



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

NÁVRH VTOKOVÝCH SOUSTAV PŘI VÝROBĚ VOSKOVÝCH MODELŮ ZA POMOCÍ NUMERICKÉ SIMULACE

DESIGN OF GATING SYSTEMS FOR WAX PATTERNS MANUFACTURE BY NUMERICAL SIMULATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. TOMÁŠ VAŠČÁK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

PROF. ING. MILAN HORÁČEK, CSC.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student: Bc. Tomáš Vaščák

který studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Slévárenská technologie (2301T014)**

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

Návrh vtokových soustav při výrobě voskových modelu za pomoci numerické simulace

v anglickém jazyce:

Design of gating systems for wax patterns manufacture by numerical simulation

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Výroba dokonalého voskového modelu je v technologii vytavitelného modelu jednou z nejdůležitějších fází. Podstatnou roli zde přitom hraje optimálně navržený vtokový systém při plnění matečné formy voskem. Úspěšné použití numerické simulace při tomto návrhu bude součástí řešení vědecko-výzkumného projektu aplikovaného výzkumu a experimentálního vývoje ALFA - TA01010766 „Výzkum a vývoj technologie výroby rozměrných, tenkostěnných a vysoce jakostních odlitků z Al slitin“.

Cíle diplomové práce:

Zvolit optimální numerickou simulaci pro návrh vtokové soustavy při zhotovení voskových modelu a tuto ověřit na praktických vybraných zkušebních těleších.

Seznam odborné literatury:

1. HORÁČEK, M. and CILECEK, J. Capabilities of Investment Casting Technology – Zmožnosti tehnologije precizijskega litja. Livarski Vestnik. Duben 2006, vol. 54, no. 4, p. 175-186. ISSN 0024-5135.
2. BEELEY, PR. and SMART, RF. Investment Casting. 1st ed. Cambridge: The University Press, 1995. 486 p. ISBN 0 901716 66 9.
3. DOŠKÁR, J., GABRIEL, J., aj. Výroba přesných odlitku. 1. vyd. Praha: SNTL, 1976. 315 s. DT 621.746.
4. CAMPBELL, J. Castings. 1st ed. Oxford: Butterworth – Heinemann, 1991. 288 p. ISBN 0 7506 1072.
5. HORÁČEK, M. Tradition, Present State and Perspectives of Foundry Industry. Proceedings of the World Technical Forum. Brno: Česká slévárenská společnost, 2009, s. 35-43. ISBN 978-80-904020-2-7.
6. HORÁČEK, M. and CILECEK, J. Accurate and Complex NET-SHAPE Castings for Challenging Markets. Foundry Trade Journal. 2007, vol. 180, no. 3641, p. 32-35. ISSN 1758-9789.

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

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

V Brně, dne 19. 11. 2010

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Dekan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problémem navrhování vtokového systému při výrobě voskových modelů za pomoci numerické simulace. Byla vytvořena optimální numerická simulace pro vstřikování voskové směsi, optimalizována na jednoduchém testovacím modelu a následně aplikována na složitějších kusech. Na základě poznatků ze vstřikování plastů a této simulace bylo navrženo několik vtokových systémů pro sériově vyráběný kus. Tyto poznatky byly následně uplatněny při návrhu vtokové soustavy pro výrobu rozměrných a tenkostěnných voskových modelů. Porovnáním jednotlivých návrhů byly nakonec vybrány nejvhodnější varianty pro provozní verifikaci s cílem praktického ověření optimální numerické simulace.

Klíčová slova

vtoková soustava, numerická simulace, vstřikování vosku, voskový model, vosková směs

ABSTRACT

Diploma thesis deals with problem of designing the gating systems for wax patterns manufacture by numerical simulation. It was created an optimum numerical simulation of wax blend injection, optimized for a simple test model and then applied to more complex pieces. Based on knowledge of plastic injection and the simulation was designed several gating systems for mass-produced pieces. These findings were subsequently applied in the design of gating systems to produce large and thin wax patterns. By comparing the various proposals were finally selected the best solution in order to verify the optimum numerical simulation in practise.

Key words

gating system, numerical simulation, wax injection, wax pattern, wax blend

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VAŠČÁK, T. *Návrh vtokových soustav při výrobě voskových modelů za pomoci numerické simulace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 83 s., Příloh 3. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Návrh vtokových soustav při výrobě voskových modelů za pomoci numerické simulace* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

.....

Jméno a příjmení diplomanta

Poděkování

Děkuji tímto prof. Ing. Milanu Horáčkovi, CSc. a Ing. et Ing. Vojtěchu Kosourovi za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále bych rád poděkoval společnosti MECAS ESI za ochotu a odbornou pomoc při přípravě geometrie a konzultacích ohledně simulací. Závěrem také děkuji celé své rodině a přítelkyni za podporu a trpělivost během mého studia.

OBSAH

Abstrakt	4
Prohlášení	5
Poděkování	6
Obsah	7
1 Úvod	9
2 Historie technologie vytavitelného modelu	10
3 Princip technologie vytavitelného modelu	12
3.1 Výroba voskového modelu	14
3.2 Výroba skořepinové formy	16
3.3 Odlévání	18
3.4 Dokončující operace	20
3.5 Kontrola jakosti	20
4 Reologie kapalin	21
4.1 Newtonské kapaliny	21
4.2 Neneutonské kapaliny	22
5 Složení voskových směsí	25
5.1 Přírodní směsi.....	25
5.2 Syntetické směsi.....	26
6 Dělení voskových směsí pro přesné lití	27
6.1 Přímé vosky (neplněné)	27
6.2 Emulsifikované vosky.....	27
6.3 Plněné vosky	27
6.4 Vosky na vtokové soustavy	27
6.5 Regenerované a rekonstituované vosky	27
6.6 Speciální vosky.....	27
7 Použitá vosková směs	28
8 Vtokové systémy při výrobě voskových modelů	30
8.1 Obecné zásady řešení vtokových systémů	31
8.2 Volba rozměrů rozváděcích kanálů	33
8.3 Koncepce zářezů (vtokových ústí)	35
8.4 Plný kuželový vtok	39
8.5 Bodový vtok	39
8.6 Tunelový vtok.....	41
8.7 Boční vtok.....	42

8.8	Filmový vtok.....	44
8.9	Plnění dutiny formy více vtoky	45
9	Simulace slévárenských procesů	51
9.1	Simulace ve slévárenství	51
9.2	Metody řešení	51
9.2.1	Metoda konečných prvků (MKP)	52
9.2.2	Metoda konečných diferencí (MKD)	52
9.2.3	MKP versus MKD	53
9.3	Simulační software ProCAST	54
9.3.1	Struktura programu ProCAST	54
9.3.2	Postup tvorby simulací	55
10	Simulace vstřikování voskové směsi	56
10.1	Testovací forma	56
10.2	Důležité parametry simulace	57
11	Výroba voskového modelu – tělo dalekohledu	59
11.1	Návrh vtokového systému	59
11.2	Numerická simulace vstřikování těla dalekohledu	60
11.3	Optimalizace simulace	62
11.4	Simulace Varianty C	66
12	Výroba voskového modelu „21“ – světlomet	68
12.1	Návrh vtokové soustavy	69
12.2	Numerická simulace vstřikování modelu „21“	70
12.2.1	Varianta s filmovým vtokem	71
12.2.2	Varianta s válcovým vtokem	72
12.2.3	Varianta se vtokem čtvercového průřezu	72
12.3	Zhodnocení výsledků simulace	76
13	Závěr	77
	Seznam použitých zdrojů	78
	Seznam příloh	80
	Příloha 1	81
	Příloha 2	82
	Příloha 3	83

1 ÚVOD

Jednou z nejdůležitějších fází v technologii vytavitelného modelu je zhotovení dokonalého voskového modelu. Předpokladem pro dokonalý model je na jedné straně kvalitní matečná forma a na straně druhé optimálně navržený vtokový systém.

Právě vtokový systém může rozhodnout o tom, zda dojde k úplnému zaplnění dutiny formy nebo jen částečnému a jestli nevzniknou jiné povrchové či podpovrchové vady. Proto je důležité správné dimenzování vtoku a zároveň vhodné umístění. K výrobě ideálního modelu občas postačí jenom správná volba umístění vtoku, nebo pouhá změna vstříkovacích parametrů – teplota vosku, teplota formy, průtok a tlak.

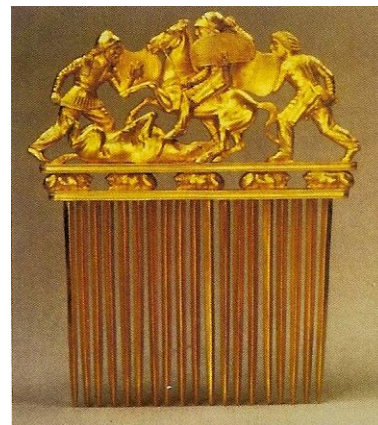
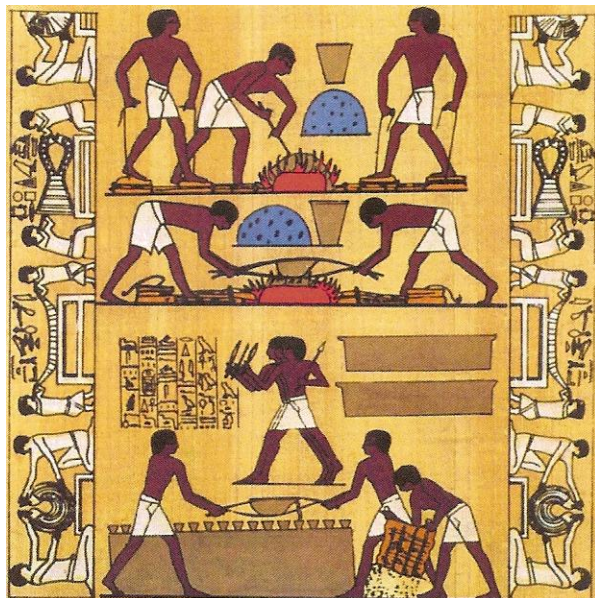
Ovšem v některých případech nelze závady odstranit pouze za pomoci změny vstříkovacích parametrů a je nutné navrhnout vhodný vtokový systém. Aby byla tato práce zjednodušena, dostává se technologům do ruky rychlý nástroj v podobě numerické simulace.

Na trhu existuje již celá řada programů, které se soustředí na simulaci vstříkování plastů či vosků, ale slévárny mnohdy nemají finanční prostředky, aby kvůli návrhu a výrobě voskového modelu investovali do dalšího simulačního programu. Z toho důvodu bude cílem této práce příprava numerické simulace v programu ProCAST a její optimalizace na sériově vyráběných modelech – dalším důvodem byla dostupnost programu na odboru slévárenství pod záštitou společnosti MECAS ESI. V druhé fázi bude cílem práce návrh vtokového systému pro velkorozměrný model s použitím znalostí ze vstříkování plastů, u kterého je výroba voskového modelu rozhodujícím faktorem výroby kvalitního odlitku.

Cílem diplomové práce je zvolit optimální numerickou simulaci pro návrh vtokové soustavy při zhotovení voskových modelů a tuto ověřit na praktických vybraných zkušebních tělesech. Úspěšné použití numerické simulace při tomto návrhu bude součástí řešení vědecko-výzkumného projektu se slévárnou přesného lítí FIMES.

2 HISTORIE TECHNOLOGIE VYTAVITELNÉHO MODELU

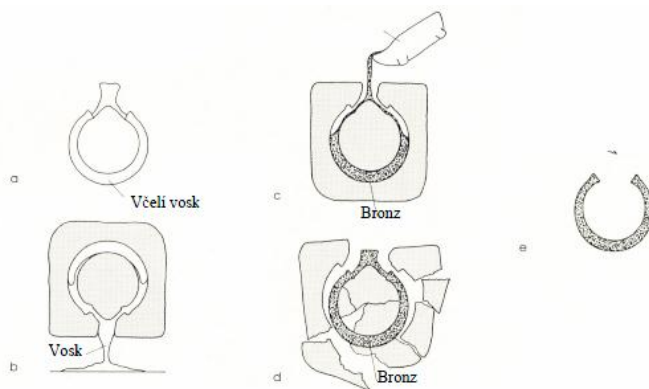
Odlévání metodou vytavitelného modelu je lidstvu známo už několik tisíciletí. Důkazem jsou především umělecká díla dávno zaniklých národů a kultur (Egypt, Palestina, Španělsko, Persie, Čína, Mexiko a jinde) [1, 2, 3] – **obr. 2.1**.



Obr. 2.1: (a) 18. dynastie Egypt (1450 před n. l.), (b) Zlatý hřeben – oblast Dněpru (4. stol. před n. l.) [1]

Dávnověká technologie byla přitom shodná s dnešní moderní technologií jen v principu – na originální model ze včelího vosku byla ručně nanášena vhodná hlína, a tak vyrobena forma – **obr. 2.2** vlevo. Duté odlitky byly zhotoveny s pomocí hliněných jader. Doba raného novověku přinesla mnoho důkazů o existenci metody vytavitelného modelu, především však renesanční Itálie – **obr. 2.3** [1].

O znovuobjevení se zasloužil italský sochař a zlatník Benvenuto Cellini, jenž vytvořil několik významných soch. Mezi nejznámější patří tři a půl tuny těžká socha Persea s uťatou hlavou Medusy (**obr. 2.2** vpravo) [2, 3].



Obr. 2.2: Postup zhotovení bronzového náramku metodou vytavitelného vosku – vlevo [4], bronzová socha Persea s hlavou Medusy – vpravo [2]

3 PRINCIP TECHNOLOGIE VYTAVITELNÉHO MODELU

Princip této technologie je patrný z **obr. 3.1**. Prvním krokem je zhotovení voskového modelu a dalších komponentů a sestavení tzv. *stromečku*. Stromeček se následně obaluje keramickou hmotou (tzv. *keramickou břečkou*). Po vytvoření poslední vrstvy keramické skořepiny a po jejím sušení se musí ze skořepiny odstranit vosk.

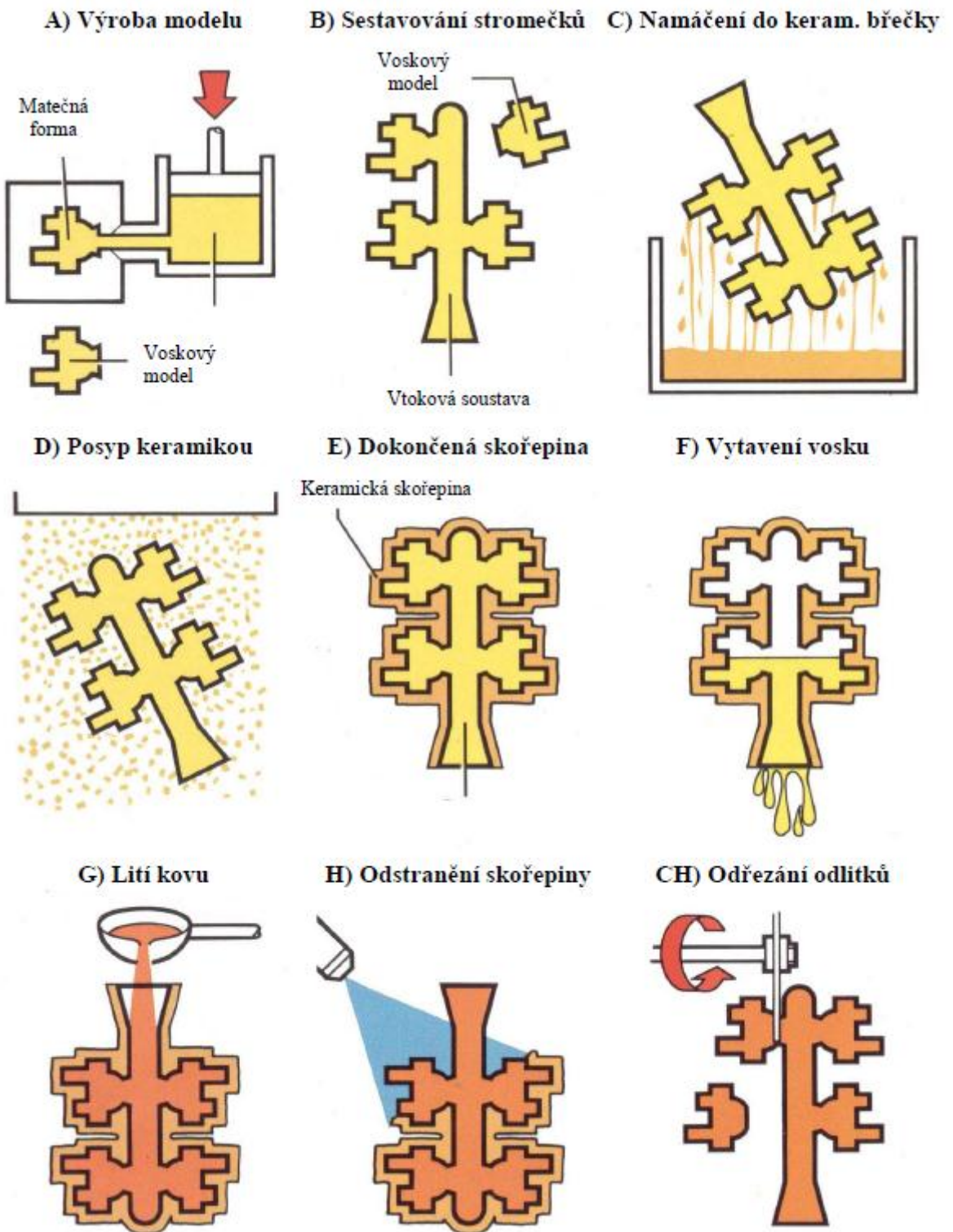
Následuje vytavení vosku přehřátou párou v autoklávu nebo bojlerklávu. Během této operace může dojít k praskání skořepin vlivem rozdílné roztažnosti keramiky a vosku. Vosk má větší tepelnou roztažnost než keramická skořepina, a proto musí být proces vytavování vosku rychlý.

Po vytavení vosku následuje žihání skořepiny. Žiháním se odstraní zbytek vosku, který se nedostal z formy během vytavování, a jiných nečistot.

V poslední fázi se vyžíhaná skořepina připraví k odlévání. Po odlití, ztuhnutí a ochlazení dochází k odstranění skořepiny a ulpělé keramické směsi tryskáním nebo jinými způsoby. Výsledné odlitky se poté odstraní od vtokového kůlu a ty se posléze omílají v bubnech nebo se tryskají.

Celý popis technologie vytavitelného modelu by se dal shrnout v následujících čtyřech bodech [5]:

1. Výroba voskového modelu
 - a) *Zhotovení matečné formy*
 - b) *Zhotovení voskového modelu*
 - c) *Sestavení modelů do stromečku*
2. Výroba skořepinové formy
 - a) *Postupné obalování a sušení obalů*
 - b) *Vytavení vosku ze skořepiny*
 - c) *Keramizační žihání skořepiny*
3. Odlévání
 - a) *Na vzduchu*
 - b) *Ve vakuu*
4. Dokončující operace
 - a) *Odstranění vtokové soustavy*
 - b) *Tryskání, omílání, atd.*



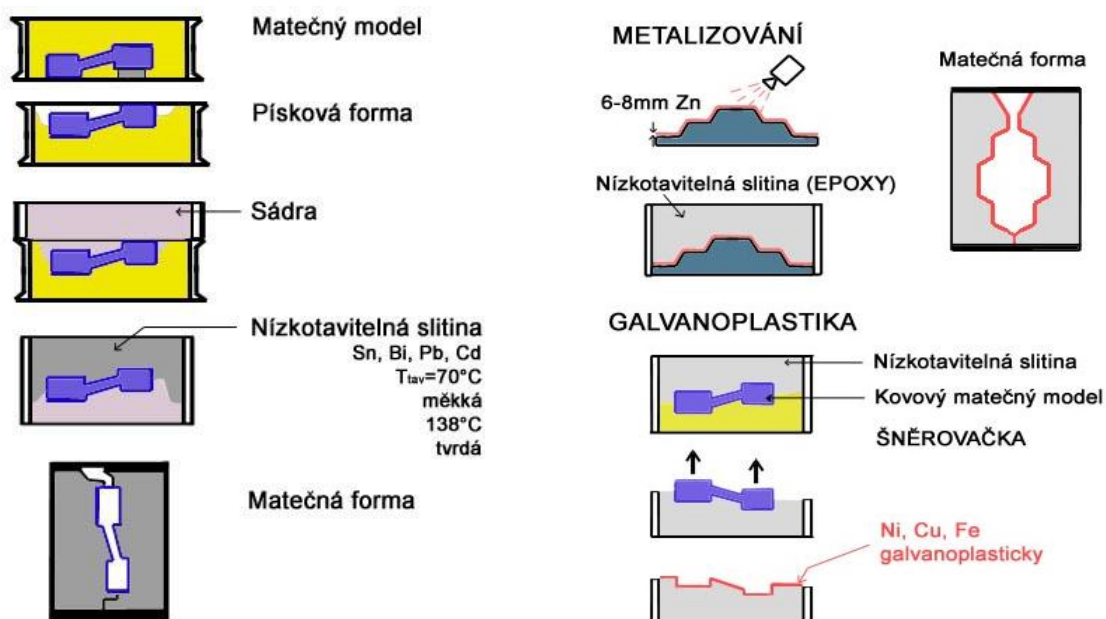
Obr. 3.1: Princip technologie vytavitelného modelu [5]

3.1 Výroba voskového modelu

a) Zhotovení matečné formy

Podle matečného modelu:

- z nízkotavitelných slitin, metalizováním, galvanoplasticky (**obr. 3.2**)
- obráběním z kovových bloků (nejčastěji)



Obr. 3.2: Matečná forma z nízkotavitelných slitin, metalizováním a galvanoplastikou [4]

Ekonomické srovnání jednotlivých způsobů výroby forem je uvedeno v **tab. 1**, kde jsou seřazeny výrobní způsoby podle nákladů za mzdu tak, že základem je výroba forem z oceli obráběním [6].

Tab. 1: Porovnání výrobních způsobů na zhotovení matečných forem [6]

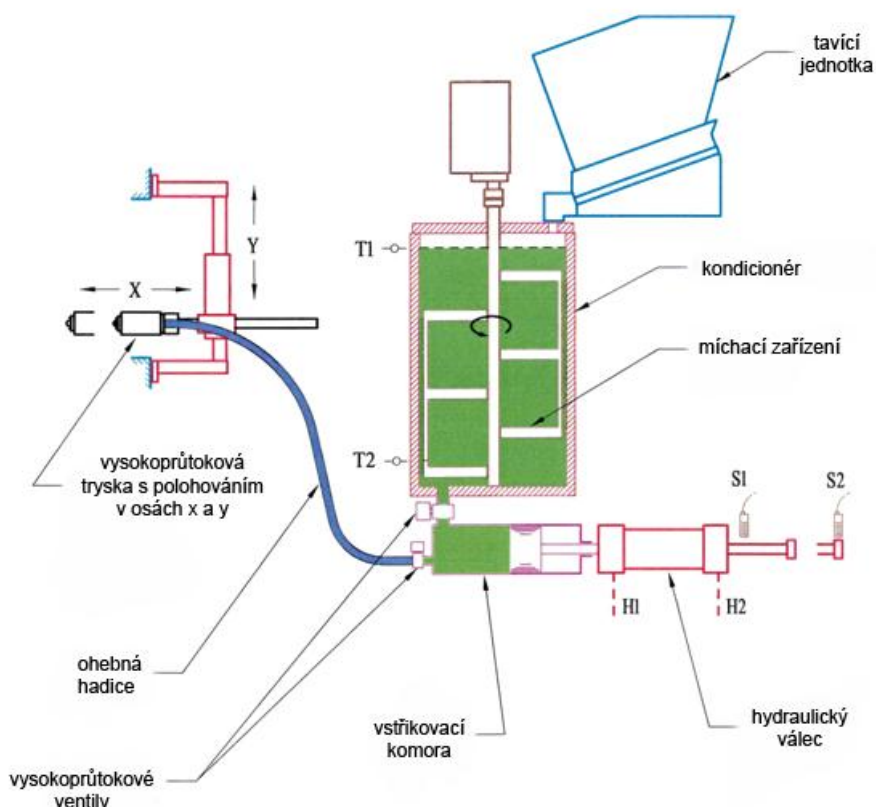
Způsob výroby formy	Mzdové náklady [%]	Stupeň přesnosti	Doba tuhnutí [s]	Počet modelů vyrobených v 1 formě
<i>Obráběním z oceli</i>	100	1	-	30 000 až 120 000
<i>Litím z nízkotavitelných slitin</i>	75	2	80	5 000 až 7 000
<i>Litím ze zinkové slitiny</i>	75	3	80	15 000 až 20 000
<i>Z plněné epoxidové pryskyřice</i>	33	4	140	do 500
<i>Z kaučuku</i>	20	5	180	do 200
<i>Ze sádry</i>	15	5	150	jednotlivě

b) Zhotovení voskového modelu

Popisem a rozdělením jednotlivých druhů modelových hmot se zabývá kapitola 5 *Složení voskových směsí*.

Voskový model může být zhotoven gravitačním litím (nad teplotou likvidu vosku), odstříknutím za zvýšeného tlaku (0,5–1 MPa – těsně pod teplotou likvidu z tzv. napěněného vosku), nebo odstříknutím za působení vyššího tlaku (2,5–5 MPa – pod teplotou likvidu z těstovitého stavu) [4].

Zařízení na výrobu modelů a přípravu voskové směsi (vstříkolis, tavící jednotka a kondicionér) je vyobrazeno na **obr. 3.3**.



Obr. 3.3: Zařízení na výrobu voskových modelů [5]

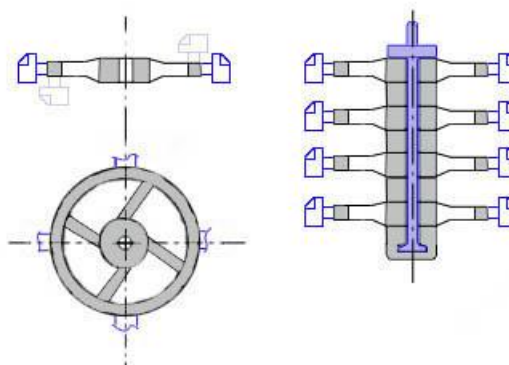
c) Sestavení modelů do stromečku

Výsledná podoba a tvar stromečku ovlivňuje celá řada faktorů a skutečností jako jsou:

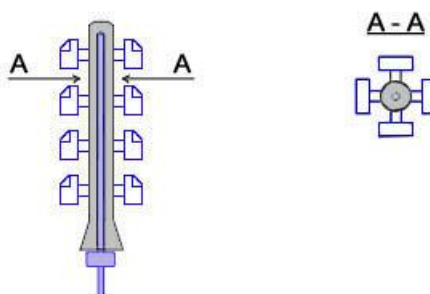
- Způsob připojení modelů (lepení/pájení) – viz **obr. 3.4**
- Technika obalování
- Způsob vytavování
- Způsob lití
- Oddělování odlitků od vtokové soustavy

Stromečkové sestavy

a) modely sestavené horizontálně - etážové



b) modely přímo na vtokový kanál



Obr. 3.4: Způsoby připojení modelů do stromečku [5]

3.2 Výroba skořepinové formy

a) Postupné obalování a sušení obalů

Obalování a sušení obalů se děje v několika krocích, které se několikrát opakují v závislosti na potřebném počtu obalů a zajištění pevnosti skořepinové formy. Prvním krokem je odmaštění voskových modelů a odstranění zbytků separátoru použitého při výrobě modelu v matečné formě.

Následuje ponoření modelu do obalové hmoty, tzv. „keramické břechky“, sestávající se z plniva a pojiva. Jako plnivo se používá žáruvzdorná keramická moučka (moločit, tavený křemen, zirkon a další), jako pojivo se užívá koloidní roztok křemene na bázi alkoholu (alkohol) nebo vody (hydrosol) [5].

Po proceduře máčení následuje okapání přebytečné keramické břechky.

Dalším krokem je posyp zrnitým keramickým materiálem. Zrnitý materiál se může nanášet fluidním nebo sprchovým způsobem. Jako posypový materiál se nejčastěji používá křemen, moločit, korund, zirkon a silimanit. Zrnitost posypového materiálu se volí s ohledem na číslo obalu. Na první dva obaly se dle [5] používá materiálu s jemnější zrnitostí (0,175–0,250 mm), který zajistí kvalitní povrch výsledného odlitku. Třetí a další obaly mají zesilovací funkci a zároveň zajišťují prodyšnost formy. Podle [5] se zrnitost materiálu pohybuje okolo 0,25–0,50 mm.

Následujícím krokem je sušení v klimatizovaném prostoru po dobu 2–4 hodin při teplotě $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ a relativní vlhkosti 30–60 % dle typu použitého pojiva [4].

Celý proces se opakuje do vytvoření potřebného počtu obalů. Obvyklý počet obalů je 8–12 [5].

b) Vytavení vosku ze skořepiny

Základním problémem při vytavování vosku ze skořepiny je rozdílná roztažnost vosku a skořepiny. Protože je roztažnost vosku větší, hrozí nebezpečí roztržení skořepiny. Proto je nutné vytvořit tzv. „*dilatační spáru*“ na povrchu voskového modelu. To se děje tepelným šokem – rychlým ohřevem této vrstvy – za použití [5]:

- a) Přehřáté páry (v bojlerklávu)
- b) Vyžiháním
- c) Mikrovlnným ohřevem

Většina sléváren používá první systém vytavování vosku ze skořepinových forem (přehřátou párou). Hlavními důvody pro použití přehřáté páry jsou [5]:

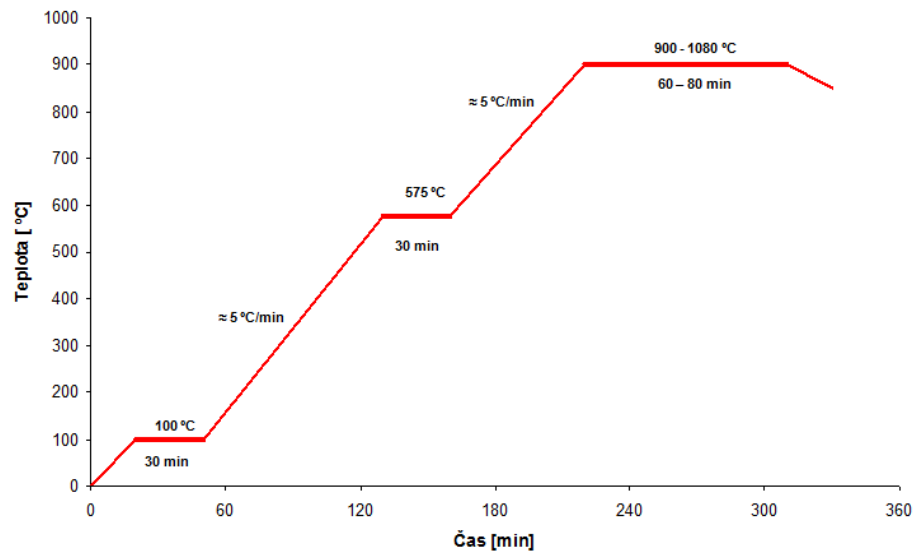
- Ideální vlastnosti páry pro přenos tepla
- Snadnost sběru vytaveného vosku
- Vysoká účinnost

Pracovní parametry pro vytavování vosku přehřátou párou v bojlerklávu [5]:

- Teplota páry: 160–170 °C
- Pracovní tlak: 6–8 atm
- Doba nárůstu tlaku na pracovní tlak: 4–5 s
- Řízená rychlost snižování tlaku

c) Keramizační žihání skořepiny

Při keramizačním žihání skořepiny dochází k převodu amorfni formy vazné vrstvy SiO_2 na krystalickou a zároveň dochází k odstranění těkavých látek (zbytku vosku) [5]. Samotný průběh cyklu žihání je znázorněn na **obr. 3.5**.

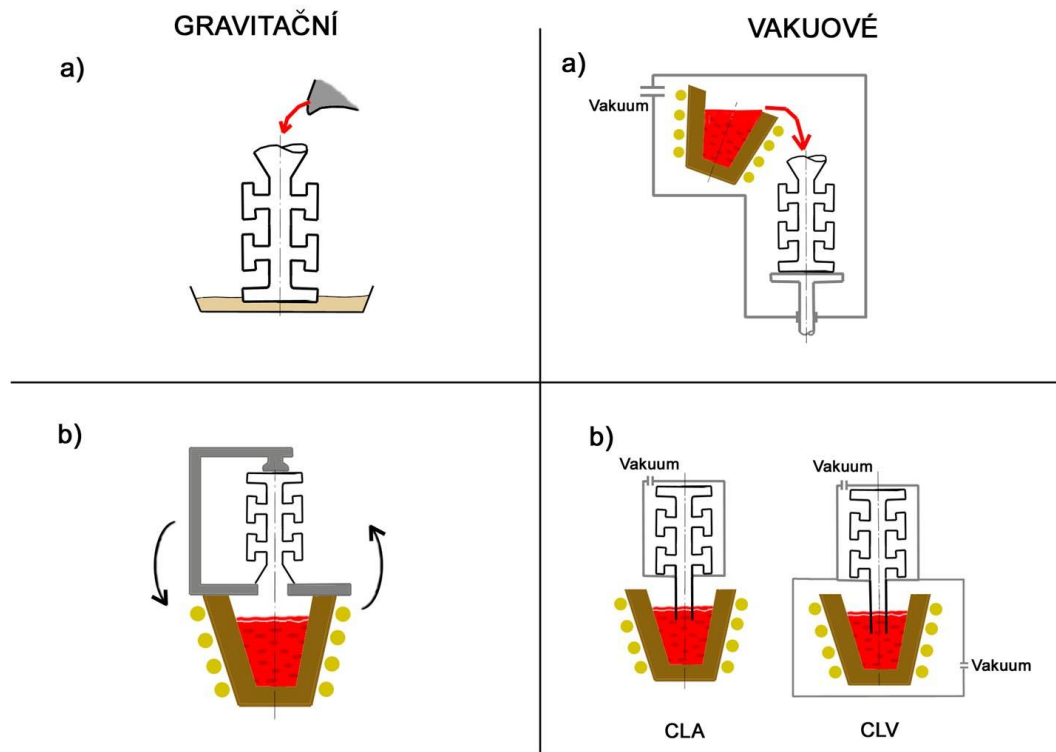


Obr. 3.5: Teplotní průběh cyklu žíhání keramické skořepiny [5]

3.3 Odlévání

a) Způsoby liti

Odlévání může probíhat buď gravitačně, nebo za použití vakua. Příklady obou metod jsou vyobrazeny na obr. 3.6.

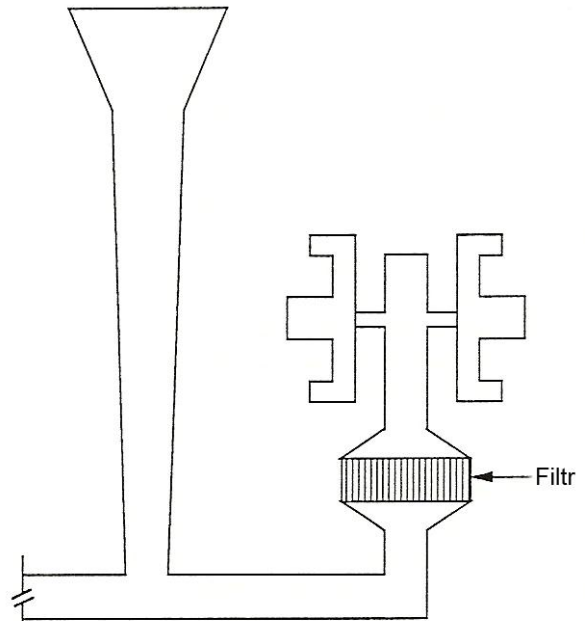


Obr. 3.6: Způsoby odlévání skořepinových forem [5]

b) Filtrace tekutého kovu

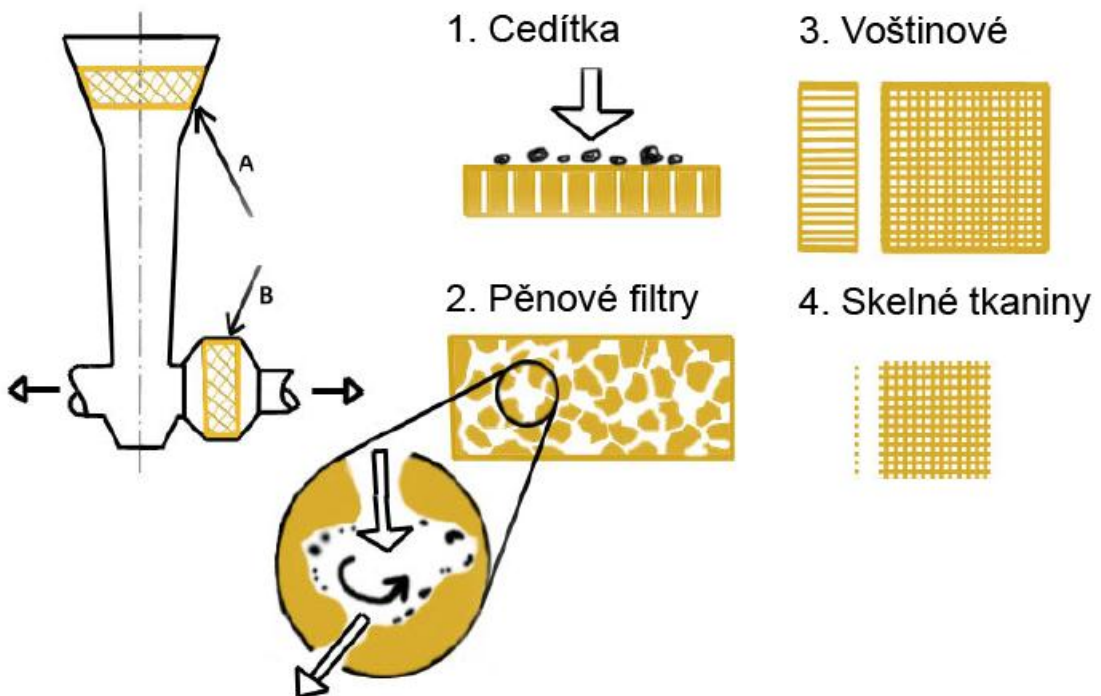
Úkolem filtrace je jednak zachycení nečistot, jež se dostanou do vtokové soustavy z tekutého kovu během tavby a další manipulace, a také zachycení nových nečistot, jež vznikají až v průběhu lití při oxidaci kovu [7]. Z toho důvodu je zřejmé, že filtry by se měly umisťovat co nejbližší samotným odlitkům – **obr. 3.7**.

Filtr se nedoporučuje umisťovat přímo do vtokové jamky nebo vtokového kanálu (uložení **A** na **obr. 3.8**). Kov, který protéká filtrem, se dělí na více proudů nebo jednotlivé kapičky kovu, což vede k oxidaci tekutého kovu a většímu počtu lidických vměstků. Další nevýhodou je brzdění proudu kovu samotným filtrem, kdy dochází k prodloužení doby lití a případnému nezaběhnutí, především u tenkostěnných odlitků. Nejvýhodnější poloha pro filtr je co možná nejbližší dutině formy samotného odlitku (uložení **B** na **obr. 1.2-6**), tak, aby tekutý kov musel postupovat směrem vzhůru a nedocházelo k dodatečnému rozstříkání kovu [3]. Možnosti filtrace a příklady filtrů jsou na **obr. 1.2-6**.



Obr. 3.7: Doporučené umístění filtru [3]

Možnosti filtrace



Obr. 3.8: Umístění a příklady filtrů [5]

3.4 Dokončující operace

Po odlití, ztuhnutí a ochlazení odlitku následují dokončující operace. Mezi tyto operace řadíme oddělování odlitků od vtokové soustavy (řezáním, vibrací), apretaci odlitků (tryskání, broušení) a případné tepelné zpracování.

3.5 Kontrola jakosti

Poslední, a neméně důležitou operací je kontrola jakosti odlitků. Odlitky se kontrolují s ohledem na [5]:

- Chemické složení a strukturu (spektrometr, metalografie)
- Vnitřní jakost (rentgen, ultrazvuk)
- Povrchovou kvalitu (kapilární metody)
- Mechanické vlastnosti (pevnost v tahu, tažnost, tvrdost, atd.)
- Rozměrovou přesnost

4 REOLOGIE KAPALIN

Vědní obor nazývaný reologie se zabývá studiem vnitřní reakce látek (pevných i tekutých) na působení vnějších sil resp. jejich deformovatelností a tokovými vlastnostmi. Souvislost mezi mikrostrukturou a reologickými vlastnostmi zkoumá mikroreologie. Naopak Makroreologie na kapaliny pohlíží jako na kontinuum a formuluje zákonitosti viskózního toku [8].

Reologické chování tekutých materiálů hraje důležitou roli v řadě technologických operací. Znalost základních reologických veličin, viskozity, meze toku a modulů pružnosti je potřebná nejen k charakterizování surovin event. produktů, ale i k řešení mnoha technických úloh a inženýrských výpočtů [8].

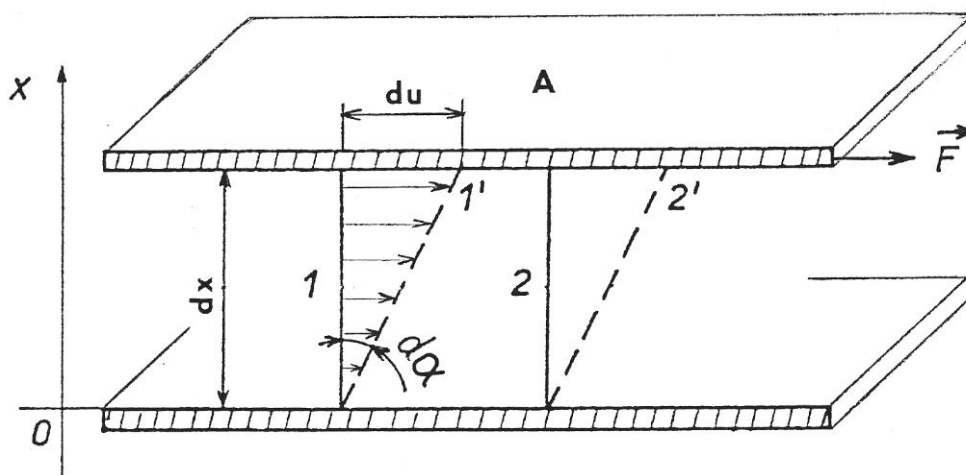
Matematickým vyjádřením tokových vlastností kapalin jsou reologické stavové rovnice, které zpravidla vyjadřují vztah mezi deformačním smykovým (tečným, vazkým) napětím τ a deformací kapaliny. Jejich grafickou podobou jsou tokové křivky [8].

4.1 Newtonské kapaliny

Pro ideálně viskózní materiály platí pro tečné napětí Newtonův zákon

$$\tau = \eta \cdot \frac{du}{dx} = \eta \cdot D \quad [\text{Pa}] \quad (1.1),$$

kde součinitel η je dynamická viskozita charakterizující vnitřní tření newtonské kapaliny, du je vzájemná rychlost pohybu smykových rovin vzdálených o element dx a D je tzv. gradient rychlosti (rychlost deformace, rychlost smyku), který charakterizuje tvarové změny v proudící tekutině (**obr. 4.1**) [8].



Obr. 4.1: Rychlostní profil toku v kapalině mezi nepohyblivou a pohybující se deskou [8]

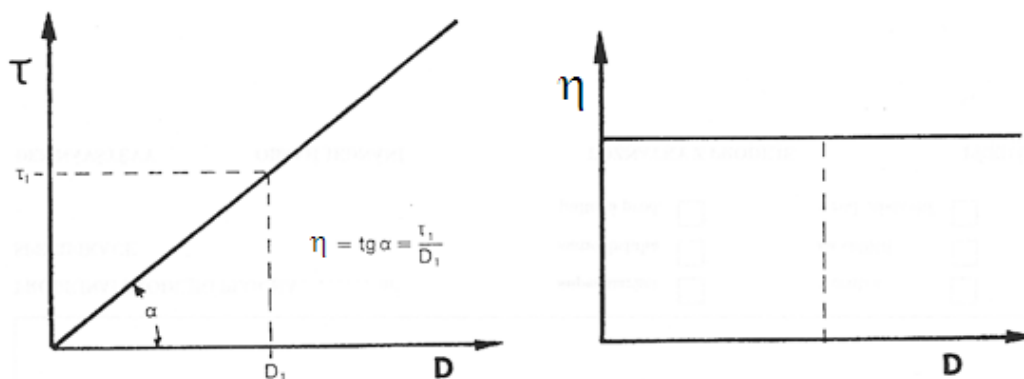
Dynamická viskozita je látkovou charakteristikou. Její hodnota závisí na teplotě a tlaku. Jednotkou dynamické viskozity je $[\text{Pa}\cdot\text{s} = \text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}]$. Převrácená hodnota dynamické viskozity se nazývá tekutost [8].

$$\varphi = \frac{1}{\eta} \quad [1/\text{Pa}\cdot\text{s} = \text{m}\cdot\text{s}/\text{kg}] \quad (1.2)$$

Podíl dynamické viskozity η a hustoty tekutiny ρ se nazývá kinematická viskozita ν s jednotkou [m^2/s]. Kinematickou viskozitu je výhodné užívat při popisu dějů závislých jak na viskozitě, tak na hustotě, např. při popisu hydrodynamiky kapalin [8].

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (1.3)$$

Tekutiny řídící se Newtonovým zákonem nazýváme newtonovské. Viskozita newtonských tekutin nezávisí na smykovém napětí a jejich toková křivka je na **obr. 4.2**. Pro smykové napětí platí vztah $\eta = \text{tg} \alpha$ [8].



Obr. 4.2: Toková a viskozitní křivka newtonské kapaliny [8]

4.2 Neneutonské kapaliny

Kapaliny, které se neřídí Newtonovým zákonem, nazýváme neneutonské kapaliny a jedná se např. o roztoky, taveniny polymerů, suspenze, různé pasty, tekuté vosky apod. Platí pro ně analogicky s Newtonovým zákonem rovnice $\tau = \eta \cdot D$, kde η je zdánlivá viskozita, která není látkovou konstantou, ale závisí na rychlosti deformace nebo tečném napětí. Pro popis toku je tedy nutné znát průběh závislosti $\eta = \eta(D)$ [8].

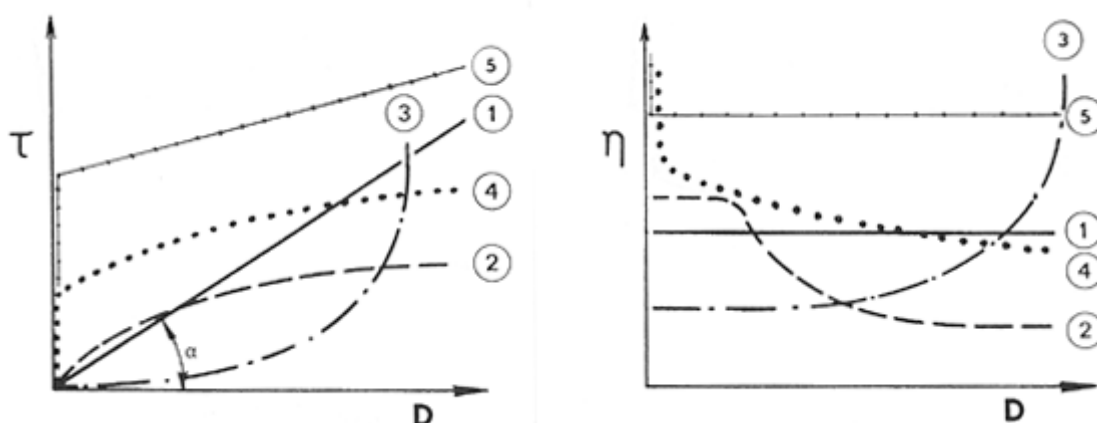
Základní typy neneutonských kapalin jsou:

- Pseudoplastické kapaliny**, jejichž zdánlivá viskozita se s rostoucím gradientem rychlosti zmenšuje (**obr. 4.3**). Podle průběhu tokové křivky se někdy rozlišují dvě podskupiny – pravé pseudoplastické kapaliny a strukturně viskózní kapaliny, u nichž lze stanovit dvě hodnoty zdánlivé viskozity (**obr. 4.4**) [8].
- Dilatantní kapaliny**, jejichž zdánlivá viskozita roste s rostoucím gradientem rychlosti (**obr. 4.3**). K vyjádření průběhu tokových křivek uvedených neneutonských kapalin se užívají rovnice empirické nebo poloempirické povahy, např. typu

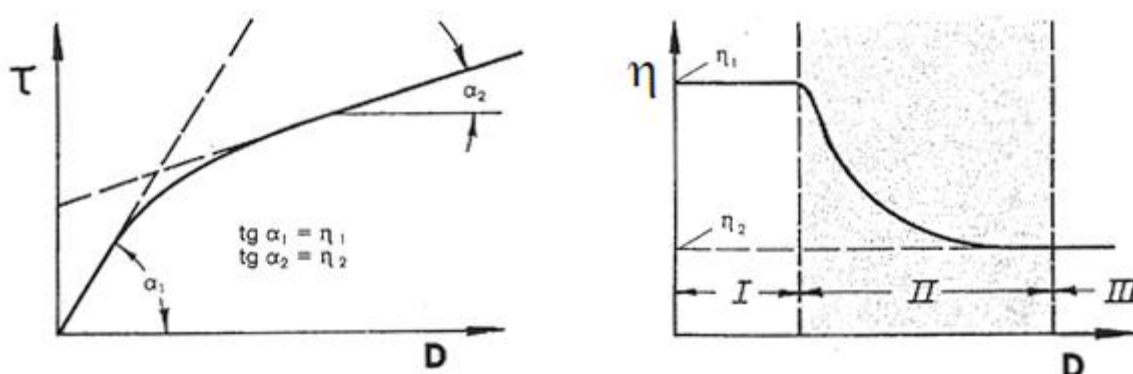
$$D = K \cdot \tau^n \quad n > 1 \quad \text{pro pseudoplasticitu} \quad (1.4)$$

$$n < 1 \quad \text{pro dilataci}$$

kde K , n jsou empirické látkové parametry charakterizující vlastnosti toku neneutonské kapaliny a závisí pouze na teplotě. Parametr K se nazývá součinitel (koeficient) konzistence a parametr n je index (nebo exponent) toku [8].



Obr. 4.3: Tokové a viskozitní charakteristiky některých neneutonských kapalin: 1 – newtonská kapalina, 2 – strukturně viskózní kapalina, 3 – dilatantní kapalina, 4 – plastická kapalina (pseudoplastická s mezí toku), 5 – binghamská kapalina [8]



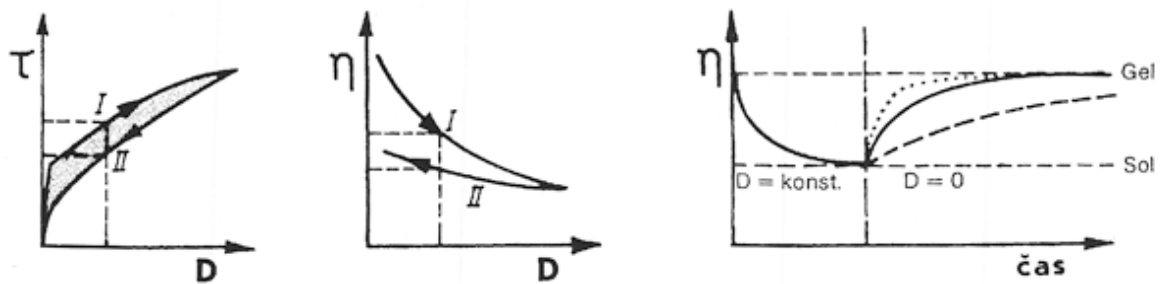
Obr. 4.4: Toková a viskozitní křivka strukturně viskózní kapaliny [8]

- c) **Binghamské kapaliny**, tj. kapaliny s plastickou složkou deformace, u nichž dochází k toku až po překročení určitého prahového smykového napětí, tzv. meze toku (kluzu), označovaného τ_k (**obr. 4.3**). Platí pro ně následující vztah

$$\tau - \tau_k = \eta_0 \cdot D \quad (1.5)$$

Existují také kapaliny s časově závislou složkou deformace, které mění zdánlivou viskozitu s dobou působení napětí. Jejich tokové křivky jsou hysterezní, a průběh při zvyšování napětí se liší od průběhu při jeho snižování (**obr. 4.5**). Rozlišují se dva základní typy [8]:

1. **Látky tixotropní**, u nichž zdánlivá viskozita klesá s prodlužující se dobou působení napětí.
2. **Látky reopektické**, jejichž zdánlivá viskozita během smykového namáhání s časem roste.



Obr. 4.5: Charakteristické křivky tixotropní kapaliny [8]

Je třeba zdůraznit, že pro nelineární kapaliny, které se v průmyslu vyskytují velmi často, nemá pojem viskozity jako látkové konstanty fyzikální význam a je nutno jej nahradit tokovou křivkou v potřebném rozsahu tečných napětí. Údaj zdánlivé viskozity změřený na jednoduchém viskozimetru bez udání tečného napětí nebo rychlostního gradientu může sloužit pouze pro orientační srovnání konzistence nelineárních kapalin stejného druhu měřené na stejných přístrojích za stejných podmínek [8].

5 SLOŽENÍ VOSKOVÝCH SMĚSÍ

Voskové směsi můžeme dělit na přírodní a syntetické. Jedná se o sloučeniny více komponentů – syntetický vosk, přírodní vosk (uhlovodík), přírodní vosk (ester), přírodní a syntetická pryskyřice, montánní vosk, organické plnivo a voda [4].

5.1 Přírodní směsi

Přírodní voskové směsi dále dělíme na tzv. „*měkké*“ a „*tvrdé*“ vosky.

1. „**Měkké**“ **vosky** – používají se převážně při výrobě modelů gravitačním litím, hlavními složkami jsou nejčastěji parafín a cerezín [4].

Cerezín

Směs tvrdých metanových uhlovodíků, čistý je v podobě malých krystalků jehličkovitého tvaru. V porovnání s parafínem má vyšší teplotu měknutí a je odolnější vůči deformacím. Obsah popela do 0,03 %. Nevýhodou je vedle poměrně nízké pevnosti, tvrdosti a plasticity značné lineární smrštění – až 3,5 % [4].

Parafín

Směs tvrdých nasycených uhlovodíků, měkne již při teplotě 30 °C. Teplota tavení závisí na stupni jejich rafinace a pohybuje se v rozmezí 42–64 °C. Obsah popela do 0,1 %. Nevýhodou je křehkost a nízká pevnost [4].

2. „**Tvrde**“ **vosky** – používají se pro výrobu voskových modelů na vstřikolisech, hlavními složkami jsou montánní vosk, romonta a kalafuna [4].

Montánní vosk

Směs voskových a pryskyřičných látek s podílem asfaltických látek. Jejich vzájemný poměr určuje kvalitu surového vosku. Používá se jako hlavní složka „tvrdých“ modelových směsí a dává jim charakteristické vlastnosti, tj. tvrdost, úzký interval tuhnutí a dostatečnou stabilitu za normální i zvýšené teploty. Se zvyšujícím se obsahem asfaltických látek se kvalita montánního vosku snižuje, protože tyto látky mají vyšší teploty tavení než vlastní modelová hmota (až 120 °C) [4].

Romonta

Směs monokarbidové kyseliny, hydrokyseliny a jejich esterů, montánní pryskyřice a asfaltických částí. Vosk romonta se používá v kombinaci s cerezínem, čímž vzniká velmi rychle tuhnoucí binární sloučenina. Rychlé tuhnutí způsobuje, že gravitačně lité modely praskají. Aby se prodloužil interval tuhnutí, přidává se do této směsi další složka – kalafuna [4].

Kalafuna

Tvrdá složka smoly jehličnatých stromů. Pro směsi se nejčastěji používá borová kalafuna s obsahem popela do 0,04 % a teplotou měknutí minimální 66 °C [4].

5.2 Syntetické směsi

Syntetické voskové směsi se skládají z těchto složek:

- Pyskyřice
- Vosky a polymery
- Plnivo

Pyskyřice

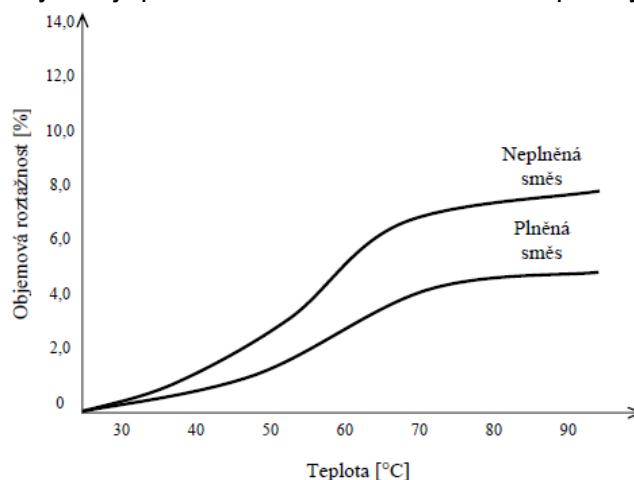
Je amorfní, v ideálním případě inertní látka. Ve směsi plní úlohu ztekučvadla. Lze je podle původu dělit na přírodní, částečně syntetické a plně syntetické. Většina pyskyřic není úplně inertní a oxiduje, a proto je nutné použití stabilizátoru [4].

Vosky a polymery

Vosk je inertní krystalická látka. Kvalitní vosk nelze vyrobit pouze z ropného vosku, a proto je míchán ze směsí více vosků s polymery. Polymery zvyšují viskozitu a do značné míry ovlivňují fyzikální vlastnosti – dělí se podle původu na petrolejové, syntetické a přírodní [4].

Plnivo

Ve srovnání s neplněnými se plněné směsi vyznačují zejména významně nižším smrštěním – obr. 5.1, což znamená vznik menší staženiny. Také při opačném procesu, tj. při zvětšování rozměrů se vzrůstající teplotou, vykazují plněné směsi ve srovnání s neplněnými podstatně nižší změny objemu, což je důležité pro vytavování vosků ze skořepiny, kdy hrozí jejich popraskání. Výběrem plniva lze také velmi podstatně ovlivnit tepelné, mechanické a chemické vlastnosti voskové směsi [4].



Obr. 5.1: Vliv plniva na objemové změny vosku [3]

6 DĚLENÍ VOSKOVÝCH SMĚSÍ PRO PŘESNÉ LITÍ

Typologické rozdělení voskových směsí pro technologii přesného lití je [3]:

- Modelové (přímé – neplněné, emulsifikované, plněné)
- Na vtokové soustavy
- Regenerované a rekonstituované
- Speciální

6.1 Přímé vosky (neplněné)

Jsou složeny z mnoha voskových a pryskyřičných komponentů. Povrch voskového modelu je většinou hladký a lesklý. Směs může být regenerována a rekonstituována a následovně použita jak pro výrobu modelů, tak pro části vtokového systému [3].

6.2 Emulsifikované vosky

Mají podobné složení jako přímé vosky, ale navíc obsahují vodu v množství 7 až 12 %. Povrch voskového modelu je extrémně hladký, protože voda působí jako plnivo a navíc výsledný model získá odolnost proti vzniku propadlin a dutin. Směs lze regenerovat i rekonstituovat a opětovně použít pro výrobu modelu i vtokové soustavy [3].

6.3 Plněné vosky

Základní složení je opět podobné jako u předešlých kategorií, ale navíc obsahují organické nerozpustné práškové plnivo, které je inertní vůči ostatním složkám voskové směsi. Je nezbytné, aby plnivo bylo organického charakteru a zajistilo dokonalé shoření bez zbytkového popela. Lze je také regenerovat a rekonstituovat a použít pro modely a vtokové soustavy [3].

6.4 Vosky na vtokové soustavy

Nejsou na ně kladeny takové nároky jako na modelové vosky. S výhodou se používají regenerované voskové směsi. Vyrábí se i speciální panenské vosky s konkrétními vlastnostmi dle požadavků odběratele. Obvykle mají nižší bod tavení a nižší viskozitu z důvodu snadného vytavení vosku ze skořepinové formy [3].

6.5 Regenerované a rekonstituované vosky

Regenerované vosky jsou zbaveny nečistot a vody a je přidána část nového vosku. Regenerace je většinou v režii sléváren, proto regenerované vosky nedosahují takových kvalit jako vosky nové. Používají se především pro vtokové soustavy, ne na model. Rekonstituci provádí samotní výrobci voskových směsí. Vosk má shodné parametry jako vosk panenský při nižší ceně [3].

6.6 Speciální vosky

Jsou navrženy pro konkrétní použití, např. pro výrobu složitých vnitřních tvarů a tvorby dilatační spáry mezi voskovým modelem a skořepinovou formou při vytavování, čímž se zabrání popraskání skořepiny [3].

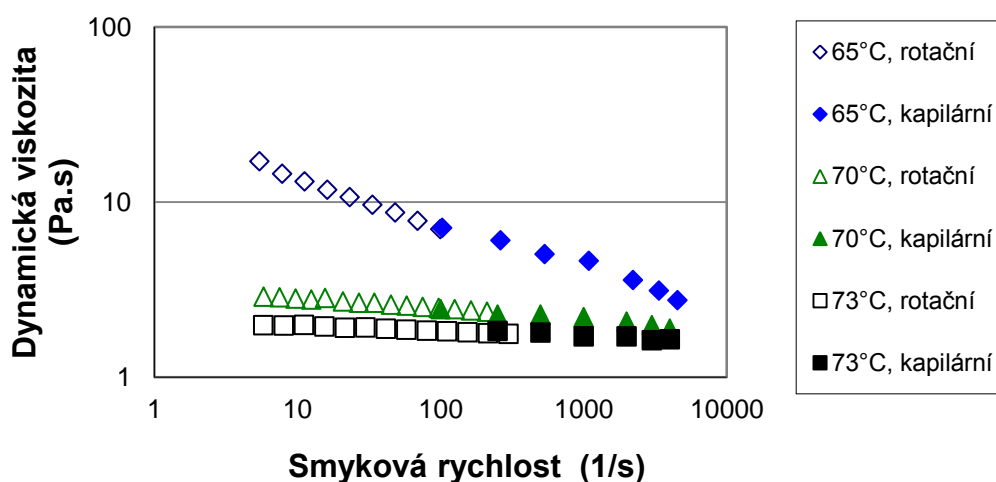
7 POUŽITÁ VOSKOVÁ SMĚS

Pro výrobu voskových modelů byla použita vosková směs s označením Hyfill B 478 od anglického výrobce REMET®. Jedná se o tvrdou, nízkoviskózní modelovou směs s 30 % polymerního plniva (polystyren). Směs nabízí dobrou tekutost a vstřikovací charakteristiky společně s nízkou hodnotou smrštění. Souhrnné informace o voskové směsi Hyfill jsou uvedeny v **tab. 2**, které byly poskytnuty přímo od výrobce (**Příloha 1**).

Tab. 2: Technická data voskové směsi Hyfill B 478 [8]

Vlastnost	Typická hodnota
bod tavení [°C]	70
bod tuhnutí [°C]	65
penetraci při 25 °C [mm]	4
penetraci při 43,3 °C [mm]	30
viskozita při 80 °C [cPs]	900
obsah plniva [%, w/w]	30
obsah popela [%, w/w]	0,03
barva	zelená
relativní hustota	1,05

V první řadě je vhodné stanovit, co od simulace očekáváme, abych zjistil, jaká materiálová data jsou potřeba naměřit. Simulace bude zaměřena na predikci průběhu zaplňování dutiny formy voskovou směsí. Na základě měření (ve spolupráci s UTB Zlín a FCH Brno) byla zjištěna termo-fyzikální data nutná pro numerickou simulaci v software ProCAST, v němž byla vytvořena materiálová databáze voskové směsi. Jde o vlastnosti materiálu jako tepelná vodivost, hustota, specifické teplo, entalpie, frakce solidu, latentní teplo, teplota likvidu a solidu, viskozita (**obr. 7.1**) a povrchové napětí (**obr. 7.2**). Všechny tyto hodnoty se zadávají do dvou modulů – modul „Thermal“ a modul „Fluid“. Modul „Thermal“ je důležitý pro výpočet rozložení teplotních polí, jak směsi, tak formy – doby tuhnutí, tepelných toků a gradientů. Modul „Fluid“ je nutný pro výpočet pohybu voskové směsi dutinou formy.



Obr. 7.1: Údaje dynamické viskozity v závislosti na smykové rychlosti naměřené na rotačním a kapilárním viskozimetru pro voskovou směs Hyfill B 478

Program ProCAST umožňuje popis neneutonského proudění pomocí matematického modelu Carreau-Yasuda. Jedná se o pětiparametrový výpočtový model.

$$\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) \cdot \left[1 + (\lambda - D)^a \right]^{\frac{n-1}{a}} \quad (1.6)$$

η – zdánlivá viskozita,

D – smykové napětí,

η_{∞} – viskozita při nekonečném smykovém napětí,

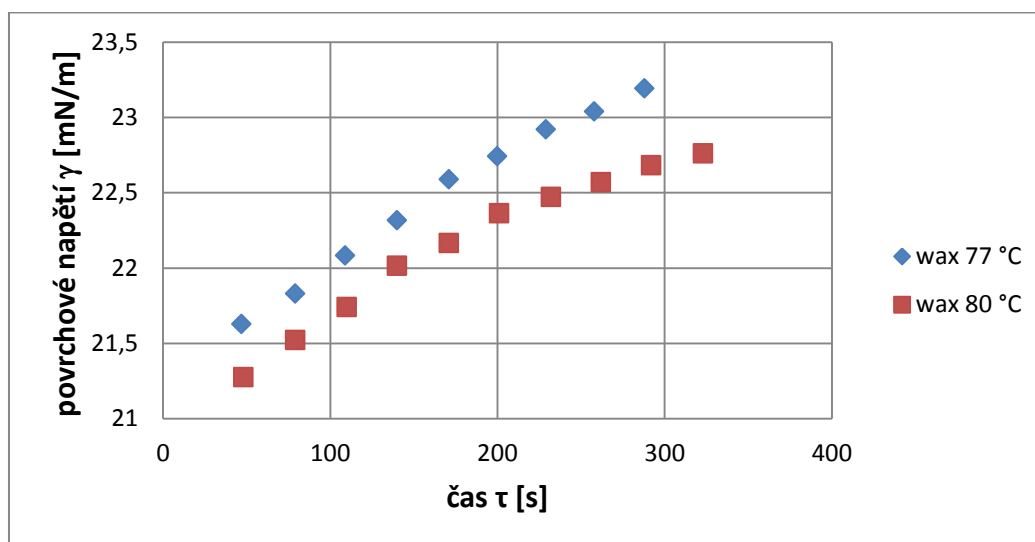
η_0 – viskozita při nulové hodnotě smykového napětí,

n – citlivost viskozity na smykové napětí,

λ – inverzní hodnota smykového napětí,

a – Yasuda parametr.

Hodnoty povrchového napětí byly naměřeny na chemické fakultě VUT v Brně, graf závislosti povrchového napětí na čase je na **obr. 1.9-2**.



Obr. 7.2: Závislost povrchového napětí na čase pro dvě různé teploty voskové směsi

8 VTOKOVÉ SYSTÉMY PŘI VÝROBĚ VOSKOVÝCH MODELŮ

Výroba dokonalého voskového modelu je v technologii vytavitelného modelu jednou z nejdůležitějších fází. Podstatnou roli zde přitom hraje optimálně navržený vtokový systém při plnění matečné formy voskem. Vtokový systém formy zajišťuje při vstřiku vedení proudu voskové směsi od vstřikovacího stroje do dutiny formy. Naplnění dutiny má proběhnout v nejkratším možném čase a s minimálními odpory. Průtok taveniny vtokovým systémem je provázen složitými tepelně-hydraulickými poměry. Tvar a rozměry vtoku spolu s umístěním jejího ústí ovlivňují [10]:

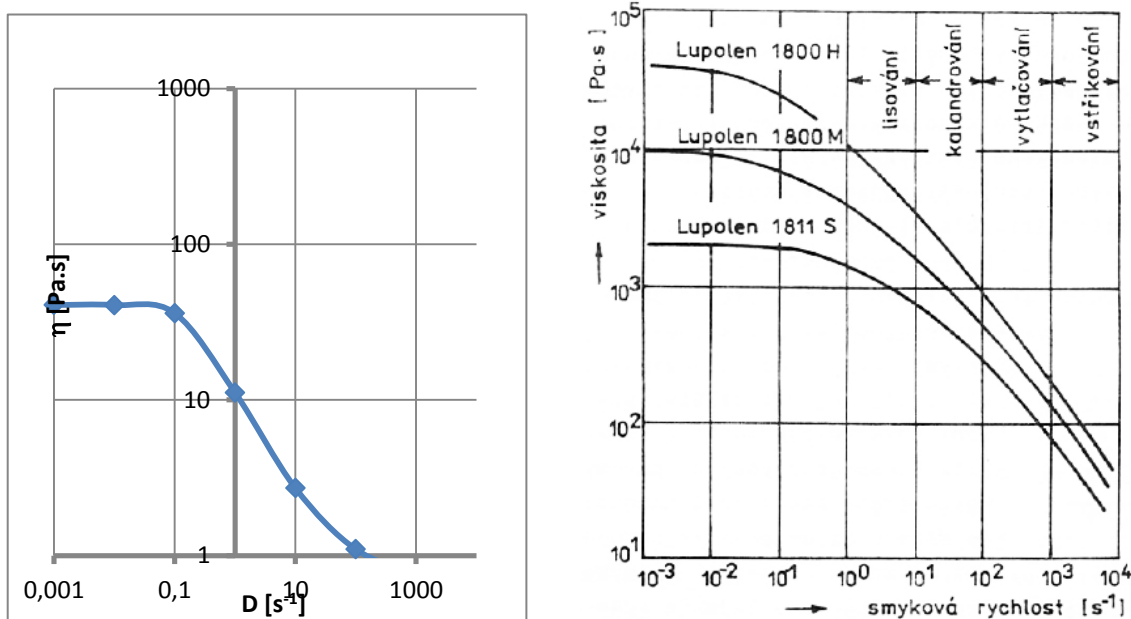
- rozměry, vzhled i vlastnosti modelu
- spotřebu materiálu vosku
- náročnost opracování na začištění modelu
- energetickou náročnost výroby.

Zásadní rozdíly v celkovém uspořádání vtokového systému jsou dány především konstrukcí formy a její násobností. U vícenásobných forem má tavenina dorazit ke všem ústím vtoku za stejného tlaku a stejný čas (vyvážené vtoky) [10].

Výroba matečné formy tvoří jednu z největších položek počátečních nákladů, proto je potřebné zajistit, aby umožňovala výrobu kvalitních voskových modelů. Kvalitu voskového modelu ovlivňuje nejen matečná forma (materiál, povrch formy, rozměrová přesnost), ale také temperace formy, nastavení vstřikovacích parametrů na vstřikolislu a samozřejmě optimální vtokový systém.

Jelikož v současné době neexistují žádné zásady či empirické vztahy pro návrh a výpočet vtokových systémů pro výrobu voskových modelů, bylo nutné shromáždit veškeré informace ohledně technologie vstřikování taveniny do dutiny formy.

Z reologického hlediska se jako optimální řešení jeví použití informací z technologie vstřikování plastů. Voskové směsi vykazují charakteristiky nenewtonovských kapalin, to znamená, že odpor tekutiny proti namáhání se mění, a to nejen se změnou teploty, ale i se změnou velikosti namáhání. Reologie a tokové křivky



Obr. 8.1: Porovnání závislosti viskozity na smykové rychlosti pro vosk Hyfill B 478 a termoplast PE-Lupolen [11]

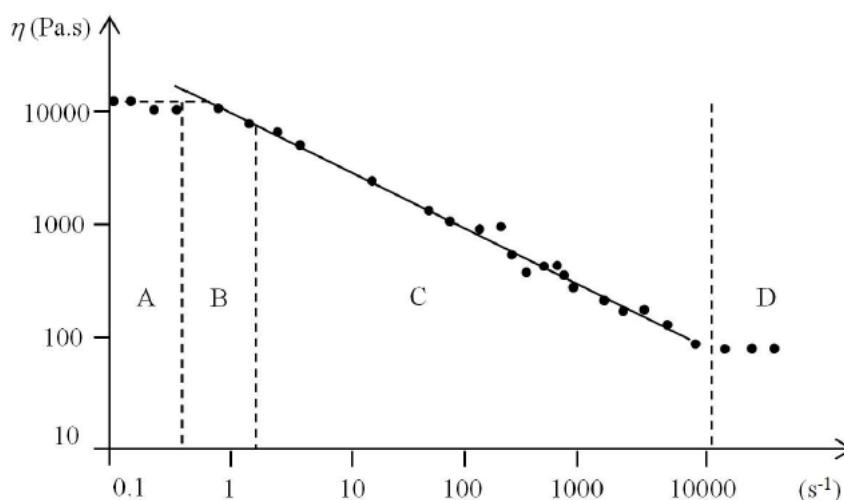
termoplastů a voskových směsí jsou si velice podobné (**obr. 8.1**) a oba materiály se chovají jako nenevtonské kapaliny, konkrétně jako pseudoplastické – viz kapitola 4.2.

Valná většina plastů určených ke vstřikování jsou z chemického hlediska polymerní látky, skládající se z jednoduchých uhlíkatých řetězců, tzv. *monomerů*. Stejně jako vosky, určené pro technologii přesného lití, se skládají z uhlíkatých řetězců.

Většina polymerních látek se během toku chová newtonsky jen při velmi nízkých rychlostech smykové deformace (**obr. 8.2** – oblast A). Při dalším zvyšování rychlosti smykové deformace přestává být na této proměnné viskozita nezávislá – buď klesá (typické chování pro polymerní taveniny) nebo stoupá, přičemž v tzv. přechodové oblasti (oblast B) se směrnice závislosti mění, ale postupně se ustaluje do konstantní hodnoty, která určuje stupeň nenevtonského chování (oblast C). Poslední oblast tokové křivky (oblast D) je tzv. druhé newtonské plateau, které je charakterizované opětovným ustálením viskozity nezávisle na stále se zvyšující rychlosti smykové deformace (oblast takto vysokých rychlostí smykových deformací je obtížně měřitelná) [12].

Technologie vstřikování plastů je poměrně dostatečně rozšířená a popsána. Existuje velké množství empiricky stanovených vzorců pro výpočet celé vtokové soustavy – vtokového kanálu, rozváděcích kanálů i zářezů (vtokových ústí).

V diplomové práci je využito těchto vztahů s cílem zkvalitnění procesu výroby voskového modelu, neboť jiná data či informace nejsou v současné době k dispozici. Následující kapitoly obsahují teoretické zásady řešení vtokových systémů pro výrobu plastových dílů technologií vstřikování taveniny do dutiny formy.



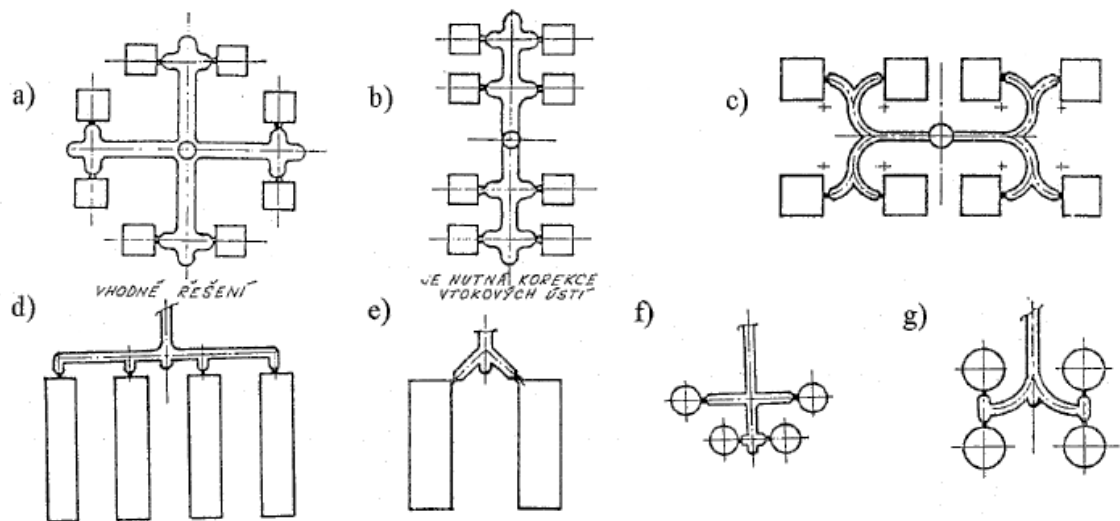
Obr. 8.2: Toková křivka polymerních látek [12]

8.1 Obecné zásady řešení vtokových systémů

Funkční řešení vtokového systému musí zabezpečit aby:

- dráha toku od vstřikovacího stroje do dutiny formy byla co nejkratší, bez zbytečných tlakových i časových ztrát
- dráha toku byla ke všem dutinám stejně dlouhá a tím se zajistilo rovnovážné plnění (**obr. 8.3**)

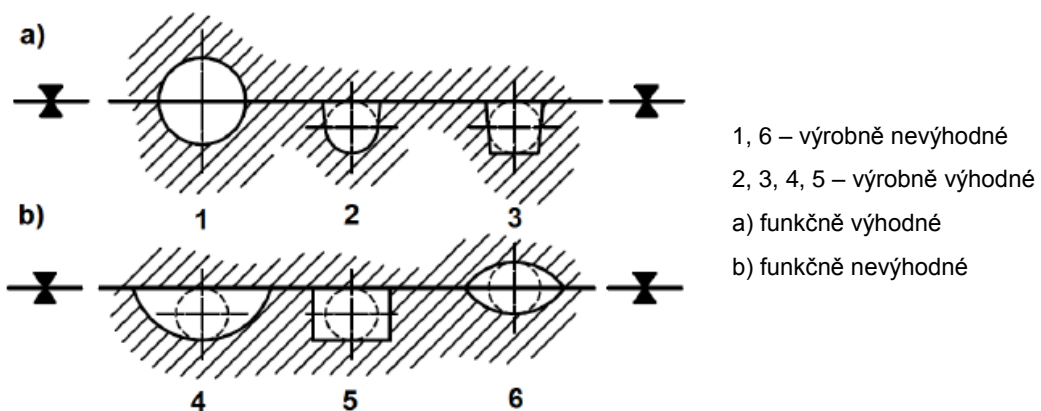
- průřez vtokových kanálů byl dostatečně velký, aby byla jistota, že po vyplnění tvářecí dutiny bude jádro taveniny ještě v plastickém stavu a tím se umožní působení dotlaku. Přitom však je třeba přihlížet ke spotřebě plasty. Vtokový kanál má mít při minimálním povrchu co největší průřez. Tím budou ztráty dosazováním minimální. Této podmínce odpovídá kruhový průřez. Z výrobních důvodů se volí i jemu podobný tvar lichoběžníkový (**obr. 8.4**)
- u vícenásobných forem je vhodné odstupňování průřezů kanálů, aby byla zachována stejná rychlost taveniny [10].



Stejně dlouhá délka vtokových kanálů ke všem dutinám formy:

- a, c, e, f, g – vhodné řešení
- b, d – nutná korekce vtokových ústí

Obr. 8.3: Obecné zásady pro volbu vtokového systému [10]



Obr. 8.4: Průřezy vtokových kanálů [10]

8.2 Volba rozměrů rozváděcích kanálů

Rozváděcí kanály spojují vtokový kanál s ústím vtoku a dutinou formy. Jejich délka je dána typem formy. Velikost jejich průřezů určuje řada činitelů, kteří se vzájemně ovlivňují. Volí se s ohledem na [10]:

- charakter výstřiku, především tloušťku stěn a předpokládanou dobu dotla-ku
- zohlednit tepelné a reologické vlastnosti taveniny, hlavně její viskozitu, te-elnou vodivost apod.
- stanovit parametry vstřikovacího stroje, vstřikovací tlak, vstřikovací rych-lost.

Stanovení jednotlivých parametrů, jejich hodnot a vzájemné spojitosti by bylo slo-žitě a vyžadovalo by to pracné výpočty. Proto se především používají empirické vztahy. Nejčastěji aplikovaným výpočtem je stanovení průměru vtokového kanálu, který ústí do rozváděcího. Průměr vtokového kanálu je dán vzorcem [10]:

$$D = d \cdot m_k \cdot p \cdot g \quad [\text{mm}] \quad (1.7)$$

d – základní průměr rozváděcího kanálu v závislosti na objemu výstřiku (dle **tab. 3**),

m_k – korekční faktor vlastnosti plastu (**tab. 4**),

p – korekční faktor délky rozváděcího kanálu (**tab. 5**),

g – korekční faktor obsahu plniva v plastu (**tab. 6**).

Všeobecně platí, že nejmenší průměr rozváděcího (i vtokového) kanálu D nemá přesáhnout 1,54 největší tloušťky stěny výstřiku H .

$$D \leq 1,54 \cdot H \quad [\text{mm}] \quad (1.8)$$

Volbu je však nutné upřesnit a přehodnotit podle vztahů [10]:

- je-li $D = 1,4 \cdot H$, není řešení vhodné pro štíhlé výstřiky s dlouhými rozvá-děcími kanály,
- je-li $D = H + 1,5$, je rozměr vhodný pro malé výstřiky, ale nevyhovuje pro tlustostěnné,
- řešení $D = \frac{4}{3} \cdot H + k$, kde pro $k = 2$ se udává pro tlustostěnné výstřiky s krátkými kanály. Pro $k = 4$ je způsob vhodný pro tenkostěnné výstřiky s dlouhými kanály.

Tab. 3: Základní průměr rozváděcího kanálu [10]

Průměr d [mm]	5,5	6	6,5	7	7,5	8
Objem dílce [cm³]	5	5–8	8–12	12–20	20–30	30–50
Průměr d [mm]	9	10	12	14	18	
Objem dílce [cm³]	60–80	80–120	120–250	250–500	800–1 200	

Tab. 4: Korekční faktor vlastností plastu [10]

Plast	PE, PS	PP, hPS, PA	ABS, PBT	PC, POM, mPVC	PMMA, tPVC, FEP
Korekce m_k	0,4–0,6	0,5–0,8	0,6–0,8	0,7–0,9	0,8–1,0

Tab. 5: Korekční faktor délky kanálu [10]

Délka kanálů [mm]	60	60–100	100–160	160–220	220–300	300–400
Korekce p	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5

Tab. 6: Korekční faktor plnění polymeru [10]

Plnění polymerů [%]	0	16	30
Korekce g	1,0	1,1	1,2

Co se týče průřezů rozváděcího kanálu, podle [10] se dává přednost kruhovému, popřípadě lichoběžníkovému, který zajistí nejmenší teplotní i tlakové ztráty. Aby byla splněna podmínka nejmenších teplotních a tlakových ztrát, je třeba zajistit, aby poměr mezi průřezem kanálu a obvodem kanálu byl co možná největší. Platí vzorec

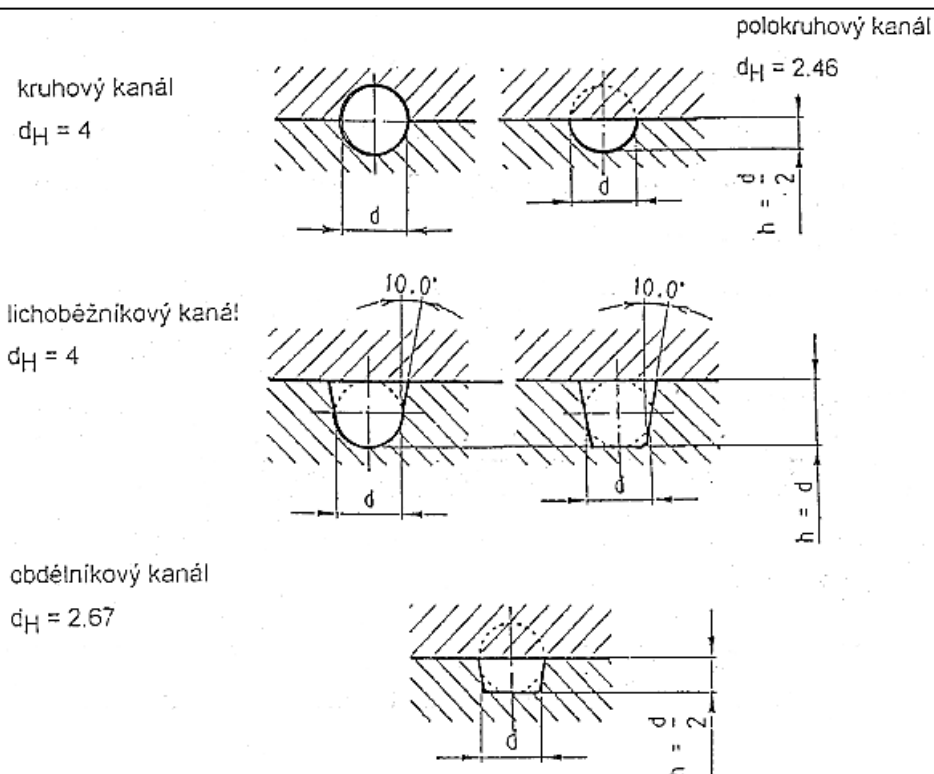
$$d_H = \frac{S}{O} = \max \quad [\text{mm}] \quad (1.9)$$

O – obvod průřezu kanálu [mm],

S – průřez kanálu [mm²],

d_H – smáčivý průměr.

Na **obr. 8.5** je příklad kanálu o průměru 4 mm s porovnáním různě provedených průřezů vtokových kanálů s ohledem na smáčivý průměr d_H . Ostatní tvary průřezů kanálů se odvozují od kruhového, přepočtem na smáčivý průměr. Čím vyšší je hodnota d_H , tím příznivější je průřez kanálu [10].



Obr. 8.5: Smáčivý průměr d_H pro kanál o $\varnothing 4$ mm [10]

8.3 Koncepce zářezů (vtokových ústí)

Vtokové ústí je v podstatě zúžení rozváděcího, popřípadě vtokového kanálu. Z důvodu potlačení některých vad u velkoobjemových a tlustostěnných dílů se může použít plný nezúžený vtok. Zúžením se zvýší klesající teplota taveniny před vstupem do dutiny formy, omezí se strhávání chladných vrstev z obvodu vtoku a tím i vytváření povrchových defektů [10].

Vtokové ústí se volí co nejmenšího průřezu v závislosti na charakteru výstřiku, vstřikovaném materiálu i technologii vstřikování (parametrech vstřikování). Malý průřez má příznivý vliv i na snadné začištění, avšak musí spolehlivě zajistit naplnění dutiny formy, případně působení dotlaku. Délka zúžení se volí co nejkratší. Délka l bývá

$$l = d + (0,5 \div 1,5) \quad [\text{mm}] \quad (1.10)$$

kde d je průměr vtoku. U průřezu vtokového ústí se doporučuje použít vztahu

$$d = n \cdot H \quad [\text{mm}] \quad (1.11)$$

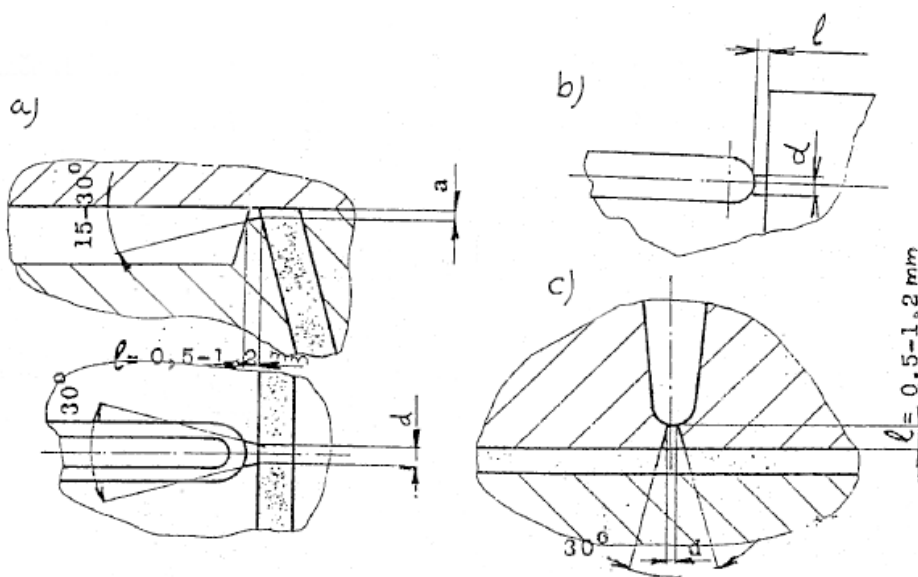
kde H je tloušťka stěny výstřiku v blízkosti vtoku a n nabývá hodnot od 0,3–0,6 (dle kapitoly 8.7) [10].

Tvar ústí vtoku bývá štěrbinový pro ploché výstřiky, nebo kruhový pro rotační a jiné díly (obr. 8.6). Šířka bývá užší, než je rozváděcí kanál. Tloušťka, nebo celý průřez se určí podle objemu výstřiku dle tab. 7. S ohledem na případné úpravy při zkouškách formy se doporučuje volit menší vtokové ústí [10].

Na vzhled a kvalitu výstřiku má rozhodující vliv vhodné umístění vtokového ústí. Na obr. 8.7 je přehled významných systémů vtokového ústí [10].

Tab. 7: Nejvhodnější rozměry vtokových kanálů a vtokových ústí [10]

Objem výstřiku [cm ³]	Délka kanálu [mm]	Průřez kanálu [mm ²]	Průřez ústí vtoku [mm ²]
do 2	do 20	4	0,3
	20–35	6	
	35–50	9	
	50–70	10	
2–5	do 20	6	0,3–0,6
	20–35	9	
	35–50	12	
	50–70	16	
5–10	do 20	9	0,6–1,0
	20–35	12	
	35–50	14	
	50–70	20	
10–30	do 20	16	1,0–2,0
	20–35	20	
	35–50	25	
	50–70	36	



a) štěrbinově zúžené, b) štěrbinové, c) bodové

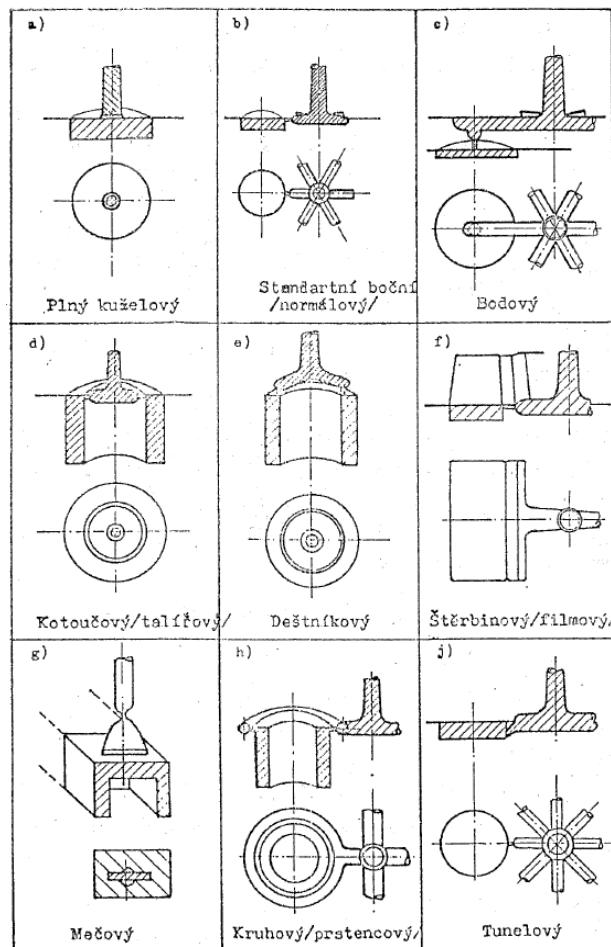
Obr. 8.6: Vtokové ústí [10]

Zásady umístění ústí [10]:

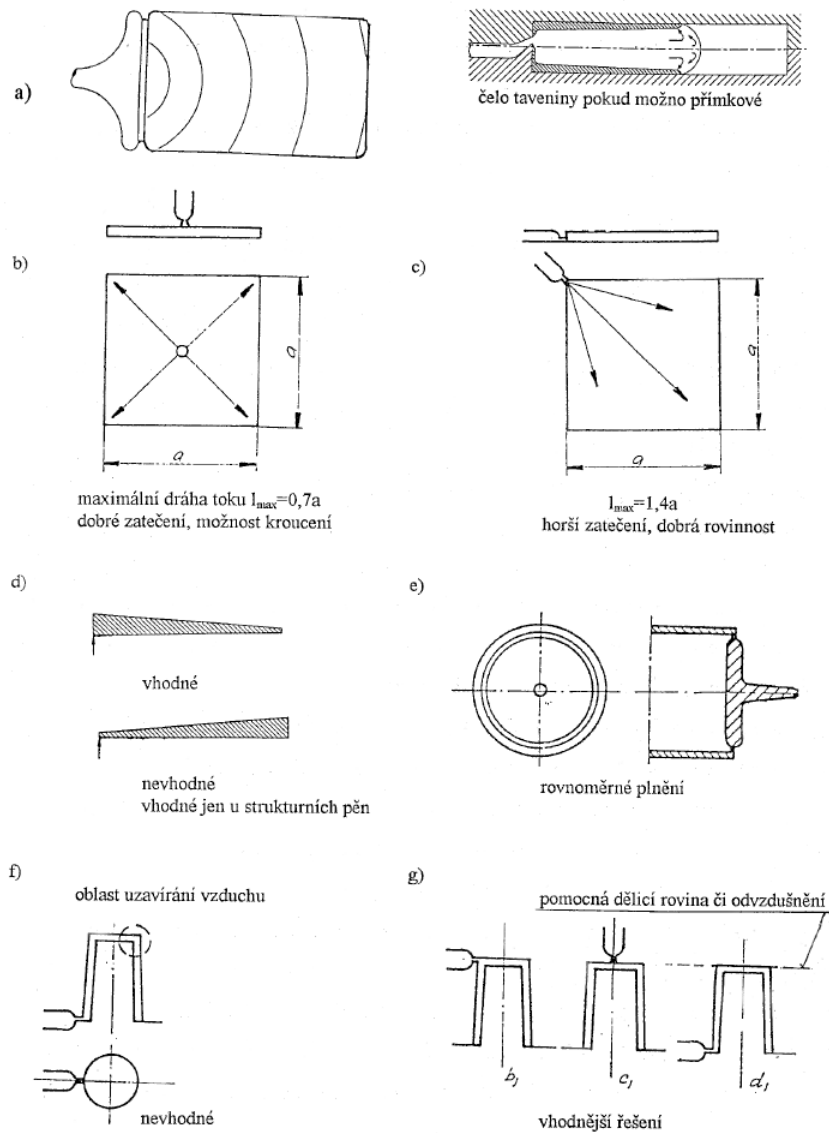
- přímkové čelo taveniny při plnění výstřiku z jedné strany (použití filmového vtoku nebo jiným provedením bočních případně tunelových vtoků – **obr. 8.8a**),
- v případě obdélníkového výstřiku umístit ústí do kratší strany (umístěním vtokového ústí do středu součásti dochází k nepravidelnému plnění, což způsobuje deformaci výstřiku – **obr. 8.8b**).

Vtokové ústí bývá umístěno [10]:

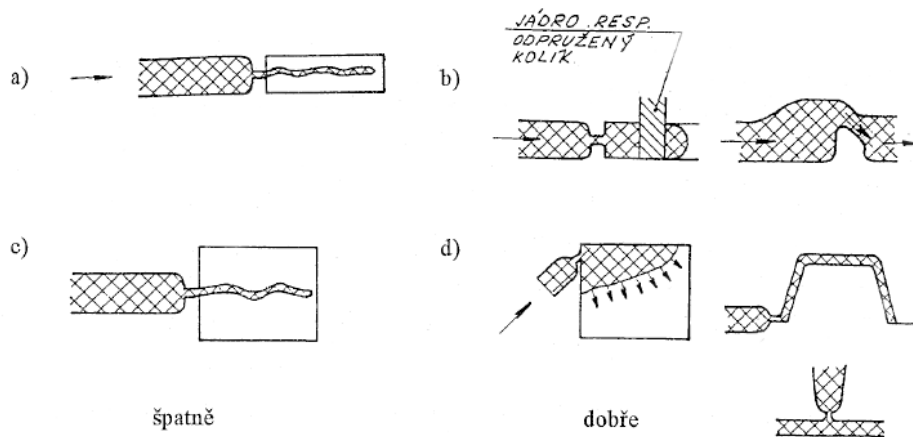
- do nejtlustšího místa výstřiku (**obr. 8.8d**); aby tavenina tuhla nejdříve na nejvzdálenějším místě od ústí, musí téci z místa většího průřezu do míst s menším průřezem,
- do geometrického středu dutiny (**obr. 8.8e**); rovnoměrné plnění všech míst výstřiku,
- mimo místa velkého namáhání nebo opticky činných ploch výstřiku,
- u výstřiku s otvory se umísťuje ústí do těchto otvorů, nebo v jejich blízkosti (u obdélníkových otvorů zajistit proudění ve směru delší strany),
- s ohledem na možnost úniku vzduchu z dutiny formy (**obr. 8.8g**),
- se zřetelem na případné nasměrování studených spojů mimo vzhledová a mechanicky namáhaná místa,
- s ohledem na zamezení vzniku volného toku taveniny a turbulentního plnění dutiny formy (**obr. 8.9a**); dopad čela taveniny po vstupu do dutiny formy na překážku nebo stěnu výstřiku (**obr. 8.9b**),
- aby odstraňování vtoku nebylo pracné a případná stopa po vtoku nesnižovala estetickou hodnotu.



Obr. 8.7: Základní typy zářezů (vtokových ústí) [10]



Obr. 8.8: Umístění vtokového ústí [10]

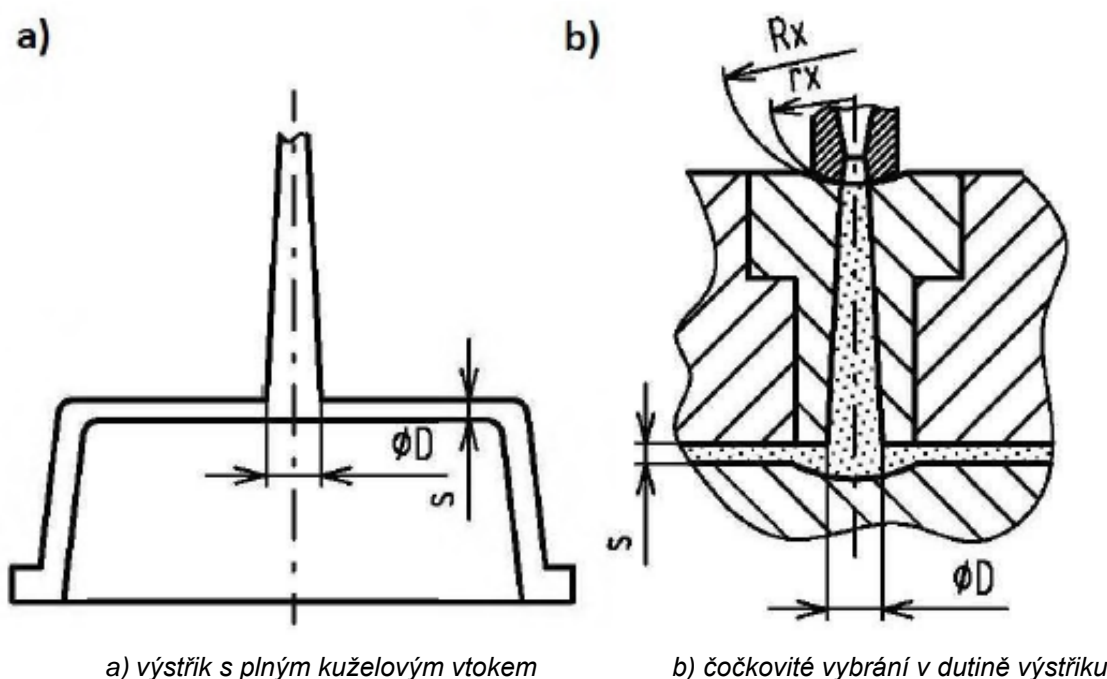


Obr. 8.9: Plnění dutiny formy; a, c – nevhodné, b, d – vhodné [10]

8.4 Plný kuželový vtok

Jedná se o vtok bez zúžení vtokového ústí (**obr. 8.10**). Používá se převážně u jednonásobných forem se symetricky uloženou dutinou. Vhodné aplikace jsou především tlustostěnné výstřiky, neboť je velmi účinný z hlediska dotlaku, protože vtok tuhne ve formě jako poslední [10].

Jelikož průřez vtoku je větší, musí se počítat s větší pracností při jeho odstranění. Průměr ústí vtoku má být o 1 až 1,5 mm větší než je tloušťka stěny výstřiku. Pro menší tloušťky stěn výstřiku je příhodné vytvořit proti ústí tzv. „čočkovité zahloubení“ (viz **obr. 8.10b**) [10].



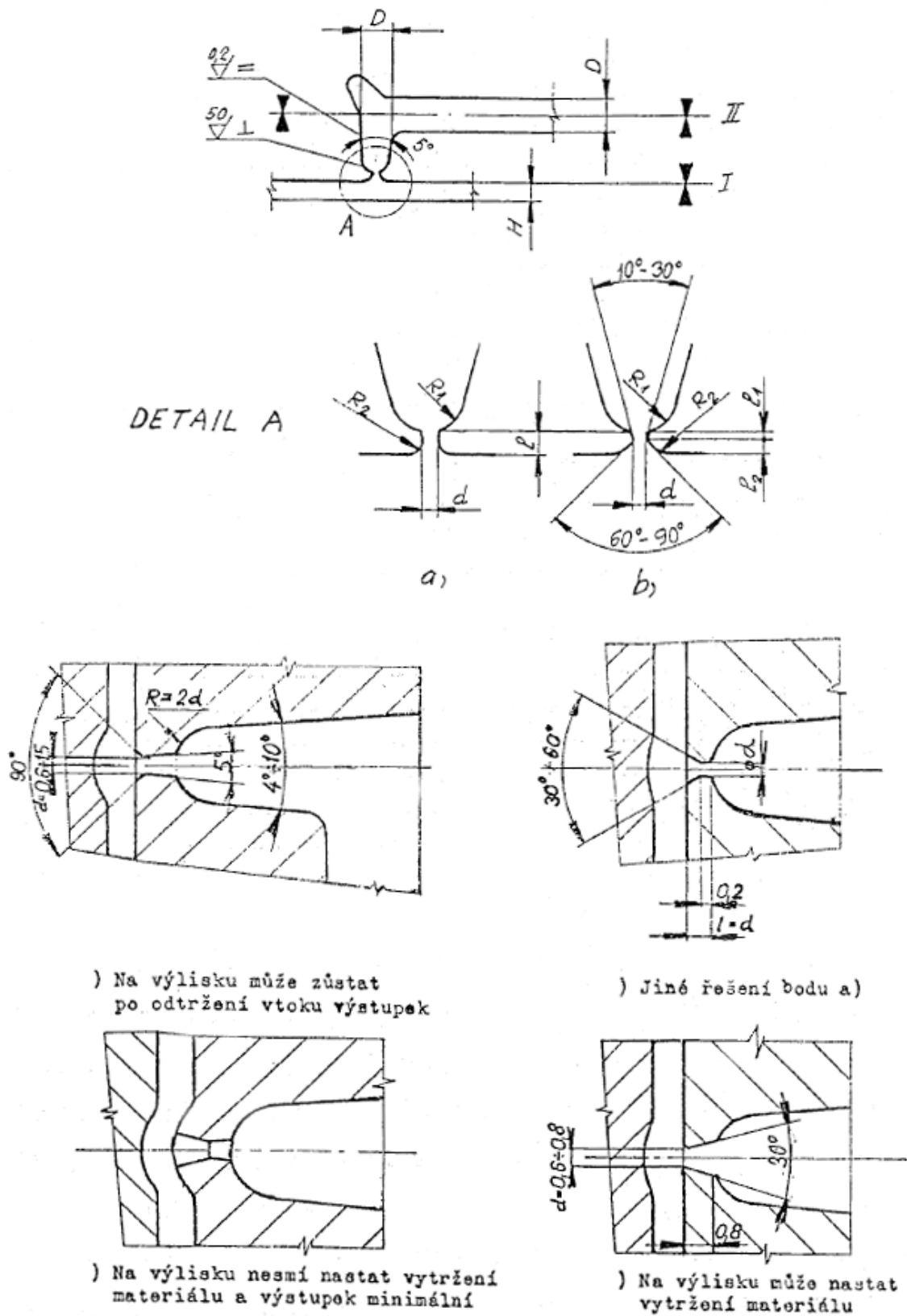
a) výstřik s plným kuželovým vtokem

b) čočkovité vybrání v dutině výstřiku

Obr. 8.10: Plný kuželový vtok [10]

8.5 Bodový vtok

Jde o nejznámější typ vtokového ústí zpravidla kruhového průřezu. Podle způsobu výroby může dojít k odtržení vtoku od výstřiku v jeho zúženém místě. Utrhne se podle způsobu provedení ústí. Nejrůznější způsoby jsou znázorněny na **obr. 8.11**. U tenkostěnných výstřiků se nejužší místo volí poněkud dále od výstřiku, než je tomu u výstřiků tlustostěnných, aby nedocházelo ke vzniku kráteru ve výstřiku – vytržení otvoru. Vzniku vytržení otvoru ve výstřiku se dá také zabránit vytvořením čočkovitého zahloubení proti ústí vtoku. Velikosti průřezů bodového ústí jsou v **tab. 8**, volí se v závislosti na objemu výstřiku. Pro vstřikované materiály o větší viskozitě, nižší teplotě vstřikování a výstřiky větších rozměrů, se použití bodového ústí nedoporučuje [10].



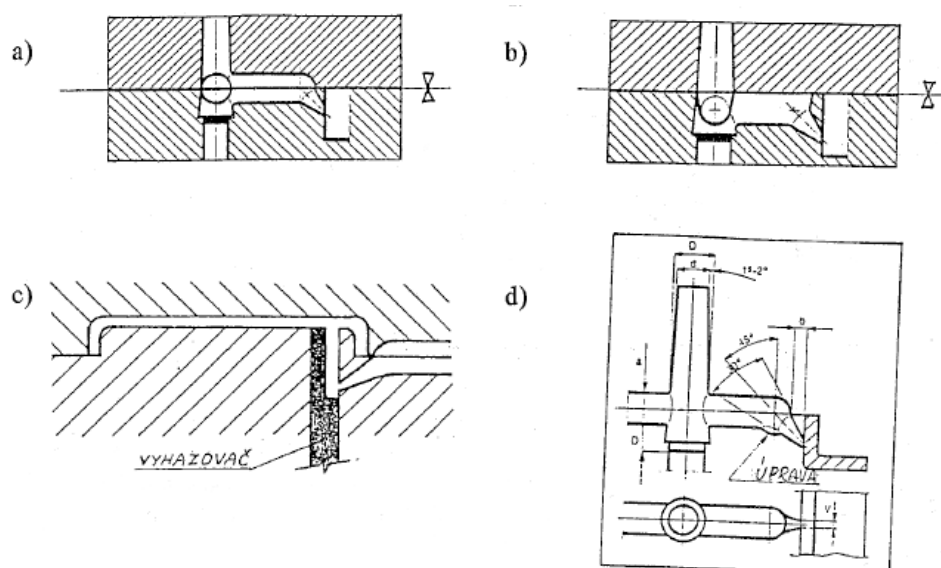
Obr. 8.11: Různé způsoby zakončení bodového vtokového ústí [10]

Tab. 8: Přibližné stanovení rozměrů základních typů vtoku (plného, bodového, bočního) v závislosti na objemu výstřiku [10]

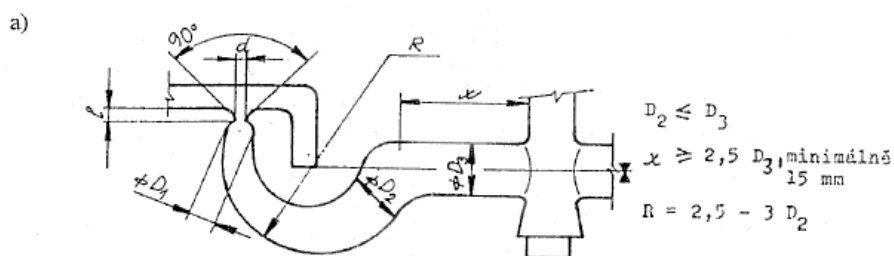
Objem výstřiku [cm ³]	Plný kuželový vtok, průměr základny [mm]	Bodový vtok, průměr vtokového ústí [mm]	Boční normálový vtok [mm]
do 10	2–3	0,6–0,8	2,0×1,0–3,0×2,0
10–20	3–4	0,8–1,2	2,5×1,5–3,5×2,5
20–40	4–5	1,0–1,8	3,0×2,0–3,5×2,5
40–60	4,5–5,5	1,2–2,0	3,0×2,0–4,0×3,0
60–100	5–6	1,3–2,2	3,5×2,5–4,5×3,5
100–300	5–7,5	1,6–2,6	4,5×3,5–5,0×4,0
300–500	5,5–8	1,8–2,8	–
500–1 000	5,5–9	–	–
1 000–2 000	6–10	–	–
2 000–5 000	10–14	–	–

8.6 Tunelový vtok

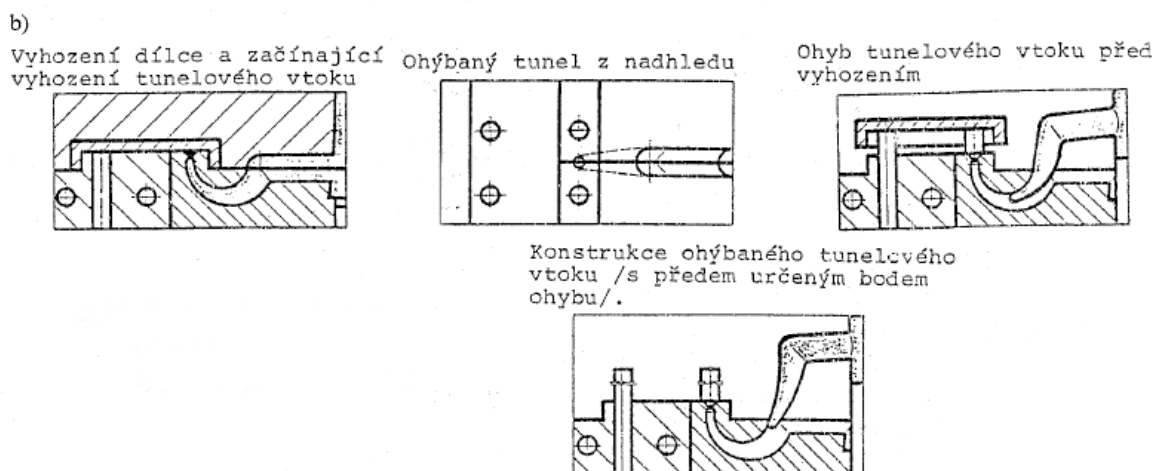
Tunelový vtok je zvláštním případem bodového vtoku, jehož funkce je zřejmá z **obr. 8.12**. Rozměry vtoku jsou shodné s hodnotami pro bodový vtok. Co se týče výroby, jde o způsob poměrně náročný. Vtokové ústí tohoto typu je vhodné pro výrobu tenkostěnných výstřiků bez viditelné stopy po vtoku na jeho vzhledové části. Zvláštním typem tunelového vtoku je srpkový vtok, jenž umožňuje umístit vtokové ústí do části výstřiku, kde nepůsobí rušivě. Typické provedení je znázorněno na **obr. 8.13** [10].



Obr. 8.12: Tunelový vtok [10]



Zmenšování průměru D_2 na D_1 odpovídá $3^\circ - 5^\circ$ úkosu v narovnaném stavu.



a) rozměry tunelového vtoku, b) funkce při vyhazování

Obr. 8.13: Srpkový tunelový vtok [10]

8.7 Boční vtok

Jedná se vtok se zúženým ústím obvykle obdélníkového průřezu, ale může být i kruhového či lichoběžníkového. Je nejrozšířenějším a nejpoužívanějším ústím – viz **obr. 8.14**. Bývá napojeno na rozváděcí kanál zúžením průtokového průřezu, čímž dochází ke zvýšení teploty taveniny. Není-li tomu tak, dochází k horšímu plnění dutiny formy, respektive se na výstřiku objeví povrchové vady. Pro výpočet základních rozměrů bočního vtokového ústí se používá vztahu

$$h = n \cdot H \quad [\text{mm}] \quad (1.12)$$

$$B \leq D - 1,5 \quad [\text{mm}] \quad (1.13)$$

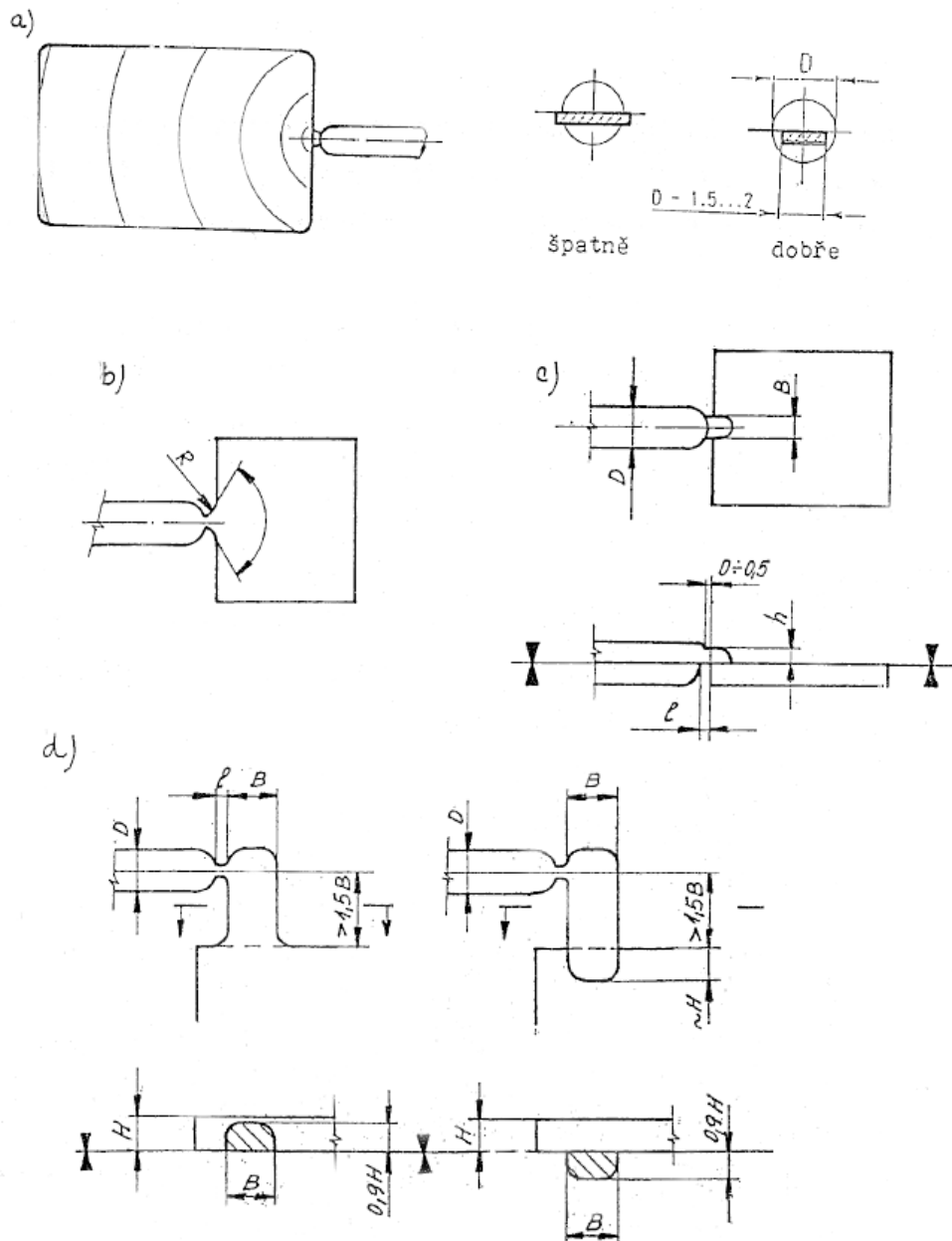
H – tloušťka stěny výstřiku [mm],

D – průměr rozváděcího kanálu [mm],

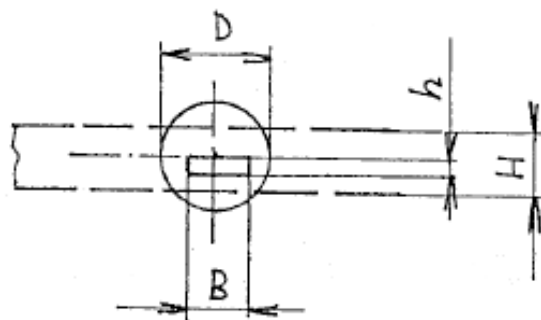
B – šířka vtokového ústí [mm],

n – se řídí dle poměru B/H a bývá 0,3 až 0,6 – nižší hodnota je pro větší poměr, minimální hodnota $h = 0,3$ mm.

Význam jednotlivých činitelů je patrný z **obr. 8.15**. Pro zlepšení a především zamezení volnému vstřikování taveniny do dutiny se ústí upraví do tvaru vějíře (**obr. 8.14b**) nebo se používá bočních vtoků s překrytím (**obr. 8.14c**) [10].



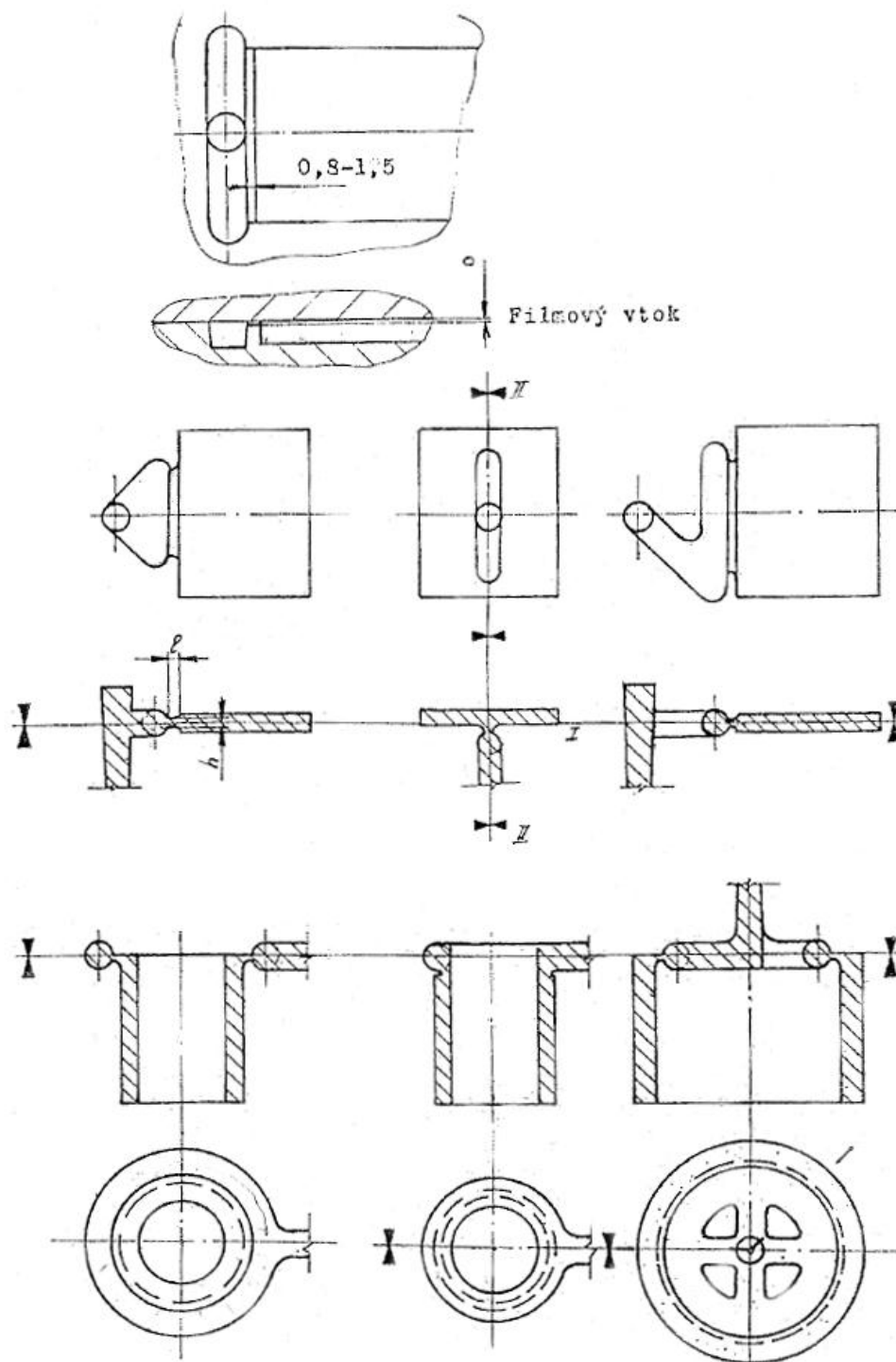
Obr. 8.14: Boční vtok [10]



Obr. 8.15: Rozměry bočního vtoku [10]

8.8 Filmový vtok

Jedná se o nejpoužívanější ústí ze skupiny bočních vtokových ústí. Používá se hlavně k plnění kruhových a trubicových dutin s vyššími požadavky na kvalitu a vzhled. Do této skupiny se ještě řadí diskové, prstencové, deštníkové a další vtoky, které jsou zobrazeny na **obr. 8.16** [10].



Obr. 8.16: Nejrůznější uspořádání filmového vtoku [10]

Filmový vtok zajišťuje [10]:

- dodržení rovinnosti, přímosti, přesnosti tvaru výstřiku,
- malé vnitřní pnutí,
- odstranění studených spojů,
- vyvážení tlaku působícího na jádra,
- zmenšení rychlosti taveniny vstupující do dutiny formy,
- zmenšení odporu vtokového systému.

Rozměry vtokového ústí (tloušťka a délka) a tvar se volí podle stejných zásad jako u bočního ústí. V důsledku problematictějšího odstranění vtokového ústí se volí co možná nejmenší tloušťka. Minimální hodnota bývá 0,3 až 0,5 mm [10].

8.9 Plnění dutiny formy více vtoky

Dutinu formy je vhodné plnit taveninou jedním vtokem. Je-li však forma členitá, nebo neumožňuje-li to jiný důvod, použije se vícenásobných vtoků. Před aplikováním je účelné udělat rozbor vlivu více vtoků na uzavírání vzduchu a vzniku studených spojů. Příklady použití vícenásobných vtoků jsou na **obr. 8.17** [10].

U vícenásobné formy, či použití vícenásobných vtoků, je možné empirické stanovení vtokového a rozváděcích kanálů určených z jejich průřezů (**obr. 8.18**) dle vzorce

$$F_H = F_r \cdot K \quad [\text{mm}] \quad (1.14)$$

F_H – průřez vtokového kanálu [mm],

F_r – průřez rozváděcího kanálu [mm],

K – korekční součinitel (z **tab. 9**) [10].

Nejdříve se stanoví průřez rozváděcího kanálu F_r a tím i průměr D z hmotnosti jednoho výstřiku dle **tab. 10**. Při vstřikování s vtokovým zbytkem se hmotnost výstřiku zvýší podle vzorce

$$m = m_1 \cdot (1 + K_1) \quad [\text{g}] \quad (1.15)$$

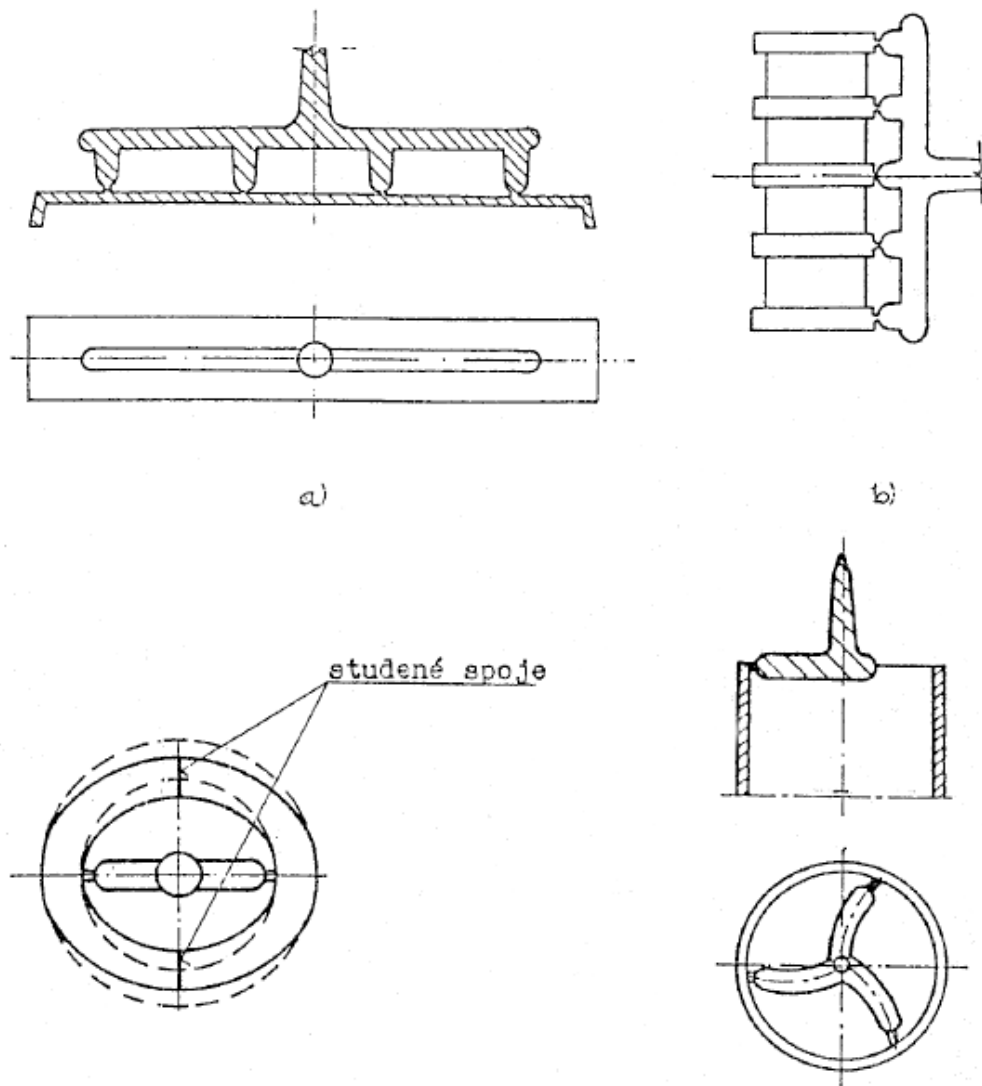
m – celková hmotnost výstřiku [g],

m_1 – hmotnost výstřiku bez vtokového zbytku [g],

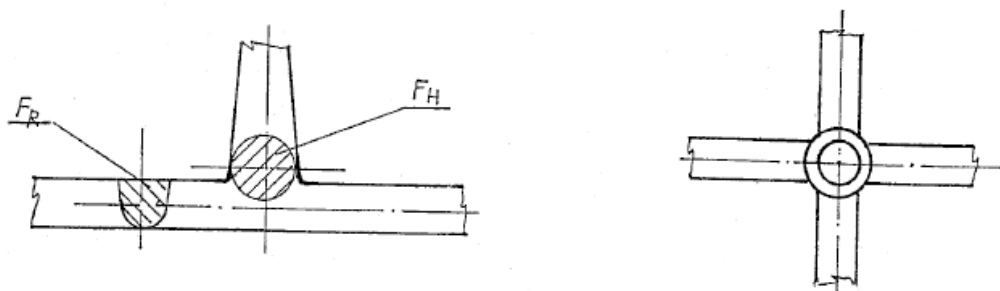
K_1 – korekční součinitel dle **tab. 11**.

Stanovený průřez F_r i průměr D se upraví dle **tab. 12** s ohledem na délku rozváděcího kanálu. Průřez vtokového kanálu F_H se vypočítá vynásobením průřezu rozváděcího kanálu F_r součinitelem K s ohledem na násobnost formy dle **tab. 9**. Pro výstřiky menší velikosti se doporučuje volba rozváděcích kanálů a jejich ústí podle **tab. 7** [10].

Různá uspořádání vícenásobných forem jsou na **obr. 8.19**. V **tab. 13** je uveden základní přehled zářezů (vtokových ústí) včetně jejich aplikace, výhod a nevýhod.



Obr. 8.17: Příklady použití vícenásobných vtoků [10]



Obr. 8.18 Rozváděcí a vtokový kanál u vícenásobné formy [10]

Tab. 9: Korekční součinitel násobnosti formy [10]

<i>n</i>	<i>K</i>
2	1,0
4	0,8
6	0,6
8	0,4
>8	0,2

Tab. 10: Stanovení průřezu F_r a průměru D rozváděcího kanálu [10]

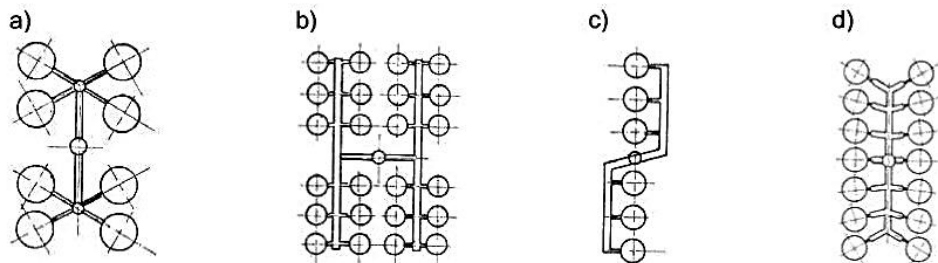
Hmotnost výstříku [g]		<i>D</i>	F_r
přes	do		
	10	2,5	4,91
10	16	3,0	7,07
16	25	3,5	9,62
25	40	4,0	12,56
40	63	4,5	15,91
63	100	5,0	18,63
100	160	5,5	23,76
160	250	6,0	28,27
250	400	6,5	33,18
400	630	7,0	38,48
630	1 000	7,5	44,18
1 000	2 500	8,5	56,74
2 500	4 000	9,0	63,62

Tab. 11: Korekční součinitel K_1 [10]

hmotnost jednoho výstříku [g]	-	0,5	1	3	5	10	20	50	100	300	600
	0,5	1	3	5	10	20	50	100	300	600	1 000
K_1	0,6	0,5	0,4	0,3	0,25	0,15	0,05	0,03	0,02	0,01	0,01
	3	0,07	0,05	0,04	0,03	0,025	0,10	0,06	0,04	0,03	0,02

Tab. 12: Vliv délky rozváděcího kanálu L na jeho průměr D [10]

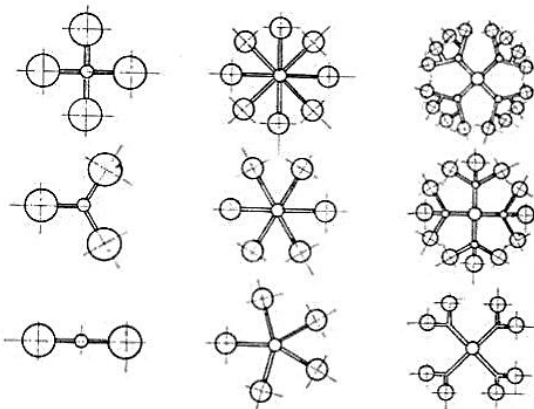
Délka rozváděcího kanálu L		Základní rozměr D							
		3	4	5	6	7	8	9	10
přes	do								
	16	3	4	5	6	7	8	9	10
16	40	4	5	6	7	8	9	10	11
40	100	5	6	7	8	9	10	11	12
100	250	6	7	8	9	10	11	12	13



ŘADOVÉ USPOŘÁDÁNÍ VTOKOVÉ SOUSTAVY VÍCENÁSOBNÝCH FOREM

a) se stejnou délkou toku taveniny

b), c), d) s nestejnou délkou toku taveniny (nevhodné bez korekce ústí vtoku)



SYMETRICKÉ USPOŘÁDÁNÍ VTOKOVÉ SOUSTAVY VÍCENÁSOBNÝCH FOREM

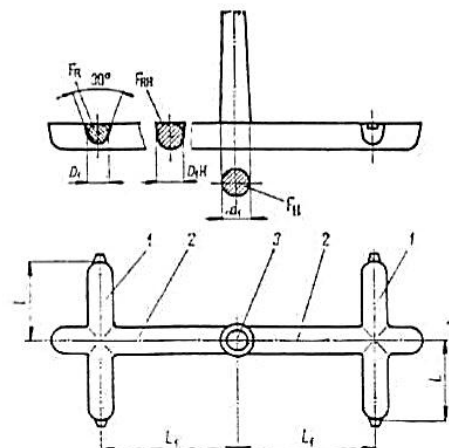
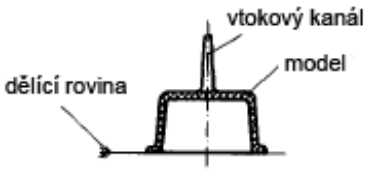
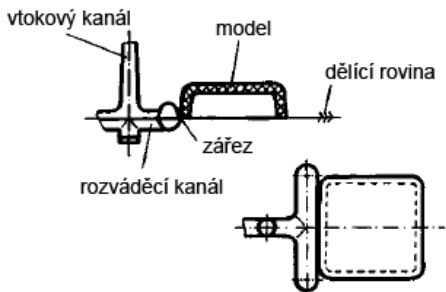
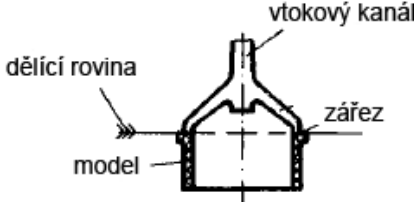
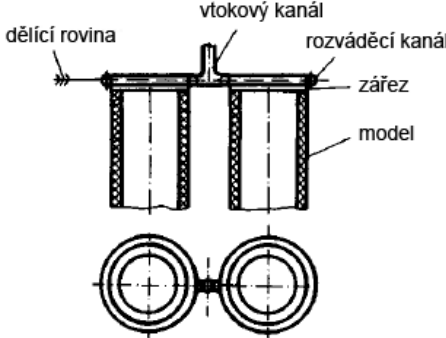
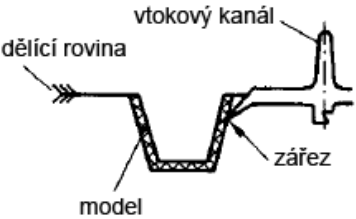
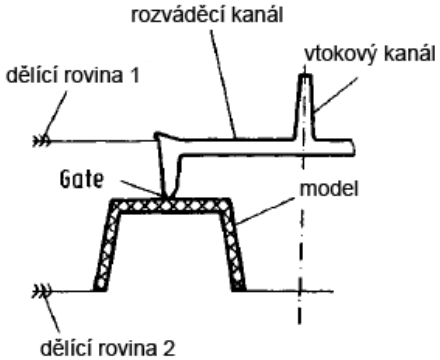
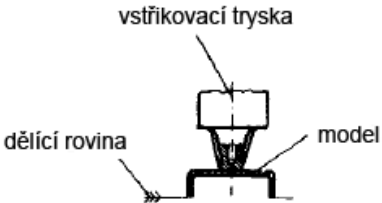


SCHÉMA SOUSTAVY ROZVÁDĚCÍCH KANÁLŮ
1- vedlejší, 2- hlavní,
3- vtokový kužel

Obr. 8.19: Různá uspořádání vtokové soustavy vícenásobných forem [13]

Tab. 13: Přehled různých typů zářezů (vtokových ústí), jejich aplikace, výhody a nevýhody [14]

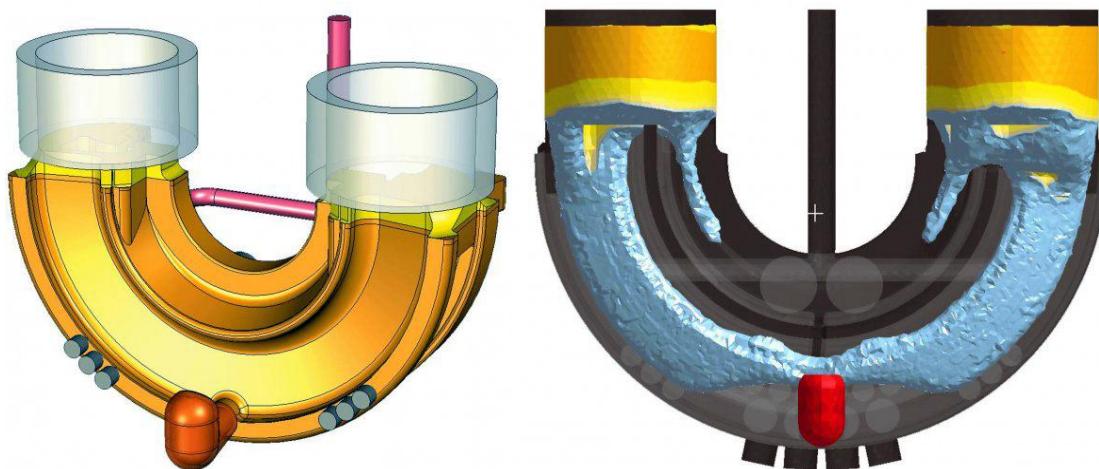
Typ zářezu (vtokového ústí)	Schéma	Charakteristika
Kuželový		<p><i>Aplikace:</i> pro teplotně citlivé a vysoce viskózní materiály, vysoce kvalitní modely a pro tlustostěnné modely</p> <p><i>Výhody:</i> vysoká kvalita a přesnost rozměrů modelu</p> <p><i>Nevýhody:</i> pracnost při odstranění vtoku, stopa po vtokovém kanálu</p>
Filmový (štěrbínový, boční)		<p><i>Aplikace:</i> pro rozlehlé modely s velkou plochou jako jsou pásy a desky</p> <p><i>Výhody:</i> vysoká kvalita povrchu, přesnost rozměrů, žádné studené spoje</p> <p><i>Nevýhody:</i> pracnost při odstranění vtoku</p>
Deštníkový (kotoučový, diskový)		<p><i>Aplikace:</i> pro osově symetrické modely a pro modely s jádrem uchyceným na jedné straně</p> <p><i>Výhody:</i> žádné studené spoje, bez snížení pevnosti modelu</p> <p><i>Nevýhody:</i> pracnost při odstranění vtoku</p>
Prstencový (kruhový)		<p><i>Aplikace:</i> pro modely trubkovitého tvaru a pro modely s jádrem uchyceným na obou stranách</p> <p><i>Výhody:</i> stejná tloušťka stěny po celém obvodu</p> <p><i>Nevýhody:</i> možnost vzniku studených spojů, pracnost při odstranění vtoku</p>

<p><i>Tunelový</i></p>		<p><i>Aplikace:</i> primárně pro menší modely a pro malé modely ve vícenásobné formě</p> <p><i>Výhody:</i> samovolné odstranění vtoků</p> <p><i>Nevýhody:</i> pouze pro malé a jednoduché modely kvůli vysokému poklesu tlaku</p>
<p><i>Bodový</i></p>		<p><i>Aplikace:</i> pro vícenásobné formy a středově centrováný vtok</p> <p><i>Výhody:</i> samovolné odstranění vtoků</p> <p><i>Nevýhody:</i> větší množství neshodných kusů, vysoká cena formy (trojdílná forma)</p>
<p><i>Bez vtokového systému</i></p>		<p><i>Aplikace:</i> pro tenkostěnné modely a pro výrobu modelů v rychlém cyklu (taktu)</p> <p><i>Výhody:</i> úspora voskové směsi za vtokový systém</p> <p><i>Nevýhody:</i> stopa po vstříkovací trysce</p>

9 SIMULACE SLÉVÁRENSKÝCH PROCESŮ

9.1 Simulace ve slévárenství

Počítačová simulace slévárenských technologických a metalurgických procesů v posledních dvaceti letech velmi pozitivně ovlivnila rozvoj slévárenství. Možnost předcházet technologickým vadám se projevila na výsledné kvalitě odlitků [15]. Numerická simulace se již stala uznávaným pomocníkem při analýzách a optimalizacích slévárenské výroby. V rukou technologa se simulační software může stát mocným nástrojem, který mu umožní optimalizovat procesy (**obr. 9.1**), zvýšit využití kovu, snížit procento neshodných výrobků a tím zefektivnit výrobu [16].



Obr. 9.1: CAD návrh technologie a její numerická simulace pomocí programu ProCAST [16]

Obecně lze počítačovou simulaci označit jako vysoce účinný nástroj optimalizace procesů a dějů s využitím vysoce výkonných počítačů. V 60. letech se při řešení některých úloh nestacionárního sdílení tepla a hmoty začaly uplatňovat analogové počítače. V 80. letech se objevily první slévárenské simulační softwary zaměřené na tuhnutí odlitků. Dnes nacházíme na evropském trhu celou řadu slévárenských komplexních simulačních programů, které dávají uživateli možnosti řešení různých úloh, stále se inovují a doplňují [15]. Avšak dobrá simulace je také podmíněna správnou definicí počátečních a okrajových podmínek a zároveň přesnou znalostí termo-fyzikálních dat použitých materiálů. Bez jakýchkoli pochyb platí, že pouze přesná data vedou ke korektnímu výsledku [16].

9.2 Metody řešení

Podstata numerických simulací spočívá v diskretizaci proměnných a opakování jednoduchých algebraických operací určitého typu. Předností těchto metod tkví v tom, že umožňují získat řešení v konečném počtu diskretních míst (tzv. uzlů či nodů) zvolené diferenciální sítě nebo sítě konečných prvků, a to buď v celé oblasti, nebo její povrchové části. Mezi numerické metody se řadí především metoda konečných prvků a metoda konečných diferencí [15].

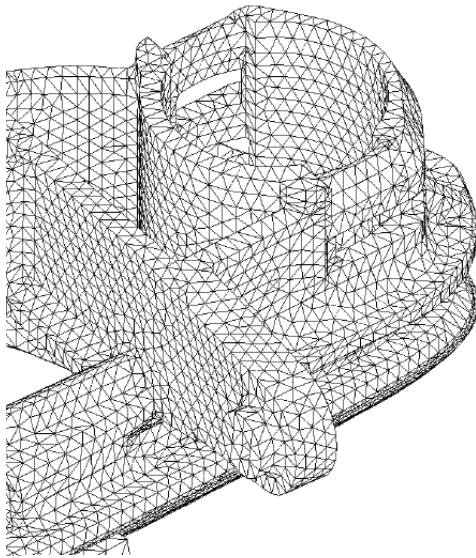
9.2.1 Metoda konečných prvků (MKP)

Metoda konečných prvků MKP (Finite Element Method – FEM) je založena na rozdělení dané oblasti na konečný počet jednodušších prvků (elementů) – konečných prvků – (viz **obr. 9.2**), o nichž předpokládáme, že jsou navzájem spojeny v konečném počtu uzlových bodů na hranicích těchto prvků [15].

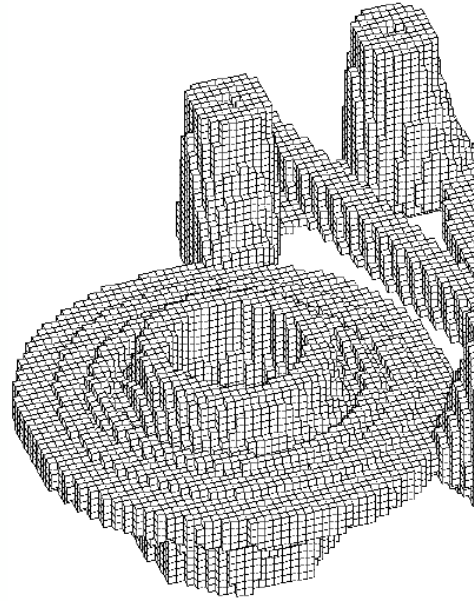
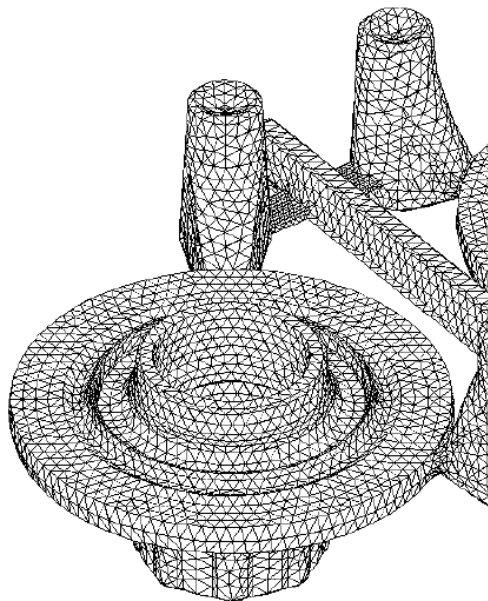
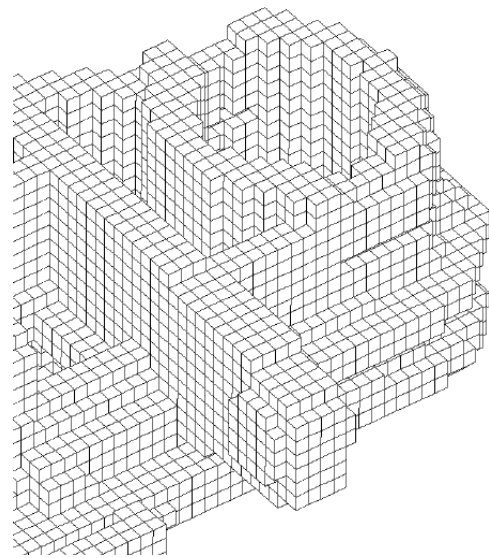
9.2.2 Metoda konečných diferencí (MKD)

Metoda konečných diferencí MKD (Finite Differences Method – FDM) je založena na aproximaci základní diferenciální rovnice s příslušnými okrajovými podmínkami odpovídající diferenciální rovnice, jež má tvar algebraických rovnic. Dokonalost aproximace spočívá v nahrazování derivace přesnějšími výrazy. Náhrada se provádí v diskretních místech tvořených uzly sítě, které zahrnují zkoumanou oblast – **obr. 9.2** [15].

MKP (FEM)



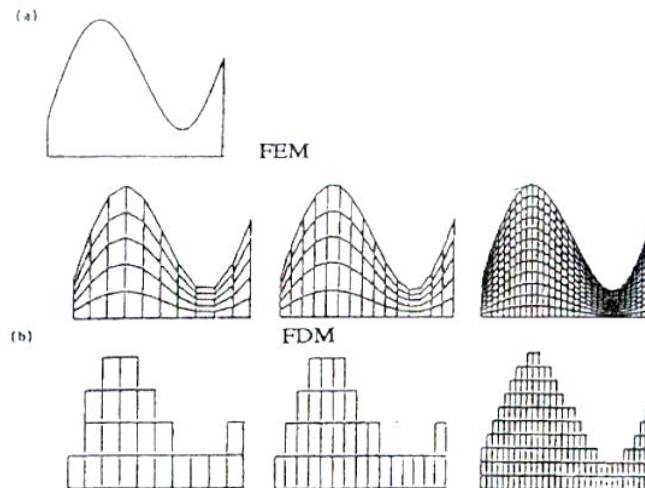
MKD (FDM)



Obr. 9.2: Metoda konečných prvků (vlevo) a metoda konečných diferencí (vpravo) [17]

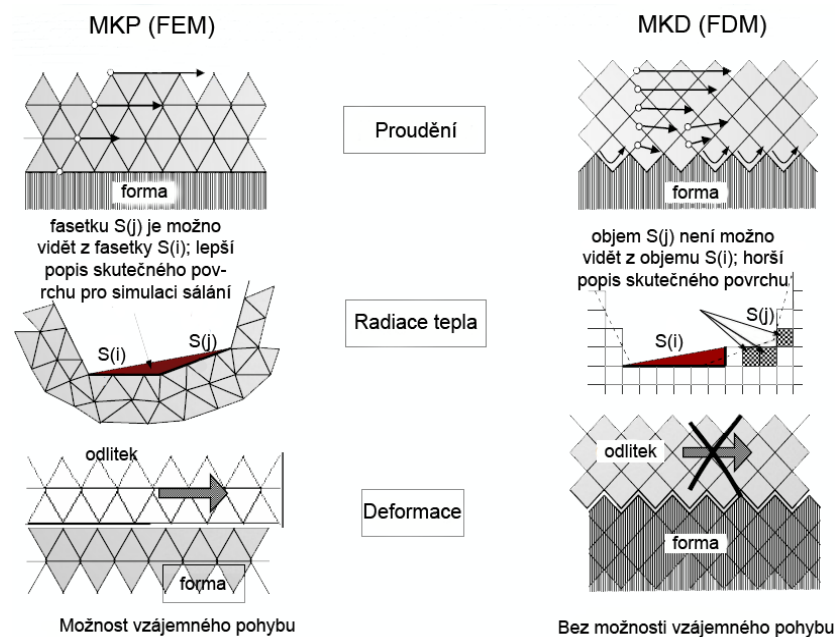
9.2.3 MKP versus MKD

I když obě metody (MKP a MKD) jsou založeny na jisté diskretizaci, má MKP ve srovnání s MKD určité výhody. Dovoluje lepší geometrický popis a vystižení okrajových podmínek při složitých tvarech integrační oblasti (**obr. 9.3**). Využívá místně zjemněné diskretizace ve významných částech řešené oblasti bez zvláštních úprav výpočtového programu. Umožňuje jednodušší použití vyšších typů aproximace hledané funkce s cílem zvýšení přesnosti řešení a lepšího popisu geometrie, komplexních tvarů a tenkých sekcí modelu [15, 17].



Obr. 9.3: Schéma dělení plochy při použití metod MKP (FEM) a MKD (FDM) [18]

Další výhody metody konečných prvků jsou patrné z **obr. 9.4**. Patří mezi ně lepší proudění, výpočty deformace, menší počet uzlových bodů (nodů), z čehož vyplývá kratší čas simulace, menší nároky na paměť počítače a místa na disku a rychlejší pre-processing a post-processing [17, 19].



Obr. 9.4: Srovnání metod MKP (FEM) a MKD (FDM) [17]

9.3 Simulační software ProCAST

V diplomové práci bude používán simulační software ProCAST (verze 2009.1) od společnosti ESI Group. Společnost ESI patří mezi světové špičky v oblasti numerické simulace prototypů a výrobních procesů pro průmysl.

ESI vyvinula rozsáhlou sadu koherentních, průmyslově orientovaných aplikací k reálnému simulování chování produktů během testování, s cílem upřesnit výrobní proces pro požadovaný produkt a zvýšení jeho produktivity [20].

Simulační software od společnosti ESI je používán v celé řadě oblastí, jako jsou letectví, kosmonautika, doprava, stavitelství, vzdělávání, energetika, elektronika, strojírenství, armáda a medicína [20].

Pro slévárenský průmysl ESI vyvinula sadu aplikací s cílem zlepšení výrobního procesu, eliminovat případné další náklady spojené s výrobou a úpravou technologie a v neposlední řadě dosáhnout časové úspory [20].

Jednou z aplikací je software ProCAST, který je založen na metodě konečných prvků, je schopen simulovat přestup tepla včetně radiace, proudění tekutého kovu, plnění formy, tuhnutí a chladnutí odlitků. Speciální moduly umožňují predikovat mikrostrukturu, porozitu, zbytková pnutí, deformace, technologie jako vysokotlaké a nízkotlaké lití, odstředivé lití, metody vypařitelného a vytavitelného modelu, sklopné lití, kontinuální lití a speciální metody jakými jsou „thixo-casting“ a „semi-solid casting“ [21].

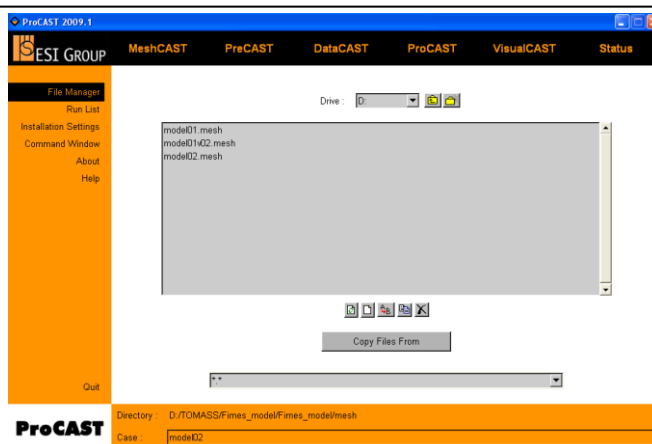
9.3.1 Struktura programu ProCAST

Tento software je organizován kolem tzv. „*Manažeru*“ (Manager), který sjednocuje jednotlivé moduly ProCASTu (**obr. 9.5**) [21]:

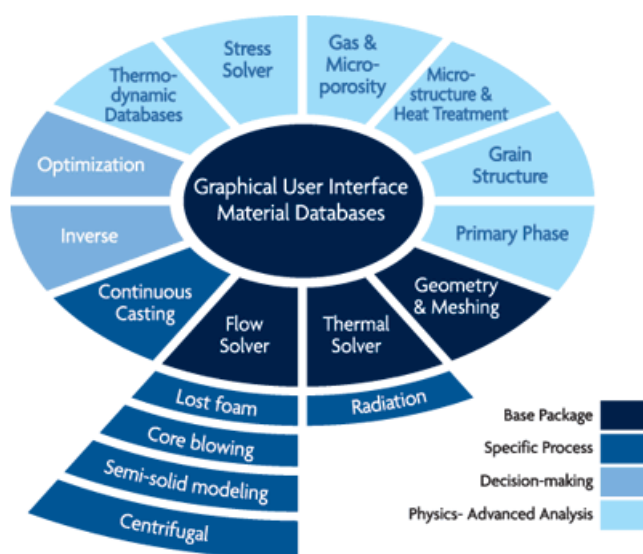
- MeshCAST (úprava a tvorba povrchové sítě – mesh generator)
- PreCAST (pre-procesor spojený s jednotlivými databázemi)
- DataCAST/ProCAST (solvery – solvers)
- VisualCAST (post-procesor – zobrazování výsledků)

Modularitu se setkáváme i v rozdělení solverů (**obr. 9.6**) [21]:

- Thermal module (tepelný modul)
- Radiation module (modul radiace)
- Fluid Flow module (modul proudění)
- Stress module (modul napětí)
- Microstructure (modul mikrostruktury)



Obr. 9.5: Manager ProCASTu



Obr. 9.6: Modularita ProCASTu [20]

9.3.2 Postup tvorby simulací

Postup tvorby simulací lze rozdělit tří částí:

1. Pre-processing – obnáší tvorbu a úpravu geometrického, nejčastěji v nejrůznějších CAD programech, a export geometrie do datového formátu, se kterým dále pracuje ProCAST (.iges, .stl, .step,...).

Po úpravě geometrie a tvorbě povrchové a objemové sítě (mesh) následuje zadávání parametrů (materiálové charakteristiky, teplotní hodnoty, parametry pro danou technologii,...).

Pre-processing ProCASTu zahrnuje aplikace MeshCAST a PreCAST.

2. Processing (Main-processing) – vlastní simulační výpočet (DataCAST a ProCAST).
3. Post-processing – zobrazení výsledků simulace, analýza a export dat. V ProCASTu se provádí v aplikaci VisualCAST.

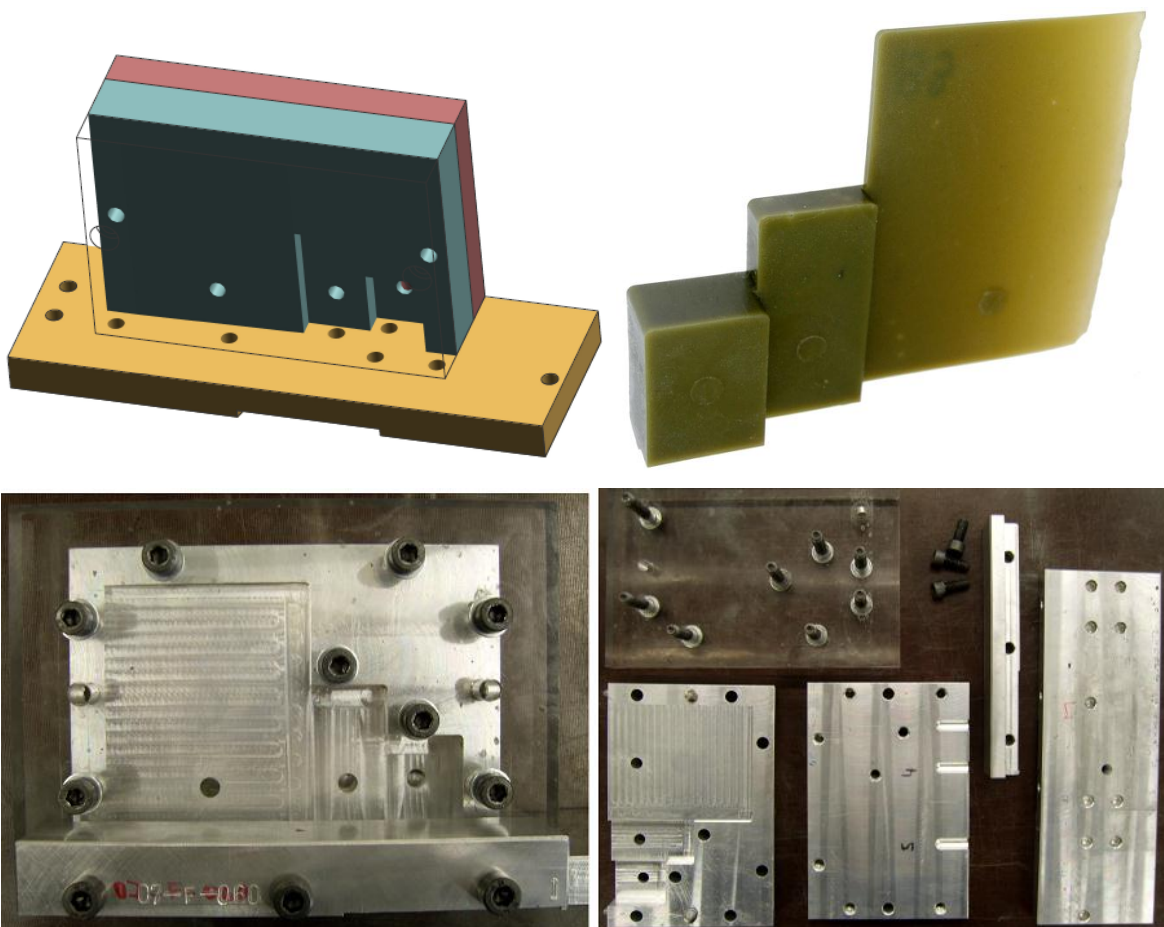
10 SIMULACE VSTŘIKOVÁNÍ VOSKOVÉ SMĚSI

ProCAST teoreticky umožňuje vytvoření simulace vstřikování voskové směsi, je ovšem třeba vytvořit termo-fyzikální databázi vstřikovaného materiálu, ověřit nastavení počátečních a okrajových podmínek simulace a ve finální fázi provést validaci na jednoduchém testovacím tvaru v porovnání se skutečností.

Význam jednotlivých parametrů pro simulaci vstřikování vosku byl nejprve zkoumán a optimalizován v rámci projektu „Numerické modelování pohybu viskoplastických směsí při výrobě modelů“ (zahájení: 01. 01. 2010, ukončení: 31. 12. 2010).

10.1 Testovací forma

Jako testovací forma byla použita odstupňovaná forma s klínovou částí. Geometrie a samotná forma jsou na **obr. 10.1**. Skládá se ze čtyř částí, přední část je tvořena silným plexisklem, které umožňuje zaznamenávat průběh plnění dutiny formy. Vrchní část formy lze přesouvat po základové desce, což umožňuje volit jeden z pěti možných vstřikovacích otvorů. Tvar dutiny ($140 \times 100 \times 20$ mm) je tvořen třemi jednoduchými geometrickými tělesy s různými rozměry.



Obr. 10.1: CAD návrh geometrie formy (vlevo nahoře), voskový model (vpravo nahoře) a čelní pohled na formu a její jednotlivé komponenty (dole)

Vstřikování probíhalo ve slévárně Fimes na vstřikolisu *SHELL-O-MATIC 35T-20/18* s uzavírací silou 35 t. Provozní parametry pro první experimenty byly zvoleny následovně: tlak vstřikování 150 psi, průtok vosku 12 l/min, čas cyklu vstřikování 20 s, teplota voskové směsi 64 °C, teplota matečné formy 24 °C. Bylo testováno všech pět vstřikovacích otvorů a průběh byl zaznamenán digitální kamerou. Z videa byly nastříhané jednotlivé snímky a ty byly následně porovnávány s výsledky numerické simulace z programu ProCAST.

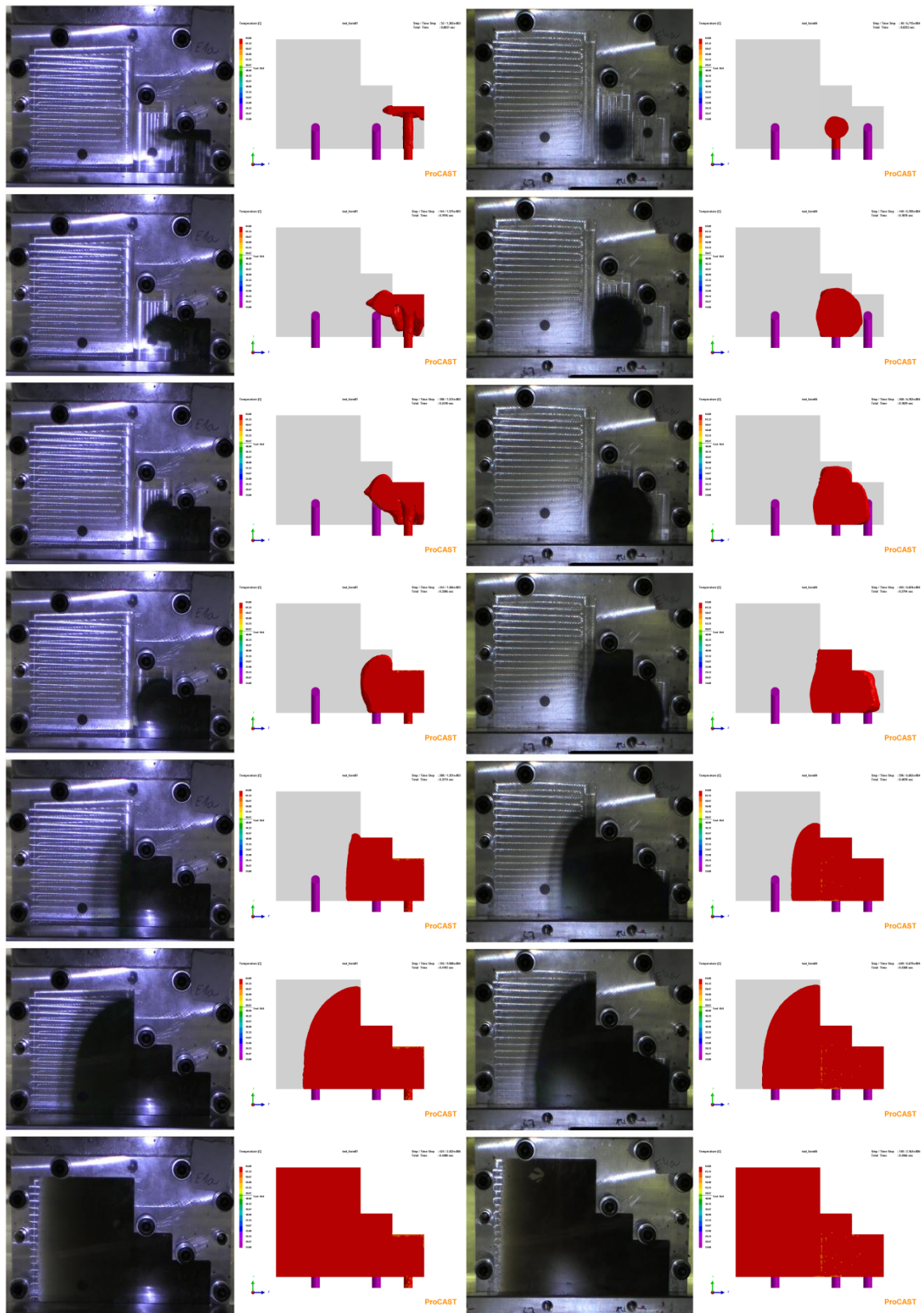
10.2 Důležité parametry simulace

Uživatelský manuál programu ProCAST udává vhodné nastavení výpočtových parametrů pro jednotlivé technologie lití, avšak pro prototypovou simulaci proudění voskové směsi neexistuje žádné doporučení či vhodné nastavení.

Na základě celé řady experimentálních simulací, jejímž cílem bylo otestovat „*Flow Run Parameters*“ (parametry pro popis proudění), bylo vybráno 12 významných parametrů, které nejvíce ovlivňovaly průběh simulace, a tím i shodu se skutečným zaplňováním dutiny matečné formy. **Tab. 14** uvádí přehled jednotlivých parametrů, jejich stručný popis a doporučenou hodnotu nastavení pro numerickou simulaci. Výsledek optimalizace parametrů v porovnání se skutečným průběhem vstřikování je možno pozorovat na **obr. 10.2** a lze konstatovat, že průběh simulace se velmi blíží skutečnosti.

Tab. 14: 12 relevantních parametrů pro numerickou simulaci

Parametr	Nastavená hodnota	Popis
<i>FREESFOPT</i>	1	rozdílné výpočtové algoritmy plnění
<i>GAS</i>	1	uvažování vlivu odporu vzduchu uzavřeného v dutině formy během plnění
<i>WSHEAR</i>	0	zohledňuje míru „klouzáni“ směsi po stěně formy
<i>HIVISC</i>	2	rozdílné výpočtové metody proudění zohledňující viskozitu a Reynoldsovo číslo
<i>VPROF</i>	1	ovlivňuje výpočet rychlostního profilu hraniční vrstvy taveniny
<i>COURANT</i>	10	dává do souvislosti velikost časových kroků výpočtu s počtem výpočtových elementů (přesnost výpočtu)
<i>WALLF</i>	1	ovlivňuje výpočtový algoritmus volné hladiny taveniny
<i>FREESF</i>	1	různé výpočtové algoritmy čela volné hladiny taveniny
<i>LVSURF</i>	1	různé výpočtové módy závěrečné fáze plnění dutiny
<i>NNEWTON</i>	1	newtonský a nnewtonský model proudění
<i>COLDSHUT</i>	1	korekce zatuhávání taveniny
<i>PREF</i>	1 atm	referenční tlak v dutině formy



Obr. 10.2: Porovnání skutečného plnění matečné formy voskem a simulace pro dvě různé pozice vtoku

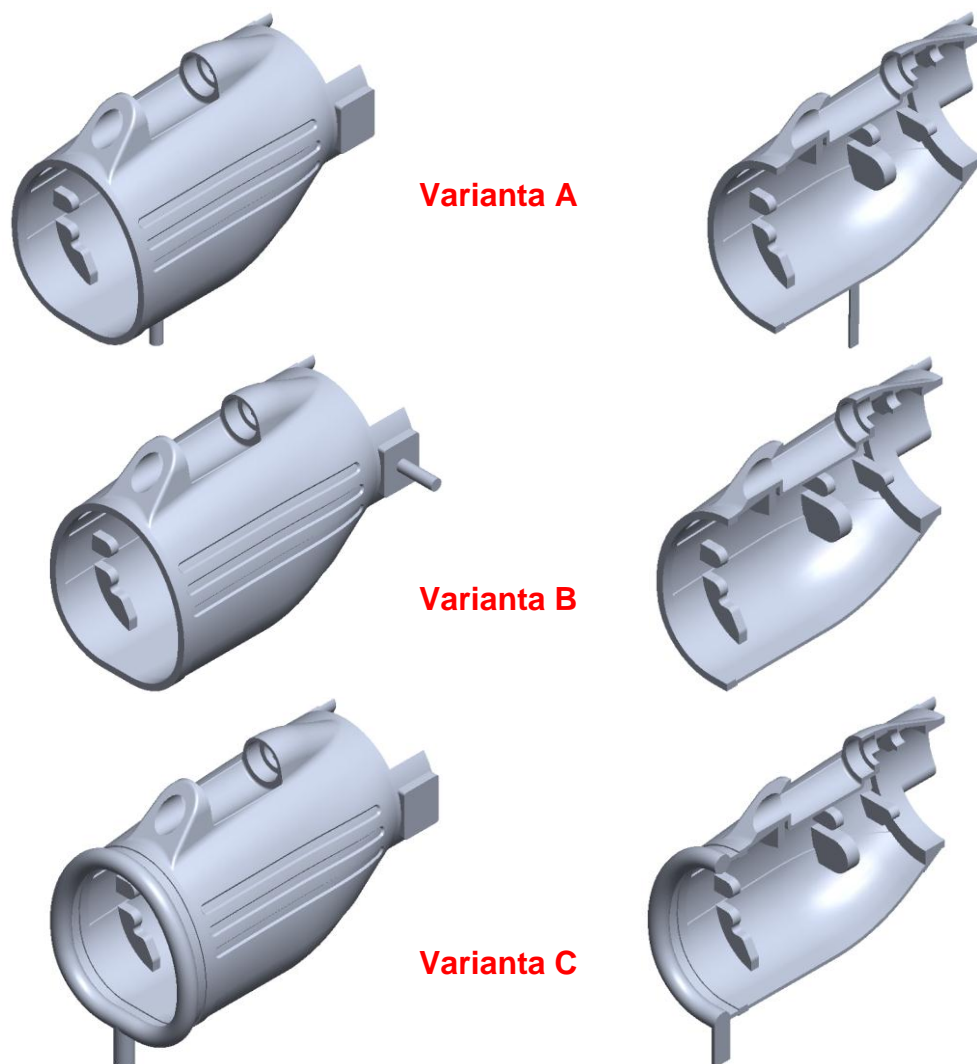
11 VÝROBA VOSKOVÉHO MODELU – TĚLO DALEKOHLEDU

Jakmile bylo otestováno nastavení parametrů na jednoduchém kusu, následovala validace na složitějším, sériově vyráběném modelu (tělo dalekohledu – **obr. 11.1**). Jedná se o tenkostěnný model válcovitého tvaru o průměru cca 80 mm, délce 140 mm, tloušťkách od 1 mm, hmotnosti voskového modelu 86 g a objemu přibližně 90 cm³.

11.1 Návrh vtokového systému

Byly vytvořeny 3 návrhy vtokového systému. Všechny varianty jsou na **obr. 11.1**. S ohledem na pracnost výroby matečné formy (vtoku) a využití vosku se od *Varianty C* upustilo, i když byla nejvhodnější, co se týče plnění dutiny, případných vad a deformací. Ačkoli se tato varianta nevyrobila, simulace byla provedena a porovnána s ostatními variantami.

Se zřetelem na velikost a tenkostěnnost modelu byl vybrán vtok ve tvaru válce, aby nedocházelo k zatuhávání vosku v ústí toku dříve než v modelu. Také z hlediska do-tlaku a výroby je tato volba ideální.



Obr. 11.1: CAD návrh tří variant vtokového systému

Dimenzování vtoku se provedlo dle **tab. 8**, uvedeném v kapitole 8.5. Základní průměr vtoku pro objem dílce cca 90 cm³ je 5 až 6 mm.

Umístění vtoků bylo navrženo ve dvou variantách, které jsou patrné z **obr. 11.1** (*Varianta A* se spodním vtokem a *Varianta B* s bočním vtokem). *Varianta A* reprezentuje umístění do poloviny (středu) součásti, aby se obě poloviny modelu plnily stejně. *Varianta B* byla navržena s ohledem na doporučení umístit vtok do nejlustšího místa výstřiku, a tudíž je umístěno v jednom ze dvou nejlustších míst modelu.

Slévárna Fimes a. s. provedla odstříknutí modelu na vstřikolisu *SHELL-O-MATIC 35T-20/18* ve dvou variantách podle návrhu. Při umístění vtokového otvoru do spodní části (*Varianta A*) často docházelo k neúplnému zaběhnutí vosku, nebo se objevily jiné nepřijatelné vady (viz vlevo dole na **obr. 11.2**). Fotodokumentace matečné formy a formy s různými stupni zaplnění je uvedena v **Příloze 2**.

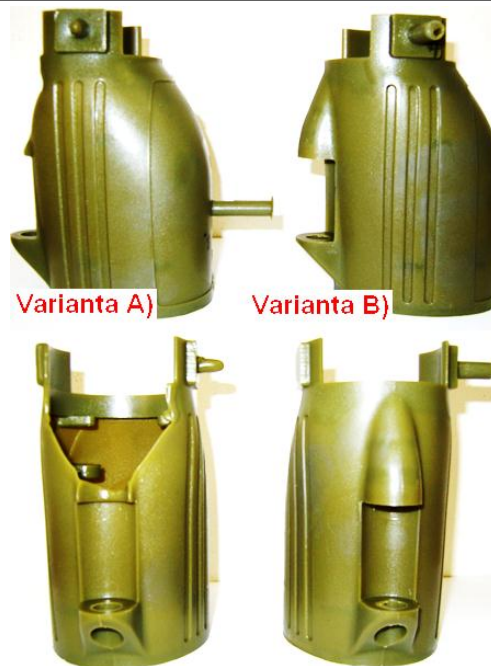
11.2 Numerická simulace vstřikování těla dalekohledu

Po doporučeném nastavení počátečních a okrajových podmínek dle **tab. 14**, bylo provedeno několik numerických simulací s nastavením, které je uvedeno v **tab. 15** a zohledňuje podmínky nastavené při výrobě na vstřikolisu. Jedná se především o teplotu vosku, teplotu formy, průtok směsi a dobu plnění. Porovnání skutečného průběhu plnění voskového modelu a numerické simulace je na **obr. 11.3**.

Tab. 15: Nastavení hodnot počátečních a okrajových podmínek

<i>parametr</i>	<i>hodnota</i>	<i>další nastavení</i>	<i>hodnota</i>
FREESFOPT	1	INLET	22.6 [g/s]
GAS	1	TEPLOTA VOSKU	67 [°C]
WSHEAR	0	TEPLOTA FORMY	24 [°C]
HIVISC	2	HTC*	250 [W/m ² .K]
VPROF	1	DOBA PLNĚNÍ	4 [s]
COURANT	10		
WALLF	1		
FREESF	1		
LVSURF	1		
NNEWTON	1		
COLDSHUT	0		
PREF	1 atm		

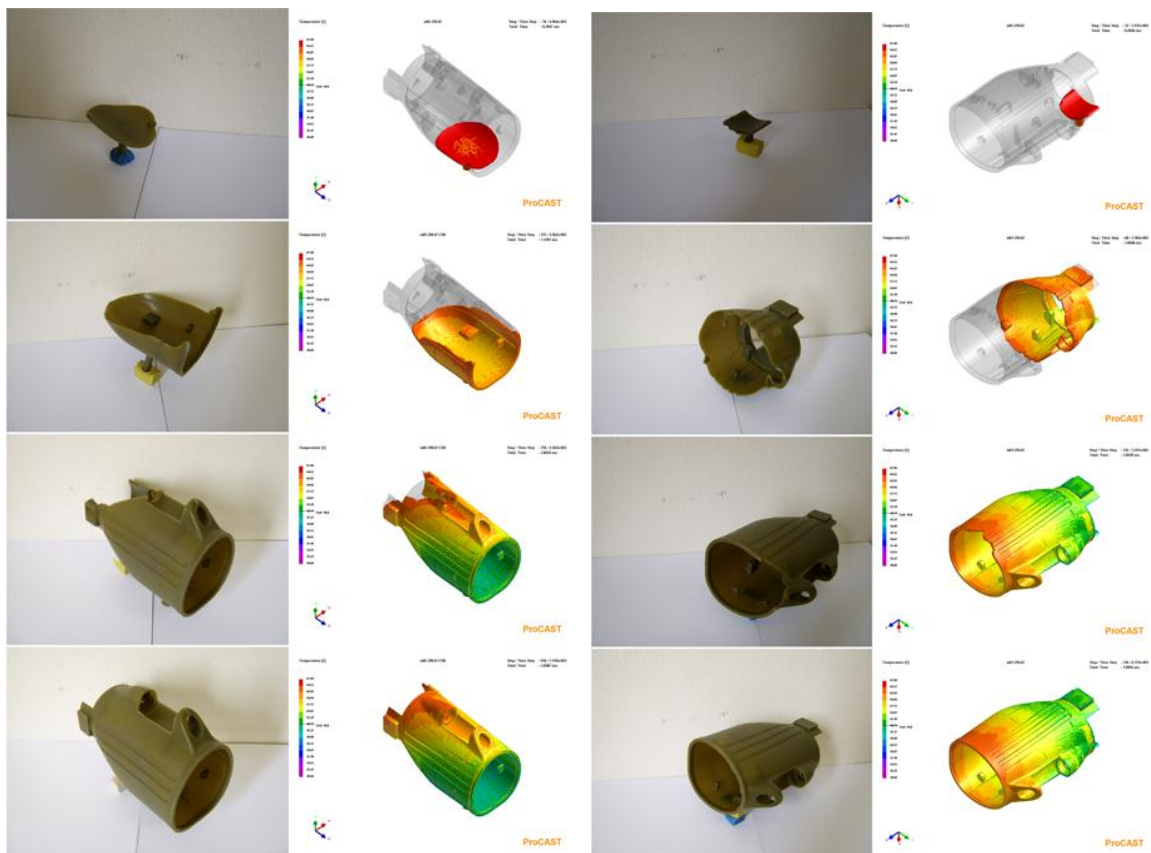
* hodnota koeficientu přestupu tepla zadána na základě experimentálního zjištění dle [22]



Obr 11.2: Sériově vyráběný voskový model. Vlevo Varianta A s nezaběhnutou částí, vpravo Varianta B s dokonalým zaplněním dutiny.

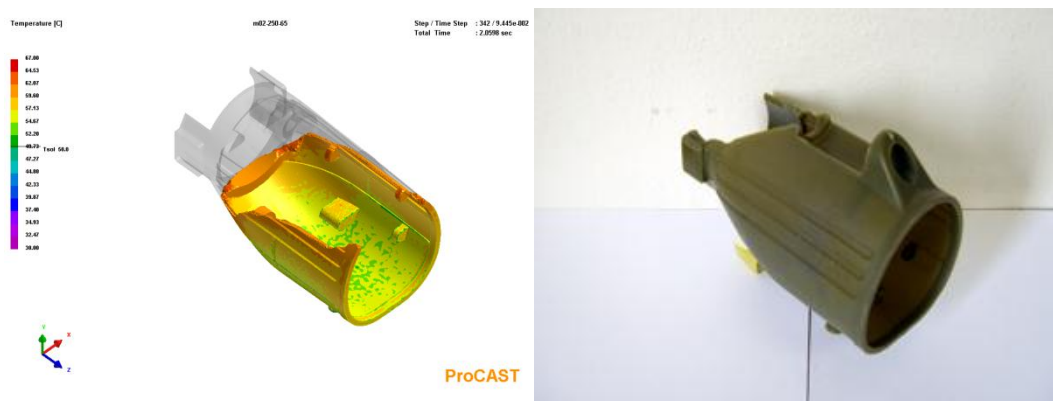
Varianta A

Varianta B



Obr. 11.3: Porovnání plnění skutečného modelu a numerické simulace

Je však nutné podotknout, že při prototypové simulaci sériového kusu byla nastavena hodnota parametru *COLDSHUT* na hodnotu 0, neboť při plnění obou variant docházelo k nedostřiknutí modelu. Obzvláště při simulaci *Varianty B* došlo k výraznému nezaplnění dutiny (**obr. 11.4**), než k jakému docházelo ve skutečnosti při plnění na vstříkolisu.



Obr. 11.4: Porovnání numerické simulace (*COLDSHUT 1*) a skutečného plnění pro *Variantu B*

Hodnota parametru *COLDSHUT* je standardně nastavena na 0,7. Toto číslo udává poměr mezi tekutou a tuhou fází. Pokud je v určitém místě podíl tuhé fáze 70 % (0,7), již není možné tímto průřezem doplňovat taveninu. Jelikož sériový kus dalekohledu je tenkostěnný, dochází při *Variantě B* k předčasnému zastavení výpočtu, i když by bylo stále možné doplnit taveninu do zbytku dutiny. Dalším problémem, který ztěžuje validaci a optimalizaci numerické simulace, je skutečnost, že dutina formy se plní taveninou, jež je v rozmezí teploty likvidu a solidu. ProCAST není v současné době odladěn a optimalizován pro simulace vstřikování voskové směsi, která se vstřikuje v polotekutém (polotuhém) stavu – „*těstovitý stav*“. Tento fakt musel být následně odstraněn, a proto bylo nutné provést korekci tohoto parametru.

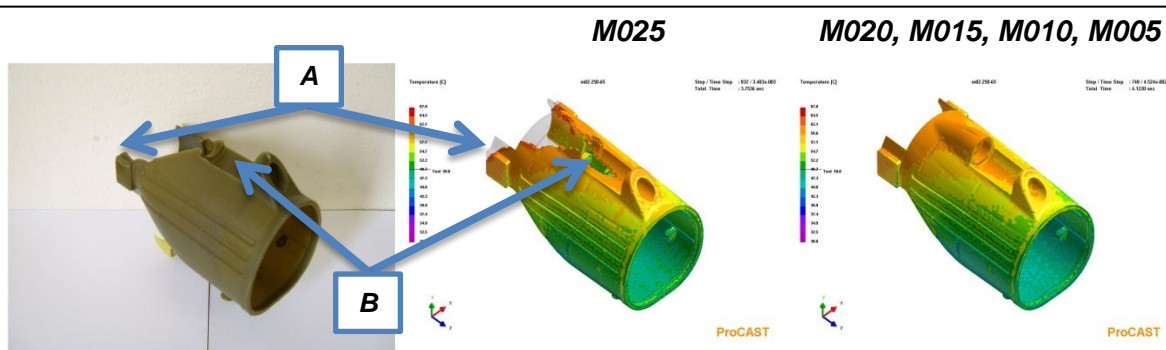
11.3 Optimalizace simulace

Parametr *COLDSHUT* se počítá jako 1 – *MOBILE*, kde parametr *MOBILE* určuje kritickou hodnotu tekuté frakce, při které tavenina již není schopna toku. Standardní hodnota parametru *MOBILE* je nastavena na hodnotu 0,3.

Dalším krokem bylo nalezení nejvhodnější hodnoty parametru. Protože je nutné, aby forma byla dále plněna taveninou, musí se hodnota parametru snížit pod implicitní hodnotu 0,3. Z toho důvodu bylo připraveno 5 simulací s nastavením parametrů dle **tab. 15** a proměnnými hodnotami parametru *MOBILE* dle **tab. 16**. Výsledky výpočtů jsou vyobrazeny na **obr. 11.5**.

Tab. 16: Nastavení parametru *MOBILE* pro optimalizaci simulace

označení simulace	<i>M025</i>	<i>M020</i>	<i>M015</i>	<i>M010</i>	<i>M005</i>
parametr <i>MOBILE</i>	0,25	0,20	0,15	0,10	0,05



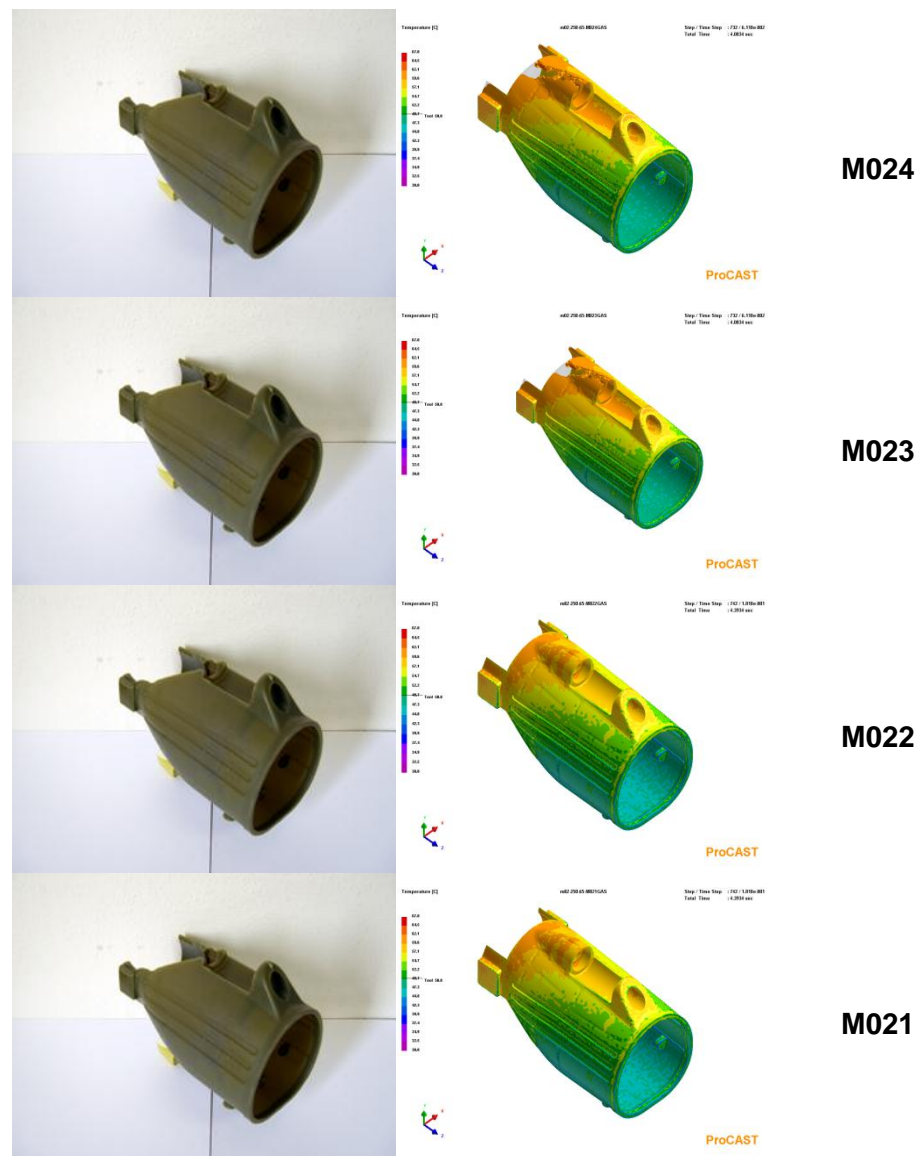
Obr. 11.5: Srovnání skutečného modelu se simulací a různými hodnotami parametru *MOBILE*

Vlevo na **obr. 11.5** se nachází fotografie nedostříknutého modelu, uprostřed je výsledek simulace s nastavením parametru *MOBILE* na hodnotu 0,25, vpravo pak všechny výsledky simulací pro ostatní hodnoty parametru. Z obrázku je též zřejmé, že výsledek je mnohem blíže skutečné vadě nedostříknutí voskového modelu, ale i nadále jsou patrné lehké odchylky simulace od skutečnosti. Tyto odchylky jsou zřejmé hlavně v koncové nejširší části (*pozice A* na **obr. 11.5**), kde dle výpočtu nedojde k úplnému zaplnění, ale ve skutečnosti ano. Tento rozdíl je patrně způsoben stečením voskové směsi z vrchu modelu ještě před jeho ztuhnutím. Simulace se v tomto kroku zastaví a není možné případný další pohyb směsi predikovat.

Dalším rozdílným místem na modelu je vrchní část mezi úchytnými otvory (*pozice B* na **obr. 11.5**). Ve skutečnosti došlo k dokonalému zaplnění, ačkoli simulace predikovala opak. Z toho důvodu byly provedeny další simulace, které měly ještě více přiblížit numerický výpočet skutečnosti. Hodnoty parametru *MOBILE* byly korigovány podle **tab. 17**. Finální výsledky v porovnání se skutečností jsou zobrazeny pod tabulkou na **obr. 11.6**.

Tab. 17: Tabulka korekcí parametru *MOBILE*

označení simulace	<i>M024</i>	<i>M023</i>	<i>M022</i>	<i>M021</i>
parametr <i>MOBILE</i>	0,24	0,23	0,22	0,21



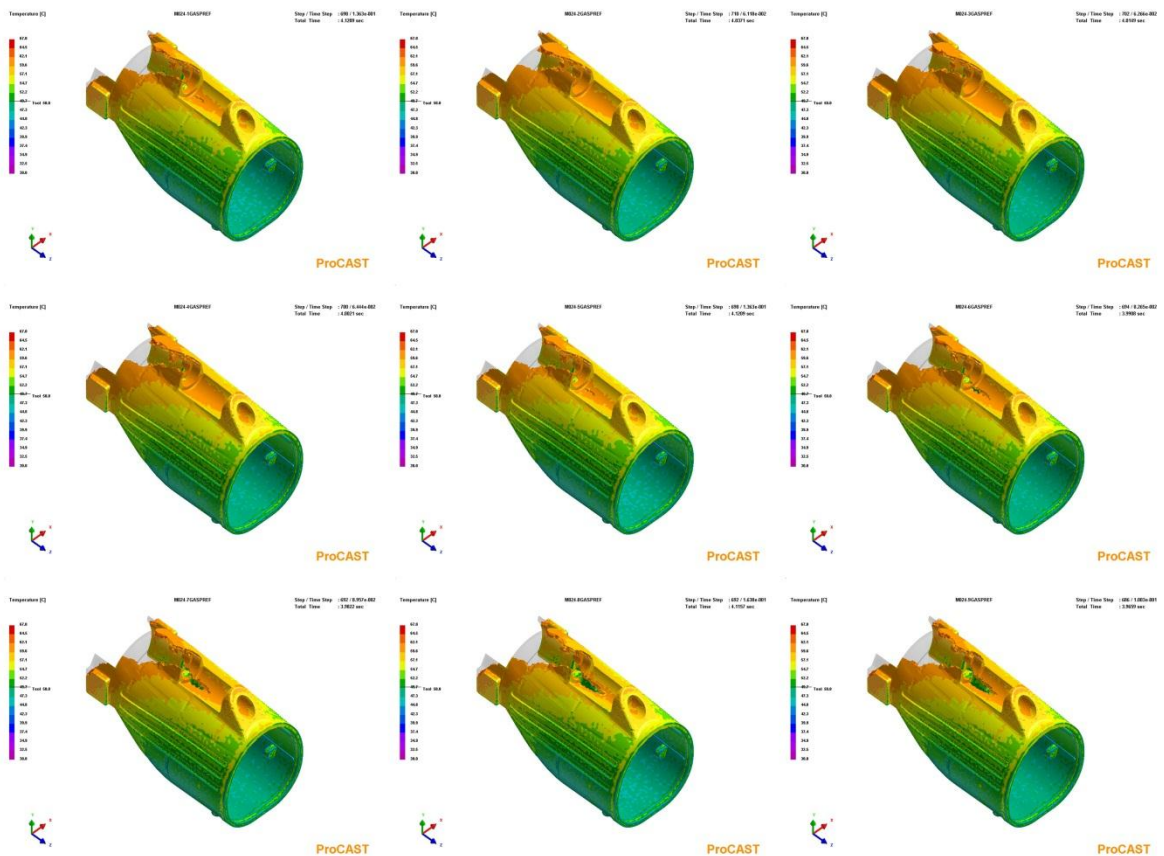
Obr. 11.6: Porovnání skutečnosti a simulace s korigovaným parametrem MOBILE

Z **obr. 11.6** je patrné, že od hodnoty parametru $MOBILE = 0,23$ až do $0,21$, neodpovídá skutečnému zaplnění formy voskovou směsí. Je téměř nebo zcela zaplněna. Hodnota $0,24$ je bližší realitě, ale i nadále je potřeba parametr upravit.

Pro finální optimalizaci bylo připraveno 10 simulací s hodnotou parametru v rozmezí od $0,241$ do $0,249$ dle **tab. 18**. Výsledky výpočtů jsou na **obr. 11.7**.

Tab. 18: Tabulka finálních korekcí parametru MOBILE

označení simulace	M024-1	M024-2	M024-3	M024-4	M024-5
parametr MOBILE	0,241	0,242	0,243	0,244	0,245
označení simulace	M024-6	M024-7	M024-8	M024-9	
parametr MOBILE	0,246	0,247	0,248	0,249	



první řádek zleva: M024-1, M024-2, M024-3
druhý řádek zleva: M024-4, M024-5, M024-6
třetí řádek zleva: M024-7, M024-8, M024-9

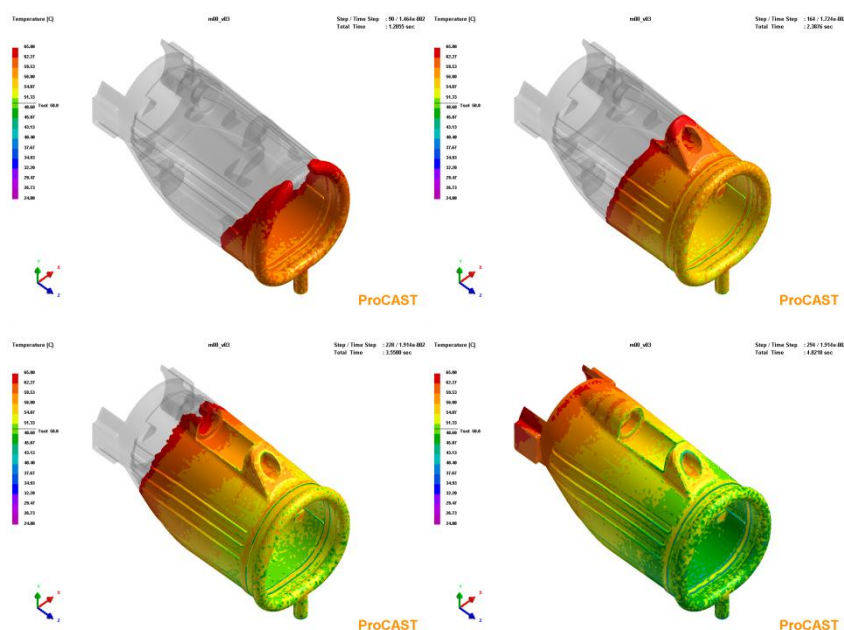
Obr. 11.7: Výsledky finálních korekcí parametru MOBILE

Na základě výsledků z **obr. 11.7** byla v porovnání se skutečností vybrána finální hodnota parametru *MOBILE*, která se rovná hodnotě 0,244. Výsledek simulace je, vzhledem k optimalizaci programu, který není odladěn na tuto technologii, dostačující a může poměrně uspokojivě posloužit při návrhu a optimalizaci vstřikování při výrobě voskového modelu. V ruce technologa může jít o kvalitní nástroj pro zjištění charakteru plnění dutiny formy, odhalení případného uzavírání vzduchu nebo studených spojů. Poté může dojít k úpravě vstřikovacích parametrů, nebo změně umístění vtokového systému a jeho rozměrů, aby bylo možné získat kvalitní voskový model.

11.4 Simulace Varianty C

Výhodou filmového vtoku je rovnoměrnost plnění formy kruhovitěho (trubkovitého) tvaru, protože nedochází k setkávání čel proudu taveniny v dutině formy, kde se nachází samotný model, ale v rozváděcím kanále vtokového systému. Výhodou této skutečnosti je, že setkávající se čela taveniny mohou uzavírat vzduch v dutině a je nutné důkladné odvzdušnění formy.

Průběh simulace a zaplňování formy je patrný z **obr. 11.8**. Nevýhodou tohoto vtoku může být pracnost výroby matečné formy a také nižší využití voskové směsi, což se může výrazně promítnout v nákladech – hlavně u velkých a rozměrných modelů.

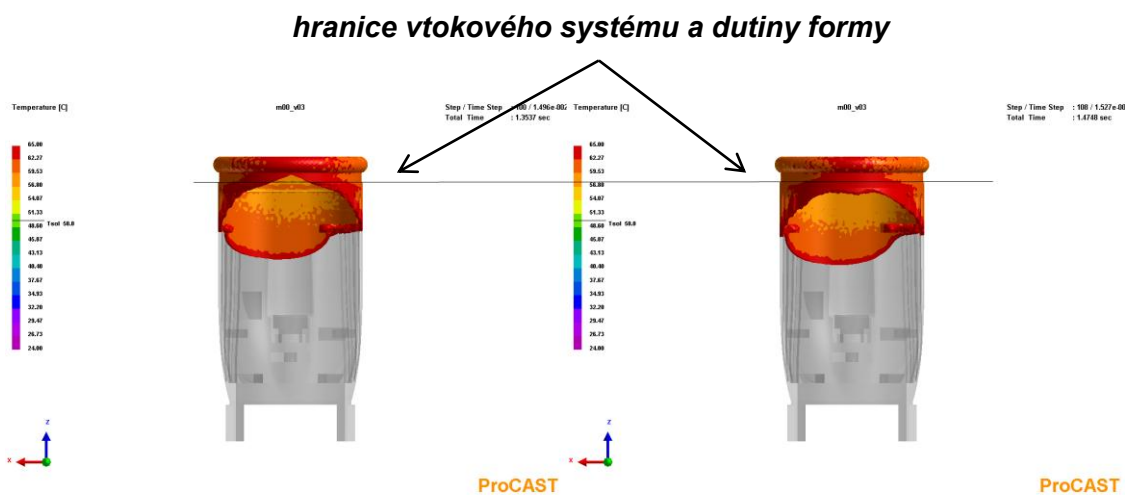


Obr. 11.8: Průběh plnění těla dalekohledu – Varianta C

Na **obr. 11.9** je vidět jak dochází ke spojení obou proudů směsi ještě ve vtokovém systému, konkrétně v rozváděcím kanále. Dutina formy se již nadále plní rovnoměrně, což je hlavním úkolem filmového vtoku.

Varianta C je bezpochyby nejvýhodnější volbou z hlediska plnění a zamezení vzniku případných vad – bubliny a studené spoje. Co se týče pracnosti výroby, jedná se o jeden z nejhůře vyrobitelných vtoků, mnohdy je nutné použít vícedílné formy.

V mnoha případech lze pro výrobu voskového modelu použít jednoduchých válcových vtoků, které jsou lehce vyrobitelné, náklady jsou minimální a výsledný model má optimální kvalitu. Případné vady je možné odstranit optimalizací vstřikovacích parametrů. Provozní návod na odstranění některých vad nabízí například Doškář a Gabriel v publikaci *Výroba přesných odlitků* – (viz **tab. 19**).



Tab. 19: Provozní návod na odstranění některých vad voskového modelu [6]

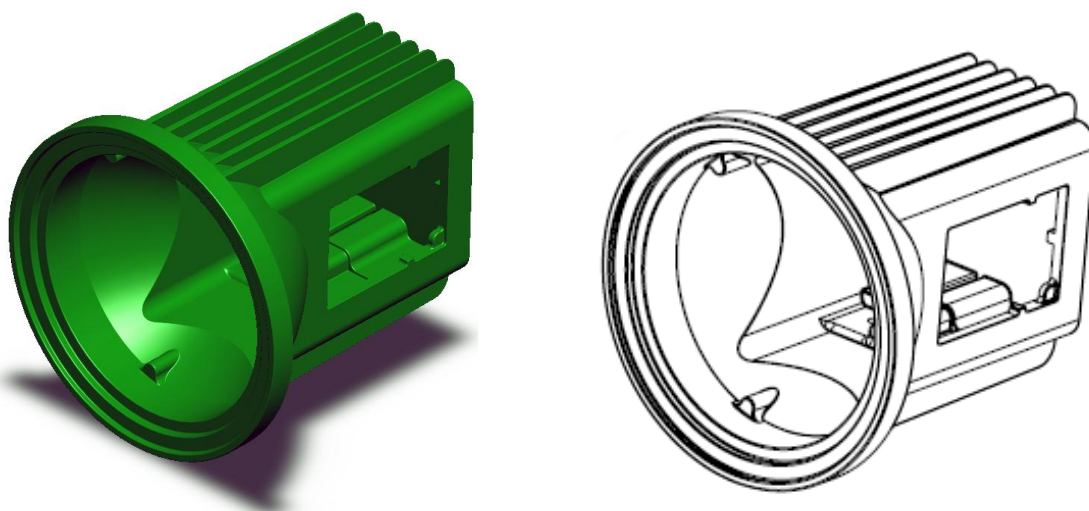
Závada					Odstranění závady
Forma se neplní	Smršťování, staženiny, propadliny	Povrchové vady, kresby	Vzduchové bubliny	Deformace	
●		●	●		Zvýšit teplotu vosku
	●			●	Snížit teplotu vosku
●	●	●			Zvýšit tlak
●	●	●			Ohřát formu (méně chladit)
		●			Méně mazat formu
	●		●	●	Prodloužit dobu tuhnutí ve formě
●	●	●	●	●	Zvýšit vtok ve formě
			●	●	Zvýšit chlazení formy

V této chvíli se kvalita simulace nachází na maximálně možné kvalitě, a proto bude nadále podrobena testování na mnohem větším a složitějším kusu, který opět poskytla slévárna Fimes.

12 VÝROBA VOSKOVÉHO MODELU „21“ – SVĚTLOMET

Slévárna Fimes bude v blízké době připravovat výrobu nových odlitků metodou vytavitelného modelu. Bude se jednat o velké odlitky, z toho důvodu bude výroba voskových modelů kritická, aby bylo dosaženo požadované kvality a rozměrových přesností výsledného odlitku.

V první fázi přípravy výroby je kladen důraz především na tři ze šesti kusů. Jedná se o největší a tvarově nejsložitější odlitky. Pro finální validaci numerické simulace výroby voskového modelu byl vybrán kus označený jako 23-01-021-T-002, nebo též pouze jako model „21“ (viz **obr. 12.1**, **obr. 12.2** a **Příloha 3**).



Obr. 12.1: CAD model „21“ a jeden z pohledů na výkresu

Voskový model je téměř 300 mm dlouhý, 260 mm široký a tloušťky stěn se pohybují přibližně od 2 do 10 mm. Jedná se tedy o poměrně velký a tlustostěnný model, z toho důvodu bude rozhodující správné umístění a dimenzování vtokového systému pro výrobu kvalitního voskového modelu. Z hlediska velikosti modelu bude důležité zastříknutí celé dutiny matečné formy voskovou směsí, eventuálně s ohledem na uzavírání vzduchu ve formě, popřípadě na studené spoje při plnění formy více vtoky. Návrhem vtokového systému se zabývá následující kapitola, která rovněž vychází z podkladů technologie vstřikování plastů, jak tomu bylo u návrhu sériového modelu v kapitole 11.2.



Obr. 12.2: Voskový model „21“

12.1 Návrh vtokové soustavy

Koncepce vtokového systému bude vycházet ze základů shrnutých v kapitole 8. Především se bude jednat o co možná nejvhodnější umístění vtoků na modelu, jejich tvar a dimenzování rozměrů.

Dalším parametrem, který bude rozhodovat o návrhu vtoku, je složitost jeho výroby. Čím jednodušší vtok bude při dokonalém odstříknutí bez vad, tím levnější a jednodušší bude jeho samotná výroba, což bude prioritou návrhu vtoku. Dalším rozhodujícím faktorem budou dokončující operace na modelu, zvláště pak pracnost při odstranění vtokového systému od voskového modelu.

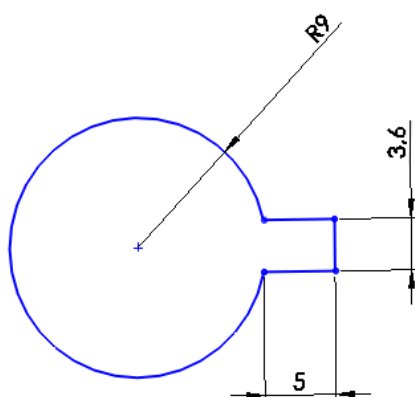
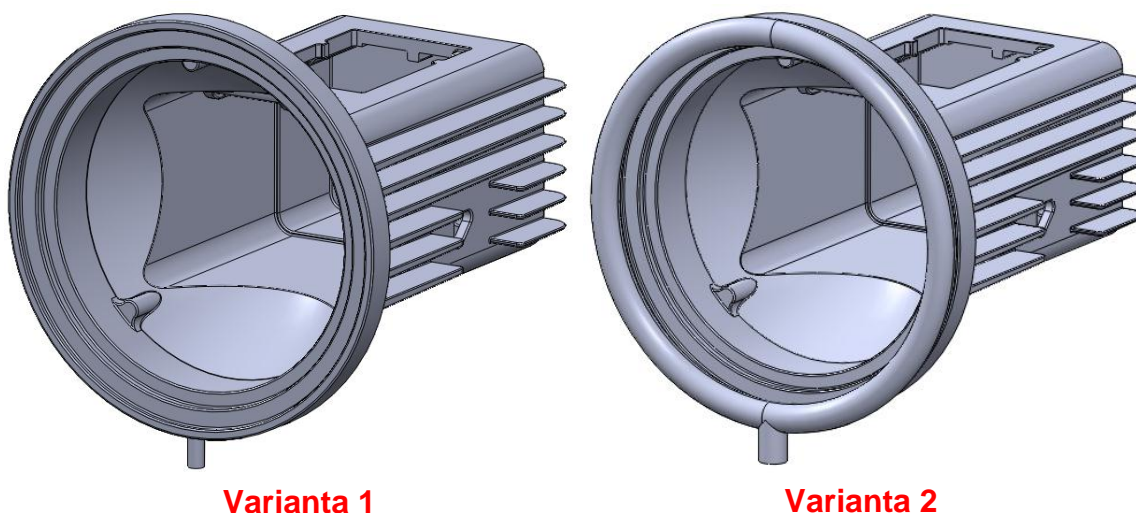
Opět byly navrženy 2 varianty vtoku – *válcový a filmový vtok* – viz **obr. 12.3**.

Průměr plného válcového vtoku (*Varianta 1*) byl určen podle **tab. 8** na základě objemu dílce a hodnota průměru může být dimenzována od 6 do 10 mm. Protože se jedná o velký model, byla zvolena krajní hodnota 10 mm a vtok ústí do nejtlustšího místa modelu.

Dimenzování filmového vtoku (*Varianta 2*) se dělo na základě odkazů kapitoly 8.8 a tedy podle výpočtů pro *boční vtok*, které jsou shrnuty v kapitole 8.7. Tloušťka ústí h se vypočítá podle vzorce 1.12, kde $n = 0,6$ a tloušťka stěny modelu H je rovna 6,0 mm. Vý-

sledná tloušťka h je tedy 3,6 mm. Pro délku ústí platí vztah 1.10 a tedy $l = d + (0,5 \div 1,5) = 3,6 + 1,5 = 5,1 \rightarrow 5 \text{ mm}$. Význam jednotlivých hodnot je patrný z **obr. 8.15** v kapitole 8.7.

Vtok opět ústí do nejtlustšího místa modelu. Průměr rozváděcího kanálu, který je napojen na ústí, byl zvolen na základě objemu modelu z **tab. 8**. Protože model má objem necelých $1\,200 \text{ cm}^3$, hodnota průměru rozváděcího kanálu je 18 mm.



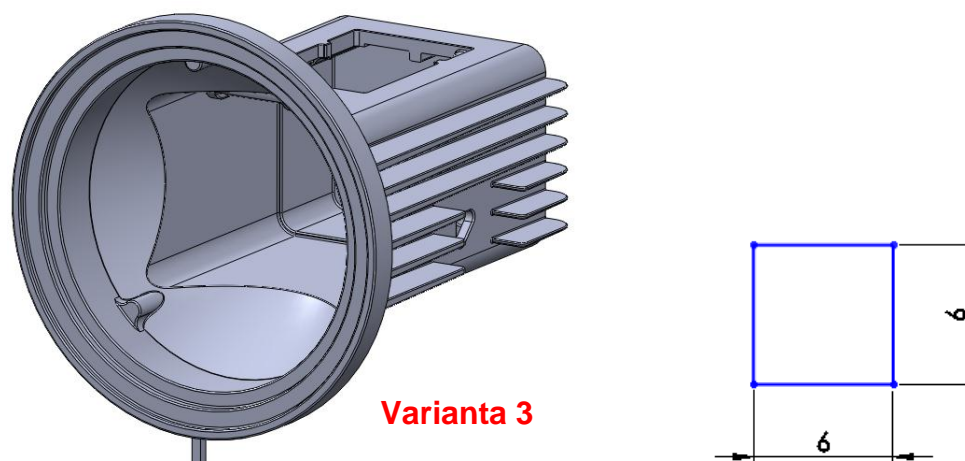
Obr. 12.3: Nahoře – CAD model návrhu umístění válcového (vlevo) a filmového vtoku (vpravo), dole – profil a rozměry filmového vtoku společně s rozváděcím kanálem

12.2 Numerická simulace vstřikování modelu „21“

Počáteční a okrajové podmínky byly nastaveny podle optimalizace simulace v kapitole 11.3. Podmínky vstřikování a nastavení parametrů výpočtu jsou uvedeny v **tab. 20**. Doba plnění, průtok, teplota vosku a formy byla nastavena na základě dat, která poskytla slévárna Fimes, jež prováděla výrobu voskového modelu.

Pro zkušební výrobu slévárna Fimes navrhla vtok čtvercového průřezu (*Varianta 3*), což ovšem není ideální řešení z hlediska tepelných ztrát voskové směsi při proudění tímto profilem a působení dotlaku. O nevýhodě tohoto typu pojednává kapitola 8.2. Z toho důvodu byl tento vtok zamítnut, ale byla provedena numerická simulace pro porovnání s dalšími návrhy.

Varianta se čtvercovým průřezem je na **obr. 12.4**. Průřezu vtoku $6 \times 6 \text{ mm}$ odpovídá průtočná plocha 36 mm^2 a doba vstřikování při zachování průtoku je necelých 18 s.



Obr. 12.4: CAD model varianty se čtvercovým průřezem vtoku

Tab. 20: Vstupní data simulace modelu „21“

parametr	hodnota	další nastavení	hodnota
FREESFOPT	1	INLET	69 [g/s]
GAS	1	TEPLOTA VOSKU	59 [°C]
WSHEAR	0	TEPLOTA FORMY	30 [°C]
HIVISC	2	HTC	250 [W/m ² .K]
VPROF	1	DOBA PLNĚNÍ	16–20 [s]
COURANT	10	DOBA CYKLU	70 [s]
WALLF	1		
FREESF	1		
LVSURF	1		
NNEWTON	1		
COLDSHUT	1		
PREF	1 atm		
MOBILE	0,244		

12.2.1 Varianta s filmovým vtokem

Filmový vtok je výborným řešením pro modely kruhového a trubkovitého charakteru s vysokými požadavky na kvalitu. Protože je model plněn rovnoměrně, je zajištěna přesnost výstřiku, vzniká pouze malé vnitřní pnutí, eliminuje se možnost studených spojů a rychlost směsi vstupující do dutiny je menší.

Při použití tohoto typu vtoku a zachování průtoku vosku se model zaplnil směsí přibližně za 20 s. Je to dáno větším průřezem vtoku (3 154 mm²), kterým vstupuje tavnina do dutiny formy.

Z **obr. 12.5** je rovněž patrné nerovnoměrné zaplňování dutiny formy, což se od vtoku neočekává. Je to pravděpodobně způsobené velikostí vtoku a způsobem zaplňování rozváděcího kanálu. V tomto případě by se jako lepší jevila varianta na **obr. 8.18** dole, kde je tavenina přiváděna do středu prstence rozváděcího kanálu, a dále postupuje rovnoměrně.

Na konci a v průběhu plnění ovšem dochází k uzavírání vzduchu, jak je patrné dole na **obr. 12.5** v čase okolo 14,555 s (snímek č. 5) a 11,227 s (snímek č. 7). Při případném použití tohoto vtoku by bylo nutné správné navržení odvzdušnění formy a vtokového kanálu, který ústí do rozváděcího kanálu.

12.2.2 Varianta s válcovým vtokem

Válcový (plný kuželový) vtok se převážně používá u jednonásobných forem pro modely se symetrickou dutinou. Vhodný je zejména pro tlustostěnné modely, proto se jeví jako vhodná varianta výroby modelu „21“.

Nevýhodou může být pracné odstranění vtoku většího průřezu a zanechání viditelné stopy na modelu.

Při použití vtoku kruhového průřezu o průměru 10 mm, průřez vtoku je 78 mm², a zachování průtoku vosku se model zaplnil voskovou směsí za 17 s.

Na snímku 6 v čase necelých 13 s je vidět, jak se čela obou proudů směsi setkávají, a v těchto místech je velká pravděpodobnost uzavírání vzduchu. Dalším kritickým místem je zadní strana modelu, která se zaplňuje jako poslední – snímek 7 v čase 16 s. I v tomto případě se musí dbát na správné odvzdušnění formy.

Zaplňování dutiny formy voskovou směsí je na **obr. 12.6**.



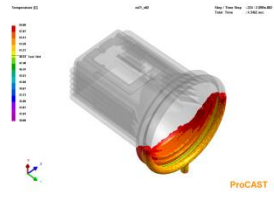

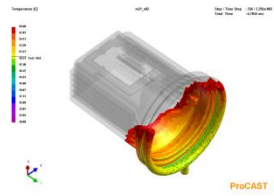
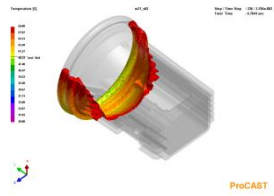
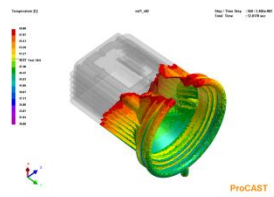
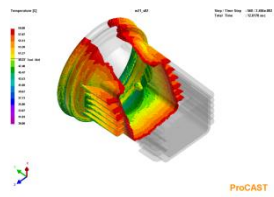
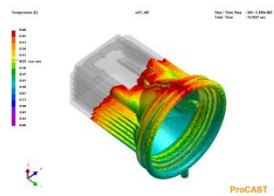
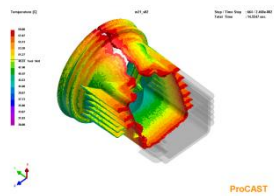
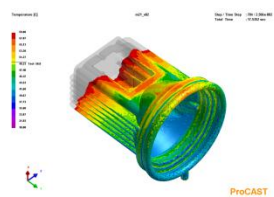
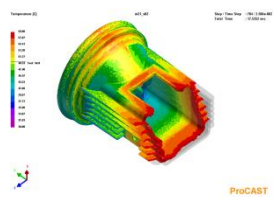
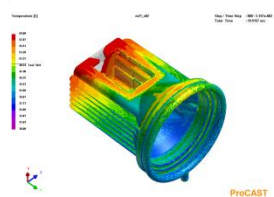
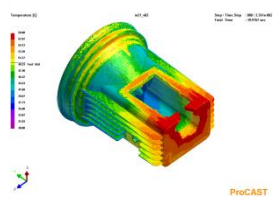
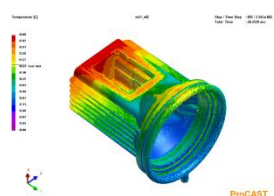
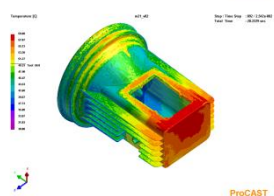
12.2.3 Varianta se vtokem čtvercového průřezu

Použití vtoku čtvercového průřezu se obecně nedoporučuje z důvodu možných teplotních a tlakových ztrát. Volba průřezu se děje na základě smáčivého průměru d_H , který má být podle [10] co největší.

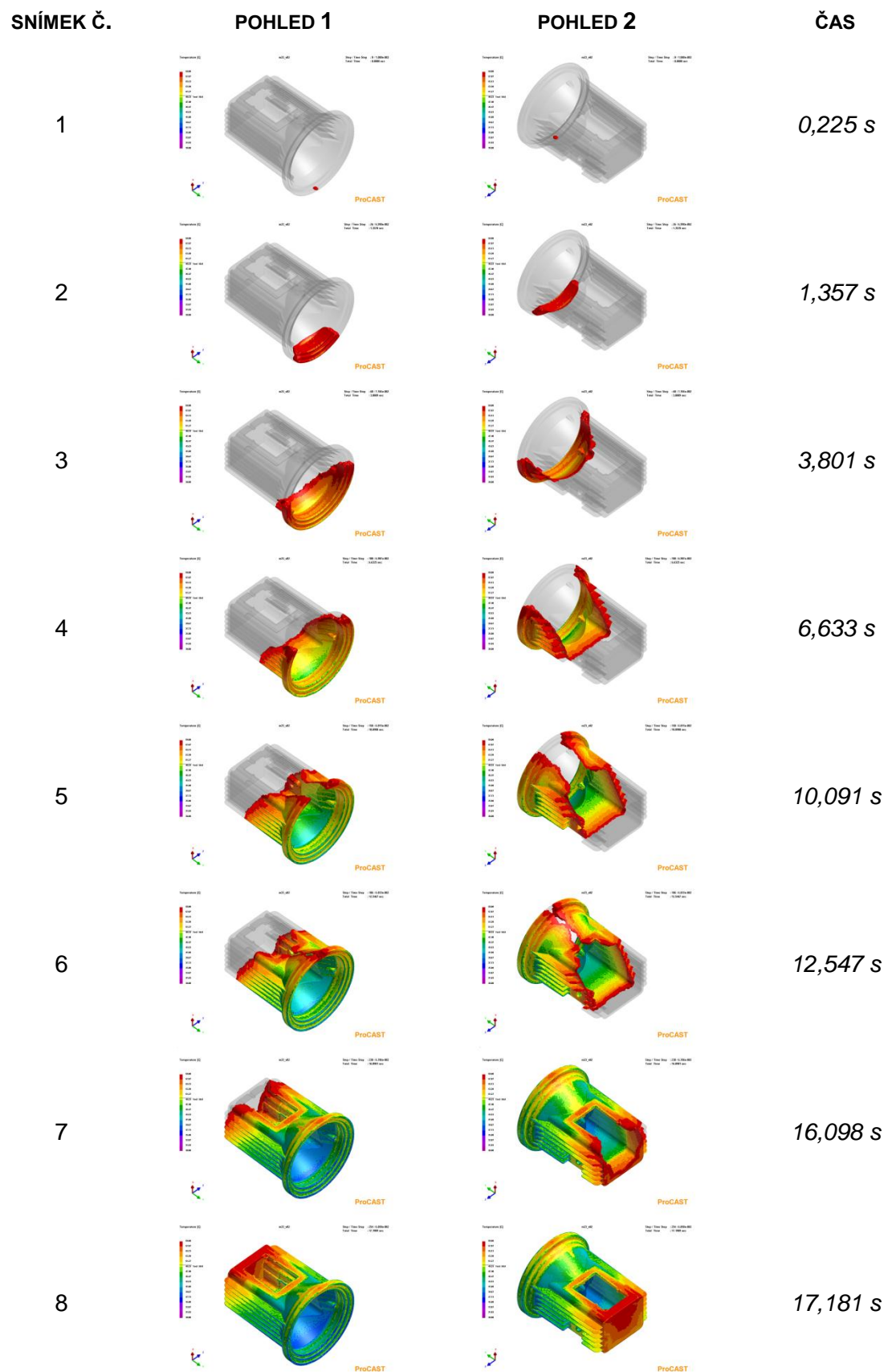
Ovšem při plnění rozměrnějších kusů, kdy je vtok dimenzován pro větší modely, nemusí docházet k negativním ztrátám, jako například u menších nebo tenkostěnných modelů.

Výsledek simulace je zobrazen na **obr. 12.7**, který nepotvrzuje všechny nevýhody a předpoklady spojené s tímto profilem vtoku. Model se zcela zaplnil voskovou směsí.

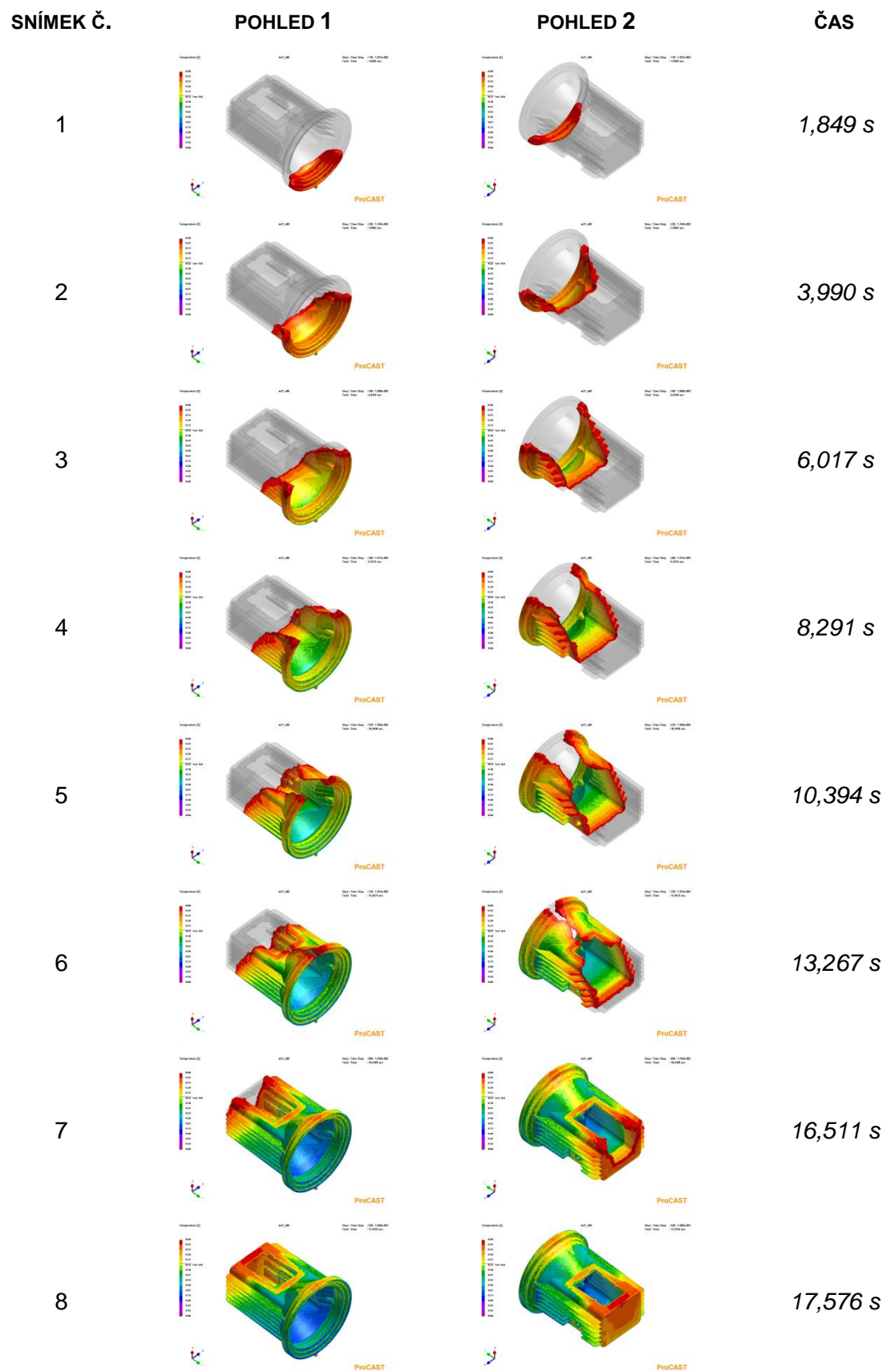
Dalším kladem je malá plocha průřezu vtoku oproti válcovému či filmovému vtoku. Z tohoto důvodu jsou náklady a pracnost na jeho odstranění minimální, proto se jeví jako dobrá varianta pro rozměrné modely s větší tloušťkou stěn, kde veškeré empirické vztahy a rady shrnuté v kapitole 8 nemusí zcela platit, jelikož při dimenzování vtoku se model nachází v krajních hodnotách a mnohdy až mimo vytyčené hranice dané tabulkami.

SNÍMEK Č.	POHLED 1	POHLED 2	ČAS
1			2,072 s
2			4,396 s
3			6,787 s
4			12,017 s
5			14,555 s
6			17,535 s
7			19,916 s
8			20,223 s

Obr. 12.5: Simulace vstřikování modelu „21“ – filmový vtok



Obr. 12.6: Simulace vstřikování modelu „21“ – válcový vtok (průměr 10 mm)



Obr. 12.7: Simulace vstříkování modelu „21“ – vtok čtvercového průřezu (výrobní varianta)

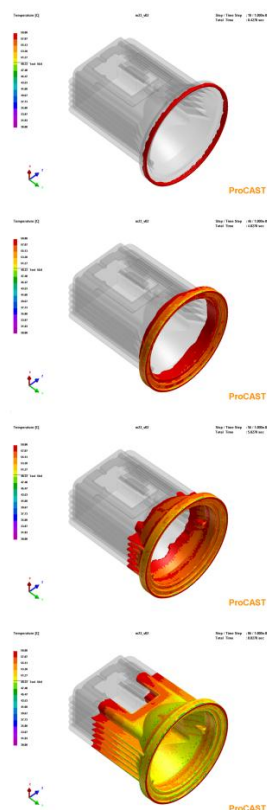
12.3 Zhodnocení výsledků simulace

Je zcela jasné, že z hlediska výroby vtoku je hlavním aspektem zaplnění dutiny formy, co možná nejmenší rozměry, jednoduché odstranění a začištění povrchu modelu. Jelikož simulace predikuje zaplnění formy ve všech případech, dalším rozhodujícím aspektem bude plocha průřezu vtoku a jednoduchost jeho odstranění.

Na základě porovnání se jako nejlepší jeví vtok čtvercového průřezu, jehož plocha průřezu činí 36 mm^2 , následuje válcový vtok kruhového průřezu s plochou průřezu 78 mm^2 a nakonec filmový vtok se 3154 mm^2 .

Při dimenzování varianty s válcovým vtokem dle **tab. 8** bylo možné navrhnout průměr vtoku od 6 do 10 mm. Vzhledem k rozměrnosti modelu byl vybrán průměr 10 mm. Protože model je poměrně rozměrný a tloušťky stěn velké, bylo by možné zvolit i druhou krajní hodnotu (6 mm), kde plocha průřezu činí přibližně 28 mm^2 . To je o 8 mm^2 menší, než je tomu v případě vtoku čtvercového průřezu.

Použití filmového vtoku je v tomto případě zcela závislé na správném umístění rozváděcího kanálu. *Varianta 2* má rozváděcí kanál umístění na spodním okraji, což je nepříznivé z hlediska prvotního zaplnění rozváděcího kanálu. Model se v podstatě plnil obdobně jako u ostatních variant a nedocházelo k rovnoměrnému plnění dutiny, k čemuž je filmový vtok především předurčen. Lepším umístěním rozváděcího kanálu, nebo změnou polohy dutiny formy (matečného modelu) lze plnění korigovat, aby vtok mohl plnit správnou funkci. Ideální případ zaplňování dutiny formy modelu „21“ je na **obr. 12.8**, avšak výroba těchto tvarově komplikovaných vtoků je nákladná. Proto je mnohdy výhodnější jednoduchá vtoková soustava i za cenu horší kvality voskového modelu, která je však i nadále postačující pro výrobu kvalitního odlitku.



Obr. 12.8: Ideální rovnoměrné zaplňování dutiny modelu „21“

13 ZÁVĚR

Úvod práce je věnován obecnému popisu technologie vytavitelného modelu a současně shrnuje poznatky technologie vstřikování plastů. Právě tyto poznatky se staly východiskem pro návrh vtokových systému praktických zkušebních těles a sériově vyráběných modelů.

Protože nikde v literatuře není popsáno dimenzování vtokových systému při výrobě voskového modelu, staly se empirické vztahy technologie vstřikování plastů východiskem pro návrh výroby voskových modelů. Jelikož jsou si z reologického hlediska oba materiály podobné, lze na těchto základech stavět.

Avšak prvním krokem bylo vytvoření kvalitní a co možná nejpřesnější simulace. Byla vyrobena testovací forma a zaplňování dutiny formy bylo nahráváno a porovnáváno s výsledky simulace. Jakmile byla simulace validována na jednoduchém modelu, následovala numerická simulace složitějšího kusu.

Po její optimalizaci byla na dostatečné úrovni, aby mohla být nasazena na rozměrný a tvarově složitý model. V tomto kroku bylo navrženo několik variant vtokových systémů a provedena numerická simulace plnění matečné formy.

Charakter plnění může technologům jednoznačně pomoci při návrhu odvzdušnění formy a hledání kritických míst. V současnosti lze poměrně přesně simulovat pohyb voskové směsi dutinou formy, může se tudíž stát cenným pomocníkem v mnoha slévárnách přesného lití.

Jelikož se jedná o prototypovou simulaci, je i nadále nutné nasbírat co možná nejvíce dat. Prvotním předpokladem dobré simulace jsou kvalitní vstupní data, jejichž získání není v mnoha případech jednoduché, zabere hodně času i finančních prostředků. Ovšem jakmile jsou tato data jednou naměřena nebo získána, je pouze čas jediným faktorem zatěžující tento proces, neboť simulace velkých a tvarově složitých kusů je náročná právě na onen výpočtový čas.

V současné době se vtokové systémy pro výrobu voskových modelů nenavrhují na nějakém empirickém či jiném základu, ale pouze ze zkušenosti a podobnosti s jinými modely, které byly vyrobeny již dříve. V podstatě se jedná o metodu pokusu a omylu. Tato práce by měla za úkol zkvalitnit a urychlit návrh výroby voskových modelů. Další výhodou může být úspora financí při výrobě a případné úpravě matečné formy. Technolog může již v kratším čase připravit několik variant vtokového systému, různých rozměrů a tvarů a při výrobě matečné formy vycházet z těchto simulací. Případné vzniklé vady typu bublin, studených spojů, nezaběhnutí či mapování, které se objeví během výroby voskového modelu, lze i nadále odstranit změnou vstřikovacích parametrů přímo na vstřikolisu podle **tab. 8**.

I když nejsou náklady spojené s pořízením software a hardware vysoké jako tomu bylo do nedávné doby, má numerická simulace své opodstatnění, jakožto moderní nástroj výrobního procesu anebo optimalizace. Je však nutno podotknout, že simulace je jen tak kvalitní, jak kvalitní jsou vstupní data. Proto je nutné vyškolených pracovníků a dodržování určitého řádu. Pokud tomu tak není, simulace ztrácí smysl.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HORÁČEK, M. Tradition, Present State and Perspectives of Foundry Industry : Proceedings of the World Technical Forum. In Česká slévárenská společnost. 1. vyd. Brno : VUTIUM, 2009. s. 35-43. ISBN 978-80-214-3524-7, ISSN 1213-418X.
- [2] *Hitchiner Manufacturing Co., Inc.* [online]. 2007 [cit. 2011-02-10]. History of the Process. Dostupné z WWW: <<http://www.hitchiner.com/history-of-the-process.html>>.
- [3] BEELEY, P. R.; SMART, R. F. *Investment Casting*. 1st ed. Cambridge : The University Press, 1995. 486 p. ISBN 0901716669.
- [4] HORÁČEK, M. *Rozměrová přesnost odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu* [online]. Brno : Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, 2009 [cit. 2011-02-11]. Dostupné z WWW: <<http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/download/technologie-vytavitelneho-modelu.pdf>>.
- [5] HORÁČEK, M. *Přednáška pro 2. ročník magisterského studia oboru slévárenská technologie* [online]. 2003 [cit. 2011-03-20]. Výroba přesných odlitků technologií vytavitelného modelu. Dostupné z WWW: <<http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/download/vyroba-presnych-modelu.pps>>.
- [6] DOŠKÁŘ, Josef, et al. *Výroba přesných odlitků*. 1. vyd. Praha 1 : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1976. 320 s. DT 621.746.
- [7] Lanik. *Lanik.eu - Techservis Bokosvice* [online]. 2006 [cit. 2011-03-22]. Historie filtrace. Dostupné z WWW: <<http://www.lanik.cz/index.php/Filtran-technologie/Historie-filtrace/>>.
- [8] PIRKL, S. *Ústav aplikované fyziky a matematiky* [online]. 2005 [cit. 2011-03-29]. Reologie a reometrie kapalin. Dostupné z WWW: <<http://kf.upce.cz/Reologie%20a%20reometrie%20kapalin.doc>>.
- [9] *Technical Information Sheet*. [s.l.] : REMET UK Limited, 14. 7. 2004. 1 s.
- [10] BOBČÍK, L., et al. *Formy pro zpracování plastů : Vstřikování termoplastů*. 2. opravené vydání. Brno : Uniplast Brno, říjen 1999. 133 s.
- [11] BĚHÁLEK, L. *Katedry strojírenské technologie - Oddělení tváření kovů a plastů* [online]. 2008 [cit. 2011-05-20]. Viskozita. Dostupné z WWW: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/tzn/c3/viskozita.pdf>.

- [12] *Ústav fyziky a materiálového inženýrství* [online]. 2011 [cit. 2011-04-11]. Tokové chování polymerních tavenin - reologické modely. Dostupné z WWW: <http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika_pol/FP_02.pdf>.
- [13] LENFELD, P. *Katedra tváření kovů a plastů* [online]. 2008 [cit. 2011-05-20]. Vstříkování plastů. Dostupné z WWW: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm#044>.
- [14] MENGES, G.; MICHAELI, W.; MOHREN, P. *How to Make Injection Molds*. 3. vyd. Mnichov : Hanser Publishers, 2000. 601 s. ISBN 3-446-21256-6.
- [15] NOVÁ, I.; KOSEK, P.; ŠMRHA, J. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2005 [cit. 2011-04-27]. Slévárenské simulační programy. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/slevarenske-simulacni-programy>>.
- [16] KRUTIŠ, V.; KUZMA, Z. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2009 [cit. 2011-04-27]. Numerická simulace ve slévárenské technologii. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/numericka-simulace-ve-slevarenske-technologie>>.
- [17] ESI Group. *ESI Group* [online]. 2004 [cit. 2011-04-28]. FEM-FDM. Dostupné z WWW: <<http://www.delcam-ural.ru/files/R007%20FEM-FDM.pdf>>.
- [18] MICHNA, S. *Fakulta výrobních technologií a managementu* [online]. 2008 [cit. 2011-04-29]. Počítačové simulační programy. Dostupné z WWW: <http://www.stefanmichna.com/download/progresivni-technologie/pocitacove_simulacni_programy.pdf>.
- [19] ESI Group. *ESI Group* [online]. 2001 [cit. 2011-03-14]. Modeling of Foundry Processes: Differences Between Various Solutions. Dostupné z WWW: <http://www.esi-group.com/products/casting/publications/Articles_PDF/T_FEM-FDM.pdf>.
- [20] ESI Group. *ESI Group* [online]. 2007 [cit. 2011-05-20]. [Http://www.esi-group.com/products/casting](http://www.esi-group.com/products/casting). Dostupné z WWW: <<http://www.esi-group.com/products/casting/>>.
- [21] *ProCAST User Manual*. Lausanne : ESI Group, 2009. 917 s.
- [22] CANNELL, N.; SABAU, A. S. Predicting Pattern Tooling and Casting Dimensions for Investment Casting, Phase II : Final Technical Report. In *Metalcasting Industry for the Future* [online]. Tennessee : Oak Ridge National Laboratory, 2006 [cit. 2011-01-26]. Dostupné z WWW: <<http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/850402-rd1y7p/850402.pdf>>.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Technická data voskové směsi Hyfill B 478

Příloha 2 – Fotodokumentace výroby voskového modelu těla dalekohledu

Příloha 3 – Výkres modelu „21“ – svítidlo

PŘÍLOHA 1



REMET UK Limited

Unit 44, Riverside 2,
Sir Thomas Longley Road,
Rochester, Kent ME2 4DP
Tel: +44 (0) 1634 226240
Fax: +44 (0) 1634 226241
www.remet.com

Technical Information Sheet

HYFILL B478

Hyfill B478 is a relatively low viscosity filled casting wax designed for the production of small and medium size patterns. Containing 30% of an inert polymeric filler, the blend offers good flow and injection characteristics coupled with a quick 'set-off' and relatively low levels of contraction.

IMPORTANT

Avoid overheating the wax (100°C max) or holding it at elevated temperatures for long periods. Doing so will thermally degrade the product. Avoid skin contact with the molten material and avoid inhaling fumes from it; see the relevant Material Safety Data sheet for more information.

TYPICAL PROPERTIES

Property	Method	Typical Value
Melting Point (°C)	IP. 371	70
Congearing Point (°C)	IP. 76	65
Penetration @ 25°C (dmm)	IP. 49	4
Penetration @ 43.3°C (dmm)	IP. 49	30
Viscosity @ 80°C (cPs)	DCF. 1	900
Filler Content (% w/w)	DCF. 3	30
Ash Content (% w/w)	DCF. 2	0.03 max.
Colour	DCF. 4	Green

PŘÍLOHA 2

