny vstříkem roztavené voskové směsi do matečné formy. Zajištění konstantní teploty a tlaku po celou dobu vstříku je nezbytnou nutností, která musí být dodržena pro získání bezchybného modelu. Rovnoměrný vstřík vosku do formy je ovlivněn volbou vhodného stroje - vstříkolisu

a vstřikovacích podmínek. Je rozlišováno několik typů strojů pro vstřikování rozdělených podle tekutosti voskové směsi: [2, 3]

- **lisy pracující s tekutým voskem,**
- **lisy pracující s kašovitým voskem,**
- **lisy pracující s tuhým voskem.**

Nejpoužívanějším typem je v současné době lis pracující s tekutým voskem viz obrázek 4. Tento stroj se skládá ze zásobníku, ve kterém se udržuje ohříváný vosk, který je přepraven do vstřikovacího válce. Po naplnění válce se uzavře ventil mezi zásobníkem a válcem a stroj je připraven ke vstřiku. Následně je vosk za předepsané teploty a tlaku, nejčastěji v rozmezí 50–90°C, vstříknut do formy. Po vstřiku voskové směsi stroj nadále působí tlakem po předem určitou dobu, což způsobí zhutnění směsi v dutině formy a zlepšuje mechanické vlastnosti modelu, tento krok se nazývá dotlakem. Model je ponechán ve formě, než dojde k dostatečnému ochlazení. Poté je z formy vyjmut. [3]

Parametry vstřiku jako teplota, tlak, doba dotlaku, rychlost vstřikování a další mají zásadní dopad na rozměrové vlastnosti modelu a je proto nutné dbát zvýšené pozornosti při jejich nastavení.

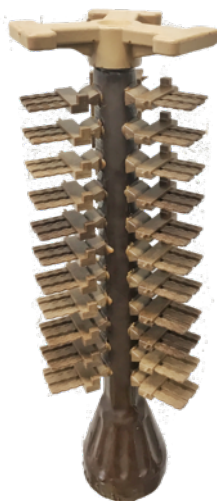


Obrázek 4. Lis pracující s tekutým voskem [15].

#### 1.3.4 Modelové stromečky

Poslední operace spadající pod výrobu voskového modelu je připojení vtokové soustavy. Modely jsou nejčastěji zhotovovány po jednom a následně jsou umístěny na vtokový kužel, čímž jsou vytvořeny tzv. stromečky (obrázek 5). Jednotlivé modely jsou do stromečků připevňovány pájením. Toto uspořádání umožňuje efektivnější odlévání, jelikož je možné připevnit až několik desítek modelů na jeden stromeček. Je nutné dbát na správné uspořádání stromečků, aby nedocházelo k nesteromnému nánosům obalové vrstvy a tedy k rozdílné tloušťce keramické skořepiny. To by mohlo vést k nerovnoměrnému chlazení odlitků a praskání skořepiny. [2, 13]

U větších modelů, kde není upevnění do stromečku možné, dojde pouze k naletování vtokové soustavy a nálitků.



Obrázek 5. Modelový stromeček.

#### 1.4 Keramické skořepiny

Keramická skořepina (obrázek 6.) je jedním z dalších specifíků metody přesného lití. Díky ní je možné odlévat nepřeborné množství materiálů a tvořit odlitky i těch nejsložitějších tvarů. Zásadním faktorem skořepiny je její odolnost. V průběhu procesu odlévání musí odolat teplotní roztažnosti vosku při jeho vytavování, zároveň smrštění odlévaného materiálu při tuhnutí odlitku. Je tedy velmi důležité dbát na dodržení postupu výroby skořepiny, protože jedině tak lze dosáhnout požadované přesnosti odlitku. [2, 9]



Obrázek 6. Keramická skořepina.

### 1.4.1 Materiály skořepin

Skořepina je tvořena dvěma základními složkami, a to **keramickou suspenzí a posypovým materiálem**.

- **Keramická suspenze**

Je to disperzní soustava pevných částic - plniva, v kapalném prostředí - pojivu. Smícháním těchto dvou složek je vytvořen roztok, do kterého jsou namáčeny modelové stromečky.

Plnivo je žáruvzdorný materiál sloužící i jako první dvě obalové vrstvy. Zajišťuje dobrou propustnost plynů, má vliv na kvalitu povrchu modelu a musí také být neutrální k odlévanému materiálu. Nejčastěji používané materiály jsou kysličníky  $Al_2O_3$  a  $ZrO_2$ , z křemičitanů se nejčastěji využívá zirkonu, silimanitu a molochitu.

Pojivo tvoří vazné prostředí pro plnivo. Nesmí negativně ovlivňovat žáruvzdornost skořepiny a stejně jako plnivo musí být neutrální k odlévanému materiálu. Nejčastěji využívanými pojivy jsou ty na základě roztoků  $SiO_2$  a organických sloučenin. Pojiva jsou rozdělena do dvou typů, a to vodní a alkoholová. [2, 9]

- **Posypový materiál**

Posypový materiál neboli ostřivo tvoří více než 90% skořepiny. Struktura ostřiva tvoří výsledné vlastnosti skořepiny. Ostřivo je nanášeno ve vrstvách se stoupajícími rozměry zrn. Pro prvotní posypové vrstvy se používají zrna krychlovitých tvarů, pro konečné vrstvy zrna ostrohranná. Tloušťka skořepiny musí být po celém povrchu stejná, aby nedocházelo k nerovnoměrnému ohřívání a chladnutí a nedošlo k popraskání skořepiny.

Nejčastěji používaným ostřivem je oxid křemičitý  $SiO_2$ , a to především díky jeho nízké ceně. Na druhou stranu má ale velkou tepelnou roztažnost a proto je nutné při žihání skořepiny postupovat pomalu po krocích, aby nedošlo k popraskání skořepiny.

Dalším typem používaných materiálů jsou křemičitany, především zirkon a molochit. Tyto materiály se vyznačují velmi dobrou žáruvzdorností a především malou tepelnou roztažností a vysokou odolností proti teplotním šokům. Kvůli těmto vlastnostem je možné při žihání postupovat bez prodlev a urychlit tím proces výroby odlitků. [2, 9, 16]

### 1.4.2 Výroba skořepin

Výroba keramických skořepin se skládá z více kroků, jejichž přesný postup je nutné dodržet k dosažení požadovaných vlastností skořepiny.

První krok se skládá z odmaštění modelových stromečků. Tento proces je důležitý především z důvodu odstranění nečistot, které se mohou na modelech usadit v průběhu jejich skladování. Stromečky jsou namočeny do nádoby s odmašťovadlem a ihned poté opláchnuty v etylalkoholu, následně jsou vysušeny na vzduchu. [2]

Další fází je samotné obalování stromečků v keramickém posypu. Stromečky jsou ponořeny do kádě s keramickou suspenzí a následně je na ně nanášen



posypový materiál pomocí posypového zařízení. Po každé nanesené vrstvě je stromeček odložen a vysušen. Proces obalování se opakuje podle potřeby nutnosti tloušťky skořepiny nejčastěji 10–12krát. V současné době je tato část procesu často urychlena pomocí automatizace procesu zapojením namáčecích robotů nebo namáčecí linky, což lze vidět na obrázku 7. [9, 3]



Obrázek 7. Robotizace procesu obalování. [17]

Po nanesení finální vrstvy posypu jsou modely vysušeny. To se děje buď přirozeným odpařováním látek na vzduchu nebo pomocí čpavkových par, které proces urychlují. Důležité je rovnoměrné vysychání skořepiny, proto se musí v sušící místnosti udržovat neustálý proud vzduchu.

Finální fází výroby skořepiny je vytavení vosku. Ta probíhá nejčastěji za pomoci bojlerklávků. Tyto zařízení pracují s přehřátou párou a zvýšeným tlakem (0,3–0,6 MPa,  $t = 135\text{--}165\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Přehřátá pára nahnána do autoklávu způsobí natavení tenké vrstvy vosku, která umožní malé zvětšení objemu modelu bez porušení skořepiny. Vysoký tlak přispívá k rychlému prostupu tepla skořepinou. Čas vytavení vosku ze skořepin se pohybuje v rozmezí 10–25 minut podle velikosti modelů. [9, 3]

### 1.5 Žihání skořepin

Před samotným odléváním kovu je nutnost keramickou skořepinu vypálit. Děje se tak z důvodů odstranění posledních zbytků nečistot, které mohly ve skořepině po skladování zůstat, zamezení teplotního šoku při nalití kovu do skořepiny a ztuhnutí skořepiny díky převedení amorfnní vrstvy  $\text{SiO}_2$  na formu krystalickou. [9]

Skořepiny jsou žíhány v odporových pecích na teplotu v rozmezí 500-1100°C avšak pro dosažení ideálních výsledků se žihá především na horní hranici daného rozmezí.

### 1.6 Odlévání

Jednou z posledních částí technologie přesného lití je odlévání kovu do připravených skořepin. Odlévání probíhá bezprostředně po vytažení skořepin z pece po žihání, a to především z důvodů omezení teplotního šoku. Škála odlévaných materiálů je široká, zahrnuje slitiny hliníku, mědi hořčíku až po vysokolegované slitiny titanu a zinku.

Tavení vsázky probíhá především v elektrických indukčních a vakuových pecích, reaktivní slitiny titanu a niklu, u kterých je kladen extrémní požadavek na kvalitu, je poté nutno odlévat ve vakuu. [9]

### 1.7 Dokončovací operace a kontrola

Po ztuhnutí a vychladnutí kovu je nutné odlitky zbavit přebytečné skořepiny a připravit je pro kontrolu a následnou expedici. Dokončovací operace se dělí do několika částí.

- **Odstranění keramiky**

K odstranění větší části keramiky dochází nejčastěji pomocí vibračních stolů, které naruší keramickou vrstvu. Ta je vibracemi otloukána pryč z odlitku. Tato operace je velmi prašná a hlučná, proto se využívá prachotěsných kabin. Další možností je otryskání pomocí vysokotlakého paprsku. kontrola [1, 9]

- **Odřezání vtokové soustavy**

Odlitky jsou po otryskání stále spojeny vtokovou soustavou do stromečků a je tedy nutné je oddělit. Jsou k tomu využívány kotoučové nebo třecí pily. [1, 9]

- **Odstranění zbylé keramiky**

Po oddělení jednotlivých odlitků následuje důkladnější odstranění zbývajících keramiky. Keramická skořepina je po odlití velice tvrdá a proto se musí provést druhé, finální, otryskání odlitků

První možností je odstranění přebytečné keramiky chemickým způsobem. To je nejčastěji provedeno lázní s rozpuštěnou solí, kde jsou odlitky na 20 minut ponořeny do kádě s roztokem o teplotě 475–600 °C nebo pomocí žíravé lázně. Tato lázeň je tvořena roztokem hydroxidu draselného o teplotě 80 °C a doba ponoření je až několik hodin. Po obou chemických metodách je odlitky nutné důkladně opláchnout. [1, 9]

Druhou metodou je mechanické odstranění zbylé keramiky. Tryskání probíhá nejčastěji v uzavřených komorách, kde je odlitek otryskán pomocí vodního paprsku obsahujícího abrazivo nebo je abrazivo vrháno lopatkovým kolem. Jako abrazivní částice jsou nejčastěji používány keramické písky a ocelové broky.

- **Finální obroušení**

Po otryskání veškeré keramiky je nutné z odlitků obrousit případné výstupky a zbytky po vtokové soustavě. To je prováděno na pásových nebo kotoučových bruskách. Odlitky složitějších tvarů mohou být broušeny i ručními bruskami. [1, 9]

Po dokonalém otryskání a obroušení jsou odlitky připravené na výstupní kontrolu. Zde jsou nejdříve prohlédnuty, zdali nemají povrchové vady a je zkontrolován povrch odlitku. Dále jsou odlitky podrobeny zkoušce na vnitřní vady, nejčastěji pomocí rentgenu. Následně jsou zkontrolovány rozměry odlitku podle výkresové dokumentace pomocí mikrometrů a posuvných měřidel, to lze vidět na obrázku 8.

Pokud odlitky vyhovují stanoveným parametrům jsou uloženy do skladu nebo expedovány přímo k zákazníkovi.



Obrázek 8. Rozměrová kontrola odlitku.



## 2 VSTŘIKOVACÍ FORMY PRO PŘESNÉ LITÍ

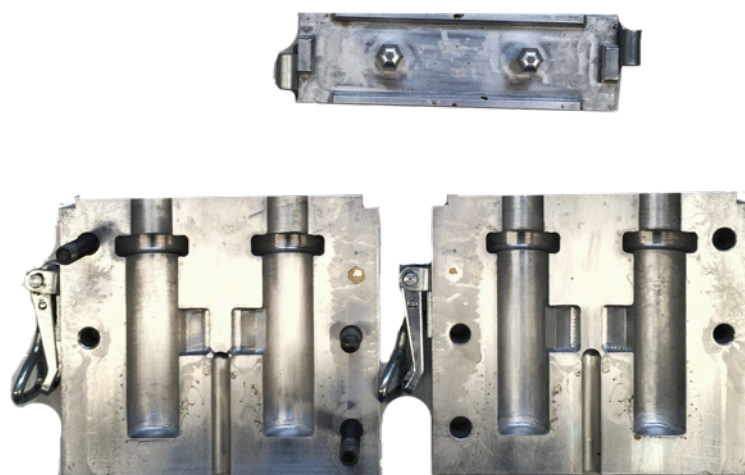
Vstřikovací forma je nástroj, který slouží pro výrobu voskových modelů. Rozličnost tvarů odlitků, které umožňuje metoda přesného lití vyrobít, se z velké části odvíjí od vyrobené formy. Právě odlišnosti jednotlivých odlitků dávají jedinečný tvar každé formě a také způsob, jakým je model ve formě zhotoven. Poloha dělicí roviny, násobnost obtisku ve formě, velikost série, vtokový systém a další jsou parametry, které musí každý konstruktér zvážit a podle nich formu uzpůsobit. Každý model je pouze tak přesný, jak přesná je forma, ze které pochází. Výroba formy je stěžejním bodem v technologii přesného lití, od čehož se odvíjí i náročnost na její zhotovení. Formy se skládají z vícera částí, které lze z pravidla rozdělit na tvářecí části, vtokový a vyhazovací systém a upínací elementy. [1, 3]

### 2.1 Dělení forem

Jelikož technologie přesného lití umožňuje odlévat často i velmi komplikované tvary odlitků není možné použít na vše pouze jeden typ formy. V určitých případech není možné vměstnat tvar voskového modelu do rozměrů formy používané na vstřikovacích strojích nebo je tvar modelu velmi komplikovaný a je tedy nutné formu zhotovit z více než dvou částí. Podle způsobu použití můžeme formy dělit na formy **ruční** a **formy strojové**. [9]

- **Ruční formy**

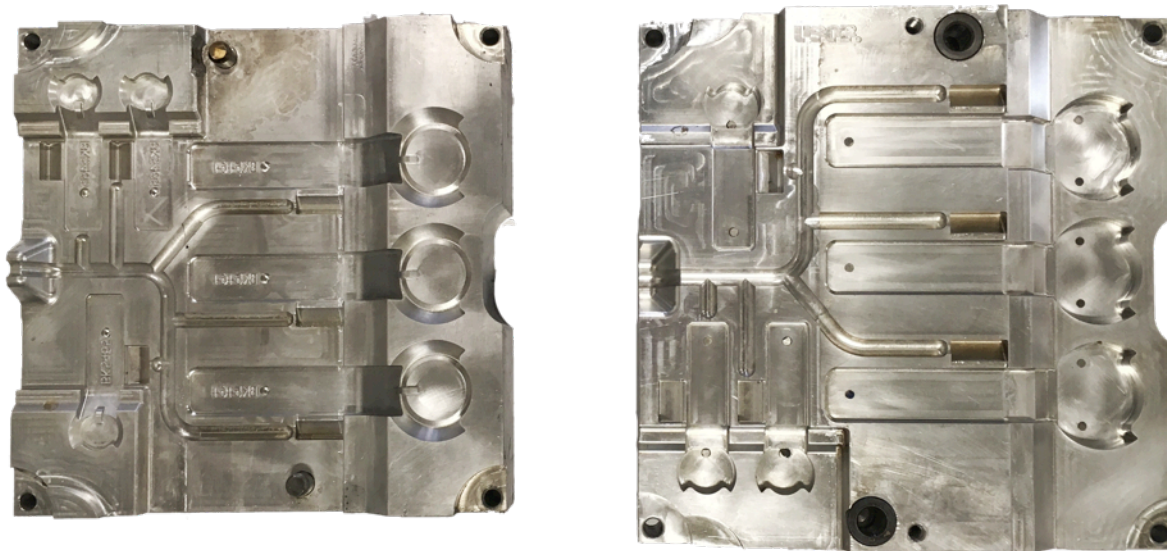
Ruční formy (obrázek 9.) jsou používány v případě menších sérií výrobků, kdy není nutné, aby bylo dosaženo co největšího počtu obtisků v co nejkratším čase. V takovém případě je většinou volen menší počet obtisků ve formě, tím se sníží náročnost na její výrobu a tedy i náklady. Dalším důvodem využití ručních forem je v případě vysoké komplikovanosti voskového modelu, a to především díky vnitřním dutinám a složitým tvarům. V takovém případě je nutné formu vyrobit z více kusů, které jsou následně postupně rozebírány, což u strojního typu forem není možné. Velikost ruční formy není omezena upínací plochou vstřikovacího stroje, proto je možné vyrábět formy i pro rozměrné odlitky, které by se svojí plochou nevešly do rozměrů typizovaných pro automatické vstřikovací lisy. Vstřik vosku do ručních forem je zajištěn pomocí manuálně operovaného vstřikovacího lisu.



Obrázek 9. Ruční forma.

- **Strojové formy**

Strojní formy (obrázek 10.) jsou mnohem častějším typem, především díky větší efektivitě výroby voskových modelů. Strojní forma je zhotovena vždy pouze pro jeden určitý typ vstřikolisu, který slévárna využívá. Nejčastější rozměry formy 250 x 250 x 100 mm. Na rozdíl od ruční formy je u strojní formy vysunutí modelu provedeno pomocí tzv. vyhazovačů a následného vyjmutí obsluhou lisu nebo robotickým manipulátorem, proto u tohoto typu forem musí být řešena i kompletní vyhazovací soustava.



Obrázek 10. Strojní forma.

## 2.2 Násobnost formy

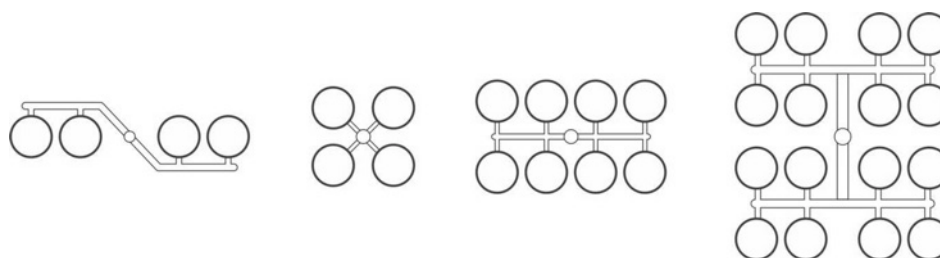
Násobnost formy, neboli počet obtisků v jedné formě. Při volbě násobnosti formy se musí dbát na velikost obtisku, požadované výrobní množství a parametry lisu. Nej kvalitnější model je z formy, která má pouze jeden obtisk, s rostoucím počtem obtisků mírně klesá jejich přesnost. U forem s větší násobností je nutnost volit umístění obtisků tak, aby dráha vtokové soustavy byla co možná nejkratší a stejně dlouhá, aby nedocházelo ke srážení vosku. Počet obtisků ve formě lze vypočítat s ohledem na:

- **vstřikovací kapacitu stroje,**
- **uzavírací sílu stroje,**
- **požadovaný termín dodávky výrobků,**
- **ekonomické hledisko.**

Hlavním kritériem pro maximální počet obtisků je velikost kotvící plochy lisu. Tím jsou určeny základní rozměry formy, do které se poté umístí maximální možný počet obtisků. [18, 19]

### 2.3 Vtokový systém forem

Vtokový systém slouží pro rovnoměrné dopravení vstřikovaného materiálu. Skládá se ze soustavy kanálků, kterými proudí vosk od ústí vstřikovacího válce až k tvarovým částem formy. Tvar, velikost a rozmístění vtokových kanálků mají velký vliv na proudění taveniny ve formě. Určují, zdali se nebudou vytvářet studené spoje nebo staženiny a mají také vliv na povrch modelu. Pokud je to možné, volí se taková konstrukce vtokového systému, aby se tavenina dostala do tvarových částí co nejrychleji a nedocházelo ke zbytečným tepelným a tlakovým ztrátám. Při volbě vtokového systému se musí brát v potaz násobnost formy. Pokud je násobnost formy větší než 1, je nutné, aby se tavenina dostala do jednotlivých tvarových částí ve stejném časovém intervalu a o stejném tlaku. Pokud to z technického hlediska není možné, je provedena úprava vtokových kanálků. Nejčastější typy rozmístění tvarových částí formy a jejich vtokových kanálků lze vidět na obrázku 11. [21, 22, 23]



Obrázek 11. Možnosti zavedení vtokové soustavy [20].

Vtokové kanály jsou vyrobeny do dělicí roviny. Ve většině případů je dělicí rovina vedena středem formy a je tedy určena oddělením forem na dvě poloviny. Složitější modely mohou vyžadovat atypické vedení dělicí roviny, které sebou nese i netradiční vedení vtokového kanálku mimo úroveň vstřikovacího ústí neboli tunelový vtok viz obrázek 12.

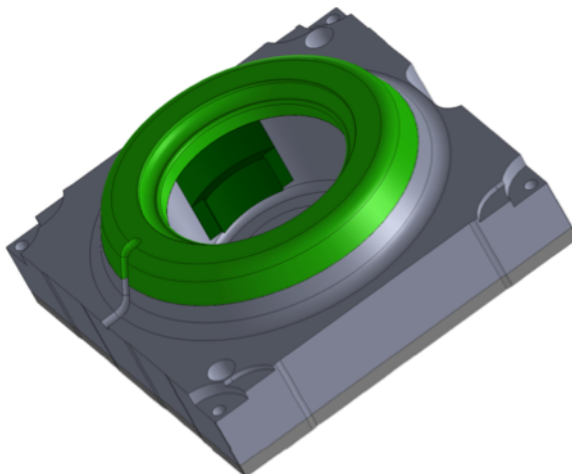
Existuje několik typů tvarů vtokových kanálků a to kruhové, parabolické a lichoběžníkové. Nejvýhodnější a nejčastěji používané jsou ty s kruhovým průměrem, protože poskytují nejmenší tepelné ztráty a neoptimalnější proudění směsi ve formě, nevýhodou je složitější výroba, jelikož se kanál frézuje do obou půlek formy. [22]

### 2.4 Vyhazovací systém forem

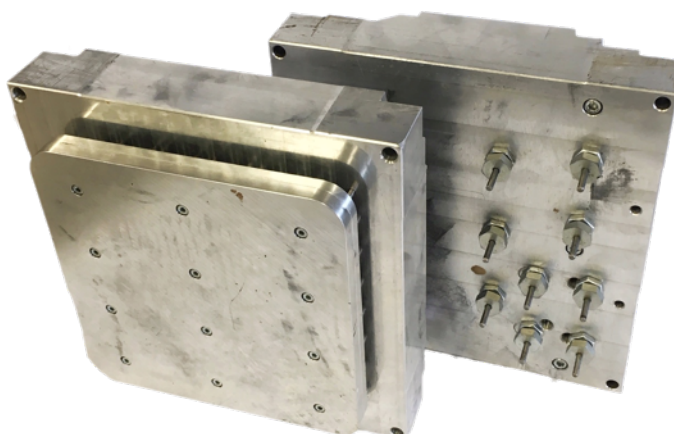
Jakmile je voskový model ve formě dostatečně ochlazený, dojde k jeho vyhození pomocí vyhazovacího systému, viz obrázek 13. Ten se skládá z vyhazovacích tyčí různého průměru, nebo z tzv. vyhazovací desky. Vždy záleží na typu daného lisu. Vyhození vstřiku může být zajištěno i pomocí stlačeného vzduchu nebo manipulátorů. Pohyb vyhazovačů je odvozen především od pohybu formy, ta se při otevření stlačí dolů a dojde k vytlačení vyhazovačů proti hotovému vstřiku, pružiny připevněné na vyhazovače poté zajistí návrat do původní pozice.

Umístění jednotlivých vyhazovačů musí být dobře promyšleno konstruktérem. Je nutné navést vyhazovač do místa modelu, kde je vyšší tloušťka stěny nebo větší množství vstřikované hmoty, aby nedošlo k porušení modelu. Zároveň vyhazovače nemohou zasahovat do funkčních ploch výsledného odlitku

a vyhazovací síla by měla být rovnoměrně rozložena po celém vstříku. Voskové modely jsou velice křehké a správné zvolení umístění vyhazovačů je velmi důležité. [14]



Obrázek 12. Tunelový vtok.



Obrázek 13. Různé vyhazovací systémy.

## 2.5 Odvzdušnění forem

Aby byla forma co možná nejlépe vyplněna voskovou směsí, je nutné zajistit dokonalé odvzdušnění. Proces vstřikování vosku trvá pouze velice krátký okamžik, nedostatečným odvodem vzduchu z útrob formy by mohlo dojít ke vzniku nežádoucích vzduchových bublin v modelu. [19]

Nejčastěji se vzduch vyskytuje v nejvzdálenějším bodu formy od ústí vtoku. Tento bod je v mnoha případech jasně určen a u složitějších forem se musí určovat pomocí počítačové analýzy. Jedná se o místa, která bývají zaplněna taveninou jako poslední. Je žádoucí zajistit postupné vytlačování vzduchu do dělící roviny. Další možnosti odvzdušnění jsou přes tvarové prvky formy a dutiny pro vedení vyhazovačů. Další možností může být zavedení odvzdušňovacích kanálků. [21]

## 2.6 Materiály vstřikovacích forem

Formy jsou nákladné nástroje sestavené často z více dílů. Jsou na ně kladeny vysoké požadavky, a to především v rámci přesnosti, životnosti a nízkých nákladů. Právě cena formy je nejčastěji odvozena od použitého materiálu, ze kterého je forma vyrobena. Mezi nejčastěji používané materiály patří **hliníkové slitiny a oceli**. [18]

Konstrukční části formy musí odolávat opakovanému zatížení a je proto nutné, aby byly vyrobeny z materiálu odpovídající pevnosti. Volba materiálu záleží na více faktorech především na tvarové složitosti, druhu vstřikovaného vosku, velikosti vstřiku, počtu vyráběných kusů, obrobitelnosti materiálu, požadovaných fyzických a mechanických vlastnostech a samozřejmě na ceně. [18, 19]

- **Hliníkové slitiny**

Hliníkové slitiny jsou nejpoužívanějšími materiály pro výrobu forem pro přesné lití. Nejčastěji se jedná o slitiny hliníku, zinku, hořčíku a mědi, které byly v historii používány v leteckém průmyslu. Příklady nejčastěji používaných slitin lze vidět v tabulce 3.

Vstřikování vosku nevyžaduje na rozdíl od vstřikování plastů tak vysoké nároky na odolnost formy, jelikož vosk je mnohem méně pevný než plast a tím pádem se forma při vstřikování vosku tolik neopotřebovává i vstřikovací tlaky a teploty nejsou tak vysoké. Dalším důvodem používání hliníkových slitin je jejich mnohem lepší obrobitelnost ve srovnání s ocelmi. U hliníkových slitin lze dosáhnout až pětinasobné rezné rychlosti při frézování a šesti až osmi násobné rychlosti při elektroerozivním obrábění a díky tomu značně zkrátit čas na výrobu formy a tím i její cenu. Hliník také velmi dobře vede teplo, což zajistí rovnoměrné rozložení tepla vzniklého při vstříknutí voskové směsi, díky čemuž je ochlazení voskového vstřiku ve formě rychlejší a zkrátí se tak interval produkce modelů. [23]

Slévárny pro přesné lití často produkují velké množství různých odlitků a nutnost mít pro každý odlitek i formu je velice nákladné. Cena za zhotovení formy je tedy rozhodujícím faktorem.

Jako nevýhody hliníkových slitin lze uvést její větší náchylnost na mechanické porušení například špatným upnutím formy do vstřikolisu nebo nesprávným založením jádra. Následná oprava takové formy je velice náročná díky horší svařitelnosti hliníku. Nejčastěji je oprava realizována odfrézováním porušené části formy a její nahrazení pomocí upevnitelné vložky.

- **Oceli**

Oceli se pro formy na přesné lití nevyužívají tak často, jako hliníkové slitiny. Příklady nejčastěji používaných ocelí lze vidět v tabulce 4.

Jejich uplatnění se nejvíce projevuje v případech, kdy se počítá s vysokou zátěží formy například u výroby modelů turbínových kol nebo u velké série odlitků. Dalším důvodem využití ocelových forem může být požadavek na vyšší tlak při plnění voskovou směsí, kde by v dlouhodobém horizontu hliníková forma nebyla schopna odolat. Forma z oceli mnohem lépe odolává při manipulaci a skladování a je méně náchylná k otlacení

nebo opotřebení ve stroji. Ocelovou formu je také lze lépe vyleštit, a tím dosáhnout lepšího povrchu u voskového modelu.

Větší pevnost ocelové formy sebou ale kromě výhod v delší životnosti nese fakt, že jejich výroba je mnohem složitější a časově náročnější, což se také promítne na její ceně. Další nevýhodou může být i fakt, že formy jsou do lisů zakládány ručně, a to na denní bázi. Manipulace s ocelovou formou je značně složitější, než s formou hliníkovou. V určitých případech musí být proto zajištěn manipulátor, který usnadní obsluhu zasazení formy do lisu.

Tabulka 3. Vybrané hliníkové slitiny [25–29].

EN	Chemické složení	Popis
AW 5083	AlMg <sub>4,5</sub> Mn <sub>0,7</sub>	Přirozeně tvrdý, nevytvrditelný materiál. Dobrá chemická stálost, obrobitelnost, leštitelnost a svařitelnost. Vyznačuje se střední pevností v tahu 280 MPa a tvrdostí 75 HB.
AW 6063	AlMg <sub>0,7</sub> Si	Chemicky stálý materiál, výborná obrobitelnost a velmi dobrá leštitelnost. Vyznačuje se pevností v tahu 220 MPa a tvrdostí 60 HB.
AW 7022	AlZn <sub>5</sub> Mg <sub>3</sub> Cu	Vytvrditelná slitina se skvělou svařitelností. Vysoce stabilní tvrdost po celém průřezu desky až do hloubky přes 100 mm. Vyznačuje se pevností v tahu 520 MPa a tvrdostí 165 HB.
AW 7075	AlZn <sub>5,5</sub> MgCu	Vytvrditelná slitina velice podobná AW 7022. Patří mezi nejpoužívanější vysokopevnostní slitinu využívanou pro hliníkové formy. Od tloušťky 100 mm ale projevuje velký pokles pevnosti a tvrdosti po celém průřezu desky. Vyznačuje se pevností v tahu 360–540 MPa a tvrdostí 104–160 HB.
AW 7122	AlZn <sub>5</sub> Mg <sub>3</sub> Cu	Vysoce pevnostní válcová deska vyrobená upravením slitiny AW 7075. Její výhoda je především ve stabilitě tvrdosti a pevnosti pro tloušťky materiálu až do 300 mm a je tedy vhodná především na formy pro velké odlitky. Je také velmi dobře leštitelná, ale nevhodná pro svařování. Vyznačuje se pevností v tahu 500 MPa a tvrdostí 150 HB.



Tabulka 4. Vybrané oceli [30–34].

DIN	Chemické složení	Popis
1.2738	40CrMnNiMo8-6-4	Předběžně zušlechtěná ocel velmi vhodná pro výrobu vstřikovacích forem. Má vynikající metalurgickou čistotou a dobrou leštitelností. Přísada niklu zajišťuje rovnoměrnou pevnost v celém průřezu. Není korozivzdorná. Vyznačuje se pevností v tahu 1050–1100 MPa a tvrdostí 235 HB.
1.2316	X36CrMo17	Korozivzdorná martenzitická ocel která je navíc legována chromem. Má velmi dobrou houževnatost, dobře odolává opotřebením, vynikající leštitelnost a vylepšenou obrobitelnost. Vyznačuje se pevností v tahu 750–850 MPa a tvrdostí 250 HB.
1.2343	X38CrMoV5-1	Kalitelná ocel velmi často používaná pro konstrukční části forem. Mezi její hlavní přednosti patří velmi nízký obsah plynů a nežádoucích stopových prvků, vysoká houževnatost a velmi dobrá leštitelnost. Velmi dobře také odolává vysokým teplotám. Vyznačuje se pevností v tahu 800 MPa a tvrdostí 210 HB.
1.2162	21MNCr5	Cementační legovaná ocel s dobrou obrobitelností a leštitelností. Po cementačním kalení je velmi odolná proti opotřebením. Má velmi vysokou povrchovou pevnost při současné houževnatosti jádra. Vyznačuje se pevností v tahu 720 MPa a tvrdostí 220 HB.
1.2767	X45NiCrMo4	Kalitelná ocel s vysokou odolností proti opotřebením, namáhání tlakem a rázům. Je též velmi odolná proti opotřebením, dobře leštitelná a má dobrou stálost rozměrů. Vyznačuje se pevností v tahu 880 MPa a tvrdostí 260 HB.

## 2.7 Smrštění

Technologie přesného lití je přímo předurčena pro výrobu odlitků takzvané „na hotovo“, což znamená, že s dalším opracováním odlitku se počítá pouze v ojedinělých případech. Z tohoto důvodu musí být odlitky zhotoveny již s velmi malými tolerancemi. Pro zvládnutí tohoto úkolu je tedy nezbytné znát přesné chování voskového modelu při jeho výrobě, stejně tak jako faktory, které ovlivňují rozměrové změny v celém průběhu technologie. Je nutné znát i rozměrové změny při výrobě, tuhnutí a vypalování skořepiny a také smrštění odlité slitiny v době jejího tuhnutí. Nejvýznamnější fáze rozměrových změn jsou zhotovení voskového

modelu a poté chladnutí slitiny. Forma pro voskové modely musí brát tyto rozměrové změny v potaz a patřičně upravit rozměry voskového modelu, aby po smrštěních v rámci celého procesu odlitek splňoval tolerance dané zákazníkem. Následné opravy forem jsou jak časově, tak finančně náročné, v případech zmenšení voskového modelu navíc prakticky nemožné. Omezení smrštění voskového modelu se dá docílit více způsoby. [3]

- **Vliv návrhu formy**

První možností ovlivnění smrštění voskového modelu je správným návrhem formy samotné. Velmi důležitým parametrem je volba délky a pozice vtokové soustavy. Vyvarování se zbytečných záhybů a změn směrů ve vedení voskové směsi k modelu a také kratší délka vtokové soustavy snižují smrštění. Dále je nutné dbát na rozmístění obtisků ve formě. Bylo experimentálně ověřeno, že příliš malý poměr mezi tloušťkou stěny formy a velikostí obtisku vede k nevyváženému přenosu tepla při chladnutí a tím zvětšuje smrštění. [36]

- **Vliv vstřikování**

Další možností omezení smrštění v průběhu technologie přesného lití je změna parametrů při vstřikování vosku. Jak bylo zmíněno dříve, vosk je do forem vpraven pomocí vstřikolisů, tyto zařízení mají nastavitelné možnosti vstřikovacího procesu. Na rozměrovou změnu vosku v dutině matečné formy mají vliv především teplota vstřikované směsi, teplota formy při vstřiku, doba vstřikování, tlak vstřiku a následný dotlak, neboli dodatečné působení tlakem vstřikolisů za tlaku vyššího, než byl vstřikovací tlak. Obecně platí, že s rostoucí teplotou vstřikované směsi roste i hodnota smrštění, je tedy nutné najít ideální teplotu vosku, při které bude mít vosk požadovanou zabíhavost a zaplní rovnoměrně všechny části dutiny formy a zároveň nedojde ke smrštění voskového modelu. Dále bylo zjištěno, že smrštění klesá s rostoucím časem a tlakem vstřiku. Pozitivní dopad na omezení smrštění má i prodloužení doby dotlaku, kdy dojde k zhutnění směsi v dutině, čímž se omezí její smrštění při tuhnutí. [36, 37, 38]

- **Vliv odlévání**

Po odlití požadované slitiny do keramické skořepiny dochází k jejímu smrštění v průběhu tuhnutí. To je dáno především jejím chemickým složením, zvolenou teplotou lití a samotným průběhem lití. Regulace těchto parametrů je ale značně omezena. Jedním z důvodů je, že teplota lití musí být udržována v úzkém rozmezí, aby slitina zaběhla do všech částí formy. Změna chemického složení slitiny může vést k nesplnění mechanických požadavků odlitku a tím pádem není možná. Nicméně snížení smrštění odlitků lze dosáhnout pomocí rychlosti lití, kdy delší doba snižuje smrštění a to především u tenkostěnných odlitků nebo přidáním nálitků do modelového stromečku. [36]

Při zvážení veškerých vlivů v průběhu technologie na smrštění se stanovuje procentuální zvětšení voskového modelu vůči finálnímu odlitku. Dutina formy je poté zhotovena v daném měřítku. Tuto hodnotu stanovuje zákazník (slévárna), který výrobu formy poptává na základě zkušeností z předešlé výroby a může být



tedy různá, nejčastěji se však pohybuje v rozmezí 0–1,2 %.

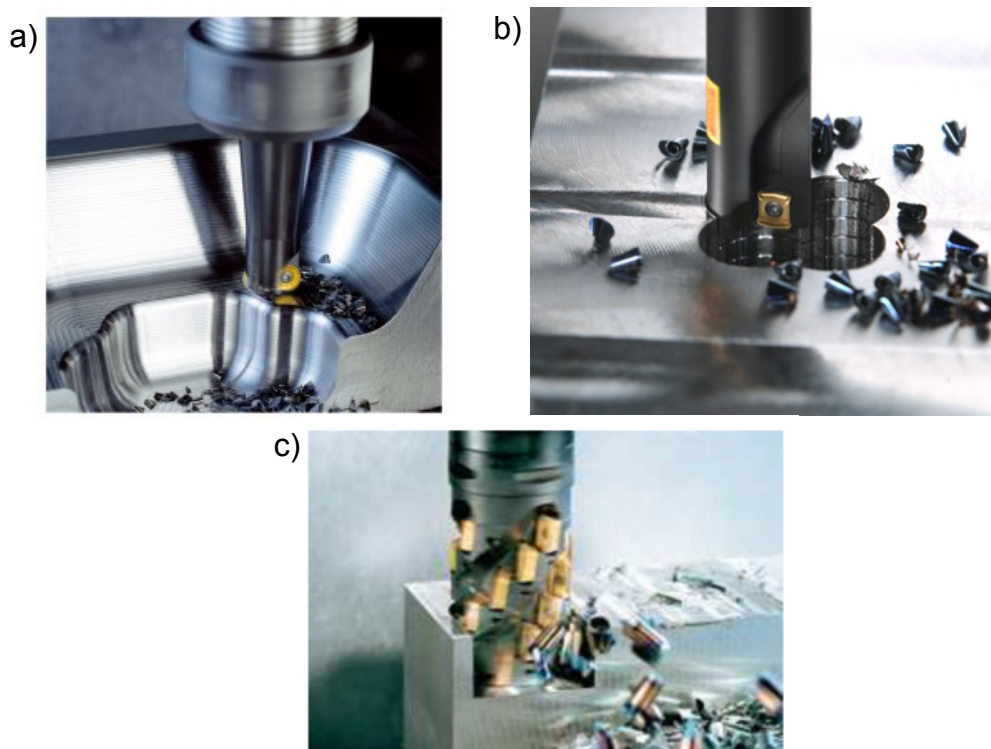
### 3 TECHNOLOGIE VÝROBY VSTŘIKOVACÍCH FOREM

Výroba vstřikovacích forem má v České republice dlouholetou tradici a je ceněným odvětvím současného strojírenství. Forma pro přesné lití je komplexní nástroj jehož výroba je v mnoha případech velmi složitá a vyžaduje použití více technologií. V největší části případů je výroba formy prováděna třískovým obráběním na CNC frézovacích centrech, které dohromady s použitím moderních programovacích nástrojů zefektivňují a zkvalitňují výrobu. Tato technologie pokryje největší část tvarových prvků formy.

Kapitola bude zaměřena na problematiku třískového obrábění a také budou zmíněny náležitosti, které se pojí s obráběním hliníkových slitin, jakožto hlavního používaného materiálu pro výrobu forem.

#### 3.1 Třískové obrábění

Třískové obrábění ( obrázek 14.) je vnímáno jako technologický proces, při kterém dochází k vytváření nových rozměrů a povrchů pomocí odstraňování materiálu z polotovaru ve formě třísky. U výroby vstřikovacích forem se z oblasti třískového obrábění využívají technologie jako broušení, frézování závitů, vrtání a frézování. [40]



Obrázek 14. Příklady třískového obrábění [44, 40]:

a) frézování dutiny b) vrtání otvorů c) čelní frézování.

##### 3.1.1 Technologie frézování

Frézování je nedílná součást technologií třískového obrábění, kde je hlavní rezný rotační pohyb vykonáván vícebřitým nástrojem, pomocné pohyby koná obrobek. V minulosti bylo frézování využíváno především pro úpravu rovinných

ploch, ale s technologickým vývojem se začaly objevovat vyspělejší stroje, které umožnili posun technologie tak, že je v současné době možné vyrobit prakticky jakýkoliv tvar obrobku. Dutiny, otvory, ale i závitů jsou dnes běžnými konstrukčními prvky vyráběnými pomocí frézování. [40, 41]

S rostoucí složitostí obrobku roste samozřejmě i složitost nastavení celého procesu. Kromě stroje a správně nastavených řezných podmínek má velmi vysoký vliv na kvalitu výsledného obrobku také použitý nástroj a jeho dráha. Způsob řízení pohybu nástroje je umožněno pomocí CNC řízení a podpory CAD/CAM softwarů. V dnešní době není problém naprogramovat dráhu nástroje prakticky ve všech směrech. Pětiosá frézovací centra umožňují posuv vřetene i stolu ve 3 osách při současné rotaci kolem dalších dvou os, tím je docíleno pohybu nástroje po libovolné křivce. [40, 41]

V rámci řezného procesu dochází k odřezávání určitého objemu materiálu – třísky pomocí každého zubu nástroje. Řez je přerušovaný a dochází při něm k rázovému zatížení při kontaktu zubu s obrobkem. V průběhu procesu dochází ke změně řezných sil a teplotním šokům, které vznikají opakovaným vnikem do a z materiálu. Na druhou stranu není nutné se zabírat utvářením a lámáním třísek. [40, 41]

### 3.1.1.1 Kinematika frézování

Základními parametry frézování jsou řezná rychlost  $v_c$ , posuvová rychlost  $v_f$  a posuv na otáčku  $f_n$ . Nastavením jednotlivých parametrů lze ovlivnit proces frézování a tím i kvalitu provedení výsledného obrobku.

Řezná rychlost vyjadřuje okamžitou rychlost hlavního pohybu daného bodu na ostří nástroje vzhledem k obrobku. Hodnota řezné rychlosti u frézování hliníku se pohybuje v rozmezí 1 000–5 000 m/min. Tato hodnota je každopádně pouze orientační, finální volba řezné rychlosti závisí především na druhu a chemickém složení obráběné hliníkové slitiny, výkonu stroje, typu nástroje a jiné. Výpočet řezné rychlosti je proveden na základě vzorce 1. [40, 43]

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \text{ [m/min]} \quad (1)$$

Posuvová rychlost vyjadřuje okamžitou rychlost posuvového pohybu daného bodu na ostří nástroje vzhledem k obrobku. Hodnota posuvové rychlosti je závislá na parametrech zvolené frézy, a to posuvu na zub  $f_z$  a počtu zubů frézy  $z$ . Hodnota posuvu na zub je vypočtena z doporučené hodnoty maximální tloušťky třísky. Posuv na otáčku určuje vzdálenost posunutí nástroje za jednu celou otáčku. Výpočet posuvové rychlosti a posuvu na otáčku je proveden na základě vzorce 2 a 3. [40, 43]

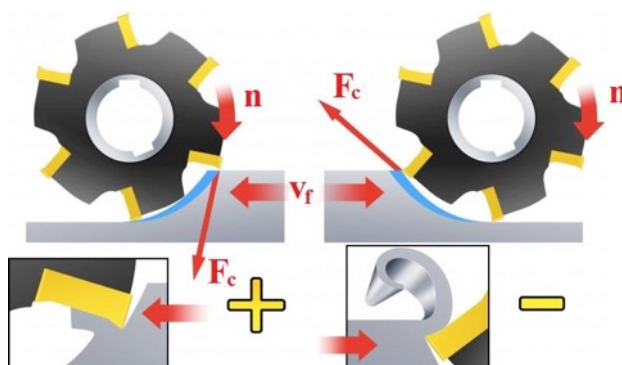
$$f_n = f_z \cdot z \text{ [mm]} \quad (2)$$

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n \text{ [mm/min]} \quad (3)$$

### 3.1.1.2 Rozdělení frézování

Z kinematického hlediska lze frézování rozdělit na **sousledné** a **nesousledné** (obrázek 15.). Při sousledném frézování je rotace nástroje ve stejném směru jako posuv obrobku. Řezné síly směřují dolů do stolu stroje a tím je obrobek vtahován pod nástroj a drží břit v záběru. Tloušťka třísky je při vniku zubu do materiálu maximální, při výstupu je nulová. Výhody sousledného obrábění jsou vyšší trvanlivost břitu, tím pádem umožnění použití vyšších řezných rychlostí, dále nižší potřebný řezný výkon a lepší hodnota drsnosti obrobeného povrchu. K nevýhodám patří především rázy vznikající při vstupu zubu do materiálu. [40].

Při nesousledném frézování je rotace nástroje proti směru posuvu obrobku. Řezné síly směřují ven z obrobku a tím vytahují obrobek z upnutí. Tloušťka třísky je při vniku do materiálu minimální a postupně stoupá. Při vstupu do řezu působí na břit velké síly, které způsobují jeho obušování a odírání v důsledku tření. Obecně je životnost nástroje stejně tak i kvalita povrchu při nesousledném frézování nižší než u sousledného. K výhodám nesousledného obrábění patří odstranění rázů, jelikož tříska začíná na minimální hodnotě a také je vhodné pokud má obrobek rozdílné velikosti přídavek na obrábění. [43]



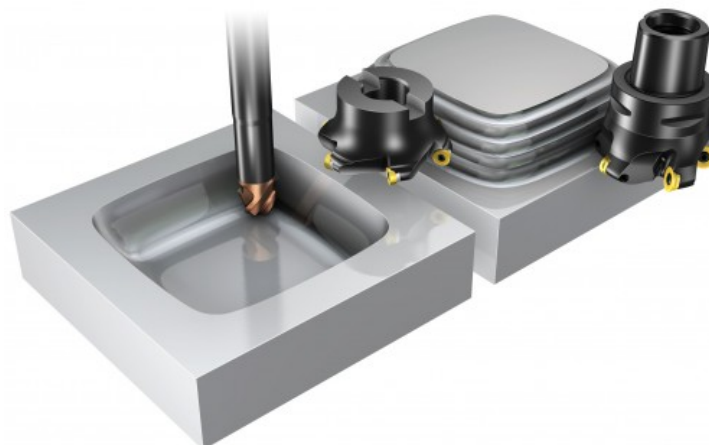
Obrázek 15. Sousledné a nesousledné frézování [40].

Z technologického hlediska a závislosti na použitém nástroji lze rozdělit frézování do dvou základních skupin, a to **válcové**, kdy dochází k obrábění materiálu obvodem nástroje a **čelní**, kdy je materiál obráběn čelem nástroje. U čelního frézování dochází k interakci jak obvodových, tak čelních břitů a probíhá současně sousledné i nesousledné frézování. [43]

Podle typu operace lze frézování dělit na **hrubování** a **dokončování** (obrázek 16.). Při hrubování jde především o co největší úběr materiálu v co nejkratším čase. Při hrubování je důležité, aby byl nástroj v plynulém konstantním, sousledném záběru. Dráhy nástroje by na sebe měly plynule navazovat a nemělo by docházet k prudkým změnám směru, aby byla kinematika procesu co možná nejplynulejší. Nejčastěji je k hrubování využíváno kruhových břitových destiček, které nabízejí více ploch pro opotřebení a lépe se přizpůsobí obráběnému materiálu. [43, 44]

Dokončování neboli obrábění na čisto má za úkol odstranit zbylý přídavek po hrubování a co nejlépe se přiblížit požadovanému rozměru v rámci daných tolerancí. Dále je úkolem dokončování zajistit požadovanou drsnost a případnou vlnitost povrchu, případně zajistit požadované vlastnosti povrchové vrstvy. Průběh

řezu při dokončování by měl být co nejplynulejší s malými hodnotami odběru materiálu, které zajistí požadovanou kvalitu obráběného povrchu. Nejčastěji je používáno stopkových fréz s kulovou hlavou. [42, 43]



Obrázek 16. Příklad dokončování kulovou frézou a hrubování pomocí kruhových VBD [44].

### 3.1.2 Technologie vrtání

Vrtání (obrázek 17.) jakožto vysoce efektivní a účinný proces obrábění válcových děr je charakterizováno nástrojem, tedy vrtákem, který svým tvarem a vlastnostmi ovlivňuje parametry obrobené plochy. Vrtací aplikace mohou působit velmi jednoduše, ve skutečnosti jsou to ale velmi složité operace, kdy špatná funkce nebo selhání nástroje může mít velmi vážné následky. Vrtání se provádí do plného materiálu nebo se zvětšují díry předvrtané, předlité atd. [43, 44]

V rámci řezného procesu dochází k řezání materiálu pomocí břítu vrtáku, podle typu může mít vrták nejčastěji dva, ale i více břitů. Na rozdíl od frézování, je odvod třísek při vrtání zásadním problémem. Zaseknutí třísky může způsobit poškození vrtáku nebo díry. Proto je důležité při vrtacím procesu využívat řezné kapaliny, která zlepšuje odvod třísek, chladí nástroj a také snižuje šanci zadření vrtáku. [43, 44]



Obrázek 17. Příklad možných operací vrtání [44].

### 3.1.2.1 Kinematika vrtání

Základními parametry vrtání jsou řezná rychlost  $v_c$ , posuvová rychlost  $v_f$  a posun na zub  $f_z$ . Nastavením jednotlivých parametrů lze ovlivnit proces vrtání a tím i kvalitu provedení výsledné díry.

U procesu vrtání, stejně jako u všech jeho přidružených operací jako zahlubování, vystružování apod., je hlavním pohybem rotace nástroje. Vedlejší pohyb je lineární pohyb a koná jej také nástroj.

Řezná rychlost je v ose vrtáku nulová a směrem k obvodu nástroje se zvětšuje. Výpočet řezné rychlosti je tedy vztažen k obvodové rychlosti nástroje a závisí na otáčkách a průměru nástroje. Velikosti řezných rychlostí pro vrtání do hliníku se se pohybují v řádů desítek až jedné stovky m/min a lze je vypočítat pomocí vzorce 1. [42, 44]

Posuvová rychlost je složkou, která určuje produktivitu vrtání a určíme ji podle vzorce 4. Je dána posuvem na otáčku  $f_n$  a otáčkami vrtáku  $n$ . Jelikož jsou vrtáky vícebřitě nástroje, definuje se pro ně také posuv na břit  $f_z$ . Vzorec 5. pro výpočet posuvu na břit, lze vidět níže.

$$v_f = f_n \cdot n \text{ [mm/min]} \quad (4)$$

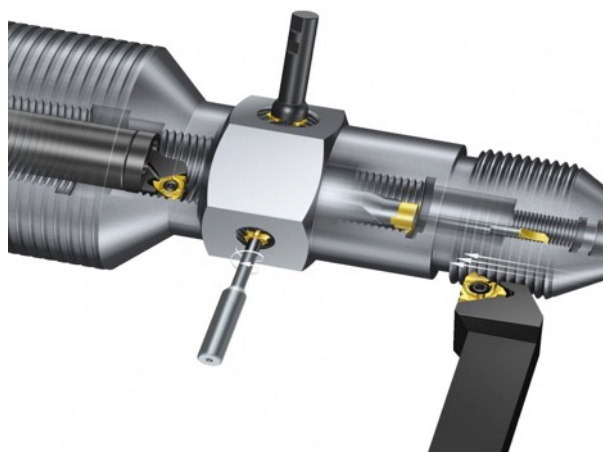
$$f_z = \frac{f_n}{z} \text{ [mm]} \quad (5)$$

### 3.1.3 Technologie výroby závitů

Závity plní spojovací a pohybové funkce a jsou nedílnou součástí strojírenských konstrukcí. Technologicky patří k nejsložitějším úkonům celého procesu obrábění a často se realizují až na jeho konci. Proto musí být zajištěna bezchybnost této operace. Závity jsou charakterizovány typem profilu (metrický, Whitworthův, atd), stoupáním, počtem chodů a směrem rotace. [43, 44]

Při výrobě závitu je velmi důležité chlazení a mazání pomocí řezné kapaliny, která pozitivně ovlivňuje trvanlivost nástroje a odvod třísek. Řezná kapalina může být vedena vnitřním nebo vnějším způsobem. Vnitřní vedení kapaliny lépe odvádí třísku a je vhodnější pro většinu operací, nástroje jsou ale dražší. Vnější vedení kapaliny je využíváno častěji a to především v případech, kdy se nevyskytují problémy s odvodem třísek. [43, 44]

Existuje celá řada způsobů výroby závitů, některé z nich lze vidět na obrázku 18. Nejčastěji je využíváno obráběcí metody, a to buď frézováním rotačním nástrojem, řezáním závitníkem nebo soustružením. Dalšími metodami jsou tvářecí způsob pomocí tvářecího závitníku nebo okružovací způsob pomocí závitotvorného prstence. Jednotlivé metody jsou voleny v závislosti na požadované kvalitě závitu, druhu materiálu, druhu závitu, zda je závit slepý nebo průchozí, atd. [43, 44]



Obrázek 18. Příklady výroby závitů [44].

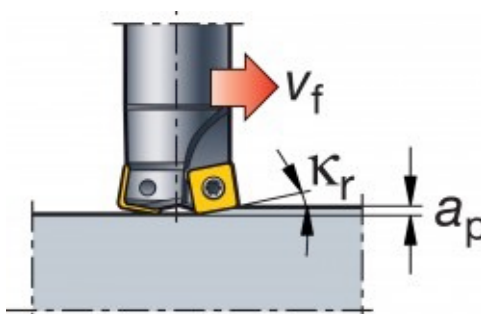
### 3.2 Strategie frézování formy

Výroba formy pro přesné lití se skládá z více jednotlivých obráběcích operací, z nichž každá vyžaduje individuální přístup z hlediska volby nástrojů, rezných podmínek a dalších parametrů. Správné nastavení těchto parametrů vede ke zkrácení strojních časů, zlepšení povrchu a dosažení dobrých geometrických tolerancí. V této kapitole budou jednotlivé operace potřebné k výrobě formy rozebrány.

#### 3.2.1 Frézování povrchu

Tvorbou povrchu znamená frézování plochy formy do souvislé roviny, do které jsou následně vyfrézovány jednotlivé kapsy. Povrch je vytvořen pomocí čelního frézování, které patří k nejrozšířenějším operacím vůbec. Lze pro něj využít velké množství nástrojů, nejčastěji jsou však využívány frézy s úhlem nastavení 10–65°. [44]

Při frézování povrchu hliníkových forem se často dosahuje rezné rychlosti přesahující 700 m/min, což vyžaduje použití fréz s malým úhlem nastavení  $K_r$  nebo fréz s kruhovými břitovými destičkami a také vysoké rychlosti posuvové rychlosti  $v_f$ . Maximální tloušťka třísky  $a_p$  se při malých úhlech nastavení snižuje, což umožňuje použití vysokých rychlostí posuvu, a tím pádem vysoké produktivity bez nebezpečí přetížení břitové destičky (obrázek 19.). [44]



Obrázek 19. Použití frézy s malým úhlem nastavení [44].



### 3.2.2 Frézování obvodu

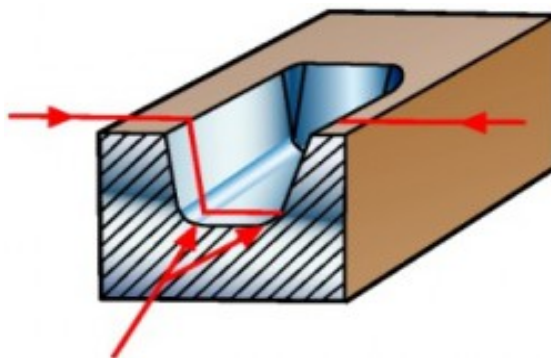
Tvorba obvodu formy lze popsat jako odstranění bočních přídavků z polotovaru a vytvoření požadovaného obvodového tvaru a rozměrů. Dochází tedy k rohovému frézování, kdy jsou tvořeny dvě plochy současně, nástroj tedy obrábí jak svou boční, tak čelní stranou. Využívají se především přesné rohové a stopkové monolitní frézy. [44]

Při obrábění hran a obrysů obíhá nástroj obrobek po vrstevnici s postupně klesající tendencí. Nutností je udržení dostatečně velkého počtu zubů v záběru a plynulý průběh řezu. Pro dosažení vysoké efektivity a kvality povrchu je využíváno monolitní karbidové frézy s velkým úhlem stoupání šroubové drážky. Pro potlačení vibrací je využíváno techniky narolování do záběru, kdy tloušťka vznikající třísky je na výstupu z řezu nulová, tím je zajištěna vyšší rychlost posuvu a delší trvanlivost nástroje. Tato metoda také brání prudkým změnám směru obrábění a tím pozitivně ovlivňuje frézování kolem vnějších rohů. [44]

### 3.2.3 Frézování dutin

Tvarové frézování dutin zahrnuje především víceosé frézování dvou a třírozměrných konvexních tvarových prvků formy. Pro dosažení ideálních výsledků je proces nutné rozdělit na hrubování a dokončování, někdy navíc i polodokončování. Frézování dutin je rozděleno na dvě základní strategie obrábění a to **kopírovací** a **konturovací** frézování. [44, 45]

Kopírovací frézování (obrázek 20.) je považováno za tradiční a nejjednodušší metodu programování dráhy nástroje. Je založena na kopírování profilu a často představuje kombinaci sousledného a nesousledného frézování s velkým počtem výjezdů a nájezdů ze záběru. Tyto výjezdy a nájezdy způsobují průhyb nástroje, který poté zanechává výškové stopy na obrobené ploše. Tato metoda neumožňuje plné využití stroje i nástrojů a tím snižuje efektivitu obrábění a prodlužuje strojní čas. [44, 45]

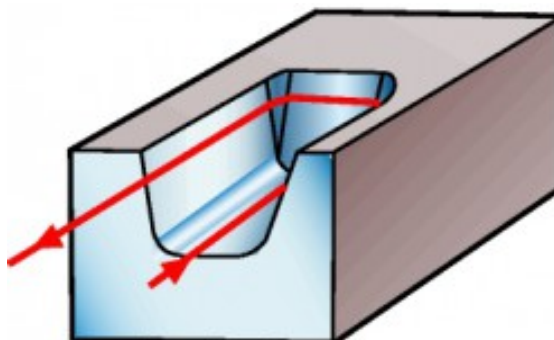


Obrázek 20. Kopírovací frézování [44].

Druhou a vhodnější metodou je konturovací frézování (obrázek 21.), při němž nedochází k omezenému odebrání vrstev s pevnou hodnotou v ose z, ale k obrysovému souslednému frézování po vrstevnici. Tento přístup umožňuje lepší využití stroje a nástrojů, tím se výrazně zkracují strojní časy, zvyšují se geometrické přesnosti a prodlužuje se životnost nástroje. Konturování je v ideálním případě prováděno obvodem frézy, protože je v tomto případě v záběru

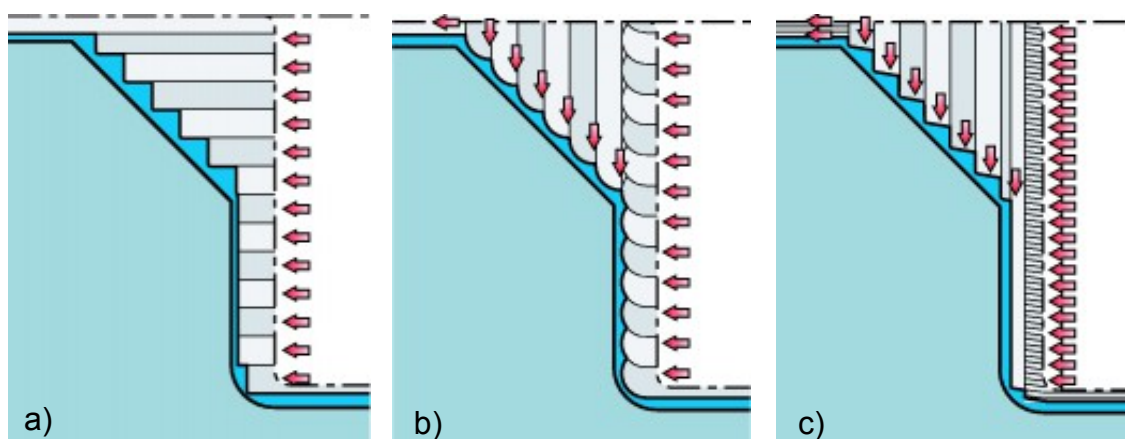


větší počet zubů. Dochází při něm k menšímu počtu náhlých změn zatížení nástroje a nástroj je udržován v konstantním záběru a nedochází tedy k rázům způsobeným nájezdem a výjezdem z materiálu. [44]



Obrázek 21. Konturovací frézování [44].

Hrubování, jakožto první fáze frézování dutin má za úkol efektivní odebrání co největší části materiálu v co nejkratším čase. Při vytváření dutiny v celistvém povrchu je důležité použití vhodného nástroje, který zanechá co nejmenší přechody mezi jednotlivými průchody nástroje. První volbou je použití rohové frézy (obrázek 22 a.), která umožní odebrat velké množství materiálu, ale zanechá povrch s velkými přechody, díky čemuž se musí zařadit i proces polodokončování, který vzniklý povrch srovná. Další možností je použití fréz s kruhovými VBD (obrázek 22 b.). Kruhové destičky se lépe přizpůsobí obráběnému povrchu a přechody mezi jednotlivými průchody nejsou tak velké. Poslední alternativou je použití fréz pro vysoké rychlosti posuvu (obrázek 22 c.). Díky malým hloubkám řezu, které se u těchto fréz nastavují, je možné ponechat menší přídávky pro následné dokončování, které navíc budou mít rovnoměrné rozdělení, tím se zvýší kvalita součásti. [44]

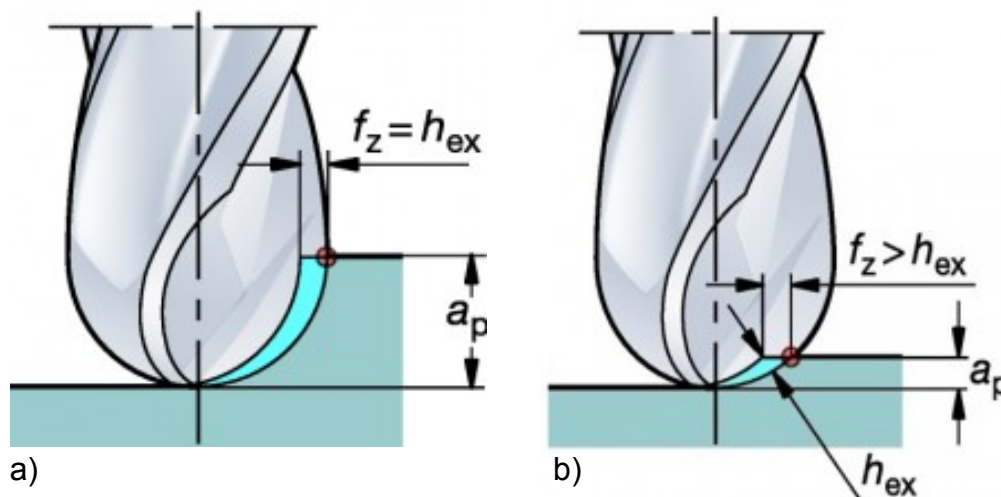


Obrázek 22. Možné strategie hrubování [44]:

a) rohovou frézou b) kruhovými VBD c) hrubování vysokorychlostní frézou.

Dokončovací operace u dutin forem slouží pro přesné obrobení rozměrů tvarových prvků formy, splnění požadovaných geometrických tolerancí a dodržení předepsaných hodnot drsnosti povrchů. Používány jsou především frézy s kulovým čelem u kterých je možnost nastavení tzv. mělkého řezu viz obrázek 23.

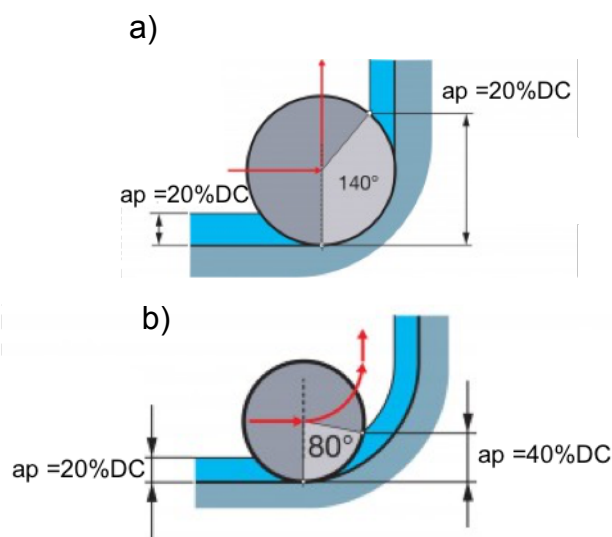
Krátká doba záběru břitu a nízké hloubky řezu zvyšují řeznou rychlost  $v_c$ , tím se zkracuje čas nutný pro přestup tepla, což vede ke snížení teploty nástroje i obrobku. Efekt ztenčení třísky také umožní zvýšení posuvu na zub  $f_z$ . [44]



Obrázek 23. Zavedení mělkého řezu [44]:  
a) před zavedením b) po zavedení.

### 3.2.4 Frézování rohů

Při frézování vnitřních rohů formy se často volí nástroj s rádiusem totožným s rádiusem rohů (obrázek 24 a). Tento přístup však není vhodný, jelikož při lineárním pohybu nástroje dojde při změně směru k jeho krátkému zastavení, kdy se zvýší radiální oblouk záběru, což klade extrémní nároky na břit. Zvyšuje se tření a teplota, vznikají vibrace a může dojít k vylamování, či zničení břitu. Řešením tohoto problému je zvolení frézy s menším průměrem a naprogramování poloměru na dráze nástroje pomocí kruhové interpolace (obrázek 24 b). Tím se zamezí zastavení nástroje, sníží se jeho radiální oblouk záběru a umožní použití větších hloubek řezu a rychlostí posuvu. [44]



Obrázek 24. Příklad frézování rohů (DC = průměr nástroje) [44]:  
a) lineární pohyb b) pohyb interpolací.

### 3.3 Obrábění hliníkových slitin

Obrábění čistého hliníku je zejména kvůli jeho struktuře velmi náročné. Čistý hliník jakožto konstrukční materiál se ve strojírenské praxi prakticky nepoužívá. Je to především díky jeho špatným mechanickým a technologickým vlastnostem kdy mez pevnosti v tahu nedosahuje 100 MPa. Proto se uplatňují především hliníkové slitiny. Mezi prvky zlepšující vlastnosti hliníkových slitin a zvyšují jejich vhodnost pro obráběcí aplikace patří měď, hořčík, mangan, zinek, chrom. [46]

#### 3.3.1 Nárůstek

Nárůstek (obrázek 25.) se u slitin hliníku projevuje jako plasticky zdeformované částice obráběného materiálu. Je určen řeznými podmínkami a vlastnosti obráběného materiálu. Vlivem adheze na řezné hraně bříty dochází ke vzniku mikrosvarových spojů, což vede až ke vzniku nárůstku. Nárůstek je tvrdší než obráběný materiál a plní částečně funkci bříty. Postupem času dochází k růstu nárůstku a tím se mění úhel řezu nástroje. Při ulomení nárůstku dojde k jeho vtlačení do obrobené plochy, kde se vytvoří nerovnost. Tento proces se v průběhu obrábění opakuje a negativně ovlivňuje drsnost povrchu. Opakované lámání nárůstku navíc způsobuje kmitání nástroje. [46]

Odstranění nárůstku je možné zvolením vhodné procesní kapaliny nebo změnou řezných podmínek. Nárůstek se nejčastěji vyskytuje při řezných rychlostech 5–80 m/min. Velikost nárůstku také klesá se stoupající pevností materiálu. [46, 47]



Obrázek 25. Nárůstek na řezné hraně nástroje [49].

#### 3.3.2 Obrobitelnost hliníkových slitin

Pojmem obrobitelnost lze vysvětlit jako souhrn vlastností a parametrů materiálu, které ovlivňují jeho vhodnost pro obráběcí operace. Nejde o veličinu, která by měla určitou hodnotu, ale o technologickou vlastnost. Obrobitelnost nezávisí pouze na mechanických, chemických a fyzických vlastnostech ale také na požadavcích na přesnost, životnosti nástrojů, řezných silách, atd. [46]

Obrobitelnost čistého hliníku je oproti jeho slitinám velmi špatná, zejména díky jeho struktuře. Slitiny hliníku se ve srovnání s ostatními materiály řadí mezi dobře obrobitelné. Oproti oceli stejné pevnosti jsou řezné síly u hliníkových slitin mnohem nižší. Z chemického hlediska lze slitiny hliníku rozdělit podle obrobitelnosti na 3 skupiny: [42, 46]

- **dobře obrobitelné slitiny,**

Do této skupiny patří duraly a slitiny Al-Cu, Al-Mg, Al-Cu-Mg, Al-Cu-Zn-Mn

- **obrobitelné slitiny,**

Slitiny Al-Si, Al-Si-Cu (Si<5%)

- **těžko obrobitelné slitiny.**

Slitiny Al-Si (Si = 5–12%), slitiny s přísadou Ni, Fe, Mg

### 3.3.3 Vlastnosti hliníkových slitin při obrábění

Při obrábění slitin hliníku se projevují jejich charakteristické vlastnosti, které ovlivňují výslednou kvalitu obrobků. Jednou z nejtypičtějších vlastností je nízký bod tání. Při obrábění dochází ke vzniku vysokých teplot a odcházející třísky se lepí na nástroj a vzniká nárůstek, který snižuje kvalitu obrobeného povrchu. Vysoké teploty vznikající při obrábění ovlivňují obrobek také díky vysokému koeficientu teplotní roztažnosti hliníku. Velká část tepla neodchází do třísky, ale do obrobku. Obrobek se působícím teplem zvětšuje, při ochlazení smršťuje, což vnáší problémy do řízení rozměrové přesnosti. Obecně se slitiny hliníku vyznačují malým modulem elasticity. To má za následek, že obrobený povrch má velikou oblast elastického zotavení, kde dochází k velkému tření mezi nástrojem a obrobkem, což negativně ovlivňuje životnost nástroje. Životnost nástroje je také negativně ovlivněna oxidací povrchu, kdy po obrobení vzniká velice tvrdá vrstva  $Al_2O_3$ . Obrobení této vrstvy při dalším průjezdu nástroje snižuje jeho životnost. [46, 47]

### 3.3.4 Nástroje pro obrábění hliníkových slitin

Při obrábění hliníkových slitin nelze použít standartní řezné nástroje kvůli nalepování třísky na řeznou hranu nástroje a zvýšenému riziku tvorby nárůstku. Je tedy nutné použít speciální nástroje, které jsou určeny především svojí geometrií, materiálem a vhodným způsobem chlazení pomocí procesní kapaliny. [48]

Geometrie nástroje by měla být přizpůsobena specifickému úkolu. Obecně platí, že pro obrábění hliníkových slitin se používá nástroj s pozitivně ostrým břitem. Břit by měl být co možná nejostřejší, což spolu s pozitivní geometrií redukuje kontaktní plochu mezi ostřím a třískou a znemožňuje tvorbu nárůstku. [50]

Nejčastější materiálovou volbou pro nástroje na hliník jsou slinuté karbidy. Jejich jemnozrnná struktura umožňuje dosáhnout velmi malé drsnosti, čímž je zaručeno nízké tření mezi třískou a nástrojem a tedy i menší náchylnost pro tvorbu nárůstku. Časté je také povlakování, které zvyšuje odolnost nástroje proti opotřebením, je ale nutné se vyhnout povlakům TiAlN, které vytváří chemickou reakci s hliníkem. Uplatnění frézovacích nástrojů závisí především na obráběcí operaci. Používají se monolitní stopkové frézy, které se vyznačují vysokou tuhostí, ale také vyměnitelné břitové destičky. Typický nástroj na obrábění hliníku v podobě frézy s leštěným povrchem pro lepší odvod třísky lze vidět na obrázku 26. [48, 50]

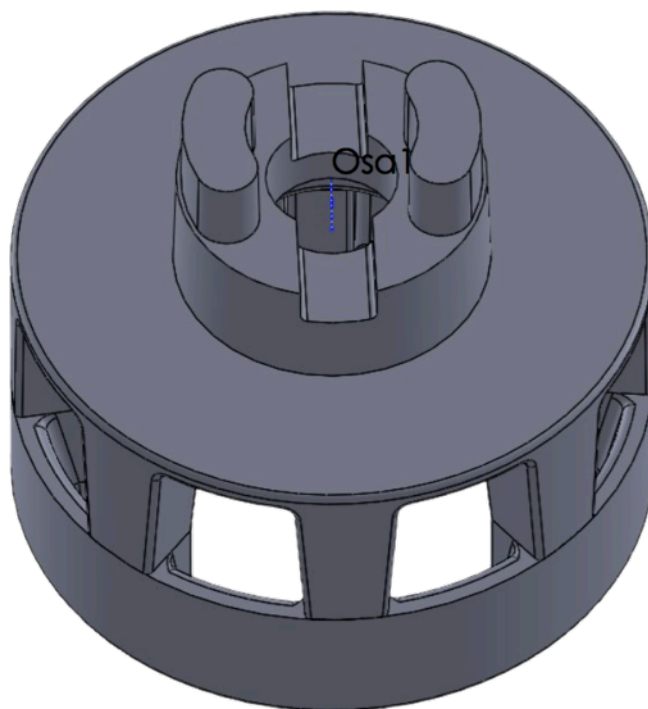
Používání nástrojů pro obrábění hliníku je v drtivé většině případů spojeno s použitím procesní kapaliny. Ta slouží především pro snížení teploty nástroje a obrobku, znesnadnění ulpívání částic na břitu nástroje a odvod třísek. Nejčastěji je používáno kapalné směsi oleje s vodou. [50]



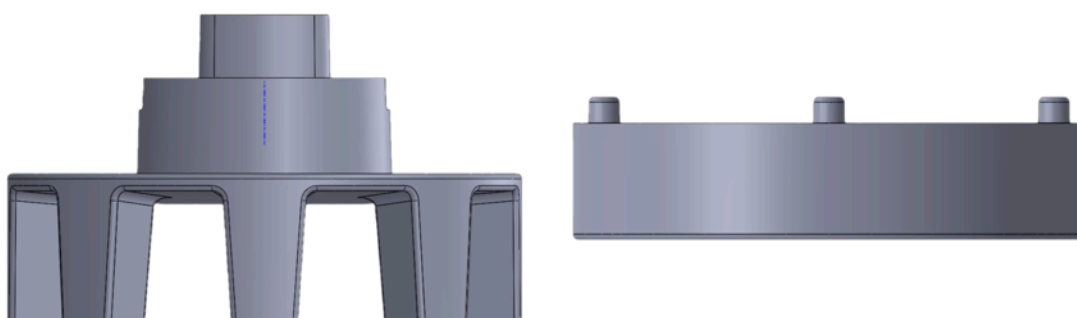
Obrázek 26. Stopková válcová fréza [51].

#### 4 NÁVRH A KONSTRUKCE VSTŘIKOVACÍ FORMY

Tato kapitola bude věnována postupu konstrukce modelu (obrázek 28. a 29.) a jeho následnému zaformování a vytvoření finálního designu vstřikovací formy pomocí programu SolidWorks. Forma je zhotovena pro slévárnu přesného lití IEG s.r.o.. Konečným produktem celého procesu je voskový model a následný odlitek „Rotor Dávkovače Metací Hlavy Spencer“, výkres je uveden příloze 1.



Obrázek 28. Hotový model.



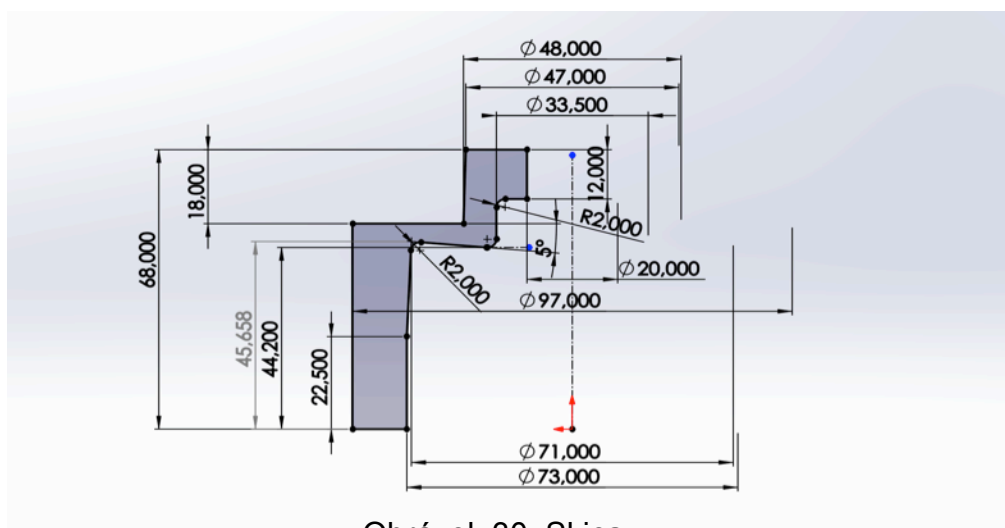
Obrázek 29. Rozdělený model.

#### 4.1 Popis použitého softwaru

SolidWorks je parametrický 3D modelář pro systém Windows postavený na jádře Parasolid. Jeho široké spektrum využití je uplatňováno především ve strojírenském průmyslu pro tvoření komplexních 3D návrhů. Program umožňuje kvalitní objemové i plošné modelování, generování výkresů i práci se sestavami. Součástí programu jsou také knihovny materiálů, normalizovaných součástí, nástrojů a dalších pomůcek, které značně usnadňují práci konstruktéra. [39]

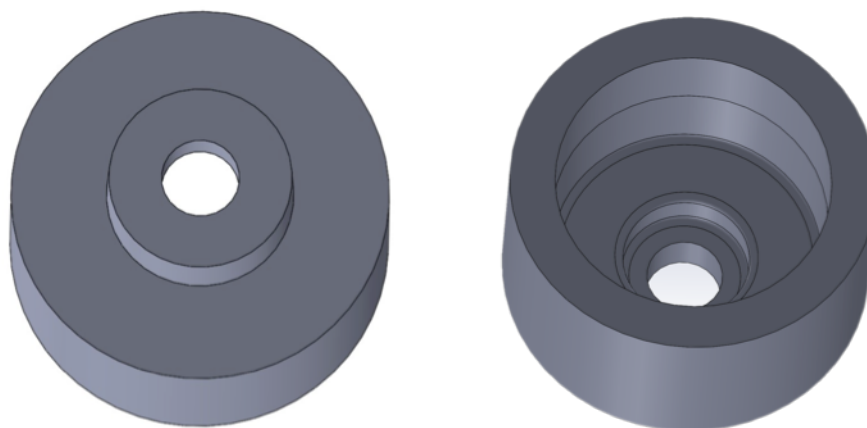
#### 4.2 Konstrukce modelu

Základem při vytváření modelu je prvotní skica viz obrázek 30. Skica by neměla být příliš složitá, aby se umožnila její snadná úprava. Ve skice jsou zahrnuty všechny vnější rozměry modelu. V dalším průběhu modelování jsou poté využívány další skici jako základ pro odběr vysunutím. Každá skica je načrtnuta buď do svojí vlastní roviny nebo přímo do plochy, ze které má být vysunutí provedeno.



Obrázek 30. Skica.

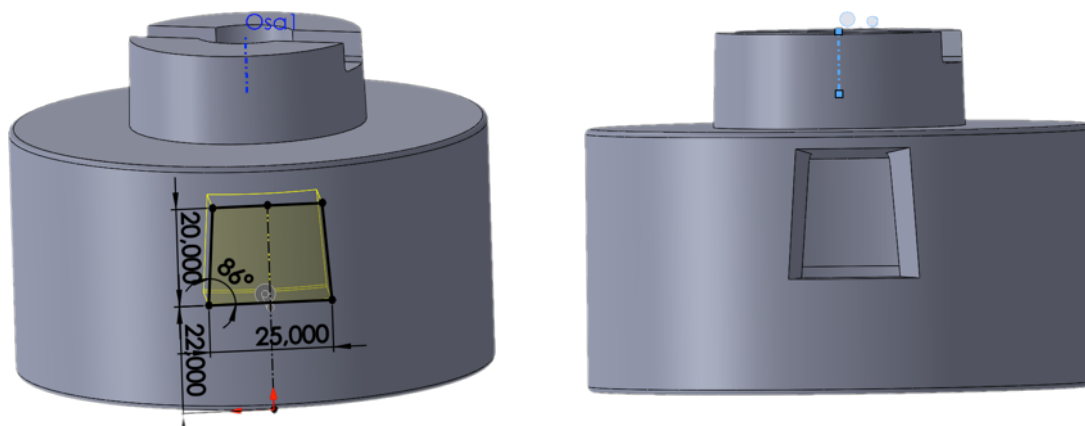
Po vytvoření skici dojde k zhmotnění 3D modelu pomocí funkce přidat rotaci, což lze vidět na obrázku 31. Takto vytvořený model je následně pomocí dalších editací upravován až do finálního tvaru.



Obrázek 31. Rotování křivky.



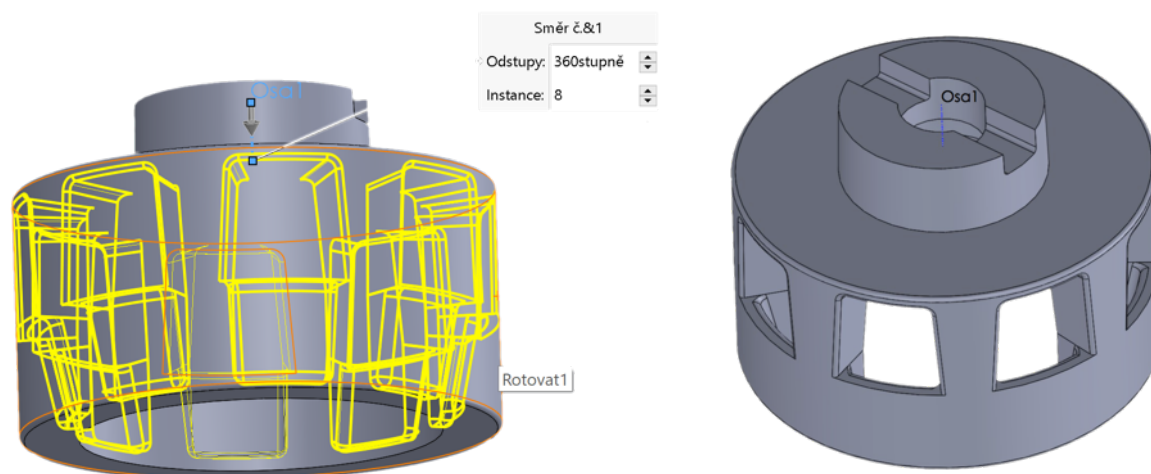
Dalším krokem je vymodelování „okna“. Tento prvek je vytvořen ve dvou krocích vysunutím po křivce. Vysunutí má svoji vlastní skicu, na jejímž základě je poté provedeno vysunutí, které lze vidět také na obrázku 32.



Obrázek 32. Skica vysunutí a vysunutí.

Tvarový prvek „okna“ je následně dokončen pomocí vysunutí rotací ve vnitřní části modelu, což je v daném případě výhodnější provedení vysunutí, než vysunutí po plochu. V dalším kroku jsou zaobleny veškeré ostré hrany modelu. Tuto operaci je nutné provést především z toho důvodu, aby bylo možné model bezpečně vyjmout z formy a nedošlo k jeho porušení. Navíc vosk a stejně tak i odlévaný kov do zaoblených hran lépe zabíhá a tím se usnadňuje výroba odlitku. Ostré hrany jsou také velmi složité na výrobu, jelikož fréza má vždy určitý rádius.

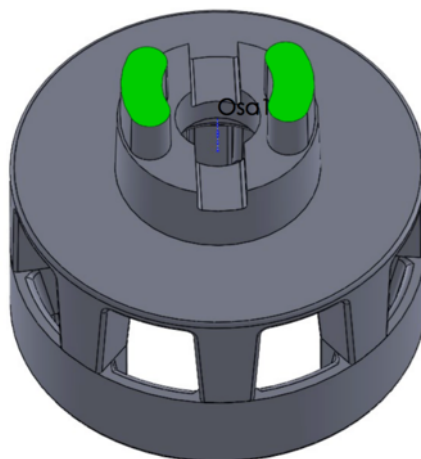
Konečný počet osmi „oken“ je vytvořen kopírováním již vytvořeného okna kolem osy za pomoci příkazu kruhové pole. Tyto nově vytvořené prvky jsou rozmístěny na určitém poloměru kolem osy rovnoměrně nebo s patřičnými úhlovými rozestupy. Osa pro rotaci byla zvolena středová osa tělesa. Zadáním příkazu se zobrazí tabulka, po jejímž vyplnění je znázorněn náhled kruhového pole. Potvrzením příkazu dojde k vytvoření kruhového pole (obrázek 33.)



Obrázek 33. Kruhové pole.



Jedním z posledních kroků při konstrukci modelu je vysunutí vtoků do vrchní části rotoru, které můžeme vidět na obrázku 34. Vtoky slouží jako místo, kudy je zavedena vosková směs do tvarové části formy a model je poté za tyto plochy upevněn do voskového stromečku. Po odlití jsou vtoky z odlitku odstraněny. Tímto je návrh modelu hotov. S ohledem na odlévanou slitinu, ze které bude odlitek vyroben, není nutné zvětšovat měřítko modelu, jelikož otěruvzdorná litina neprojevuje při odlévání smrštění. Dále bude model použit pro vytvoření dutiny formy, což je podrobně popsáno v další části práce.

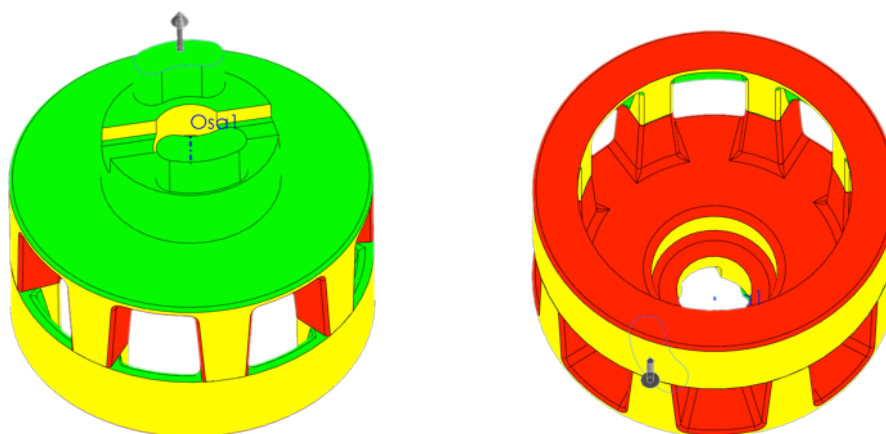


Obrázek 34. Hotový model s vtoky.

### 4.3 Konstrukce formy

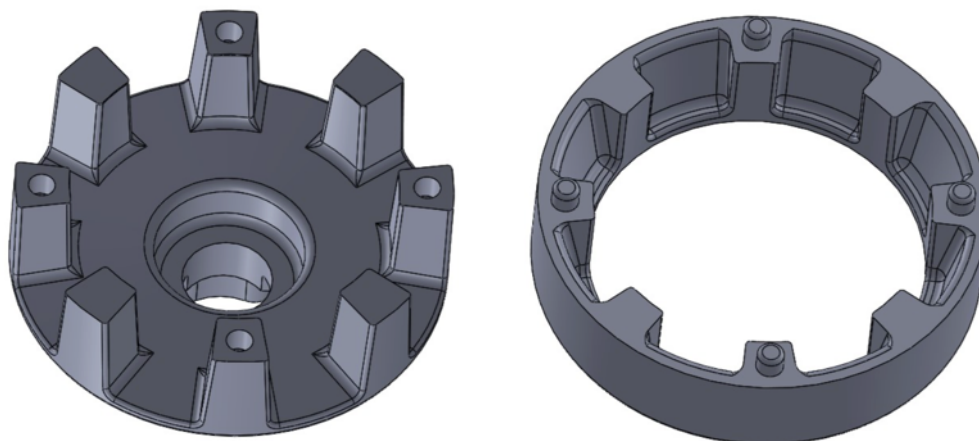
Prvním krokem při konstrukci formy je správné zaformování modelu, čili zvolení vhodné dělicí roviny a umístění modelu do plochy vstřikovací formy. Dále je nutné zvolit ideální počet obtisků a také zajistit bezproblémové vyhození vstříku.

Pro zaformování modelu je stěžejní jeho bezproblémové vyjmutí z formy. Jelikož tvar modelu je poměrně komplexní, není možné jej zaformovat a následně vyrobit jako jednu dutinu. Vnitřní zkosení vybraní znemožňuje vytažení modelu jako celku, proto musí být model rozdělen na dvě poloviny. Rozdělení je provedeno na základě analýzy úkosů, tu můžeme vidět na obrázku 35.



Obrázek 35. Analýza úkosů.

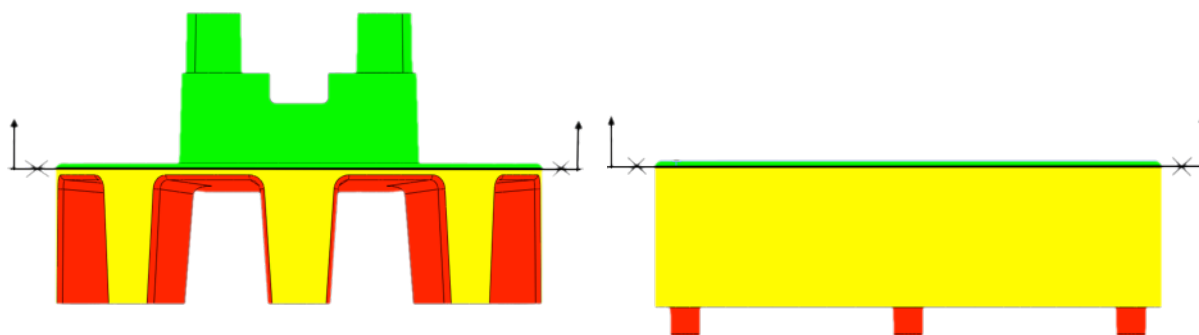
Analýza je provedena vůči ploše vtoků a jasně z ní vyplývá, že ideální místo pro rozdělení modelu určuje rovina procházející podél spodní hrany „oken“. Jednotlivé části modelu jsou díky tomuto rozdělení vyrobitelné jako dutiny formy. Je také umožněno snadné vyjmutí vstřiku pomocí vyhazovačů. Aby bylo zajištěno přesné složení obou kusů dohromady, byly k jednotlivým částem modelu zkonstruovány středící kolíky a otvory. Jednotlivé části lze vidět na obrázku 36.



Obrázek 36. Rozdělení modelu.

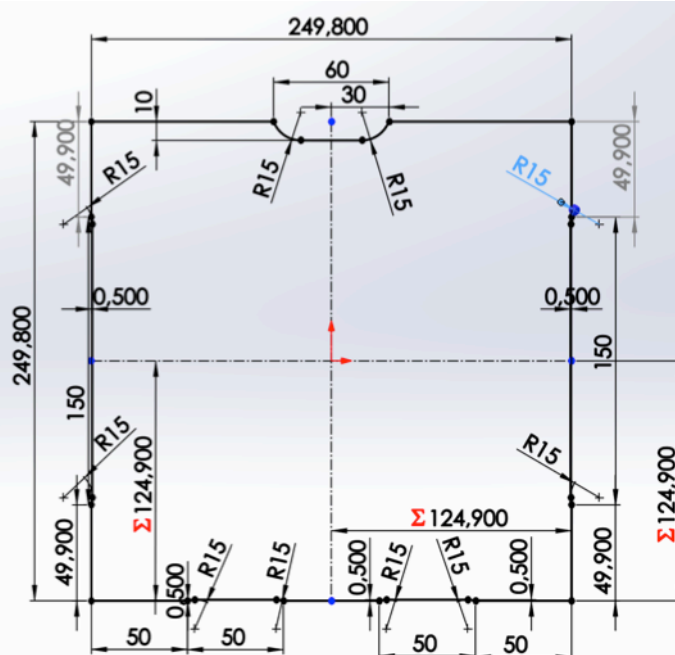
Po rozdělení modelu je nutné určit dělicí rovinu a zvolit vhodné umístění dutin do obou polovin formy. Pro určení dělicí roviny opět použijeme analýzu úkosů viz obrázky 37.

Dělicí rovina je po provedení analýzy jasně viditelná. Zeleně označené plochy modelu budou zaformovány do vrchní části formy, žluté a červené do spodní. Je vhodné zaformovat části s větším objemem vstřikovaného vosku ve spodní části formy, odkud jsou vytlačeny vyhazovači. Z vrchní části formy by je musela vytáhnout ručně obsluha lisu tím model poškodit.



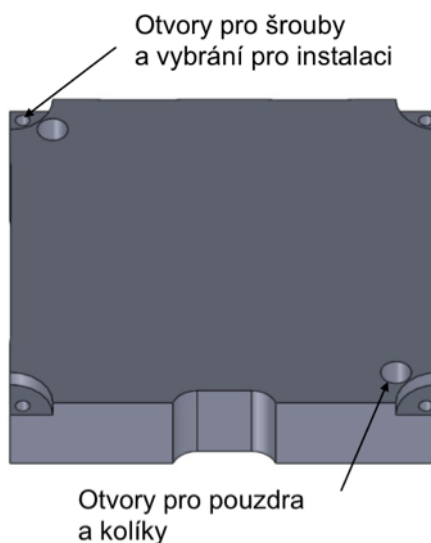
Obrázek 37. Volba dělicí roviny.

Po provedení analýz a vhodné přípravě modelu lze zahájit samotnou konstrukci formy. Slévárna IEG s.r.o. požaduje určité rozměry a tvarové prvky obrysu formy, které musí být zahrnuty v jejím návrhu. Tvar formy je vytvořen na základě vysunutí skici (obrázek 38.). Výřez v horní části formy slouží pro upevnění formy do vstřikolisu. Rozměry upínací plochy vstřikolisu jsou 250 x 250 mm, rozměry formy jsou proto o dvě desetiny milimetru zmenšeny, aby se zajistilo bezproblémové zasazení formy do lisu.



Obrázek 38. Skica formy.

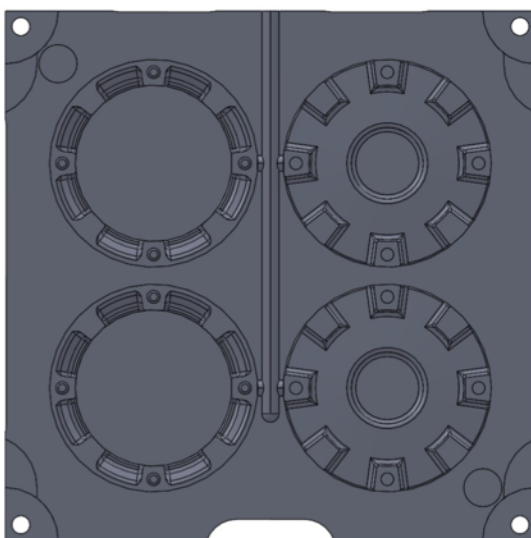
Dalším krokem je vysunutí čtyř průchozích otvorů pro šrouby sloužící k upevnění formy. Vybrání v okolí děr umožňuje snadnější instalaci a oddělení částí forem od sebe. Další dva otvory slouží pro umístění pouzder ve spodní části formy a středících kolíků ve vrchní. Tyto úpravy jsou pro obě části formy stejné a lze je vidět na obrázku 39.



Obrázek 39. Otvory a vybrání pro instalaci formy.

Před vybráním dutin spodní části formy musí být do modelu formy přidán materiál, aby bylo možné část modelu do formy obtisknout. Je to z toho důvodu, že dodávaný polotovár pro výrobu formy má výšku 50 mm, což nestačí na pokrytí celé výšky části modelu. Vyvýšená část je poté vyfrézována samostatně a na formu upevněna pomocí šroubu. Tím je spodní část připravena pro obtisknutí dutiny, které je provedeno na základě funkce programu.

Současně s dutinami modelu je do formy vysunut také vtok, který byl vymodelován jako samostatná součást (obrázek 41.). Vtok má kruhový průřez a průměr 8mm. Ústí vtoku do dutiny má poločočkovitý tvar, tím se zamezí vylamování vosku při oddělení modelu od vtokové soustavy. Model Spodní části formy se všemi dutinami a vtokem lze vidět na obrázku 40.



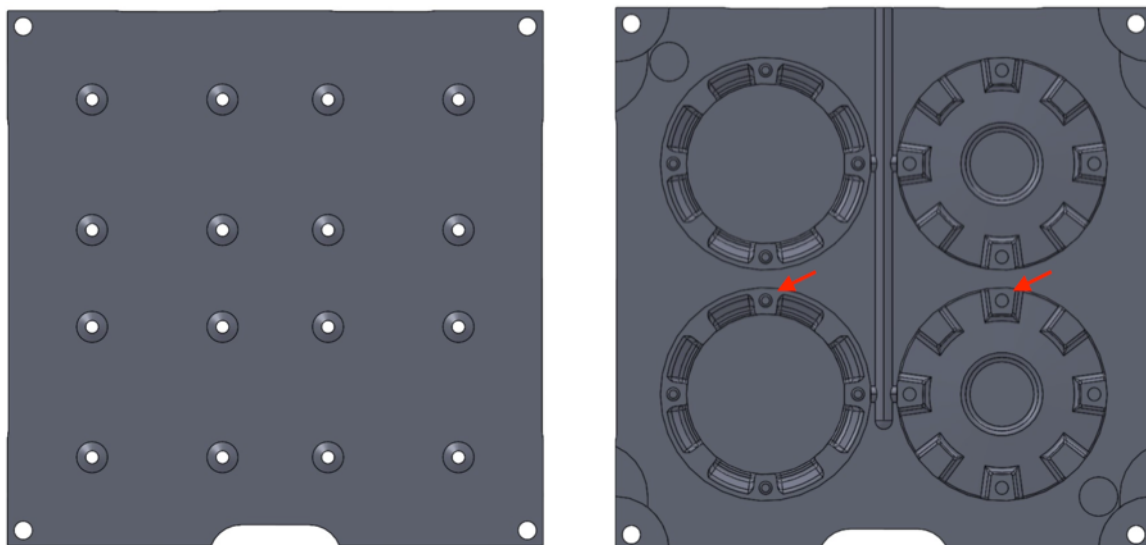
Obrázek 40. Vysunutí ve spodní části formy.



Obrázek 41. Vtok.

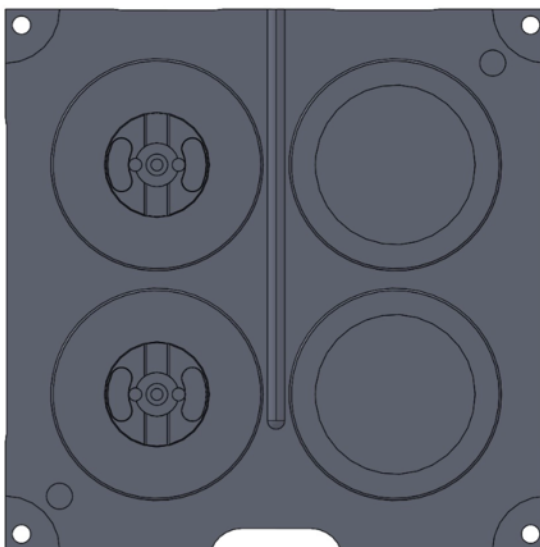
Poslední úpravou spodní části formy je navrhnutí umístění vyhazovačů (obrázek 42. a). Vyhazovače jsou vysunovány pomocí desky, tudíž nemohou být umístěny mimo její rozměry, protože by nedošlo k jejich vysunutí a model by se porušil. Pro zjednodušení rozmístění modelu byl ke spodní části formy vymodelován rámeček, který vymezuje plochu pro umístění vyhazovačů a usnadňuje tak jejich rozmístění. Rámeček je pouze konstrukční řešení a ve skutečné sestavě formy se nevyskytuje.

Vyhazovače jsou umístěny do modelu tak, aby po spojení jednotlivých částí nebyly vidět stopy po vyhození vstříku (obrázek 42. b). Vyhazovače v pravé části modelu navíc slouží k vytvoření středícího otvoru pro jeho přesné složení. Při uzavření formy zasahují vyhazovače do dutiny a tím je vytvořen středící otvor. V druhé dutině jsou umístěny vyhazovače v rovině s dutinou, aby nevznikla hrana mezi plochou vyhazovače a formou. K uchycení vyhazovačů budou použity speciální šrouby se dvěma matkami a pružinou. Toto upevnění umožňuje korekci délky vyhazovačů.



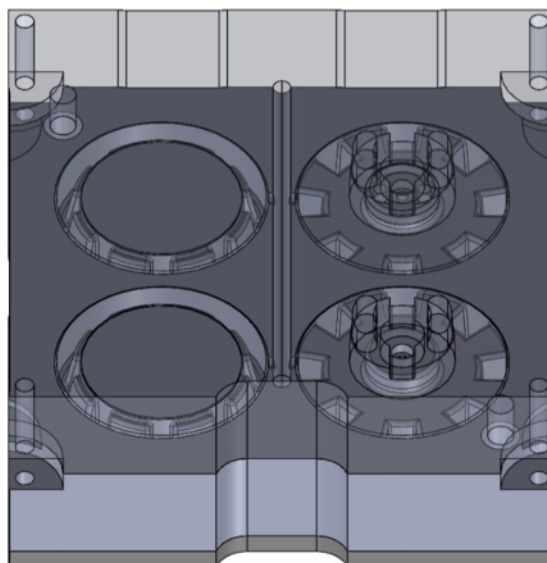
Obrázek 42. Umístění vyhazovačů:  
a) umístění vyhazovačů ve formě b) umístění vyhazovačů v dutině.

Konstrukce vrchní části formy je o poznání jednodušší, než část spodní a to především díky absenci vyhazovačů a menší velikosti dutin. Obrys formy je totožný se spodní polovinou a je opět vytvořen na základě skici z obrázku 38. Otvory pro kolíky spolu s otvorem pro upevnění formy jsou také shodné se spodní částí. Vysunutí dutin a vtoku lze vidět na obrázku 43.

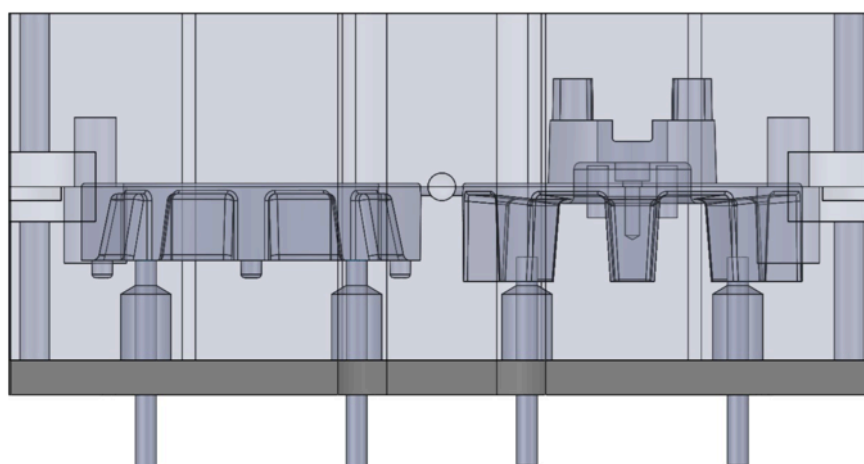


Obrázek 43. Dutina ve vrchní části formy.

Tím je návrh konstrukce formy hotov. Pro lepší znázornění formy jako celku jsou všechny její části následně spojené do sestavy. V sestavě lze velmi dobře vidět rozmístění jednotlivých částí dutin modelu a jejich vzájemnou návaznost, společně s vyhazovači viz obrázky 44 a 45.



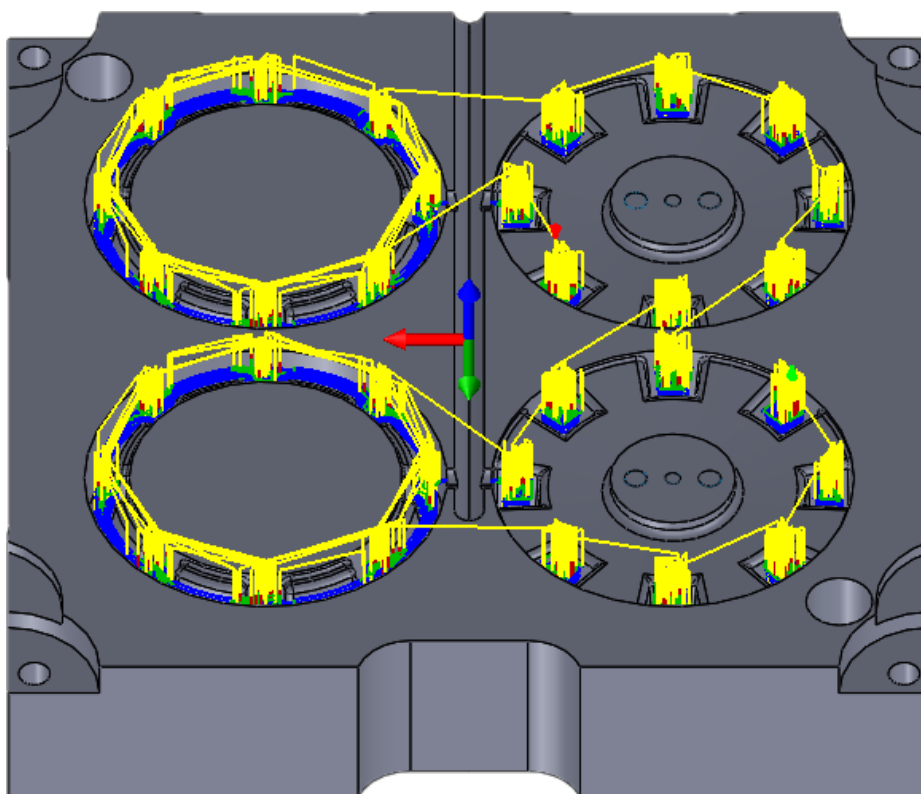
Obrázek 44. Průhled sestavou formy.



Obrázek 45. Boční pohled na sestavu formy.

## 5 NÁVRH VÝROBNÍ TECHNOLOGIE A VÝROBA VSTŘIKOVACÍ FORMY

Vstřikovací forma je vyrobena pomocí technologie třískového obrábění na tříosém obráběcím centru HAAS. Součástí práce je pouze návrh technologie obrábění v programu SolidCam. K tomuto účelu byly vygenerovány náhledy drah příslušných nástrojů, které budou u každé operace uvedeny (obrázek 46). Společně s návrhem obrábění je v kapitole rozepsán podrobný přehled použitých nástrojů, obráběcího centra, řezných podmínek a použitého softwaru. Po obrobení obou dílů formy bude následovat jejich vyleštění a sestavení.



Obrázek 46. Ukázka simulace drah nástroje z programu SolidCam.

### 5.1 Popis použitého softwaru

SolidCam je obráběcí systém pro programování CNC strojů a to především obráběcích center, ale také drátových řezaček a elektroerozivních obráběcích strojů. Umožňuje programování všech základních obráběcích aplikací jako 2D a 3D tvarové obrábění a to až v 5-ti osách. Operace mohou být programovány na 2D výkresu, ale také na 3D prostorovém modelu. Program lze používat jako samostatnou jednotku, každopádně propojením SolidCamu a SolidWorksu je docíleno velmi efektivního nástroje pro programování. SolidCam pracuje přímo v prostředí SolidWorks, což sebou přináší integraci mnoha užitečných funkcí jako analýzu úkosů, odvození tvárníku a tvárnice, elektrod a další, které značně usnadňují práci programátorů. [52]



## 5.2 Popis obráběcího centra

Obrábění formy bude prováděno na tříosém centru HAAS VF-2SS (Obrázek 47.). Toto velmi výkonné vertikální obráběcí centrum disponuje vysokou rychlostí otáček vřetene až  $12\,000\text{ min}^{-1}$ . Chlazení vřetena je zajištěno pomocí cirkulace chladicí kapaliny v nezávislém plášti, který vřeteno obepíná, což minimalizuje teplotní deformaci. Spolu s vysokorychlostním vřetenem disponuje centrum vysokými rychlostmi posuvů a rychlou výměnou nástrojů s bočním zásobníkem. Vřeteno stroje je přímo napojeno na motor, což umožňuje dosažení perfektní kvality povrchu při dokončování a lepší teplotní stabilitu. Tyto atributy stroj předurčují k efektivní výrobě přesných dílů, a také k obrábění forem. Podrobnější parametry stroje jsou uvedeny v tabulce 5. [53, 54]



Obrázek 47. Obráběcí centrum HAAS VF-2SS [54].

Tabulka 5 Parametry stroje [54].

Pracovní rozsah	Hodnota	Pracovní rozsah	Hodnota
Pojezd v ose X [mm]	762	Upínací kužel	SK 40
Pojezd v ose Y [mm]	406	Maximální posuv [ m/min]	35,6
Pojezd v ose Z [mm]	508	Kapacita zásobníku nástrojů [ks]	30
Délka stolu [mm]	914	Maximální hmotnost nástroje [kg]	5,4
Šířka stolu [mm]	356	Maximální průměr nástroje [kg]	127
Maximální zatížení stolu [kg]	680	Maximální délka nástroje [mm]	279
Maximální výkon [kW]	22,4	Rozměry stroje d x š x v [mm]	2 320 x 2 490 x 2 570
Maximální otáčky [ min <sup>-1</sup> ]	12 000	Hmotnost [kg]	3 539



### 5.3 Materiál polotovaru

Základem pro obě části formy je válcovaná deska z hliníkové slitiny AW 5083, která je dodávána firmou Feropol. Tento materiál byl zvolen především z důvodů jeho dobré chemické stálosti, obrobitelnosti, leštitelnosti a nízké ceně. Další parametry této slitiny jsou uvedené výše v tabulce 3 a její chemické složení v tabulce 6. Rozměry polotovaru jsou 260 x 260 x 50 mm.

Tabulka 6. Chemické složení AW 5083 [55] (objemové %).

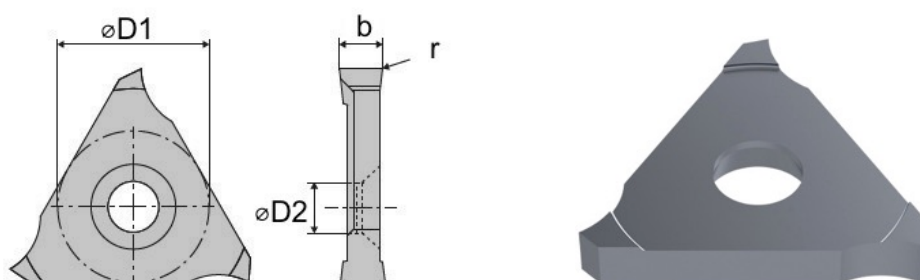
Prvek	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ostatní	Al
Obsah min. [%]	-	-	-	0,1	4	0,05	-	0,35	93,3
Obsah max. [%]	0,4	0,4	0,1	0,4	4,9	0,25	0,25	-	95,5

### 5.4 Použité obráběcí nástroje

Pro výrobu formy se používá více typů nástrojů od různých výrobců, některé nástroje jsou používány jak pro hrubování, tak i dokončování. Jedná se především o kulové a tyčové monolitní frézy ze slinutého karbidu. Níže jsou uvedené nástroje a jejich základní parametry, označení a materiál. Frézy jsou upnuty pomocí kleštinových upínačů. Závitníky se upínají do rychlovýměnných vložek a vrtáky do kleštinových upínacích pouzder.

Tabulka 7. Břitová destička Ceratizit ze slinutého karbidu [56].

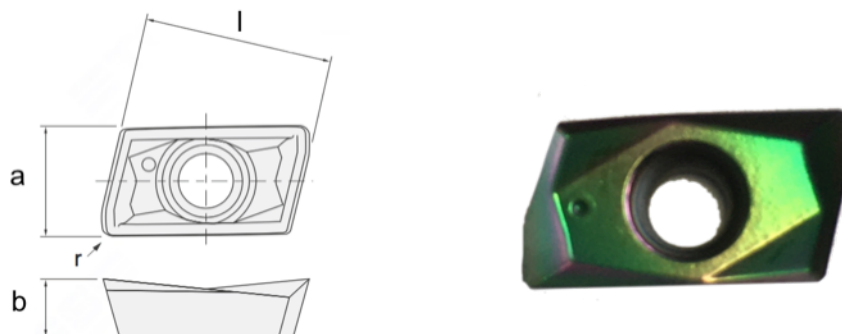
Katalogové označení	Vepsaná kružnice $\varnothing D1$ [mm]	Tloušťka b [mm]	Zaoblení špičky r [mm]	Upevňovací průměr $\varnothing D2$ [mm]
TXR 161702 CWX500	10	3,4	0,2	3,95



Obrázek 48. Břitová destička Ceratizit [56].

Tabulka 8. Břitová destička Hitachi ze slinutého karbidu karbidu [57].

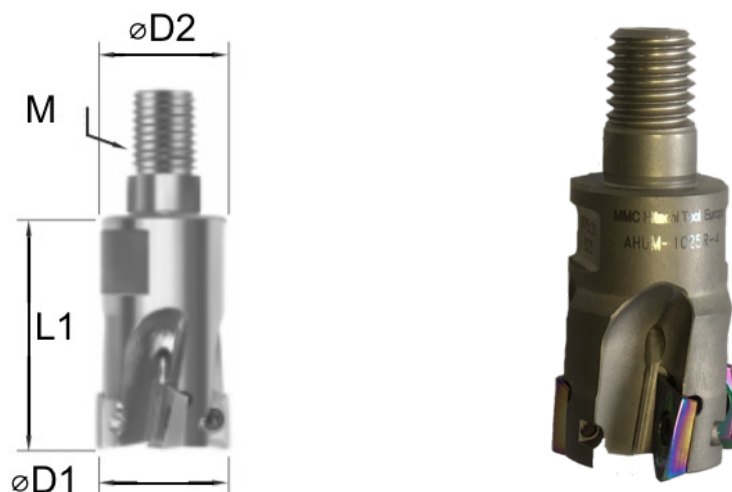
Katalogové označení	Délka l [mm]	Šířka a [mm]	Tloušťka b [mm]	Zaoblení špičky r [mm]
JDET100304R-FA	11	6,1	3,5	0,4



Obrázek 49. Břitová destička Hitachi [57].

Tabulka 9. Rohová fréza Hitachi s vyměnitelnými VBD [58].

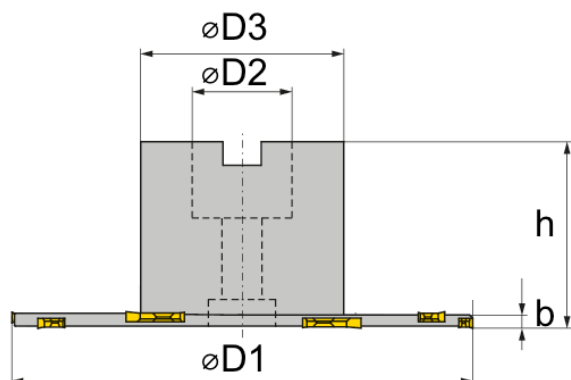
Katalogové označení	Průměr $\varnothing D1$ [mm]	Počet VBD [ks]	ISO VBD	Průměr $\varnothing D2$ [mm]	Délka L1 [mm]	Upevňovací Závit
AHUM-1025R-4	25	4	JDET100304R-FA	21	35	M12



Obrázek 50. Rohová fréza Hitachi [57].

Tabulka 9. Nástrčná kotoučová fréza Ceratizit [58].

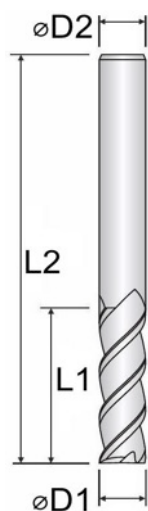
Katalogové označení	Průměr $\varnothing D1$ [mm]	Tloušťka břítu $b$ [mm]	Počet břitů	Výška $h$ [mm]	Průměr $\varnothing D2$ [mm]	Průměr $\varnothing D3$ [mm]	ISO VBD
TXASF100 R03Z5	100	3	5	50	27	48	TXR1 61702



Obrázek 51. Nástrčná kotoučová fréza [58].

Tabulka 10. Válcová monolitní fréza Alicon ze slinutého karbidu [59, 60].

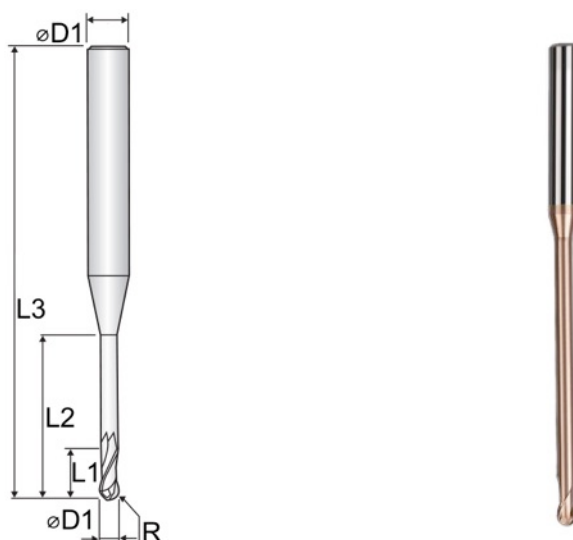
Katalogové označení	Průměr $\varnothing D1$ [mm]	Délka $L1$ [mm]	Počet Břitů	Délka $L2$ [mm]	Průměr $\varnothing D2$ [mm]
WAE303201	20	70	3	110	20
WAE303140	14	38	3	90	14
WAE303082	8	36	3	85	8
WAE303062	6	26	3	70	6
WAE302040-16	4	16	2	65	4
WAE302020-10	2	10	2	60	2



Obrázek 52. Válcová monolitní fréza Alicon se třemi a dvěma zuby [59, 60].

Tabulka 11. Kulová monolitní fréza Alicon ze slinutého karbidu [61].

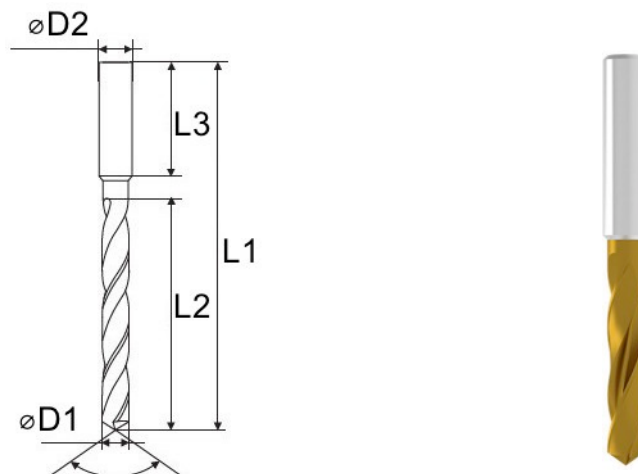
Katalogové označení	Průměr $\varnothing D1$ [mm]	Délka $L1$ [mm]	Počet břitů	Délka $L2$ [mm]	Délka $L3$ [mm]	Poloměr $R$ [mm]	Průměr $\varnothing D2$ [mm]
WB51208035	8	10	2	35	70	4	8
WB51204016	4	4	2	16	60	2	6
WB51202014	2	2	2	14	50	1	4



Obrázek 53. Kulová monolitní fréza Alicon [61].

Tabulka 12. Vrták Ceratizit z rychlořezné oceli [62].

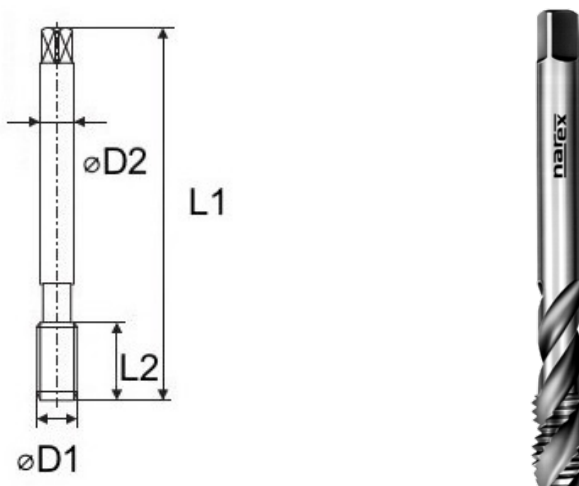
Katalogové označení	Průměr $\varnothing D1$ [mm]	Průměr $\varnothing D2$ [mm]	Délka $L1$ [mm]	Délka $L2$ [mm]	Délka $L3$ [mm]	Vrcholový úhel $\alpha$ [°]
VX.9,00.R.3D	9	10	91	40	40	118
VX.6,00.R.3D	6	6	72	36	28	118
VX.14,50.R.3D	14,5	16	116	56	48	118



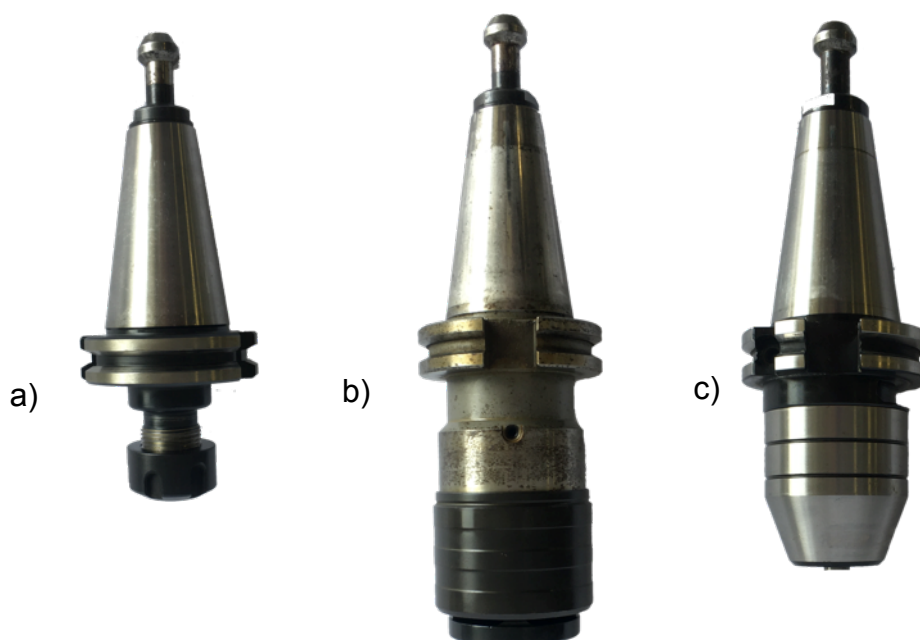
Obrázek 54. Vrták Ceratizit [62].

Tabulka 13. Závítník Narex z rychlořezné oceli [63].

Katalogové označení	Průměr $\varnothing D1$ [mm]	Průměr $\varnothing D2$ [mm]	Délka $L1$ [mm]	Délka $L2$ [mm]	Lícování	Rozteč [mm]
41537536205000	M16	12	100	16	6H	1,5
41537336060000	M6	4,5	80	10	6H	1



Obrázek 55. Závítník Narex [63].



Obrázek 56. Použité upínače:

- a) kleštinové upínací pouzdro na frézy  
 b) rychlovýměnná vložka na závítníky  
 c) vrtací sklíčidlo na vrtáky.

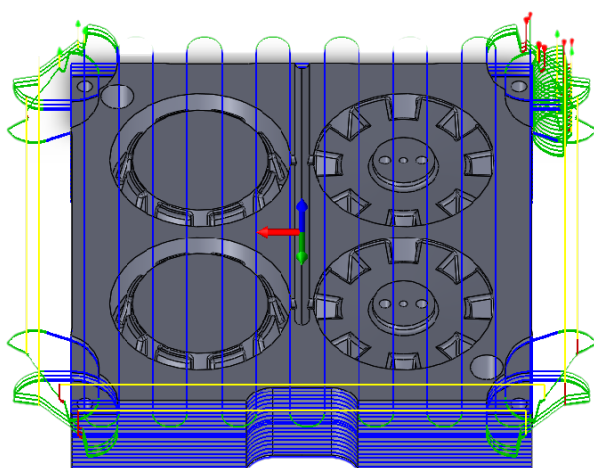
### 5.5 Návrh technologie výroby

Obrábění formy se bude skládat ze tří částí a to obrobení vnějších tvarů formy a upevňovacích prvků, dále hrubování dutin a dokončení dutin. Níže budou jednotlivé části popsány společně s ukázkami dráh nástrojů a obrázky z výroby. Modrá barva ukazuje nástroj v řezu, zelená znázorňuje posuv a žlutá rychloposuv. Forma je složená ze dvou polovin a každá část se obrábí zvlášť.

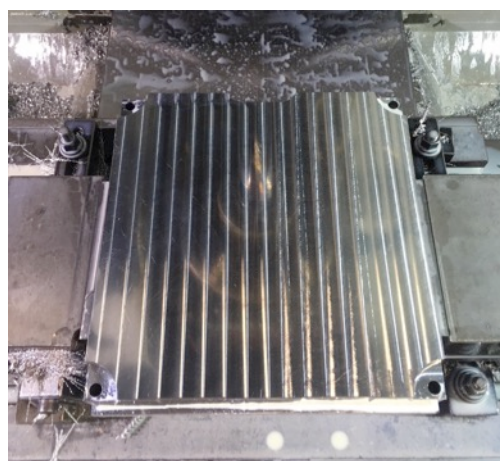
U obou částí je nutné nejdříve frézovat vnější obrys polotovaru do finálních rozměrů, ofrézovat horní plochu do roviny, vyfrézovat vybrání pro instalaci a navrtat otvory pro pouzdra a montážní otvory. Postup obrábění je u obou polovin formy shodný až na vybrání pro snadnější rozložení. Hrubování obvodu je prováděno s přídávkem, ostatní operace přídavek nevyžadují. Níže jsou uvedeny řezné podmínky k jednotlivým operacím. Na obrázcích 57. a 58. lze vidět dráhy nástroje a obrobenou plochu. Celková doba obrábění této části je 22 min 58 s.

Tabulka 14. Řezné podmínky pro první část obrábění.

Nástroj	$v_c$ [m/min]	$a_p$ [mm]	$n$ [min <sup>-1</sup> ]	$v_f$ [mm/min]	$f_z$ [mm]	čas [s]	Operace
Rohová fréza Ø 25 mm	700	0,10	10 200	4 080	0,10	476	Zarovnání čela, hrubování obvodu, vybrání
Válcová fréza Ø 20 mm	120	0,05	1 910	573	0,10	474	Dokončení obvodu
Válcová fréza Ø 8 mm	150	0,50	5 970	1 195	0,07	267	Vyfrézování otvoru pro pouzdra
Vrták Ø 9 mm	50	4,50	1700	140	0,08	161	Vyvrtání otvorů pro šrouby, předvrtání děr pro pouzdra



Obrázek 57. Dráhy rohové frézy.

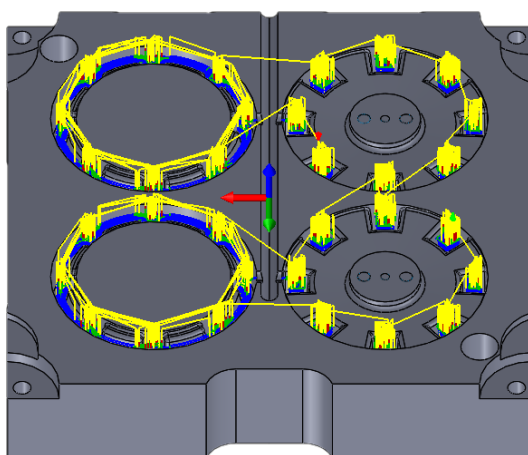


Obrázek 58. Obrobená plocha.

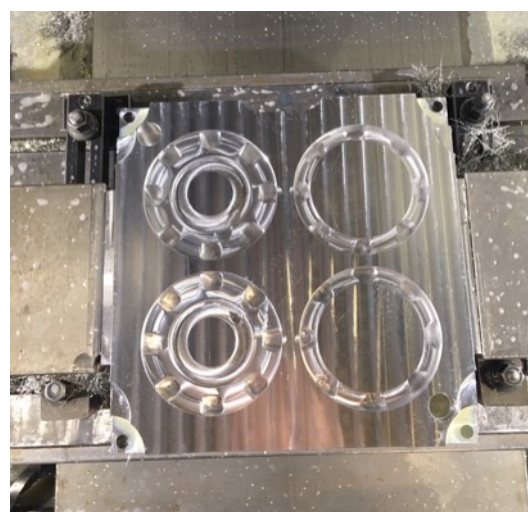
Následuje část hrubování formy. Jako první bude obráběna spodní polovina. Pro hrubování je zvolen přídavek 0,1 mm. Strategie hrubování je následující. V programu SolidCam je určena 3D plocha, která se má obrábět a fréza s požadovaným průměrem. Program vygeneruje dráhy nástroje do maximální hloubky, kterou je nástroj schopen obrobit, aniž by překročil daný rozměr dutiny. Největší možný průměr frézy je 14 mm. V dalším kroku proces opakujeme s menším průměrem nástroje. Tímto způsobem lze zkrátit strojní čas hrubování ve srovnání s použitím pouze jednoho průměru frézy. Větší fréza odebírá materiál rychleji. Nejdelší čas obrábění bude pochopitelně u nástroje s nejmenším průměrem. Na obrázcích 59. a 60. lze vidět dráhy nástroje a obráběnou dutinu. Celkový čas hrubování je 4 hod 37 min 4 s.

Tabulka 15. Řezné podmínky pro hrubování spodní části formy.

Nástroj	$v_c$ [m/min]	$a_p$ [mm]	$n$ [min <sup>-1</sup> ]	$v_f$ [mm/min]	$f_z$ [mm]	čas [s]	Operace
Válcová fréza Ø14 mm	400	1	9 100	1 820	0,07	356	Hrubování dutiny
Válcová fréza Ø 8 mm	150	0,50	5 970	1 195	0,07	578	Hrubování dutiny
Válcová fréza Ø 6 mm	150	1	7 960	1 780	0,07	5 252	Hrubování dutiny
Válcová fréza Ø 4 mm	125	0,50	9 950	1 771	0,09	2 981	Hrubování dutiny
Válcová fréza Ø 2 mm	74	0,30	11 780	1 790	0,08	7 457	Hrubování dutiny



Obrázek 59. Dráhy kulové frézy Ø 6.

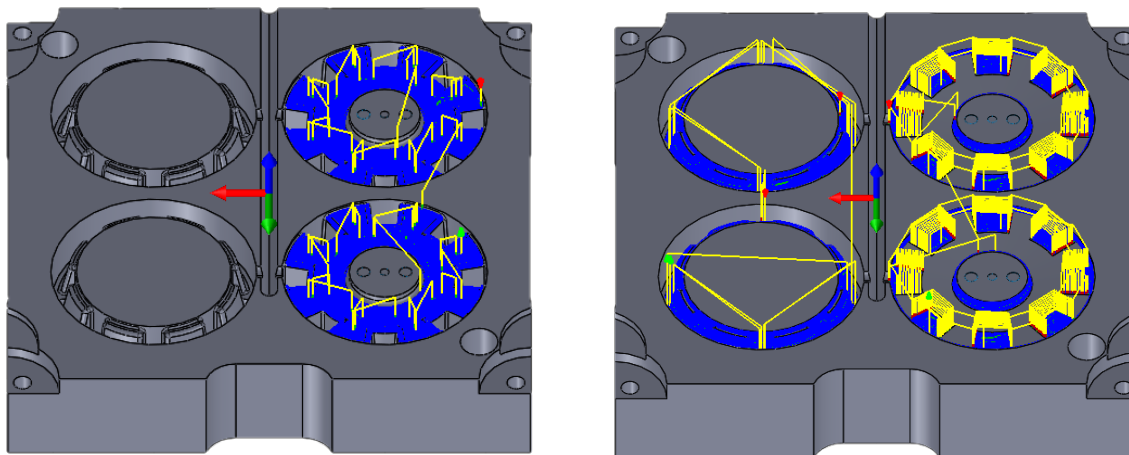


Obrázek 60. Obrobená plocha.

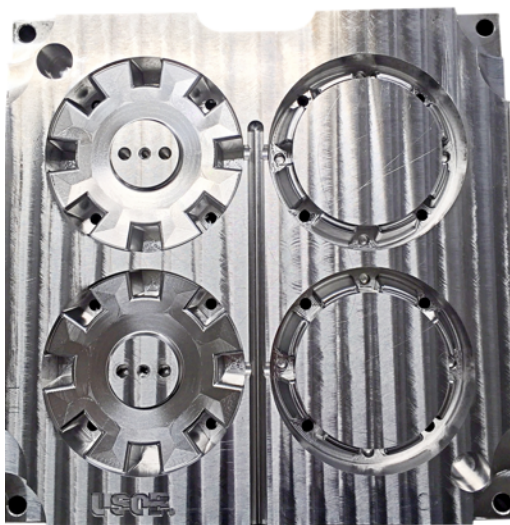


Po hrubování lze přistoupit k dokončení tvarů formy bez přídavku. Pro tyto účely se používají převážně kulové frézy, které umožňují dosáhnout velmi dobré drsnosti povrchu u nerovinných tvarových prvků dutin. První operací je dokončení rovinných ploch dutin za pomoci válcové frézy s průměrem 2 mm. Dále je vyfrézován vtok a poté se postupuje obdobně jako u hrubování, ale za použití kulových fréz. Frézou s průměrem 4 mm se obrobí vrchní část pravé dutiny, která se mírně svažuje ke středu. Operace lze vidět na obrázku 61. Nejnáročnější frézovací operací plní kulová fréza s průměrem 2mm, která dokončuje zbývající vnitřní rozměry dutin. Na závěr je provedeno vyfrézování ostrých rohů dutin a dokončení vnitřního průměru v levé dutině.

Dutiny spodní části formy jsou hotové, ještě je nutné vyvrtat otvory pro vyhazovače a z druhé strany formy vyřezat závity pro jistící šrouby, které slouží k jejich uchycení. Z dříve popsanych důvodů příliš nízkého polotovaru jsou na závěr vyvrtány díry pro jistící kolíky a závit pro upevnění „víčka“. Hotovou spodní část formy lze vidět na obrázku 62. Celkový čas dokončení je 16 hod 56 min 9 s.



Obrázek 61. Dráhy kulové frézy  $\varnothing 4$  a  $\varnothing 2$ .



Obrázek 62. Obrobená spodní část.



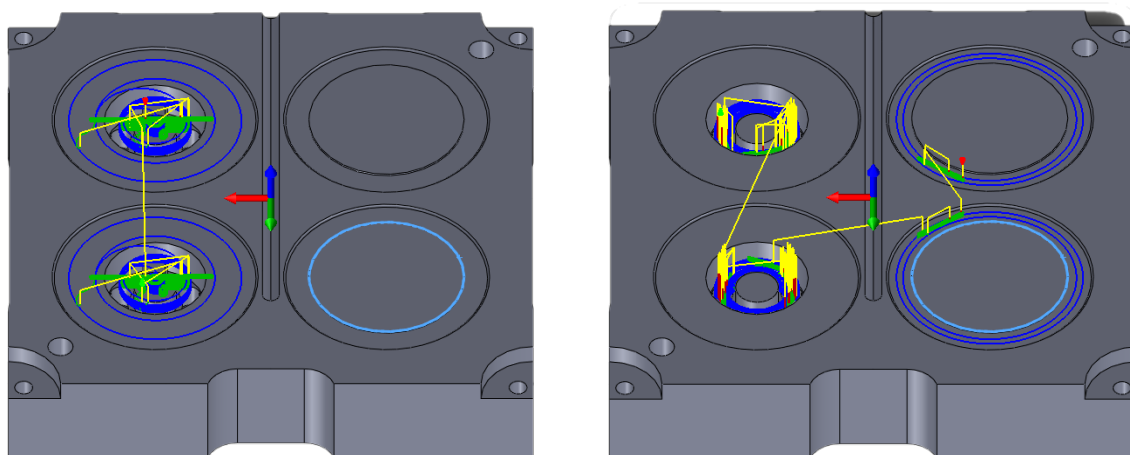
Tabulka 16. Řezné podmínky pro dokončování spodní části formy.

Nástroj	$v_c$ [m/min]	$a_p$ [mm]	$n$ [min <sup>-1</sup> ]	$v_f$ [mm/min]	$f_z$ [mm]	čas [s]	Operace
Válcová fréza Ø 2 mm	74	0,30	11 780	1 790	0,08	1 974	Dokončení spodních ploch dutiny
Kulová fréza Ø 8 mm	200	0,90	7 960	1 783	0,11	208	Frézování vtoku
Kulová fréza Ø 4 mm	150	0,10	11 940	1 790	0,07	4 459	Dokončení horní plochy dutiny
Kulová fréza Ø 2 mm	75	0,10	11 780	1 814	0,08	45 976	Dokončení Dutiny
Válcová fréza Ø 2 mm	75	0,30	11 780	1 790	0,08	7 341	Dokončení ostrých rohů dutiny
Vrták Ø 6 mm	50	3	2 650	110	0,06	492	Vrtání otvorů pro vyhazovače a jistící kolíky
Vrták Ø 14,5 mm	50	7,25	1 100	165	0,15	254	Vrtání otvorů pro šrouby
Závitník M16x1,5	10	-	200	-	-	176	Řezání závitů pro šrouby na vyhazovače
Závitník M6x1	10	-	530	-	-	89	Řezání závitů pro šrouby na volnou část

U vrchní části formy je postup návrhu výrobní technologie totožný se spodní. Frézování obrysu a tvarových prvků již bylo popsáno, je tedy rovno popsána hrubovací a dokončovací část. Dutiny ve vrchní části formy jsou mnohem méně členité, navíc jsou pouze na jedné straně formy. Jejich výroba je o poznání jednodušší, čemuž odpovídají i kratší strojní časy. Strategie hrubování je stejná jako u spodní části. Postupným zmenšováním průměru nástrojů frézujeme dutinu s přídkem 0,1 mm (obrázek 63.). Důraz je kladen především na odběr co nejvíce materiálu v co nejkratším čase. Celkový čas hrubování je pouze 37 min 34 s.

Tabulka 17. Řezné podmínky pro hrubování vrchní části formy.

Nástroj	$v_c$ [m/min]	$a_p$ [mm]	$n$ [min <sup>-1</sup> ]	$v_f$ [mm/min]	$f_z$ [mm]	čas [s]	Operace
Válcová fréza Ø 14 mm	400	1	9 100	1 820	0,07	657	Hrubování dutiny
Válcová fréza Ø 8 mm	150	0,50	5 970	1 195	0,07	1 297	Hrubování dutiny
Válcová fréza Ø 4 mm	125	0,50	9 950	1 771	0,09	300	Hrubování dutiny



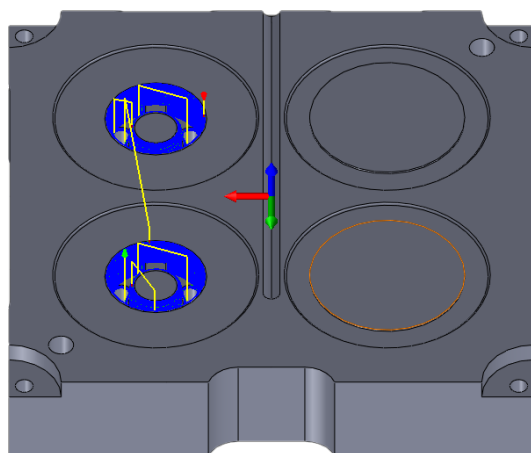
Obrázek 63. Dráhy frézy Ø 14 a Ø 8.

Vyhrubovaná dutina formy je dokončována opět pomocí monolitních kulových a válcových fréz. Jako první jsou dokončeny rovinné plochy dutin a jejich rádiusy po vnitřním i vnějším obvodu. Následně je vyfrézován vtok. Pokračuje se frézováním vnitřních tvarů dutin pomocí kulových fréz (obrázek 64.). Konečnými operacemi jsou frézování ostrých rohů a dokončení vnitřního průměru pravé dutiny pomocí válcové frézy. Celkový čas obrábění je 4 hod 4 min 16 s.

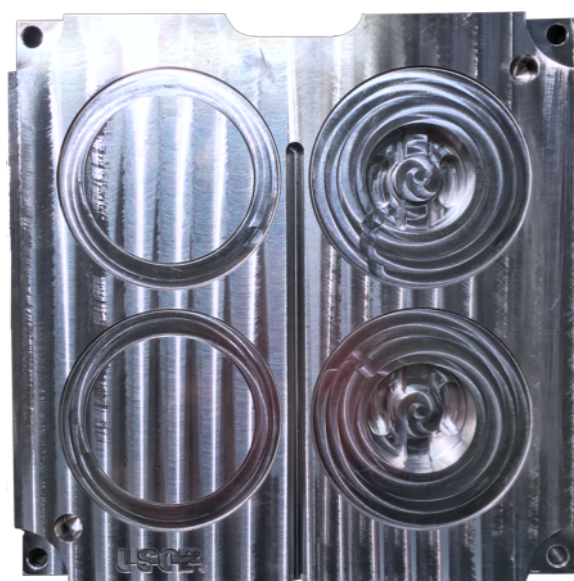
Tím je dokončena i druhá polovina formy (obrázek 65.), poslední nutností je obrobení „víčka“, která budou přišroubována na spodní část formy (obrázek 66.). Čas obrobení víčka je 13 min 20 s.

Tabulka 18. Řezné podmínky pro dokončování vrchní části formy.

Nástroj	$v_c$ [m/min]	$a_p$ [mm]	$n$ [min <sup>-1</sup> ]	$v_f$ [mm/min]	$f_z$ [mm]	čas [s]	Operace
Válcová fréza Ø 8 mm	150	0,50	5 970	1 195	0,07	405	Dokončení rovinných ploch
Kulová fréza Ø 8 mm	200	0,90	7 960	1 783	0,11	176	Frézování vtoku
Kulová fréza Ø 2 mm	75	0,10	11 780	1 814	0,08	2 479	Dokončení Rádiusů
Kulová fréza Ø 4 mm	150	0,10	11 940	1 790	0,07	4 751	Dokončení dutiny
Kulová fréza Ø 6 mm	160	0,10	8 490	951	0,06	1 343	Dokončení nálitku v dutině
Válcová fréza Ø 8 mm	150	0,50	5 970	1 195	0,07	623	Dokončení ostrých hran nálitku
Válcová fréza Ø 2 mm	75	0,30	11 780	1 790	0,08	4 881	Dokončení ostrých rohů dutiny



Obrázek 64. Dráhy kulové frézy Ø 4.



Obrázek 65. Obrobená vrchní část.

Tabulka 19. Řezné podmínky pro obrobení „víčka“.

Nástroj	$v_c$ [m/min]	$a_p$ [mm]	$n$ [min <sup>-1</sup> ]	$v_f$ [mm/min]	$f_z$ [mm]	čas [s]	Operace
Rohová fréza Ø 25 mm	700	0,10	10 200	4 080	0,10	105	Hrubování plochy a obvodu
Kulová fréza Ø 4 mm	150	0,10	11 940	1 790	0,07	330	Dokončení vnějšího tvaru
Válcová fréza Ø 8 mm	150	0,50	5 970	1 195	0,07	33	Dokončení vnějšího obvodu
Vrták Ø 9 mm	50	4,50	1 700	140	0,08	20	Vyvtání Otvoru pro šroub a středící kolíky
Válcová fréza Ø 8 mm	150	0,50	5 970	1 195	0,07	24	Osazení Otvoru
Drážková fréza Ø 100	200	16	637	255	0,04	288	Odříznutí



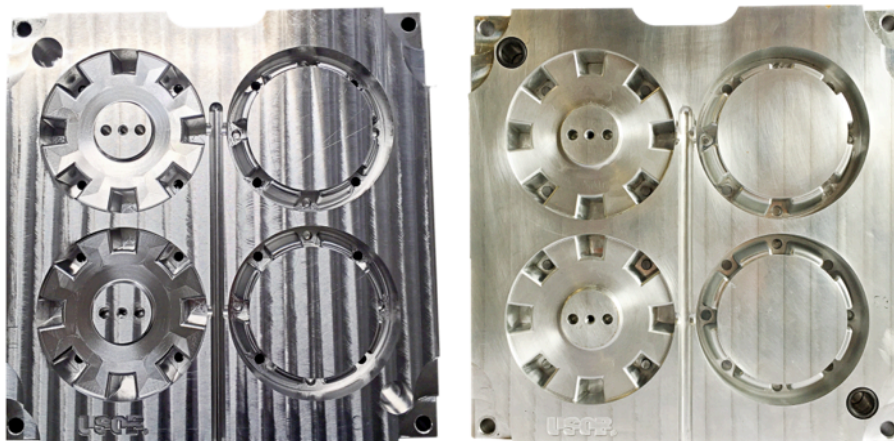
Obrázek 66. „víčko“ na spodní část formy.

## 5.6 Sestavení formy

Po provedení veškerých obráběcích operací není forma stále připravena pro vstřík voskové směsi. K jejímu dokončení je nutné vyleštit obrobený povrch, upevnit středící kolíky a pouzdra, zavést vyhazovací systém a další nutné úpravy. Teprve po finálním sestavení lze formu předat do slévárny, kde bude proveden kontrolní vstřík.

Frézovací nástroje zanechají na povrchu formy dráhy po průjezdech. Tyto malé odchylky v drsnosti povrchu mohou negativně ovlivnit rovnoměrnost průtoku voskové směsi formou a také znemožnit vytažení voskového modelu. Je proto

nutné povrch formy vyleštit. Forma je leštěna ručně pomocí brusného rouna Scotch-Brite, přičemž se používá více drsností a postupuje se od větší k menší. Vtoky a místa náchylná na špatné vytažení vosku, jako jsou záhyby, jsou následně doleštěny voskovou pastou Tempo. Rozdíl mezi obrobnu a vyleštěnou plochou je jasně zřetelný a lze jej vidět na obrázku 67.

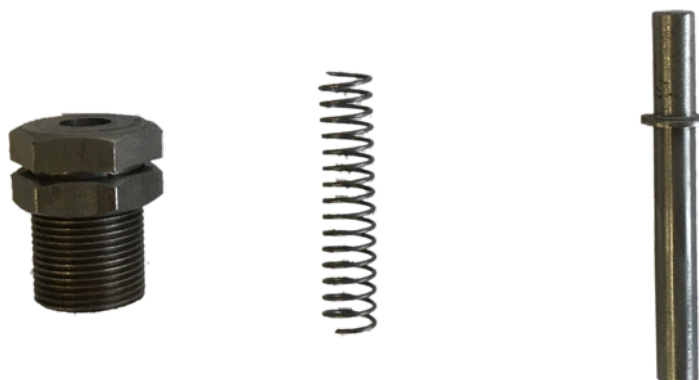


Obrázek 67. Forma před a po vyleštění.

Po vyleštění povrchu formy následuje instalace pouzder a vodících kolíků. Ty slouží jako středící body, aby se forma uzavírala vždy do stejné polohy a nedošlo k vychýlení. Pouzdra i kolíky jsou dodávány firmou Jan Svoboda s.r.o. a do formy jsou upevněny pomocí lepidla.

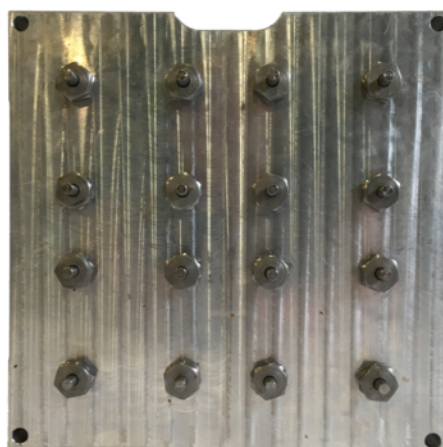
Voskové modely jsou ze spodní poloviny formy vyjmuty pomocí vyhazovacího systému. Ten je v tomto případě vyřešen šestnácti vyhazovacími tyčemi upevněnými speciálními šrouby (obrázek 68.). Šroub se skládá z dutého těla, kterým je vedena tyč vyhazovače a pružina, která ji vrací do původní polohy a dvou upevňovacích matek (obrázek 69.). Jenda slouží pro utažení šroubu a druhá pro vymezení hloubky zašroubování a tím i hloubky zasunutí tyče. Vyhazovací tyče jsou soustruženy z kulatiny o průměru 10 mm na konečný průměr 6 mm a délku 54 mm. Tyče jsou soustruženy z důvodů nutnosti osazení, o které je tyč opřená ve šroubu a nedochází tak k jejímu úplnému vysunutí.

Poslední díl, který je nutné na formu upevnit je „víčko“, to bylo vyrobeno zvlášť. Aby nedocházelo k jeho protáčení, je víčko zajištěno pomocí dvou kolíků a utaženo šroubem. Obě dvě hotové části formy lze vidět na obrázku 70.

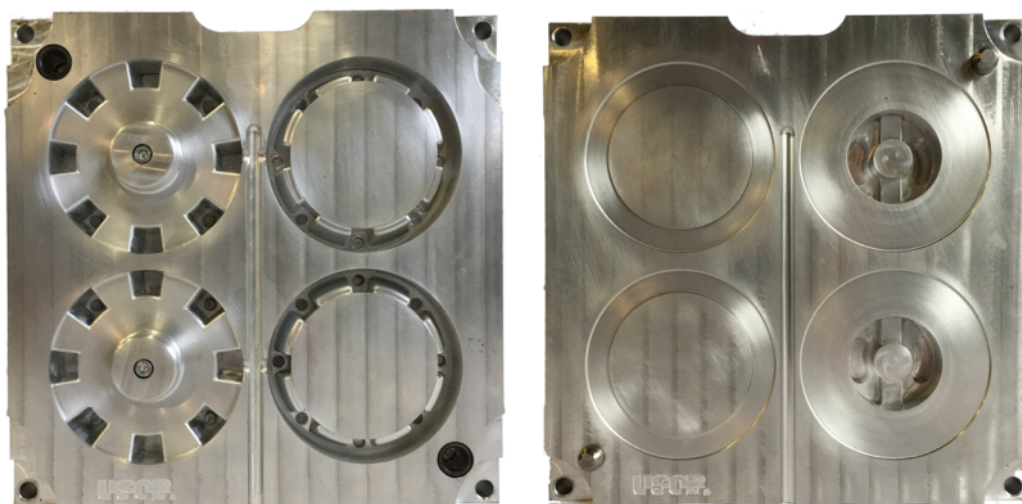


Obrázek 68. Šroub s pružinou a vyhazovací tyč.





Obrázek 69. Vyhazovací systém.



Obrázek 70. Hotová forma.

## 6 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI FORMY

Pro ověření funkčnosti formy bude proveden zkušební vstřík voskové směsi, na jehož základě bude posouzeno, zda forma splňuje požadavky na přesnost výsledného modelu (obrázky 71. a 72.) a zda nedojde k porušení modelu při jeho vytahování z formy. Model bude následně změřen a porovnán s rozměry na výkresu.



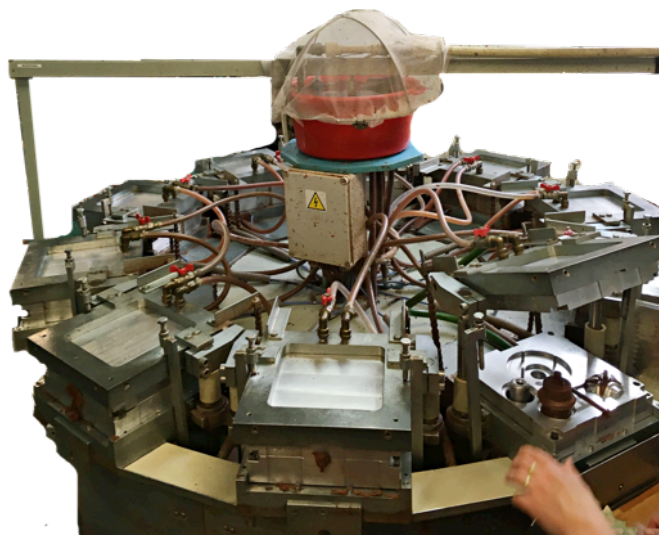
Obrázek 71. Voskový model.



Obrázek 72. Voskový model.

### 6.1 Popis vstřikovacího stroje a vstřik směsi

Vstřik voskové směsi bude proveden na vstřikovacím lisu AVO 70 (obrázek 73.), který byl vyroben na zakázku pro slévárnu IEG. Zkušební vstřik slouží pro ověření funkčnosti formy, ověření zabíhavosti směsi a rozměrové kontrole modelu. Lis pracuje s kašovitým voskem, který je udržován v centrální vaně, odkud je rozváděn do vstřikovacích lisů. Směs v udržovací vaně má teplotu 70–75 °C. Lis je obsluhován manuálně pracovníci slévárny, která nastavuje parametry pro vstřik směsi a vytahuje modely z forem. Lis je tzv. karuselového typu, což znamená, že je v něm upnuto až 9 forem, které jsou postupně plněny voskovou směsí. Vstřikovací parametry pro model rotoru dávkovače jsou uvedeny v tabulce 20. a složení voskové směsi je uvedeno v tabulce 21. Základ směsi tvoří parafín, který je doplněn o montánní vosk a stearin. Tyto dvě složky zlepšují tvrdost směsi po vychladnutí a zužují teplotní interval chladnutí.



Obrázek 73. Vstřikovací lis AVO 70.

Tabulka 20. Parametry vstřiku.

<b>Tlak vstřiku [bar]</b>	4
<b>Teplota vstřiku [°C]</b>	51
<b>Čas vstřiku [s]</b>	15
<b>Dotlak [s]</b>	10

Tabulka 21. Složení vstřikované směsi (objemové %).

<b>Parafín 52/54</b>	73
<b>Stearin 15RG</b>	18,2
<b>Montánní vosk Ramonta</b>	8,8

Po vyjmutí modelu z formy je provedena pohledová kontrola obsluhou lisu. Obě části modelu (obrázek 74.) musí být následně složeny dohromady. Díky středícím kolíkům je složení velice jednoduché. Aby nedocházelo k oddělování částí, jsou styčné plochy naleptány uhlovodíkovým roztokem, který naruší



strukturu vosku a slepí obě části dohromady. Hotový model je následně uskladněn.



Obrázek 74. Model vytažený z formy.

## 6.2 Rozměrová kontrola modelu

Přesnost formy je jedním z hlavních požadavků, které musí být při její výrobě splněny. Měření dutiny pomocí CNC měřicího centra je ale náročné a cenově nákladné. Kontrola rozměrů formy se tedy pro její zjednodušení provádí kontrolou rozměrů modelu. Tato kontrola je možná pouze v případě, že odlévaná slitina nejeví známky smrštění. Pokud ano, je nutné provést kontrolu až na finálním odlitku. Pokud se neshodují rozměry modelu s výkresem, je nutné formu upravit. Rozměry budou naměřeny pomocí posuvného měřidla TESA, hloubkoměru INSIZE a rádiusových měrek. Vyhodnocení správnosti rozměrů bude posouzeno na základě měřicího protokolu, který je uveden níže jako tabulka 22. Měřené rozměry jsou označeny čísly na výkrese, který je uveden v příloze 2.

Tabulka 22. Měřicí protokol.

č. rozměru	Jmenovitý rozměr	Naměřený rozměr	Vyhovuje
1.	Ø 48 mm	Ø 48,05 mm	OK
2.	Ø 47 mm	Ø 47,10 mm	OK
3.	11,5 mm	11,56 mm	OK
4.	R1	R1	OK
5.	86 mm	85,87 mm	OK
6.	R5	R5	OK
7.	R1	R1	OK
8.	18 mm	18,02 mm	OK
9.	69 mm	69,11 mm	OK

10.	R1	R1	OK
11.	R2	R2	OK
12.	Ø 97 mm	Ø 97,08 mm	OK
13.	22 mm	22,10 mm	OK
14.	25 mm	24,93 mm	OK
15.	(3) mm	(3,02) mm	OK
16.	Ø 20 mm	Ø 20,11 mm	OK
17.	R2	R2	OK
18.	12 mm	11,92 mm	OK
19.	R2	R2	OK
20.	5°	4,92°	OK
21.	R2	R2	OK
22.	Ø 33,5 mm	Ø 33,23 mm	OK
23.	Ø 71 mm	Ø 71,08 mm	OK
24.	Ø 73 mm	Ø 73,25 mm	OK
25.	22,5 mm	22,47 mm	OK
26.	44,2 mm	44,23 mm	OK
27.	45,6 mm	45,43 mm	OK
28.	56 mm	56,25 mm	OK
29.	8x45°	8x45°	OK
30.	59 mm	59,17 mm	OK
31.	15°	15,15°	OK
32.	25 mm	25,13 mm	OK
33.	Ø 97 mm	Ø 96,87 mm	OK
34.	Ø 89 mm	Ø 89,11 mm	OK
35.	Ø 73 mm	Ø 73,08 mm	OK
36.	25 mm	25,03 mm	OK
37.	(19) mm	(19,12) mm	OK
38.	12° mm	12,11° mm	OK
39.	3 mm	3,04 mm	OK
40.	22 mm	22,23 mm	OK
41.	R2	R2	OK
42.	R2	R2	OK
43.	4°	4,05°	OK
44.	4°	4,08°	OK
45.	(16) mm	(16,13) mm	OK
46.	(22) mm	(22,02) mm	OK

Po důkladném změření všech hodnot lze na základě měřicího protokolu tvrdit, že forma splňuje veškeré rozměrové požadavky. Všechny rozměry modelu splňují toleranci ISO 2768–mH, která je předepsaná na výkrese.

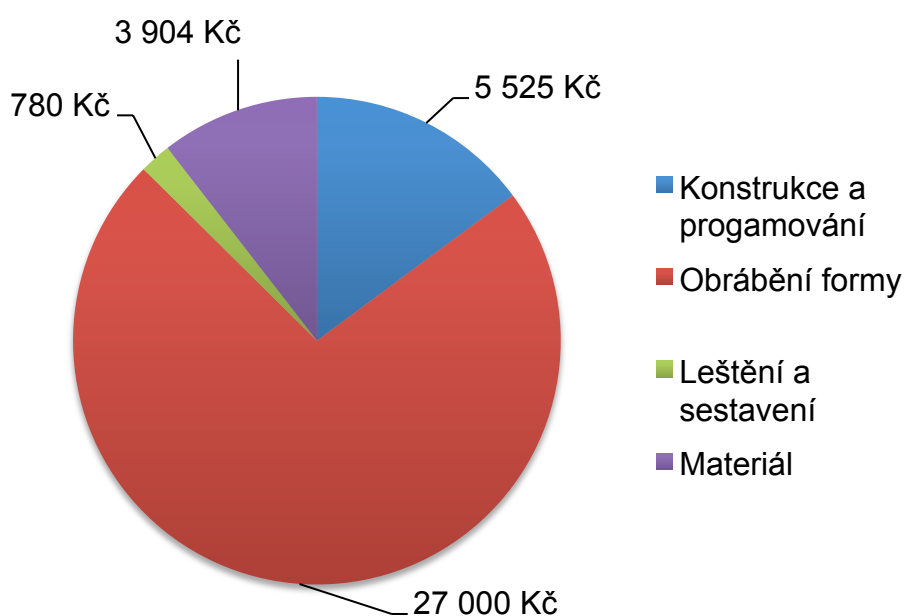
## 7 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Cílem ekonomického zhodnocení je kalkulací přibližně stanovit celkovou cenu výroby formy. Ta se bude skládat z ceny za materiál, mzdy zaměstnanců, a ceny za provoz stroje.

Materiálem pro výrobu formy byly dvě válcované hliníkové desky s rozměrem 260 x 260 x 50 mm. Cena za obě desky je 3 079 Kč. Materiál na výrobu víček zanedbáváme. Dále je nutné zahrnout cenu za vyhazovací systém, čili šrouby, vyhazovací tyče a pružiny. Celková cena je 825 Kč. Cena za mzdy zaměstnanců se odvíjí od hodinových sazeb pro jednotlivé úkony. Celkový čas konstrukce a programování byl 17 hod, což při sazbě 325 Kč/hod dělá 5 525 Kč. Jelikož byla konstrukce a návrh technologie formy prováděna jako součást diplomové práce, je celkový čas pouze odhadem. Největší podíl na ceně formy zaujímají náklady na Provoz stroje. Celkový čas obrábění stanovený pomocí programu SolidCAM činí 26 hod 52 min, po zaokrouhlení 27 hod. Cena za práci stroje je 1 000 Kč/hod celková cena tedy činí 27 000 Kč. Sestavení a leštění formy je prováděno na specializovaném pracovišti. Při celkovém času 6 hodin a mzdové sazbě brigádníka 130 Kč/hod činí cena 520 Kč. Celkové náklady (obrázek 75.) jsou sepsány v tabulce 23.

Tabulka 23. Celkové náklady.

Náklady	Cena [Kč]
Materiál	3 904
Konstrukce a programování	5 525
Obrábění formy	27 000
Leštění a sestavení	780
<b>Celkem</b>	<b>37 209</b>



Obrázek 75. Celkové náklady.

Z obrázku 75. Je jasně zřetelné, že největší podíl na ceně za výrobu formy tvoří náklady na obrábění. Hodinová sazba frézovacího centra je odvislá od jeho pořizovací ceny a jsou do ní započítány i náklady za nástroje, upínače a výrobní režie.

Pokud by tedy mělo dojít ke snížení nákladů na výrobu, největší prostor pro úpravy je právě tady a to především formou zkrácení strojního času potřebného pro obrobení. Toho by mohlo být dosaženo použitím přesnějšího upínání nástrojů například pomocí tepelných upínačů. Toto upnutí zvyšuje tuhost systému nástroj–upínač a je tak možné nastavit vyšší hodnoty posuvové rychlosti a tím proces urychlit. Tepelné upínání také zkracuje čas potřebný pro výměnu nástroje ve srovnání s kleštinovými upínači, což má opět za následek zkrácení strojního času. Na druhou stranu je pořízení tepelného upínacího systému poměrně nákladné a je tedy nutné zvážit, zda-li se při dané produkci vyplatí.

Další možnost zlevnění výroby vychází z drsnosti povrchu, která je požadovaná na finálním odlitku. Čím vyšší je povolená drsnost povrchu odlitku, tím může být drsnější i povrch formy. Tím pádem není nutné nastavovat tak husté řádkování průjezdů frézy při dokončování dutin, což má opět za následek zkrácení strojního času. Tuto úpravu je ale nutné důkladně konzultovat se zákazníkem slévárny.

## ZÁVĚR

Práce byla věnována popsání technologie přesného lití a to od počáteční výroby matečné formy, přes voskové směsi až po dokončovací operace. Byly popsány typy forem pro přesné lití a nejčastěji používané materiály pro jejich výrobu. Součástí teoretické části práce byl taktéž rozbor obrábění hliníkových forem, kde byly uvedeny časté problémy a jejich možná řešení.

V další části práce byl vytvořen model Rotoru Dávkovače pomocí programu SolidWorks, ten byl následně použit pro návrh formy. Dále byla navržena výrobní technologie, která zahrnovala ukázky drah nástrojů vygenerovaných pomocí programu SolidCam společně s výpisem všech použitých nástrojů a upínačů. V přehledných tabulkách byly uvedeny jednotlivé obráběcí operace společně s řeznými podmínkami a strojními časy. Výroba formy byla realizována na obráběcím centru HAAS. Po dokončení obráběcích operací byla forma vyleštěna a sestavena. Pro ověření funkčnosti a přesnosti výroby byl proveden zkušební vstřík voskové směsi. Na závěr bylo provedeno ekonomické zhodnocení. Z dosažených výsledků můžeme usoudit že:

- při návrhu formy je nutné dbát na smrštění odlévaného kovu a náležitě upravit velikost modelu. V řešeném případě nebylo nutné upravovat měřítko modelu
- základem pro přesnou formu je bezchybně vymodelovaný model odlitku. Forma je následně vytvořena jako vybrání na základě modelu.
- při řešení výrobní technologie je vhodné použít strategií zmenšujících se průměrů nástrojů při frézování dutin formy, tím se znatelně zkrátí strojní časy operací.
- zkušebním vstříkem se ověřuje funkčnost formy ve smyslu bezproblémového vytažení modelu z dutin formy a zaběhnutí směsi.
- detailním změřením zkušebního voskového modelu lze určit, zda forma splňuje požadavky na přesnost dle výkresu finálního odlitku.
- celková náklady na výrobu formy byly stanoveny na 37 209 Kč. Majoritní část nákladů tvoří cena za provoz obráběcího centra.
- ke snížení nákladů na výrobu by mohlo pomoci použití tepelných upínačů nebo snížením řádkování průjezdů frézy.

Forma byla na základě měřicího protokolu a úspěšně provedeném zkušebním vstříku schválena slévárnou přesného lití IEG s.r.o. a je v současnosti využívána pro produkci voskových modelů. Odhadovaná minimální životnost formy je 500 000 obtisků.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. BEELEY, P. R a R. F SMART. *Investment Casting*. London: Institute of Material, Minerals and Mining, 1994. ISBN 0 901716 66 9
2. DOŠKÁŘ, Josef, Jan GABRIEL, Miroslav HOUŠŤ a Miroslav PAVELKA. *Výroba přesných odlítků*. 1. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1976.
3. HORÁČEK, Milan. *Rozměrová přesnost odlítků vyráběných metodou vytavitelného modelu*. Brno, 2003. Habilitační práce. Vysoké učení technické v Brně.
4. PÍŠA, V. *Technologie přesného lití: metoda vytavitelného modelu* [online]. 2007 [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: [http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/MPL/Metoda\\_presneho\\_liti\\_vosk.ppt](http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/MPL/Metoda_presneho_liti_vosk.ppt)
5. MRÁZEK, M. *Slévárství* [online]. Brno: Svaz sléváren České republiky, 2008 [cit. 2020-02-10]. Technologie přesného lití, s. 13-15. Dostupné z: [http://www.slevarenstvi.svazslevaren.cz/download/9\\_10-2008.pdf](http://www.slevarenstvi.svazslevaren.cz/download/9_10-2008.pdf) ISSN 0037-6825.
6. Casting Proces. In: *Ginho Group* [online]. Staffordshire: Ginho Group – Precise Metals, c2018 [cit. 2020-02-10]. Dostupné z: <http://www.ginho-group.com/products/casting-process>
7. HORÁČEK, Milan. Technologie vytavitelného modelu - technologie pro nové tisíciletí. *Slévárství*. 2001, 53(10), 570-580. ISSN 0037-6825.
8. OSTRÉZÍ, Barbora. *Technologie vytavitelného modelu v současnosti*. Brno, 2017. 41s, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Odbor slévárství. Vedoucí práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc.
9. HERMAN, Aleš, *Lití na vytavitelný model* [online]. In: . s. 30 [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/419638-Ing-ales-herman-ph-d.html>
10. Understanding of investment casting waxes. *Saffroshine* [online]. Solapur, Indie: Solapur, 2017, 2017 [cit. 2020-03-02]. Dostupné z: <http://www.saffroshine.com/understanding-investment-casting-waxes/>
11. BEMBLAGE, Omkar a Benny KARUNAKAR. *A study on the blended wax patterns in investment casting process* [online]. Londýn, 2011
12. BOND, D, NISHIKAWA, K. *Investment Casting Wax Technology* [online]. 4.1.2006, [cit. 2020-03-10]. Dostupný z: <http://www.investmentcastingwax.com/downloads/tl5.pdf>

13. ŽUJA, J. *Optimalizace technologie výroby voskových modelů ve firmě Fimes*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 84 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc.
14. POKOJ, Petr. *Bisfenol A - jeho vliv na zdravý člověka a životní prostředí*. Zlín, 2010. Bakalářská práce. UTB. Vedoucí práce Ing. Markéta Julinová, Ph.D.
15. Wax Melters. In: Shell-O-Matic [online]. Quebec: Shell-O-Matic, c2017 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <http://shellomatic.com/products/wax-melters>
16. *MOLOCHITE* [online]. Paris: Imerys Refractory Minerals, c2016 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <https://imerys-refractoryminerals.com/molochite-2/#toggle-id-4>
17. SHELL-O-MATIC AUTOMATES FRANKLIN BRONZE FOUNDRY. In: Shell-O-Matic [online]. Quebec: Shell-O-Matic, c2014 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <http://shellomatic.com/automates-franklin-bronze-foundry>
18. BOBČÍK a kolektiv, *Formy pro zpracování plastů, I. Díl – Vstřikování termoplastů*, Uniplast Brno, 2. opravené vydání, 1999. 134 s.
19. KANDUS, Bohumil. *Technologie zpracování plastů [Přednášky a cvičení]*. Brno: Fakulta strojního inženýrství VUT Brno, 2014
20. Tváření plastů a výroba forem II. *Uspořádání vtoků* [online]. 2014 [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <http://www.14220.cz/technologie/tvareni-plastu-a-vyroba-form-ii/>
21. BOBEK, J. *Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů* [online]. 2016 [cit. 2020-04-08]. ISBN 978-80-88058-65-6. Dostupné z: <https://publi.cz/books/179/Cover.html>
22. MICHAELI, G. GREIF, W. KRETZSCHMAR, H. EHRIG, G. FRANK. (2001). *Training in Injection Molding - A Text- and Workbook (2nd Edition) - Prerequisite Knowledge*. Hanser Publishers. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0050YI4G/training-in-injection/prerequisite-knowledge>
23. MENGES, MICHAELI, G. MOHREN, W. PAUL. (2001). *How to Make Injection Molds (3rd Edition) - 5.7 Design of Gates*. Hanser Publishers. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt003OCFY1/how-make-injection-molds/design-of-gates>
24. HYNEK, M. MÜLLER, E a HELLER, Š. *Vyhazovací sestava a vyhazovače* [online]. 2013 [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: [https://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-verfin/OPVK\\_PU/KA\\_05\\_publicace/KA05\\_Vyhazovaci\\_sestava\\_a\\_vyhazovace.pdf](https://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-verfin/OPVK_PU/KA_05_publicace/KA05_Vyhazovaci_sestava_a_vyhazovace.pdf)



25. Technický list EN AW 5083. *Gleich Aluminium s.r.o.* [online]. Kaltenkirchen, c2016, [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: [https://gleich.de/cz/wp-content/uploads/sites/8/2016/07/cz\\_en\\_aw\\_5083.pdf](https://gleich.de/cz/wp-content/uploads/sites/8/2016/07/cz_en_aw_5083.pdf)
26. Technický list EN AW 5083. *Gleich Aluminium s.r.o.* [online]. Kaltenkirchen, c2016, [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: [https://gleich.de/cz/wpcontent/uploads/sites/8/2016/07/cz\\_en\\_aw\\_7075.pdf](https://gleich.de/cz/wpcontent/uploads/sites/8/2016/07/cz_en_aw_7075.pdf)
27. Technický list EN AW 7022. *Gleich Aluminium s.r.o.* [online]. Kaltenkirchen, c2016, [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: [https://gleich.de/cz/wp-content/uploads/sites/8/2017/04/cz\\_certal.pdf](https://gleich.de/cz/wp-content/uploads/sites/8/2017/04/cz_certal.pdf)
28. Technický list EN AW 7122. *Gleich Aluminium s.r.o.* [online]. Kaltenkirchen, c2016, [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: [https://gleich.de/cz/wp-content/uploads/sites/8/2017/04/cz\\_certal\\_spc.pdf](https://gleich.de/cz/wp-content/uploads/sites/8/2017/04/cz_certal_spc.pdf)
29. Přehled norem. *Slitiny hliníku* [online]. Bystřička: Feropol, c2012 [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: <http://www.feropol.cz/cz/product/slitiny-hliniku/1/0/>
30. Jakosti dle norem. *PRECIZ* [online]. Napajedla, Česká Republika: PRECIZ, c2016 [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: <https://www.preciz.cz/sluzby/jakosti-dle-norem/details/5/9-9>
31. W. NR. 1.2767. *JKZ Bučovice* [online]. Bučovice, Česká republika: JKZ Bučovice, c2018 [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: <https://www.jkz.cz/cs/produkty/nastrojove-oceli/na-vyrobu-forem/w-nr-12767/>
32. *Popis produktu M303* [online]. Česká republika: Böhler, c2020 [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: <https://www.bohler.cz/cs/products/m303/>
33. *Popis produktu M238* [online]. Česká republika: Böhler, c2020 [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: <https://www.bohler.cz/cs/products/m238/>
34. *Popis produktu M238* [online]. Česká republika: Böhler, c2020 [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: <https://www.bohler-edelstahl.com/en/products/k600/>
35. SAROJRANI, P. KARUNAKAR, D.B. JHA, P.K. Developments in investment casting process—A review. *Journal of Materials Processing Technology*. 2012, **212**(11), 2332-2348. ISSN 0924-0136.
36. ANNICCHARICO, D. JEFFREY R. Alcock (2014) Review of Factors that Affect Shrinkage of Molded Part in Injection Molding, *Materials and Manufacturing Processes*, 2014, **29**(11), 662-682, DOI: 10.1080/10426914.2014.880467
37. POMERLAU, J. SANSCHARGIN, B. Injection molding shrinkage of PP: experimental progress. *Polymer Engineering and Science* 2006, 46 ( 9 ), 1275 – 1283.

38. NAYAK, R.K. a VENUGOPAL, S. Prediction of shrinkage allowance for tool design of aluminium alloy (A356). *Materials Today: Proceedings*. 2018, 5(11), 24997-25005. ISSN 2214-7853.
39. Popis SolidWorks. *1cpro* [online]. Praha, 2017 [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: <http://www.1cpro.cz/solidworks.php>
40. *Technická příručka obrábění: soustružení, frézování, vrtání, vyvrtávání, upínání nástrojů*. Praha: Sandvik Coromant, 2005, [601] s. : il. (převážně barev.).
41. BORO VAN, Petr. Řezné nástroje(7), *Technický týdeník* [online]. 2011, [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/rezne-nastroje/rezne-nastroje-7\\_8519.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/rezne-nastroje/rezne-nastroje-7_8519.html)
42. FOREJT, M. PÍŠKA, M. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
43. HUMÁR, A. *Technologie I: Technologie obrábění - 1. část* [online]. Studijní opory pro magisterskou formu studia. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003 [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: [https://is.muni.cz/el/1441/jaro2011/DT3MK\\_STR3/um/TI\\_TO-1cast.pdf](https://is.muni.cz/el/1441/jaro2011/DT3MK_STR3/um/TI_TO-1cast.pdf)
44. *Co vyžaduje úspěšné frézování?* [online]. Sandviken: Sandviken, c2000-2012 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/pages/default.aspx>
45. SKOPEČEK, T. HOFMANN, P. Frézovací strategie při výrobě forem a zápustek. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2005, č. 5 [cit. 2009-04-17]. Dostupný z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/frezovaci-strategie-pri-vyrobe-forem-a-zapustek.html> ISSN 1212-2572.
46. MICHNA, Š. et al. *Encyklopedie hliníku*. Prešov: Adin s.r.o., 2005. ISBN 80-890-4188-4.
47. Nástroje pro obrábění hliníkových slitin s mikroleštěným povrchem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2005 [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nastroje-pro-obrabeni-hlinikovych-slitin-s-mikrolestenym-povrchem.html>
48. ŠEBESTA, Vít. *Aplikace CAD/CAM softwaru hyperMILL při obrábění*. Brno 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 73 s. 9 příloh. Ing. Aleš Polzer, Ph.D.

49. Příručka pro technology - Opotřebení se nevyhneme! *MM Spektrum* [online]. 2012, 13.06.2012, **2012**(6), 56 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-opotrebeni-se-nevyhneme.html>
50. Co zvolit pro obrábění Al slitin? *MM Spektrum* [online]. 2008, 17.12.2008, **2008**(12), 26 [cit. 2020-06-02]. DOI: 081211. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/co-zvolit-pro-obrabeni-al-slitin.html>
51. *Frézy: Produkty* [online]. Velatice: TOOLZONE, c2018 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://www.toolzone.cz/produkt/frezy/stopkove/celni/stopkova-freza-tvrdokov-nano-lestene-rezne-hrany-zesilene-celni-brity-ha-3xd-16mm-guh-ring-15683.htm#tab-technicke-parametry>
52. *CAD/CAM-ovský systém „SolidCAM“* [online]. Česká republika: CADWiki, 2006 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: [http://plarmy.cz/cadwiki/index.php?title=Ji%C5%99%C3%AD\\_Pressl\\_-\\_CAD/CAM-ovsk%C3%BD\\_syst%C3%A9m\\_%E2%80%9ESolidCAM%E2%80%9C](http://plarmy.cz/cadwiki/index.php?title=Ji%C5%99%C3%AD_Pressl_-_CAD/CAM-ovsk%C3%BD_syst%C3%A9m_%E2%80%9ESolidCAM%E2%80%9C)
53. *Vertikální obráběcí centra HAAS VF* [online]. Česká republika: HAAS, c2017 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://www.opetech.cz/wp-content/uploads/2019/04/vertikalni-obrabeci-cnc-centra-haas-vf.pdf>
54. *VF-2SS* [online]. Oxnard: HAAS, c2020 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://www.haascnc.com/cs/machines/vertical-mills/vf-series/models/small/vf-2ss.html>
55. *Vlastnosti a normy slitin* [online]. Považská Bystrica: IMC, c2020 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <http://www.hlinikbronz.cz/vlastnosti-a-normy-slitin/>
56. *50381217* [online]. Route de Holzem, Lucembursko: Ceratizit, c2020 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://cuttingtools.ceratizit.com/cz/cs/products/50381217.html>
57. *Hitachi produktový list* [online]. Česká republika: TGS, c2014 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <http://www.tgs.cz/content/fck/files/katalogy/TgS-Hitachi-produktovy-list-14-09-AHU10.pdf>
58. *50734* [online]. Route de Holzem, Lucembursko: Ceratizit, c2020 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://cuttingtools.ceratizit.com/cz/cs/products/50734.html>
59. *TK fréza WAE303062* [online]. Libotenice: Alicon, c2020 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://www.alicon.online/widin-tk-frezy-stopkove-3z-alu-hlinik-wae303-wae323/widin-tk-freza-wae303062-d-6-0-d2-6-11-26-l2-70-z3/>
60. *TK fréza WAE302040-16* [online]. Libotenice: Alicon, c2020 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://www.alicon.online/widin-tk-frezy-stopkove-2z-alu-hlinik-wae302/widin-tk-freza-wae302040-16-d-4-0-d2-6-11-16-l2-65-z2/>

61. *TK fréza WB51208035* [online]. Libotenice: Alicon, c2020 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://www.alicon.online/tk-mikrofrezy-kulove-pro-zebrovani-2z-do-62hrc-widin-wb512/tk-freza-wb51208035-d-8-0-r4-0-d3-8-l1-10-l2-35-l3-70-z2/>
62. *10122060* [online]. Route de Holzem, Lucembursko: Ceratizit, c2020 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://cuttingtools.ceratizit.com/cz/cs/products/10122060.html>
63. *Strojní krátký závitník se šroubovitou drážkou 35°* [online]. Ždánice: Narex, c2020 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: <https://www.narexd.cz/strojni-zavitniky/0600/>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Jednotka	Popis
D	mm	Průměr
D1	mm	Průměr 1
D2	mm	Průměr 2
L1	mm	Délka 1
L2	mm	Délka 2
L3	mm	Délka 3
R	mm	Poloměr
a	mm	Šířka destičky
a <sub>p</sub>	mm	Šířka záběru ostří
b	mm	Tloušťka destičky
d	mm	Délka
f <sub>n</sub>	mm	Posuv na otáčku
f <sub>z</sub>	mm	Posuv na zub
h	mm	Výška
l	mm	Délka
n	ot/min	otáčky
r	mm	Zaoblení špičky
s	s	Sekunda
š	mm	šířka
v <sub>c</sub>	m/min	Řezná rychlost
v <sub>f</sub>	m/min	Posuvová rychlost
z	–	Zub
K <sub>r</sub>	°	Úhel nastavení hlavního ostří
∅	mm	Průměr
α	°	Vrcholový úhel

Zkratka	Jednotka	Popis
Al	–	Hliník
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	–	Oxid hlinitý
BPA	–	Bisfenol A
CAD	–	Computer Aided Design
CAM	–	Computer Aided Manufacturing
CNC	–	Computer Numerical Control

<b>Co</b>	–	Kobalt
<b>Cu</b>	–	Měď
<b>Cr</b>	–	Chrom
<b>EVA</b>	–	Etylvinil acelát
<b>Fe</b>	–	Železo
<b>Mg</b>	–	Horčík
<b>Ni</b>	–	Nikl
<b>Si</b>	–	Křemík
<b>SiO<sub>2</sub></b>	–	Oxid křemičitý
<b>TiAlN</b>	–	Titan aluminium nitrid
<b>VBD</b>	–	Výměnná břitová destička
<b>ZrO<sub>2</sub></b>	–	Oxid Zirkoničitý
<b>s.r.o.</b>	–	S ručeným omezeným
<b>tzv</b>	–	Takzvaně

**SEZNAM PŘÍLOH**

- Příloha 1      Výkres Rotor Dávkovače Metací Hlavy Spencer
- Příloha 2      Výkres Rotor Dávkovače Metací Hlavy Spencer s popisem pro  
měřicí protokol



# Příloha 1–Výkres Rotor Dávkovače Metací Hlavy Spencer

