

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice PhD Thesis, sv. 697*

*ISSN 1213-4198*

*thesis* IS

*Ing. et Ing. Vojtěch Kosour*

**Využití numerické simulace  
k optimalizaci výroby  
voskových modelů**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

**Ing. et Ing. Vojtěch Kosour**

**VYUŽITÍ NUMERICKÉ SIMULACE K OPTIMALIZACI  
VÝROBY VOSKOVÝCH MODELŮ**

**USE OF NUMERICAL SIMULATION TO OPTIMIZE WAX  
PATTERNS PRODUCTION**

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Slévárenská technologie  
Školitel: prof. Ing. Milan Horáček, CSc.  
Oponenti: prof. Ing. Iva Nová, CSc.  
prof. Ing. Elbel Tomáš, CSc.  
Datum obhajoby: 14. 3. 2013

## **Klíčová slova**

Technologie lití na vytavitelný model, voskový model, proces vstřikování vosku, simulace, proudění voskové směsi, ProCast, Cadmould.

## **Key words**

Investment Casting Technology, Wax pattern, Wax injection process, Numerical simulation, Wax flow, ProCast, Cadmould.

## **Místo uložení práce**

Areálová knihovna Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně  
Technická 2896/2  
616 69 Brno

## Obsah

1 ÚVOD .....	5
1.1 Komplikace při výrobě voskových modelů .....	5
1.2 Numerická simulace v technologii lití na vytavitelný model .....	5
1.3 Předpoklady vytvoření numerické simulace vstřikování voskové směsi.....	7
1.4 Cíl a struktura hlavních kapitol dizertační práce .....	8
2 NUMERICKÁ SIMULACE .....	9
3 CHARAKTERIZACE VOSKOVÉ SMĚSI.....	10
3.1 Požadavky materiálových databází simulačních programů .....	10
3.2 Zkoušky voskových směsí .....	11
3.2.1 Zkoušky voskových směsí prováděné jejich výrobci .....	11
3.2.2 Obecné metody měření využitelné k charakterizaci voskové směsi .....	11
4 SIMULACE PRŮBĚHU PROUDĚNÍ VOSKOVÉ SMĚSI.....	13
4.1 Program Cadmould 3D-F .....	13
4.2 Prototypová simulace v programu Cadmould 3D-F .....	13
4.3 Program ProCast .....	14
4.4 Prototypová simulace v programu ProCast .....	15
5 VALIDACE .....	16
5.1 Validace I.....	16
5.1.1 Forma I.....	16
5.1.2 Srovnání experimentálně získaných dat se simulací v programu Cadmould.....	16
5.1.3 Srovnání experimentálně získaných dat se simulací v programu ProCast.....	18
5.2 Měření průtoku voskové směsí .....	19
5.3 Validace II.....	21
5.3.1 Forma II.....	21
5.3.2 Údaje stanovené pomocí formy II .....	21
5.3.3 Numerická simulace plnění formy II.....	23
6 ZÁVĚR.....	26
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	29
ŽIVOTOPIS AUTORA .....	31
ABSTRAKT.....	32



# 1 ÚVOD

Jednu z hlavních fází výroby odlitků pomocí technologie lití na vytavitelný model je zhotovení kvalitního vytavitelného modelu. Tyto modely jsou dnes nejčastěji zhotovovány vstřikováním voskové směsi do kovových forem na vstřikolisech. Nastavení technologických podmínek procesu vstřikování, optimálně navržená vstřikovací forma a použitá modelová směs jsou klíčové faktory pro zhotovení kvalitního voskového modelu s bezvadným povrchem, bez dalších vad, v dostatečné rozměrové a tvarové toleranci. Práce se zaměřuje na oblast tvorby a využití numerické simulace průběhu proudění voskové směsi dutinou formy během vstřikovacího cyklu.

## 1.1 KOMPLIKACE PŘI VÝROBĚ VOSKOVÝCH MODELŮ

Proces výroby voskového modelu stojí na čtyřech hlavních pilířích – 1) vstřikovací forma; 2) vstřikolis; 3) vstřikovaný materiál, 4) lidský faktor. Ve všech těchto oblastech dochází k zásadnímu ovlivnění výsledné kvality voskového modelu. Jednotlivé faktory se vzájemně ovlivňují a je třeba je vždy uvažovat v celém výrobním kontextu. Při vzniku neshodného kusu bývá obtížné definovat konkrétní jedinou příčinu a napravit ji tak aby nebyly narušeny ostatní veličiny procesu a vznikl voskový model požadované kvality. Požadavky na odlitky, tedy i voskové modely neustále rostou. S rostoucími rozměry, tvarovou složitostí, vyššími požadavky na rozměrovou a tvarovou přesnost roste i pravděpodobnost vzniku neshodného voskového modelu [1].

Proces optimalizace všech faktorů ovlivňujících výrobu náročných odlitků (letecký průmysl, kosmonautika, lékařství, atd.) se stále více detailizuje a zpřesňuje. Jedním z nástrojů umožňující lépe pracovat s velkým množstvím proměnných při minimálním zatížení výrobních kapacit je numerická simulace. Díky simulaci je možné testovat vliv změny konkrétního parametru/ů na výslednou kvalitu voskového modelu. Je možné nejen najít kritické místo procesu, ale také navrhnout a testovat nejvhodnější řešení. Pokud by měli technologové k dispozici takovýto nástroj, mohli by provádět optimalizaci celé výrobní technologie virtuálně na počítači. Tím by se výrazně urychlilo nalezení optimálního nastavení výrobního procesu.

Mezi nejčastější vady voskových modelů patří nezaběhnutí, deformace, tokové čáry, pomerančová kůže, výronky, propadliny, staženiny, uzavřený vzduch, praskliny, nedodržení předepsaných rozměrových a tvarových deformací [2], [3]. K jejich eliminaci, a to ještě dříve než je vadný kus vyroben, by mohlo být využito numerické simulace procesu vstřikování voskové směsi.

## 1.2 NUMERICKÁ SIMULACE V TECHNOLOGII LITÍ NA VYTAVITELNÝ MODEL

V technologii lití na vytavitelný model jsou dnes již běžně modelované procesy odlévání kovu do keramické skořepiny (odlévání gravitační, za sníženého tlaku, sklopné, rotační, atd.), procesy tuhnutí a chladnutí rozmanitých druhů slévárenských slitin v keramické skořepině. Matematické modelování umožňuje s velkou přesností predikovat vznik vad, mikrostrukturu, napětí, deformací v odlitku. Tyto numerické simulace jsou dnes na trhu v několika simulačních programech slévárnám běžně dostupné a slévárny je často využívají [4].

Podle dostupných informací, však slévárnám není dostupná kompletní numerická predikce procesu výroby voskového modelu vstřikováním. Takováto simulace uvažující vlivy vstřikovací formy (tvar modelu, vtokového systému, temperace, od vzdušnění atd.), vstřikovaného materiálu (slévárenské voskové směsi) a nastavení procesních parametrů by umožňovala výrazné zkrácení cyklu zavedení výroby nových náročných voskových modelů. Díky optimalizaci výrobního cyklu při nasazení numerických simulací v technologii vstřikování plastů, které má k výrobě voskových modelů poměrně blízko, je uváděna redukce v čase a celkových nákladech výroby kolem 30% [5].

Pro kompletní numerické modelování proudění (CFD – Computational Fluid Dynamics) tekuté směsi dutinou je v dnešní době dostupno mnoho specializovaných simulačních programů. Tyto programy se skládají z několika modulů, které umožňují uživateli vytvořit požadovanou vizualizaci simulovaného děje. Simulační programy se liší právě možnostmi jednotlivých modulů. Obsahují moduly pro načtení a úpravy digitálních dat z běžných CAD softwarů, moduly pro vytvoření matematického popisu tělesa pro výpočet (vytvoření výpočtové sítě), pro definování počátečních a okrajových podmínek výpočtu, moduly pro volby různých druhů a postupů analýz, moduly materiálové databáze a moduly pro vizualizaci vypočtených dat.

První výpočtové programy, hlavně vzhledem k velmi omezenému výkonu hardwaru, umožňovali modelovat proudění tekutiny pouze ve dvou rozměrech (2D analýzy; „2D simulace“). Tyto programy se specializovaly na modelování proudění plastových výstřiků, u kterých jsou dva rozměry výrazně větší než rozměr třetí (tloušťka tělesa se zanedbávala). Plastové výstřiky jsou většinou tenkostěnné výrobky. Později bylo umožněno analyzovat tenkostěnné prvky (poměr délky ku tloušťce stěny cca 10 : 1), které již však byly vzájemně spojeny do 3D prostoru. Tato skupina analýz tenkostěnných objektů usprádaných do trojrozměrného prostoru se označuje jako 2,5D analýzy. Tyto analýzy jsou dodnes hojně využívány a jsou dnes zcela dostatečné pro potřeby plastových výstřiků. Tyto „plastikářské“ programy většinou obsahují několik matematických modelů umožňující výpočet neneutonského proudění. Jako většina plastů, tak i voskové směsi vykazují chování neneutonských kapalin a k popisu jejich proudění je třeba popsat závislosti viskozity, smykových rychlostí a teploty (např. modely Carrau-Yasuda, Carrau-WLF, Cross, Williamson, Power-Cutoff, a další) [6].

Pro simulace objemových těles (zhruba stejné rozměry ve všech třech osách) jsou určeny tzv. plně 3D analýzy. Byly vyvíjeny především pro potřeby modelování odlévání odlitků. Popis neneutonského proudění v trojrozměrném prostoru vyžaduje výrazně náročnější matematický popis a 3D analýzy jsou tedy náročnější na hardwarový výkon výpočetních stanic a výpočtový čas. Slévárenské slitiny při odlévání se však většinou chovají jako newtonské kapaliny a slévárenské simulační programy jsou tedy primárně optimalizovány na newtonské kapaliny. V posledních letech však začínají obsahovat i přídatné výpočtové moduly pro popis proudění neneutonských kapalin a lze je tedy teoreticky použít i pro vytvoření simulace plnění dutiny formy voskovou směsí (tato domněnka je v práci prokázána).

### 1.3 PŘEDPOKLADY VYTVOŘENÍ NUMERICKÉ SIMULACE VSTŘIKOVÁNÍ VOSKOVÉ SMĚSI

K vytvoření prakticky použitelné numerické simulace vstřikování voskové směsi je třeba splnit minimálně pět následujících podmínek.

#### 1) Matematické modely a postup řešení

Matematické modely jsou soubory rovnic určitým způsobem popisující fyzikální procesy. Proces vstřikování voskové směsi je neizotermický děj, při kterém dochází ke změnám tlaku (objemu směsi). Predikce průběhu plnění se provádí především pomocí řešení rovnic o zachování hybnosti, hmoty a energie (Navier-Stokesovi rovnice; CDF – Computational Fluid Dynamics). (Kapitoly v dizertační práci 2.3, 2.4, 2.5.). Pro velice jednoduché tvary voskového modelu je lze řešit analyticky pro ostatní je nutné řešení přibližné (numerické). (Kapitoly 2.1, 2.2, 2.6, 2.7 v dizertační práci).

#### 2) Materiálová databáze

Materiálová databáze simulačního programu musí obsahovat nezbytné reologické, tepelné a mechanické vlastnosti materiálů. „Nezbytná“ znamená taková, která jsou potřebná pro výpočet konkrétní požadované numerické predikce (např. pro predikci pohybu voskové směsi, jejího ochlazování, deformace, atd.). Materiálová data k materiálům formy (nejčastěji běžné hliníkové slitiny) jsou dnes ve většině simulačních programů dostupná. Materiálová data k voskovým směsím nejsou v databázích programů k dispozici (anebo jen neúplně) a je třeba je naměřit a po úpravách do materiálové databáze zadat. Pro slévárenské voskové směsi nejsou většinou známy konkrétní metodiky měření požadovaných charakteristik. Obecně se vychází ze zkušeností s měřením plastových materiálů (kapitola 3 dizertační práce).

#### 3) Počáteční podmínky

Počáteční podmínky je třeba stanovit z reálného výrobního procesu. Jde například o teplotu vstřikovaného materiálu, teplotu formy, průběh tlaku a průtoku během vstřikovacího cyklu, koeficienty přestupu tepla, atd. Pokud není možné získat potřebná data přímo z výroby, je třeba navrhnout vhodný způsob jejich stanovení a data naměřit (např. skutečný průtok voskové směsi tryskou při nastavení určité hodnoty na vstřikolisu; skutečné hodnoty tlaku, teploty voskové směsi, atd.). (Kapitoly 4.1.2, 4.1.4, 4.2.2, 4.2.4 a kapitoly 5.1, 5.2, 5.3 v práci).

#### 4) Okrajové podmínky

Jedná se o předpoklady (zjednodušení) nutné pro zjednodušení matematického popisu skutečného děje. Například u vstřikování voskových směsí se předpokládá, že nedochází k deformacím vstřikovací formy a lze ji pro potřeby výpočtů pokládat za ideálně tuhou. Dále lze například předpokládat tuhnutí voskové směsí po vrstvách, směrem od okraje stěny formy do středu atd. (Kapitoly 4.1.4, 4.1.5, 4.2.4, 4.2.5, 5.1.5 práce).

#### 5) Validace

Po vytvoření první „prototypové“ simulace na základě výše zmíněných vstupů je třeba provést její porovnání se skutečností. Bez jasného prokázání vypovídající hodnoty simulací vzhledem ke konkrétním výrobním podmínkám ji není možné použít jako efektivní nástroj optimalizace technologie. V prvních fázích, kdy je třeba provádět postupnou optimalizaci nově vytvořené simulace, je vhodné používat jednoduché tvary voskových modelů, jednoduché vstřikovací formy na kterém lze lépe sledovat vliv změny různých parametrů (např. vliv nastavených technologických podmínek vstřikování). (Kapitoly 5.1, 5.2, 5.3 práce).



## 1.4 CÍL A STRUKTURA HLAVNÍCH KAPITOL DIZERTAČNÍ PRÁCE

Cílem práce je vytvořit numerickou predikci průběhu zaplňování dutiny formy voskovou směsí při vstřikování na slévárenském vstřikolisu. Definovat, co všechno je třeba učinit, aby tato predikce mohla vzniknout. Následně pak srovnat výsledky získané z vytvořené numerické predikce se skutečným průběhem zaplňování dutiny na vstřikolisu.

Dizertační práce je strukturována do šesti hlavních kapitol. První kapitola uvádí do problematiky výroby voskových modelů pro technologii lití na vytavitelný model. Vymezuje pozici výroby voskového modelu vstřikováním v celé této slévárenské technologii. Definuje klíčové prvky ovlivňující kvalitu voskového modelu – vstřikovací formu, stroj a vstřikovaný materiál. Vymezuje nejběžnější vady, se kterými se při výrobě voskových modelů setkáváme. Druhá část první kapitoly je věnovaná stručnému úvodu do problematiky numerické predikce vstřikování voskových směsí.

Druhá kapitola se věnuje především teoretickému rozboru a obecným principům numerických simulací. Popisuje hlavní části výpočtového řešení a konstrukci simulačních programů. Více se zaměřuje na matematický popis spojený s problematikou proudění vstřikované směsi a vhodného popisu materiálového modelu voskových směsí. V závěru se stručně zmiňuje o dvou nejpoužívanějších numerických metodách řešení – metodě konečných prvků a metodě konečných diferencí.

Třetí kapitola uvádí, co je třeba zadat do materiálových databází vybraných simulačních programů (ProCast, Cadmould), aby mohly být prováděny numerické výpočty spojené s voskovými materiály. Skrze analýzu ve slévárenství používaných metod charakterizace voskových směsí se snaží najít možnosti, jak potřebná materiálová data pro simulace získat. Následně uvádí konkrétní postupy měření a naměřená materiálová data pro vybranou voskovou směs Remet Hyfill B478.

Čtvrtá kapitola představuje vybrané simulační programy ProCast a Cadmould z pohledu jejich možností k vytvoření numerických predikcí vstřikování voskových směsí. Z možností, které simulační programy v tomto kontextu nabízejí, se zaměřuje na numerickou predikci průběhu zaplňování dutiny formy voskovou směsí. Jde o první krok, který musí být učiněn, pokud mají být vytvořeny i další navazující numerické predikce – tj. simulace rozměrových změn a deformací voskových modelů. V kapitole jsou představeny vytvořené prototypové simulace průběhu zaplňování jednoduché dutiny vstřikováno voskovou směsí Remet Hyfill B478.

Numerická predikce, v této práci predikce průběhu zaplňování dutiny formy voskem, je pro praxi použitelná pokud víme, do jaké míry se se skutečným procesem shoduje. Tedy jak přesné (realitě odpovídající) predikce se nám podaří pomocí simulace získat. Je tedy nutné nově vytvořenou predikci podrobit validaci a následně pokračovat v její optimalizaci tak, aby bylo dosaženo požadovaných výsledků. V páté kapitole jsou navrženy a realizovány postupy validace vytvořené simulace.

V poslední šesté kapitole je provedeno shrnutí této práce, která představuje úvodní práci do nové problematiky využívání numerických predikcí ve výrobě voskových modelů vstřikováním pro technologii lití na vytavitelný model.

## 2 NUMERICKÁ SIMULACE

Pojmem simulace označujeme zjednodušený model určitého reálného systému. Počítačová simulace je virtuální prostředí založené na podobnosti s prostředím reálným, které nám umožňuje zkoumat určité principy a zákonitosti, čehož pak lze využívat v prostředí reálném. Virtuální prostředí je vytvořeno pomocí matematického popisu. Matematické rovnice popisují zvolené klíčové fenomény reálného procesu i postupy jejich řešení.

Nejpoužívanější počítačovou metodou numerického řešení jsou metody konečných prvků (česky MKP, anglicky FEM – Finite Element Method). Tyto metody jsou založeny na principu diskretizace kontinuita do velkého množství konečných prostorových nebo plošných prvků (výpočtová síť), což umožňuje nalezení řešení matematického modelu s přijatelnou chybou. Hledání neznámých funkcí v oblasti  $\Omega$  s hranicí  $\Gamma$  je nahrazeno hledáním konečného počtu známých hodnot funkcí nebo parametrů  $\Delta$  z nichž pak lze zkonstruovat přibližné řešení. Jde o převedení analytického řešení soustav diferenciálních rovnic na řešení soustav algebraických lineárních rovnic. FEM metod existuje velké množství. Liší se především ve způsobu, kterým se provádí převod analytického řešení na algebraické (volbou báze funkcí do kterých se hledané funkce rozkládají). Tento převod, rozklad je vázán na rozdělení oblasti  $\Omega$  na podoblasti  $\Omega_e$ , které nazýváme konečné prvky na rozdíl od nekonečně malých diferenciálů  $d\Omega$  u přesné (analytické) analýzy. Metoda FEM je definována jako: „Zobecněná Ritz-Galerkinova variační metoda, užívající báze funkcí s malým kompaktním nosičem, úzce spjatým se zvoleným rozdělením řešené oblasti na konečné prvky“ [7].

Dobrý matematický model je kompromisem mezi zjednodušením reálného procesu vyjádřeného matematickým popisem a přesností dosažených výsledků ze simulace. V případě vstřikování voskových směsí, by bylo např. možné použít matematický model proudění viskózní homogenní izotropní tekutiny. Pro popis proudění lze použít řadu matematických modelů více, či méně vhodných pro různé druhy newtonských kapalin. Řada simulačních programů umožňuje uživateli volit různá nastavení. Pokud je např. použito pro voskovou směs (pseudoplastické kapaliny, často vysoký podíl plniva) matematické vyjádření popisující proudění newtonské kapaliny, znamená toto zjednodušení značnou úsporu ve výpočetním čase i hardwarových nárocích simulace. Na druhou stranu může dojít k výraznému snížení vypovídající hodnoty predikce [8].

Proces získání výpočtového řešení se skládá ze dvou hlavních oblastí. První hlavní oblast řešení představuje převedení parciálních diferenciálních rovnic a počátečních a okrajových podmínek výpočtu do systému diskrétních algebraických rovnic. Tato první oblast řešení bývá nazývána jako diskretizace. Proces diskretizace může být proveden například pomocí dnes již běžně používaných metod konečných diferencí nebo konečných objemů [9].

Druhou oblastí hledání výpočtového řešení je implementace numerických metod, které umožní nalezení řešení v předchozí fázi vytvořeného systému algebraických rovnic. Jedná se o řadu možností, jak v přímých numerických metodách (např. Gaussova eliminace), tak metod nepřímých (např. Jacobiova, Gauss-Siedelova metoda) [8], [9], [10].

### 3 CHARAKTERIZACE VOSKOVÉ SMĚSI

Voskové směsi jsou rozmanité materiály, jejich vlastnosti a chování je proměnlivé v poměrně širokém intervalu. Z tohoto důvodu je třeba naměřit pro simulaci potřebné charakteristiky zvlášť vždy pro konkrétní voskovou směs. Materiálová databáze byla vytvořena pro materiál Remet Hyfill B478. Údaje do materiálové databáze byly stanovovány a zadávány především s ohledem na požadavky programů ProCast a Cadmould s cílem vytvoření predikce zaplňování dutiny formy voskovou směsí.

#### 3.1 POŽADAVKY MATERIÁLOVÝCH DATABÁZÍ SIMULAČNÍCH PROGRAMŮ

##### A) Požadavky materiálové databáze softwaru ProCAST 2010

K simulaci proudění je třeba materiál do databáze základní verze programu ProCast zadefinovat pomocí následujících údajů [11]:

- Tepelná vodivost [W/mK]
- Hustota [kg/m<sup>3</sup>]
- Specifické teplo [J/kgK]
- Latentní teplo [J/kg]
- Frakce solidu [/]
- Teploty solidu a likvidu [°C]
- Viskozita [centipoise]
- Povrchové napětí [mN/m]

V ideálním případě by měla být tepelná vodivost, hustota, specifické a latentní teplo, povrchové napětí zadány v závislosti na teplotě. Viskozitu je možné definovat pomocí tří modulů: 1) modul „Newtonian“ – pro newtonské kapaliny, 2) „Carreau-Yasuda“ – pro neneutonské kapaliny, 3) „Power-Cutoff“ - matematický model doporučovaný pro simulace Thixo-castingu. Pro plnění voskové směsi je nejvhodnější pětiparametrový model Carreau-Yasuda. Hodnoty latentního a specifického tepla lze v databázi nahradit křivkou entalpie [J/kgK].

##### B) Požadavky materiálové databáze softwaru Cadmould 3D-F

- Viskozita
- Tepelná vodivost [W/mK]
- Specifická tepelná kapacita [J/KgK]
- Hustota [g/cm<sup>3</sup>] (pouze pokud není pvT)
- pvT data

Výše uvedená materiálová data jsou nezbytná pro provedení simulace průběhu plnění a teplotního pole voskové směsi. Dále je nutné doplnit i tzv. „procesní data“. K provedení kompletní analýzy vstřikovacího cyklu (tedy i analýz smrštění a deformace) je třeba databázi doplnit o [12]:

- Youngův modul
- Modul pružnosti ve smyku
- Poissonovo číslo
- Koeficient lineární teplotní roztažnosti

## 3.2 ZKOUŠKY VOSKOVÝCH SMĚSÍ

Prvotní úvahou, jak získat pro numerickou simulaci potřebná materiálová data voskových směsí, bylo obrátit se na světové producenty voskových směsí. Jednotliví výrobci voskových směsí používají k testování svých produktů kromě standardizovaných zkoušek i celou řadu svých interních metod testování. Výrobci metody často vyvíjí a optimalizují podle svých potřeb a zkušeností.

### 3.2.1 Zkoušky voskových směsí prováděné jejich výrobci

Jde často o soubory specializovaných zkoušek zaměřených na definování klíčových charakteristiky voskových směsí pro její uplatnění v procesu lití na vytavitelný model. Tyto zkoušky je možné dělit do různých skupin. Možné dělení zkoušek voskových směsí:

- A) Standardizované zkoušky – běžně prováděné obecné zkoušky typických vlastností voskových směsí
- B) Testy mechanických vlastností – jde především o zkoušky ohybem a tahem
- C) Reologické zkoušky – viskozita, oscilační zkoušky
- D) Termální analýza – diferenční skenovací kalorimetrie (DSC)
- E) Skenovací elektronová mikroskopie – stanovení složení a podílu popelovin. Zkoušky C), D) E) bývají také souhrnně označovány jako zkoušky fyzikálních vlastností směsí.
- F) Testování technologických vlastností směsí – jde o zkoušky rozměrových a tvarových deformací, smrštění, zabíhavosti, objemové roztažnosti, rychlosti tavení a testování vlivů technologických podmínek nastavitelných na vstřikolisu (měření průběhu tlaku, průtoku, teploty na konkrétním vstřikolisu s vybranou voskovou směsí a formou).

Kompletní testování metod používaných k charakterizaci voskové směsi B478 bylo prováděno ve spolupráci s několika pracovišti. Zkoušky uvedené v kapitolách 3.3.1 – 3.3.5 dizertační práce byly prováděny v laboratořích společnosti Blayson Olefines Ltd. v Anglii a v Japonsku. Zkoušky uvedené v kapitole 3.4 pak na několika specializovaných pracovištích v ČR.

Testy voskových směsí prováděných u jejich výrobců slouží primárně pro poskytnutí informací využitelných ve výrobním procesu zhotovení voskových modelů. Využívají se pro srovnávání mezi různými voskovými směsmi. Pro hledání nejvhodnější směsi podle individuálních potřeb konkrétní technologie výroby odlitků metodou lití na vytavitelný model. Z pohledu přípravy materiálové databáze numerické simulace procesu vstřikování voskové směsi do formy jsou však simulačními programy kladeny na materiálový popis voskových směsí často odlišné požadavky. Pro splnění požadavků materiálových databází simulačních programů bylo třeba dále využít i metod používaných k charakterizaci plastických materiálů.

### 3.2.2 Obecné metody měření využitelné k charakterizaci voskové směsi

Byly určeny metody měření a jimi následně i potřebné údaje pro materiálovou databázi voskové směsi B478 tak, aby bylo možné vytvořit predikci průběhu zaplňování dutiny formy touto směsí.

#### A) Měření viskozity

K charakterizaci reologického chování voskových směsí pro potřeby simulačních programů jsou doporučovány reometry nebo viskozimetry s geometrií kužel, deska, válec v různých kombinacích a rozměrech [13], [14], [15]. Vhodnou geometrii je třeba vybrat s ohledem na

druh voskové směsi. Hodně tekuté směsi (většinou voskové směsi bez plniva) je nutné pro měření viskozity umístit do uzavřené geometrie (válec), aby během měření nedocházelo k jejich odtékání. Měření viskozity bylo provedeno na rotačním viskozimetru Bohlin Gemini 150 (pro rozsah smykových rychlostí cca 5 - 300 1/s) a na kapilárním viskozimteru (pro rozsah smykových rychlostí cca 300 – 5000 1/s). Na rotačním viskozimetru byla použita geometrie kužel-deska. Pro zadání naměřených dat do materiálové databáze byly použity modely Carreau-Yasuda a Carreau-WLF.

#### **B) Měření povrchového napětí**

Povrchové napětí bylo měřeno balanční metodou DuNouy – vyvažování platinového prstence. Detailněji viz [15].

#### **C) Měření specifického a latentního tepla**

Specifické a latentní teplo bylo stanoveno pomocí metody DSC (Differential Scanning Calorimetry) na kalorimetru Q200 Heat-flux od společnosti TA Instruments.

#### **D) Měření závislosti tlak-objem-teplota**

Ke stanovení závislostí tlaků, objemů a teplot bylo použito pvT měření na zařízení PVT100 s PTFE těsněním. K zadání naměřených dat do databáze byly použity Rennerovi rovnice.

## 4 SIMULACE PRŮBĚHU PROUDĚNÍ VOSKOVÉ SMĚSI

Prototypové numerické simulace průběhu zaplňování dutiny voskovou směsí byly vytvořeny v programech Cadmould a ProCast.

### 4.1 PROGRAM CADMOULD 3D-F

Je program vyvinutý pro modelování IMP (Injection Moulding Process) - procesu výroby plastových dílců vstřikováním. Výpočtová síť je generována automaticky na načteném tvaru tělesa ve formátu .stl. Patentovaná metoda (patent EP 1 385 5103) tvorby výpočtové sítě je označována zkratkou „3D-F“. Povrch je popsán trojúhelníkovými elementy, jimž je tloušťka stěny přiřazena jako parametr. Výpočet toku tekutiny pak probíhá buď jako „dvourozměrný tok“ (2-plate flow) nebo jako „tok potrubím“ (Pipe flow) [16]. U plastových dílců vyráběných vstřikováním je většinou tloušťka stěny modelu, kterou směs proudí zanedbatelná vzhledem k délce a šířce modelu. Proudění směsi dutinou je matematicky popsáno jako proudění mezi dvěma stěnami. Poměr délky stěny dutiny formy ku její tloušťce by měl být nad poměr 10:1. Aby byla zajištěna dostatečná přesnost výpočtu. Vtokový systém ve vstřikovacích formách nelze s dostatečnou přesností zjednodušit pro matematický popis na proudění mezi dvěma rovnoběžnými stěnami. Proto Cadmould obsahuje druhou možnost jak popsat pohyb směsi dutinou tvaru potrubí – model „Pipe-flow“. Průřez je rozdělen na axisymetrické vrstvy s rozdílnými rychlostmi proudění. Tento profil nemůže být popsán pomocí plošných trojúhelníkových elementů jako v prvním případě a je použitý speciální typ válcových elementů, jimž se lokální rozměr průřezu přiřazuje jako atribut (detailněji viz [12], [16]). Jedná se tedy o tzv. „2,5D“ výpočtovou síť (někdy též označována jako pseudo-3D). Povrch tělesa je popsán plošnými útvary a jejich vzájemná poloha (tloušťka průřezu) je jim přiřazena jako jejich společný atribut.

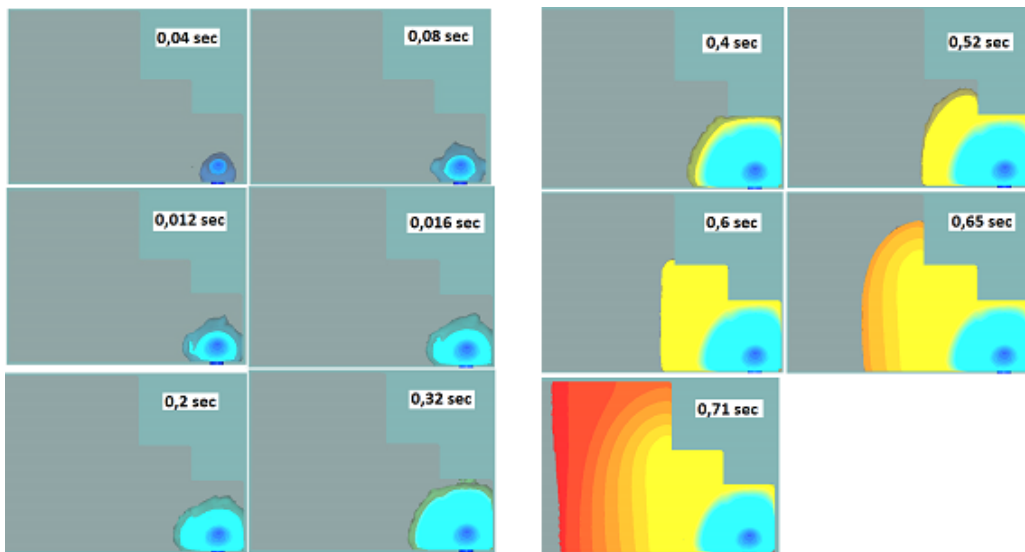
### 4.2 PROTOTYPOVÁ SIMULACE V PROGRAMU CADMOULD 3D-F

V simulačním programu Cadmould 3D-F 5.0 byla vytvořena numerická simulace fáze plnění testovací dutiny voskovou směsí, čímž byla potvrzena domněnka, že tuto simulaci je možné v komerčně dostupném programu vytvořit. Pro vytvoření simulace bylo třeba v materiálové databázi nadefinovat nový materiál Remet Hyfill B478 na základě provedených měření vlastností voskové směsi. Kromě materiálových dat nutných pro predikci proudění, byla naměřena a zadána i data, která lze využít pro predikci rozměrových změn a deformací voskových modelů. Práce se primárně zaměřuje na predikci proudění. Dále byly nastaveny vstřikovací podmínky panující během vstřikování voskové směsi na slévárenském vstřikolisu. Tyto hodnoty průtoku voskové směsi, tlaku a teploty byly přibližně stanoveny na základě běžně nastavovaných hodnot na vstřikolisu.

Byl navržen jednoduchý tvar testovacího tělesa, který byl načten do programu Cadmould a popsán výpočtovou sítí. Byly spuštěny výpočty a příklady vizualizací získaných výsledků jsou na Obr. 1. Cadmould je program navržený přímo pro optimalizaci technologie vstřikování a umožňuje tedy vizualizovat velké množství různých výsledků jež mohou být efektivně využity i pro optimalizaci technologie výroby voskových modelů (konkrétní příklady vizualizací v Příloze č. 5 práce).

Aby bylo možné využít celý potenciál programu, je třeba mít k dispozici kompletní materiálovou definici voskové/vých směsí, tak aby mohly být predikovány i rozměrové změny

a deformace voskových modelů, které jsou také významným kritériem kvality „přesných“ odlitků. Je také nutné znát co nejpřesněji průběhy základních vstřikovacích podmínek (tlak, průtok, teplota). Jakmile jsou do programu zadány všechny vyžadované údaje v dostatečné přesnosti, jsou spočteny numerické simulace, je nutné provést validace všech vypočtených výsledků ve vztahu ke skutečnému výrobnímu procesu, skutečnému voskovému modelu. Pro následné praktické nasazení simulací na řešení výrobních problémů je nutné znát vztah mezi přesností predikce konkrétního parametru ze simulace a skutečností (např. výskyt uzavřeného vzduchu, studených spojů, ..., vliv teploty formy, vliv tvarů vtokové soustavy, ..., vztah mezi hodnotami tlaku, teploty, průtoku, jejíž nejvhodnější nastavení predikuje simulační program pro konkrétní voskový model ve vztahu jak nastavit tyto hodnoty na konkrétním výrobním vstřikolisu, atd.). Pro účely validace a následné optimalizace prototypové simulace byly navrženy testovací formy (viz dále).



Obr. 1 Vizualizace průběhu zaplňování testovací dutiny voskovou směsí Hyfill B478 z prototypové numerické predikce vytvořené v programu Cadmould 3D-F 5.0.

### 4.3 PROGRAM PROCAST

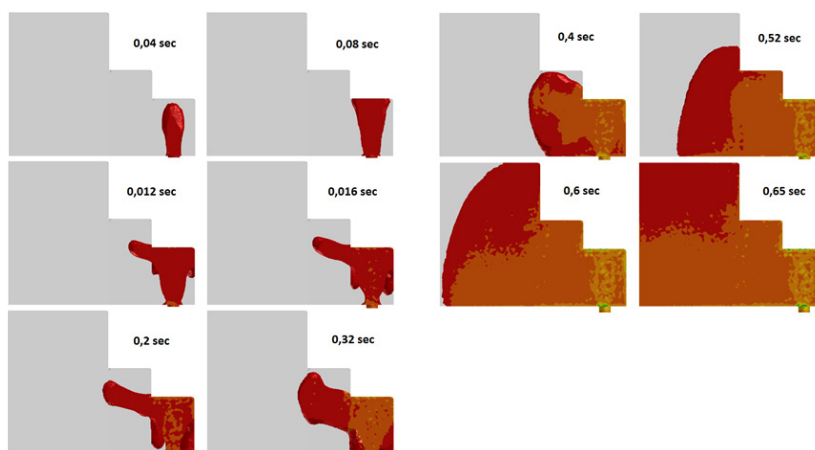
Program ProCast je jedním z rozsáhlé řady softwarových produktů nadnárodní společnosti ESI Group. Společnost se zaměřuje na kompletní počítačové testování, simulace při vývoji nových produktů či optimalizaci rozsáhlých výrobních technologií (tzv. „Virtual Prototyping“) v mnoha oborech lidské činnosti (energetika, elektrotechnika, doprava, vojenství, letectví, kosmonautika, medicína, atd.) [17]. Software ProCast umožňuje simulovat mnoho slévárenských technologií výroby kovových odlitků. Predikce zahrnují mnoho aspektů jednotlivých slévárenských technologií. Standardně umožňuje program predikovat průběh plnění dutiny, chladnutí, predikci rozměrových změn a defektů.

ProCast využívá plně 3D FEM síť (objemová) tvořené tetraedrickými elementy. V první fázi je povrch tělesa načteného z CAD systému popsán povrchovou sítí tvořenou trojúhelníky v podmodulu MeshCAST. Uživatel může volit velikost výpočtových elementů. Program umožňuje automatické generování i opravy výpočtových sítí.

#### 4.4 PROTOTYPOVÁ SIMULACE V PROGRAMU PROCAST

Byla vytvořena prototypová numerická simulace průběhu zaplňování dutiny vstříkovanou voskovou směsí v programu ProCast 2009 (Obr. 2). Nezbytným předpokladem dostatečně přesné simulace je kromě počátečních a okrajových podmínek výpočtu (tedy znalosti skutečných podmínek, které během vstříkování nastávají) je i znalost optimálního nastavení RP parametrů (Run Parameters – výpočtové parametry). Tyto parametry umožňují programu ProCast aby byl vhodně přizpůsobitelný pro provádění různých numerických predikcí pro rozmanité slévárenské výrobní technologie. Numerická predikce průběhu plnění dutiny voskovou směsí během procesu vstříkování nepatří mezi běžně prováděné numerické simulace v programu ProCast 2009 a neexistuje tedy doporučení, jak a jaké parametry mají být nastaveny, aby bylo dosaženo optimálních výsledků numerické predikce vstříkování za určitých výrobních podmínek. Z tohoto důvodu byl proveden výběr a testování nejvhodnější RP. V simulačních programech optimalizovaných na proces vstříkování (např. Cadmould) jsou tyto výpočtové parametry implicitně vhodně přednastaveny a uživatel je nemusí nastavovat. Tím je uživateli usnadněno vytvoření numerické predikce, současně je mu však také snížena možnost výpočty ovlivňovat, upřesňovat a programu není možné použít na numerické predikce jiného typu, než pro které je implicitně optimalizován.

V ProCastu je výpočtových RP parametrů několik desítek a s každou novou verzí softwaru jejich počet narůstá, popř. starší parametry jsou nahrazeny jinými, nebo lze měnit jejich nastavitelný rozsah hodnot. Vzhledem k jejich výraznému vlivu na výpočty bylo přikročeno k jejich testování. Na základě konzultace se zástupci vývojové firmy byly z velkého počtu všech dostupných RP v programu vybrána užší skupina parametrů, u níž lze na základě jejich vlastností předpokládat nějaký vliv na výsledky výpočtu průběhu proudění voskové směsi dutinou formy během vstříkování. Celkem šlo o skupinu 27 vytypovaných RP. Tyto parametry byly testovány tak, že pro konkrétní nastavení jednotlivých parametrů byla vytvořena numerická simulace průběhu plnění dutiny voskovou směsí. Pak byl hodnocen vliv nastaveného parametru na získané výsledky. Tyto výsledky byly porovnávány vzájemně mezi sebou a následně i se skutečným průběhem plnění na testovací formě I a byla hledána největší shoda mezi skutečným průběhem plnění a simulací. Znalost vlivu jednotlivých RP umožňuje optimalizovat nastavení výpočtu, aby bylo dosaženo maximální přesnosti simulace vzhledem ke skutečnému průběhu plnění dutiny.



Obr. 2 Prototypová simulace průběhu zaplňování dutiny voskovou směsí Hyfill B478 v programu ProCast 2009.



## 5 VALIDACE

Pro praktické použití numerické predikce je třeba znát její predikční schopnost ve vztahu k reálnému procesu. Je tedy třeba provést srovnání mezi vytvořenými prototypovými simulacemi a skutečným průběhem zaplňování dutiny formy na vstřikolisu. Po validaci byla navržena experimentální testovací forma I s průhlednou stěnou. Pro upřesnění vstřikovacích podmínek panujících během vstřikovacího cyklu (počáteční výpočtové podmínky simulace) byly navrženy další dvě experimentální zařízení v dizertační práci označované jako „forma II“ a „průtočná forma“. Forma II je tvarově náročnější než forma I a kromě záznamu průběhu jejího zaplňování voskovou směsí, umožňuje i měření průběhů tlaků a teplot během vstřikovacího cyklu. Pro stanovení průtoku (parametr vstřikolisu „FLOW“) voskové směsi tryskou, byl navržen experiment využívající „průtočnou“ formu.

### 5.1 VALIDACE I

#### 5.1.1 Forma I

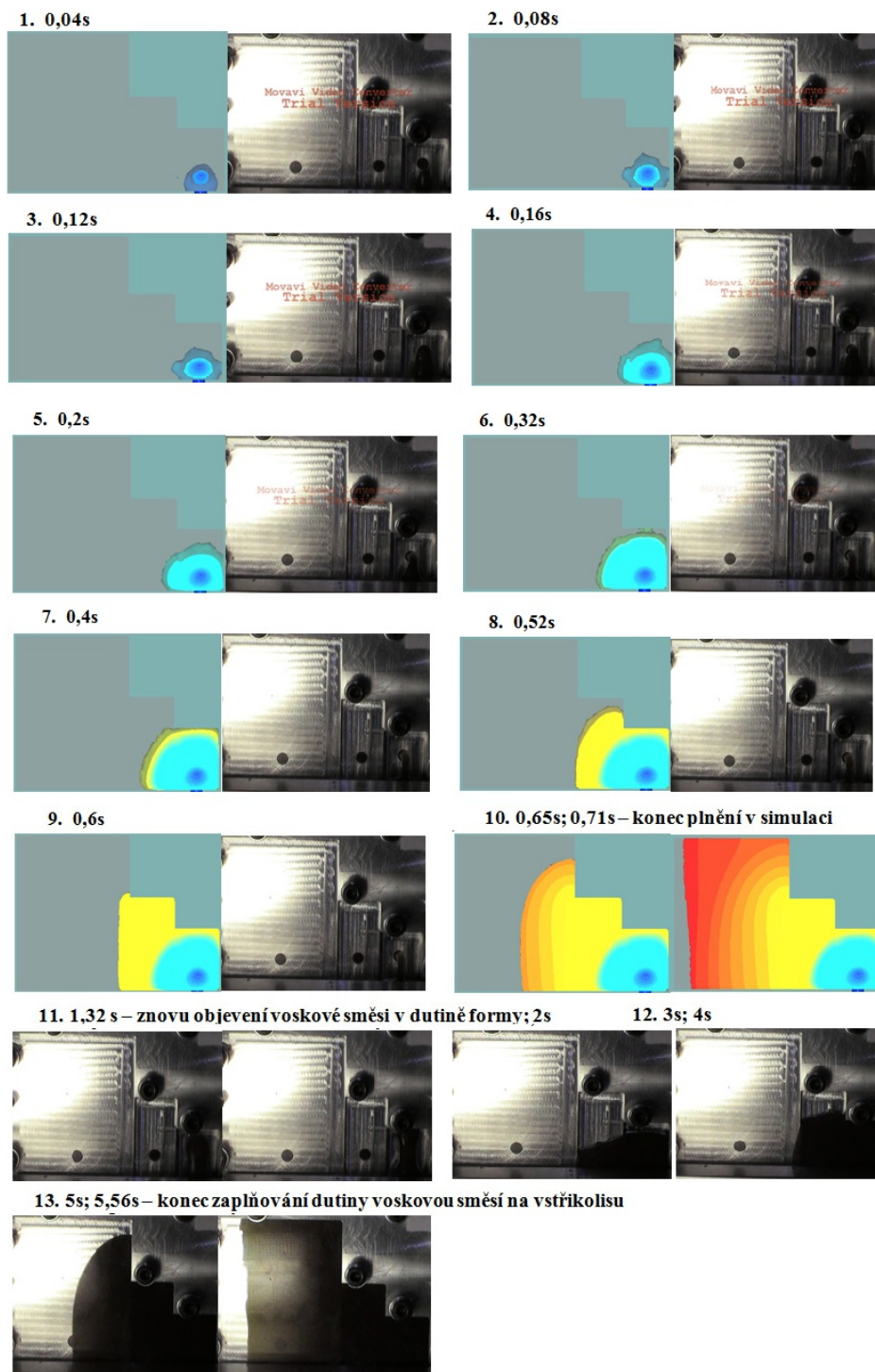
Experimentální testovací forma I byla navržena za účelem provedení porovnání průběhu zaplňování dutiny formy na vstřikolisu a průběhu predikovaného v simulačních programech. Získané záznamy postup proudů tekuté voskové směsi zaplňující dutinu byl srovnáván s predikcí v programech Cadmould a ProCast.

#### 5.1.2 Srovnání experimentálně získaných dat se simulací v programu Cadmould

Pro každé nastavení vstřikovacích podmínek (Tab. 1) byla vytvořena jedna numerická simulace průběhu zaplňování v program Cadmould. Následně byla porovnáována videa získaná záznamem průběhu zaplňování dutiny formy I na vstřikolisu s videm z numerické simulace s tímž nastavením vstřikovacích podmínek. Pro snadnější a přehlednější porovnání byla videa také nastříhána na snímky ve stejných časových okamžicích (Obr. 3).

<b>PRESSURE / FLOW</b>	<b>3,86 bar</b>	<b>11,58 bar</b>	<b>19,31 bar</b>	<b>30,89 bar</b>
<b>75 cm<sup>3</sup>/s</b>	A1	A3	A5	A8
<b>150 cm<sup>3</sup>/s</b>	B1	B3	B5	B8
<b>225 cm<sup>3</sup>/s</b>	C1	C3	C5	C8
<b>300 cm<sup>3</sup>/s</b>	D1	D3	D5	D8

Tab. 1 Přepočet údajů uvedených na vstřikolisu pro jednotlivé experimentální odstříky na jednotky používané v simulačních programech dle údajů uvedených v manuálu ke vstřikolisu [18].



Obr. 3 Levý sloupec – výsledky z programu Cadmould. Pravý sloupec záznam z digitální kamery při nastavení vstřikovacích podmínek A5 (Průtok: 75cm<sup>3</sup>/s; Tlak: 19,31 bar; Doba plnění ze záznamu z kamery: 5,56s; Doba plnění v simulaci: 0,71s). V čase 0,14 sec došlo k přerušení přísunu voskové směsi na vstřikolisu. V čase 1,32 s od počátku vstřikovacího cyklu pak došlo k opětovnému přísunu voskové směsi do dutiny formy v rámci jednoho vstřikovacího cyklu.

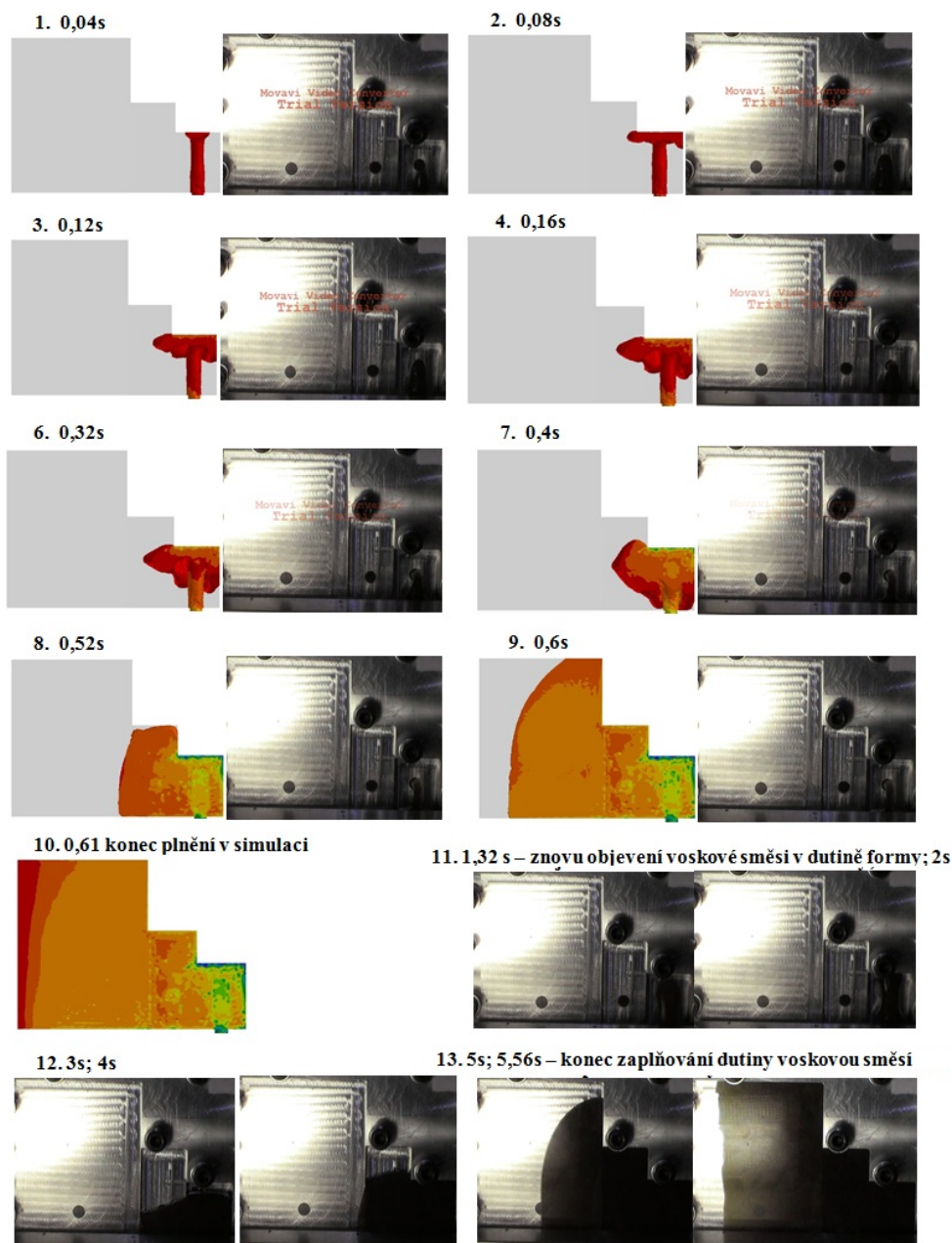
Během testovacích odstříků u všech případů nastavení vstříkovacích podmínek ve skupině A (také v případech B5 a C3) došlo v čase 0,1 s od počátku vstříkovacího cyklu k přerušení dodávky voskové směsi do dutiny formy. Vosková směs začala do dutiny proudit opět v čase kolem 1,3 s. K takovému přerušení cyklu by podle výrobce vstříkolisu nemělo nikdy dojít. Toto přerušení komplikuje možnost řádného srovnání se simulací a snižuje vypovídající schopnost validace.

Z experimentů není zcela zřejmý vliv odlišných nastavení hodnot tlaku na průběh a dobu plnění. Vliv různých hodnot parametru FLOW je patrný. S rostoucí nastavenou hodnotou FLOW roste i rychlost plnění dutiny. Z provedených experimentů nelze jasně definovat, jak se hodnoty parametru PRESSURE a parametru FLOW nastavovaných na vstříkolisu Shell-O-Matic vzájemně ovlivňují. Skutečná hodnota průtoku voskové směsi (cm<sup>3</sup>/sec) do formy a skutečný tlak (Pa) – tedy údaje, které představují základní vstupy do numerické simulace lze z hodnot FLOW a PRESSURE nastavovaných na budících vstříkolisu spíše jen přibližně odhadovat. Nepřesnost těchto základních vstupních parametrů vnáší odchylku do numerické predikce a snižuje její vypovídající hodnotu. I z těchto důvodů byly navrženy experimenty umožňující měřit průběh průtoku, tlaku a teploty (viz. „forma II“ a „průtočná forma“).

Tvar proudu tekuté voskové směsi postupně zaplňujících dutinu v predikci lze vzhledem ke skutečnému průběhu plnění zaznamenaného digitální kamerou hodnotit jako více kompaktní a celistvý. Zvláště v úvodní části, kdy proud vniká do dutiny formy, je v záznamu z kamery zachycen jako úzký proud, který naráží na protilehlou stěnu dutiny formy (při použití spodních vtoků). V simulaci dochází spíše k rovnoměrnému zaplňování dutiny voskovou směsí. Velmi dobrou tvarovou shodu lze konstatovat, když vosková směs začne vyplňovat druhý a třetí segment dutiny formy (větší kvádr a klínová část). Bylo by vhodné sledovat průběh zaplňování větší a tvarově komplikovanější dutiny, která by se více blížila reálným tvarům voskových vyráběných voskových modelů než jak je tomu u jednoduché testovací formy I (viz navržená forma II).

### **5.1.3 Srovnání experimentálně získaných dat se simulací v programu ProCast**

Tvar proudu voskové směsi ze simulací z ProCastu se velice dobře přibližuje tvaru při skutečnému průběhu plnění a to i v počáteční fázi kdy vosková směs vstupuje do dutiny formy. Jak je patrné z Obr. 4 tvarová shoda je velmi dobrá, dochází však k disbalanci mezi časem snímku v simulaci a ve skutečnosti (tj. velice podobné tvary proudu mezi simulací a skutečností jsou v odlišných časových krocích).

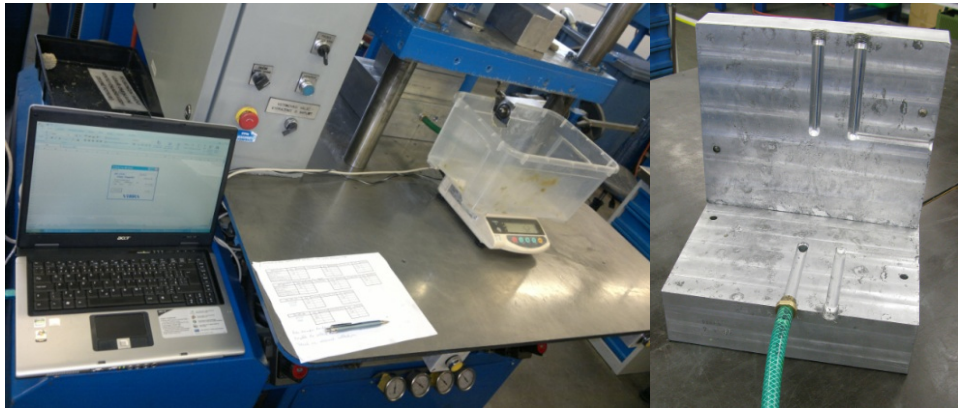


Obr. 4 Levý sloupec – výsledky z programu ProCast. Pravý sloupec záznam z digitální kamery při nastavení vstřikovacích podmínek A5. V čase 0,14 sec došlo k přerušení přísunu voskové směsi na vstřikolisu. V čase 1,32 s od počátku vstřikovacího cyklu pak došlo k opětovnému přísunu voskové směsi do dutiny formy.

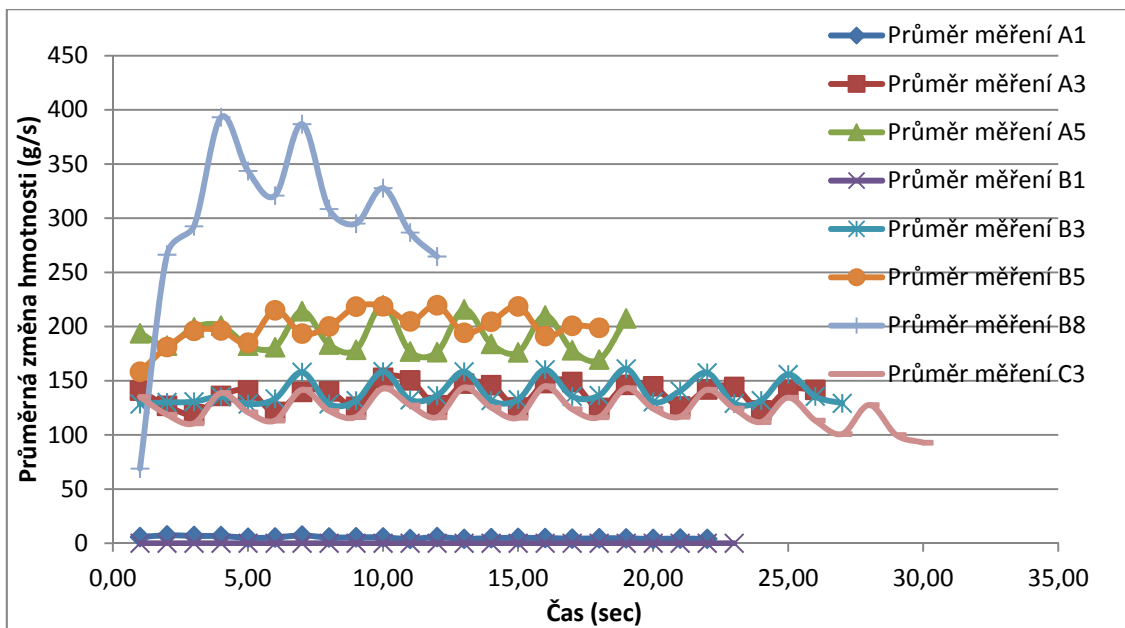
## 5.2 MĚŘENÍ PRŮTOKU VOSKOVÉ SMĚSÍ

Vstřikovací podmínky, hodnoty tlaku, teploty a průtoku představují jedny ze základních vstupních údajů, které silně ovlivňují výslednou přesnost (blízkost skutečnému průběhu) numerických simulací. Jedním z klíčových vstřikovacích parametrů nastavovaných na vstřikolisu je parametr “FLOW”. Tímto vstřikovacím parametrem se ovlivňuje velikost průtoku voskové směsi, která vtéká do formy (Obr. 5). Na základě navrženého experimentálního měření hmotnosti proteklého množství voskové směsi tryskou vstřikolisu do nádoby umístěné na digitální váze byly

stanoveny skutečného hodnoty průtoku v gramech resp. cm<sup>3</sup> za vteřinu pro různé vstřikovací podmínky (Obr. 6). Tyto údaje slouží jako základní vstupní počáteční podmínky numerické predikce průběhu plnění dutiny formy v simulačních programech.



Obr. 5 Uspořádání experimentu měření „FLOW“ v provozu spolupracující slévárny. Vpravo detail „průtočné“ formy s pryžovým výstupem do nádoby umístěné na váze.



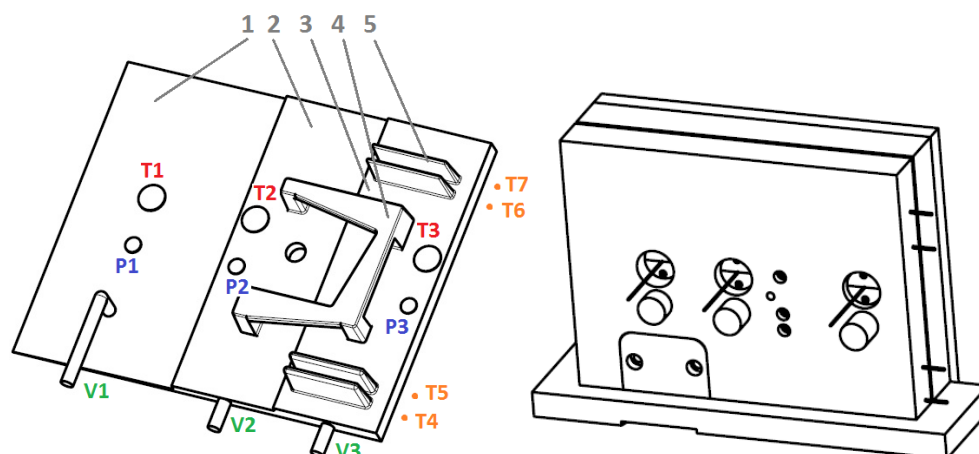
Obr. 6 Znárodnění průměrných změn hmotností voskové směsi, která protéká tryskou vstřikolisu během vstřikovacího cyklu. V grafu je patrné rozdělení naměřených hodnot, křivek na čtyři skupiny, podle podobných hodnot průtoku voskové směsi v g/sec. První skupinu tvoří křivky A1, B1 (1=100 dílků PRESSURE); druhou A3, B3, C3 (3=300 dílků PRESSURE); třetí A5, B5 (5=500 dílků PRESSURE), a čtvrtou pak měření B8 (8=800 dílků PRESSURE).



## 5.3 VALIDACE II

### 5.3.1 Forma II

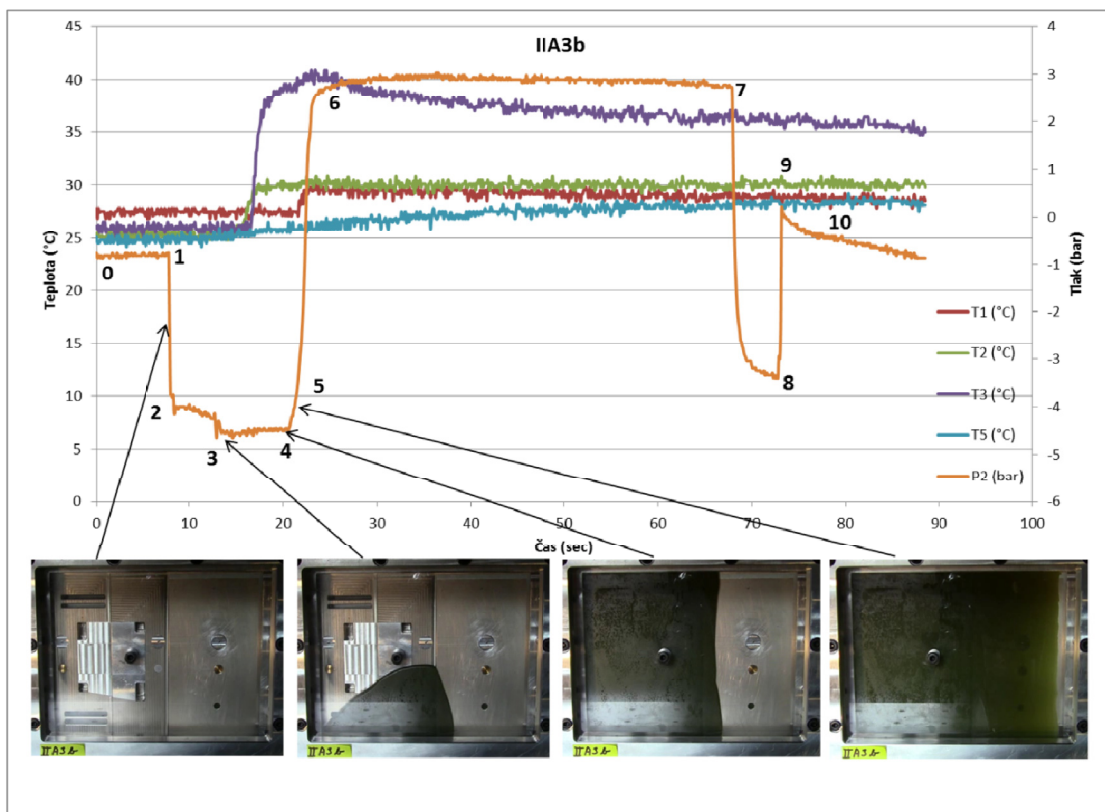
Experimentální testovací forma II byla navržena na základě zkušeností s testovací formou I (Obr. 7). Jejím účelem je umožnit snímat průběh zaplňování dutiny voskovou směsí během vstřikovacího cyklu. Navržené zařízení dále umožňuje měřit a zaznamenávat průběh teploty voskové směsi a tlaku uvnitř dutiny formy během vstřikovacího cyklu a teplotu uvnitř kovové stěny formy.



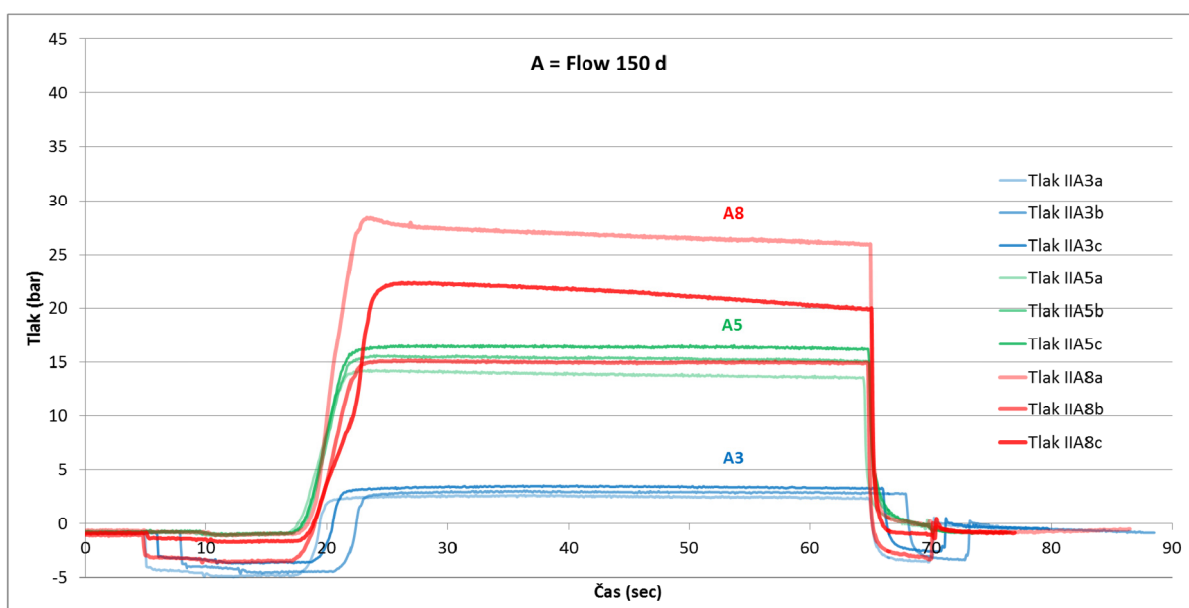
Obr. 7 Vlevo zobrazen tvar dutiny testovací formy II – pohled zepředu (tvar voskového modelu). Šedými čísly označeny hlavní tvarové části dutiny. Červenou (T1, T2, T3) označeny pozice pro umístění termočládku měřících průběh teploty uvnitř voskového modelu. Oranžovou (T4, T5, T6, T7) označeny místa pro umístění termočládku do tělesa formy umožňující snímat teplotní pole stěny formy. Modře (P1, P2, P3) označeny pozice pro umístění tlakových senzorů. Zelenou (V1, V2, V3) označeny možné vtokové otvory. V pravé části je celkový pohled na sestavenou testovací formu II zezadu.

### 5.3.2 Údaje stanovené pomocí formy II

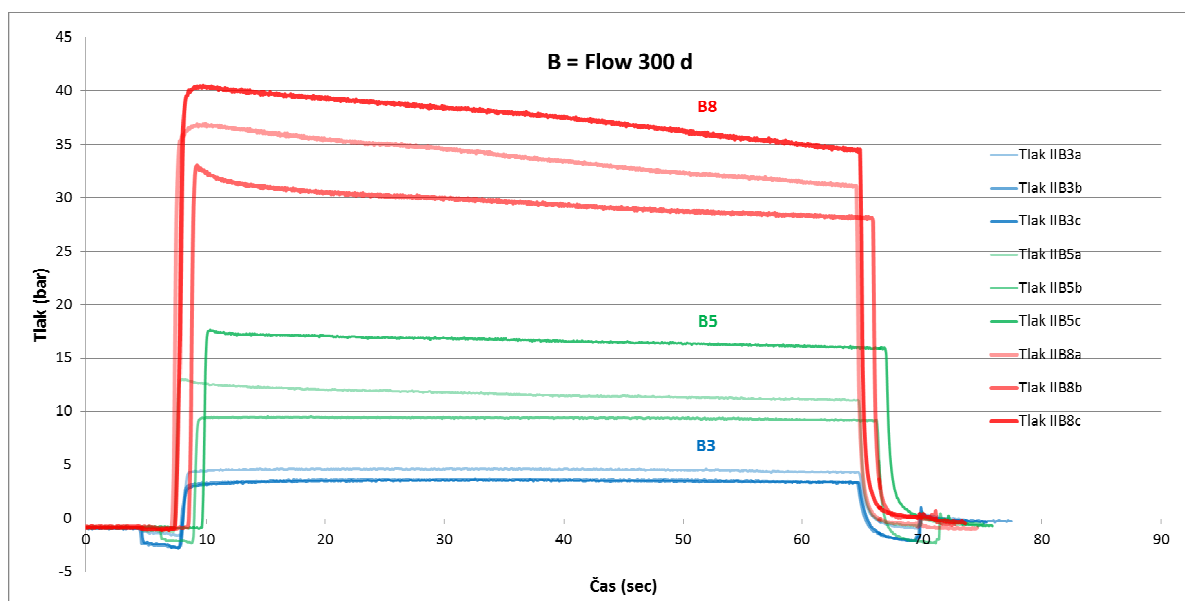
Pomocí testovací vstřikovací formy II byly zaznamenány průběhy teplot a tlaků během vstřikovacích cyklů při různých nastavení vstřikovacích podmínek (Obr. 8). Pro numerickou simulaci byly stanoveny průměrné hodnoty dotlaku, teploty stěny formy, teploty voskové směsi a doby plnění (Obr. 9 a 10). Byly také získány digitální záznamy průběhu zaplňování dutiny formy II voskovou směsí B478. Tyto údaje byly použity k optimalizaci prototypové simulace.



Obr. 8 Znáornění klíčových oblastí průběhu tlaku (body 0-10) typického grafu z měření pomocí formy II. Ke křivce průběhu tlaku přiřazeny vybrané snímky z digitálního záznamu průběhu zaplňování dutiny formy II voskovou směsí B478. Záznamy teplot a tlaků jsou naměřeny při nastavení vstřikovacích podmínek IIA3a. T1, T2, T3 – pozice termočlánků uvnitř dutiny formy II; T5 – pozice termočlánku v tělesu formy II, P2 – poloha tlakového senzoru.



Obr. 9 Průběhy všech záznamů tlaků (různé vstřikovací podmínky) naměřených pomocí formy II v závislosti na čase pro vstřikovací podmínky A (FLOW = 150 dílků).



Obr. 10 Průběhy všech záznamů tlaků (různé vstřikovací podmínky) naměřených pomocí formy II v závislosti na čase pro vstřikovací podmínky A (FLOW = 300 dílků).

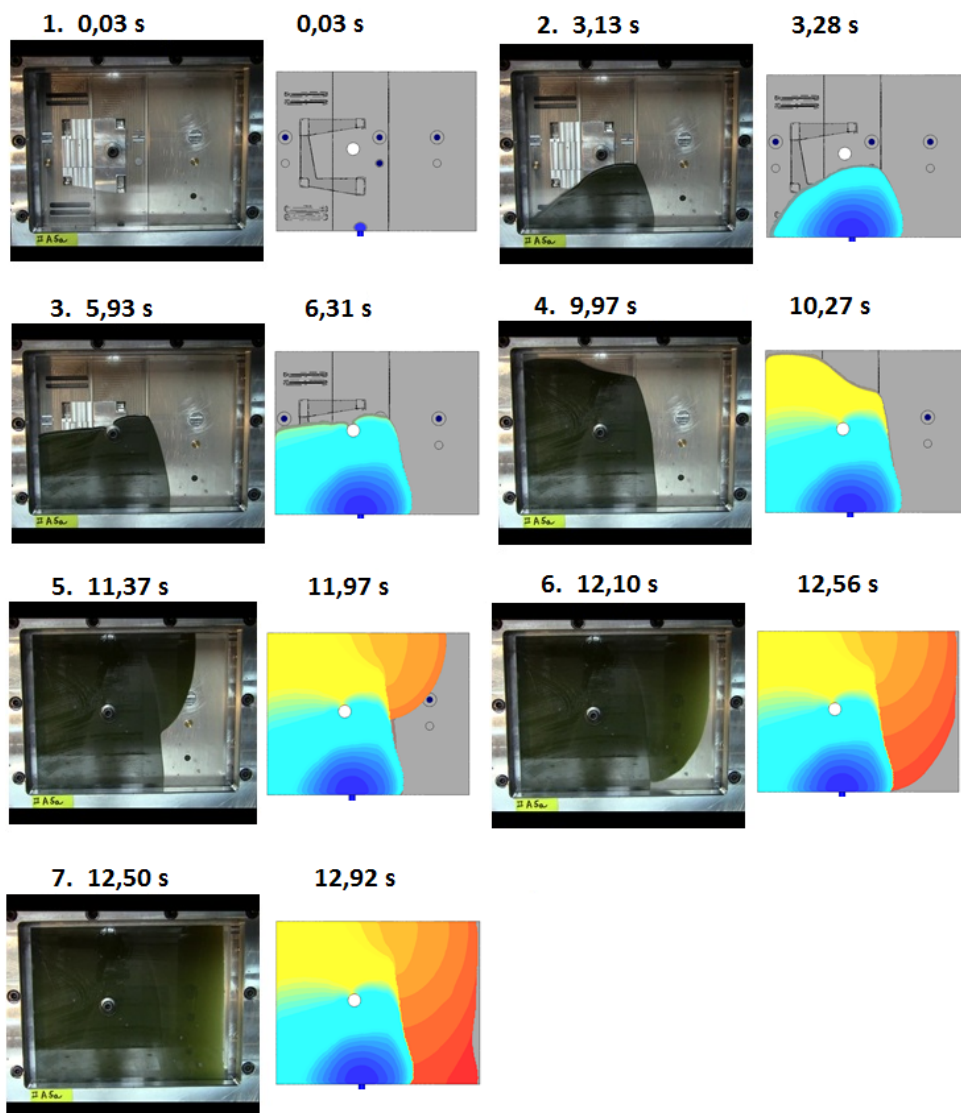
### 5.3.3 Numerická simulace plnění formy II

Prototypové simulace byly na základě dat získaných pomocí provedených experimentů upřesněny a byly vytvořeny optimalizované numerické predikce plnění formy II v programu Cadmould 6.0.

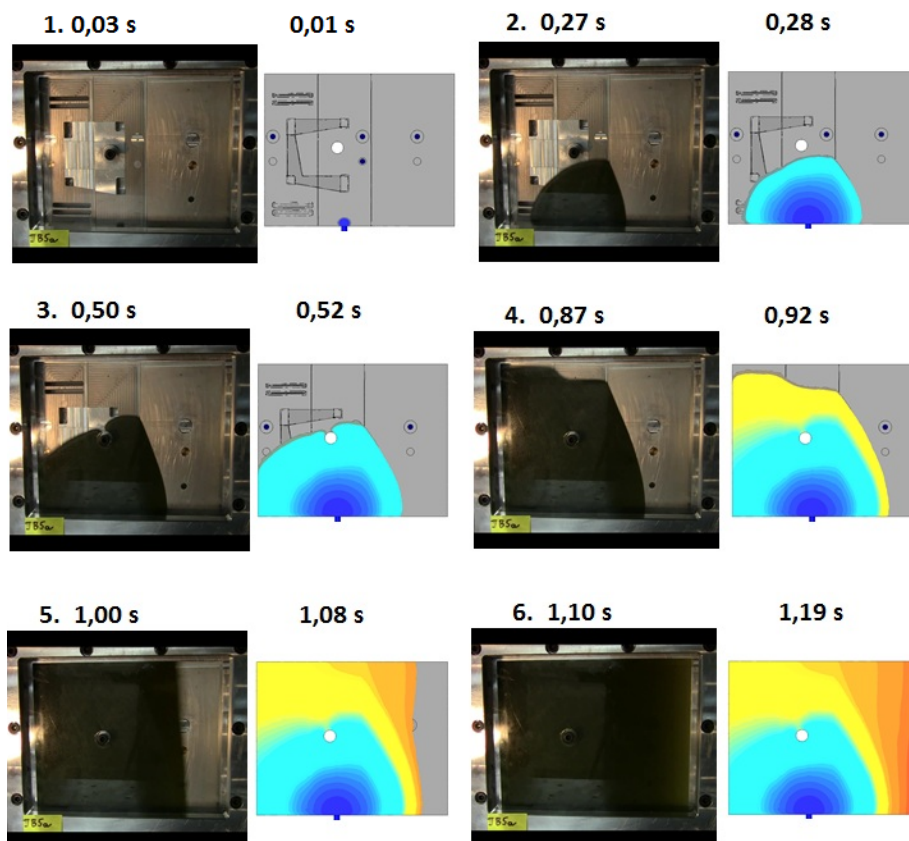
U všech variant skupin nastavení A je průběh zaplňování dutiny podobný. Během plnění částí 1 a 2 dutiny formy část vosku zateče i do oblasti 3 kde než dojde k úplnému zaplnění částí 1 a 2 ztuhne. Po naplnění 1 a 2 směrem od spodu, od vtokového otvoru, nahoru se začne od shora plnit i oblast 3 dutiny formy II (klín). Ve všech případech tedy vznikne v klínové oblasti studený spoj na přechodu mezi oblastí 2 a 3. U všech variant nastavení A také nedojde k úplnému zaplnění oblasti 3. Vosková směs nezaběhne do nejužší části klínu. Průběh plnění v numerické predikci u všech variant A odpovídá tomuto průběhu a lze konstatovat plnou shodu v predikovaném a skutečném průběhu plnění (Obr. 11). Lze nalézt pouze drobné odchylky mezi tvary postupujícího proudu v určitých časových okamžicích. Tyto drobné odchylky v čase a tvaru proudu lze považovat za přijatelné a numerickou predikci za dostatečně vypovídající o průběhu plnění dutiny.

U všech variant nastavení vstřikovacích podmínek B je průběh plnění částí 1 a 2 dutiny formy II obdobný jako u varianty A. Vzhledem k větší nastavené hodnotě průtoku (FLOW = 300 oproti FLOW 150 u variant A) je však doba zaplňování dutiny výrazně kratší (cca 1,1 vteřina oproti cca 12,5 vteřinám u variant A). Rychlost plnění je vyšší a nedochází ke vzniku studeného spoje na přechodu mezi 2 a 3 částí dutiny formy II. Klínová oblast se plní více rovnoměrně, je kompletně zaplněná a nevzniká nezaběhnutí. Numerické simulace pro varianty nastavení B odpovídají tomuto průběhu (Obr. 12). Opět lze konstatovat dostatečnou shodu predikce průběhu plnění se zanedbatelnými odchylkami ve tvaru proudu vosku a časovém postupu plnění.





Obr. 11 Validace numerické predikce průběhu zaplňování dutiny formy II pro nastavení vstřikovacích podmínek IIA5. Nad každým obrázkem je uvedena doba za jakou došlo k tomuto naplnění dutiny voskovou směsí Hyfill B478. Obrázek vlevo získán pomocí digitální kamery. Barevný obrázek vpravo získán z numerické simulace (Skupina výsledků: „Flow Front“, Detail výsledků: „Time When Filled [s]“).



Obr. 12 Validace numerické predikce průběhu zaplňování dutiny formy II pro nastavení vstřikovacích podmínek IIB5. Nad každým obrázkem je uvedena doba za jakou došlo k tomuto naplnění dutiny voskovou směsí Hyfill B478. Obrázek vlevo získán pomocí digitální kamery. Barevný obrázek vpravo získán z numerické simulace (Skupina výsledků: „Flow Front“, Detail výsledků: „Time When Filled [s]“).

## 6 ZÁVĚR

Slévárenská technologie lití metodou vytavitelného modelu patří k perspektivním a neustále se rozvíjejícím výrobním technologiím. Umožňuje získat vysoce tvarově náročné odlitky s minimem dokončujících operací. Je snaha o výrobu stále větších, tvarově náročnějších a přesnějších odlitek v co nejkratších výrobních časech se silným akcentem na snižování nákladů. Jednou z nových možností, jak reagovat na rostoucí požadavky zákazníků je nasazení numerických predikcí. Numerické predikce urychlují optimalizaci jednotlivých fází této technologie. Jednou z klíčových fází je výroba voskových modelů vstřikováním. Dle dostupných informací slévárny doposud neměli k dispozici kompletní numerickou predikci výroby voskových modelů vstřikováním.

Práce mapuje možnosti tvorby predikce zaplňování dutiny voskovou směsí. Největší vliv na výslednou kvalitu voskového modelu má fáze vstřikovacího cyklu, během které dochází k zaplňování dutiny formy vstřikovanou voskovou směsí. Současně je tato fáze i prvním krokem při tvorbě kompletní numerické predikce celého vstřikovacího cyklu včetně predikce rozměrových změn a deformací voskového modelu. V práci bylo prokázáno, že je možné v dnes již komerčně dostupných simulačních programech ProCast a Cadmould vytvořit numerickou predikci průběhu zaplňování dutiny formy vstřikovanou voskovou směsí. Porovnáním výsledků simulací se skutečným průběhem plnění byla prokázána dostatečná přesnost vytvořených predikcí.

V úvodní části práce je stručně popsán matematický aparát nezbytný k vytvoření takovéto predikce. Je popsán princip funkce simulačních programů. Uvedeny základní rovnice, které tyto programy pro predikci proudění využívají a stručně popsány hlavní numerické metody řešení. Přesné, detailní informace, jak daný simulační program na této úrovni pracuje, jsou samozřejmě utajeny jako know-how jednotlivých vývojářských firem. Nicméně bylo prokázáno, že simulační programy obsahují výpočtové modely umožňující predikovat průběh proudění neneutonských kapalin, kam lze voskové směsi zařadit.

Dále bylo zjištěno, že potřebné výpočtové moduly v obou testovaných programech sice existují, ale jejich materiálové databanky neobsahují informace o voskových materiálech nutných k provedení výpočtu. Bylo třeba tedy stanovit, kde a jakým způsobem se tyto data dají zajistit. V první fázi byli osloveni výrobci voskových směsí. Odezva byla nedostatečná, proto byla navázána užší spolupráce s vývojovou laboratoří jednoho z největších světových výrobců voskových směsí společností Blayson Ltd. Byly provedeny všechny zkoušky, které je tento výrobce schopen zajistit. Výsledky z provedených zkoušek jsou pro potřeby simulačních programů nedostatečné. Data z těchto zkoušek lze, až na výjimky, použít spíše jen jako upřesnění pro vhodné nastavení dalších speciálních měřících metod. Potřebné materiálové informace byly tedy zjišťovány ve spolupráci s chemickými laboratořemi v ČR. Byly použity metody měření DSC, pVT, TMA, DuNuyo, modifikovaná tahová zkouška, speciální reologická zařízení a softwary na zpracování měřených dat. Naměřená data byla vhodně upravena tak, aby je bylo možné zadat do jednotlivých databází simulačních programů. Byla vytvořena materiálová databáze plněné voskové směsi Hyfill B478, která obsahuje všechna potřebná data pro numerickou predikci proudění.

Ve čtvrté kapitole jsou stručně představeny oba požitá simulační programy. Je popsána tvorba prototypové simulace průběhu plnění jednoduché testovací dutiny voskovou směsí B478 na základě naměřených materiálových dat. Předností simulačního programu Cadmould je velké množství předpřipravených vizualizací výsledků, které je možné využít k optimalizaci vstřikování. Program je uživatelsky přívětivý a optimalizovaný výhradně na technologii výroby modelů

pomocí vstřikování. Používá 2,5D výpočtovou strukturu, která umožňuje rychlé provádění výpočtů. Je vhodná pro modely s poměrem délky ku šířce stěny větším jak 10:1. Program ProCast je software určený pro kovové materiály. Využívá plně 3D výpočtovou síť – je tedy použitelný pro jakýkoliv tvar, ale výpočty jsou náročnější na hardware (delší výpočtové časy). Na rozdíl od Cadmouldu nabízí široké možnosti jak ovlivňovat výpočtové řešení pomocí mnoha okrajových výpočtových podmínek („RUN“ parametry). Vhodné nastavení výpočtových parametrů pro predikce proudění voskové směsi nebyly známy. Po konzultaci s vývojovou firmou byly vybrány parametry, které by mohly mít vliv na žádanou predikci. Testováním jejich vlivu na průběh proudění byly vybrány parametry s největším vlivem na predikci průběhu proudění. Do predikce je také třeba vhodně nadefinovat počáteční podmínky výpočtu. Jedná se hlavně o průběhy teploty, průtoku, tlaku během vstřikovacího cyklu. U prototypových simulací byly tyto hodnoty stanoveny přibližně na základě nastavitelných procesních parametrů na vstřikolisu Shell-O-Matic. Tyto údaje zásadním způsobem ovlivňují výsledky predikce, proto byly v další fázi měřeny (pátá kapitola práce).

Výsledky z nově vytvořených numerických predikcí je třeba porovnat se skutečným procesem. Byla stanovena jejich vypovídající schopnost ke vztahu ke konkrétním výrobním podmínkám. Valdice průběhu zaplňování dutiny formy vstřikovanou voskové směsí byla nejdříve prováděna pomocí navržené testovací formy I. Byly snímány průběhy zaplňování dutiny této formy při různých nastavení vstřikovací podmínky. Tyto digitální záznamy a snímky byly srovnávány s predikcemi plnění v obou programech. Větší shody tvaru proudu voskové směsi, zvláště v počáteční fázi zaplňování dutiny, bylo dosaženo v programu ProCast. V páté kapitole jsou také popsány postupy měření nastavitelných parametrů vstřikolisu, které se v numerické predikci odráží skrze počáteční výpočtové podmínky. Bylo navrženo experimentální zařízení, umožňující stanovit hmotnost voskové směsi, která proteče tryškou vstřikolisu za čas (měření parametru „FLOW“). Z provedených měření při různých nastaveních ventilů vstřikolisu ovládajících tlak a průtok během vstřikovacího cyklu bylo zjištěno, že nastavení ventilu FLOW nemá vliv na množství proteklé voskové směsi. Množství voskové směsi, které proteče tryškou je ovlivňováno nastavením ventilu ovládajícího tlak (ventil „PRESSURE“). Toto zjištění bylo v rozporu s údaji výrobce vstřikolisu, podle něhož má být průtok voskové směsi nezávislý na nastavené hodnotě tlaku. Ventil FLOW byl poškozen a musel být vyměněn. Dále byla navržena druhá testovací forma II. Forma II je větší, tvarově složitější než forma I. S její pomocí byly kromě záznamu průběhu plnění, měřeny průběhy teplot a tlaku během vstřikovacího cyklu. Údaje zjištěné pomocí formy II byly použity pro zpřesnění numerické predikce a pro validaci II. Byla vytvořena numerická predikce průběhu zaplňování dutiny formy II v dostatečné shodě se skutečným průběhem plnění formy a lze ji nyní začít validovat na rozměrných tvarově náročných voskových modelech. Pak bude numerická predikce dostatečně prověřena a připravena pro praktické nasazení k řešení výrobních problémů. Na geometrii II byla vytvořena také numerická predikce rozměrových změn a deformací, která podává představu co je pomocí softwaru Cadmould možné u výroby voskových modelů predikovat (příloha č. 5).

Jak tedy práce dokládá, lze numerické predikce v dnes dostupných simulačních programech vytvořit a použít pro optimalizaci technologie vstřikování voskových směsí. Pro rozšíření jejich praktického využití by bylo vhodné vytvořit materiálovou databázi vybraných typických představitelů jednotlivých skupin voskových směsí tak, aby si uživatel mohl zvolit, alespoň

podobnou voskovou směs, kterou používá ve výrobě. Dále je třeba provést poslední krok validace simulace průběhu plnění na rozměrných tvorbě komplikovaných voskových madlech. Poté je možné přikročit k validacím výsledků, které souvisejí s rozměrovými změnami a deformacemi voskových modelů. Tím bude vytvořen velice silný nástroj umožňující virtuální optimalizace celé technologie. Do numerické predikce je třeba zadávat počáteční a okrajové podmínky v dostatečné přesnosti. Pokud ukazatele na vstřikolisu nejsou dostatečně přesné, je třeba provést nezávislá měření základních vstřikovacích veličin – průběhu tlaku, průtoku a teploty během vstřikovacího cyklu. Bylo by vhodné provést tato měření na více vstřikovacích zařízeních a definovat vztah mezi veličinou nastavenou a jejím skutečným průběhem během vstřikovacího cyklu, který je třeba zadávat do simulačního programu.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HORÁČEK, M., *Tradition, present state and perspectives of foundry industry, World Technical Forum*, In: World Technical Forum, Brno, 2009, pp.35-46, ISBN 978-80-904020-2-7.
- [2] STRATTON, R., MONKS H., INVESTMENT CASTING INSTITUTE. *Atlas of Wax pattern defects*. Dallas : Investment Casting Institute, 2001. 2nd Edition. ISBN 1-56061-000-X.
- [3] PILBURY, S., BRITISH INVESTMENT CASTING TRADE ASSOCIATION. *Wax Injection and Build: problems and solutions*. Coventry: BITCA, 1989.
- [4] GAUMANN, M; SHOLAPURWALLA, A. *Investment Casting Simulation*. In Calcom [online]. Lausanne : UES Software Inc., 2004 [cit. 2012-06-18]. Dostupné z WWW: <[http://www.esi-group.com/products/casting/publications/Articles\\_PDF/T\\_InvestmentCasting.pdf](http://www.esi-group.com/products/casting/publications/Articles_PDF/T_InvestmentCasting.pdf)>.
- [5] *Simcon* [online]. 2011 [cit. 2012-07-01]. Dostupné z WWW: <<http://www.simcon-wrldwide.com/pages/en/products/cadmould.php?lang=EN>>.
- [6] TA INSTRUMENTS - WATERC LLC. *Rheology Advantage Data Analysis: Rheometric Series Getting Started Guide*. 2004, 60 s.
- [7] NĚMEC et al. *FEM Principy a praxe metody konečných prvků*. Praha: PROTISK Slavkov, 1997, 401 s. ISBN 80-7226-021-9.
- [8] J.A DANTZING a CH.L. TRUCKER. *Modeling in materials processing*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001, 364 s. ISBN 0 521 77063 7.
- [9] FERZINGER, J.H. a M. PERIČ. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Third, rev. edition. Berlin: Springer, 2002. ISBN 3-540-42074-6.
- [10] TU, Jiyuan. *Computational fluid dynamics: a practical approach*. 1st ed. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2008, xv, 459 s. ISBN 978-0-7506-8563-4.
- [11] ESI GROUP. *ProCast 2010.0: Users Manual*. 2010, 880 s.
- [12] SIMCON KUNSTSTOFFTECHNISCHE SOFTWARE GMBH. *Cadmould 3D-F Fill: User Manual Version 6.0*. Wurselen, 2012, 213 s.
- [13] *2nd FOCAST Mini-Conference: "The Middle Year - have we got as far as we'd hoped? A review of technical progress in the first two years"*. Birmingham: The Universtiy of Birmingham, 2001.

- [14] SABAU, A. S. a S VISWANATHAN. *Material properties for predicting wax pattern dimensions in investment casting*. Materials Science and Engineering: A. 2003, Volume 362, Issues 1–2, s. 125-134. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509303005690>
- [15] GEBELIN, J.C., M.R. JOLLY, A.M. CENDROWICZ a S. BLACKBURN. *Simulation of die filling for the wax injection process: Part I. Models for Material Behavior*. Metallurgical and Materials Transactions B. 2004, Volume 35, Number 4, s. 755-759. Dostupné z: <http://www.springerlink.com/content/e2546k6572x20g69/>
- [16] SIMCON KUNSTSTOFFTECHNISCHE SOFTWARE GMBH. *Cadmould: User Manual*. Herzogenrath, 2005, 198 s.
- [17] ESI GROUP. *ESI Casting Simulation Suite: ProCAST & QuikCAST* [online]. 2012 [cit. 2012-10-09]. Dostupné z: <http://www.esi-group.com/products/casting>
- [18] SHELL-O-MATIC INC. Technická dokumentace k vstřikolisu 35T-20/28. Quebec, 1995.

## ŽIVOTOPIS AUTORA

Jméno: Vojtěch Kosour  
Datum narození: 2.1. 1984  
Telefon: +420 777 633 721  
E-mail: kosourvojtech@email.cz  
Státní příslušnost: Česká republika  
Adresa: Polní 31, Žďár nad Sázavou 2, 59102, Česká Republika

### Vzdělání

2008 – 2013 Doktorský studijní program Strojírenská technologie; Studijní obor Slévárenská technologie. Téma dizertační práce: Využití numerické simulace k optimalizaci výroby voskových modelů. Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2896/2, 61669, Brno.

2008 – 2010 Magisterský studijní program Ekonomika a management; Studijní obor: Řízení a ekonomika podniku. Téma diplomové práce: Návrh marketingové strategie pro získání nových zákazníků ve slévárenství. Fakulta podnikatelská, Vysoké učení technické v Brně, Kolejní 2906/4, 61200, Brno. Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2896/2, 61669, Brno.

2003 – 2008 Magisterský studijní program Strojní inženýrství; Studijní obor: Slévárenská technologie. Téma diplomové práce: Technologie rychlého prototypování za použití metody FDM a současně technologie vytavitelného modelu.

2011 Základy systematického koučování – přípravná kombinovaný kurz před výcvikem pro samostatný výkon profesionálního koučování. Systemický institut, s.r.o. U Hranic 18, Praha 10.

2010 - 2011 Systematické a komplexní vzdělávání pracovníků výzkumu a vývoje v oblasti širší problematiky VaV. Masarykova univerzita, Žerotínovo náměstí 617/9, 60177, Brno.

2010 Certifikovaný marketingový manažer podle standartu CIMA-A. Český institut pro marketing (CIMA), o.s.

2009 - 2010 Certifikovaný projektový praktikant, úroveň IPMA-D. Společnost pro projektové řízení, o.s., Rybkova 1, 602 00, Brno.

### Pracovní zkušenosti

2011 – současnost Strojírenský technik pro technický rozvoj, vědu a výzkum. Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2896/2, 61669, Brno.

2008 Trainee program – laboratorní technik. Blyson Olefines Ltd. (UK)

2007 Trainee program – vývojový pracovník. Calcom ESI (CH)



# ABSTRAKT

## Abstrakt

Výroba voskových modelů vstřikováním do kovových forem je jednou z klíčových fází výroby kovových odlitků pomocí slévárenské technologie lití na vytavitelný model. Práce se zabývá problematikou tvorby numerické simulace průběhu zaplňování dutiny vstřikovanou voskovou směsí. Popisuje možnosti vybraných simulačních programů ProCast a Cadmould ve vztahu k numerickým predikcím využitelným k optimalizaci výroby voskových modelů. Popisuje tvorbu materiálové databáze pro vybranou voskovou směs, tvorbu prototypových simulací plnění dutin testovacích forem a jejich validaci ke konkrétním výrobním podmínkám. Zabývá se i oblastí stanovení počátečních výpočtových podmínek měřením hlavních parametrů vstřikolisu.

## Abstract

Production of wax pattern model by injection machine is a one of the key phases of Investment casting process. The thesis deals with the development of numerical simulation wax blend injection in to metal die. The possibilities of selection simulation software – ProCast and Cadmould are described in the relation to numerical predictions of wax injection. Creating of material database of selected wax blends is described. The prototype simulations of die filling are made. The special testing die are designed a used for created simulations. The measurements of initial conditions are mentioned.