

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

OPTIMALIZACE TECHNOLOGIE VYTAVITELNÉHO MODELU S VYUŽITÍM NUMERICKÉ SIMULACE

OPTIMIZED LOST WAX PROCESS BY USING NUMERICAL SIMULATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. RADKA SVOBODOVÁ

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. MILAN HORÁČEK, CSc.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Radka Svobodová

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

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

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

Optimalizace technologie vytavitelného modelu s využitím numerické simulace

v anglickém jazyce:

Optimized lost wax process by using numerical simulation

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Numerické simulace jsou dnes běžně používány při optimalizaci slévárenských technologií. Využívají se jak při aplikaci trvalých (kovových), tak netrvalých (pískových) forem, a to prakticky ve všech fázích zhotovení odlitku (při výrobě forem a jader, plnění dutiny formy kovem a jeho následném tuhnutí a chladnutí). Nicméně zatím není zcela využito možností numerických simulací při zhotovení odlitků metodou vytavitelného modelu (především při zhotovení voskového modelu, který je primárním předpokladem pro vznik dokonalého odlitku). Přitom existuje několik výpočetních programů, které by po příslušných úpravách mohly být s úspěchem v technologii vytavitelného modelu použity. Tematika této práce je 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:

Vyhodnotit optimální program vhodný pro simulace v technologii vytavitelného modelu se zaměřením především na zhotovení voskových modelů. Dosažené výsledky by měly být verifikovány na zvolených zkušebních odlitcích.

Seznam odborné literatury:

- [1] BEELEY, P.-R., SMART, R.-F. Investment Casting. Cambridge: The University Press, 1995. 486 p. ISBN 0 901716 66 9.
- [2] DOŠKÁŘ, J., GABRIEL, J., aj. Výroba přesných odlitků. Praha: SNTL, 1976. 315 s. DT 621.746.
- [3] CAMPBELL, J. Castings. Oxford: Butterworth – Heinemann, 1991. 288 p. ISBN 0-7506-1072.
- [4] HORÁČEK, M. Tradition, Present State and Perspectives of Foundry Industry. In: Proceedings of the World Technical Forum. Česká slévárenská společnost, Brno, 1.–3.6.2009.
- [5] HORÁČEK, M., CILEČEK, J. Capabilities of Investment Casting Technology – Zmožnosti tehnologije precizijskega litja. Livarski Vestnik. Duben 2006, vol. 54, no. 4, p. 175-186. ISSN 0024-5135.
- [6] HORÁČEK, M., CILEČEK, 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 2011/2012.

V Brně, dne 23.11.2010

L.S.

prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je zjistit průběh vstřikování vosku vstřikolisem za určitých vstupních podmínek a pomocí simulačního programu Cadmould 3D-F[®] zdokonalit vstřikování a následné tuhnutí vosku. Jen díky dokonalému vstřikování a následnému tuhnutí vosku může být zhotoven přesný voskový model. K porovnání průběhu vstřikování voskové směsi dopomůže simulační program Cadmould 3D-F[®] a záznamy vstřikování z videokamery. V této práci byl pro porovnání použit simulační program, který se využívá pro simulaci vstřikování plastů. Je zde využita podobnost reologických vlastností vosků a plastů.

Klíčová slova

Voskový model, vstřikolis, Cadmould 3D-F[®]

ABSTRACT

The aim of this diploma thesis is to ascertain the process of injecting the wax through an injection moulding machine under certain input conditions and with the help of the simulation program Cadmould 3D-F[®], to perfect the injection and the following solidification of the wax. Only thanks to a perfect injection and the following solidification of the wax, a precise wax pattern can be made. In order to compare the process of injecting the wax mixture, we are helped by the Cadmould 3D-F[®] simulation program and the records of the injection taken by a video camera. In this thesis a simulation program used when simulating the injection of plastics was applied, as a means of comparison. In this case the similarity between the rheological characteristics of both wax and plastic was exploited.

Key words

Wax pattern, injection moulding machine, Cadmould 3D-F[®]

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SVOBODOVÁ, R. *Optimalizace technologie vytavitelného modelu s využitím numerické simulace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 79 s., Příloh 1. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Optimalizace technologie vytavitelného modelu s využitím numerické simulace vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum 17.5.2012

.....
Radka Svobodová

Poděkování

Děkuji tímto panu prof. Ing. Milanu Horáčkovi za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále pak děkuji Ing. et Ing. Vojtěchu Kosourovi za pomoc při vypracování experimentální části, spolužákovi Bc. Štěpánu Bochníčkoví za spolupráci při simulacích v programu Cadmould 3D-F[®] a také zaměstnancům slévárny Fimes a.s. v Uherském Hradišti, kteří mi poskytli prostor a zařízení pro experimentální část diplomové práce.

OBSAH

Abstrakt.....	4
Prohlášení	5
Poděkování	6
Obsah	7
Úvod.....	8
1 Teoretická část.....	9
1.1 Princip výroby vytavitelného modelu	9
1.2 Vosky pro výrobu voskového modelu.....	13
1.2.1 Hlavní složky voskových směsí	17
1.2.2 Dělení dle typu vosku	21
1.2.3 Regenerované a rekonstituované vosky	22
1.3 Zařízení na výrobu voskových modelů.....	25
1.3.1 Popis vstřikolisu	26
1.3.2 Tavič a kondicionér.....	24
1.3.3 Ventil na regulaci průtoku.....	26
1.3.4 Průběh plnění formy voskem pomocí vstřikolisu	27
1.3.5 Vstřikování vosku pomocí pístu.....	29
1.3.6 Technologický postup při vstřikování pístem	30
1.3.7 Vstřikování vosku pomocí šneku	31
1.3.8 Co ovlivňuje průtok	33
1.4 Metody simulace.....	34
1.4.1 Simulační program Cadmould	34
1.4.2 Vstupní parametry zadávané do programu Cadmould	35
1.4.3 Vstupní parametry zadávané vstřikolisu	36
2 Experimentální část	48
2.1 Dosavadní výsledky simulace vstřikování.....	48
2.1.1 Matečná forma	48
2.1.2 Model dutiny testovací formy	49
2.1.3 Výpočtové parametry simulace	50
2.1.4 Srovnání simulace a skutečnosti.....	52
2.1.5 Neshody mezi simulací a skutečným průběhem plnění	52
2.1.6 Možnosti upřesnění numerické simulace	60
2.2 Experimentální měření parametrů vstřikolisu	60
2.2.1 Experimentální vybavení pro měření průtoku a teploty.....	60
2.2.2 Měření průtoku	63
2.2.3 Měření teploty.....	71
3 Shrnutí a návrh dalšího postupu.....	73
Závěr.....	74
Seznam použitých zdrojů.....	75
Seznam použitých zkratk a symbolů	77
Seznam Příloh	78

ÚVOD

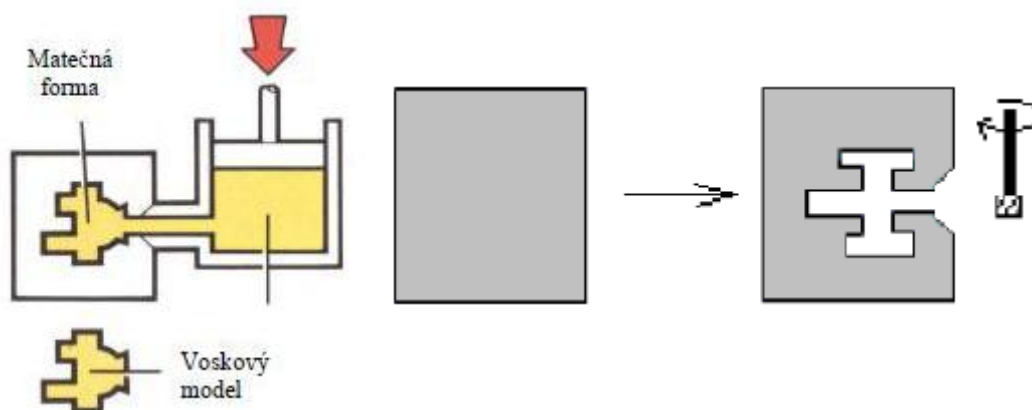
V dnešní době zatím neexistuje simulační program zabývající se průběhem vstřikování a následným tuhnutím vosků. V plastařském průmyslu však takové programy již existují. Proto bylo využito reologické podobnosti plastů a vosků. Do plastařského simulačního programu Cadmould 3D-F[®] byl nadefinován materiál se všemi vlastnostmi vosku a byly provedeny zkoušky simulace plnění a následného tuhnutí vosku ve zkušební formě. Tato simulace byla porovnána s průběhem vstřikování vosku vstřikolisem v určitých časových sekvencích. Protože docházelo k nesprávnému průběhu vstřikování vstřikolisem zvláště u malých průtoků, byly průtoky proměřeny pomocí elektronické váhy, která současně zaznamenávala hmotnostní přírůstek vstřikovaného vosku v časových intervalech. Také byla měřena teplota vstřikovaného vosku bezprostředně po naplnění zkušební misky. Tyto naměřené hodnoty byly vyhodnoceny a tento experiment následně dopomůže k lepšímu nadefinování materiálu (vosku) a zadání vstupních podmínek do simulačního programu Cadmould 3D-F[®].

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 *Princip výroby vytavitelného modelu*

Aby bylo dosaženo co nejdokonalějšího odlitku, je třeba udělat řadu výrobních kroků. Na konečný produkt má vliv mnoho činitelů, výběr vosku, skořepiny i samotný materiál, ze kterého se bude odlévat a mnoho dalších.

A) Výroba modelu



Obr. 1.1.1 Výroba modelu a výroba modelové formy [1]

Nejprve se vyrobí matečná forma pro model. Formy, ze kterých se modely vyrábí jsou většinou kovové. Vyrábí se obráběním, odléváním, galvanoplasticky nebo metalizováním, nejčastěji však obráběním z kovových bloků [1].

Kvalita voskového modelu je velmi důležitá, závisí na ní kvalita hotového odlitku. 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.

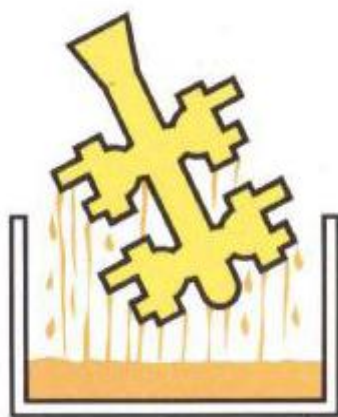
Voskové modely se vyrábějí dvěma způsoby:

- a) vstřikováním do formy
- b) gravitačním litím do formy [1].

B) Sestavování stromečků

Obr. 1.1.2 Stromeček [1]

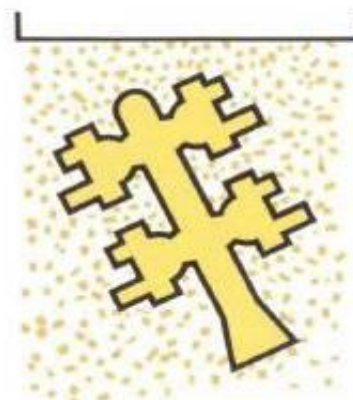
Stromečky jsou sestavovány po minimálně 24 hodinách. Až je dosaženo tzv. „vyzrání“ (stabilizace) voskového modelu. Drobnější modely se sestavují do tzv. „stromečků“ pomocí pájení nebo lepení. Tvar stromečku ovlivňuje způsob připojení modelů, technika obalování, vytavování, lití a oddělování odlitků od vtokové soustavy. Vtoková soustava nebývá vyrobena z panenského vosku (nového), ale z vosku regenerovaného [1].

C) Namáčení do keram. břčky

Obr. 1.1.3 Namáčení [1]

Po vytažení modelu z obalové hmoty a jejím optimálním okapání se na model nanáší posypový materiál – ostřivo, buď fluidním nebo sprchovým způsobem [1].

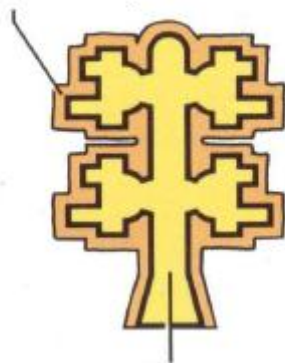
Model (stromeček) se postupně ponořuje do obalové keramické břčky. Ta se skládá z pojiva (alkosoly nebo hydrosoly) a plniva (nejčastěji křemenná moučka). Stromeček musí být před namočením do keramické břčky řádně odmaštěn [1].

D) Posyp keramikou

Obr. 1.1.4 Posyp [1]

Jako ostřívo je nejčastěji použit křemen, molochit, korund, zirkon a silimanit. První dva obaly zajistí kvalitní povrch výsledného odlitku. Třetí a další obaly mají zesilovací funkci a zároveň zajišťují prodyšnost formy [1].

E) Dokončená skořepina
Keramická skořepina



Jednotlivé obaly se suší na vzduchu (řízená teplota, vlhkost a proudění) nebo působením plynného činidla (čpavku) [1].

Obr. 1.1.5 Skořepina [1]

F) Vytavení vosku



Vosk se ze skořepiny vytavuje dvěma způsoby:

1) za vysoké teploty

- vložení formy s voskem do pece o teplotě min. 750 °C s následným žíháním na 900 – 1000 °C

2) za nízké teploty

- ve vroucí vodě

- v přehřáté páře v autoklávu

(0,3 – 0,6 MPa , t = 135 –165 °C)

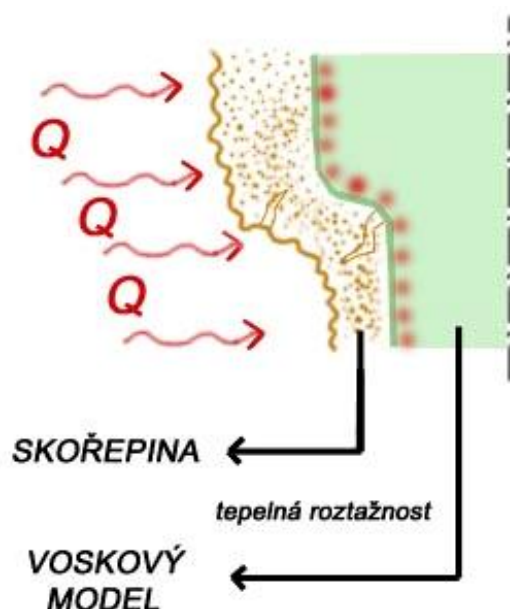
Obr. 1.1.6 Vytavení vosku [1]

či bojlerklávu (t = 160 –170 °C, 6-8 atmosfér za dobu 4-5 s) řídí se zde rychlost i tlak

- dielektrickým ohřevem (ohřev navlhčené skořepiny umístěné v poli vysokofrekvenčních oscilací)

- proudem teplého vzduchu (do středu voskového modelu) [1].

Nejčastěji se používá přehřátá pára, má totiž ideální vlastnosti pro přenos tepla, vytavený vosk se snadno sbírá a účinnost je vysoká [2].

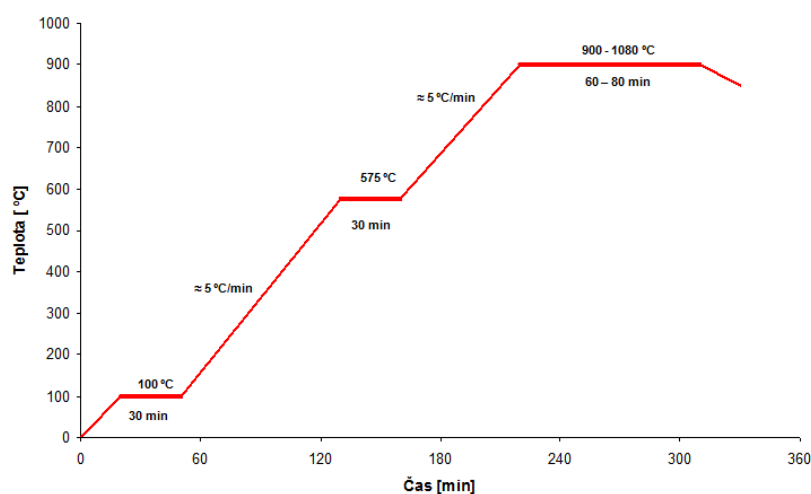


Největším problémem při vytavování vosku ze skořepiny je rozdílná roztažnost skořepiny a vosku. Protože je roztažnost vosku větší, hrozí při tepelném šoku (rychlý ohřev skořepiny s voskem) nebezpečí roztržení skořepiny. Proto je nutné vytvořit tzv. dilatační spáru na povrchu voskového modelu [2].

Obr. 1.1.7 Schéma tepelného šoku [1]

Po vytavení vosku následuje keramizační žíhání skořepiny [1].

Cílem je zde převod amorfnní formy vazné vrstvičky SiO_2 na krystalickou formu a také odstranění těkavých látek (ty zde představují zbytky vosku) [2].



Obr. 1.1.8 Teplotní průběh cyklu žíhání keramické skořepiny [2]

Gravitační:

- 1) klasické lití
- 2) sklopné lití

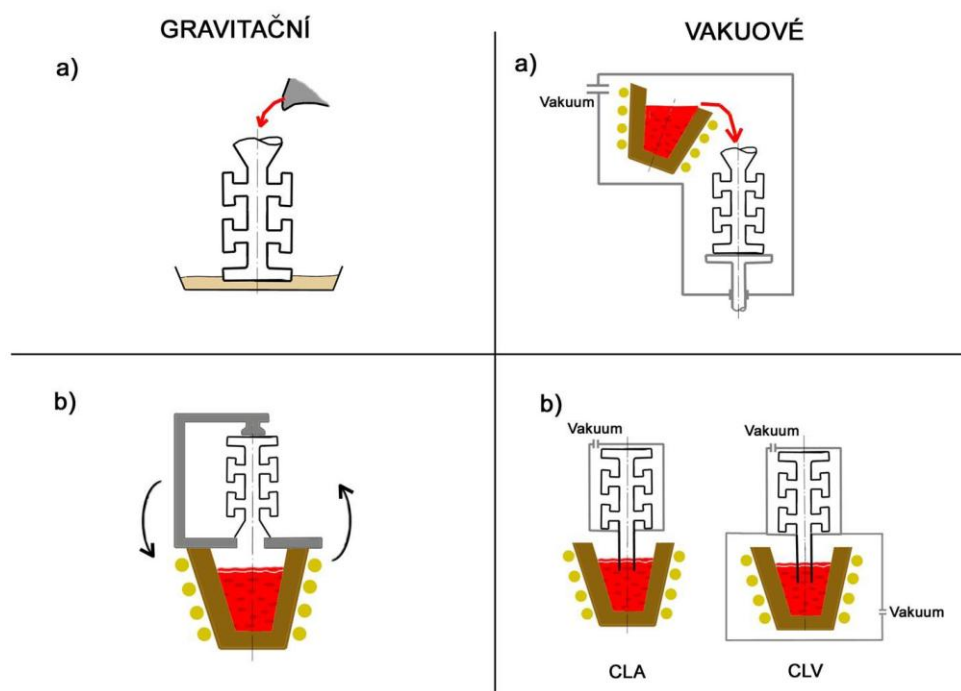
Za použití vakua:

- 1) Tavení a gravitační lití ve vakuu
- 2) Vakuové nasávání (CLA , CLV) [2]

G) Lití kovu



Obr. 1.1.9 Odlévání [1]



Obr. 1.1.10 Způsoby odlévání skořepinových forem [2]

1.2 Vosky pro výrobu voskového modelu

Dnes pojem slévárenský vosk znamená termoplastický materiál s vlastnostmi podobnými vosku. Dnes mají tyto modelové směsi mnoho komponent, aby vyhovovaly mnoha požadavkům. Vosk se může lít nebo formovat v tekutém, plastickém nebo polotuhém stavu [3].

Současné vosky – komplexní materiály obsahující následující složky:

- přírodní vosky
- syntetické vosky
- přírodní pryskyřice
- syntetické pryskyřice
- organická plnidla
- vodu

Kombinace různých vlastností surovin k dosažení optimálních charakteristik:

- | | |
|-------------------------|----------------------------|
| - bod tavení a tuhnutí | - obsah popela (< 0,05%) |
| - tvrdost | - pružnost |
| - viskozita | - povrchová kvalita |
| - roztažnost/smrštivost | - stabilita vůči oxidaci |
| - rychlost tuhnutí | - možnost regenerace [2] |

Reologie vosků

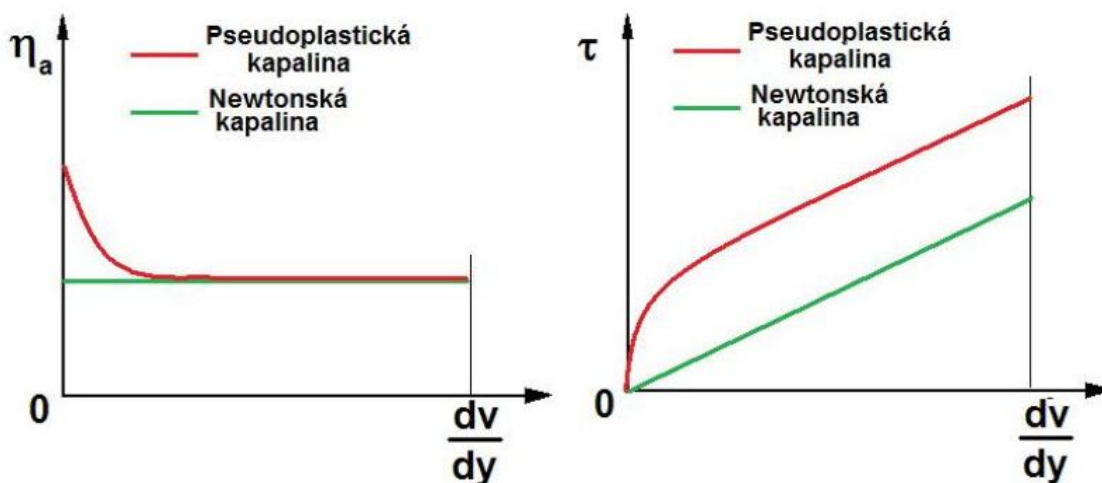
Veškeré kapaliny se dělí na Newtonovské a Nenevtonovské. Jejich největším rozdílem je jejich schopnost tečení způsobená především viskozitou. Nenevtonovskými kapalinami nazýváme ty kapaliny, které se neřídí Newtonovým zákonem. Tyto kapaliny nejsou kapalinami v pravém slova smyslu. Jedná se například o roztoky, suspenze, taveniny polymerů, různé plasty, tekuté vosky, emulze, směsi pevných látek s kapalinami apod., nebo makromolekulární látky. Přesto se jedná o látky, které v podstatě tečou. Považujeme je za kapaliny s proměnnou viskozitou [4].

Pro ně jejich viskozita není fyzikální konstantou závislou pouze na tlaku a teplotě, ale je také funkcí tečného napětí, popř. smykové rychlosti. Ve vzorci o Newtonově zákonu

$$\eta = \frac{\tau}{dv/dy} \quad [\text{Pa.s}] \quad (1.1),$$

kde η je dynamická viskozita kapaliny

[$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$] a dv/dy je rychlostní spád. Na rozdíl od Newtonova zákona o viskozitě v příslušném vzorci, není zde η stálé, ale závisí na τ nebo na $\gamma' = dc/dn$. Závislost mezi tečným napětím τ a gradientem rychlosti $\gamma' = dc/dn$ se vynáší do diagramu, který obecně nazýváme reogramem [5].



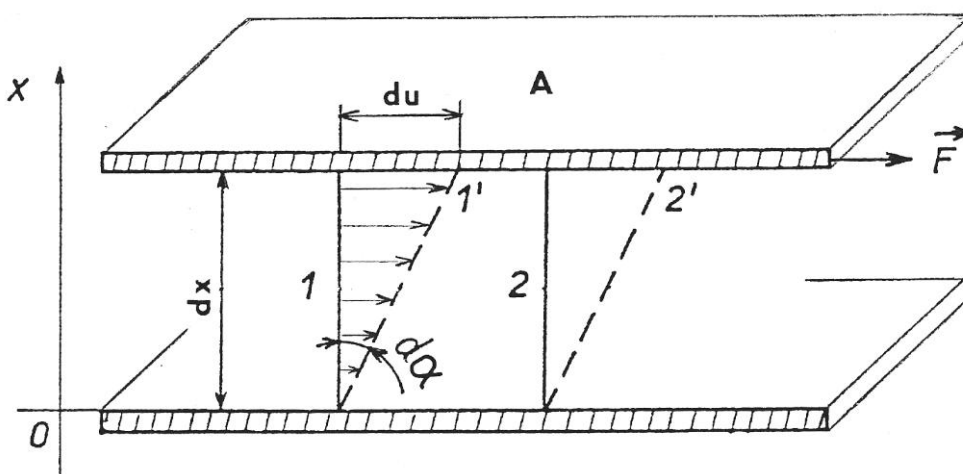
Graf. 1.2.1 Reogramy kapalin [6]

Platí, že pro newtonovskou kapalinu je tato závislost přímková, ale pro nenewtonovskou kapalinu je to křivka.

Vlastnosti těchto kapalin se mohou měnit v závislosti na době působení smykového napětí – to jsou kapaliny s časově závislými reologickými vlastnostmi, a kapaliny, jejichž vlastnosti nezávisí na čase, jsou nenewtonské kapaliny s časově nezávislými reologickými vlastnostmi. Pro ideálně viskózní materiály platí pro tečné napětí Newtonův zákon:

$$\tau = \eta \cdot \frac{du}{dx} = \eta \cdot D \text{ [Pa]} \quad (1.2),$$

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 [5].



Obr.1.2.1 Rychlostní profil toku v kapalině mezi nepohyblivou a pohybující se deskou [6]

Kapaliny pseudoplastické

Vosky řadíme právě mezi pseudoplastické kapaliny. Jedná se většinou o makromolekulární látky. Když tečné napětí nepůsobí, jsou molekuly orientovány nepravidelně, ale když působí, tak se molekuly orientují tak, aby kladly vzájemnému pohybu kapaliných vrstev menší odpor. Proto také napětí roste pomaleji, než smyková rychlost. Jejich zdánlivá viskozita se s rostoucím gradientem rychlosti zmenšuje. Podle průběhu tokové křivky se někdy rozlišují dvě podskupiny:

- pseudoplastické kapaliny
- strukturně viskózní kapaliny, u nichž můžeme stanovit dvě hodnoty

zdánlivé viskozity [5].

Podle složení rozdělujeme modelové vosky do tří základních skupin:

1. Přímé - Neplněné voskové směsi

Tyto vosky jsou komplexem mnoha vosků a pryskyřic. Při použití tohoto vosku ale může nastat kavitace (stahování) v jakékoli tuhé části voskového modelu, a to i přesto, že je používáno chlazení formy dle specifikace, které právě proti stahování pomáhá u mnoha jiných voskových modelů. I přes

tento problém s kavitací je přímý vosk používaný v mnoha slévárnách [4]. Povrch je zpravidla lesklý. Využívá se jak na vtoky, tak na modely [7].

2. Plněné voskové směsi

Některé slévárny preferují právě tento vosk. Chemický základ plněné voskové směsi je podobný jako u vosků emulzifikovaných i přímých, ale ve směsi je přimícháno plnivo ve formě prášku. Plnivo není rozpustné v základním vosku. Plnivo je organickou sloučeninou a tím zajistí kompletní vyhoření plniva bez zbylých popelových částic. Je také důležité použít správnou velikost částice plniva, aby nebyl zhoršený povrch. A aby byla zajištěna minimální sedimentace plniva v tekutém vosku, je třeba zajistit co nejpodobnější hustotu a hmotnost plniva se základní voskovou hmotou. Výhodou plněných vosků je malé, nebo žádné stahování, které bývá v masivních částech modelu a také větší pevnost velkých a také tenkostěnných modelů. Práce s voskem je jednoduchá, ale je nutné se vyhnout sedimentaci plniva ve vosku, dodržováním pokynů výrobce [4]. Díky vyspělé technologii je možné použít tyto vosky i rekonstituované a to na vtoky nebo modely [7]. Tyto vosky obsahují 30% plniva [2].

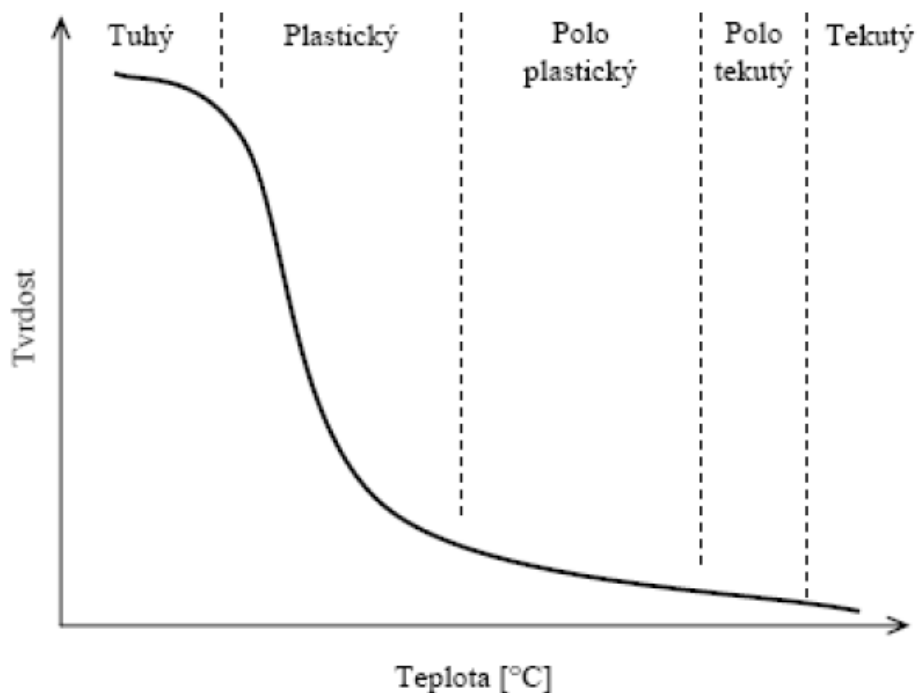
3. Emulzifikované voskové směsi

Základní chemické složení emulzifikovaného vosku je podobné jako u vosků přímých, ale navíc je emulzifikovaný vodou. Voda se chová částečně jako plnivo, proto se zde vyskytuje méně staženin [4]. Vody je zde 7-12% a tím se snižuje kavitace. Po rekonstituci mohou být použity jak na vtoky, tak na modely [7]. Povrch voskových modelů je pak extrémně hladký [4].

1.2.1 **Hlavní složky voskových směsí**

Voskové směsi se dělí podle původu na přírodní a syntetické, dále pak přírodní směsi dělíme na „měkké“ a „tvrdé“ [1].

Na rozdíl od homogenních chemických sloučenin, vosk se netaví okamžitě při zahřátí, ale prochází několika přechodnými stavy [5].



Graf. 1.2.1.1 Závislost tvrdosti vosku na teplotě [2]

- **Přírodní směsi**

1) „Měkké“ hmoty – nejčastěji se používají při výrobě modelů gravitačním litím, mezi hlavní složky řadíme parafín a cerezín [1].

Cerezín

Směs je tvořena z tvrdých metanových uhlovodíků, v čisté podobě má tvar malých krystalků tvaru jehliček. V porovnání s parafínem má vyšší teplotu měknutí a je odolnější vůči deformacím. Obsah popela je do 0,03%. Nevýhodou je vedle poměrně nízké pevnosti, tvrdosti a plasticity značné lineární smrštění, a to až 3,5% [1].

Parafín

Směs je tvořena tvrdými nasycenými uhlovodíky, měkne již při teplotě 30°C. Teplota tavení závisí na stupni jejich rafinace a pohybuje se v rozmezí 42-64°C. Obsah popela je do 0,1%. Nevýhodou je křehkost a nízká pevnost [1].

2) „Tvrdé“ hmoty – používají se pro výrobu voskových modelů na vstřikolisech, mezi hlavní složky patří: montánní vosk, romonta a kalafuna [1].

Montánní vosk

Ve směsi jsou obsaženy voskové a pryskyřičné látky s podílem asfaltických látek. Poměr těchto dvou látek určuje kvalitu surového vosku. Používá se jako hlavní složka „tvrdých“ modelových směsí a dává jim charakteristické vlastnosti, těmi je: tvrdost, úzký interval tuhnutí a úměrná stabilita za normální i zvýšené teploty. S narůstajícím obsahem asfaltických látek se kvalita montánního vosku snižuje. Tyto látky mají vyšší teploty tavení než vlastní modelová hmota, a to až 120 °C [1].

Romonta

Jedná se o směs monokarbidové kyseliny, hydrokyseliny a jejich esterů, ale také montánní pryskyřice a asfaltických částí. V kombinaci s cerezí se používá vosk romonta, čímž vzniká velmi rychle tuhnoucí binární sloučenina. Právě toto rychlé tuhnutí způsobuje praskání gravitačně litých modelů. Aby se prodloužil interval tuhnutí, přidává se do této směsi další složka, a tou je kalafuna [1].

Kalafuna

Kalafuna je tvrdá složka smoly jehličnatých stromů. Pro směsi se nejčastěji používá kalafuna ze smoly borovice s obsahem popela do 0,04 % a teplotou měknutí minimálně 66 °C [1].

- **Syntetické směsi**

Syntetické vosky jsou složeny z následujících složek:

- pryskyřice
- vosky a polymery
- plnivo

Pryskyřice

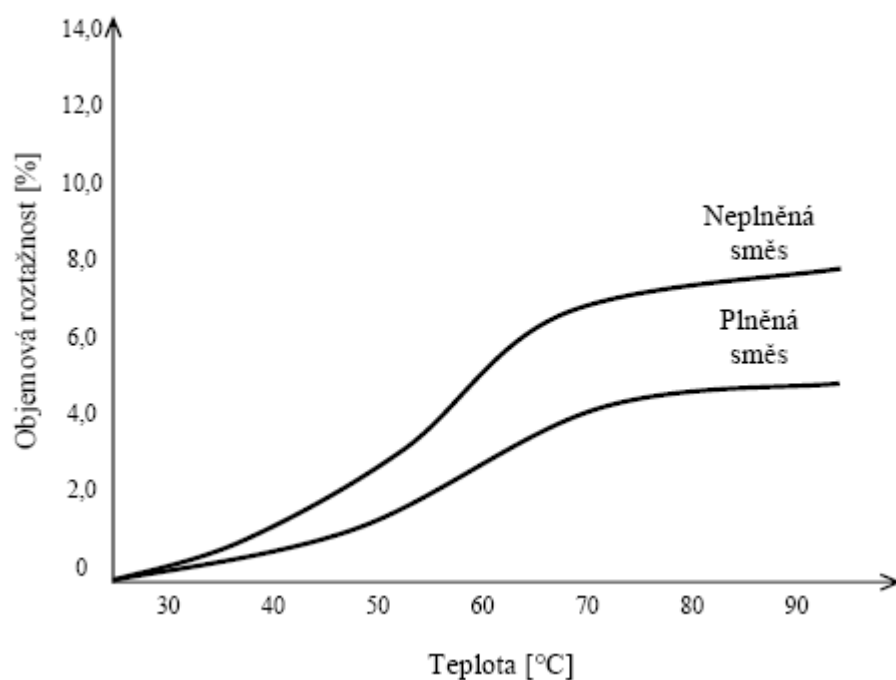
Pryskyřice je amorfní a v ideálním případě inertní látka. Ve směsi má úlohu ztekucovadla. Podle původu je můžeme dělit na přírodní, částečně syntetické a plně syntetické. Je nutné použití stabilizátoru, protože většina pryskyřic není úplně inertní a oxiduje [1].

Vosky a polymery

Vosk je řazen mezi inertní krystalické látky. Kvalitní vosk nelze vyrobit pouze z ropného vosku, a proto je míchán ze směsí více vosků s polymery. Polymery zvyšují viskozitu a tím do značné míry ovlivňují fyzikální vlastnosti. Vosky se dělí podle původu na petrolejové, syntetické a přírodní [1].

Plnivo

Porovnáme-li neplněné s plněnými směsmi, plněné se vyznačují zejména významně nižším smrštěním, 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. A to je pro vytavování vosků ze skořepiny velmi důležité, hrozí totiž jejich popraskání. Výběrem správného plniva můžeme velmi podstatně ovlivnit mechanické, tepelné a chemické vlastnosti voskové směsi [1].



Graf. 1.2.1.2 Vliv plniva na objemové změny vosku [1]

1.2.2 Dělení dle typu vosku

Vosky pro modely

Přímý (neplněný)

Nepřímý

Emulzifikovaný [7]

Vosky pro vtoky

K výrobě vtokové soustavy slouží vtokové vosky. Většinou obsahují méně, nebo dokonce žádné polymerové plnivo. Teplota tavení je nižší než teplota tavení modelového vosku. Důvodem je nutnost, aby se vtokový vosk vytavil dříve než později se tavící modelový vosk. Ten pak má kudy ze skořepiny odtékat [7] . Mimo jiné zvyšuje pevnost vtokového kůlu [8] .

Vosky vyplavitelné vodou

Tyto vosky se používají k výrobě jader. Vosk se rozpouští ve vodním roztoku kyseliny citronové [7] . Je pro vnitřní složité tvary [8] .

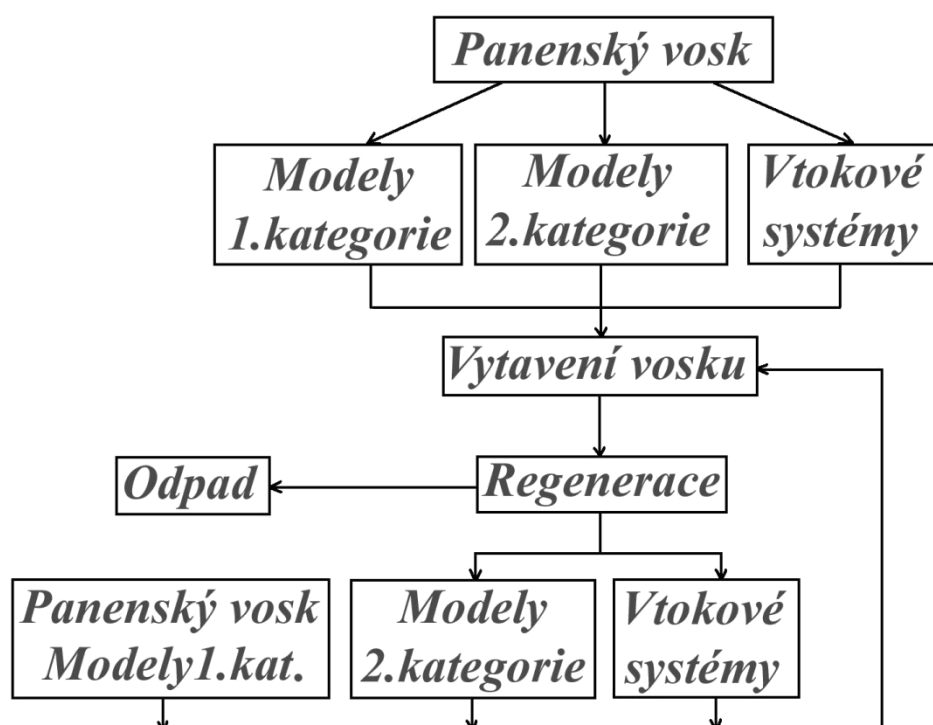
Speciální vosky

Speciální vosky se většinou používají k opravám, namáčení a lepení [8]. Mohou se jimi opravovat defekty voskových modelů, přilepovat ulomené části (adhezní), nebo se mohou používat jako části vtokové soustavy („rod wax“) [7].

1.2.3 Regenerované a rekonstituované vosky

Regenerovaný vosk

Obnova vosků patří k podstatné části obchodní činnosti dodavatelů, vedly k tomu trendy hospodářské a ekologické. Dříve byly využívány jako ekonomicky výhodná alternativa pro výrobu vtoků a nálitků. Konkurence nutí k šetření spotřebního materiálu, je totiž vyšší poptávka po cenově výhodných produktech. Dnes mají regenerované vosky stejné vlastnosti jako vosky panenské [8].



Obr.1.2.3.1 Regenerace vosku [8]

Nejčastější způsoby regenerace

- Sedimentace

Jedná se o nejstarší způsob regenerace. Vosk je nejprve roztaven, homogenizován a pak je ponechán v tekutém stavu. Na dně se usadí voda, keramické nečistoty a plnivo, protože mají větší hustotu. Po určité době se může vosk odlít a poté znovu použít. Nevýhody této metody jsou: časová náročnost a přesnost při nastavení teploty [8].

- Filtrace

Zde je využíván filtrační lis. Vosk z autoklávu je přes něj přečerpán. Pak vosk teče přes filtrační textili. Díky filtrační kůře se plnivo, keramické nečistoty a spaliny usadí na textili. Jakmile je filtrační lis zaplněn a tok vosku přerušen, je lis otevřen a vyčištěn. Filtrační kůra je zlikvidována podle předpisů [8].

- Odstředivý způsob

Ve vosku je vyšší obsah plniva. Nejprve je vosk z autoklávu přečerpán do vysokorychlostní centrifugy a částice s vyšší hustotou než vosk se oddělí. Ale částice s podobnou hustotou zůstávají ve vosku.

Nevýhodou této metody je, že odstředěný vosk obsahuje vyšší podíl popela než vosk filtrovaný [8].

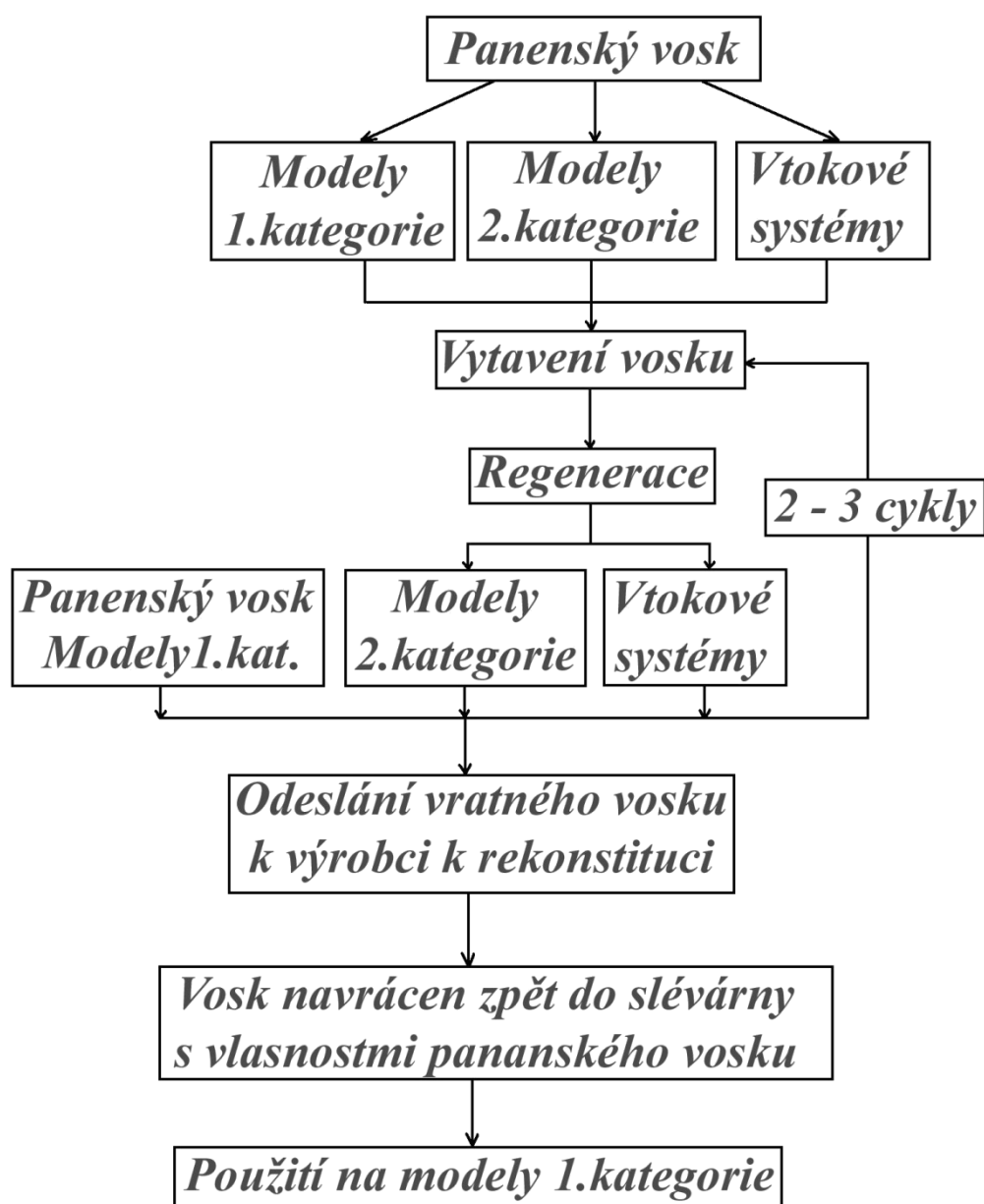
Rekonstituovaný vosk

Jedná se o proces, při kterém buď vosk vytavený slévárnou v autoklávu nebo slévárnou použitý vosk známého druhu může být vyčištěn a smíchán s novými surovinami. Jinými slovy řečeno je rekonstituován na dohodnutou specifikaci a vrácen pro použití k výrobě modelů.

Takto rekonstituovaný vosk je používán pro výrobu modelů 1.kategorie.

Rekonstituovány mohou být všechny druhy vosků:

- neplněný
- emulzifikovaný
- plněný [8]



Obr.1.2.3.2 Schéma rekonstituce [8]

Rozdíly mezi panenským a rekonstituovaným voskem v kvalitě a specifikaci nejsou. Zato v ceně včetně transportu je cena pananského 100% a rekonstituovaný 65 – 70%. Díky regeneraci a rekonstituci jsou značné úspory nákladů, výhody z ekologického hlediska a navíc užívání rekonstituovaného vosku staví slévárnu do popředí z hlediska technologie vosku [8].

„Výrobci se neustále snaží voskové směsi zdokonalovat, důraz je kladen na kontrolu jakosti voskové směsi. Tento aspekt se projeví vyšší cenou vosků. Pro slévárnu je přitom důležitá nejen otázka ceny a kvality vosků, ale i jejich následná regenerace a rekonstituce, které mohou přinést značné úspory nákladů. Proto slévárna musí dobře zvážit svou technologii vosku pro budoucí období.“ [8]

1.3 *Zařízení na výrobu voskových modelů*

V dnešních moderních slévárnách přesného lití se na výrobu voskových modelů používají především vstřikolisy pracující za vysokého tlaku s co nejnižší teplotou vosku. Vstřikolisy se používají především pístové, existují i šnekové (ty se využívají při vstřikování plastů), ale pro svoji vysokou cenu se neujaly. Výhodou šnekových vstřikolisů je možnost natavení a následného vstřiku jen požadovaného množství plastové směsi. U pístových vstřikolisů je v plnicím válci větší množství voskové směsi (v případě vstřikolisu Shell-o-matic 35T-20/28 je to 5 litrů). A vstřikování probíhá po částech [9].

Rozhodujícími parametry pro výrobu kvalitních voskových modelů, bez ohledu na typ stroje jsou:

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

- Doba vstřikování a doba výdrže - měla by být dostatečná k zajištění kvalitního povrchu voskového modelu [10].

1.3.1 Popis vstřikolisu

Každý vstřikolis musí mít pevnou, tuhou a těžkou konstrukci schopnou odolat otřesům a vibracím, které jsou způsobené provozem stroje. Vstřikolisy se na trhu pohybují již desítky let. Jejich stavba se v zásadě nemění, pouze se vylepšují detaily v technických řešeních konstrukce, ovládání a údržby. V dnešních slévárnách se nejvíce používají dvě koncepce lisu, protože jsou schopny obsloužit od nejmenších až po velmi velké formy. Lis s rámem „C“ a lis se čtyřmi sloupy [9].



Obr.1.3.1.1 Vstřikolis MPI s C rámem
čtyřsloupový řady 55 [9]



Obr.1.3.1.2 Vstřikolis MPI
řady 35 [9]

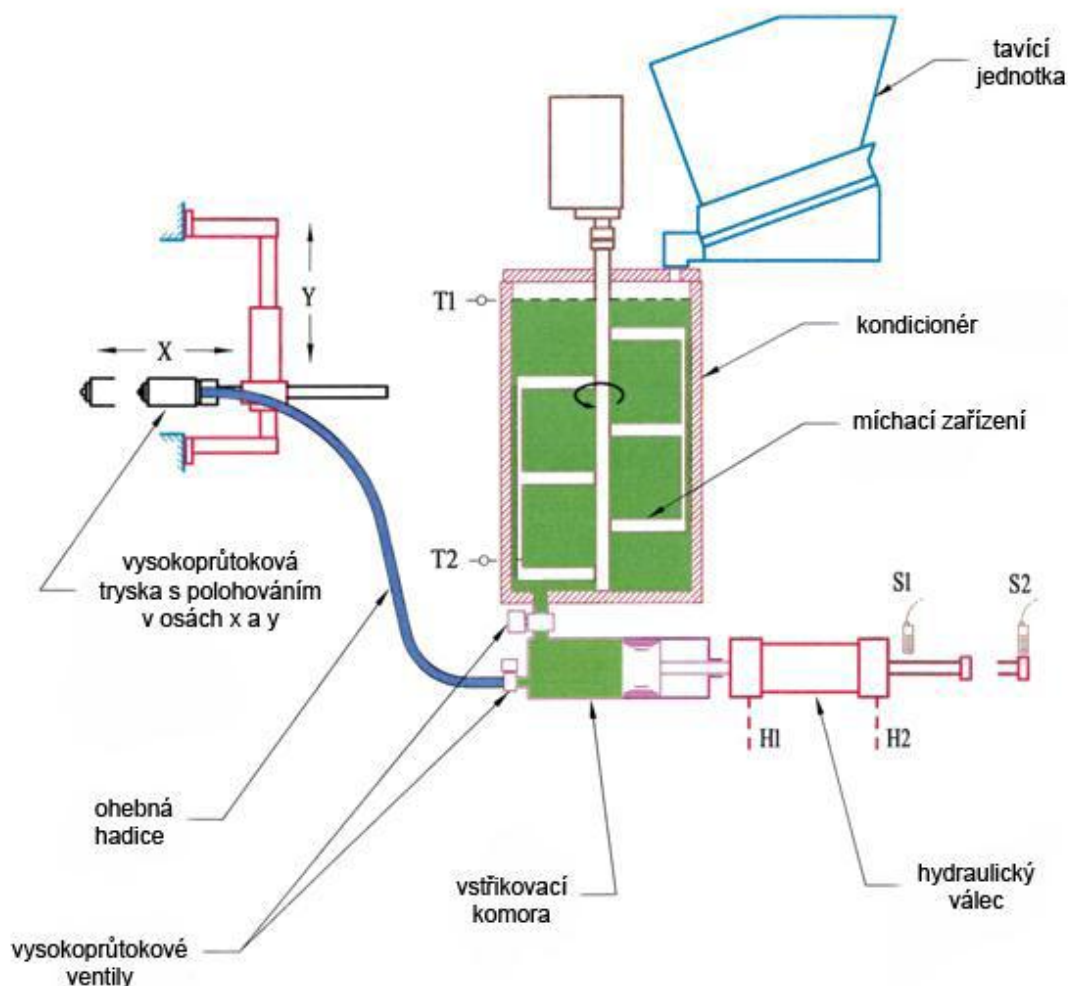
Typ vstřikolisu	Závěrná síla [t]	Max. tlak vstřiku [MPa]	Objem jednoho vstřiku [l]	Zdvih [mm]	Světlá šířka [mm]	Světlá hloubka [mm]
MPI 55-100-38	91	3,5-70	18,5	965	864	1016
MPI 35 300	272	3,5-70	18,5	1219	1524	1524
Shell-O-Matic 35T-20/28	34	7-70*	5	470	470	470

Tab.1.3.1.1 Parametry zástupců vstřikolisů různých koncepcí amerického výrobce MPI a vstřikolisu Shell-O-Matic [9]

*Minimální vstřikovací tlak 7 barů je dle specifikací výrobce, i když lis funguje a plní formy už od 1 MPa.

Vstřikolis umožňuje vstřikovat pod různými tlaky tvrdý vosk za přesně kontrolované rychlosti tečení a teploty. Díky tomu je možno dosáhnout bezchybné kvality při plnění velké či tenkostěnné formy. Při plnění nedochází ke vzniku studených spojů, vzduchových bublin a nezatečených tvarů. Nejmodernější vstřikolisy jsou řízeny počítačem. Jedná se o složitá zařízení s rozsáhlými možnostmi regulace a řízení plnění formy. Pomocí počítače můžeme regulovat tlak vosku v trysce i ve formě, teplotu vosku v trysce a průtok vosku do formy i průběh plnění. Právě kontrola plnění formy pomocí řízení průtoku poskytuje kvalitnější voskové modely než standardní kontrola plnění pomocí průběhů tlaků. Při příliš rychlém plnění vosku může dojít k uzavření vzduchu v modelu a tím tvorbě vzduchových defektů. Při příliš pomalém plnění může být vosk chladnější a tím docházet ke studenému spoji – tzv. zavalenině. Při výběru lisu není hlavním parametrem pouze maximální vstřikovací tlak a maximální velikost formy, ale důležitý je i objem jednoho vstřiku, či manuální nebo počítačové řízení. Maximální vstřikovací tlak je dán velikostí vstřikovacího válce, který tlačí vosk do trysky. Právě objem vstřikovacího válce musí odpovídat maximálnímu objemu jednoho vstřiku. K jednomu typu vstřikolisu se mohou nainstalovat válce o různých objemech. Na trhu jsou běžně dostupné válce o objemu 2 až 40 litrů. Pro správný provoz lisu je důležitý i zásobník vosku. Dnes se zásobníkem myslí speciální tank vyhříváný v několika patrech na různé teploty. Dříve bývaly zásobníky vosku vyhřívány na jednu konkrétní teplotu. Takto vyhříváný zásobník vosku se nazývá kondicionér. Protože na kvalitní voskový model má vliv vstřikovací teplota. Právě díky kondicionéru je možnost regulace teploty vosku vstupujícího do trysky lisu ve velkém rozsahu teplot. Svým způsobem funguje jako chladič vosku, který je dopravován a má teplotu tavení. Na výstupu z kondicionéru má vosk kašovitě skupenství o teplotě blízké se teplotě tuhnutí vosku. Hlavním prvkem kondicionéru je rošt v možnostech regulace teploty, na který se položí pelety, hroudy nebo čocky vosku, které se nejlépe taví. Pro lepší manipulaci s čockami může být použito

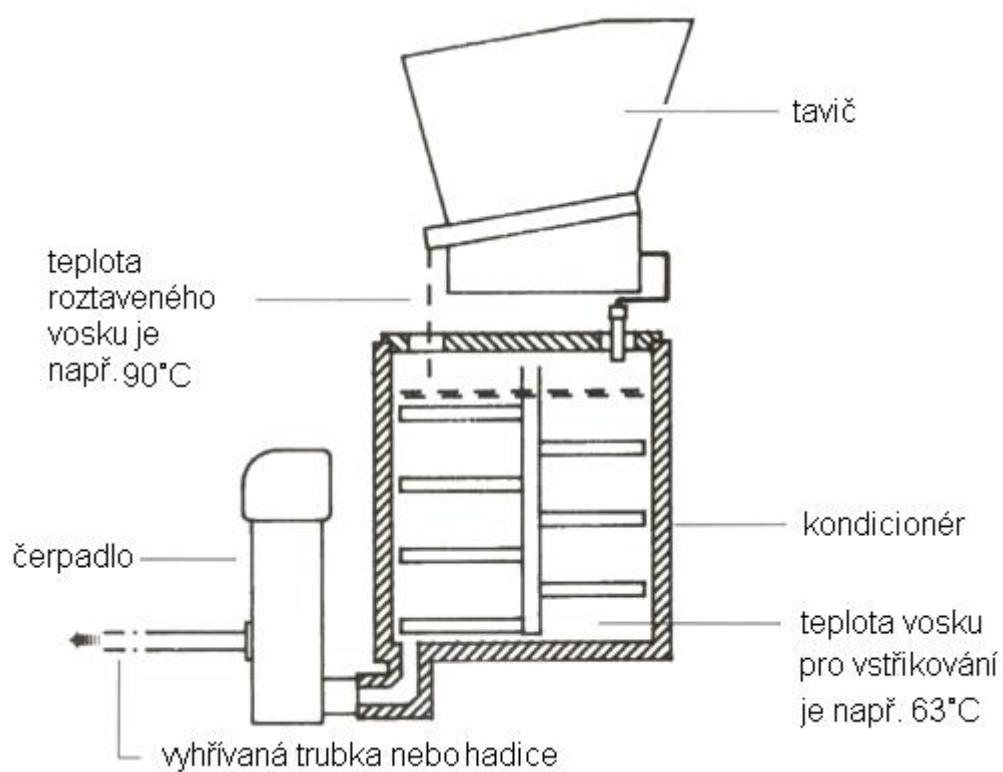
podtlakové nasávání do taviče. Roztavený vosk do kondicionéru nejčastěji dodává tavič [9].



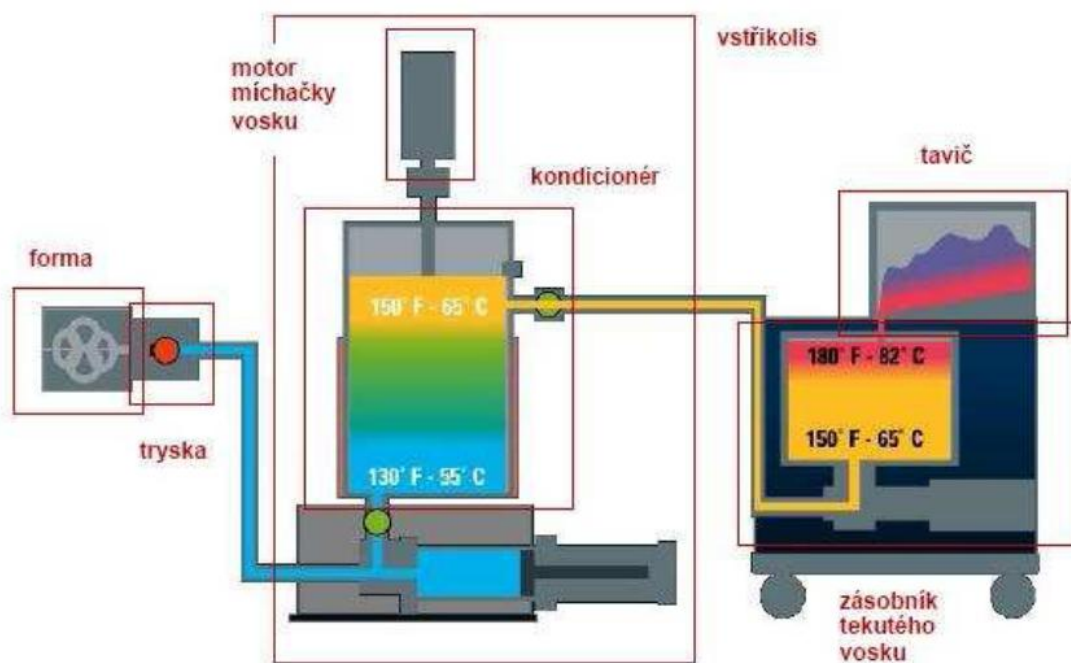
Obr. 1.3.1.3 Zařízení pro výrobu voskových modelů-obecné schéma
(vstřikolis, tavičí jednotka a kondicionér) [2]

1.3.2 Tavič a kondicionér

Tavičí zařízení tzv. tavič slouží k roztavení voskových granulí či čoček často plněných např. polystyrenem. V taviči se vosková směs nataví maximálně na 90 °C, poté se směs musí ochladit v kondicionéru za neustálého míchání na co nejnižší teplotu vhodnou pro vstřik. Většinou na teplotu kolem 65°C, pak jde vosková směs do čerpadla, které směs vhání do trysky, která končí v ústí formy [9].



Obr. 1.3.2.1 Tavič a kondicionér [2]

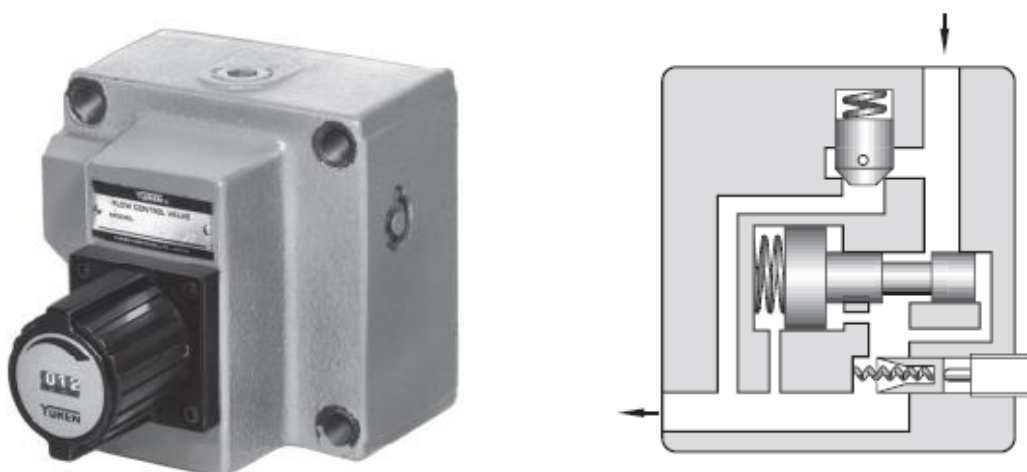


Obr. 1.3.2.2 Schéma vstřikolisu s kondicionérem a tavičem [2]

1.3.3 Ventil na regulaci průtoku

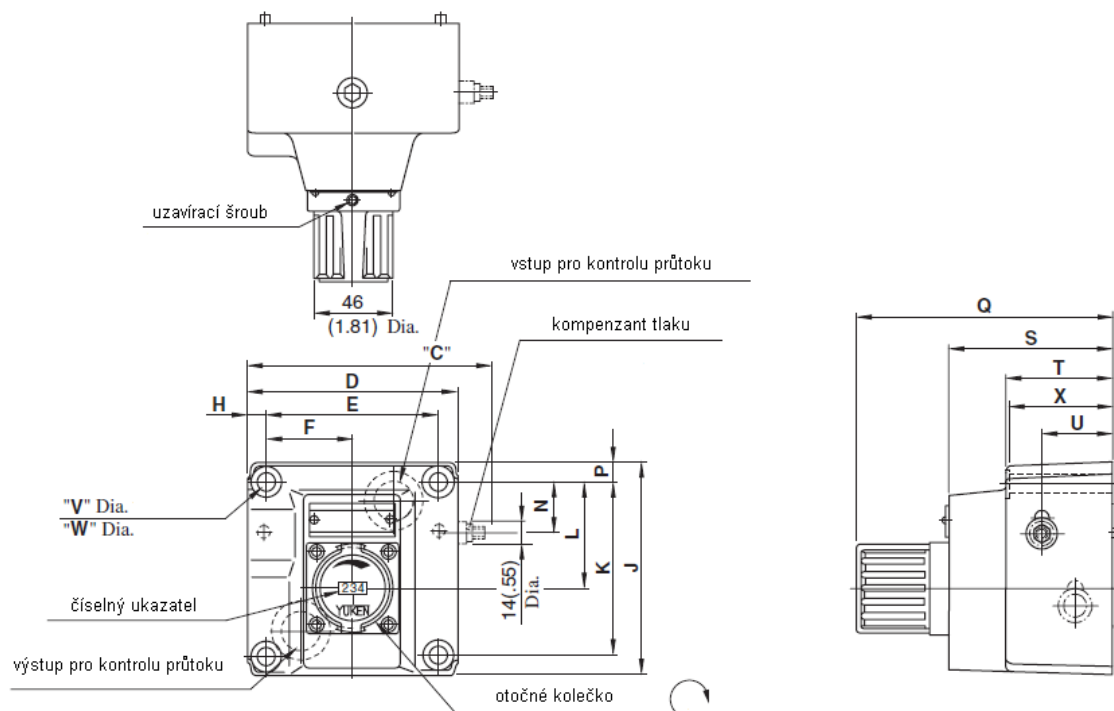
Průtok se na vstřikolisu reguluje pomocí ventilu, maximálně lze průtok nastavit na 1000 dílků. Výrobce v manuálu uvádí, že tyto ventily po nastavení určitého tlaku udržují konstantní průtok nezávisle na změně v systému tlaku (zatížení) a teploty (viskozita vosku). Kontrolují průtok hydraulického okruhu a nakonec ovládají přesnou rychlost. Ventily s integrovaným zpětným ventilem umožňují kontrolovaný průtok.

Na vstřikolisu jsou oba ventily typu FG FCG 02-30-30. Dle manuálu je maximální možný průtok 30 l/s, minimální možný průtok 0,05 l/s. Hmotnost ventilu je 3,8 kg. Průtok ventilu se zvyšuje otáčením ve směru hodinových ručiček a snižuje se otáčením v opačném směru [11].



Obr. 1.3.3.1 Ventil FG FCG 02-30-30 a jeho schéma [11]

FG/FCG-02-30-*-30/3090
FG/FCG-03-125-*-30/3090



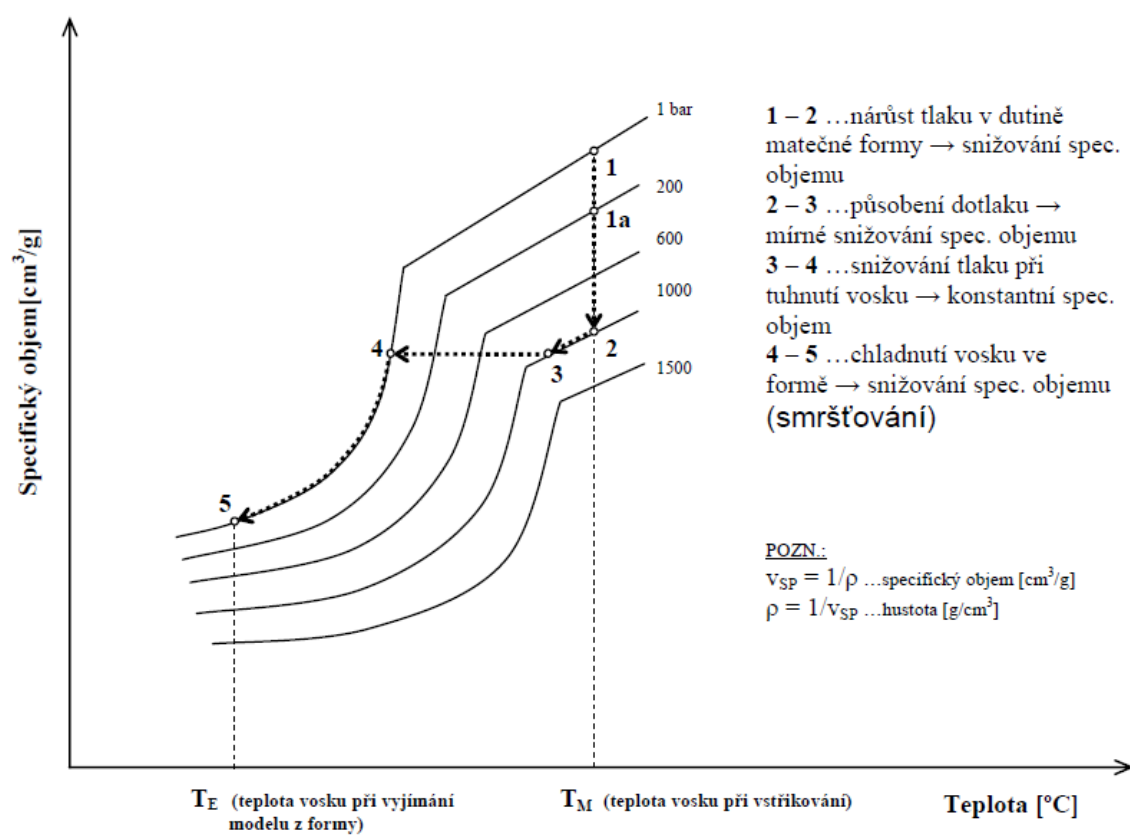
Obr. 1.3.3.2 Schéma ventilu FG FCG 02-30-30 [11]

Model No.	Dimensions mm (Inches)																	Y
	C	D	E	F	H	J	K	L	N	P	Q	S	T	U	V	W	X	
FG FCG-02	116 (4.57)	96 (3.78)	76.2 (3.00)	38.1 (1.50)	9.9 (.39)	104.5 (4.11)	82.6 (3.25)	44.3 (1.74)	24 (.94)	9.9 (.39)	123 (4.84)	69 (2.72)	40 (1.57)	23 (.91)	8.8 (.35)	14 (.55)	39 (1.54)	1
FG FCG-03	145 (5.71)	125 (4.92)	101.6 (4.00)	50.8 (2.00)	11.7 (.46)	125 (4.92)	101.6 (4.00)	61.8 (2.43)	29.8 (1.17)	11.7 (.46)	152 (5.98)	98 (3.86)	64 (2.52)	41 (1.61)	11 (.43)	17.5 (.69)	63 (2.48)	2

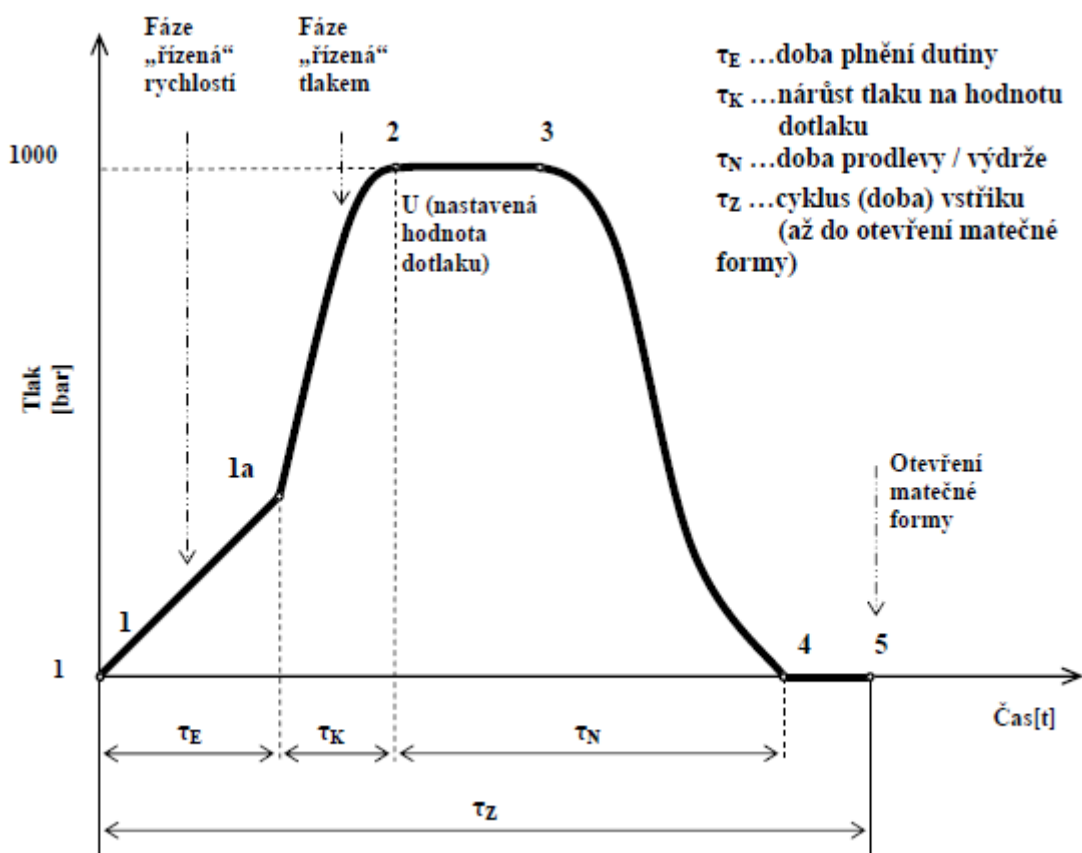
Tab.1.3.3.1 Rozměry ventilu [11]

1.3.4 Průběh plnění formy voskem pomocí vstříkolisu

Parametry ovlivňující konečnou velikost voskového modelu jsou parametry vstříku. Myslí se tím tlak plnění, doba plnění, dotlak a výdrž pod tlakem. Větší rozměry modelu zajišťuje velká rychlost ochlazování formy a voskového modelu. Ochlazování modelu může být buď prováděno chlazením modelu ve vodě nebo na vzduchu a ochlazování formy se může provádět na beranech vstříkolisu. Konečný rozměr voskového modelu je tím stabilnější, čím intenzivnější je ochlazování. Stále platí podmínka, že teplota vosku musí být co nejblíže teplotě tuhnutí vosku. Čím má vosk vyšší teplotu, tím větší bude rozměrová změna [9].



Graf. 1.3.4.1 Vstřikovací parametry [2]



Graf. 1.3.4.2. Typický profil průběhu tlaku v dutině matečné formy při vstřikovacím cyklu [2]

1.3.5 Vstřikování vosku pomocí pístu

1. Vstřikovací válec se po každém vstřikování automaticky znovu naplní voskem.

2. Pístnice s kroužkem R se normálně pohybuje ve směru plnění do blízkosti konce fyzické pojezdové dráhy válce a pak se sepne polohový spínač S1.

3. V závislosti na rychlosti plnění a viskozitě vosku R poněkud odskočí dozadu

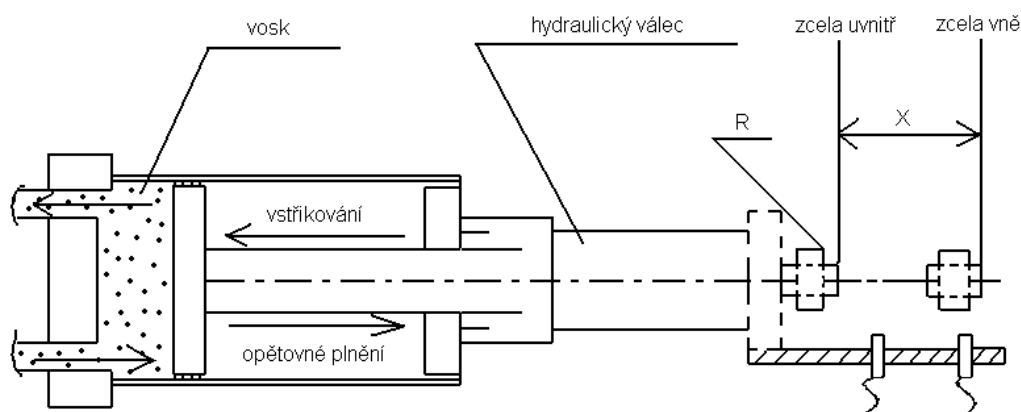
4. Aby se toto odskočení minimalizovalo a vyloučila se jakákoliv možnost nasátí vzduchu, je nutno sledovat plnicí rychlost vstřikovacího válce.

5. Plný pojezd dráhy X mm by měl trvat přibližně t sekund, neměl by být rychlejší.

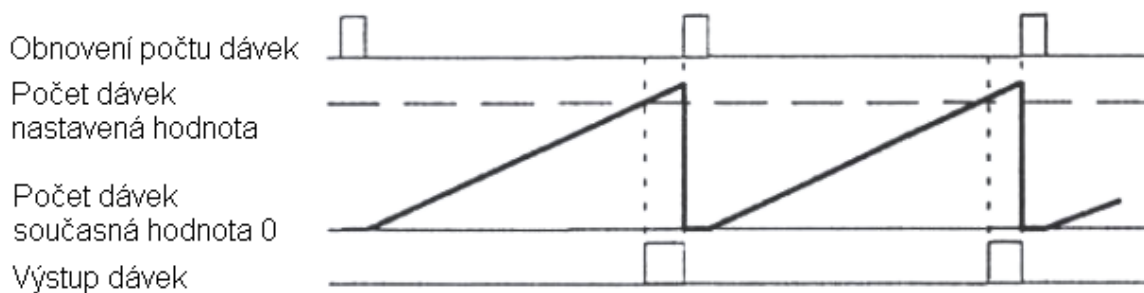
6. Rychlost plnění je naprogramována přibližně na hodnotu 7 l/min.

Čištění je nezbytné po prvním naplnění voskem, aby se odstranily možné vzduchové bublinky ve válci vosku, nebo je-li nutno odstranit starý vosk.

Toto se může provést pomocí čistící formy a nádoby pro zachycení vosku. Tento proces se opakuje, má-li být starý vosk odstraněn z vyhřívané hadice a trysky [12].



Obr. 1.3.5.1 Schéma průběhu vstřikování pístem [12]



Graf. 1.3.5.2 Průběh jednotlivých plnění a vyprazdňování pístu [12]

1.3.6 Technologický postup při vstřikování pístem

1. Stiskněte tlačítko „upínadlo nahoru“, tím se nabudí SV 1, když se tlaková deska dostane do kontaktu s formou, vzroste hydraulický tlak, sepne se tlakový spínač PS 2, aktivuje se časovač vstřikování a tryska se přes SV 3 nebo SV 5 pohybuje směrem k formě.

2. Vstřikování se zahájí s časovým zpožděním 2 s přes časovač T2 a ventil SV3 nebo SV5.

3. Po doběhnutí časovače vstřikování nastane několik operací:

a) Vstřikovací ventil SV3 nebo SV5 se odbudí a posune do své neutrální a střední polohy, čímž umožní snížení tlaku oleje a vosku.

b) O 2,5 s později se pomocí časovače T3 zatáhne tryska

c) Jestliže je volící přepínač nastaven na „opětovné plnění v každém cyklu“, relé R7 nabudí relé R5, aby opětovně naplnil vstřikovací válec.

d) Časovač T4 zpozdí otevření upínadla o 5 s, potom se SV2 nabudí a tlaková deska se pomocí T8 pohybuje nahoru po dobu 2 s

4. Po doběhnutí časovače vstřikování přidrží relé R5 ventil opětovného plnění vosku SV4 nebo SV11 nebo dokud je aktivován spínač SV1 nebo SV2

Poznámka: Pro správný sled operací musí být časovač T4 vždy nastaven na delší dobu než časovač T3 [12].

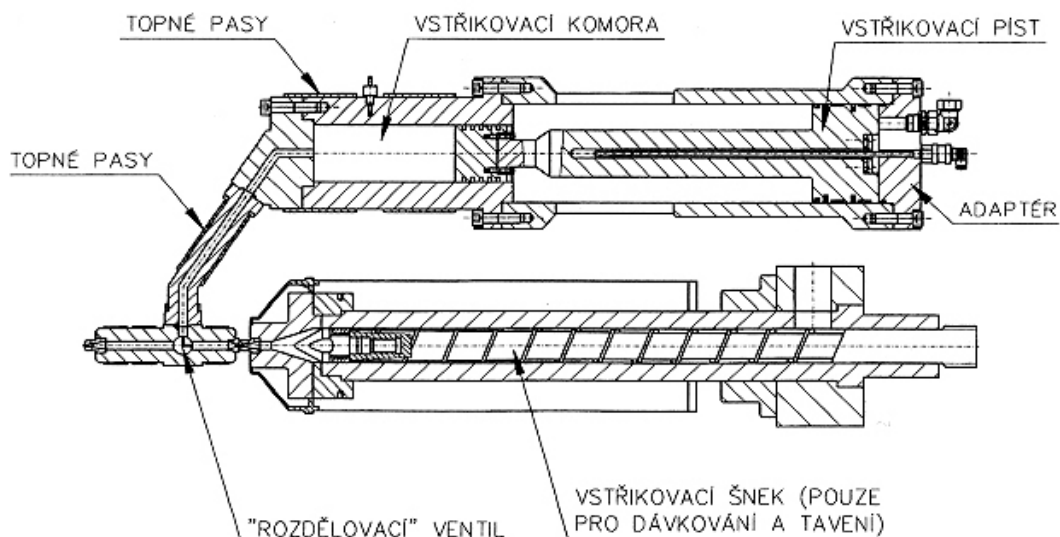
1.3.7 Vstřikování vosku pomocí šneku

V České republice se vývojem a výrobou vstřikolisů zabývá výhradně firma INVERA s.r.o., která převzala na přelomu tisíciletí výrobní dokumentace vstřikolisů od největšího českého výrobce přesných odlitků, firmy KDYNÍUM a.s., Kdyně. Vstřikování vosku tak došlo k významnému pokroku, jelikož je díky nové vstřikovací hlavě možno významně zkrátit čas, kdy je tavenina udržována na maximální teplotě. Došlo zde také ke kompletnímu přepracování vstřikovací trysky. Vosk je taven a uchováván před vstříknutím do formy mimo dopravní šnekovou hřídel.

„U dřívějších systémů, které vycházely z upravených lisů na plasty, byl vosk taven ve šnekové komoře a po celou dobu dopravy muselo být udržováno v roztaveném stavu zbytečně velké množství. Vlivem toho prudce klesala jeho životnost a zbytečně narůstaly náklady na tavení i na chlazení stroje. Vstříknutí samotné se dělo axiálním pohybem šneku. V současnosti firma využívá dva systémy. V prvním je hlavice rozdělena na dvě části: vstřikovací komoru a šnekovou komoru. V prostoru šneku dojde k natavení menšího množství vosku a k jeho vytlačení do vstřikovací komory. Odtud je potom pístem pod vysokým tlakem vstříknut do formy. Šneková komora se tedy stará pouze o natavení a přesné dávkování vosku a o samotné plnění formy se stará vstřikovací komora. Tento systém umožňuje používat mnohem nižších teplot

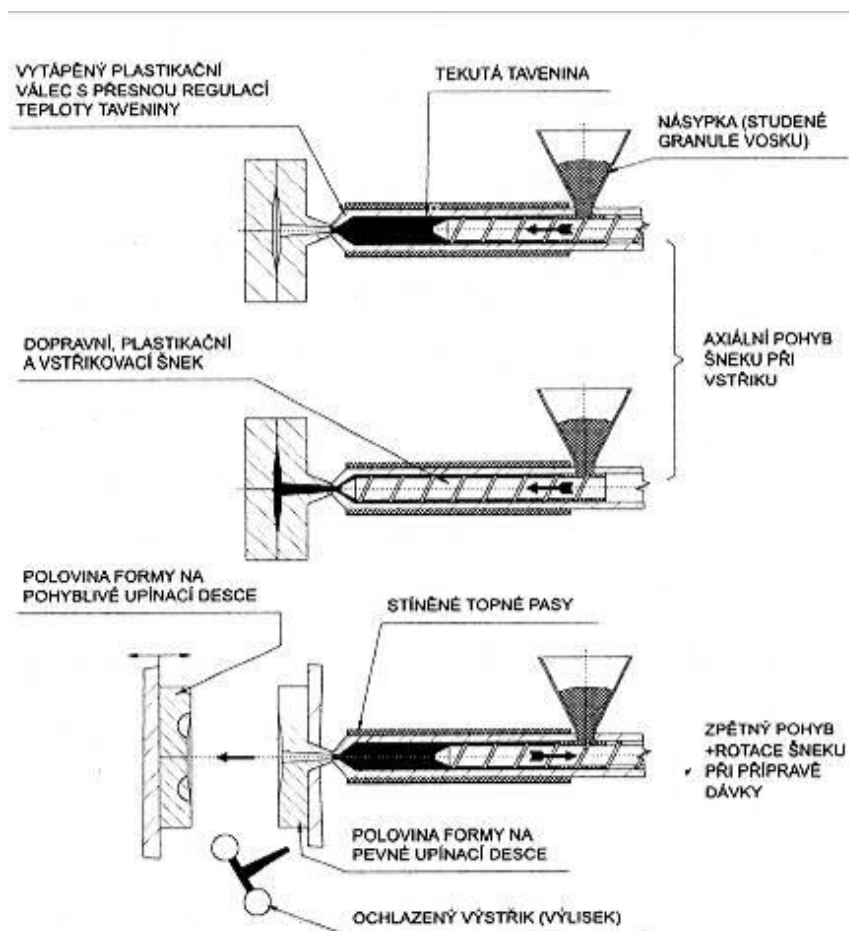
a vyšších vstřikovacích tlaků, což se v důsledku projeví ve zvýšené životnosti vosku a nižších energetických nákladech stroje“.[13]

PLASTIKAČNÍ VÁLEC S ADAPTÉREM



Obr.1.3.7.1 Průřez plastifikačním válcem s adaptérem [13]

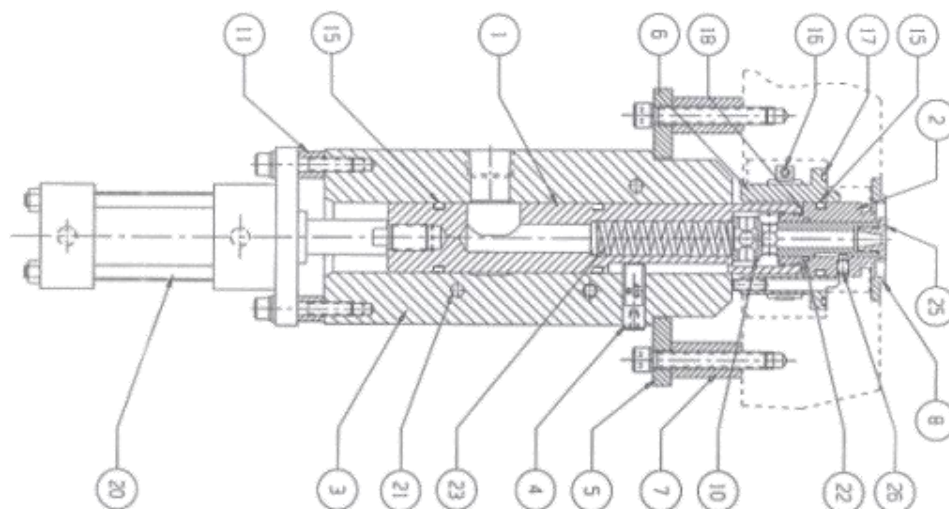
„Druhá metoda využívá dávkování a vstřikování pomocí šneku, ale s tím rozdílem, že vosk je taven v plastifikační komoře a do prostoru šneku přichází již v tekutém stavu a je pouze udržována jeho teplota. Obecně využívá tyto systémy v různých variantách většina světových výrobců vstřikolisů jako je rakouský BATTENFELD³ nebo japonská NISSEI.“ [13]



Obr. 1.3.7.2 Vstřikování pomocí šneku [13]

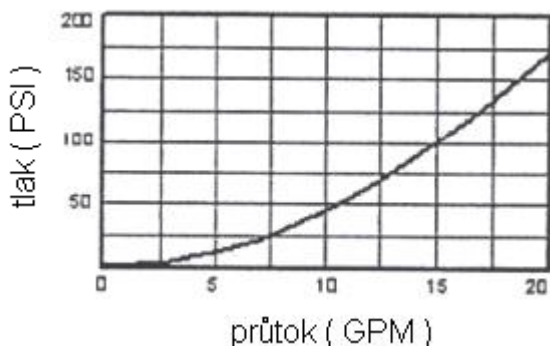
1.3.8 Co ovlivňuje průtok

Průtok záleží nejen na tlaku vstřikování, ale také na průměru trysky [12].

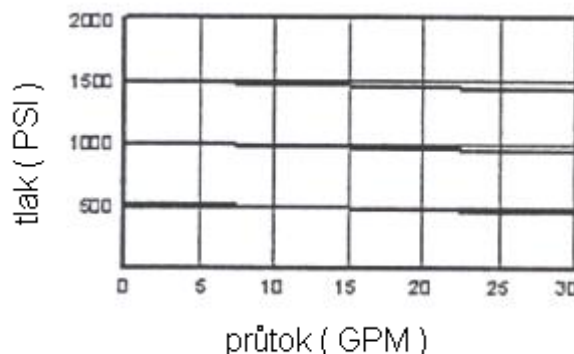


Obr. 1.3.8.1 Schéma trysky [12]

Mezi vstřikovacím pístem a tryskou je umístěn ventil (kapitola 1.3.3), který se otevírá a zavírá při každém vstřiku. Vosk má následující průtok:



Graf. 1.3.8.1 Závislost průtoku na tlaku bez zatížení tlakem [12]



Graf. 1.3.8.2 Závislost průtoku na tlaku při regulovaném tlaku [12]

Průtok (GPM...gallons per minute = galon za minutu)

1.4 Metody simulace

Na dnešním trhu je již několik simulačních programů, které dokáží nasimulovat plnění a tuhnutí kovu. Dokáží také učit vady. Program na simulaci vstřiku voskových modelů však zatím nikdo nevymyslel. Proto je snaha o simulaci výroby voskového modelu na „plastařském“ programu Cadmould 3D-F® (dále jen Cadmould), kde se využívá podobnosti vlastností vosků a plastů [12].

1.4.1 Simulační program Cadmould

Cadmould je softwarem pro simulaci vstřikování plastů. Plasty jsou nejvíce podobné voskům, a proto se zkouší použít tento program pro vstřikování vosků. Plnění formy je prvním a zároveň jedním z nejdůležitějších úkolů vstřikování. Pomocí tohoto programu se simuluje plnění a stanovení optimální polohy a počtu vtoků, může zjistit, kde budou studené spoje a místa uzavírání vzduchu. Nová verze programu Cadmould podporuje automatickou

optimalizaci plnicího modelovacího procesu. Zákazník si může do modelace navolit materiál, ze kterého bude daný model, kudy povede vtoková soustava a jaký bude mít tvar. Může si určit hlavní cíl simulace, např. ušetřit peníze. Simulace ukáže průběh a konec tuhnutí, z výsledných hodnot si může zobrazit grafy jednotlivých veličin. Tím zákazník uvidí, jak jsou jednotlivé veličiny na sobě závislé. A z barevně odlišených výsledků tuhnutí je známo, kde se nachází místo s možným výskytem vad [14].

1.4.2 Vstupní parametry zadávané do programu Cadmould

Jako první parametr, který se pro simulaci zadává, je výběr materiálu z materiálové databáze. Materiál si můžeme nadefinovat i sami, stačí zadat nejdůležitější údaje [14].

Teplotní údaje

Tepelná vodivost, měrné teplo, hustota tuhé fáze, hustota kapalně fáze a tepelná difuzivita. Dále pak procesní parametry: teplota kapalně fáze – její optimum, minimum a maximum. Teplota formy – její optimum, minimum a maximum. Teplota solidu voskové směsi, teplota vstřiku a teplota vyjmutí voskového modelu [14].

Tlakové údaje

Tlak se do simulačního programu zadává v barech a po celou dobu vstřiku je nastaven jako konstanta. I průtok uvažujeme konstantní, zadává se v cm^3/s [14].

Procesní parametry

Zde se zadává tlak a čas, za který se forma naplní. Teplota tavení, optimální teplota formy při plnění a vstřikovací teplota vosku. Zadává se i čas celého procesu vstřikování [14].

Parameter	Value
Filling Time [s]	0.705
Pressure-Controlled Filling [%]	99.0
Melt Temperature [°C]	67.0
Uniform Wall Temperature [°C]	30.0
Ejection Temperature [°C]	35.0
Packing	Duration [s] = 100.000
S + W	Duration [s] = 240.000
Injection Compression	Input

Tab. 1.4.2.1 Zadané procesní parametry [14]

1.4.3 Vstupní parametry zadávané vstříkolisu

Vstupní podmínky pro vstříkolis vyžadují další vstupní veličiny s porovnáním se simulačním programem. Je to například nastavení upínacího tlaku. Ten může být maximálně 2400 psi / 16,54 kPa manometrického tlaku. Pro manometrický tlak platí, že tlak vosku je 0,56 x tlak oleje o válci o objemu 5 litrů. Nebo, má-li válec 44 litrů, tlak vosku i oleje je stejný. Tlak vstříkovaného vosku může být maximálně 1430 psi / 9,85 kPa manometrického tlaku. Dále se nastaví požadovaný čas vstříku, rychlost vstříkování řízením toku a teplota vstříkovaného vosku. Rychlost plnění je většinou nastavena na 7 l/min. Automatický cyklus se spustí přidržení dvouručního tlačítka, až se upínadlo dotkne formy, upínací tlak se zvýší a sepne tlakový spínač, čímž se spustí automatický cyklus [12].

1.4.3.1 Vstříkování plastů

Protože Cadmould je program navržený pro vstříkování plastů, je nutné uvažovat průběh vstříku jako je tomu u plastů [15].

Tlak při vstřikování

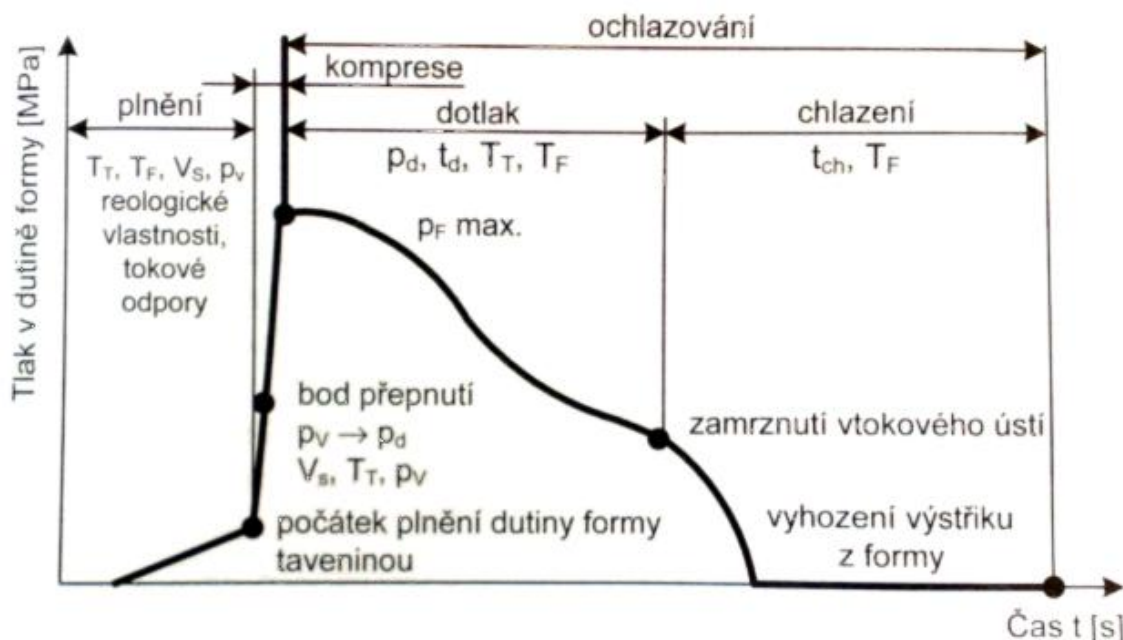
Tlak při vstřiku není konstantní. Při vstřikování plastů rozlišujeme tři základní typy tlaků:

a) Systémový tlak - jedná se zde o tlak vytvořený čerpadlem nebo skupinou čerpadel v hydraulickém systému vstřikovacího stroje. Podle konstrukce vstřikovacích strojů má obvykle hodnotu 140, 170, 210 nebo 270 barů. Tento tlak se objevuje na obrazovce řídicího systému vstřikovacího stroje, a proto bývá nejčastěji používán do záznamů o procesu vstřikování.

b) tlak před čelem šneku – myslí se zde tlak v dávce taveniny před čelem šneku při plnění formy taveninou. Jeho hodnota je svázána se systémovým tlakem a určuje ji průměr šneku a pístu vstřikovacího válce. Velikost systémového tlaku, resp. tlaku před čelem šneku, musí být taková, aby při požadované rychlosti nebo profilu rychlosti vstřikování tuto rychlost při překonávání všech odporů proti plnění dutiny formy taveninou realizovala ve všech místech tvarové dutiny formy. V případě nastavení nižšího vstřikovacího tlaku, který nebude schopen překonat odpory ve formě, se na základě hydraulických zákonů automaticky změní vstřikovací rychlost a vstřikování nebude probíhat požadovanou rychlostí, ale rychlostí odpovídající příslušnému vstřikovacímu tlaku. V takovém případě je nutné změnit poměr vstřikovací tlak-vstřikovací rychlost (buď zvýšit tlak, nebo snížit rychlost), aby vstřikování probíhalo korektně a reprodukovatelně, samozřejmě při splnění kvalitativních požadavků kladených na konkrétní výstřik. Tlak před čelem šneku může dosahovat hodnot až např. 2800 a více barů. I tento přepočítaný tlak může být zobrazován.

c) tlak v dutině formy - je nižší než tlak před čelem šneku a poplatný členitosti a složitosti tvarů výstřiku, délce toku taveniny v tvarové dutině, rozvodnému systému taveniny, teplotě taveniny a formy atd., tj. je snížený o hydraulické odpory působící při plnění tvarové dutiny formy. Tlak v dutině formy je i místně rozdílný, na začátku toku (u vtokového ústí) je největší a se vzdáleností od ústí vtoku taveniny klesá. V závislosti na zvolených parametrech a vstřikovaném materiálu se jeho hodnota pohybuje v rozmezí cca 200 až 900

barů. Střední hodnota je cca 500 barů. Na tyto hodnoty tlaků musí být dimenzována forma i uzavírací síla vstřikovacího stroje [15].



Graf. 1.4.3.1.1 Vztah mezi technologickými parametry a průběhem tlaku ve formě, včetně jednotlivých úseků tlakové křivky na kvalitativní ukazatele výstřiku[15]

Velmi nutné je i stanovit potřebnou uzavírací sílu. Uzavírací síla musí zajistit dokonalé sevření formy v dělicí rovině jako reakci na vstřikovací tlak a vstřikovací rychlost (hybnost taveniny dopravované do tvarové dutiny vstřikovací formy).

Rozhodující pro výpočet potřebné uzavírací síly vstřikovacího stroje je znalost maximálního tlaku v dutině formy. Nejpřesněji se tento tlak určí na základě počítačových simulací plnění programy jako je Cadmould nebo Mold flow.

Vstřikovací tlak a rychlost

Úkolem vstřikovací rychlosti a vstřikovacího tlaku je objemově naplnit tvarovou dutinu formy, při co nejmenším smykovém namáhání dopravované taveniny. mělo by k objemovému naplnění tvarových dutin dojít při co nejnižších možných nastaveních obou parametrů, při samozřejmém předpokladu požadované jakosti povrchu výstřiku.

„Při volbě obou parametrů je nutné si uvědomit i jejich technickou realizaci. Nastavujeme vždy pouze jednu hodnotu vstřikovacího tlaku, kdežto vstřikovací rychlost můžeme nastavit jak konstantní pro celou dobu pohybu šneku nebo jako profil rychlosti v závislosti na poloze šneku. Jedná se tedy o regulaci průtoku (rychlosti) hydraulických pohonů, kdy nastavení hodnot vstřikovacího tlaku musí mít takovou úroveň, která dokáže požadovanou maximální rychlost plnění realizovat i přes všechny hydraulické odpory (např. změny průřezů, překážky v toku taveniny, ohyby toku apod.) působící při plnění dutin formy polymerní taveninou.“

Stane-li se, že nastavený vstřikovací tlak není schopen realizovat požadovanou vstřikovací rychlost, probíhá reálné vstřikování takovou rychlostí, která odpovídá konkrétnímu vstřikovacímu tlaku, tj. rychlost plnění dutiny taveninou je nižší než požadovaná.

Na tuto chybu v nastavení některé řídicí systémy vstřikovacích strojů upozorňují chybovým hlášením. Potom je nutné změnit poměr vstřikovací tlak - vstřikovací rychlost, tj. vstřikovací tlak zvýšit a rychlost ponechat nebo ponechat tlak a snížit rychlost, a to vždy podle požadavku na jakost povrchu výstřiku a požadavku na objemové naplnění dutiny formy.

Při nastavování vstřikovací rychlosti je nutné pamatovat na to, že příliš pomalá rychlost plnění dutiny taveninou může mít za následek tzv. studený tok. K němu dochází při plnění při velmi velkém ochlazování čela taveniny a vzniku spojových čar.

Pro lepší povrchovou jakost je výhodnější pomalejší plnění.

Pro nastavení vstřikovací rychlosti je možné zobecnit doporučení:

a) Rozhodující pro výpočet potřebné uzavírací síly vstřikovacího stroje je znalost maximálního tlaku v dutině formy. Nejpřesněji se tento tlak určí na základě počítačových V běžných případech vstřikování pracovat s konstantní a vyšší vstřikovací rychlostí

b) při problémech platí, že pro jejich zmenšení je jako prevence výhodné vstřikovací rychlost snížit

c) Při nastavování K minimalizaci problému je výhodné vstřikovací rychlost profilovat [15]

Doba vstřiku – doba plnění formy

Rychlost pohybu šneku vpřed při vstřikování, ať konstantní nebo profilovanou rychlostí, přímo ovlivňuje jeden z hlavních procesních parametrů mající výrazný vliv na povrchové vlastnosti výstřižku, a to rychlost postupu čela taveniny v tvarové dutině formy. Tato rychlost by pro výrobu výstřižku s izotropními vlastnostmi měla být ve všech průřezích tokových kanálů a místech tvarové dutiny formy konstantní [15].

Bod přepnutí ze vstřikovacího tlaku na dotlak

Po objemovém naplnění tvarové dutiny formy vstřikovací formy polymerní taveninou, kdy byla ve funkci regulace průtoku, resp. rychlosti se v bodě přepnutí ze vstřikovacího tlaku na dotlak regulace rychlosti mění na regulaci tlakovou [15].

Bod přepnutí je možné definovat v závislosti na:

- dráze pohybu šneku vpřed při vstřikování, resp. objemu vstřikované taveniny
 - na tlaku v hydraulickém systému vstřikovacího stroje nebo na tlaku vyvolaném pohonem šneku při vstřiku
 - na tlaku v horkém rozvodu formy
 - na tlaku v dutině formy
 - na čase

Doba dotlaku a úroveň dotlaku

Dotlaková fáze vstřikovacího cyklu má z hlediska jakosti výstřižku z termoplastů největší vliv na tvarovou a rozměrovou přesnost. Je definována dvěma základními technologickými parametry - úrovní dotlaku, resp. jeho časovým profilem, a dobou dotlaku. Jako pomocný technologický parametr některé řídicí systémy vstřikovacích strojů umožňují nastavení rychlosti dotlaku. Tato rychlost je závislá na tzv. řídicí tloušťce výstřižku - obvykle místo jeho největší tloušťky: pro tloušťku do 1 mm se nastavuje v rozmezí cca 50 až 30 %

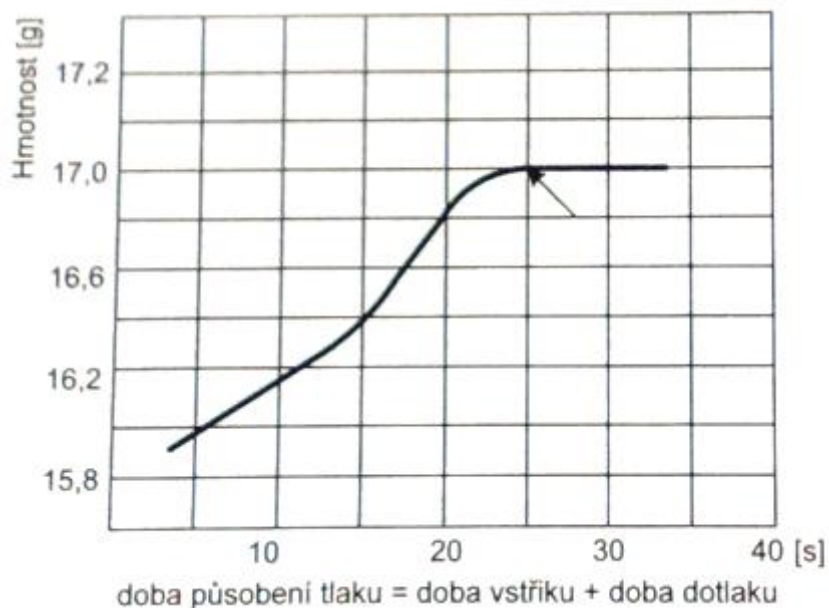
z možného maximálního nastavení rychlosti, pro rozmezí tloušťky mezi 1 a 2 mm je 30 až 20 % a pro tloušťku větší než 2 mm cca 10 %.

Tlaková úroveň dotlaku, včetně doby jeho působení, musí být taková, aby po objemovém naplnění dutiny formy taveninou v plnicí fázi a přepnutí ze vstřikovacího tlaku na dotlak, dotlaková fáze dokázala vyrovnat všechny možné propadliny, nerovnosti, zaplnit všechny průřezy taveninou (odstranit možné vnitřní bubliny a lunkry) a vykopírovat všechny požadované tvary, včetně dezénů.

„Tento požadavek je velmi silně závislý na optimalizovaných rozměrech studeného vtokového rozvodu a zejména studeného ústí vtoku. Průřez ústí vtoku musí mít takovou hodnotu, aby umožnil po celou nutnou dobu dotlaku doplňování nové taveniny do tvarové dutiny formy. Z toho vyplývá nutnost konstruovat ústí vtoku tak, aby oba jeho rozměry u štěrbinových ústí vtoku byly přibližně stejné, tj. umožňovaly tok taveniny svým „živým“ středem. Při malých tloušťkách ústí vtoku zvětšování jeho průřezu jeho rozšiřováním k požadovanému cíli nevede a vtok předčasně zamrzá, aniž by dotlaková fáze dokázala splnit výše popsany úkol.“

S optimalizovaným ústím vtoku velmi úzce souvisí i jeho umístění na výstřiku, a to jak v případě studeného ústí vtoku, tak u horké trysky. Ústí vtoku musí být umístěno na výstřiku do takové jeho části, resp. do takové tloušťky stěny, která předčasně před skončením doby dotlaku nezamrzne a tím opět znehuje funkci dotlakové fáze.

Optimalizace doby dotlaku souvisí jak s jakostí výstřiku, tak má významný vliv i na celkovou dobu cyklu a tedy ekonomii výroby příslušného výstřiku. Optimální dobu dotlaku je možné určit velmi jednoduše, a to vážením. Při nastavené úrovni dotlaku prodlužujeme dobu jeho působení a vyrobené výstřiky vážíme. Jako optimalizovanou dobu dotlaku vezmeme ten čas, při kterém jsme již nezjistili zvyšování hmotnosti výstřiku. To vše samozřejmě za předpokladu vhodně zvoleného průřezu ústí vtoku, včetně jeho umístění na výstřiku.



Graf. 1.4.3.1.2 Optimální doba dotlaku [15]

Šipka ukazuje optimální dobu působení tlaku (zamrznutí ústí vtoku)

Měřeno na výstřižku: teplota taveniny 250 °C

teplota formy 90 °C

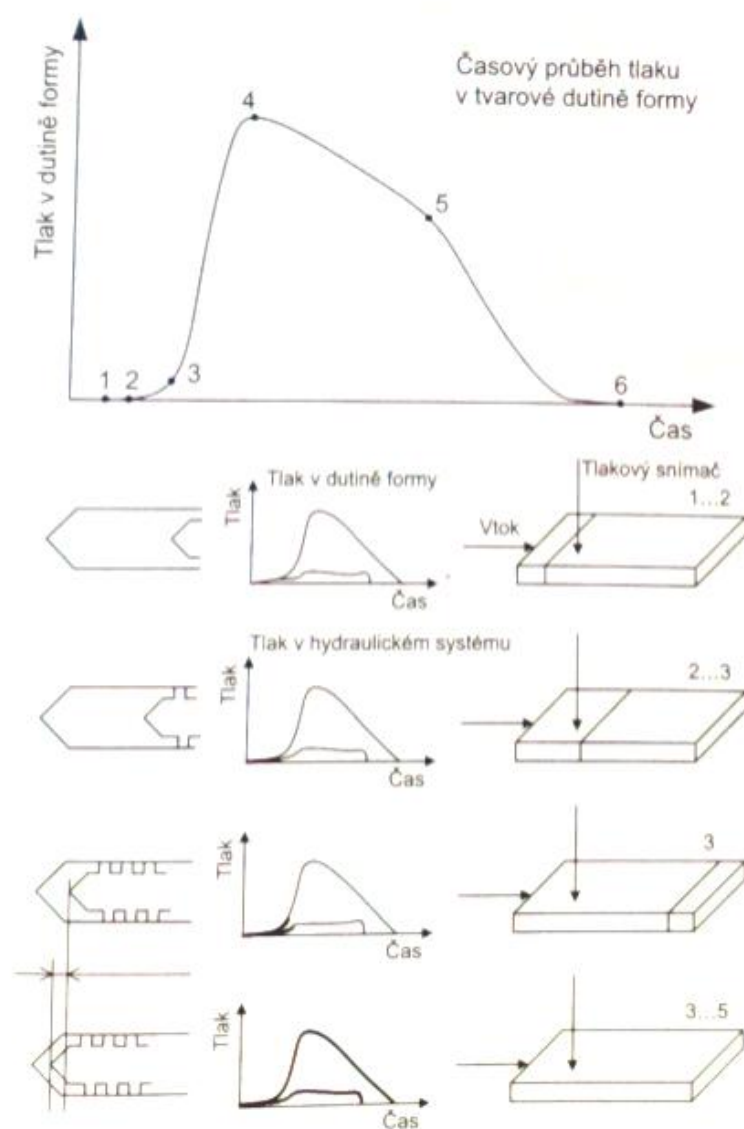
tloušťka stěny 3,2 mm

Časový průběh tlaku - tlaková křivka - je při vstřikování termoplastů jak pro seřizování vstřikovacího procesu, tak pro jeho optimalizaci a v neposlední řadě pro jeho kontrolu nezastupitelný. Jeho nezastupitelnost je v tom, že podává integrální pohled na proces vstřikování, a to od počátku plnění dutiny formy taveninou až po zamrznutí ústí vtoku, resp. po pokles vnitřního tlaku ve výstřiku na tlak 1 bar [15].

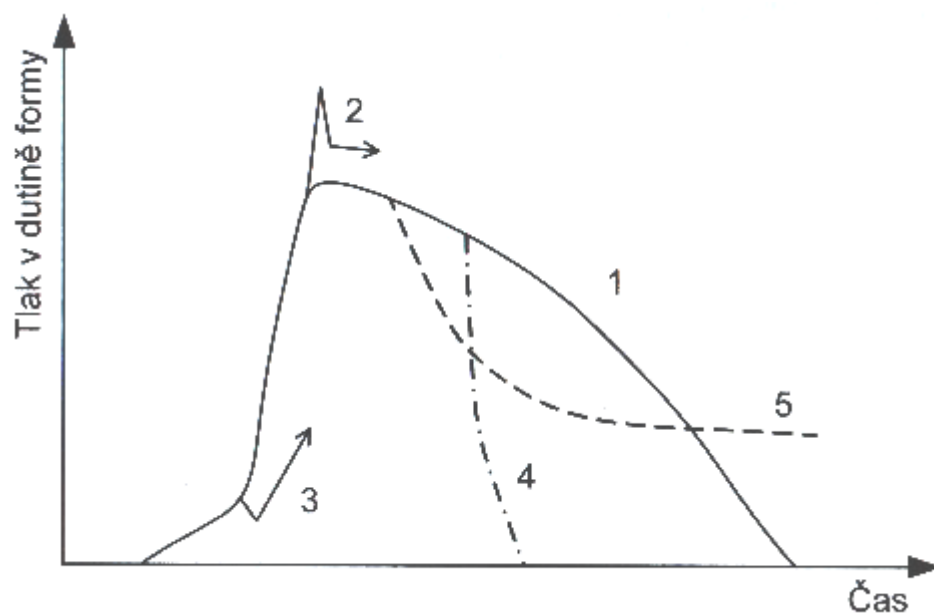
Tlakové snímače mohou být umístěny:

- v tvarové dutině formy, měření tlaku přímé nebo nepřímé - u nepřímého je siloměr obvykle umístěn pod vyhazovačem
- ve studených rozváděcích kanálech vstřikovací formy
- v horkých rozvodech vstřikovací formy - otevřené trysky, jehlové uzavíratelné trysky, rozváděcí kanály (nutná teplotní kompenzace)

- v trysce vstřikovacího válce vstřikovacího stroje, měření přímé nebo nepřímé využívající přenosu tlaku prostřednictvím elastické deformace kovu, v jehož objemu je snímač umístěn (není nutná teplotní kompenzace)
- v hydraulickém systému vstřikovacího stroje
- v systému vstřiku vstřikovacího stroje s elektrickým pohonem [15]



Graf. 1.4.3.1.3 Časový průběh tlaku v dutině formy [15]



Graf. 1.4.3.1.4 Časový průběh tlaků v dutině formy – optimalizace [15]

Průběh tlakové odezvy:

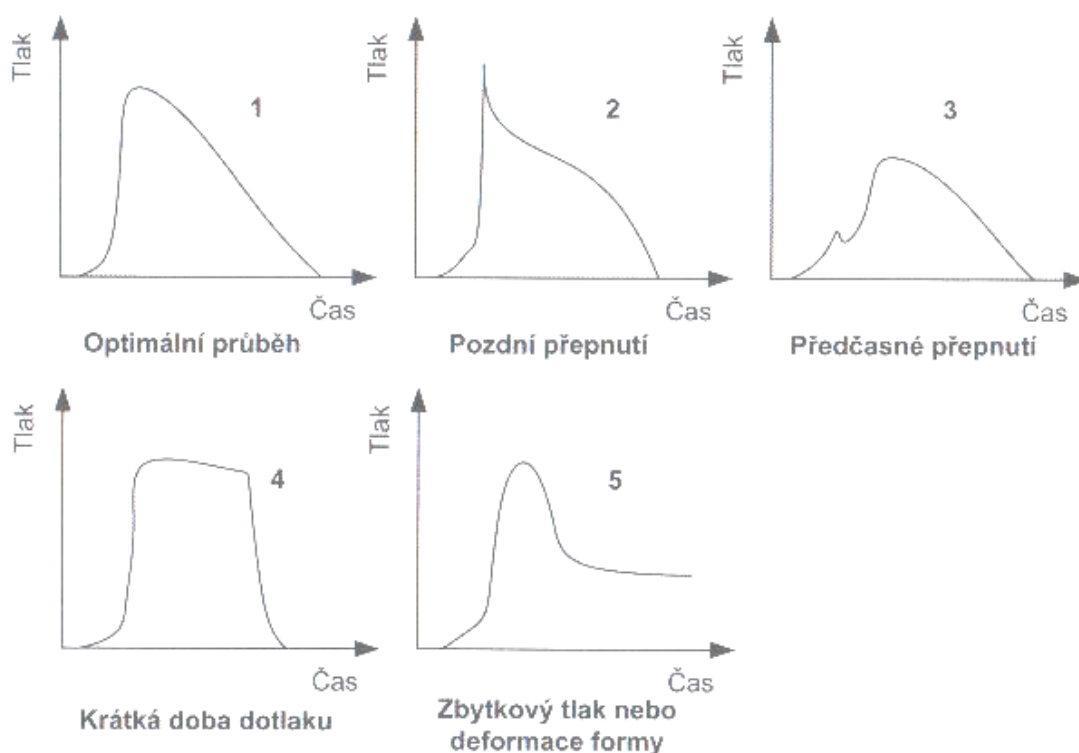
1 – optimalizovaný

2 – přeplnění formy – přetoky – vnitřní pnutí – pozdní přepnutí tlaku vstřikovacího na odtlakový

3 – plnění dotlakem – brzké přepnutí tlaku vstřikovacího na odtlakový

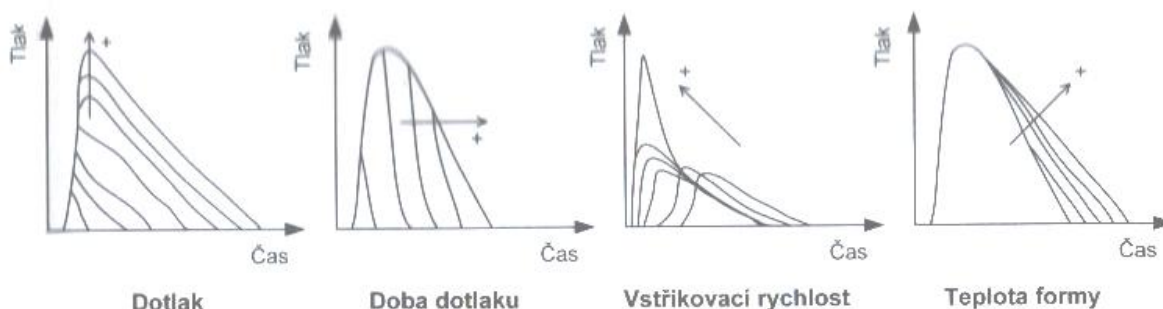
4 – krátká doba dotlaku

5 – nedostatečná tuhost formy [15]



Graf. 1.4.3.1.5 Optimalizace procesu přepnutí ze vstřikovací rychlosti na dotlak [15]

- 1 – žádná známka vady – je možné očekávat dobrou kvalitu výstřiku
- 2 – špice na tlakovém průběhu
 - přepnutí rychlosti na dotlak bylo provedeno pozdě – přeplnění formy
 - vnitřní pnutí, deformace, nižší pevnost výstřiku
- 3 – pokles tlaku při kompresní fázi
 - přepnutí rychlosti na dotlak bylo předčasné
 - nekontrolovatelné (dotlakem) plnění dutiny formy
- 4 - odpadnutí tlaku v době trvání dotlaku
 - krátká doba dotlaku
 - možný zpětný tok taveniny
 - propadliny v oblasti ústí vtoku
- 5 – zbytkový tlak
 - forma je nevhodně pevnostně (tuhostně) dimenzována
 - velmi pozdní přepnutí
 - deformace desek formy při vstřikování
 - tavenina po naplnění formy bez relaxace



Graf. 1.4.3.1.6 Vliv změny parametru na průběh tlaku v dutině formy [15]

Tento tlak ukazuje, které technologické parametry mají vliv na tlakový průběh [15].

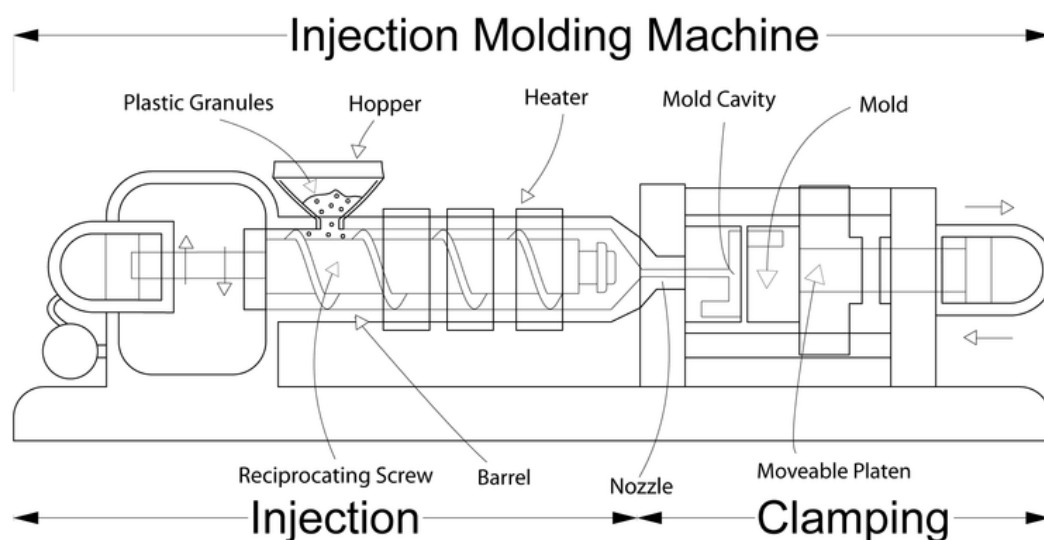
1.4.4.1 Hlavní rozdíly mezi vstřikováním vosků a plastů

Jedním z hlavních rozdílů mezi vstřikolisy je způsob jejich vstřikování, tlaky vstřikování, teplota a množství nataveného materiálu, teplota stěny formy a používaný vstřikovaný materiál.

Vstřikování plastů

Plasty se vstřikují pomocí šnekové hřídele, což je výhodnější z hlediska nataveného materiálu. Nataví se pouze požadované množství granulátu. Do granulátu je často přimícháváno sklo, 10-60% pro zvýšení tvrdosti. Proto není možná regenerace nebo recyklace, odpad v podobě vtoků se musí likvidovat jako nebezpečný odpad. Granulát není přehříván, je pouze vysoušen teplým vzduchem v tzv. suškách. Jak granulát postupně ztrácí vlhkost (pouze vzdušnou vlhkost), začne se zahřívat a pak i tavit. Teplota, ve které se dostává do formy, se liší podle chemického složení, hlavně obsahu skla. Většinou se pohybuje kolem 250 °C. Některé druhy granulátu jsou přehřívány. Granulát je vysoušen v komoře, ve které je i šnek. Právě speciálním šnekem je posunován, u kterého se směrem k formě zvětšuje průměr a zmenšují rozměry vlastního šneku. Tím dochází k vytlačování přebytečného vzduchu. Do formy vstupuje plast v tekutém a zahřátém stavu. Formy jsou kovové, na začátku vstřikování

jsou přehřívány, postupem času naopak chlazeny vodou. Jejich teplota se pohybuje kolem 90°C. Pro lepší izolaci je celá forma obložena speciální izolační deskou. Před začátkem vstřikování není z formy odsáván vzduch. Vstřikování je jak jednou tryskou, tak i kaskádově. U vlastních výlisků jsou nejčastějším problémem studené spoje. S nezabíhavostí problémy nejsou, vstřikolis je schopen vyvinout tak velký tlak, že plast se dostane prakticky všude, jen se přitom ozývají menší rány.



Obr. 1.4.4.1.1 Schéma šneku ve vstřikolis pro plasty [16]

Vstupními podmínkami pro vstřikování plastů je výchozí tlak, tím je určena i rychlost vstřikování. Nastavený tlak se po dobu vstřikování nemění.

Vstřikování vosků

U vstřikování vosků není použito šneku se zmenšujícím se průměrem, ale pístu. Vstřikování pomocí šnekové hřídele je možné, ale pro vysokou cenu vstřikolis se používá jen výjimečně. Vstřikování probíhá náraz, stejně jako u plastů. Tlak vstřiku se určí na začátku a po dobu vstřiku se nemění. Na budíku odpovídá tlak pouze v případě, je-li použit 40 litrový válec. V případě 5 litrového válce se musí tlak na ukazateli vynásobit 0,56. Tím získáme skutečný tlak. Rychlost a průtok vstřikovaného vosku jsou určeny tlakem a také průměrem trysky. Vstřikolisy na vosk jsou schopny ho vstřikovat v tekutém až polotuhém stavu. Vosk může být obohacen o polystyren. Nevýhodou je natavení všech pěti nebo čtyřiceti litrů voskové směsi ve vstřikovacím pístu

a pak jeho následné vstřikování po částech (podle objemu voskového modelu). Vstřikování vosků a plastů se liší i teplotou vstřikované směsi, u vosků je kolem 65°C, u plastů kolem 250°C. Tyto teploty se mohou měnit podle obsahu přídatných složek. U vosků je to polystyren, u plastů sklo. I teplota formy se liší, u vosků je 30°C a u plastů je 90°C. Maximální vstřikovací tlak pro vosky je 1430 psi / 9,85 kPa, při použití pístu o objemu 5 l musíme tlak vynásobit *0,56.

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část se nejprve zabývá porovnáním simulace průběhu plnění dutiny testovací formy pomocí simulačního programu Cadmould s video záznamem zaplňování dutiny formy vstřikolisé. Protože výsledky simulace a skutečnosti ukazovaly neshody hlavně v plnění formy voskovou směsí, kdy ve skutečnosti vosková směs byla vstříknuta „nadvakrát“, proto bylo proměřeno vstřikování vosku na vstřikolisu. Experiment vstřikování voskové směsi vstřikolisé proběhl bez přerušení, ukázal však jiné neshody, proto byl navržen další postup.

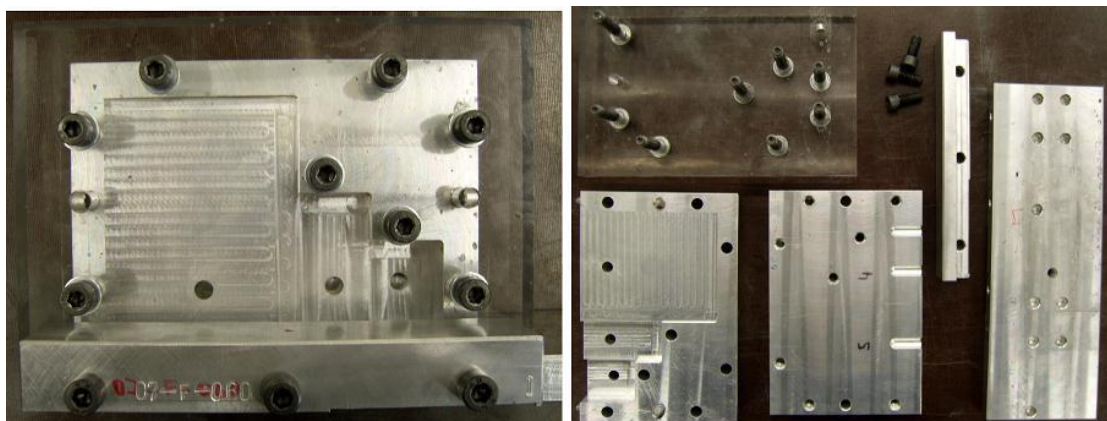
2.1 *Dosavadní výsledky simulace vstřikování*

Prozatím bylo srovnáno 16 experimentů plnění matečné formy a modelu dutiny stejného tvaru a rozměrů za stejných vstupních podmínek.

(Tyto experimenty jsou pokračováním experimentů viz. články z Použité literatury [17] a [18]).

2.1.1 **Matečná forma**

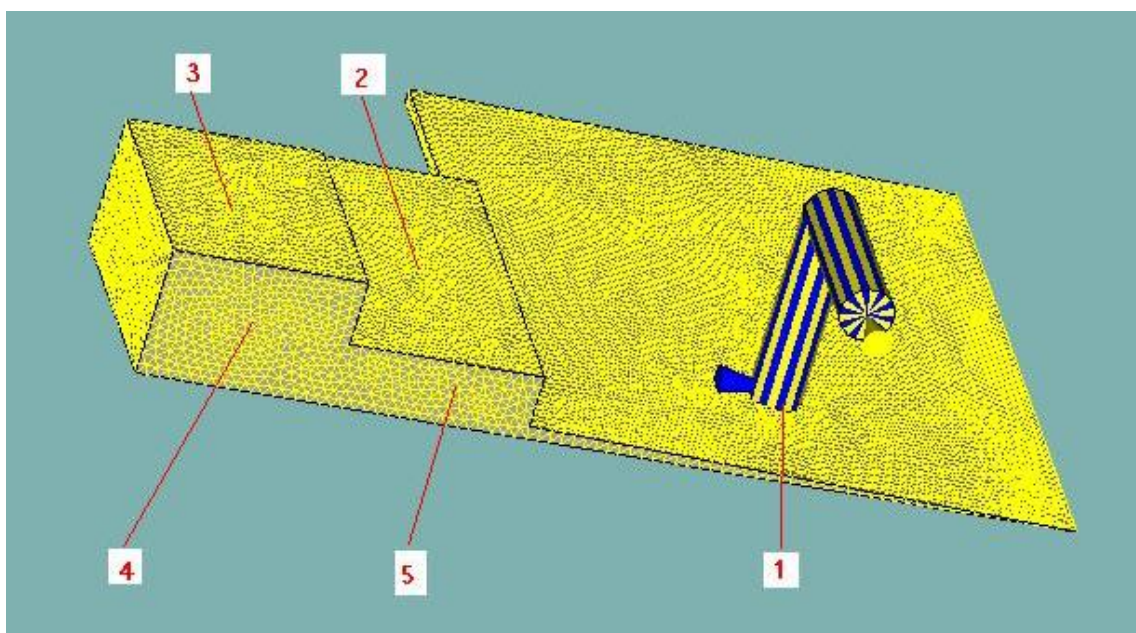
Testovací forma je odstupňovaná forma s klínovou částí. Je složena ze čtyř částí, přední část je tvořena silným plexisklem, které umožnilo zaznamenávat průběh plnění dutiny formy voskovou směsí. Vrchní část formy je možno přesouvat po základové desce, to umožňuje volit jeden z pěti vstřikovacích otvorů, které forma nabízí. Tvar dutiny je 140 × 100 × 20 mm. Je tvořena třemi jednoduchými tělesy s různými rozměry.



Obr. 2.1.1.1 Testovací forma [19]

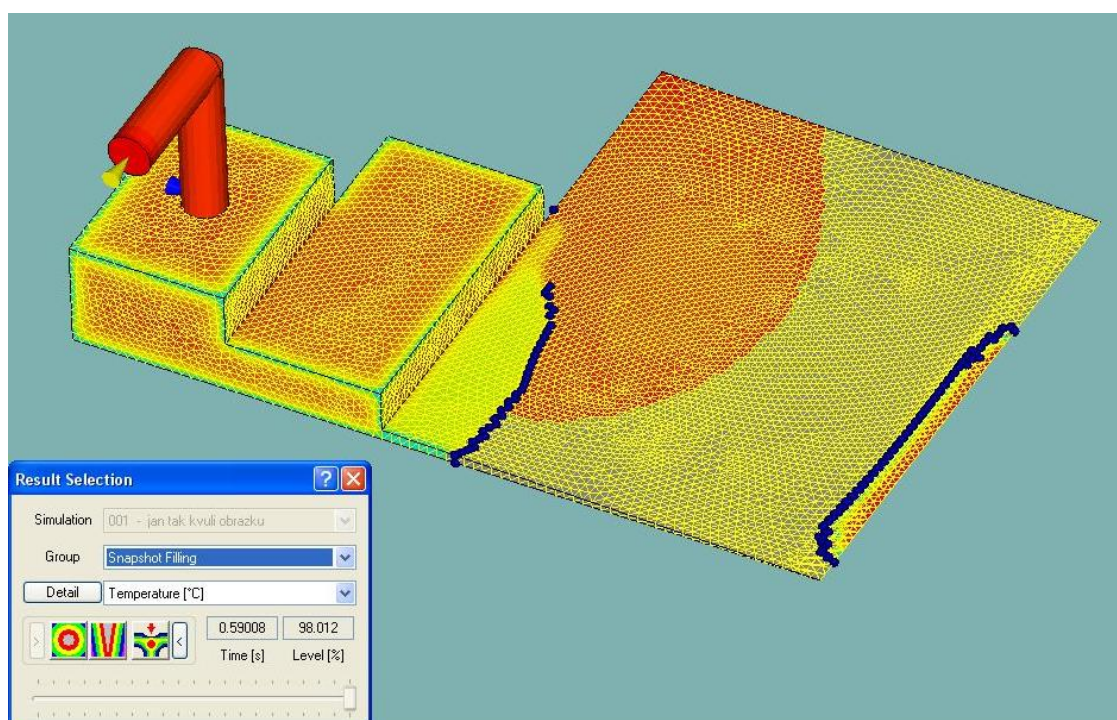
2.1.2 Model dutiny testovací formy

Zkušební vzorek byl nejprve upraven v programu Solidworks, po odstranění vtoků byl získán samotný model. Ten byl uložen do formátu .STL. Pak byla v programu Cadmould zjemněna povrchová síť a postupně nadefinovány pozice pro vtoky 1-5.



Obr. 2.1.2.1 Zkušební forma

Kvůli neustále se opakující neodstranitelné chybě, kdy se vosk objevoval v místech, kde v tu chvíli být neměl, byla zkušební forma zkrácena o 5 mm v nejužší klínovité části. Chyba byla způsobena špatným vytvořením povrchové mřížky, po zkrácení formy již byla mřížka vytvořena dobře.



Obr. 2.1.2.2 Chyba povrchové mřížky

Na této zkušební formě bylo provedeno celkem 16 simulací za různých tlaků, průtoků a umístění vtoku. Cílem těchto simulací je porovnání vstřikování voskové směsi pomocí programu Cadmould a skutečného vstřikování zaznamenaného kamerou.

2.1.3 Výpočtové parametry simulace

Před samotným simulováním byl proveden přepočet hodnot průtoku na hodnoty, které vyžaduje program Cadmould. Tento program počítá průtok v cm^3/s a tlak v barech. Zadání průtoku bylo v dílcích, které jsou na ukazateli přímo na vstřikolisu. Z manuálu pro ovládání vstřikolisu bylo zjištěno, že při nastavení průtoku na 0 dílků odpovídá průtoku 0,05 l/min a na 1000 dílků odpovídá průtoku 30 l/min.

průtok 150 dílků...	4,5 l/min	...75 cm^3/s
průtok 300 dílků...	9 l/min	...150 cm^3/s
průtok 450 dílků...	13,5 l/min	...225 cm^3/s
průtok 600 dílků...	18 l/min	...300 cm^3/s

Tab. 2.1.3.1 Přepočet průtoku

tlak (psi)	tlak (bar)
100	6,89476
300	20,68428
500	34,4738
800	55,1581

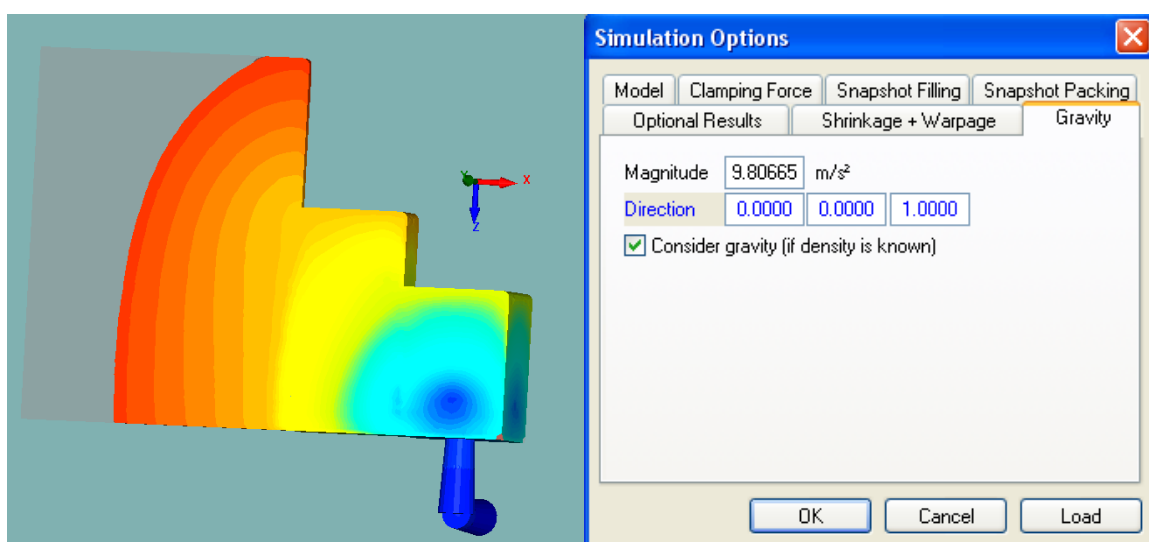
Tab. 2.1.3.2 Přepočet tlaku na bary

Hodnoty tlaku byly následně vynásobeny *0,56, protože ve vstřikolisu byl nainstalován plnicí válec o objemu 5l namísto 40l, pro které jsou v manuálu uvedeny hodnoty tlaku a průtoku. Předchozí tabulka ukazuje přepočet tlaku pro plnicí válec o objemu 40l.

tlak (bar)	*0,56 (bar)
6,89476	3,86106
20,6843	11,5832
34,4738	19,3053
55,1581	30,8885

Tab. 2.1.3.3 Přepočet tlaku pro plnicí válec o objemu 5l

Ve všech simulacích byla brána v úvahu gravitace. U této simulace gravitace odpovídala kladnému směru osy z.



Obr. 2.1.3.1 Směr působení gravitace

V simulaci byly nastaveny konstantní hodnoty pro průtok i pro tlak. Teplota formy byla nastavena na 30 °C a teplota vstřikovaného vosku na 64°C.

Zkušební forma pro simulaci byla zkrácena o 5mm z důvodu chyby v povrchové mřížce.

2.1.4 Srovnání simulace a skutečnosti

Porovnání průběhů plnění matečné formy a testovací dutiny probíhalo v časových úsecích. V čase 0s byly obě formy prázdné. Záznam z kamery byl rozdělen na nejmenší možné snímky, a to po 0,04s (25 frameů za 1s).
(Tato porovnání vychází z článků viz. Použitá literatura [17] a [18]).

2.1.5 Neshody mezi simulací a skutečným průběhem plnění

Bylo zaznamenáno celkem 16 video sekvencí průběhu zaplňování dutiny vstřikovací formy voskovou směsí na vstřikolisu. Pro všechny výše uvedené nastavitelné parametry byl použit jeden vtokový otvor (Vtok č.4). Průměr trysky byl vždy 8mm. Teplota formy 30°C. Teplota voskové směsi Remet Hyfill B478 64°C. Hodnota průtoku byla nastavena na 150, 300, 450, 600 dílků a hodnoty tlaků 100, 300, 500, 800 psi (video záznamy označeny písmenem vyjadřující nastavenou hodnotu průtoku a číslem vyjadřující nastavenou hodnotu tlaku). Pro představu byla vybrána zadání, na kterých je nejvíce vidět daný problém se vstřikováním voskové směsi.

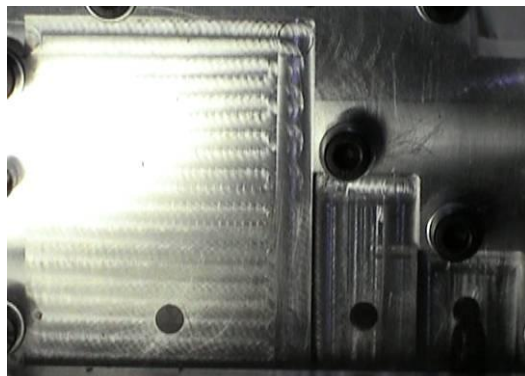
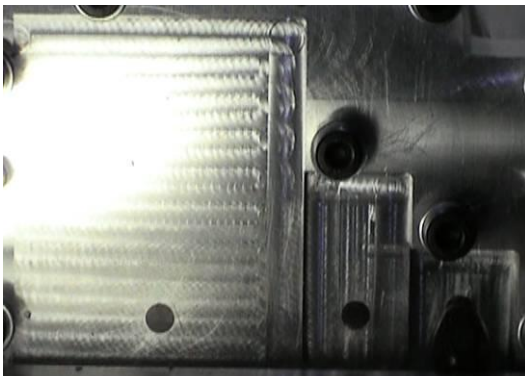
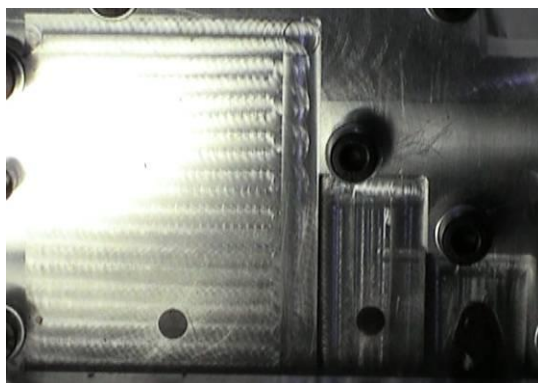
Zadání A3

Průtok: 75 cm³/s

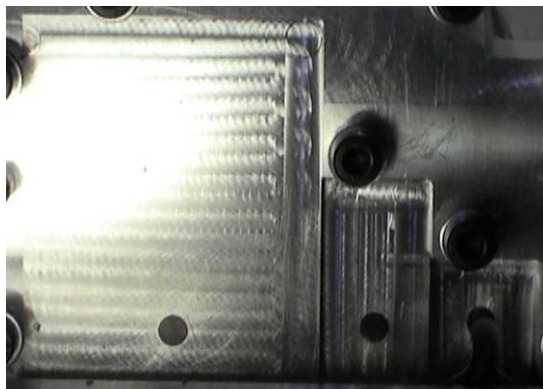
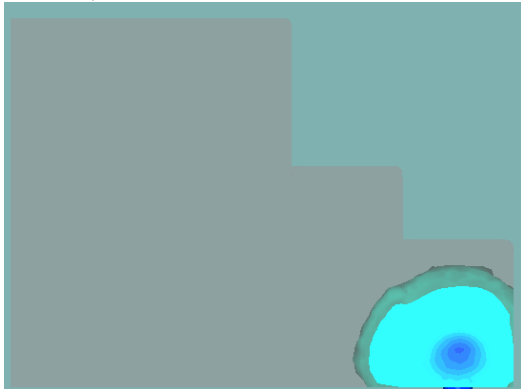
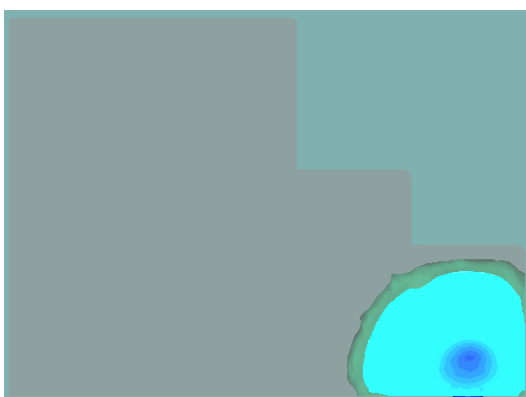
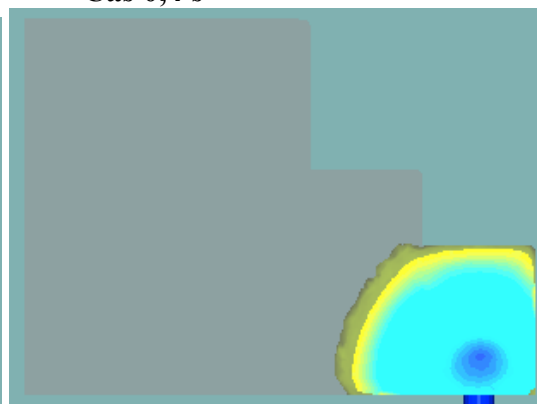
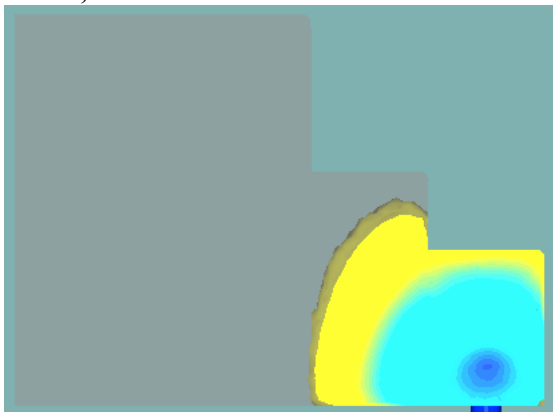
Tlak: 11,5832 baru

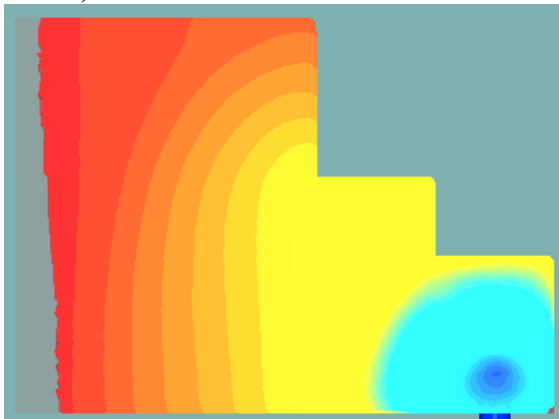
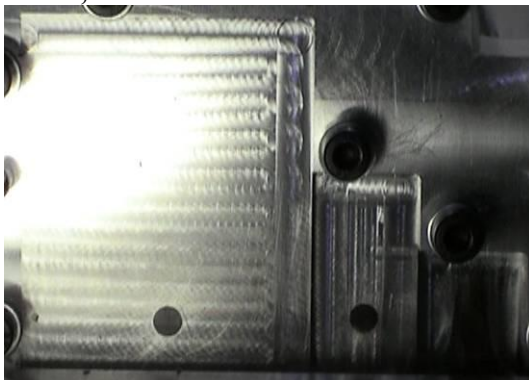
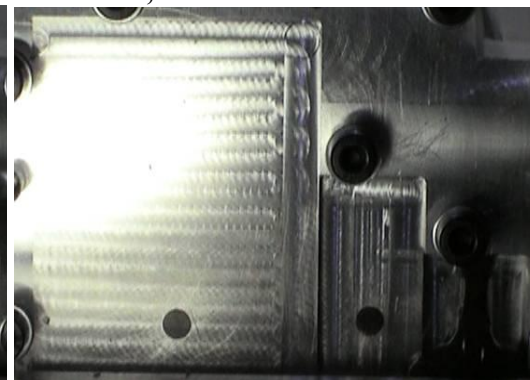
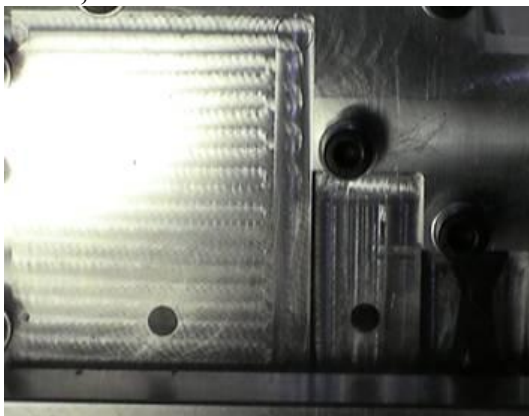
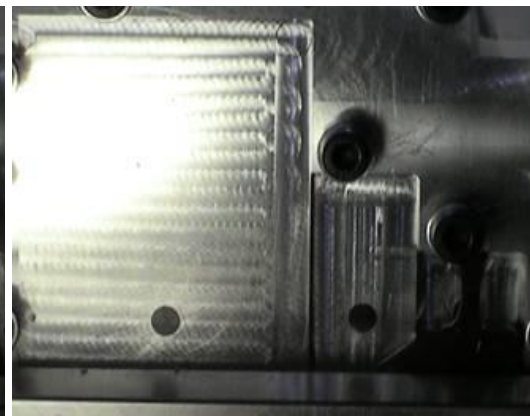
Doba vstřiku v programu Cadmould: 0.71 s

Doba vstřiku v záznamu z kamery: 5.88 s

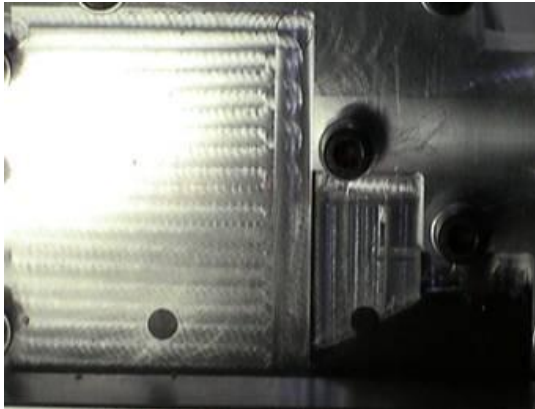
Čas 0,04 s**Čas 0,08 s****Čas 0,12 s**

V tomto okamžiku se vosk zatáhl a začne mizet do doby opětovného vstříku
Čas 1,36 s.

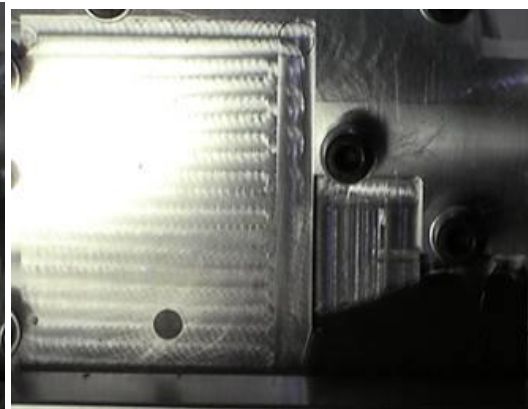
Čas 0,24 s**Čas 0,3 s****Čas 0,4 s****Čas 0,5 s****Čas 0,6 s**

Čas 0,71s - Konec**Čas 1,36 s****Čas 1,6 s****Čas 1,64 s****Čas 2 s**

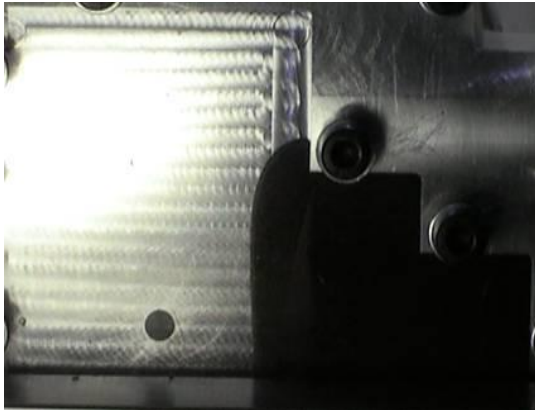
Čas 3 s



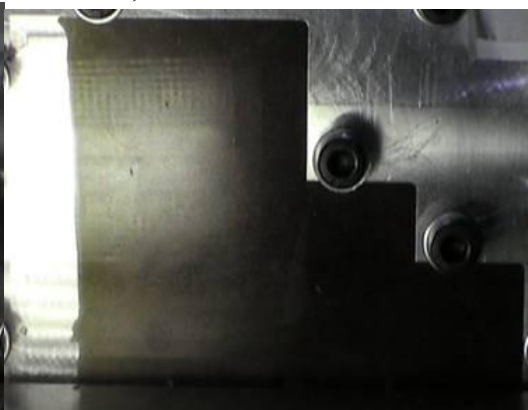
Čas 4 s



Čas 5 s



Čas 5,88 - konec



Obr. 2.1.5.1 Průběh vstřikování v simulačním programu a na videozáznamu

Došlo k zastavení vstřikování voskové směsi, zřejmě v důsledku malého průtoku. Čas simulace byl podstatně rychlejší než skutečný čas plnění.

V zadáních s vyšším průtokem již nedocházelo ke vstřiku voskové směsi „nadvakrát“. I časy samotného plnění byly srovnatelné. Plnění pomocí simulačního programu byl pozvolnější než skutečné vstřikování. Konečný tvar voskového modelu byl odpovídající ve většině srovnání.

Zadání D3

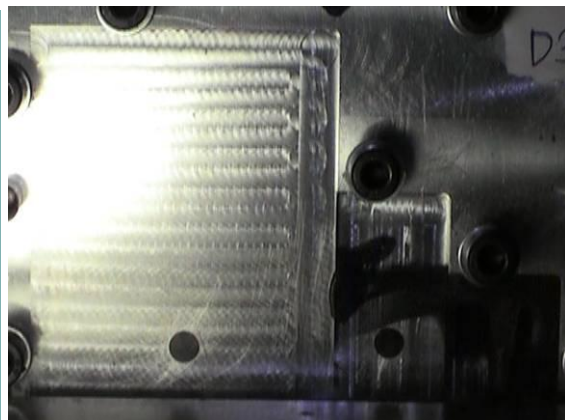
Průtok: $300 \text{ cm}^3/\text{s}$

Tlak: 11,5832 baru

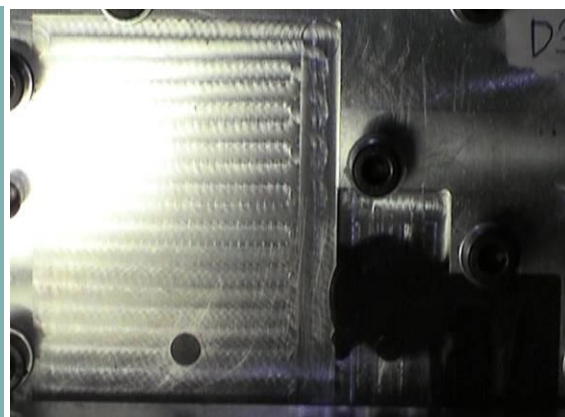
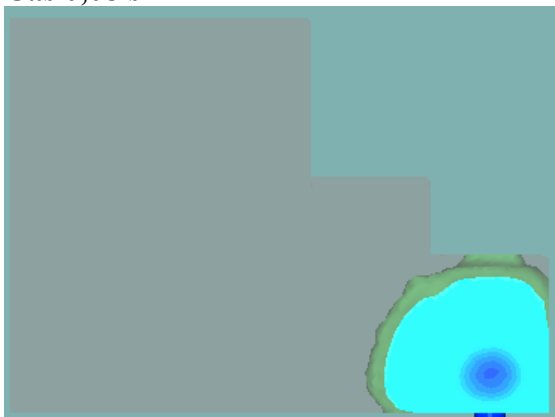
Doba plnění v programu Cadmould: 0,18 s

Doba plnění videozáznam: 0,24 s

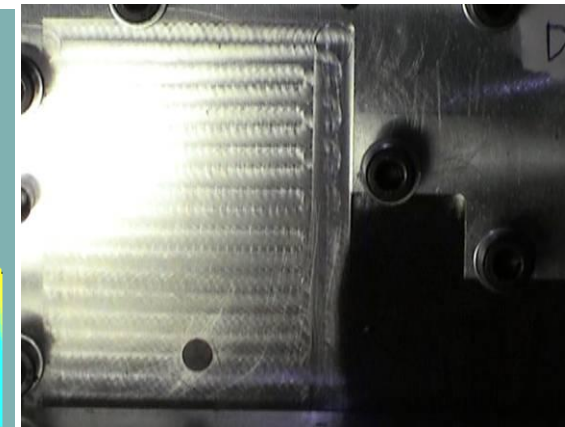
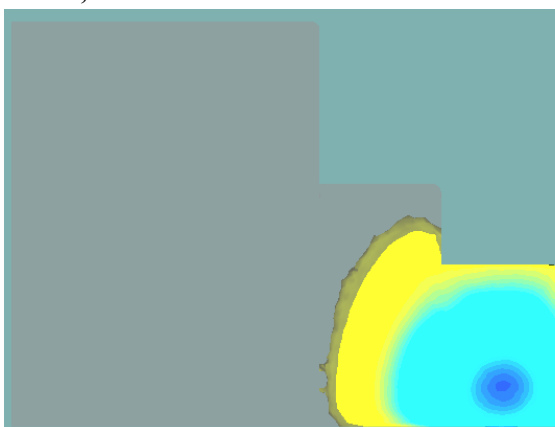
Čas 0,04 s



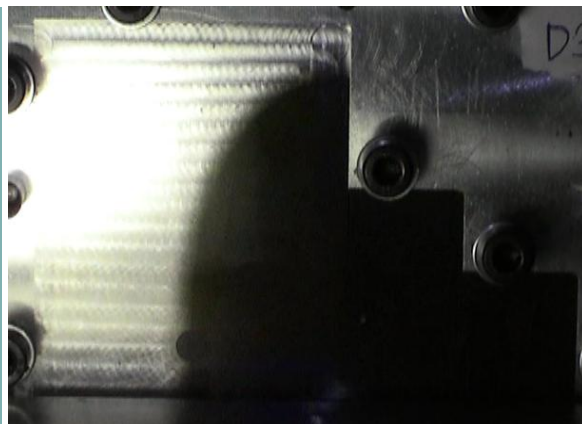
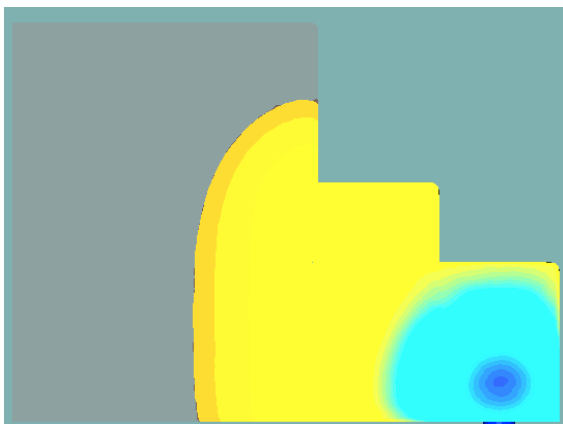
Čas 0,08 s



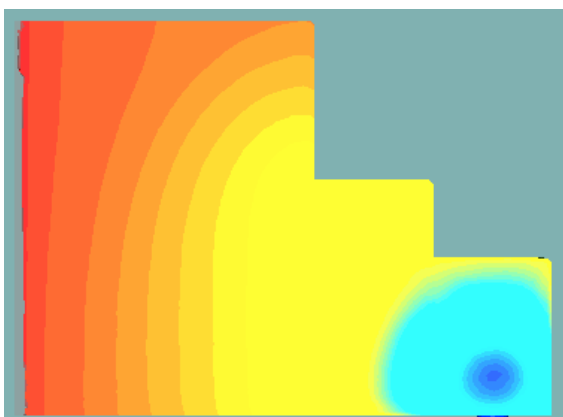
Čas 0,12 s



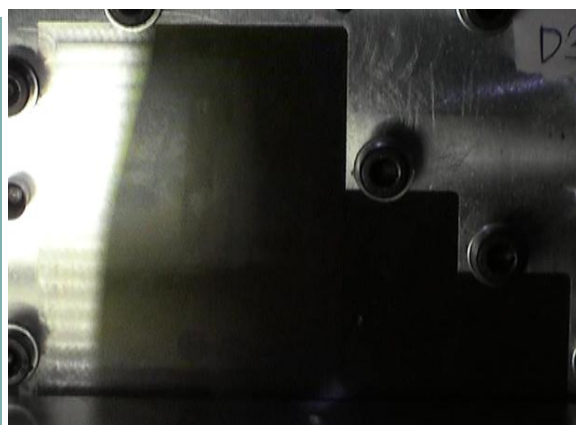
Čas 0,16 s



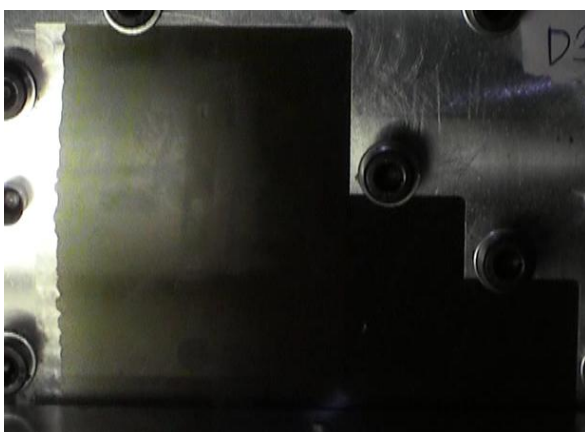
Čas 0,18461 s – Konec



Čas 0,2 s



Čas 0,24 s – konec



Obr. 2.1.5.2 Průběh vstřikování v simulačním programu a na videozáznamu

průtok=150 dílků	A1	A3	A5	A8
tlak (psi)	100	300	500	800
čas [s](kamera)	5,8	5,88	5,56	5,6
čas [s](Cadmould)	0,4	0,4	0,4	0,4

průtok=300 dílků	B1	B3	B5	B8
tlak (psi)	100	300	500	800
čas [s](kamera)	1,04	0,24	1,68	0,24
čas [s](Cadmould)	0,36	0,36	0,36	0,24

průtok=450 dílků	C1	C3	C5	C8
tlak (psi)	100	300	500	800
čas [s](kamera)	0,88	1,56	0,12	0,12
čas [s](Cadmould)	0,24	0,24	0,24	0,18

průtok=600 dílků	D1	D3	D5	D8
tlak (psi)	100	300	500	800
čas [s](kamera)	0,64	0,2	0,16	0,12
čas [s](Cadmould)	0,18	0,18	0,18	0,19

Tab. 2.1.5.1 Porovnání doby plnění dutiny testovací formy na vstřikolisu
a v programu Cadmould

Zeleně jsou vyznačeny vstřiky voskové směsi vstřikolisé, které proběhly bez přerušení, červeně jsou vyznačeny ty, které proběhly „nadvakrát“. V zadáních A1-A8 byl nastaven nejmenší tlak a postupně se zvyšující průtoky. V důsledku malého průtoku nikdy neproběhl vstřik voskové směsi bez přerušení, ale „nadvakrát“. Se zvyšujícím se průtokem tento problém přestal až na zadání B5 a C3.

Ve všech zadáních A nebyl vstřik bez přerušení, ale „nadvakrát“. Zřejmě v důsledku malého průtoku. Čas simulace byl podstatně kratší než čas vstřiku na záznamu. V zadáních B1, B5 a B8 byl vstřik bez přerušení, čas simulace byl vždy rychlejší než na záznamu. Až na zadání B5 už byl vstřik bez přerušení, protože byl nastaven větší průtok. V zadáních C1 a C3 byla simulace v programu Cadmould rychlejší než skutečný vstřik. Nutno zmínit, že v zadání

C3 došlo k zastavení vstřiku voskové směsi. Vstřík v zadáních C1, C5 a C8 byl bez přerušení. V zadáních C5 a C8 byl skutečný vstřík rychlejší než v simulaci. V zadáních D vstřík proběhl bez přerušení, čas skutečného vstřiku byl často rychlejší než simulace. Také zde nikdy nedošlo ke vstřiku voskové směsi „nadvakrát“, v důsledku velkého průtoku. V zadáních D1 byla simulace rychlejší. V zadáních D3 a D5 byl rozdíl mezi vstříky jen 0,02s (v programu Cadmould byl vstřík rychlejší) a v zadání D8 byla simulace pomalejší než vstříkolis, v důsledku narůstajícího tlaku.

S narůstajícím průtokem nedocházelo ke vstřiku voskové směsi „nadvakrát“. Zadání B5 a C3 prokázaly „nesprávnou“ funkci vstříkolisu.

2.1.6 Možnosti upřesnění numerické simulace

Pro správný průběh a výsledek numerické simulace je třeba zadat správná vstupní data. Protože mezi nastavitelné vstupní podmínky patří tlak, teplota a průtok voskové směsi, byly právě průtok a teplota proměřeny. Účelem experimentu bylo zjistit, jaký mají vliv na průběh plnění formy voskovou směsí.

2.2 *Experimentální měření parametrů vstříkolisu*

Samotné měření probíhalo v prostorách slévárny Fimes a.s. v Uherském Hradišti. K tomuto měření bylo využito hned několika měřících zařízení a dalších pomůcek za účelem proměřit průtok a teplotu vstříkovaného vosku.

2.2.1 Experimentální vybavení pro měření průtoku a teploty

Vstříkolis

K tomuto experimentu byl použit vstříkolis SHELL-O-MATIC 35T-20/18 ve slévárně Fimes a.s. Rozsah průtoku je 0 – 1000 dílků (0 – 30 l/min). Rozsah nastavitelného tlaku je 0 – 2000 psi (0-13,8 MPa). Objem nainstalovaného vstříkovacího válce byl 5l. Skutečná hodnota tlaku na menším vstříkolisu se musí vynásobit hodnotou 0,56. Hodnota tlaku uvedená na tlakoměru je v jednotkách psi.



Obr. 2.2.1.1 Ventily na nastavení průtoku a ukazatele tlaku

Ventily na nastavení průtoku jsou označeny červenou barvou, levý ventil šel nastavit na maximální hodnotu 482 dílků a pravý na 620 dílků namísto 1000 dílků, jak uvádí manuál. Pro tuto indispozici funkce ventilu některá zadání nemohla být proměřena, ač v době pořizování video záznamu s ventily šlo manipulovat do hodnoty 1000 dílků. Tlak vstřikované voskové směsi se nastavoval na tlakoměru vlevo, rozsah měřícího zařízení byl 0-2000 psi.

Váha

Dále byla pro experiment použita váha Shinko Denshi SJ 4200 CE. Rozsah min. 5g, max. 4200g, rozlišení 0,1 g.

Kabel

Redukční kabel z koncovky RS 232/C na USB, délka kabelu je 1,8m.



Obr. 2.2.1.2 Redukční kabel

Forma

Duralová forma pro odvod voskové směsi do požadovaného směru (vstřikolis má spodní plnění), násadka a gumová hadice pro odvod voskové směsi do misky.



Obr. 2.2.1.3 Duralová forma pro odvod vosku s hadicí

Teplotní čidlo

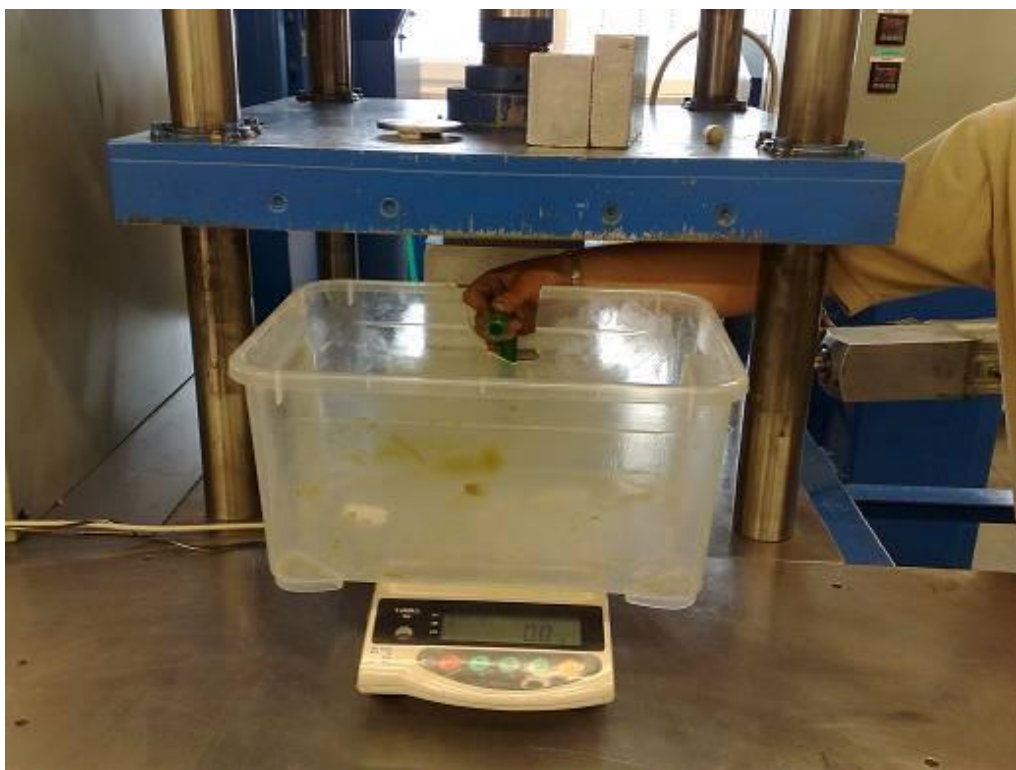
K měření teploty vosku bezprostředně po naplnění misky voskovou směsí bylo použito digitální teplotní čidlo GTH 175/Pt-E měřící v rozsahu $-199,9^{\circ}\text{C}$ až $+199,9^{\circ}\text{C}$ s přesností $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$.



Obr. 2.2.1.4 Teplotní čidlo

Další pomůcky

Notebook a plastová miska dostačující pro objem 5 litrů.



Obr. 2.2.1.5 Měřicí zařízení

2.2.2 Měření průtoku

Výstupními hodnotami váhy bylo současné zaznamenávání hmotnosti v gramech za určitý čas. Protože váha byla napojena na notebook přes redukční kabel, umožnila přenos dat pouze po dobu cca 30 sekund, poté již byla zahlcena informacemi a data již nepřenášela. Váha přenášela 5-6 hodnot hmotnosti za sekundu.

Měření s tlakem 1000 psi nebyla provedena pro velký ráz stříkané voskové směsi. Měření s tlakem 800 psi již byla uskutečněna, ale zkušební miska musela být obestavěna formami, aby se rázem voskové směsi nepohnula. Nejvíce bylo proměřeno zadání B: průtok 300 dílků a tlaky: 100, 300, 500 a 800 psi, od každého zadání byla provedena tři měření. Zadání A: průtok 150 dílků, tlaky: 100, 300 a 500 psi, od každého zadání byla

provedena dvě měření. V zadání C bylo třikrát proměřeno: průtok 450 dílků a tlak 300 psi.

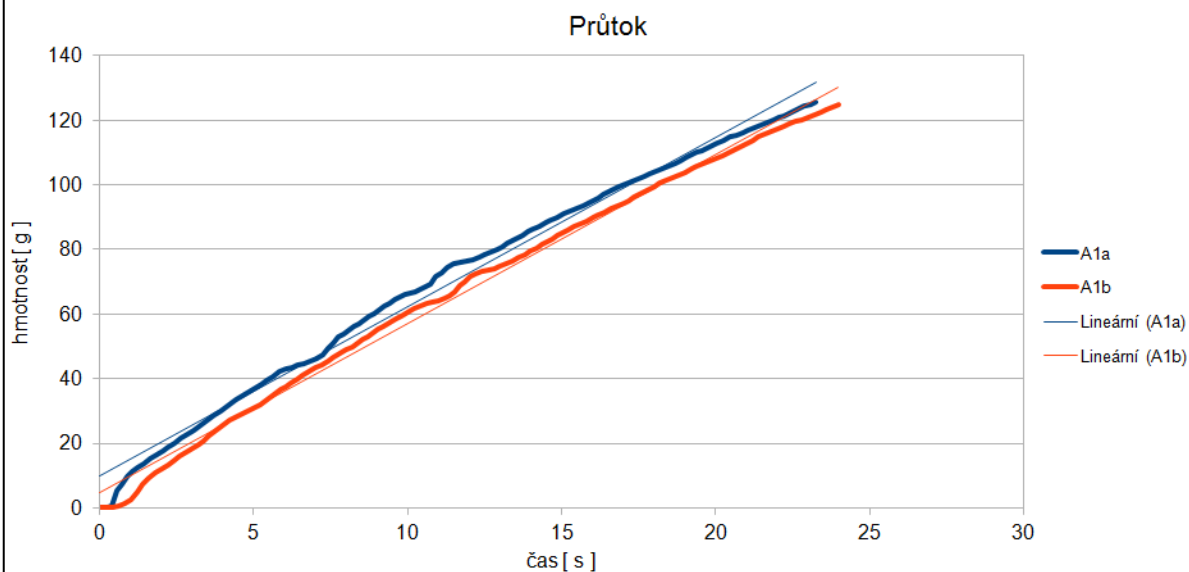
Zadání A1:

Průtok: 150 dílků

Tlak: 100 psi

Teplota vstřikované voskové směsi na ukazateli: 64 °C

Zadání A1 bylo proměřeno celkem dvakrát pod označení A1a a A1b.



Graf. 2.2.2.1 Průtok voskové směsi

Na rozdíl od videozáznamu nedošlo k počátečnímu zastavení voskové směsi.

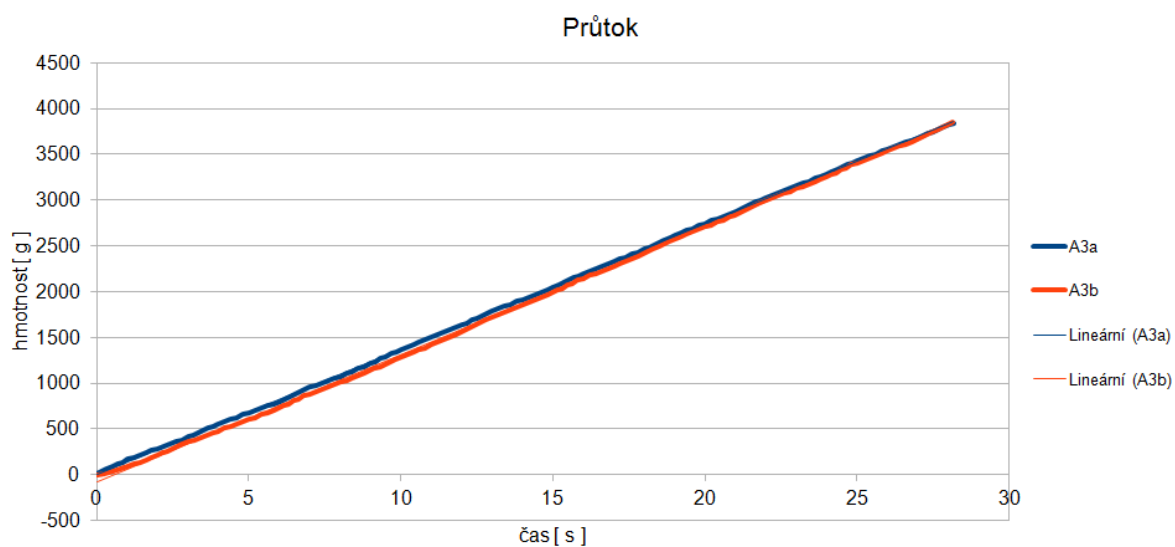
Zadání A3:

Průtok: 150 dílků

Tlak: 300 psi

Teplota vstřikované voskové směsi na ukazateli: 64 °C

Zadání A3 bylo proměřeno celkem dvakrát pod označení A3a a A3b.



Graf. 2.2.2.2 Průtok voskové směsi

Na rozdíl od videozáznamu nedošlo k počátečnímu zastavení voskové směsi.

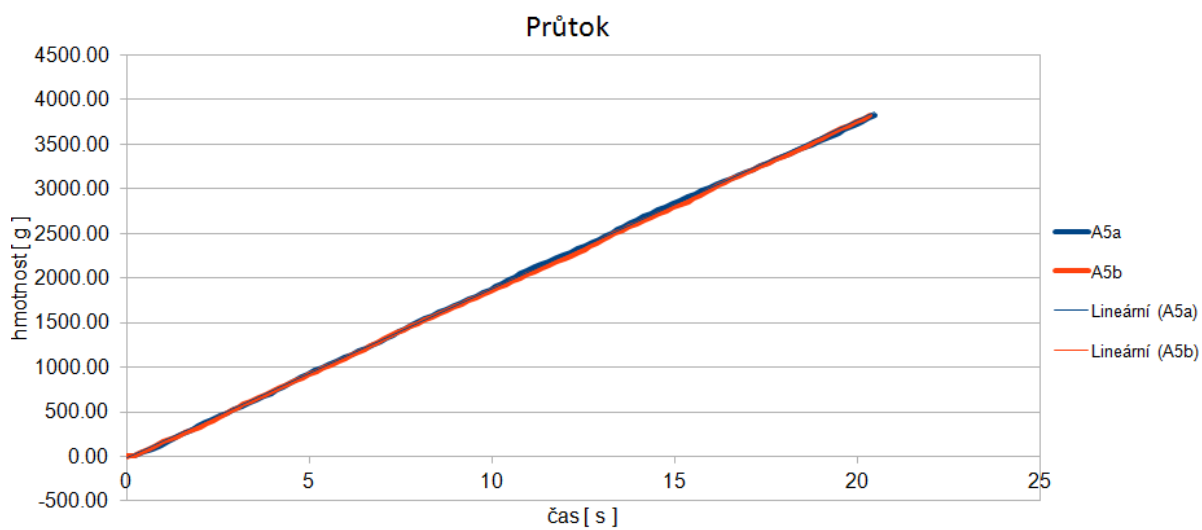
Zadání A5:

Průtok: 150 dílků

Tlak: 500 psi

Teplota vstřikované voskové směsi na ukazateli: 64 °C

Zadání A5 bylo proměřeno celkem dvakrát pod označení A5a a A5b.



Graf. 2.2.2.3 Průtok voskové směsi

Na rozdíl od videozáznamu nedošlo k počátečnímu zastavení voskové směsi.

Závěr pro zadání A:

Ve všech měřeních proběhl vstřik voskové směsi bez přerušení. Teplota voskové směsi nebyla 64 °C, jak uváděl ukazatel na vstřikolisu, ale pohybovala se mnohem výše, a to kolem 72,5 °C.

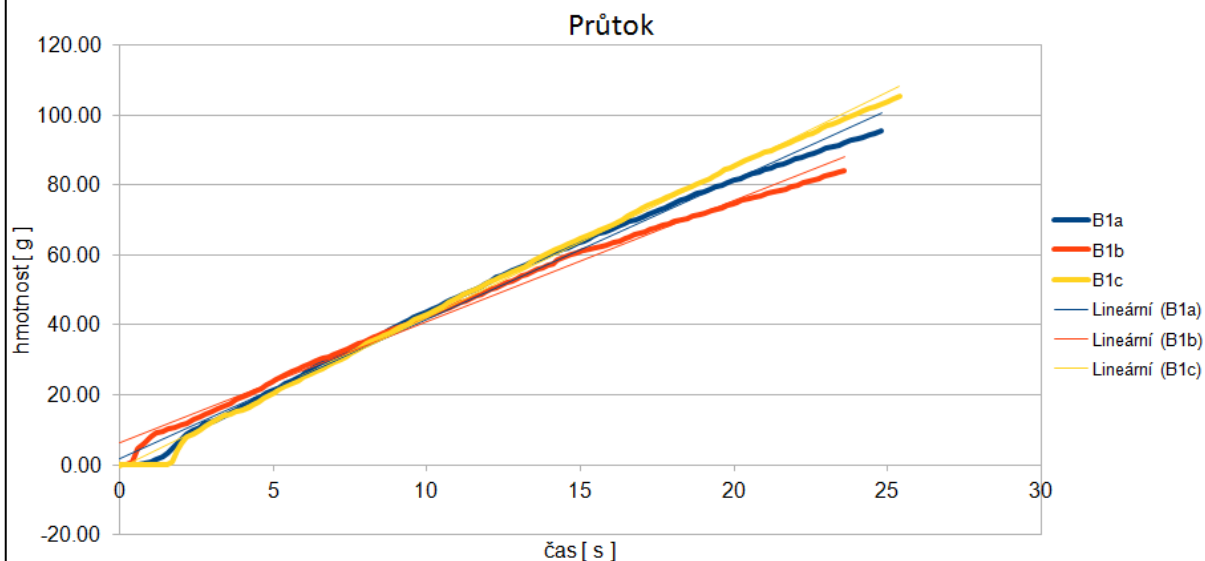
Zadání B1:

Průtok: 300 dílků

Tlak: 100 psi

Teplota vstřikované voskové směsi na ukazateli: 64 °C

Zadání B1 bylo proměřeno celkem třikrát pod označení B1a, B1b a B1c.



Graf. 2.2.2.4 Průtok voskové směsi

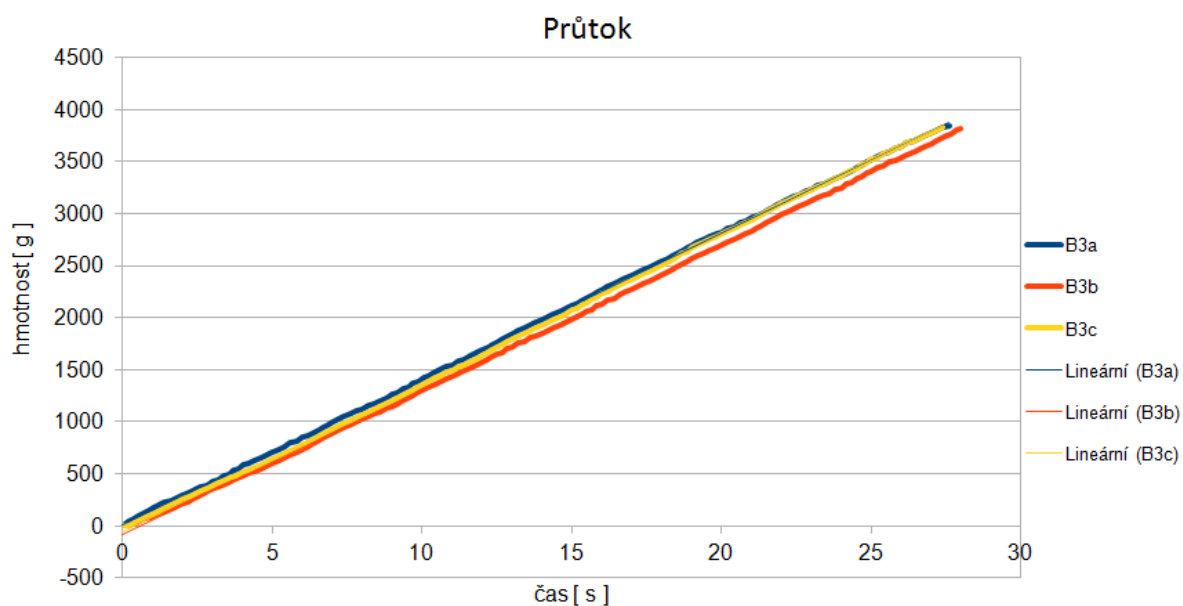
Zadání B3:

Průtok: 300 dílků

Tlak: 300 psi

Teplota vstřikované voskové směsi na ukazateli: 64 °C

Zadání B3 bylo proměřeno celkem třikrát pod označení B3a, B3b a B3c.



Graf. 2.2.2.5 Průtok voskové směsi

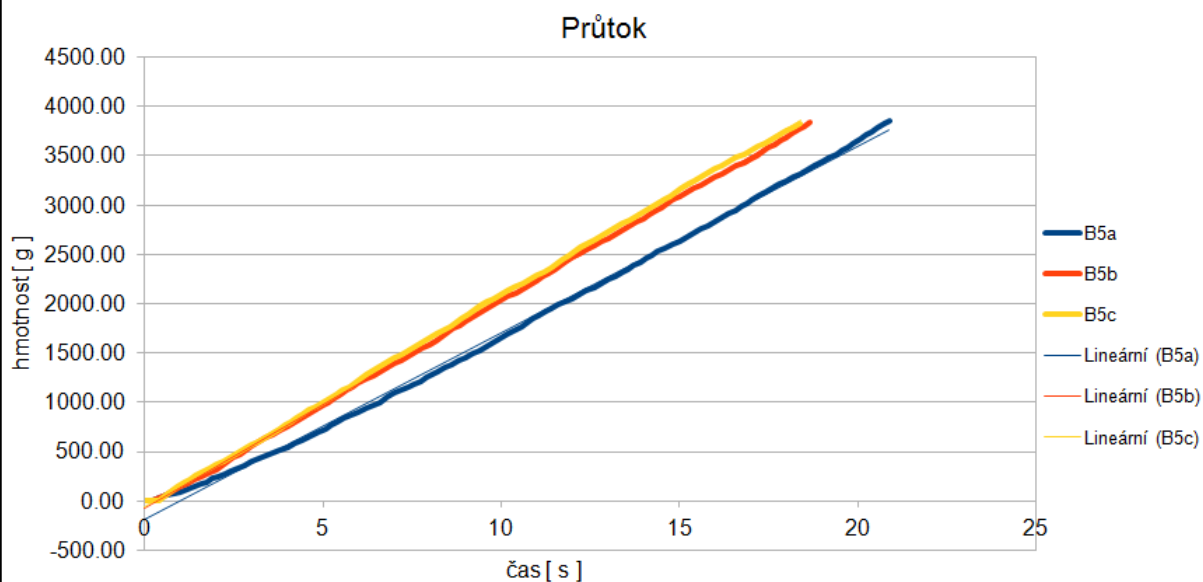
Zadání B5:

Průtok: 300 dílků

Tlak: 500 psi

Teplota vstřikované voskové směsi na ukazateli: 64 °C

Zadání B5 bylo proměřeno celkem třikrát pod označení B5a, B5b a B5c.



Graf. 2.2.2.6 Průtok voskové směsi

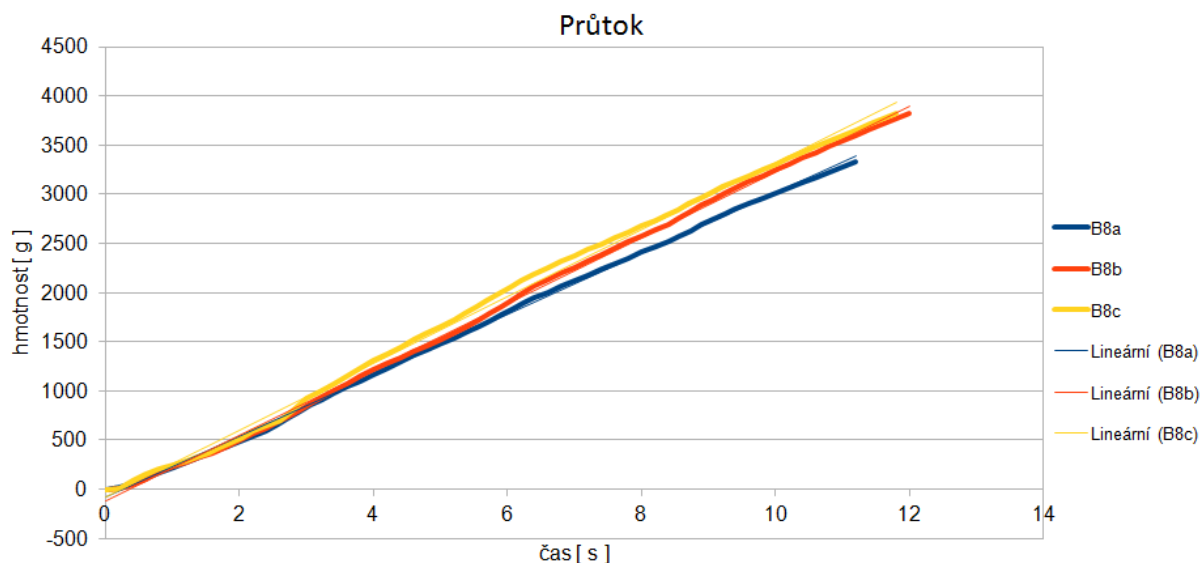
Zadání B8:

Průtok: 300 dílků

Tlak: 800 psi

Teplota vstřikované voskové směsi na ukazateli: 64 °C

Zadání B8 bylo proměřeno celkem třikrát pod označení B8a, B8b a B8c.



Graf. 2.2.2.7 Průtok voskové směsi

Závěr pro zadání B:

Ani při těchto měřeních nedošlo k zastavení voskové směsi a ve všech měřeních proběhl vstřik bez přerušení.

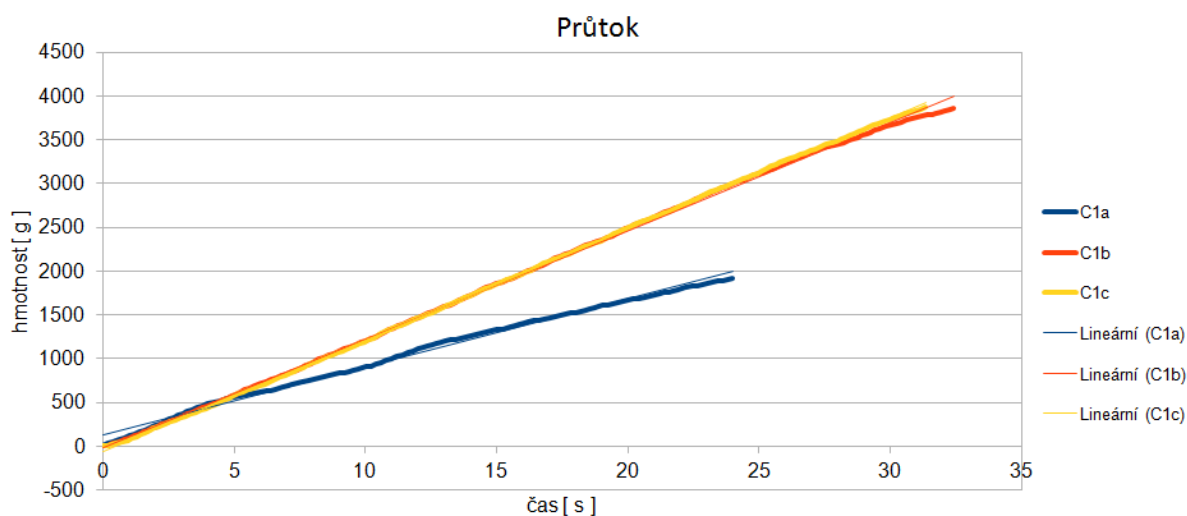
Zadání C1:

Průtok: 450 dílků

Tlak: 100 psi

Teplota vstřikované voskové směsi na ukazateli: 64 °C

Zadání B5 bylo proměřeno celkem třikrát pod označení C1a, C1b a C1c.



Graf. 2.2.2.8 Průtok voskové směsi

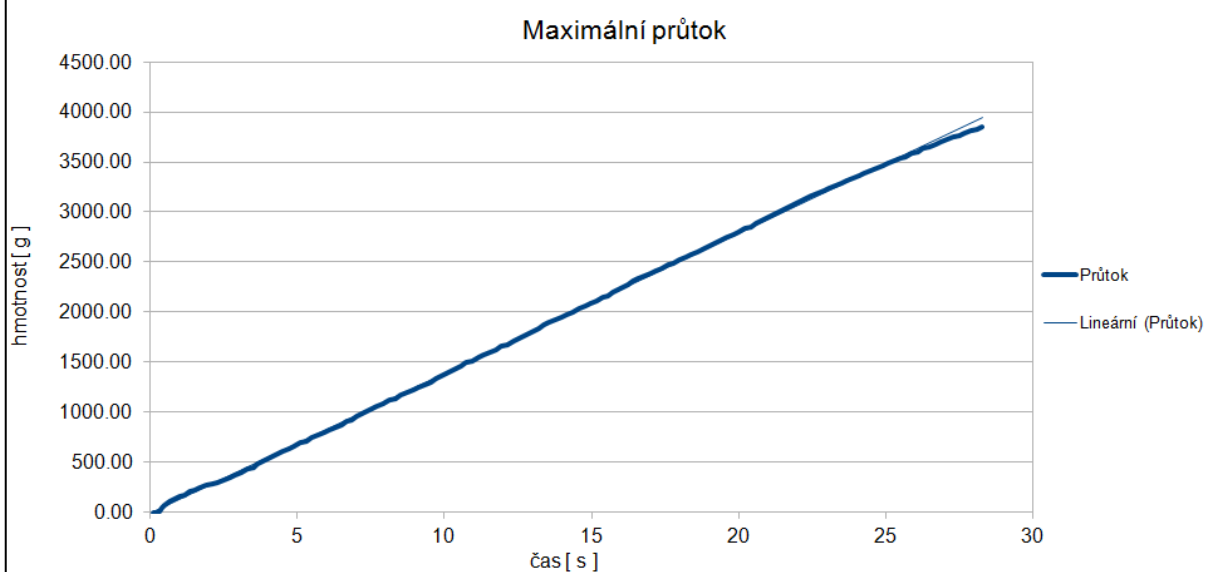
Závěr měření:

Protože porovnání záznamu z kamery a simulace ukazuje na nesprávnou funkci vstřikolisu, bylo třeba ověřit jeho schopnost vstřikovat voskovou směs spojitě, jak to uvádí výrobce.

V žádném měření nedošlo ke vstřiku voskové směsi „nadvakrát“, jak je tomu patrné z videozáznamů. Grafy dokazují, že průběh vstřikování je po nastavení určitého tlaku a průtoku vždy lineární. S narůstajícím průtokem má ale vždy první měření z experimentu (např. měření B5a z experimentu B5) odkloněnou první křivku z měření než zbylá měření. Toto odklonění může být způsobeno narůstající teplotou voskové směsi, která se po dobu měření mírně zvyšovala, i když hodnota teploty na ukazateli vstřikolisu byla neměnná. Při proměřování experimentu C byla naměřená teplota nejnižší, při experimentu B se mírně zvýšila a při posledním měření A dosahovala teplota voskové směsi 73 °C. Výrobce uvádí, že po určitém nastavení vstupních podmínek průtoku již průtok zůstane neměnný i po změně tlaku nebo teploty voskové směsi, tato měření však tuto informaci vyvrátila.

Maximální průtok

Také bylo provedeno měření s nastaveným největším průtokem 482 dílků. Manuál sice udává největší možný průtok ventilu 1000 dílků, ale ovládací kolečko umožnilo nastavení pouze 482 dílků. Tlak byl 300 psi. I při největším možném průtoku byl přírůstek hmotnosti za čas lineární.



Graf. 2.2.2.9 Maximální průtok voskové směsi

čas plnění [s]	celková hmotnost [g]	hmotnost g/s	odchylka od průměru [g]
1.	107,7	107,7	33,0
2.	251,0	143,3	-2,6
3.	341,0	90,0	50,7
4.	481,0	140,0	0,7
5.	639,0	158,0	-17,3
6.	767,5	128,5	12,2
7.	903,9	136,4	4,3
8.	1063,1	159,2	-18,5
9.	1193,3	130,2	10,5
10.	1331,6	138,3	2,4
11.	1492,3	160,7	-20,0
12.	1622,3	130,0	10,7
13.	1763,2	140,9	-0,2
14.	1925,0	161,8	-21,1
15.	2056,8	131,8	8,9
16.	2198,5	141,7	-1,0
17.	2363,2	164,7	-24,0
18.	2491,8	128,6	12,1
19.	2625,4	133,6	7,1
20.	2780,7	155,3	-14,6
		průměr: 139,0	průměr odchylky: 1,665

Tab. 2.2.2.1 Přibývajcí hmotnost voskové směsi za časový úsek

Při proměření maximálního průtoku voskové směsi (průtok: 482 dílků, tlak: 300 psi) bylo naměřeno, že průtok je ve výsledku lineární, avšak s menšími odchylkami v řádu jednotek až desítek gramů za sekundu. Odchytky jsou viditelné ve zvětšeném grafu 2.2.2.9 viz. Příloha 1. Tento průtok odpovídá průměrně 140,7 g voskové směsi za sekundu. Výrobce uvádí maximální průtok voskové směsi 30 l/s při vstupních podmínkách průtok: 1000 dílků a tlak: 2000 psi. Při známé hustotě voskové směsi 950 kg/m^3 tento průtok odpovídá $0,0005 \text{ m}^3/\text{s}$. Při vstupních podmínkách průtok: 482 dílků a tlak: 300 psi průtok odpovídá $0,000148 \text{ m}^3/\text{s}$. Zda informace o maximálním průtoku výrobce vstříkolisu je či není správná nelze posoudit pro odlišné vstupní podmínky.

2.2.3 Měření teploty

Při měřeních byla náhodně změřena teplota vstříkované voskové směsi. Ukazatele na vstříkolisu ukazovaly vždy stejnou teplotu 64°C .



Obr. 2.2.3.1 Teploty voskové směsi

Náhodné měření při pokusech však ukázalo jiné hodnoty.

Teplota vosku [°C]		
zadání	teplota při pokusech	teplota na vstříkolisu
A3a	72	64
A3b	73	
A5a	70,3	
A5b	72	
B3a	70	
B3b	70,5	
B5a	71	
B5b	70,5	
B8a	70	
B8b	64	
C1a	69	
C1b	64	
průměr	69,7	64

Tab. 2.2.3.1 Skutečné a teoretické hodnoty teploty voskové směsi

Měření probíhala od zadání C po zadání A. Naměřené hodnoty ukazují, že teplota vstříkované voskové směsi s přibývajícím časem narůstá. Odklon první křivky z daného měření ukazuje, že teplota ovlivňuje průtok. Za stejný časový úsek bylo vstříknuto méně voskové směsi než v ostatních měřeních při stejných vstupních podmínkách.

3 SHRUTÍ A NÁVRH DALŠÍHO POSTUPU

Provedená měření ukázala, že po nastavení vstupních podmínek (tlak, teplota a průtok) probíhá plnění misky voskovou směsí lineárně s menšími odchylkami v řádech jednotek až desítek gramů voskové směsi za sekundu. Při měření byly zjištěny nedostatky, zejména vyšší teplota vstřikované voskové směsi. Proto je nutné zkontrolovat a seřídít vyhřívací a chladicí zařízení vstřikolisu a teplotní čidla, aby byla dodržena nastavená teplota voskové směsi. Je třeba používat redukci z koncovky RS232/C na USB bez propojovacího kabelu o délce 1,8m, která dokáže přenášet data nepřetržitě bez přerušení signálu. Dále je nezbytné instalovat nové pevné uchycení gumové hadice k duralové formě pro lepší možnost plnění i za použití větších tlaků. Další výhodou bude možnost průběžného měření tlaku při plnění forem. Nejen průtok a teplota, ale i tlak má podstatný vliv na průběh plnění forem voskovou směsí.

V simulačním programu Cadmould je třeba nastavit nové vstupní podmínky: teplotu (po opravě teplotních čidel), tlak a průtok vstřikovaného vosku, který je dán i průměrem trysky. Dále je třeba porovnat průběh plnění většího modelu s výsledky simulace.

ZÁVĚR

Porovnávání průběhu vstřikování voskové směsi do zkušební formy a průběhu vstřikování v simulačním programu Cadmould vykazuje rozdíly v plnění při malém průtoku. Všechna plnění v zadání A (malý průtok) proběhla s přerušením, tedy „nadvakrát“. Vždy došlo k zastavení voskové směsi a po určitém časovém intervalu k dokončení plnění formy. Tato přerušení plnění voskové směsi se objevila i při vyšších průtocích, proto byl proveden experiment se vstřikováním voskové směsi do misky, která byla umístěna na váhu zaznamenávající spojitý přírůstek hmotnosti a času. Průběh vstřikování probíhal lineárně, jak tomu uvádí výrobce. Nyní již byla vosková směs vždy vstřikována bez přerušení. Avšak teplota voskové směsi se s přibývajícím časem zvyšovala.

Výsledky měření ukazují na mylnou informaci výrobce vstřikolisu, že po nastavení určitého průtoku se průtok nezmění a to ani vlivem změny tlaku nebo teploty vstřikované voskové směsi. Poukazuje na to odklon první křivky (tj. prvního měření z daného experimentu) za stejných vstupních podmínek, který měl vždy vyšší teplotu než měření následující. Za vyšší teploty dojde ke vstřiku menší hmotnosti voskové směsi za určitý čas. Po nastavení vstupních podmínek jako jsou tlak a průtok je vstřikování voskové směsi lineární, jak uvádí výrobce, nesmí se však měnit tlak nebo teplota. Jen poté budou i následující vstřiky stejné. Po validování vstupních podmínek na vstřikolisu mohou být tyto podmínky využity pro simulaci v programu Cadmould.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] 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>>.
- [2] 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>>.
- [3] PIRKL, S. *Ústav aplikované fyziky a matematiky* [online]. 2005 [cit. 2012-02-12]. Reologie a reometrie kapalin. Dostupné z WWW: <<http://kf.upce.cz/Reologie%20a%20reometrie%20kapalin.doc>>.
- [4] BEELEY, P. R.; SMART, R. F. *Investment Casting*. 1st ed. Cambridge : The Uni-versity Press, 1995. 486 p. ISBN 0901716669.
- [5] FLEISCHNER, P. *Hydromechanika*. Vyd. 4. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1990. 232 s. ISBN 80-214-0226-1.
- [6] JANALÍK, J. *Viskozita tekutin a její měření* [online]. 2010 [cit. 2012-02-12]. Ostrava. Dostupné z www: <<http://www.338.vsb.cz/PDF/TEXTviskozitaPDF.pdf>>.
- [7] HORÁČEK, M. *ESL*. (přednáška) Brno: FSI 12.11.2011.
- [8] HORÁČEK, M. *Přehled vosků pro přesné lití*. Brno: Odbor slévárenství ÚST, FSI Brno, 2006. 15 s.
- [9] ŠMÍD, D. *Optimalizace technologie vybraných náročných výrobků ze slitiny Al*. Brno, 2009. Diplomová práce. VUT FSI v Brně. Vedoucí práce Milan Horáček.
- [10] HORÁČEK, M. *Současné trendy v technologii vytavitelného modelu*. Brno: Odbor slévárenství ÚST, FSI Brno.
- [11] YUKEN, Flow controls, [online]. [cit.2012-05-17]. Dostupné z WWW: <http://www.seall.cz/upload/stranky/users/seall/File/produkty/hydraulika/ventily_pro_rizeni_prutoku_Yuken.pdf>.

- [12] SHELL-O-MATIC INC, *Manuál pro vstříkolis 35T 20/28 sériové číslo 3439, Kondicionér/Chladič vosku 185 I sériové číslo 3440-1, Tavicí vana vosku 185I sériové číslo 3441-1*, zapůjčeno slévárnou Fimes a.s. Uherské Hradiště.
- [13] *Vstříkolisy*. INVERA, s.r.o. [online]. [cit. 2012-05-20]. Dostupné z WWW: <<http://www.invera.cz/index.php?lang=cs&id=vyrobn-program>>.
- [14] Cadmould 3D-F[®].*Help*. Dostupný v simulačním programu Cadmould 3D-F[®].
- [15] ZEMAN, L. *Vstříkování plastů*. Vyd. 1. Praha: Nakladatelství BEN, 2009. 247 s. ISBN 978-80-7300-250-3.
- [16] ROCKEY, B. *University of Alberta Industrial Design, for Injection Molding Wikipedia article*, [online]. 2009 [cit. 2012-02-12]. Injection Molding Machine Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Injection_molding.png>.
- [17] KOSOUR, V.; HORÁČEK, M.; VAŠČÁK, T. *Wax injection simulation*. In Proceedings 51. International Foundry Conference Porotorž 2011. Ljubljana, Fleks, d.o.o. 2011. p. 1 - 9. ISBN 978-961-90130-6-9.
- [18] KOSOUR, V. *Numerické modelování pohybu viskoplastických směsí při výrobě modelů*. Sborník z FSI Junior konference 2011. Brno. 2011. p. 1 - 50. ISBN 978-80-214-4359-4.
- [19] 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.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
η	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}]$	dynamická viskozita kapaliny
τ	[Pa]	tečné napětí
dv/dy	[m/s]	rychlostní spád
du/dx	[m/s]	vzájemná rychlost pohybu smykových rovin
D	[m/s]	gradient rychlosti
p	[psi]	tlak
QV	[m ³ /s]	průtok
t	[°C]	teplota
t	[s]	čas
m	[kg]	hmotnost

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Měření průtoku

