

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TECHNOLOGIE RYCHLÉHO PROTOTYPOVÁNÍ ZA  
POUŽITÍ METODY FDM A SOUČASNĚ  
TECHNOLOGIE VYTAVITELNÉHO MODELU  
RP TECHNOLOGY USING FDM METHOD AND INVESTMENT CASTING TECHNOLOGY

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
DIPLOMA THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**VOJTĚCH KOSOUR**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**doc. Ing. MILAN HORÁČEK, CSc.**

BRNO 2008



## ABSTRAKT

V úvodní části diplomové práce je proveden přehled vývoje trhu s přesnými odlitky a Rapid Prototyping zařízeními. Dále jsou popsány základní metody rychlého prototypování a detailně rozebrána metoda FDM, která je následně využita v praktické části diplomové práce při zhotovení silikonové formy.

Největší část práce je věnována problematice vytvoření simulace lití voskové směsi do silikonové formy. Je provedena charakteristika slévárenských vosků, popsány parametry, které je nutno zadat do simulačního programu ProCAST a možnosti jejich změření. Detailně je rozpracován průběh sestavování simulace plnění formy a její validace se skutečným průběhem plnění.

## Klíčová slova

Přesné lití, rapid prototyping, simulace, ProCAST, silikonová forma, voskové modely

## ABSTRACT

An overview of the development of the Investment Casting market and Rapid Prototyping equipment is given in the introductory part of this diploma thesis. Basic methods of rapid prototyping and the FDM method are further described in detail. The FDM method is consequently used in the practical part of this work for the preparation of the silicon mould.

The largest part deals with the issue of the simulation of pouring process of wax into the silicon mould. A characteristics of the casting wax is made; the parametres, which are inserted into the simulation software ProCAST and the possibilities of their measurement are described. The process of the simulation of the mould filling and its validation with the real filling process are described in detail.

## Key words

Investment Casting, Rapid Prototyping, Simulation, ProCAST, Silicone Mould, Wax Pattern

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOSOUR, V., *Technologie rychlého prototypování za použití metody FDM a současně technologie vytavitelného modelu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 268s., 27 příloh., Vedoucí práce: doc. Ing. Milan Horáček, CSc.



## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: „Technologie rychlého prototypování za použití metody FDM a současně technologie vytavitelného modelu“ jsem vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně, 20.5.2008

.....  
Vojtěch Kosour



## **Poděkování**

Zvláště děkuji za pomoc při vypracování diplomové práce doc. Ing Milanu Horáčkovi CSc., doc. Dr. Ing. Vladimíru Pavlínkovi, Ing. Ondřeji Charvátovi, MSc. Adrianu S. Sabauovi Ph.D., Ing. Martinu Chytilovi, Ing. Martinu Drastíkovi, Philu Hanckokovi a společnosti MECAS ESI s.r.o..





**OBSAH**

Abstrakt	4
Prohlášení	5
Poděkování	6
Obsah	7
Úvod	9
Cíl práce	10
<b>1 TEORETICKÁ ČÁST</b>	<b>11</b>
<b>1.1 Historie „přesného“ lití</b>	<b>11</b>
<b>1.2 Princip technologie vytavitelného modelu</b>	<b>13</b>
<b>1.3 Situace na trhu s přesnými odlitky</b>	<b>14</b>
<b>1.4 Možnosti výroby prototypových odlitků</b>	<b>16</b>
1.4.1 Úvod, metody RP	16
1.4.2 Metody RT	18
1.4.3 Metoda FDM	20
<b>1.5 Simulace slévárenských procesů</b>	<b>25</b>
1.5.1 Úvod do problematiky simulací	25
1.5.2 Metody řešení	25
1.5.3 Základní výpočtové vztahy	28
1.5.3.1 Plnění formy taveninou	29
1.5.3.2 Tepelně fyzikální veličiny forem	31
1.5.4 Simulační software ProCAST	33
1.5.4.1 Filozofie, strukturování ProCASTu	33
1.5.4.2 Parametry pro modul THERMAL	36
A) Specifické teplo	36
B) Tepelná vodivost	38
C) Hustota	38
D) Entalpie	39
E) Latentní teplo	40
1.5.4.3 Parametry pro modul FLUID	42
A) Viskozita	42
B) Povrchové napětí	49
1.5.4.4 Možnosti určení parametrů pro moduly	50
A) Možnosti měření parametrů pro modul THERMAL	50
B) Možnosti měření parametrů pro modul FLUID	56
<b>1.6 Materiály pro výrobu formem a modelů metodou RP</b>	<b>67</b>
1.6.1 Hmoty k výrobě měkké formy	67
1.6.2 Voskové směsi	70
<b>2 PRAKTICKÁ ČÁST</b>	<b>79</b>
<b>2.1 Úvod do praktické části</b>	<b>79</b>
<b>2.2 Výroba voskového modelu „C“ metodou RP</b>	<b>80</b>
2.2.1 Výroba matečného RP modelu	80
2.2.2 Výroba matečné formy	81
2.2.2.1 Návrh formy	81
2.2.2.2 Prostředky nutné ke zhotovení formy	81



2.2.2.3 Postup výroby formy	86
2.2.3 Výroba voskových modelů	90
2.2.3.1 První voskový model	90
2.2.3.2 Druhý voskový model	96
2.2.3.3 Třetí voskový model	98
<b>2.3 Simulace plnění silikonové formy pro voskový model „C“</b>	101
2.3.1 Preprocessing	101
2.3.1.1 MeshCAST	101
2.3.1.2 PreCAST	108
A) Dostupné vlastnosti silikonu	115
B) Dostupné vlastnosti voskové směsi	117
C) Měřené vlastnosti voskové směsi	119
2.3.2 Processing	132
2.3.3 Postprocessing	133
2.3.3.1 Simulace č.1	133
2.3.3.2 Simulace č.2	137
2.3.3.3 Simulace č.3	141
2.3.3.4 Simulace č.4	143
2.3.3.5 Simulace č.5	144
2.3.3.6 Simulace č.6	147
2.3.3.7 Simulace č.7	149
2.3.3.8 Simulace č.8	150
2.3.3.9 Simulace č.9	152
2.3.5 Zhodnocení dosažených výsledků simulací	153
<b>3 SHRNU TÍ A ZÁVĚR</b>	155
Seznam použitých zdrojů	157
Seznam příloh	160



## ÚVOD

Výroba odlitků pomocí vytavitelného modelu je velmi komplexní metoda. Vzniku přesného odlitku předchází mnoho kroků, z nichž každý má určitý podíl na výsledné kvalitě odlitku. Cílem je znát a dokázat ovlivňovat veškeré faktory, které jsou součástí technologie. Je třeba minimalizovat metodu pokusů a omylů, jež je často při výrobě odlitků uplatňována, tak snižovat náklady, zkracovat výrobní čas a zvyšovat svoji konkurenceschopnost na perspektivním trhu s přesnými odlitky.

Fyzickou metodu zkoušení zhotovit výrobek požadované kvality, která je časově a finančně náročná, lze dnes provádět virtuálně na počítači. Počítačová simulace umožňuje zoptimalizovat a výrazně zkrátit čas zavádění výroby. V poslední době se ze sléváren přesného lití, jež jsou seznámeny s výhodami simulací aplikovaných na řešení praktických problémů, stále častěji objevuje požadavek na provedení simulace plnění voskových směsí do kovových forem. Od simulace je požadováno urychlení a zlevnění při návrhu optimálního tvaru formy a volby podmínek pro zhotovení bezvadného voskového modelu. Simulace vstřikování vosku do formy, zobrazení průběhu plnění, tuhnutí, napětí a vad ve voskovém modelu v současné době není dostupná. Vzhledem k možnostem jež poskytují současné simulační softwary je možné tuto simulaci uskutečnit. Je ovšem třeba provést její komplexní návrh. Je třeba získat nezbytná provozní a materiálová data, provést jejich vyhodnocení a zadání do simulačního programu. Poté je třeba provést řadu simulací, optimalizaci a následně validaci simulace s konkrétní praktickou výrobou.

Zákazníkci sléváren přesného lití dnes požadují rychlé zhotovení kvalitního a náročného odlitku, za rozumnou cenu. Moderní úspěšná slévárna tedy musí neustále a cíleně vylepšovat klasický výrobní postup, zahrnovat do něj moderní technologie, postupy které nám umožní lépe plnit požadavky zákazníka. Při jednáních o nových zakázkách se výraznou obchodní výhodou stává možnost prezentovat budoucímu zákazníkovi hotový výrobek během velmi krátké doby, během kratší doby než konkurence. Pomocí implementace některé z technologií Rapid Prototypingu je možné již dnes předložit zákazníkovi hotový odlitek během několika dnů. S využitím RP lze zhotovit prototypový odlitek ve velmi krátkém čase, několikanásobně rychleji než při použití pouze klasické metody výroby. Tato možnost předvést zákazníkovi hotový výrobek během několika dnů nám dává velkou výhodu při získávání nových zakázek.

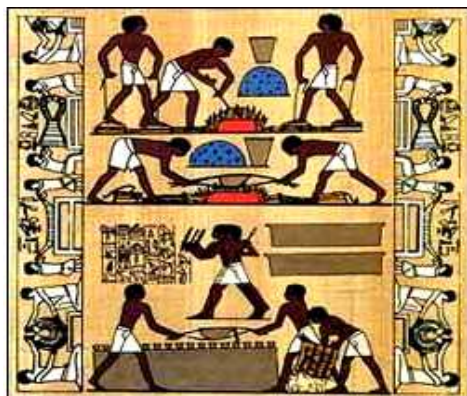
## CÍL PRÁCE

Cílem předkládané práce je popsat postup a sestavit simulaci pro novou výrobní technologii - gravitační odlévání voskových modelů do silikonové formy ve vakuu. Tato Rapid Prototyping technologie nachází uplatnění při výrobě menšího počtu voskových modelů, kdy je schopna modely zhotovit v krátkém čase bez nutnosti vyrábět drahou kovovou formu. Simulace pro tento proces bude sestavena z důvodů hledání odpovědí na otázky, jak je možné technologii zoptimalizovat a dále urychlit. Hlavní náplní práce je sestavení simulace gravitačního plnění roztavené voskové směsi do silikonové formy ve vakuu. Na jejím základě bude možné např. předpovědět nebezpečná místa z pohledu nedolití či studených spojů a s jejím využitím optimalizovat lící soustavu, teplotu přehřevu formy a teplotu lití voskové směsi.

# 1 TEORETICKÁ ČÁST

## 1.1 Historie „přesného,, lití

Výroba odlitků pomocí voskových modelů je z historického hlediska jednou z nejstarších metod odlévání objektů životních potřeb našich předků. Archeologické nálezy nám potvrzují využívání metody lití na ztracený vosk již kolem roku 4000 před naším letopočtem [1]. První známé odlitky, především náboženského významu a zbraní zhotovené ze zlata, stříbra, mědi a bronzu, pocházejí z oblastí Středního východu a Indie. Později se objevují u všech vyspělých kultur po celém světě – Mezopotámie, Egypt, Čína, Afrika, Mexiko, ... (**Obr. 1.1-1, Obr. 1.1-2, Tab. 1.1-1**).



Obr. 1.1-1 Starověký Egypt [2], [3]



Obr. 1.1-2 Předkolumbovské Mexiko [4], [3]

Dalším výrazným obdobím je renesanční Itálie. O znovuoobjevení se zasloužil italský sochař a zlatník Benvenuto Cellini, jenž vytvořil několik významných soch. Mezi nejmámenější patří tři a půl tuny těžká socha Persea s uťatou hlavou Medusy (**Obr. 1.1-3**). Socha byla hotova v roce 1554 a umístěna náměstí Loggia dei Lanzi ve Florenci, kde stojí dodnes [4]. Popis technologie lití na vytavitelný model našel Cellini v knize mnicha Theophilusse Presbysterse: „Schedula Diversarum Strium“, která je nejstarším známým textem o slévárenství [1].

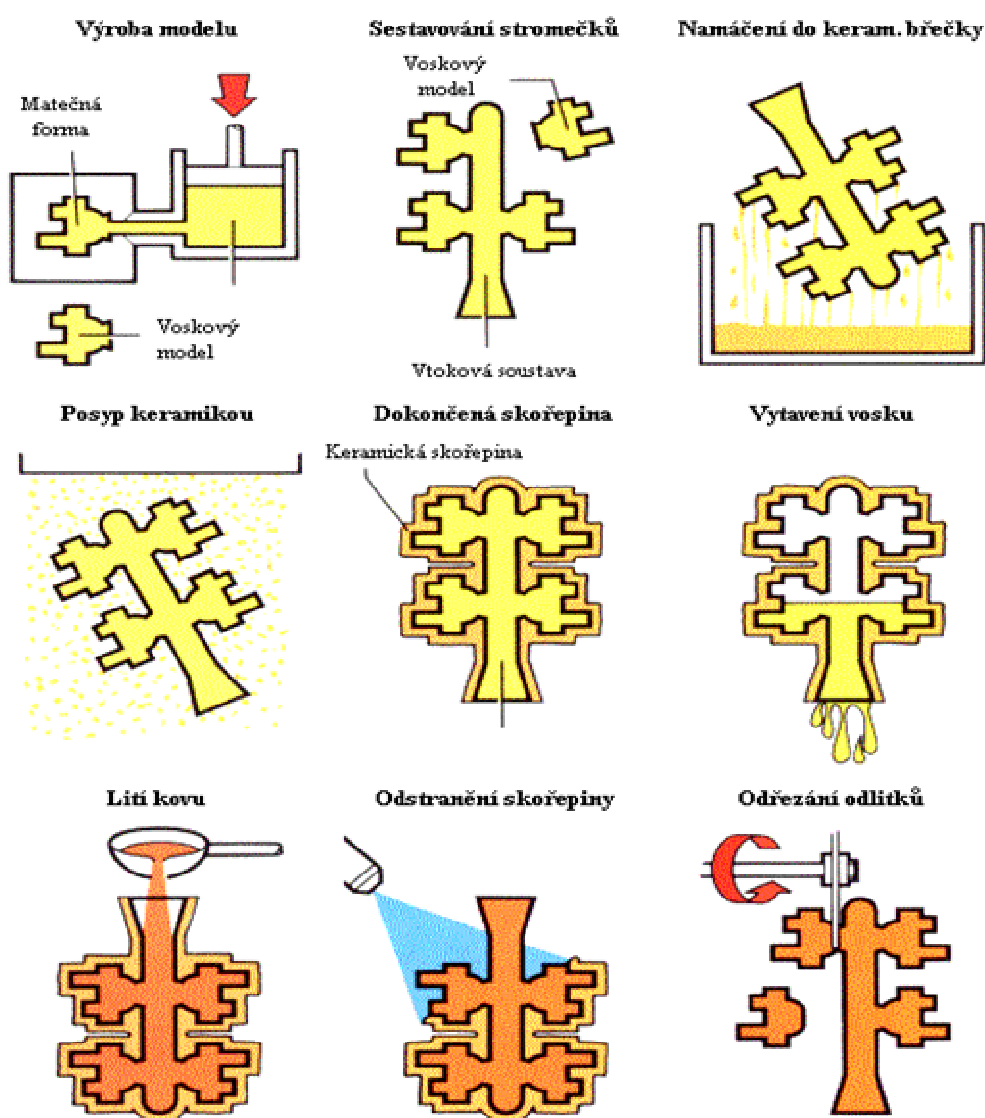




## 1.2 Princip technologie vytavitelného modelu

Technologie lití na ztracený vosk je přehledově znázorněna na **Obr.1.2-1**. Nejdříve je třeba zhotovit voskový model a další komponenty, pak se jednotlivé díly sestaví dohromady a vznikne tzv. stromeček. Stromeček se postupně obaluje keramickou hmotou. Následuje vytavení vosku a tepelné zpracování keramické formy. Odlévá se převážně do žhavých skořepin. Následují dokončující operace, tj. odstranění skořepiny, tryskání, oddělení jednotlivých odlitků od vtokové soustavy.

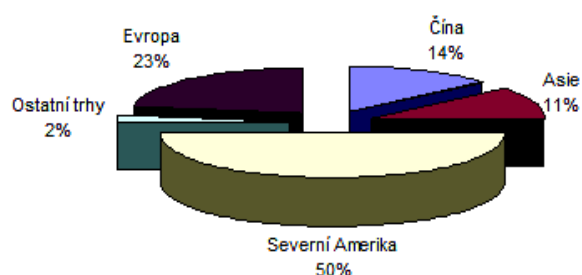
Detailní popis technologie výroby odlitku, na který bude provedena simulace, lze nalézt v příloze diplomové práce **P1**.



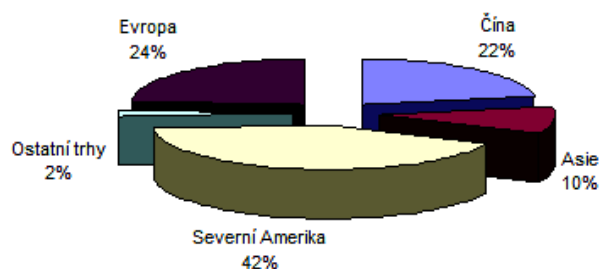
**Obr. 1.2-1** Princip metody vytavitelného modelu [5]

### 1.3 Situace na trhu s přesnými odlitky

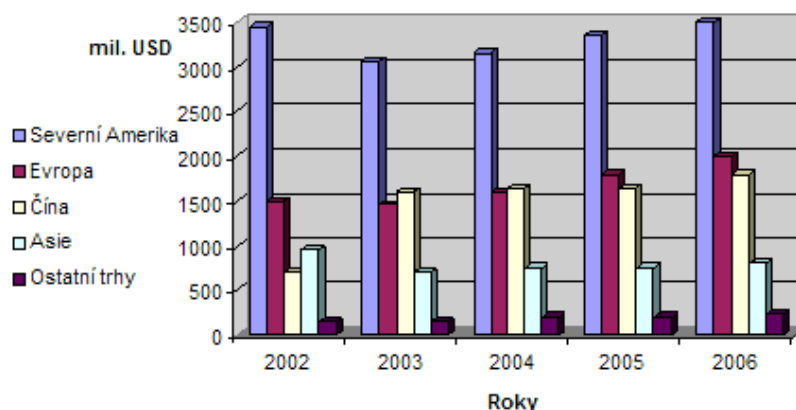
Rozvoj trhů s přesnými odlitky nastává po Druhé světové válce. Od počátku patří mezi vedoucí trhy trh americký. V roce 1958 dosahuje obrat na trhu s přesnými odlitky v USA cca 70 mil. USD, v roce 1979 - 1000 mil. USD, v roce 1993 – 1800 mil. USD, v roce 2000 již 2500 mil. USD [1], [5]. V současnosti lze světový trh podle velikosti obratu rozdělit na: Severní Amerika, Evropa, Čína, Asie a ostatní (**Graf 1.3-1**, **Graf 1.3-2**, **Graf 1.3-3**). Celosvětový obrat činil v roce 2006 – 8300 mil. USD. Přičemž se již obrat na čínském trhu téměř vyrovnal trhu evropskému [7].



**Graf 1.3.-1** Světové trhy podle podílu na prodeji odlitků vyrobených metodou vytavitelného modelu podle regionů – 2002 [7]

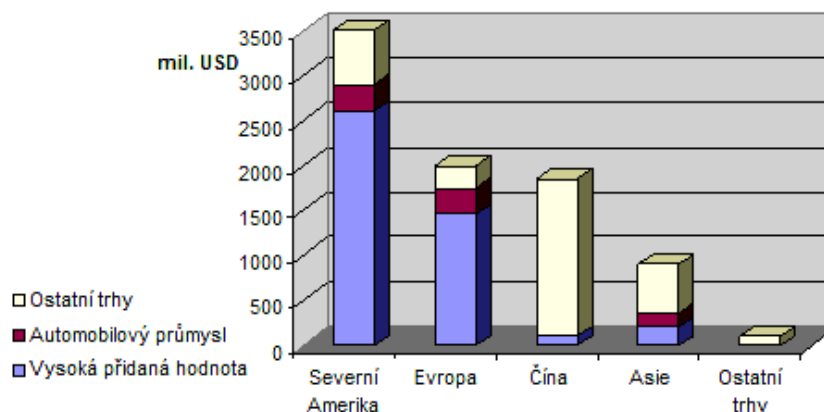


**Graf 1.3-2** Světové trhy podle podílu na prodeji odlitků vyrobených metodou vytavitelného modelu podle regionů – 2006 [7]



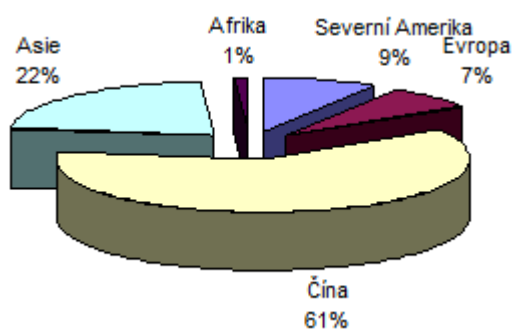
**Graf 1.3-3** Vývoj na světových trzích podle podílu na prodeji odlitků vyrobených metodou vytavitelného modelu podle regionů od roku 2002 do roku 2006 [7]

Dále se provádí dělení trhu s odlitky vyráběnými metodou vytavitelného modelu (dále jen odlitky VMVM) podle skladby zákazníků. Odlitky můžeme rozdělit do třech skupin, na odlitky pro automobilový průmysl, odlitky s vysokou přidanou hodnotou (letecký průmysl, energetika, zbrojní průmysl,...) a odlitky pro ostatní trhy. V posledních letech k výrazným změnám v poměru skladby zákazníků (vzhledem k předchozímu dělení trhu dle regionů) nedochází (**Graf 1.3-4**).



**Graf 1.3-4** Rozdělení trhu s odlitky VMVM na sektory podle zákazníků – 2006 v mil. USD [7]

Zajímavým údajem je i počet sléváren ve jednotlivých oblastech. V Číně a Asii je velký počet malých sléváren, kdežto v Evropě a Severní Americe převažují slévárny velké (**Graf 1.3-5**).



**Graf 1.3-5** Rozdělení počtu sléváren podle oblastí – 2006 [7]

Závěrem lze říci, že výroba odlitků metodou vytavitelného modelu celosvětově roste a i nadále lze určitý růst očekávat. Všechny sledované trhy dosáhly v roce 2006 nárůstu v řádu několika procent oproti roku 2005 (Evropa +8%, Severní Amerika +6%, Čína +12%) [7].

V současné době se však začíná na americkém trhu projevovat hospodářská recese. Pokud k recesi v USA opravdu dojde, lze očekávat pokles růstu, a to nejen na trhu USA, ale i v Evropě a celosvětově. Na druhé straně je stále výrazný růst ekonomik Číny, Indie a Ruska.

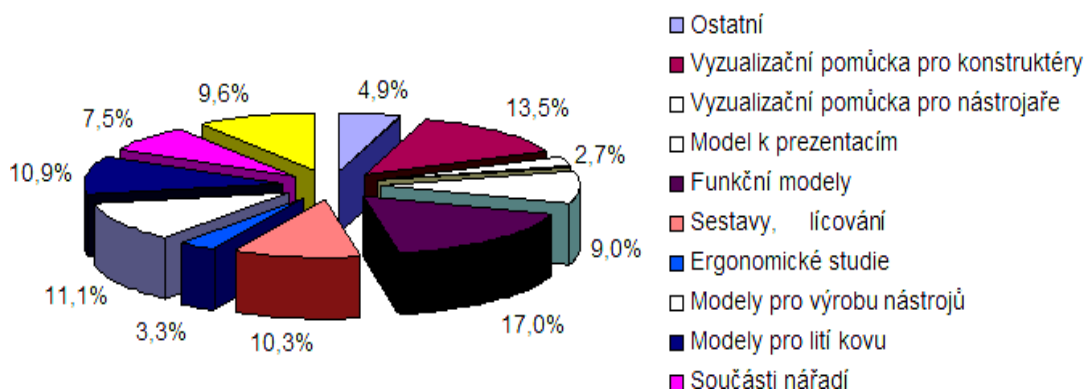
## 1.4 Možnosti výroby prototypových odlítků

### 1.4.1 Úvod , metody RP

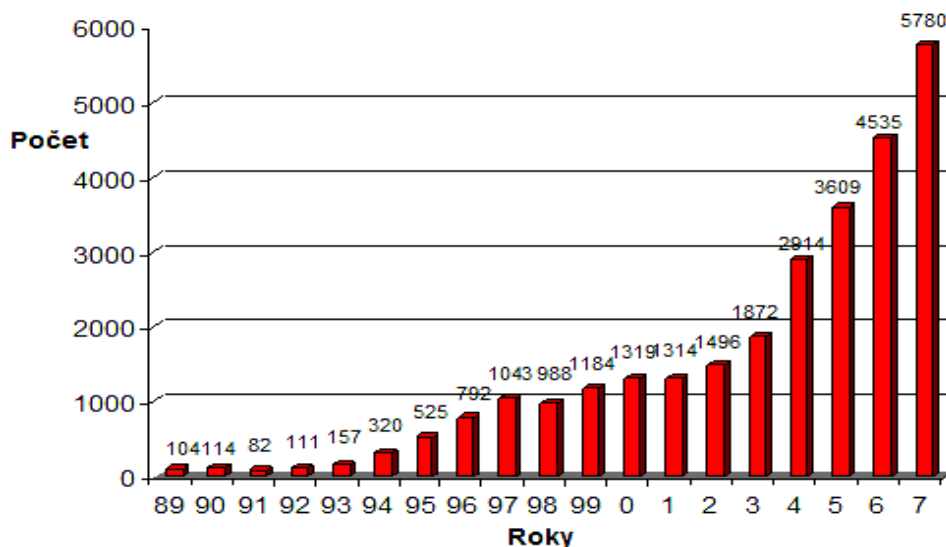
Tato kapitola představuje stručný úvod do technologií Rapid Prototyping. Důraz je kladen na možnosti využití z pohledu slévárenství.

Rapid Prototyping (dále jen RP) je skupina moderních technologií, jež umožňuje zhotovit výrobek přímo z 3D dat. Pod pojmem „výrobek,“ si lze nejčastěji představit prototypový díl, ale může to být i přímo konečný výrobek pro další technologie (např. slévárenské formy, jádra, formovací desky, ... ). Hlavním smyslem RP je získání reálného výstupu v čase kratším než je třeba pro zhotovení dílu klasickými technologiemi, při nižších nákladech, což jsou požadavky kladené zejména na výrobu prototypových kusů v malých sériích.

Oblast nasazení metod RP je velice široká, uplatnění nachází ve všech výrobních odvětvích (**Graf 1.4.-1**). Vyroběný dílec může použít např. konstruktér při komunikaci se zákazníkem, pro zkoušení smontovatelnosti, ergonomie, mechanických vlastností, ... .

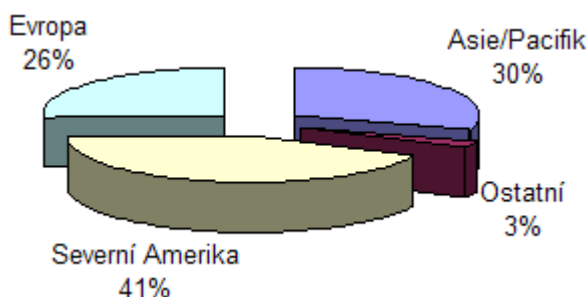


**Graf 1.4.-1** Oblasti využití RP v roce 2005 [19]



**Graf 1.4-2** Graf vývoje celosvětového prodeje RP zařízení [34]

Metody rychlé výroby prototypů představují dynamicky se rozvíjející obor (**Graf 1.4-2**). Počty instalovaných RP zařízení se každoročně výrazně zvyšují, přičemž v roce 2005 bylo celosvětově používáno cca 17 000 RP zařízení.



**Graf 1.4-3** Procentuální vyjádření RP zařízení ve světových regionech v roce 2005 [19]

První RP systémy se ve slévárenství začaly využívat před dvaceti lety. Jejich smyslem, stejně jako dnes, bylo snižování nákladů a zkracování výrobních časů pro výrobu kovového odlitku. Pro výrobu kovových forem, ve kterých se pak zhotovují voskové modely, jsou využívány především metody Laser-sintering, Steereolitography, Thermo-Jet, Multi-jet.

Lze také vyrábět modely, které lze rovnou obalovat a zcela se tak vyhnout výrobě voskových modelů. Tyto metody lze zatím využívat v kusové výrobě odlitků, ovšem i zde je možno vidět značný potenciál, neboť při malých sériích odlitků mohou být vyšší marže. Zrychlenou kusovou výrobu lze však také využít pro získávání nových zakázek – kdy zákazníkovi můžeme nabídnout hotový odlitek ve velice krátkém čase, bez nutnosti zhotovovat drahou matečnou formu pro hromadnou výrobu voskových modelů.

Dále lze metody RP využívat k nepřímé výrobě forem, kdy se pomocí metody RP zhotoví model, který se pak použije pro výrobu formy. Forma může být zhotovena např. ze silikonu, pryže, epoxidu, apod., a poté třeba pro zvýšení odolnosti, povlakována kovovým materiálem.

Je také možné vyrábět přímo keramickou skořepinu. Např. metody Soligen Technologies, Direkt Shell production Casting (DSCP), kdy je skořepina vyráběna po vrstvách vstříkáním pojiva do práškového materiálu [34].

#### **Mezi základní metody RP patří :**

##### 1) Stereolitografie ( SL )

Je první komerčně zavedená metoda (1987). Principem je ozařování fotopolymeru laserem, čímž dochází k jeho postupnému vytvrzování ve vrstvách.

##### 2) Solid Ground Curing ( SGC )

Ultrafialovým světlem se vytvrzuje fotocitlivý polymer v celých vrstvách naráz.

### 3) Selective Laser Sintering ( SLS )

Pomocí laserového paprsku je postupně taven (spékán) práškový materiál.

### 4) Laminated Object Manufacturing ( LOM, někdy též jen LM )

Model je postupně vyřezáván pomocí laseru z materiálu v podobě tenké fólie.

### 5) Three Dimensional Printing ( 3DP )

Principem této metody (někdy též označováno jako Model Maker 3D Plotting) je vstřikování pojiva do vrchní vrstvy práškového materiálu .

### 6) Fused Deposition Modelling ( FDM )

Tryska postupně nanáší vrstvu termoplastického materiálu. Metoda bude dále podrobněji rozebrána.

### 7) Ballistic Particle Manufacturing ( BPM )

Piezoelektrická tryska nanáší mikroskopické kapky roztaveného materiálu.

### 8) Multiphase Jet Solidification ( MJS )

Vytlačování řídké směsi tvořené kovovým a keramickým práškem a voskem.

Samozřejmě existuje celá řada méně rozšířených metod. Velice rychle se také objevují nové perspektivní metody. Vývoj je třeba sledovat pomocí internetu.

## 1.4.2 Metody RT

Kromě přímého použití dílů z RP zařízení jako jader či modelů, se začíná využívat také metod Rapid Tooling (RT) neboli rychlé výroby nástrojů (pro slévárnství především forem). Metody RT lze dělit např. podle tvrdosti, resp. životnosti forem na tzv. Soft tooling a Hard Tooling. Dále se dělí na Indirect RT (nepřímé) a Direct RT (přímé). Přímé metody výroby konečného výrobku na základě 3D dat přímo z RP zařízení se nazývá Rapid Manufacturing.

### 1) Metody Soft Tooling – Indirect RT

Jsou technologie výroby forem pomocí tzv. „Master modelu“ (matečný model), složí pro zhotovování malých sérií odlitků. Matečný model je objekt jenž byl zhotoven na RP zařízení. S jeho pomocí je pak zhotovena „měkká forma“ (ze silikonů, uretanů, polymerů, ...), ve které lze vyrobit většinou několik desítek odlitků, nejčastěji z plastů či vosků. Patří sem především metoda vakuového lití do silikonového kaučuku (Silicone Rubber Mould), která je detailně rozpracována v kapitole 2.2. Pro větší série je možno použít plněných epoxidových forem (metoda Aluminium filled Epoxy – vstřikovací

formy pro sérii do 1000 kusů), formy s povrchovou úpravou (metoda Sprayed Metal Tooling) a další.

### 2) Metody Soft Tooling – Direct RT

Forma je zhotovena přímo na RP zařízení, jsou vhodné pro malé série. Např. metody Cooper Polyamide (směs měď, polyamid, polymer), Direkt Metal Laser Sintering (forma z bronzové směsi), ... .

### 3) Metody Hard Tooling – Indirect RT

Do této skupiny patří všechny nepřímé metody zhotovení forem pomocí matečného modelu pro větší ověřovací série (řádově tisíce kusů). Většinou jsou tyto formy používány pro nízkotlaké vstřikování plastů, nebo pro zhotovení formovacích desek. Patří sem např. Rapid Solidification Proces RSP Tooling, kdy je na model nanášen vysokou rychlostí roztavený kov až do tloušťky několik mm. Metoda se kromě výroby formovacích desek uplatňuje při zhotovování vložek nástrojů. Dále sem patří metoda Keltool jež umožňuje získat kvalitní formovací desky. Například metoda EcoTool a další.

### 4) Metody Hard Tooling – Direct RT

Je velice obsáhlá skupina technologií, kdy je forma vyráběna přímo na RP zařízení. Jednotlivé metody lze dále dělit podle metody výroby (z prášku pomocí laseru, postupným nanášením roztaveného materiálu, jiný princip). Patří sem : Rapid Bridge Tooling

Direct Metal Laser Sintering

Selective Laser Melting

Laser Engineering Net Shaping

Metal Direct Deposition

Elektron Beam Melting

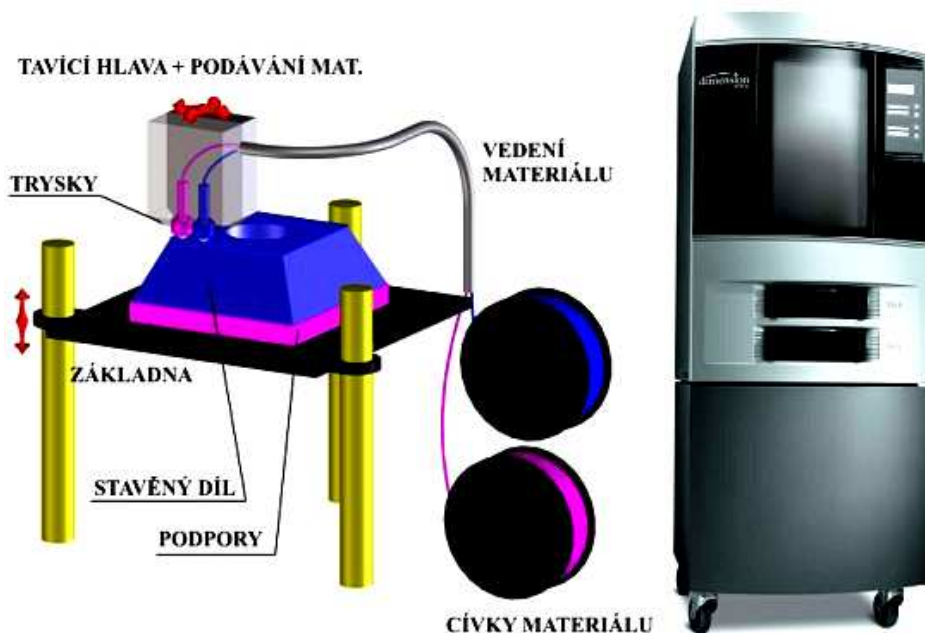
ProMetal Rapid Tooling a další.



**Obr. 1.4-1** Kovová forma vyrobená metodou SLS [9]

### 1.4.3 Metoda FDM

Metoda Fused Deposition Modeling je postupné nanášení roztaveného materiálu do vrstev. Komerčně je využívána od roku 1991 firmou Stratasys (**Obr. 1.4-2**).



**Obr. 1.4-2** Princip technologie FDM, kterou využívá většina tzv. 3D tiskáren [7]

**Princip:** Materiály pro stavbu modelu a podpor jsou přiváděny z výměnných zásobníků ve formě drátu (průměr 1,6 mm) do vodorovně pohyblivé hlavy se dvěma tryskami. Trysky jsou vyhřívány a dochází v nich k tavení materiálu, který je postupně v tenkých vrstvách nanášen na svisle se pohybující pracovní stůl.

Trysková hlava je umístěna ve vyhřívané komoře (70 °C), jež zaručuje optimální přilnutí a tuhnutí vrstev.

**Materiály:** Jsou inertní a netoxické, což předurčuje použití FDM metod pro vyžívání přímo v kancelářích jako tzv. 3D tiskárny.

1) ABS - akrylonitril-butadien-styren - je základní a nejpoužívanější materiál

- pevnost v tahu 22 MPa, pevnost v ohybu 41 MPa

2) ABS M30 - vyznačuje se vyšší pevností, vyšší kvalitou povrchu oproti ABS

- pevnost v tahu 36 MPa, pevnost v ohybu 61 MPa



3) ABSi - vyznačuje se vysokou pevností, rozměrovou stabilitou a je průhledný

- pevnost v tahu 37 MPa, pevnost v ohybu 61 MPa

4) ABSplus – o 40 % pevnější než ABS, barevnost

- pevnost v tahu 36 MPa, pevnost v ohybu 52 MPa

5) PC – polykarbonát – vysoká rozměrová stabilita, vysoké mechanické vlastnosti, především pro testovací díly

- pevnost v tahu 52 MPa, pevnost v ohybu 97 MPa

6) PC-ABS – spojuje přednosti obou materiálů, vysoké mechanické vlastnosti, tepelná odolnost

- pevnost v tahu 35 MPa, pevnost v ohybu 50 MPa

7) PC-ISO - splňuje normu ISO 10993-1 pro použití v potravinářství a v medicíně

- pevnost v tahu 52 MPa, pevnost v ohybu 82 MPa

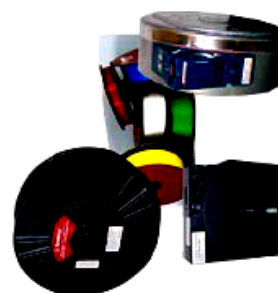
8) PPSF/PPSU - polyphenylsulfon - vysoká chemická odolnost, pevnost, rozměrová stabilita, možnost sterilizace ( gama zářením, párou, chemicky, plazmová sterilizace )

- pevnost v tahu 55 MPa, pevnost v ohybu 110 MPa

9) ICW06 – jde o voskovou směs, vhodné pro přímé použití jako vytavitelný model v Investment Casting

10) Elastomer E20 – vhodný pro pružné komponenty

	ABS	ABSi	ABSplus	ABS M30	PC-ABS	PC	PCISO	PPSF
Koncepční návrhy	✓		✓	✓				
Formy	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Funkční testování	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Jemnost detailů	✓	✓	✓	✓	✓			
Hladkost povrchu	✓	✓		✓	✓			
Vysoko teplotní aplikace								✓
Direct digital manufacturing	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Ověřování projektu	✓		✓	✓				
Certifikace ISO							✓	
Průhlednost		✓					✓	
Barvy	✓	✓	✓	✓			✓	
Water Works	✓	✓	✓	✓	✓			



Obr. 1.4-3 Materiály pro FDM [20]

Tyto materiály lze také použít pro stavbu podpor. Lídr v oboru, firma Stratasys, používá pro stavbu podpěr dvě technologie. Prvním je systém BASSTM - materiál podpor je křehčí než materiál modelu, což usnadňuje mechanické odstranění pomocných částí. Novější je systém Water Works, kdy se podpěry rozpustí ve vodě s kyselinou citrónovou.

Detailní popis vlastností materiálů lze nalézt na stránkách výrobce.

#### Výhody technologie FDM:

- velký výběr materiálů s různými vlastnostmi pro tisk na jednom stroji
- snadná obsluha
- zdravotně nezávadný provoz

#### Nevýhody metody FDM:

- nutnost dokončujících operací

#### RP zařízení pro FDM:

Jednotlivé stroje se rozdělují především podle velikosti modelu, který jsou schopny vytisknout. Maximální velikost je v současnosti (2007) 600 x 500 x 500 mm. Tloušťky vrstev se pohybují od 0,13 do 0,25 mm. Jak již bylo řečeno, lídrem je společnost Stratasys a kompletní informace lze nalézt na jejích internetových stránkách (viz [20]).



**Obr. 1.4-4** Několik příkladů použití metody FDM [20]

### ***Výroba RP dílu***

Podstatou všech metod RP je výroba dílu po vrstvách. Lze tedy vyrobit součást libovolného tvaru, při omezené velikosti (dáno konkrétním RP zařízením). Dělení na jednotlivé etapy lze použít stejné jako u simulací, tedy:

- 1) Preprocessing
- 2) Processing
- 3) Postprocessing

#### *Ad1) Preprocessing*

Preprocessingem rozumíme všechny úkony potřebné k vytvoření dat nutných ke zhotovení dílu.

Patří sem převod dat do tzv. výměnného formátu, a to z:

- CAD systému (ProEngineer, Catia, SolidWorks, 3D MAX Studio, ...)
- 3D skeneru (tzv. revers Engineering)
- diagnostických přístrojů v medicíně (CT)

Výměnný formát je datového soubor, se kterým je schopno dané RP zařízení pracovat (.stl, .iges, .cli ...). Nejčastěji používaný datový formát je .stl (Stereolithography file - Standard Tessellation Language) v němž je těleso popsáno pomocí povrchové uzavřené sítě trojúhelníků, bez respektování některých parametrů modelu (barva, textura). Při převodu do tohoto výměnného formátu bohužel často, stejně jako u simulací, vznikají chyby, které je nutno dále opravovat. Pro konverzi a práci s daty je vyvinuto mnoho softwarů (např.: Spinfire Professional – od Actify, GEOMESH - od ESI Group, View Expert – od DeskArtes, RapidForm – od Rapid Form , Magics – od Materialisime, ... ).

Dále je těleso pomocí speciálních programů rozděleno na tenké řezy – vrstvy o tloušťce řádově v desetinách až setinách mm. Další kroky se mohou lišit podle konkrétní technologie RP. V případě potřeby, je automaticky vygenerována podpurná konstrukce, většinou z odlišného materiálu než samotný model. Je zvolena nejvýhodnější poloha pro „tisk“, modelu a vygenerovány pohybové dráhy.

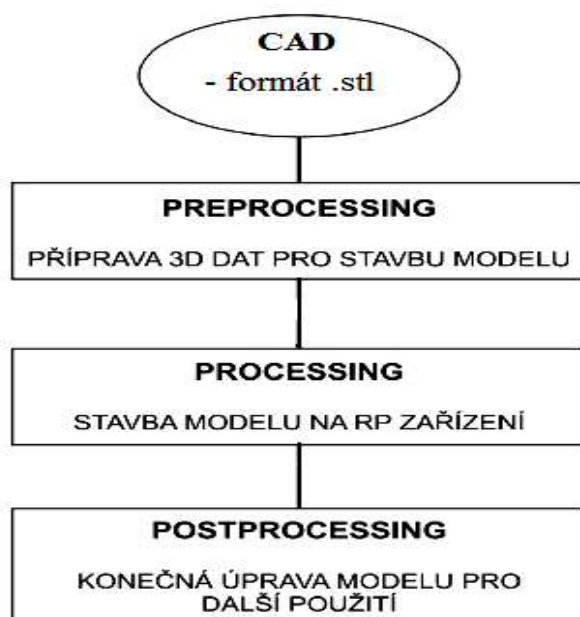
#### *Ad2) Processing*

Fází processingu je u technologií RP nazývána stavba (tisk) modelu po jednotlivých vrstvách. Metoda vzniku vrstev je závislá na druhu metody RP (u metody SL – vytvrzování tekutého polymeru pomocí laseru, u SLS tvorba vrstev z práškového materiálu pomocí laseru, u metody FDM – nanášením roztaveného materiálu, ... ).

### Ad3) Postprocessing

Postprocessing jsou dokončovací operace, které začínají vyjmutím modelu z RP zařízení. Podle druhu použité technologie to může být:

- odstranění podpůrné konstrukce (mechanicky, chemicky)
- povrchové dokončující operace (čištění, broušení, tmelení, leptání, ...)
- vytvrzování (UV zářením, tepelně, ...)
- napouštění speciálními látkami
- nanášení povrchových vrstev



**Obr. 1.4-5** Schéma procesu tvorby součásti pomocí RP

## 1.5 Simulace slévárenských procesů

### 1.5.1 Úvod do problematiky simulací

Počítačovou simulaci lze obecně označit jako nástroj pro optimalizaci procesů s využitím počítače. Pod pojmem „procesy“, si lze představit velmi širokou oblast - děje které probíhají kolem nás (viz kapitola 1.5.4). Snahou je na počítači napodobovat (simulovat) reálný děj a pomocí tohoto virtuálního světa předpovědět důsledky skutečného děje. Simulace se využívají v mnoha oblastech lidské činnosti, např. v dopravě, energetice, medicíně, ... . V dalším textu bude pozornost zaměřena pouze na simulaci slévárenských procesů.

Existuje velké množství simulačních programů, různě zaměřených na konkrétní oblast simulace, na konkrétní proces či technologii lití. Obecně se zaměřují především na procesy :

- plnění formy
- tuhnutí a chladnutí
- predikce vnitřní struktury a vlastností odlitku
- predikce vnitřních pnutí a deformací

Z nejznámějších simulačních softwarů lze jmenovat např.:

MAGMA SOFT - Německo

ProCAST - USA

AFS Solidification System 3D - USA

NovaCast - Švédsko

FLOW 3D - USA

SIMTEC - Německo

„Kvalitu“ jednotlivých softwarů lze hodnotit především blízkostí dosaženého výsledku k realitě. Což je ovlivněno mnoha skutečnostmi, především však matematickým popisem simulovaného děje (zjednodušení), přesností fyzikálních a mechanických vlastností simulované soustavy (odlitek – forma – okolí) a v neposlední řadě i schopností uživatele využít potenciál daného programu.

### 1.5.2 Metody řešení

„Know-how“ jednotlivých programů je skryto především v korektnosti matematického popisu modelu, v zjednodušení popisu skutečnosti. K matematickému řešení problému lze využít metod analytických či numerických. Při řešení analytickými metodami, ať již přesnými či přibližnými, se z diferenciální rovnice získává spojitá informace o neznámé veličině. Např.

teplota je funkcí souřadného systému a času. Mezi analytické metody se řadí metoda separace proměnných, Greenova funkce, metody integrální transformace, variační metody, ... [12], [13].

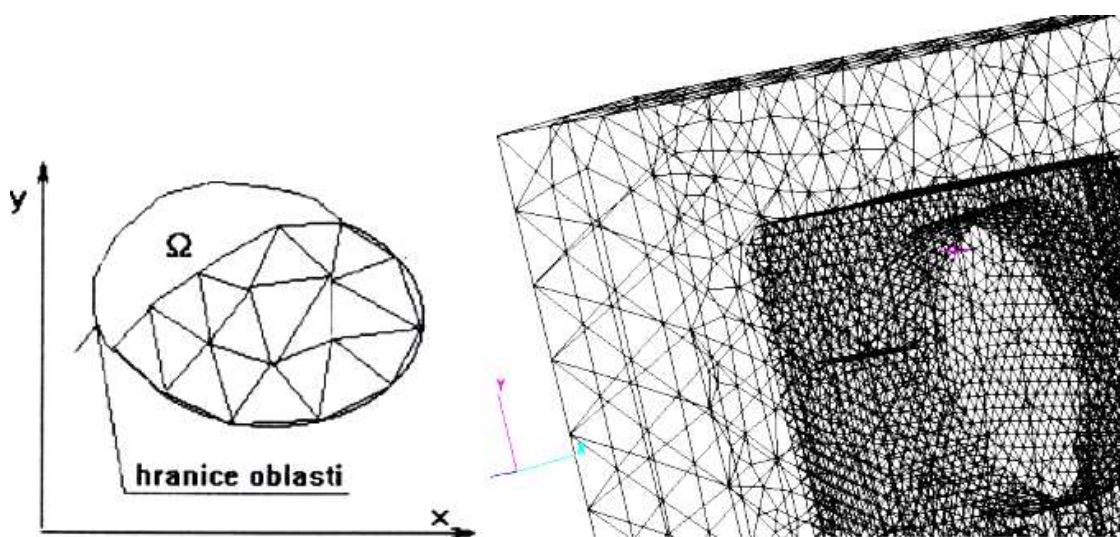
Při numerickém řešení je spojitá informace o neznámé veličině (např. průběh teploty na stěně formy) nahrazena diskrétními hodnotami v daných bodech (tzv. uzlových bodech) oblasti. Diskretizace, jak řešené veličiny, tak řešené oblasti, umožňuje nahradit diferenciální rovnici jednoduchými algebraickými rovnicemi. Pro provedení diskretizace musí být nejprve algebraicky popsán vztah mezi hodnotami hledané veličiny a polohou uzlových bodů.

Mezi numerické metody patří metoda konečných prvků, metoda konečných diferencí, metoda okrajových prvků, metoda řízených objemů, ... [12], [13]. Ve slévárenských simulačních programech je v současnosti nejvíce využívána metoda konečných prvků.

### **Metoda MKP**

Mezinárodní značení metody konečných prvků je FEM (Finite Elements Methode). Metoda navržená v roce 1943 R. Courantem je dnes považována za jednu z nejúčinnějších metod řešení problémů popsanych diferenciální rovnicí (viz kapitola 1.5.3). Je založena na rozdělení dané oblasti na konečný počet jednoduchých prvků (nejčastěji trojúhelníky – pak je tato prostorová diskretizace nazývána triangulací), které jsou na svých hranicích vzájemně spojeny v konečném počtu uzlových bodů (**Obr.1.5-1**). Matematické řešení vyšetřované veličiny (např. teploty) je pak na jednotlivých elementech popsáno např. jednoduchou lineární rovnicí či polynomem.

Metoda je v programech plně automatizována, uživatel však může ovlivňovat výslednou přesnost a čas výpočtu zadáním velikosti jednotlivých elementů (a tzv. nekoincidentní sítě - **Obr. 1.5.-1**).

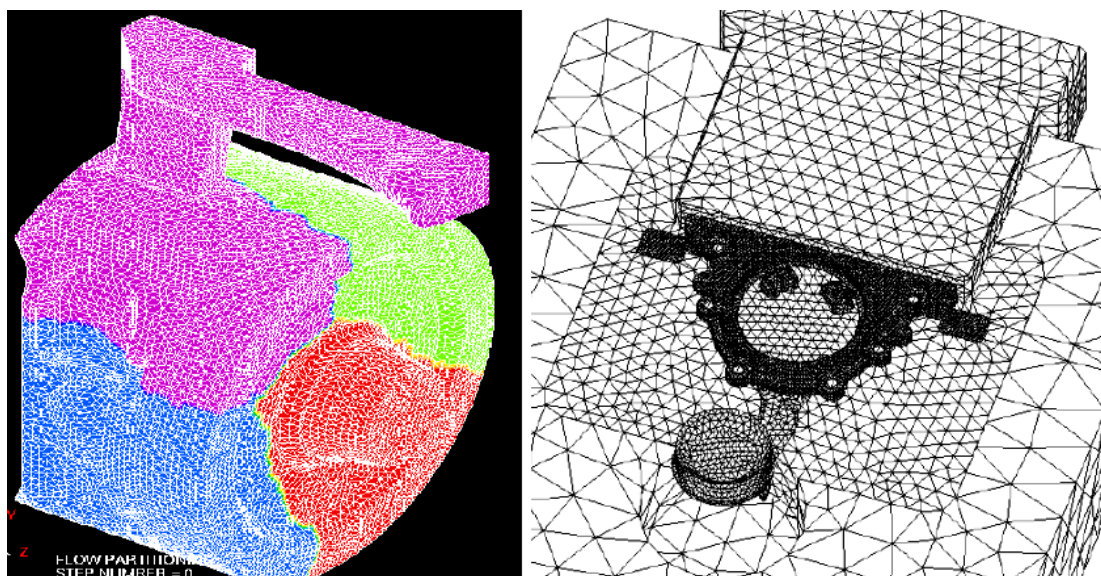


**Obr.1.5-1** Triangulace oblasti  $\Omega$ , část ztriangulovaného („zmešovaného“) povrchu odlitku „C“

Hlavními výhodami této metody jsou:

- přesný popis geometrie
- přesné termo-mechanické výpočty (poměrně snadno se dají vyjádřit oblasti složené z různých anizotropních materiálů, okrajové podmínky i jejich nespojitosti).

Hlavní nevýhodou jsou vysoké nároky na výkon výpočetní techniky. Pro zkrácení výpočtových časů se dnes využívá výcejádrových či víceprocesorových výpočetních stanic, rozdělení výpočtů mezi více procesorů, kdy každý počítá určitou oblast modelu. Popř. také tzv. nekoincidentní sítě, což je tvorba různých velikostí elementů sítě částí modelu.



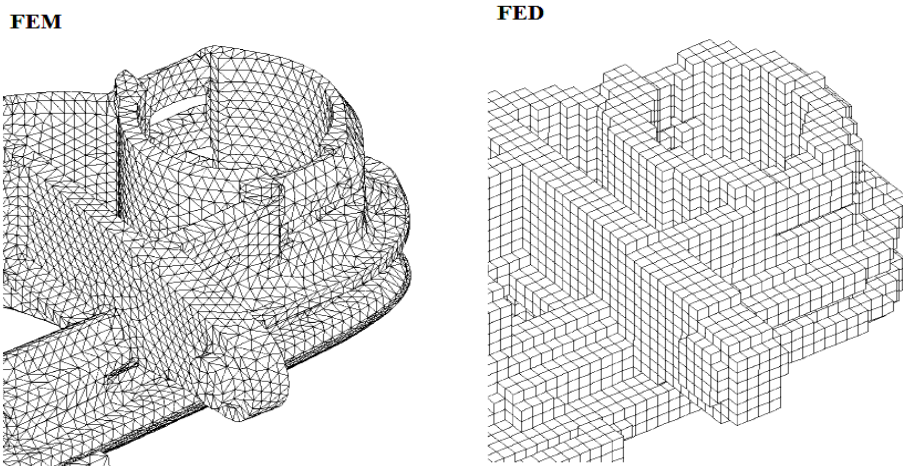
**Obr. 1.5.-2** Rozdělení modelu na domény mezi více procesorů pro zkrácení výpočtového času simulace, nekoincidentní sítě [13]

### **Metoda MKD**

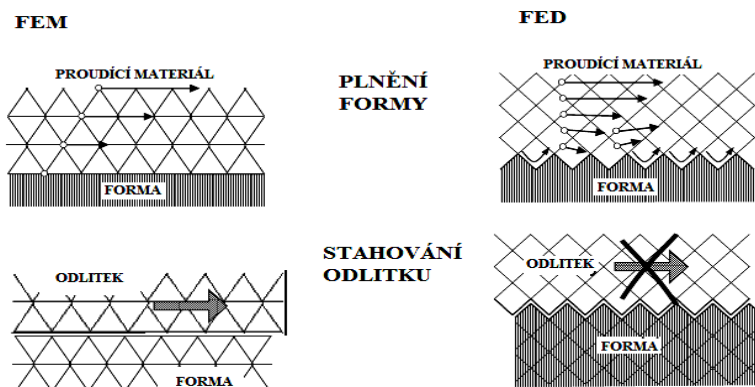
Mezinárodní značení metody konečných diferencí je FDM (Finite Differences Methode). Metoda je druhou nejčastěji používanou. Je založena na aproximaci diferenciální rovnice s příslušnými okrajovými podmínkami pomocí diferenční rovnice, která je ve tvaru soustavy algebraických rovnic. Přesnost aproximace spočívá v nahrazování derivace v jednotlivých diskretních místech (v uzlových bodech sítě, jež pokrývá vyšetřovanou oblast) přesnějšími výrazy (**Obr. 1.5-3**).

Výhodou oproti FEM je jednoduché generování výpočtových sítí a kratší výpočtové časy (vzhledem k počtu elementů), vyšší výpočtová robustnost. Nevýhodou je obtížné lokální zhušťování sítě, při vizualizaci nepůsobí dobře schodkovitý tvar povrchu odlitku. Další výhody a nevýhody obou metod plynou z principu řešeného problému a vlastností dané plochy (např. při sledování tepelných poměrů přes velkou hraniční plochu je výhodnější metoda FEM, u

metody FED působí jisté obtíže při výpočtu napětí a deformací, proudění, radiace ...), (**Obr.1.5-4**) [12], [13].



**Obr. 1.5-3** Povrchová síť vytvořená pomocí metody FEM a FED [13]



**Obr.1.5-4** Obtíže plynoucí z principu metody FED při výpočtu plnění formy a napětí v odlitku [13]

### 1.5.3 Základní výpočtové vztahy

Simulační softwary vycházejí při výpočtech ze známých vztahů pro popis daných dějů. Nejdůležitější budou přehledově shrnuty v následujících kapitolách.

Přenos energie v soustavě „tavenina-forma-okolí“ může probíhat:

- vedením (kondukcí) – teplo přechází od částice k částici jejich přímým stykem (uplatňuje se především v tuhé fázi)
- prouděním (konvekce) - se uplatňuje např. v pískové slévárenské formě
- sáláním (radiací) – je šíření energie ve formě elektromagnetického vlnění



### 1.5.3.1 Plnění formy taveninou

Tepelné poměry v soustavě „tavenina-forma“ závisí na tepelně-fyzikálních vlastnostech formy, druhu odlévaného materiálu a podmínkách sdílení tepla na rozhraní této soustavy. V tavenině se teplo předává vedením a prouděním. Tepelné děje v tavenině popisuje Fourierova-Kirchhoffova rovnice vedení tepla:

$$\frac{\delta T}{\delta t} = v_x \cdot \frac{\delta T}{\delta x} + v_y \cdot \frac{\delta T}{\delta y} + v_z \cdot \frac{\delta T}{\delta z} = a \cdot \nabla^2 \cdot T \quad (1-1)$$

T - teplota

a - teplotní vodivost taveniny

$v_x, v_y, v_z$  - rychlost pohybu elementu taveniny v příslušném směru souřadného systému

$\nabla^2$  - Laplasův operátor

t – čas

Proměnnými v rovnici (1-1) jsou teplota a rychlost. Teplotní pole v proudící tavenině závisí i na rychlosti proudu. Sdílení tepla v tavenině je ovlivněno procesy tepelnými a hydrodynamickými (tření), nestačí tedy řešit jednu diferenciální rovnici, ale soustavu dif. rovnic.

Pro simulaci plnění se uplatňuje i rovnice Navier-Stokesova, jejíž odvození vychází z rovnováhy sil působících na proudící kapalinu. Lze ji zapsat např. v obecném tvaru:

$$\rho \cdot \underline{v} + \underline{v} \cdot \text{div}(\rho \cdot \underline{v}) = \rho \cdot g + \text{grad}(p) + \underline{v} \cdot \Delta \underline{v} \quad (1-2)$$

$\rho$  - hustota proudící kapaliny

$v$  – rychlost

p – tlak

$\nu$  - součinitel kinetické viskozity

Ve výpočtech proudění se také využívá zákon zachování hmoty, vyjádřený rovnicí kontinuity, která říká že změna hmoty v určitém objemu je dána rozdílem množství vtékající a vytékající tekutiny. Lze ji zapsat ve tvaru:

$$\frac{\delta v_x}{\delta x} + \frac{\delta v_y}{\delta y} + \frac{\delta v_z}{\delta z} = 0$$

$$\text{div} \bar{v} = 0$$

(1-3)

Dále je třeba matematicky popsat chování taveniny při jejím tuhnutí, tedy vzájemnou interakci mezi taveninou a formou. Jednou z rozhodujících vlastností je schopnost formy přebírat teplo z taveniny, odlitku. Sledování celého procesu přenosu tepla je dosti obtížné vzhledem k řadě probíhajících dějů (uvolňování skupenského tepla při tuhnutí a fázových přeměnách, přestup tepla mezi tekutým a tuhým kovem, ...). Při řešení je třeba definovat řadu podmínek charakterizující jednotlivé děje. Jak již bylo uvedeno výše, dochází v soustavě ke sdílení tepla vedením, prouděním a sáláním.

Když forma nakumuluje dostatečné množství tepla, dojde k dostatečnému podchlazení taveniny a ta začíná tuhnout. Vzniká licí vrstva, která ovlivňuje další odvod tepla. Odvod tepla formou má zásadní vliv na výsledné vlastnosti odlitku. Při řešení tepelných poměrů lze vycházet z tepelné rovnováhy soustavy.

$$dQ_O = dQ_{Pr} = dQ_F \quad (1-4)$$

$dQ_O$  - přírůstek tepla uvolněného při tuhnutí odlitku

$dQ_{Pr}$  - přírůstek tepla prošlého rozhraním odlitek-forma

$dQ_F$  - přírůstek tepla, kterou akumuluje forma

Množství tepelné energie uvolněné odlitkem mezi teplotami likvidu a solidu lze určit ze vztahu:

$$Q_O = m_K \cdot \left[ \int_{T_S}^{T_L} c_L \cdot dT + L_{KR} + \int_{T_S}^{T_L} c_S \cdot dT \right] \quad (1-5)$$

Po integraci dostaneme vztah :

$$Q_O = m_K \cdot [c_L \cdot (T_1 - T_L) + L_{KR} + c_S \cdot (T_S - T_K)] \quad (1-6)$$

$m_K$  - hmotnost kovu

$T_L$  - teplota počátku tuhnutí

$c_L$  - měrná tepelná kapacita taveniny

$T_K$  - konečná teplota odlitku

$c_S$  - měrná tepelná kapacita ztuhlé taveniny

Výpočtové vztahy používané simulačními programy pro výpočet tuhnutí a chlazení odlitku ve formě jsou uvedeny v příloze diplomové práce **P2**.

### 1.5.3.2 Tepelně fyzikální veličiny slévárenských forem

Tepelně fyzikální veličiny potřebné pro výpočty tepelných procesů mezi odlitkem a formou jsou:

- měrná tepelná kapacita  $c \quad J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
- tepelná vodivost  $\lambda \quad W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
- součinitel přestupu tepla  $\alpha \quad J \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
- součinitel prostupu tepla  $\beta \quad J \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
- teplotní vodivost  $a \quad m^2 \cdot s^{-1}$
- součinitel tepelné akumulace formy  $b_F \quad W \cdot s^{\frac{1}{2}} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$

#### Měrná tepelná kapacita $c$

Rozlišujeme měrnou tepelnou kapacitu za konstantního tlaku a konstantního objemu. Ve slévárenství má význam především za stálého tlaku. Tato tepelná charakteristika udává množství tepla, které musíme látce dodat aby se její teplota zvýšila o 1°C.

$$c = \frac{dQ}{dT \cdot m} \quad \text{či} \quad c = A + B \cdot T + C \cdot T^{-2} \quad (1-7)$$

dQ – diferenciál tepla

dT – přírůstek teploty

m – hmotnost látky

A, B, C - konstanty

T - teplota

Čím vyšší je hodnota  $c$ , tím pomaleji se látka ohřívá.

#### Tepelná vodivost $\lambda$

Tepelná vodivost charakterizuje schopnost látky vést teplo. Součinitel tepelné vodivosti udává pro určitý časový okamžik množství tepla, které projde jednotkou délky materiálu a vytvoří rozdíl teplot 1 K. Stanovení  $\lambda$  je dosti náročné vzhledem k její závislosti na druhu látky, její struktuře, vlhkosti, tlaku. U některých látek je tepelná vodivost závislá na teplotě lineárně:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot (1 + b \cdot T) \quad (1-8)$$

$\lambda_0$  - tepelná vodivost při teplotě 0°C

b - konstanta

T – teplota

Tepelná vodivost je ve srovnání s jinými látkami vysoká, vyšší než u kapalin či plynů.

Tepelná vodivost čistých kovů je vyšší než sloučenin (atomy příměsí tvoří nepravidelnosti ve struktuře krystalové mřížky). Jsou odvozeny rovnice pro výpočty  $\lambda$  různých materiálů, viz. např. literatura [16], [12].

### **Součinitel teplotní vodivosti a**

Vyjadřuje rychlost změny průběhu tepelného děje při nestacionárním průtoku tepla. Má obdobný význam jako součinitel tepelné vodivosti u dějů stacionárních.

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad (1-9)$$

$\lambda$  - tepelná vodivost

c – měrná tepelná kapacita

$\rho$  - hustota

Čím vyšší je hodnota, tím lépe materiál dokáže vyrovnávat tepelné rozdíly.

### **Součinitel přestupu tepla $\alpha$**

Je mírou intenzity přestupu tepla z teplejšího do chladnějšího prostředí. Jeho určení je obtížné, neboť závisí na mnoha činitelích (rychlost proudění taveniny, teplota, tepelná vodivost formy a taveniny, viskozitě, hustotě ...).

### **Součinitel tepelné akumulace formy $b_F$**

Tato odvozená veličina komplexně charakterizuje ochlazovací účinek formy vůči odlitku. Akumulační schopnost materiálu je množství tepla, které projde z odlitku do formy jednotkou plochy za jednotku času při rozdílu teplot 1K.

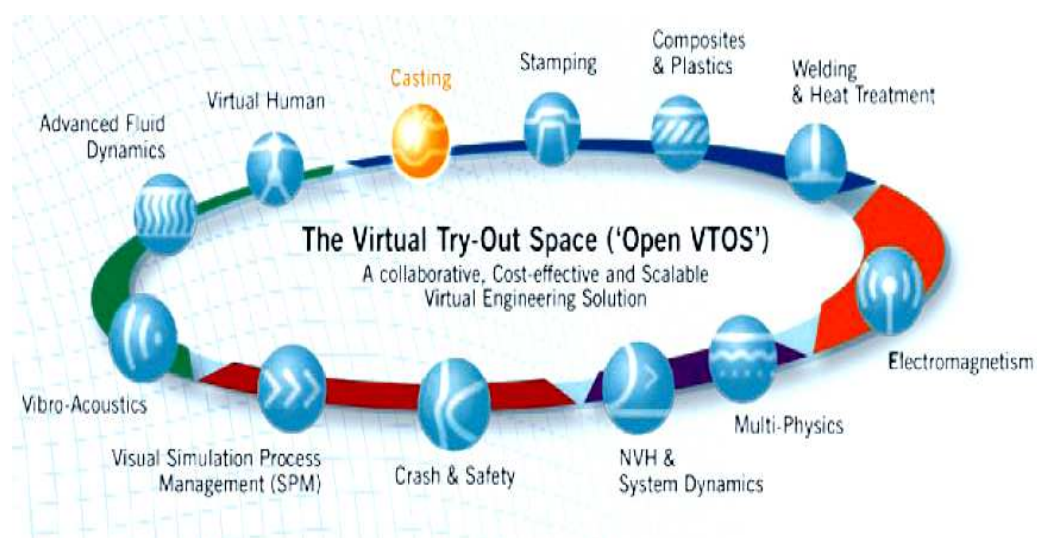
$$b_F = \sqrt{c_F \cdot \rho_F \cdot \lambda_F} \quad (1-10)$$

Stanovení  $b_F$  lze provést výpočtem dle vztahu (1-10), pomocí elektrické analogie a numerických metod, experimentálně.

## 1.5.4 Simulační software ProCAST

### 1.5.4.1 Filozofie, strukturování ProCASTu

V diplomové práci bude používán slévárenský simulační software ProCAST (verzi 2008.0) od společnosti ESI Group. Společnost patří mezi světovou špičku v oblasti virtuálního testování pro průmysl. Oblastmi působení společnosti jsou letectví, kosmonautika, doprava, stavitelství, vzdělávání, energetika, řízení, elektronika, stroje, vojenství, medicína. Takto široká oblast působení je dána filosofií společnosti, která spočívá v provedení ucelené výpočtové analýzy pomocí programových prostředků založených na bázi konečných prvků jako jednoho integrovaného celku. Výsledky z jednoho programového souboru je možné dále použít jako vstupu do následných počítačových analýz a simulovat tak skutečné děje s uvážením co možná největšího množství jevů, které ovlivňují podobu a vlastnosti finálního produktu [14].



**Obr. 1.5-1** Filozofie počítačových analýz [14]

ProCAST je profesionální modulární slévárenský software, který se užívá pro simulaci plnění formy, tepelné analýze soustavy „odlitek-forma-okolí“, napětí a deformací a k predikci struktury a vad odlitků. Jedním z cílů mé diplomové práce je vytvořit a následně validovat simulaci plnění a tuhnutí vosku do silikonové formy ve vakuu.

Modulární znamená, že řídicí program (Manager) se skládá z několika částí, kterými při tvorbě simulace postupně procházíme (**Obr. 1.5-2**). Těmito moduly jsou :

- 1) MeshCAST
- 2) PreCAST
- 3) DataCAST/ProCAST

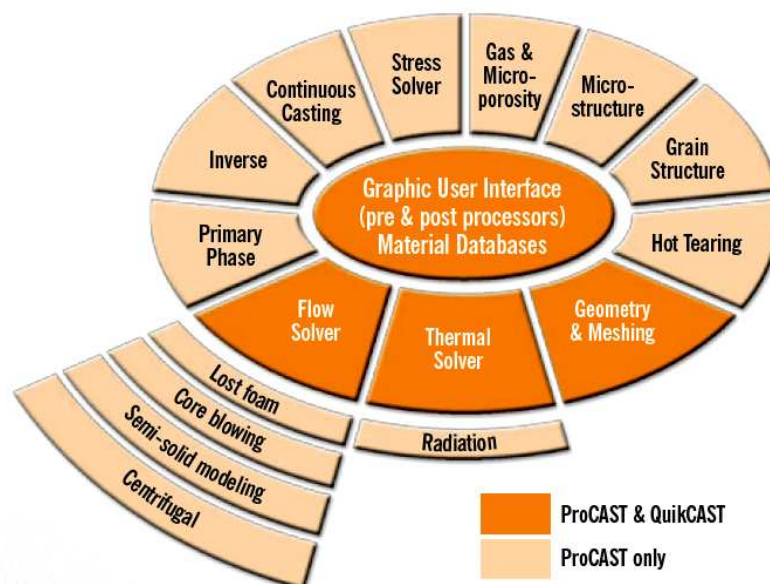
## 4) ViewCAST



**Obr. 1.5-2** Modularita v systému ProCAST 2008.0

Modularitu lze spatřovat také v rozdělení solverů (řešitelů) na :

- a) Thermal module ( tepelný modul )
- b) Radiation module ( modul záření )
- c) Fluid Flow module ( modul proudění )
- d) Stress module ( modul napětí )
- e) Microstructures ( modul mikrostruktury )



**Obr.1.5-3** Schéma modularity Simulačního software ProCAST v oblasti solverů [15]

### Postup tvorby simulace

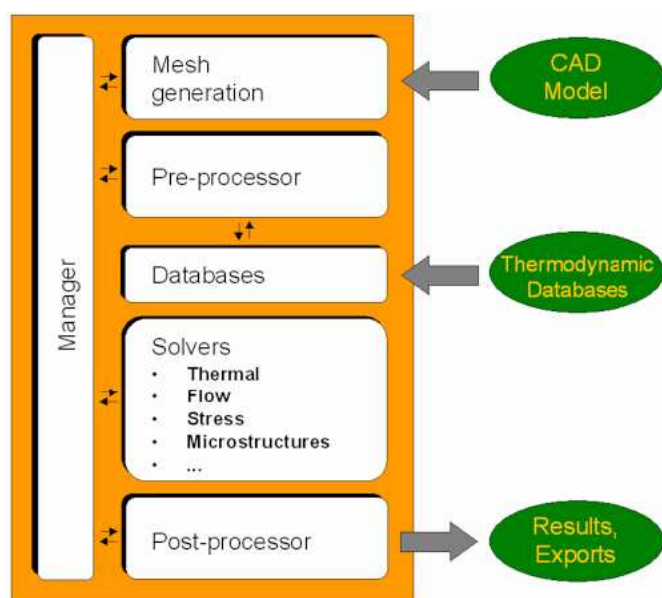
Postup tvorby simulace lze, stejně jako u postupu výroby RP modelu, rozdělit na tři části:

- 1) Preprocessing – který zahrnuje přípravu geometrického modelu, a to buď v interním, častěji však v externím CAD modeláři (Catia, UniGraphic, ProEngeneer, ...).V případě použití externího modeláře se musí zhotovený model exportovat ve vhodném datovém formátu, s kterým je schopen ProCAST dále pracovat (mezi nejpoužívanější patří formáty .iges, .stl, .step, .dff, .vda, ... ). Dále se určují a zadávají potřebné parametry, jako materiálové

konstanty, parametry dané technologické metody výroby odlitku, ... . Do Preprocessingu, v případě ProCASTu, zahrnujeme MeshCAST a PreCAST.

2) Processing (Mainprocessing) – je vlastní simulační výpočet. Provádí se v DataCASTu/ProCASTu.

3) Postprocessing – je zobrazení výsledků analýzy a export dat. V případě ProCASTu se provádí v modulu ViewCAST či VisualCAST.



**Obr. 1.5-4** Organizace softwaru ProCAST [15]

Jednotlivé kroky při tvorbě konkrétní simulace (lití voskového modelu CROWN CENTRE 019 – C 002 do silikonové formy ve vakuu) jsou detailně popsány v praktické části diplomové práce v kapitole 2.3.

### Využití ProCASTu v Investment Casting

Software standardně umožňuje simulovat několik slévárenských technologií. Vzhledem k jeho značné „robustnosti“, v možnostech uživatelského nadefinování konkrétní slévárenské technologie se ve své DP pokusím systém obohatit o simulaci lití vosku do silikonové formy ve vakuu. Pro přesné lití program již umožňuje automatické generování skořepiny kolem tvaru odlitku, zahrnutí vlivů okolí (kromě standardních parametrů lze zahrnout tepelné sálání jak mezi jednotlivými skořepinami, tak vzájemné tepelné ovlivňování odlitků na stromečku, pohyb skořepiny v žíhací peci), simulaci plnění skořepiny (zobrazení teplotního pole odlitku i skořepiny), simulaci tuhnutí, zobrazení nebezpečných míst pro vznik vad, výpočet růstu zrn (mikrostruktura odlitku).

### 1.5.4.2 Parametry pro modul THERMAL

#### A) Specifické teplo ( měrné teplo )

Je tepelná kapacita látky vztažená na jednotku hmotnosti dané látky (viz rovnice (1-13)) [37]. Tepelná kapacita je mírou schopnosti látky přijmout teplo. Je konstantou úměrnosti mezi množstvím přeneseného tepla a změnou teploty systému, která tím byla způsobena. Střední tepelná kapacita určitého systému je dána rovnicí:

$$\bar{C} = \frac{Q}{T_f - T_i} \quad (1-11)$$

$\bar{C}$  ... střední tepelná kapacita ( $J \cdot K^{-1}$ )

$Q$  ... množství tepla ( J )

$T_i$  ... počáteční teplota (  $^{\circ}C$  )

$T_f$  ... konečná teplota (  $^{\circ}C$  )

Protože hodnota střední tepelné kapacity  $C$  je ovlivněna velikostí rozdílu teplot, definujeme pro infinitesimální teplotní interval  $(T_f - T_i) \rightarrow 0$ , tzv. pravá tepelná kapacita:

$$C' = \lim_{(T_f - T_i) \rightarrow 0} \frac{Q}{T_f - T_i} = \frac{dQ}{dT} \quad (1-12)$$

$C'$  ... pravá tepelná kapacita ( $J \cdot K^{-1}$ )

Tepelná kapacita vztažená na jednotkovou hmotnost látky  $m$  je specifické ( měrné ) teplo  $c$ :

$$c = \frac{C'}{m} = \frac{1}{m} \cdot \frac{dQ}{dT} \quad (1-13)$$

$c$  ... specifické teplo ( $J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$ )

Tepelná kapacita vztažená na jednotku látkového množství  $n$ , tzv. molární tepelná kapacita (též molární teplo  $C$ ):

$$C = \frac{C'}{n} = \frac{1}{n} \cdot \frac{dQ}{dT} \quad (1-14)$$

$C$  ... molární tepelná kapacita ( $J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$ )

$n$  ... počet molů uvažované látky



Rovnice (1-11), (1-14) nestačí k určení tepelných kapacit  $c$  popř.  $C$ , neboť  $dQ$  není totální diferenciál. To znamená že teplo, které systém vyměňuje s okolím, závisí na „cestě“, po níž děj probíhá. Většina praktických dějů probíhá buď za konstantního objemu či tlaku.

Pokud uvažujeme systém skládající se pouze z jednoho molu čisté látky, který může konat jen objemovou práci, lze psát:

a) pro  $V = \text{konst.}$

- z rovnice:

$$dU = dQ - p \cdot dV \quad (1-15)$$

$dU$  ... vnitřní energie systému

$dQ$  ... změna tepla systému

$p$  ... tlak

$dV$  ... změna objemu systému

- plyne že:  $dQ_v = dU$  a podle rovnice (4), pro  $n = 1$ :

$$C_v = \frac{dQ_v}{dT} = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_v \quad (1-16)$$

$C_v$  ... molární teplo při konstantním objemu ( $J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$ )

Molární tepelná kapacita  $C_v$  je množství tepla, které musí být přivedeno za konstantního objemu jednomu molu látky, aby teplota látky vzrostla o jeden stupeň.

b) pro  $p = \text{konst.}$

- plyne z rovnice:

$$dQ_p = d(U + p \cdot V) \quad (1-17)$$

- plyne že:  $dQ_p = dH$  a podle rovnice (1-14), pro  $n = 1$ :

$$C_p = \frac{dQ_p}{dT} = \left( \frac{\partial H}{\partial T} \right)_p \quad (1-18)$$

$C_p$  ... molární teplo při konstantním objemu ( $J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$ )

$H$  ... entalpie (J)

Molární tepla za konstantního tlaku a za konstantního objemu lze vzájemně přepočítávat podle rovnice:

$$C_p - C_v = \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_T + p \right] \cdot \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \quad (1-19)$$

Veličiny  $C_p$  a  $C_v$  jsou důležitými vlastnostmi látek a určují se hlavně experimentálně – kalorimetricky. Spolu se základními stavovými veličinami ( $p$ ,  $V$ ,  $T$ ) slouží k řadě výpočtů, především určování energetických stavových veličin ( $U$ ,  $H$ ,  $F$ ,  $G$ ,  $S$ ).

### B) Tepelná vodivost

Je vlastnost materiálu definovaná jako množství tepla  $Q$ , které projde stěnou tloušťky  $X$  za čas  $t$ , ve směru kolmém k povrchu  $S$ . Tepelnou vodivost vyjadřuje součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  ( $Wm^{-1}K^{-1}$ ). Součinitel tepelné vodivosti představuje konstantu úměrnosti ve vztahu pro ustálený tepelný tok plochou.

$$\frac{Q}{t} = -\lambda \cdot S \cdot \frac{(T_1 - T_2)}{X} \quad (1-20)$$

Z rovnice tedy plyne vztah pro součinitel tepelné vodivosti:

$$\lambda = \frac{Q}{t} \cdot \frac{1}{S} \cdot \frac{X}{\Delta T} \quad (1-21)$$

### C) Hustota

Hustota je definována jako poměr elementární hmotnosti a objemu za předpokladu, že látka je v objemu rovnoměrně rozložena.

$$\rho = \frac{dm}{dV} \quad (1-22)$$

$dm$  ... elementární hmotnost látky ( $kg$ )

$dV$  ... elementární objem látky ( $m^3$ )

$\rho$  ... měrná hmotnost ( $kg \cdot m^{-3}$ )

Hustota obecně závisí na tlaku a teplotě. S rostoucí teplotou se zvětšuje objem a hustota tedy klesá a naopak s rostoucím tlakem hustota roste. Převrácená hodnota hustoty se nazývá měrný objem:

$$v = \frac{dV}{dm} \quad (1-23)$$

$v$  ... měrný objem ( $m^3 \cdot kg^{-1}$ )

**D) Entalpie**

Většina termodynamických dějů probíhá v podmínkách, kdy je tlak v soustavě konstantní (nejčastěji atmosférický). Tyto děje považujeme za izobarické ( $dp = 0$ ). Z první věty termodynamické je možno odvodit, že pro tyto děje platí, že celkové teplo, které systém uvolní nebo pohltí, je stejné bez ohledu na to, jestli uvažovaný termodynamický děj proběhne najednou nebo po etapách. Pro studium izobarických dějů se zavádí stavová funkce – entalpie  $H$ , která pak umožňuje zjednodušení popisu těchto dějů [37].

První věta termodynamiky, jež je vyjádřením zákona o zachování energie pro makroskopické izolované soustavy:

$$E = E_p + E_K + U \quad (1-24)$$

$E$  ... celková energie soustavy

$E_p$  ...potencionální energie soustavy

$E_K$  ... kinetická energie soustavy

$U$  ... vnitřní energie závislá na druhu a stavu látky

Uvažujeme že vnitřní energie je součtem veškeré energie soustavy (v termodynamických úvahách se zpravidla neuvažují vnější energie  $E_p$ ,  $E_K$  - nezávisí v jaké je soustava poloze či pohybu vůči určitému bodu):

$$E = U \quad (1-25)$$

První větu termodynamiky lze pak vyjádřit:

$$\Delta U = Q + A \quad \text{nebo} \quad dU = dQ - dA \quad (1-26)$$

$\Delta U$  ... změna vnitřní energie izolované soustavy

$Q$  ... teplo

$A$  ... práce

První věta termodynamiky tedy říká, že změna vnitřní energie uzavřeného systému je rovna energii, která překračuje hranice systému jako teplo nebo práce.

Pokud uvažujeme systém, který po dodání tepla  $dQ$  koná jen objemovou vratnou práci, lze první v. t. přepsat jako:

$$dU = dQ - p \cdot dV \quad (1-27)$$

- což lze upravit na tvar:

$$dQ_p = d(U + p \cdot V) \quad (1-28)$$

A pak lze, při konstantním tlaku, zavést stavovou funkci:

$$H = U + p \cdot V \quad \text{tedy} \quad dH = dQ_p \quad (1-29)$$

V PreCASTu lze definovat tepelné vlastnosti materiálu:

1) u kterého neprobíhá fázová přeměna pomocí parametrů :

- tepelná vodivost
- specifické teplo ( měrné teplo )
- hustota

2) u kterého probíhá fázová přeměna:

- 2a) - tepelná vodivost
- specifické teplo (měrné teplo)
  - hustota
  - průběh frakce solidu
  - latentní teplo (reakční teplo fázové přeměny)
  - teploty likvidu a solidu

2b) Místo latentního a specifického tepla lze u materiálu, který prodělává fázové přeměny použít odpovídající křivku entalpie, kdy entalpie je definována jako funkce teploty, podle rovnice:

$$H_{(T)} = \int_0^T c_{p(T)} dT + L_{(1-f_s)} \quad (1-30)$$

$c_{p(T)}$  ... specifické teplo jako funkce teploty

L ... latentní teplo

$f_s$  ... frakce solidu

Lze tedy zadefinovat tepelnou vodivost, hustotu, frakci solidu, teploty likvidu a solidu, entalpii.

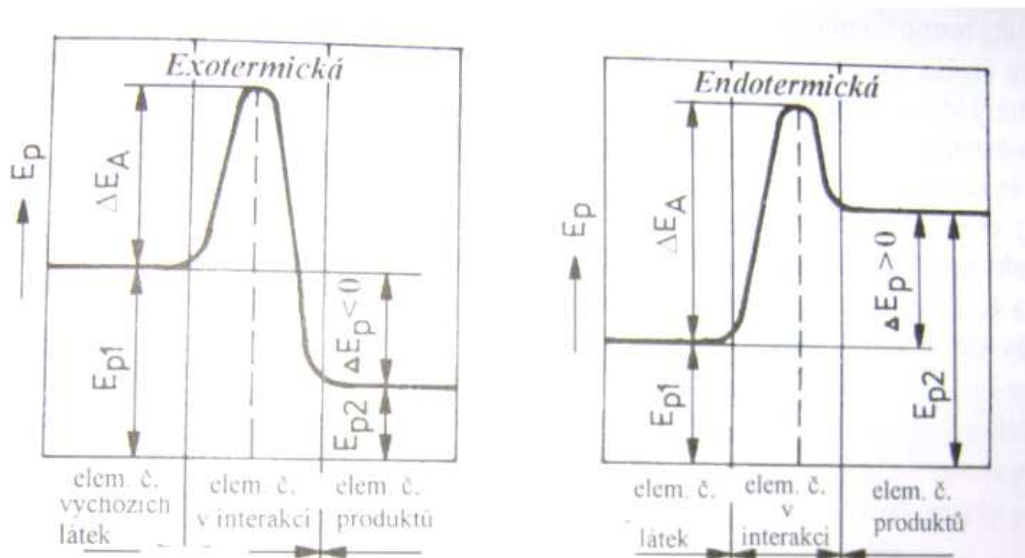
### **E) Latentní teplo**

Termodynamické děje mohou být provázeny energetickými změnami – tj. uvolňováním nebo spotřebováním reakčního tepla. Pod pojmem termodynamický děj lze chápat například fázovou přeměnu (tání, sublimace, kondenzace, tuhnutí, ...), vznik roztoků, tvorbu chemických sloučenin. Podle

typu reakce pak rozeznáváme reakční teplo fázové přeměny, teplo rozpouštěcí a teplo slučovací.

Latentní (reakční) teplo je množství tepla, které systém při reakci vymění s okolím. Probíhá-li reakce za stálého objemu pak je reakční teplo rovno příslušné změně vnitřní energie. Probíhá-li reakce za stálého tlaku a systém nekoná jinou než objemovou práci, je reakční teplo dáno změnou entalpie  $\Delta H$ .

Uvolňuje-li systém při reakci teplo, nazýváme děj exotermický ( $\Delta H < 0$ ), když systém při reakci teplo z okolí přímá, mluvíme o ději endotermickém ( $\Delta H > 0$ ). Znaménko  $+\Delta H$  bylo endotermickému ději přiřazeno na základě konvence. Dochází-li v soustavě k přeměně látek (fázová přeměna, chemická přeměna, tvorba roztoků, ...), dochází ke vzniku tzv. přechodných aktivovaných komplexů. Při jejich tvorbě se rozrušují staré vazby mezi elementárními částicemi a vzrůstá potencionální energie, při tvorbě nové struktury pak potencionální energie klesá (**Obr. 1.5-5**).



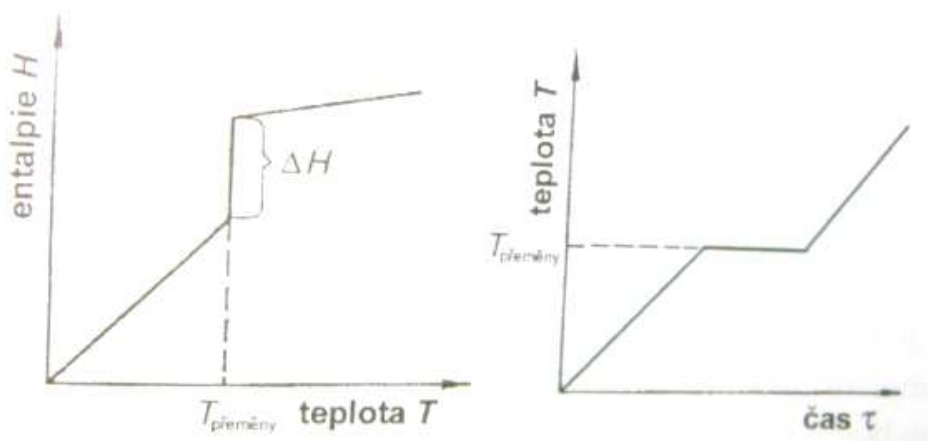
**Obr. 1.5-5** Změny potencionální energie elementárních částic v průběhu reakce [37]

V prvním případě na **Obr. 1.5-5** se při reakci v tepelně izolované soustavě výsledný pokles potencionální energie projeví vzrůstem kinetické energie a tím i teploty soustavy. Soustava, v níž probíhá exotermická reakce, se tedy zahřívá,  $\Delta H < 0$ . V druhém případě na **Obr. 1.5-5** dochází ke vzrůstu potencionální energie, tedy k poklesu kinetické energie a teploty,  $\Delta H > 0$ .

Problematikou reakčních tepel se zabývá termochemie. Vychází především z prvního zákona termodynamiky (rovnice (1-26)), a z prvního a druhého zákona termochemiky.

### Reakční teplo fázové přeměny

Je teplo potřebné k uskutečnění izobarické fázové přeměny daného množství látky.



**Obr.1.5-6** Závislost entalpie na teplotě a teploty na čase při fázové přeměně čisté látky [37]

Přivádíme-li čisté látce energii ve formě tepla, roste její teplota, dokud není dosaženo teploty fázové přeměny. Od tohoto okamžiku se teplo spotřebovává na uskutečnění fázové přeměny a teplota soustavy se nemění, ale vzrůstá entalpie soustavy.

### 1.5.4.3 Parametry pro modul FLUID

#### A) Viskozita

##### Reologie voskových směsí

Reologie je obor mechaniky zabývající se deformací a tokem látek (ve všech skupenstvích) vlivem vnějších mechanických sil, které na něj působí (z řeckého rheos – tok a logos – věda). Zabývá se obecnými mechanickými vlastnostmi látek, vztahy mezi napětím, deformacemi a rychlostí deformace a z toho u kapalin vyplývajícími dalšími hydrodynamickými vztahy.

Zjednodušeně lze říci, že mechanika materiálů vychází ze dvou elementárních zákonů. Na jedné straně je to Newtonův zákon viskózního toku pro tzv. newtonovské kapaliny (viskózní nestlačitelné materiály) na straně druhé pak Hookův zákon (hookovské materiály – izotropně pružné). Reologie se pak zajímá i o materiály, které nejsou ani zcela hookovské ani newtonovské, o materiály viskoelastické.

#### 1) Hookův zákon

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1-31)$$

$\sigma$  ... mechanické zatížení ( MPa )

$E$  ... Yangův modul pružnosti ( MPa )

$\varepsilon$  ... pružná deformace ( mm )

Grafem je přímka, jejíž směrnice je Yangův modul pružnosti  $E$  ( $E = tg\alpha$ ). Hookovský materiál se vlivem zatížení okamžitě deformuje a po odlehčení se vrátí do původního stavu.

## 2) Newtonův zákon viskózního toku - viskozita

Viskozita patří mezi základní reologické vlastnosti látek (viskozita, plasticita, elasticita), vyjadřuje vnitřní odpor tekutiny proti smykové deformaci. Přesněji, viskozita je fyzikální veličina udávající poměr mezi tečným napětím a změnou rychlosti při proudění kapaliny. Charakterizuje tedy vnitřní tření v proudící kapalině. U prostých kapalin (newtonovské) je materiálovou konstantou, obecně je však materiálovou funkcí. Dynamická viskozita se dle SI značí symbolem  $\eta$  a základní jednotkou je  $Pa \cdot s$ . Kapaliny s lineární závislostí smykového napětí  $\tau$  na gradientu rychlosti deformace  $\dot{\gamma}$  jsou popsány Newtonovým zákonem viskózního toku:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (1-32)$$

$\tau$  ... tečné napětí ( $N \cdot m^{-2} = Pa$ )

$\eta$  ... dynamická viskozita (též vazkost, součinitel vnitřního tření, newtonovská viskozita, smyková viskozita, ... ,  $Pa \cdot s = N \cdot s \cdot m^{-2} = kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} = 10 \cdot g \cdot cm^{-1} \cdot s^{-1} = 10 \cdot P$ )

$\frac{dv}{dy} = \dot{\gamma}$  ... gradient rychlosti deformace ( rychlost smyku,  $s^{-1}$  )

Grafem je stejně jako v případě Hookova zákona přímka, směrnicí je tentokrát viskozita  $\eta$  ( $\eta = tg\alpha$ ). U newtonovských kapalin je viskozita v každém časovém okamžiku nezávislá na napěťovém a deformačním stavu kapaliny. U většiny systémů však není viskozita konstantou, ale je závislá na hodnotě rychlostního gradientu. Poměr tečného napětí a rychlostního gradientu je pak označován jako zdánlivá viskozita, a tyto tekutiny pak nazýváme nenewtonské. Patří mezi ně i voskové směsi.

### Nenewtonské tekutiny

Studiem proudění reologicky komplexních kapalin v reálných situacích, zahrnující vliv setrvačnosti (mezní vrstvy) a nestabilit (vlnové toky, turbulence,...) se zabývá podobor reologie – reodynamika. Jejím hlavním cílem je konfrontace matematické předpovědi s výsledkem experimentu.

Pro představu o neneutonské kapalině lze uvést názorný příklad – jogurt. Je-li jogurt vyndán z ledničky, a otočen, tak v případě kvalitního jogurtu zůstane obsah kelímku na svém místě. Když je však jogurt nejprve řádně promíchán, nebo je delší dobu nechán v kuchyni na stole, tak po otočení kelímku obsah vyteče. Viskozita neboli tekutost je tedy v případě jogurtu (neneutonských kapalin) závislá na rychlosti míchání (rychlosti namáhání tekutiny), na čase, teplotě a dalších podmínkách (historie předchozí deformace,...).

Jako neneutonské kapaliny lze obecně označit všechny systémy, které vykazují tzv. neneutonské efekty, tedy fenomény a vlastnosti, které nejsou pozorovatelné v kapalinách, jejichž viskozita je zcela nezávislá na stavu napjatosti a deformaci kapaliny [30].

Neneutonské kapaliny lze dělit podle více kritérií, dělení lze provést např. (některé skupiny se mohou vzájemně překrývat):

A) Časově nezávislé (obecně viskózní) nen. kapaliny – rychlost smyku je v každém časovém okamžiku jednoznačnou funkcí pouze smykového napětí. Obecně jsou popsány reologickou funkcí:

$$\dot{\gamma} = f(\tau) \quad (1-33)$$

A patří sem:

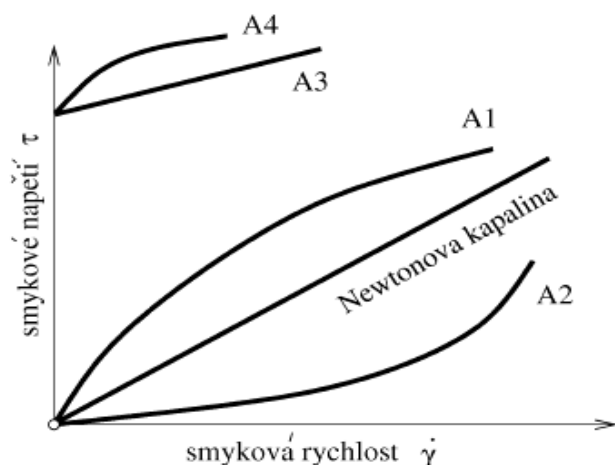
A1) Binghamova plastická kapalina (většinou směsi jako např.: olejové barvy, zubní pasta, bláto, ... )

A2) pseudoplastická kapalina (strukturně viskózní, „smykově řidnoucí,, , většinou makromolekulární látky, např.: některé suspenze, polymery, vosky )

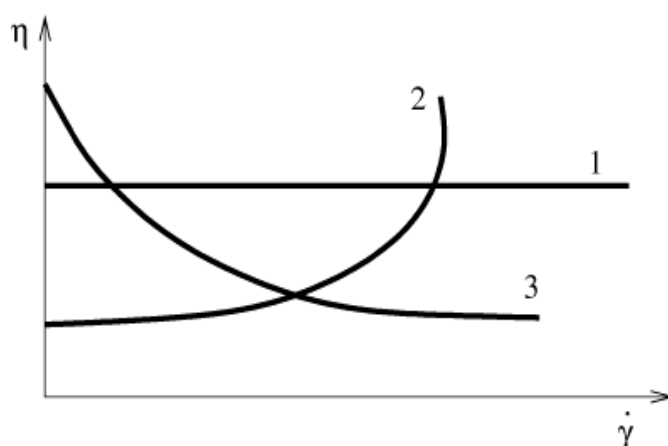
A3) dilatantní kapalina („smykově houstnoucí,, , jsou to směsi pevných látek a newtonské kapaliny, např.: hrubé disperzní roztoky – písek a voda)

A4) Cassonova plastická kapalina ( např. sinovální kapaliny, krev )





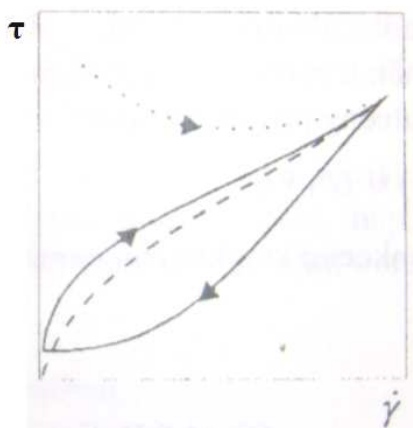
**Obr. 1.5-7** Tokové křivky (reogramy) pro obecně viskózních newew. kapalin A1 – pseudoplastická, A2 – dilatantní, A3 – Binghamova, A4 – Cassonova



**Obr. 1.5-8** Viskózní křivky pro kapaliny : 1) newtonovská , 2) dilatantní newew., 3) pseudoplastická newew.

B) Časově závislé newew. kapaliny – jsou komplexní systémy u kterých je časová závislost mezi smykovým napětím a rychlostí smyku a tento vztah je funkcí historie předchozí deformace kapaliny. Sem patří většina reálných kapalin a nelze je jednoduše popsat reologickou rovnicí (viz rov. (1-33)). Zdánlivá viskozita totiž není pouze funkcí rychlosti smyku, ale závisí také na délce času, po který byla kapalina vystavena působení smykového namáhání. Dělí se na :

B1) tixotropní kapaliny – jsou charakteristické pozvolným poklesem viskozity v čase při rostoucím mechanickém namáhání (při rostoucím smykovém napětí) s následným obnovením struktury po odlehčení (poklesu smykového napětí), (např. některé barvy).



**Obr.1.5-9** Schéma tixotropního chování tekutiny jako reakce na změnu smykové rychlosti [33]

B2) reopektické kapaliny (antitixotropní) - při vzrůstu smykových napětí viskozita proudící kapaliny s časem roste (suspenze bentonitu).

Tixotropní časově závislé chování mohou vykazovat i některé pseudoplastické kapaliny.

C) Viskoelastické kapaliny – jsou komplexní systémy, které vykazují jak elastické vlastnosti poddajných těles, tak viskózní vlastnosti kapalin. Po provedené deformaci a následném odlehčení se částečně zpětně přetvoří, tj. v rámci své elastické deformace se přiblíží ke stavu před deformací. Také je nelze popsat jednoduchou reologickou rovnicí (viz rov. (1-33)).

D) Viskoplastické kapaliny - jsou komplexní systémy, které vykazují jak plastické vlastnosti tak viskózní vlastnosti kapalin. Po provedené deformaci a následném odlehčení se zpětně nepřetvoří. Toto chování vykazují např. emulze s vysokým obsahem koloidní suspenze (některé barvy, laky, ... ) [33].

Pro porozumění nenev. kapalinám se využívá reologických modelů, především však počítačové simulace a analýzy.

#### Proudění voskových směsí

Pro popis proudění nenevtonských kapalin existuje celá řada modelů, (Bingham, Casson, Cross, Ellis, Sisk, ... ). Empirické modely nám umožňují:

- statisticky zpracovat primární data
- udávají informace o průběhu viskozitní funkce v kondenzovaném stavu prostřednictvím malého počtu parametrů
- umožňují korelovat průběh viskozitních funkcí v závislosti na teplotě a složení kapalin

- při vhodné volbě může jejich použití zvýšit spolehlivost extrapolace dat mimo proměřený rozsah

- umožňují provádět funkcionální operace s viskozitní funkcí (derivace, integrace, ... ), které jsou nezbytné při zpracovávání dat z reálných viskozimetrických konfigurací.

Mezi nejčastěji používané matematické modely pro látky o nízké molekulární hmotnosti s malou pružností, které vykazují limitní newtonovské chování v oblastech extrémně vysokých a extrémně nízkých smykových napětí, patří model Carreau-Yasuda [21]. Jeho předchůdcem byl tříparametrový model Carreau (odvozen v roce 1972). Třemi parametry v modelu jsou viskozita při nulové deformační rychlosti ( $\eta_0$ ), mocninný koeficient ( $n$ ) a charakteristický čas ( $t_1 = \lambda$ , někdy též nazýván fázový posuv) [44].

$$\eta = \frac{\eta_0}{\left[1 + (\lambda \cdot \dot{\gamma})^2\right]^{\frac{(1-n)}{2}}} \quad (1-34)$$

Dalším krokem ve vývoji vhodného matematického popisu viskózní křivky byl čtyřparametrový model Carreau, odvozený v roce 1979 (navíc parametr  $\eta_\infty$  - viskozita při nekonečné deformační rychlosti):

$$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = \frac{1}{\left[1 + (\lambda \cdot \dot{\gamma})^2\right]^{\frac{(1-n)}{2}}} \quad (1-35)$$

Pětparametrový model Carreau-Yasuda byl odvozen v roce 1979 a umožňuje proložit (fitovat) experimentálně naměřená data tvarově náročnou křivkou.

$$\eta = \eta_\infty + (\eta_0 - \eta_\infty) \cdot \left[1 + (\lambda \cdot \dot{\gamma})^a\right]^{\frac{n-1}{a}} \quad (1-36)$$

Pátým parametrem je tzv. Yasudův koeficient  $a$ , který zlepšuje popis přechodové oblasti mezi reálnou a nulovou smykovou rychlostí. Tento model umožňuje vysoce přesný odhad viskozity při nulové deformační rychlosti. Pokud je zadáno  $a=2$  dostaneme čtyřparametrový Carreův model (viz rov. (1-35)).

$\eta$  ... zdánlivá viskozita ( Pa.s )

$\eta_\infty$  ... viskozita při nekonečné deformační rychlosti (asymptotická horní, limitní horní vis.), ( Pa.s )

$\eta_0$  ... viskozita při nulové deformační rychlosti (limitní dolní, počáteční vis. při nulovém zatížení), ( Pa.s )

$\lambda$  ... fázový posuv (opačná hodnota deformační rychlosti pro kterou se viskozita začíná měnit z  $\eta_0$  na  $\eta_\infty$  s rostoucí deformační rychlostí), ( s )

$\dot{\gamma}$  ... gradient rychlosti deformace (  $s^{-1}$  )

a ... Yasuda koeficient ( , - )

n ... mocninný koeficient ( vyjadřuje citlivost viskozity k deformační rychlosti během přechodu z  $\eta_0$  na  $\eta_\infty$  ), ( - )

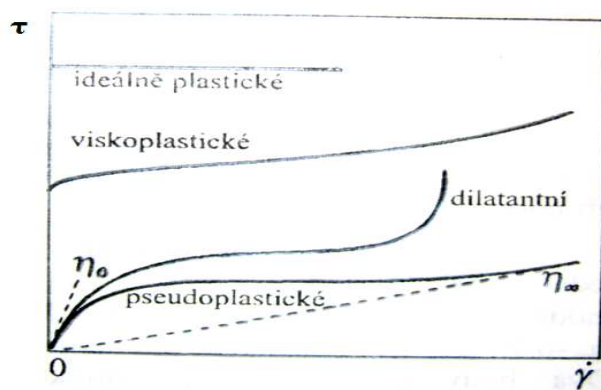
Koeficient n

Nejběžnějším typem nenewtonských kapalin jsou kapaliny pseudoplastické, tedy kapaliny, u nichž viskozita klesá s rostoucím napětím ( resp. smykovou rychlostí ). Tuto vlastnost lze např. odůvodnit změnou uspořádání částic ve směsi. Lokálně je možné míru pseudoplasticity charakterizovat indexem toku m:

$$m = \frac{d \ln \tau}{d \ln \dot{\gamma}} \quad ( 1-37 )$$

U pseudoplastických kapalin je  $0 \leq m \leq 1$  a mez  $m=1$  odpovídá chování newtonovskému ( tj. konstantní viskozitě kapaliny ), mez  $m=0$  odpovídá chování ideálně plastickému. Mezní případ ideálně plastického chování (  $m=0$  ), charakterizuje situaci , kdy při podkritickém napětí (  $\tau < \tau_y$  ), materiál za ustálených podmínek neteče, zatímco při kritických podmínkách (  $\tau = \tau_y$  ), může téci libovolnou smykovou rychlostí [33]. Koeficient n je pak:

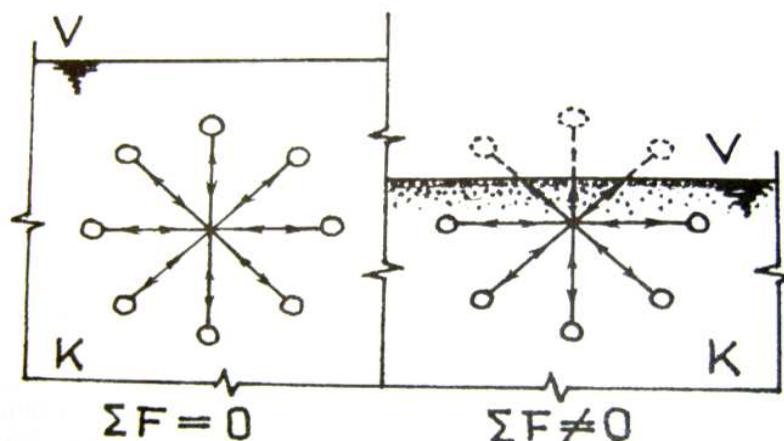
$$n = 1 - m \quad ( 1-38 )$$



**Obr.1.5-10** Některé typy nenewtonovského tokového chování [33]

**B) Povrchové napětí**

Povrchové napětí vzniká v tenké vrstvě na rozhraní látek, kdy molekuly v těsné blízkosti rozhraní nejsou rovnoměrně (na všechny strany stejně) ovlivňovány mezimolekulárními silami (**Obr.1.5-11**).



**Obr.1.5-11** Na levém obrázku je znázorněno rovnoměrné působení přitažlivých molekulárních sil na částici daleko od rozhraní, na pravém obrázku pak nerovnoměrné silové působení na částici blízko rozhraní [39]

Povrchové napětí lze definovat jako:

a) energii vrstvy molekul kapaliny na rozhraní s jinou látkou vztaženou na jednotku plochy rozhraní.

$$\gamma = \frac{E}{S} \quad (1-39)$$

$\gamma$  ... povrchové napětí ( $J \cdot m^{-2} = N \cdot m^{-1}$ )

$E$  ... energie vrstvy molekul ( $J$ )

$S$  ... plocha rozhraní ( $m^{-1}$ )

b) poměr elementárních složek přitažlivých mezimolekulárních tečných sil a délky rozhraní.

$$\sigma = \frac{dF}{dl} \quad (1-40)$$

$\sigma$  ... povrchové napětí ( $N \cdot m^{-1}$ )

$dF$  ... tečné mezimolekulární sily ( $N$ )

$dl$  ... délka rozhraní ( $m$ )

### 1.5.4.4 Možnosti měření parametrů pro moduly

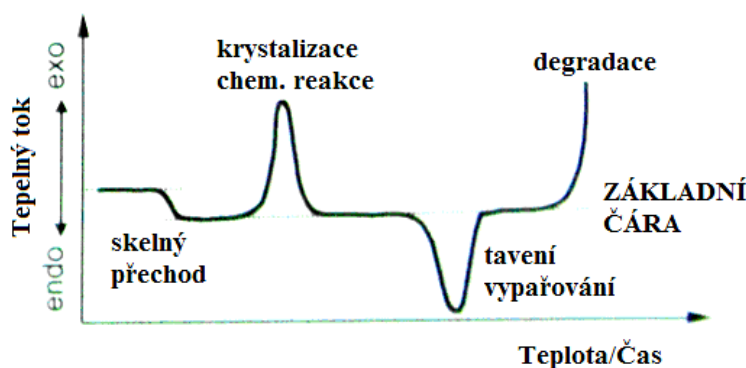
#### A) Možnosti měření parametrů pro modul THERMAL

#### Diferenční skenovací kalorimetrie (Diferencial Scanning calorimetry–DSC)

Kalorimetrie je technika pro určování velikosti tepla absorbovaného nebo uvolněného z měřené látky, která prodělá fyzikální nebo chemickou změnu. Tyto pochody mění vnitřní energii materiálu. Za konstantního tlaku, je vnitřní energie nazývána entalpie  $H$ . Pro praktické aplikace se zajímáme nejvíce o změny entalpie mezi dvěma stavy:

$$\Delta H = \int c_p \cdot dT \quad (1-41)$$

Ke zvyšování entalpie dochází při ohřevu, vypařování, skelném přechodu. Tyto pochody jsou nazývány endotermické. Exotermickými pochody jsou krystalizace, vytvrzování, rozklad.



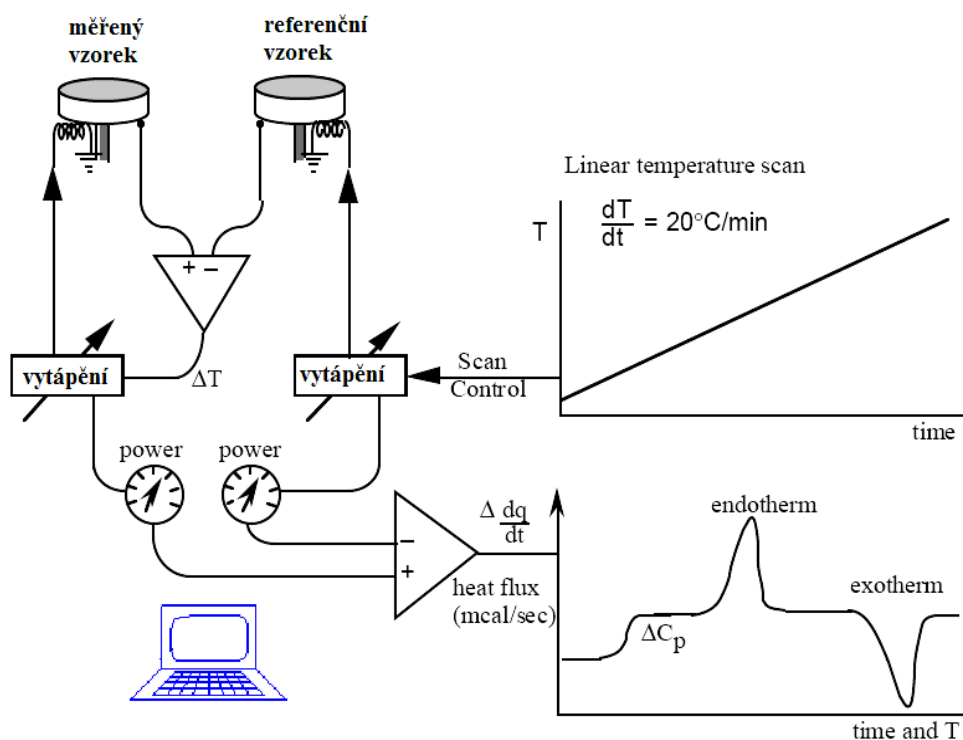
**Obr.1.5-12** Schematický diagram DSC křivky znázorňující možné přechody [47]

Změna entalpie je měřena pomocí kalorimetru jako změna tepelného toku  $Q^{\circ}$  od základní čáry. Základní čára je lineární oblast DSC křivky reprezentující podmínky, za kterých se nevyskytuje žádná reakce nebo přechod. Na základní čáře se předpokládá nulová hodnota tepelného toku.

Specifická tepelná kapacita  $c_p$  je hodnota energie potřebná k nárůstu teploty o  $1^{\circ}\text{C}$  v  $1\text{ g}$  materiálu za konstantního tlaku. Protože k přímému měření  $c_p$  je třeba komplikovaného vybavení, v DSC zjišťujeme místo  $c_p$  tepelný tok, což je množství tepla předaného hmotě  $m$  za čas  $t$ . Tepelný tok  $Q^{\circ}$  je přímo úměrný specifické tepelné kapacitě. Poměrným faktorem je rychlost ohřevu  $v$ .

$$\frac{Q^{\circ}}{m} = v \cdot c_p \quad (1-42)$$

Tepelný tok  $Q^{\circ}$  je měřen jako funkce teploty a/nebo času.

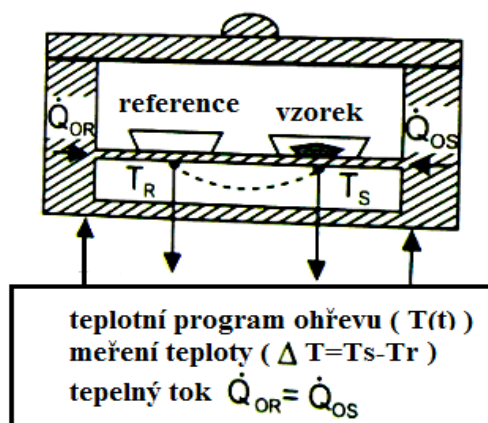
Princip měření pomocí DSC

Obr.1.5-13 Princip diferenčního skenovacího kalorimetru [47]

Podle ISO a DIN existují dva základní DSC metody pro měření tepelných přechodů ve vzorku a v referenčním materiálu:

- a) Heat-flux DCS
- b) Power-compensation

ad a) Heat-flux DSC



Obr.1.5-14 Schéma kalorimetru heat-flux DSC [47]

$T_R$  ... teplota referenčního materiálu

$T_S$  ... teplota měřeného vzorku

$Q^{\bullet}_{OR}$  ... tepelný tok z topení do referenční misky

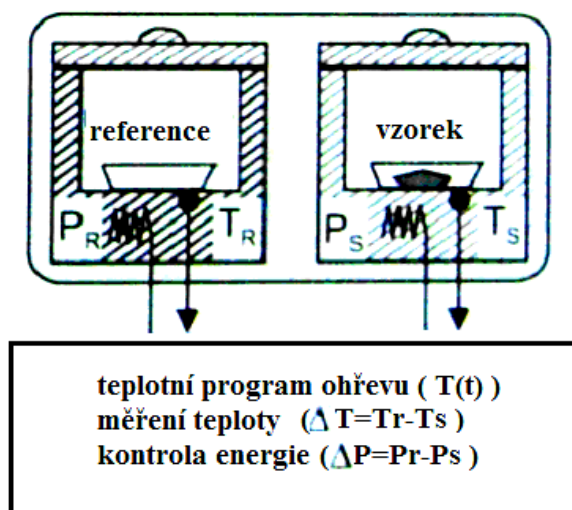
$Q^{\bullet}_{OS}$  ... tepelný tok z topení do misky s vyhodnocovaným vzorkem

V heat-flux DSC testovaná komůrka obsahuje vyhřívání, při kterém jsou zahřívány oba materiály (testovací i porovnávací) současně. Teplota je průběžně měřena a ovládána nastaveným programem. Tepelné toky  $Q^{\bullet}_{OR}$  a  $Q^{\bullet}_{OS}$  jsou do obou vzorků konstantní, ale rozdílné jsou teploty obou vzorků.

Hlavní výhodou této metody je její „robustnost“, snadné ovládání, přímé měření. Tepelná křivka má stabilní základní čáru, což dovoluje jasně stanovit skelný přechod.

#### Ad b) Power-compensation DSC

Kalorimetr power-compensation DCS má dvě testovací komory, dvě oddělené testovací komůrky, které jsou kontrolovány nezávisle definovaným programem. Když probíhá exotermická nebo endotermická reakce ve vzorku, vzniká teplotní rozdíl  $\Delta T$  mezi oběma vzorky, a k vyrovnání teplot je použita energie (power). Systém se snaží po celou dobu měření udržet nulový rozdíl teplot mezi oběma vzorky pomocí změn přiváděné energie  $\Delta P$ . Změna v přiváděné energii představuje změnu v tepelných tocích  $\Delta Q^{\bullet}$ .



**Obr.1.5-15** Schéma kalorimetru power-compensation DSC [47]



$T_R$  ... teplota referenčního materiálu

$T_S$  ... teplota měřeného vzorku

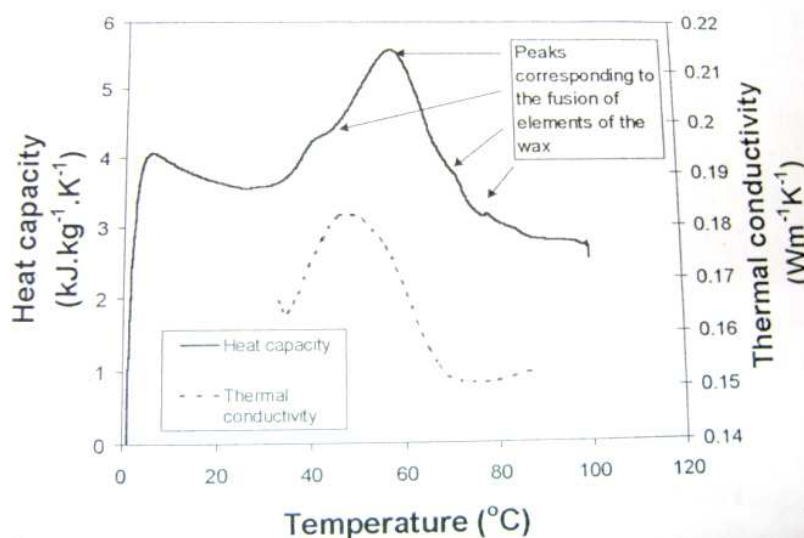
$P_R$  ... tepelná energie do referenčního vzorku

$P_S$  ... tepelná energie do měřeného vzorku

Power-compensation DSC umožňuje rychlé měření, elektrická kompenzace je velice rychlá, teplotní rozdíly mezi vzorky jsou velmi malé.

Dále existují různé variace těchto dvou základních metod.

Tepelná kapacita plněného vosku byla změřena pomocí DSC v práci [26] (viz **Graf.1.5-1**). Z grafu plyne, že vosk je tekutý při teplotě 80°C a tuhý při 40°C. Průběh křivky tepelné vodivosti není autorovi zcela jasný. Roztavením jedné z komponent voskové směsi dojde ke zvýšení tepelné vodivosti, zatímco roztavením jiné složky dochází k poklesu tepelné vodivosti.



**Graf.1.5-1** Známořuje průběh křivek tepelné kapacity a tepelné vodivosti v závislosti na teplotě [26]

### **Termomechanická analýza ( Termomechanical Analysis – TMA )**

Se primárně používá k určování koeficientu lineární roztažnosti. Ale s jejím využitím se stanovují také teploty skelných přechodů, tavení, měknutí, krystalizace, tečení po zatížení ( creep ), hustota, ... .

Koeficient lineární expanse může být zaznamenáván jako střední hodnota  $\bar{\alpha}(\Delta T)$  nebo jako diferenciál  $\alpha(T)$ .

Střední hodnotu koeficientu lineární expanse  $\bar{\alpha}(\Delta T)$  (jednotky  $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}$ ) lze získat ze vztahu:

$$\bar{\alpha}(\Delta T) = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{l_2 - l_1}{T_2 - T_1} = \frac{l}{l_0} \cdot \frac{\Delta l_{th}}{\Delta T} \quad (1-43)$$

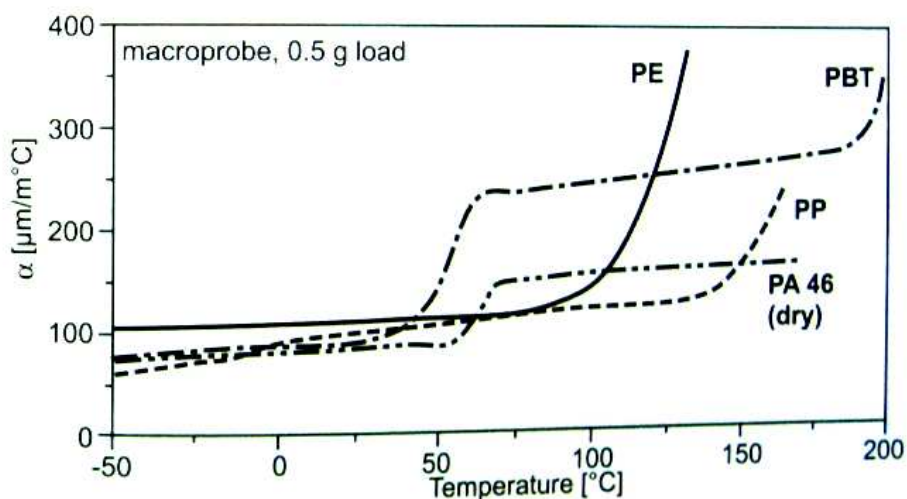
$\bar{\alpha}(\Delta T)$  je experimentální hodnota závisící na intervalu teplot, při kterých byla změřena. Není tedy vhodná jako obecná charakteristika, ale jako hodnota k specifickým aplikacím.

Teplotně závislá změna délky je postupná změna délky vyjádřená z poměru počáteční délky ku referenční délce. Jde o relativní měření lineární expanse, která má na počátku hodnotu 0 při referenční teplotě  $T_0$ .

Diferenciální koeficient lineární roztažnosti  $\alpha(T)$  (jednotky  $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}$ ) je vyjádřen vztahem:

$$\alpha(T) = \frac{l}{l_0} \cdot \frac{dl_{th}}{dT} \quad (1-44)$$

Nárůst koeficientu lineární expanse v oblasti skelného přechodu ukazuje, že nejde o konstantní hodnotu. Z těchto důvodů doporučeno vyhodnocovat na velkém teplotním intervalu.

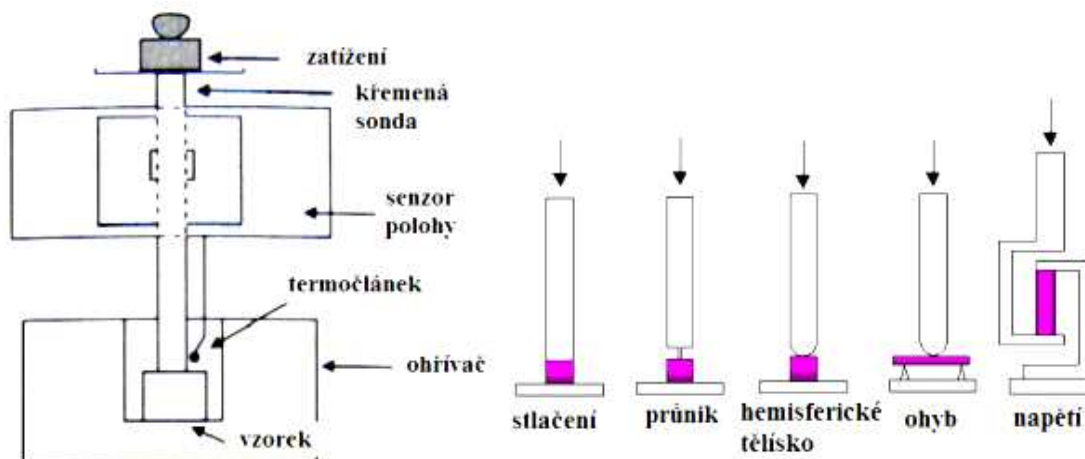


**Graf 1.5-2** Koeficient lineární tepelné roztažnosti pro PE, PP, PBT a PA 46 [47]

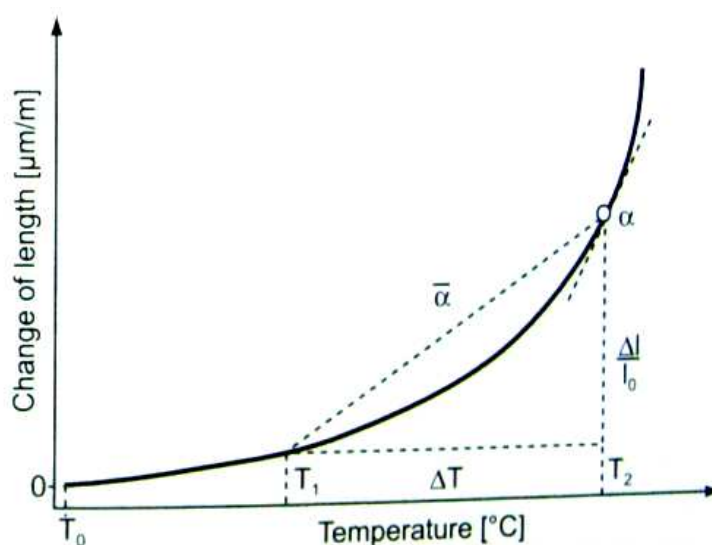
### Princip měření TMA

Válcový nebo kvádrový vzorek průměru 2 – 6 mm a délky 2 – 10 mm je vystaven malému zatížení (0,1 – 5 g) přes vertikálně nastavitelnou sondu. Sonda je integrována do indukčního polohového senzoru. Systém je pomalu

ohříván. Roztahování nebo smršťování vzorku je zaznamenáváno sondou. Termočlánek blízko vzorku měří teplotu.



**Obr.1.5-16** Schématický náčrt TMA aparatury, testovací sondy mohou mít různé geometrie podle cíle měření.



**Graf 1.5-3** Průběh středního koeficientu lineární tepelné roztažnosti  $\bar{\alpha}(\Delta T)$  a diferenciálního koeficientu  $\alpha(T)$

$\bar{\alpha}(\Delta T)$  ... diferenciální koeficient lineární roztažnosti - tangenta v teplotě  $T_2$

$\alpha(T)$  ... střední koeficient lineární roztažnosti – sklon spojnice teplotního intervalu  $\Delta T$

$\frac{\Delta l}{l_0}$  ... změna délky - změna délky na teplotním intervalu

$\Delta T$  ... změna teploty

## B) Možnosti měření parametrů pro modul FLUID

### *Viskozimetrie newtonských kapalin*

Viskozitu kapalin určujeme pomocí viskozimetrů. Viskozimetrii newtonských kapalin je možno rozdělit na :

a) Stanovení viskozitní funkce ( $\eta = \tau / \dot{\gamma}$ ) v oblasti platnosti Newtonova viskózního zákona s konstantním koeficientem  $\eta$ .

Cílem měření je experimentálně stanovit smykové rychlosti a smyková napětí. Z nich pak určit viskozitu, kterou lze přiřadit určitému intervalu měřených proměnných ( $\tau, \dot{\gamma}$ ). Tento přístup je vhodný i v případě měření limitní viskozity  $\eta_0$  u pseudoplastických kapalin. Použitý přístroj by měl být kalibrován v obouh proměnných, což ale u některých typů viskozimetrů bývá obtížně splnitelný požadavek [33].

b) Stanovení materiálové konstanty  $\eta$ , která je parametrem Navier-Stokesovy teorie.

$$\rho \left( \frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - g_i \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \eta \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j^2} \quad ( 1-45 )$$

Využívá se skutečnosti, že při nízkých Reynoldsových číslech (tzv. plouživé proudění) je poměr mezi hnací silou toku a rychlostí toku úměrný viskozitě. Koeficient úměrnosti je závislý na geometrických parametrech viskozimetru a lze jej stanovit kalibračním měřením se vzorkem o známé viskozitě. Jako viskozitní standarty jsou obvykle používány úzké destilační frakce alifatických olejů [33].

### *Viskozimetrie Nenevtonských kapalin*

Pro stanovení viskozity nenevtonských kapalin se používají speciální viskozimetry, které musí umožňovat:

- realizovat kinematické podmínky smykového toku
- stanovit smykovou rychlost a smykové napětí z primárních dat experimentu a kalibračních charakteristik přístroje

Existuje celá řada viskozimetrů, jež se snaží realizovat tok kapaliny (tzv. viskozimetrický tok), při kterém je napěťová odezva nenevtonské kapaliny stejná jako při prostém smykovém toku (využívá se analogie prostého smykového toku kapaliny se smykovou napjatostí pevných izotropních materiálů – více [33]). Existuje několik skupin prakticky realizovatelných viskozimetrických toků :

- rektilineární toky – materiálové body se pohybují po rovnoběžných přímkách s rychlostí

- cirkulární toky – materiálové body se pohybují po kružnici kolem společné osy

- helikální toky – materiálové body se pohybují šroubovici

Kvantitativní studium proudění ve viskometrických přístrojích vyžaduje složité matematické metody a hlubší znalost reologických vlastností kapalin při konkrétním typu proudění. Jejich objasnění není předmětem této práce.

Žádný viskozimetrický tok nelze prakticky realizovat zcela přesně. Při měření pomocí viskozimetrů bude vždy docházet k určitým nepřesnostem daným konkrétní stavbou přístroje. V kapilárním viskozimetru musí proudění v kapiláře někde začínat a někde končit, u rotačního viskozimetru musí mít válec konečné rozměry ... , což ovlivňuje způsob proudění a přesnost určování viskozity kapaliny [33].

### **Viskozimetry**

Základní rozdělení lze provést na viskozimetry :

a) kapilární ( výtokové ) – tok kapaliny tenkou trubičkou, otvorem

- viskozita se určuje z rozdílu tlaků, doby průtoku určitého objemu za určitý čas definovanou kapilárou

- např. Englerův, Ostwaldův, Kohlův, Ubbelohdeův

b) rotační, torzní - těleso rotuje v kapalině

- viskozita určí měřením síly, kroutícího momentu přenášené kapalinou z jedné plochy tělesa viskozimetru na druhou

- např. Couett, Searle

c) pádové tělískové – pád tělesa (kuličky) v kapalině

- viskozita se určuje z doby pádu definovaného tělíska v kapalině na základě Stokesova zákona

- např. Stokesův, Höpplerův

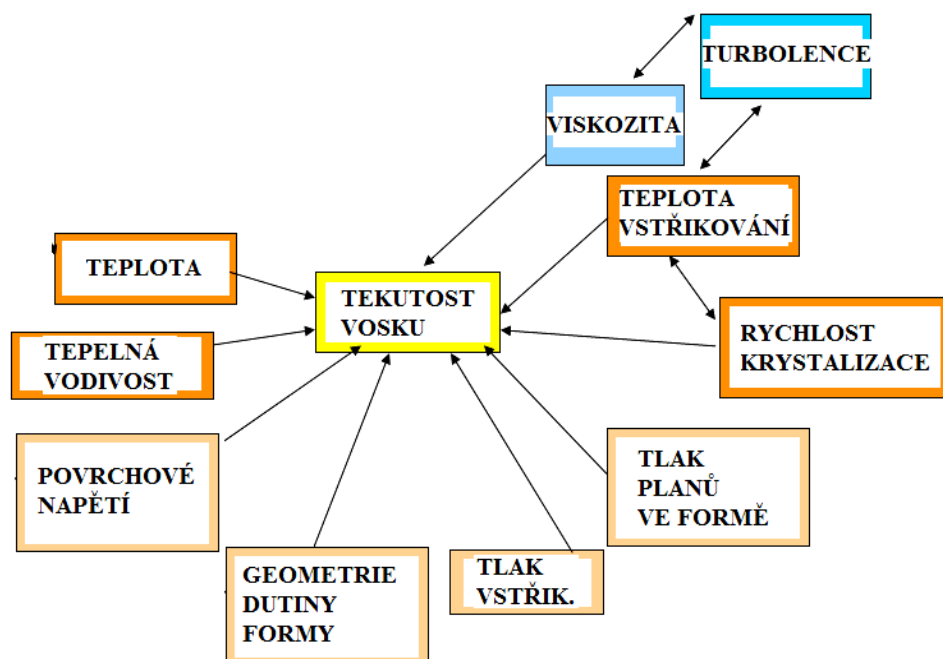
d) speciální

- viskozita se určuje z doby, za kterou se zaboří definované těleso do tekutiny

- např. gelometry, Farino



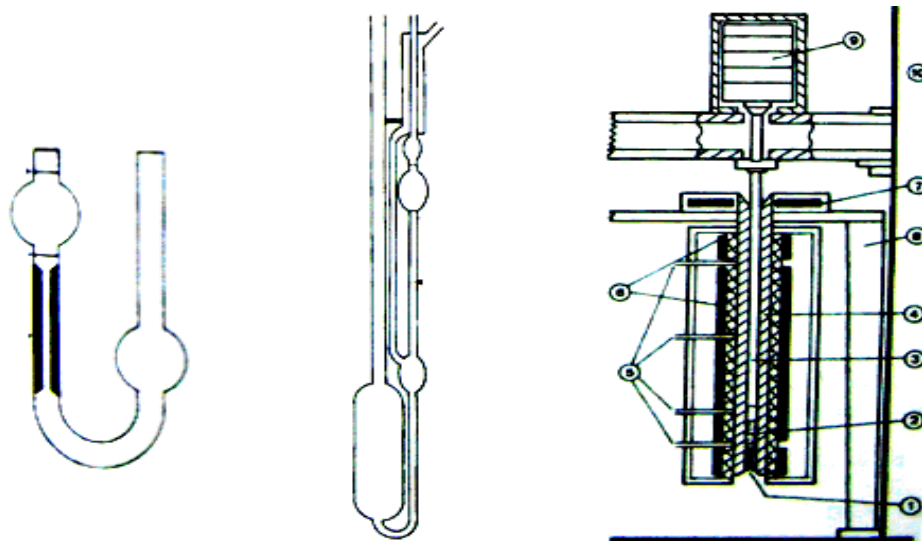
**Obr.1.5-17** Kuličkový pádový, rotační a tlakový kapilárový viskozimetr [36]



**Obr.1.5-18** Faktory ovlivňující tečení voskové směsi formou [42]

#### Ad a) Kapilární viskozimetry

Jsou nejjednoduššími a i dnes často používanými viskozimetry. První byly skleněné trubice různých tvarů a viskozita Newtonských kapalin se měřila pomocí vztahu mezi změnou tlaku a rychlostí toku (**Obr.1.5-19**).



**Obr.1.5-19** Ostwaldův, Ubbelohdeův viskozimetr a hydraulicky ovládaný kapilární viskozimetr [44]

Dnes se používají kapilární viskozimetry s hydraulicky ovládaným pístem pro změnu tlaku (třetí na **Obr.1.5-19**).

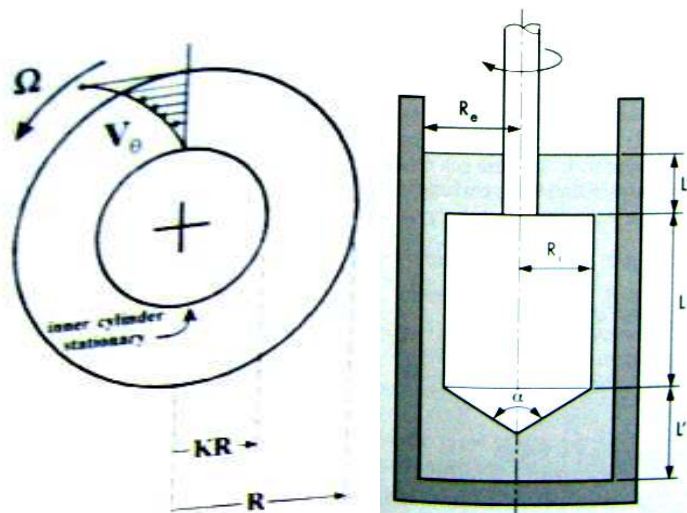
1- kovová forma – kapilára, 2- polymerní materiál, 3- píst, 4- pouzdro, 5- termočlánek, 6- topný element, 7- vytápěný disk, 8- rám, 9- zatížení, 10- opláštování přístroje

Tekutina z rezervoáru je vytlačována skrz kapiláru konstantní rychlostí, která je řízena pístem. Jejich hlavní výhodou je, že rychlostní tok lze snadno vypočítat z rychlosti pohybu pístu a pomocí tlaku pak lze vypočítat viskozitu. Používají se především pro polymery.

#### Ad b) Rotační viskozimetry

Patří mezi nejčastěji používané (**Obr.1.5-20**). Umožňují rychlé určení viskozitní křivky a dalších reologických funkcí (reometry). Komerční rotační reometry jsou opatřeny počítačovou podporou a umožňují rychlou analýzu naměřených dat. Měření na rotačních reometrech lze provádět pomocí třech typů geometrie : válce, kužele (či komolého kužele – talířové) a disku.

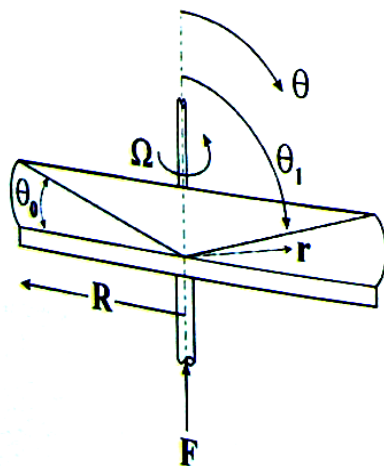
## b1) Rotační viskozimetry válec - válec



**Obr.1.5-20** Zkušební tělísko je ve tvaru rotujícího válce, kolem něj je měřená kapalina v nehybném dutém válcovém pouzdře [44]

## b2) Rotační reometry kužel – deska (Cone-Plate measuring system - CPMS)

V praktické části DP (viz kapitola **2.3.1.2 C**) bude pro měření viskozity použit tento typ viskozimetru – proto bude proveden jeho detailnější popis.



**Obr.1.5-21** Schéma geometrie kužel – deska u rotačního viskozimetru [44]

Jde o nejčastěji využívaný typ geometrie, vhodný pro nízkoviskózní kapaliny (**Obr.1.5-21**). Zapotřebí je jen velmi malé množství vzorku, který se umístí mezi vyhřívanou desku a válec o poloměru  $R$ . Úhel sklonu kužele je velmi malý (do  $\theta < 3^\circ$ ). Menší rádius komolého kužele označme  $r$ . Desky je většinou pevná, rotuje kužel úhlovou rychlostí  $\Omega$ .



Pro velmi malé úhly je rychlostí profil lineární a lze jej vyjádřit ve tvaru:

$$\frac{v_{\phi}}{r} = \Omega \left[ \frac{\left(\frac{\pi}{2}\right) - \theta}{\theta_0} \right] \quad (1-46)$$

Smykovou rychlost můžeme vyjádřit ve tvaru:

$$\gamma^{\bullet} = \frac{\sin \theta}{r} \left[ \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{v_{\phi}}{\sin \theta} \right) \right] \approx -\frac{\Omega}{\theta_0} \quad (1-47)$$

Z čehož plyne, že pro malé úhly kužele je smyková rychlost konstantní ( $\sin \theta \approx 1$ ) a rychlostní tok odpovídá jednoduchému smykovému namáhání. Hlavní výhody geometrie kužel – deska:

- smyková rychlost je konstantní
- není nutné používat reologických modelů
- nutné jen velmi malé množství
- systém umožňuje dobrou tepelnou kontrolu
- koncový efekt je většinou zanedbatelný
- snadné čištění

Nevýhody geometrie kužel – deska:

- lze měřit pouze při nižších smykových rychlostech, hlavně některé polymery se při vyšších rychlostech neudrží v mezeře ( místo desky lze použít tvar pohárku )

- obtížně se eliminuje vypařování vzorku
- může docházet ke značnému zkreslení výsledků zvláště u vícefázových systémů, který obsahuje pevný podíl ( vosková směs ). Ke zkreslení dojde pokud nebude homogenní rozložení vzorku po celém průřezu mezery. Pro více fázové systémy je vhodnější geometrie disk – deska.

Určení viskozity

Smyková rychlost je konstantní po celém průřezu mezery, viskozita je jednoduše určena z kroutícího momentu, který je vyjádřen rovnicí:

$$T = 2\pi \int_0^R \tau_{\theta\phi} r^2 dr = \frac{2}{3} \pi R^3 \tau_{\theta\phi} \quad (1-48)$$

Nenewtonská viskozita je určena ze vztahu (1-43) a z rovnice:

$$\tau_{\theta\phi} = -\eta\dot{\gamma}_{\theta\phi} = -\eta\dot{\gamma} \quad (1-49)$$

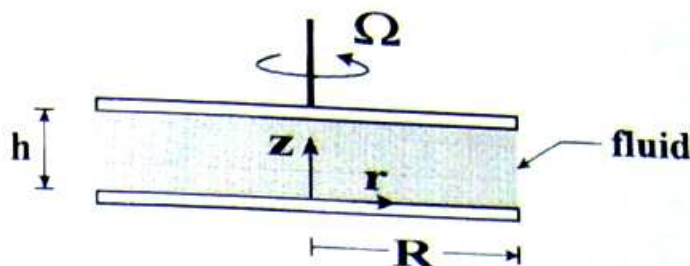
Získáme:

$$\eta = \frac{3\theta_0 T}{2\pi R^3 \Omega} \quad (1-50)$$

Viskozita je tedy přímo úměrná krouticímu momentu  $T$  a nepřímo úměrná rychlosti otáčení  $\Omega$  (rad/s). Tato jednoduchost vysvětluje, proč jsou rotační viskozimetry s geometrií deska – kužel tak rozšířené.

b3) Rotační reometry disk – deska

Se často používá pro vícefázové tekutiny.



**Obr.1.5-22** Geometrie disk – deska [44]

Disk i deska jsou stejného poloměru  $R$  vzdálené o  $h$ . V pohybu je vždy jen jedna geometrie.

Vliv kapilárního napětí na volném povrchu kapaliny je většinou zanedbatelný. Geometrie je zvláště vhodná pro měření vícesložkových roztoků za vysokých teplot. Velikost mezery může být snadno změněna, většinou se pohybuje mezi 1 a 2 mm u disku s průměrem 25 mm.

Pro malou mezeru ( $\frac{h}{R} \ll 1$ ), nebo pro nízkou rychlost rotace je rychlostní profil v ustáleném stavu:

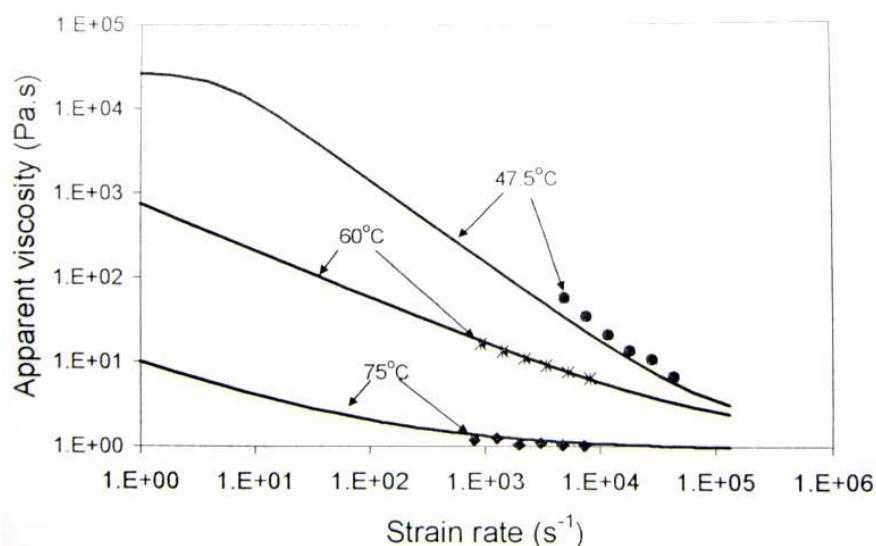
$$v_0 = \Omega r \left(1 - \frac{z}{h}\right) \quad (1-51)$$

A smyková rychlost je vyjádřena:

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_{z\theta} = \Omega \frac{r}{h} \quad (1-52)$$

Určení viskozity je již matematicky náročnější a lze je dohledat v odborné literatuře (např. [44]).

V práci [26] byl pro určení viskozity plněného vosku použit reometr s geometrií desky – kužel a pro fitování model Carreau-Yasuda.



**Graf 1.5-4** Závislost zdánlivé viskozity na velikosti smykové rychlosti [26]

### ***Měření povrchového napětí***

Metody pro stanovení povrchového a mezifázového napětí je možné rozdělit do tří skupin na metody:

- 1) statické
- 2) semistatické
- 3) dynamické

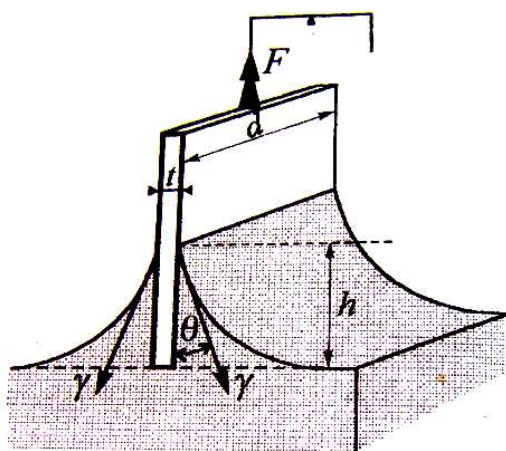
#### ***Ad 1) Statické metody měření***

Jsou založeny na sledování ustáleného rovnovážného stavu. Umožňují získat skutečné rovnovážné hodnoty povrchového napětí, což je nezbytné při definici materiálů pro simulační software. Zvláště u roztoků je na rovnovážných rozhraních odlišná koncentrace než v objemové fázi. Pokud je dosaženo rovnováhy je povrchové napětí časově nezávislé a v ideálním případě nezávislé i na použitém způsobu měření. Mezi statické metody patří např. metody kapilární elevace, sledování tvaru kapek a bublin v gravitačním poli, metoda vyvažování destičky [45].

### Wilhelmyho metoda vyvažování destičky

Zjišťování povrchového napětí se provádí pomocí tenké destičky určité šířky, která je dobře smáčená studovanou kapalinou (**Obr.1.5-23**). Destička se ponoří do kapaliny, na jejím povrchu se vytvoří menisky, jejíž tvar a maximální výška vzestupu je určena Laplaceovou-Youngovou rovnicí. Celková hmotnost vzlínající kapaliny připadající na jednotku obvodu destičky pak nezávisí na tvaru menisku a při nulovém úhlu smáčení je rovna povrchovému napětí. Pro síly  $F$ , kterou je nutno vytvořit pro vyvážení destičky o šířce  $d$ , tloušťce  $t$ , v poloze kdy je ponořený konec destičky v úrovni hladiny platí:

$$F = 2(d+t) \cdot \gamma \cdot \cos \theta \cong 2 \cdot d \cdot \gamma \quad (1-53)$$



**Obr.1.5-23** Metoda vyvažování destičky [45]

### Ad 2) Semistatické metody

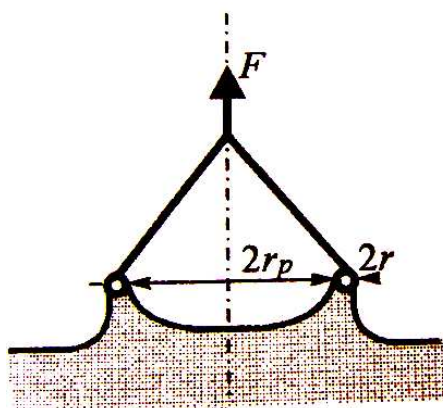
Jsou také založeny na dosažení rovnovážného stavu soustavy, jde však o rovnováhu nestabilní. Při zkoumání každé soustavy je třeba zvolit optimální rychlost potřebnou k přiblížení se k rovnovážnému stavu. Patří sem např. metody maximálního přetlaku v bublině, metoda vážení kapky, metoda odtrhávání prstence, ... [45].

#### Metoda odtrhávání prstence ( du Nouyho )

Měří se síla  $F$ , potřebná k odtržení tenkého prstence z platinového drátku od fázového rozhraní (**Obr.1.5-24**). Prstenec musí být dobře smáčen měřenou kapalinou (úhel smáčení  $\theta = 0^\circ$ ). Většinou se měří tak, aby nedošlo k odtržení prstence – pak je tato metoda statická (jako metoda Wilhemyho). Platí vztah:

$$\gamma = \frac{F}{4 \cdot \pi \cdot r_p} \cdot \phi \quad (1-54)$$

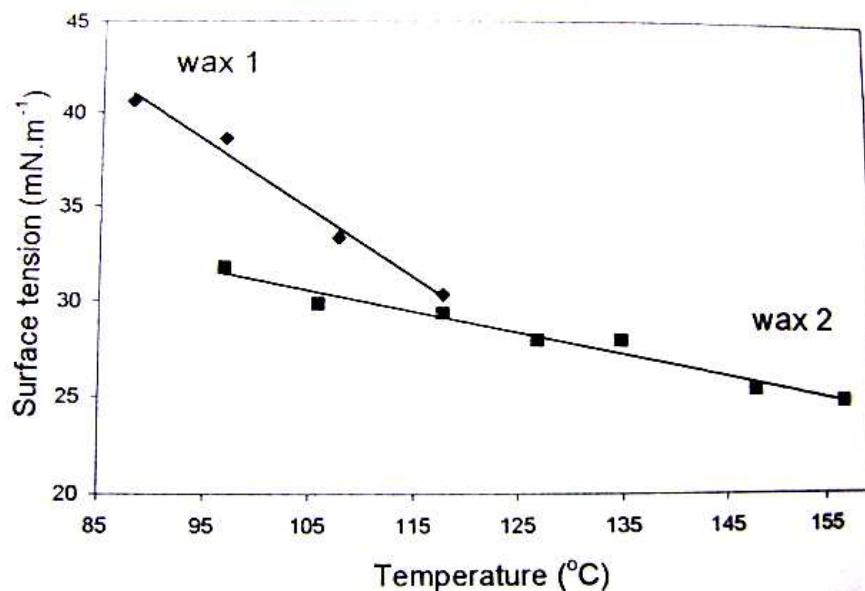
Kde  $\phi$  je korekce na kapalinu, která ulpí na prstenci při odtržení od hladiny, je závislý na geometrii prstence a je tabelován.



**Obr.1.5-24** Metoda odtrhávání prstence [45]

Tato metoda byla použita při stanovování povrchového napětí voskové směsi v [26]. Šlo o dvě voskové směsi:

- wax 1 – plněný vosk, směs s převahou parafínu a mikrokrystalického vosku, 30% pryskyřice, 40% polystyrénového plniva
- wax 2 – neplněný vosk, směs vosků a pryskyřice



**Graf.1.5-5** Závislost povrchového napětí na teplotě pro dvě voskové směsi [26]

Ad 3) Dynamické metody

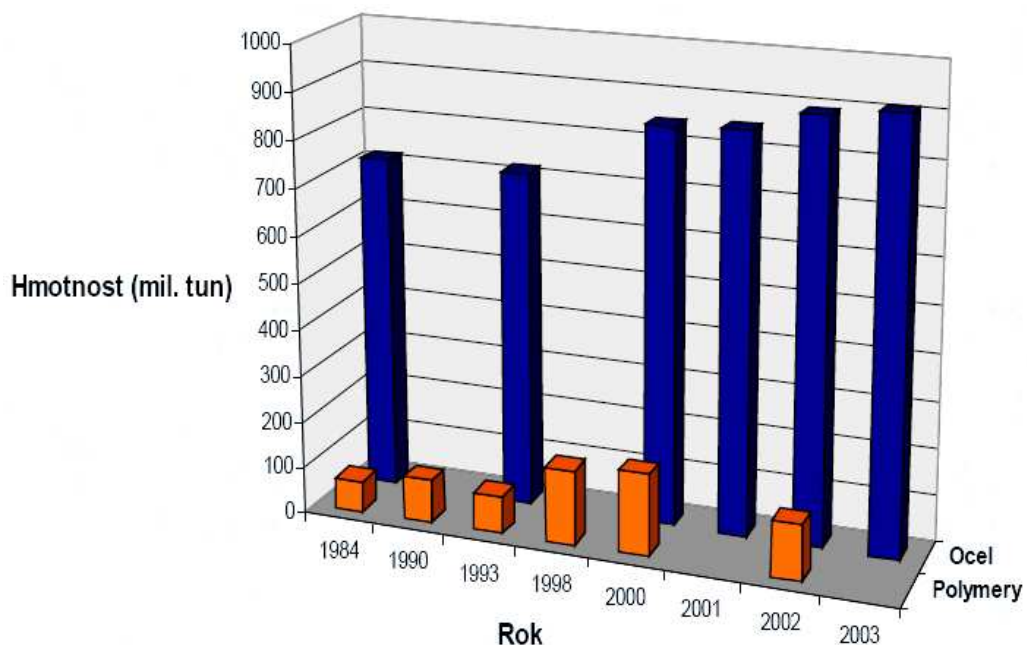
Používají se při studiu výrazně nerovnovážných stavů povrchových vrstev kapaliny. Patří sem např. metoda oscilujícího paprsku, při níž je z eliptického otvoru vypouštěn proud kapaliny ve tvaru eliptického válce do vzduchu nebo do druhé kapaliny. Působením povrchových sil, které se snaží dodat paprsku tvar válce, a působením setrvačných sil, vznikají příčné oscilace, při níž se postupně mění poměr os průřezu proudu. Z délky vln  $\lambda$  na povrchu proudu kapaliny, která se stanovuje optickými metodami a z objemové rychlosti proudění, lze určit hodnotu povrchového napětí. Metoda je vhodná především pro měření velikosti změn povrchového napětí, kdy není důležitá absolutní hodnota [45].

Správná definice povrchového napětí má velký význam při simulaci proudění voskové směsi, zvláště v tenkých stěnách. Vliv povrchového napětí bude ukázán pomocí simulace v praktické části diplomové práce (kapitola **2.3**).

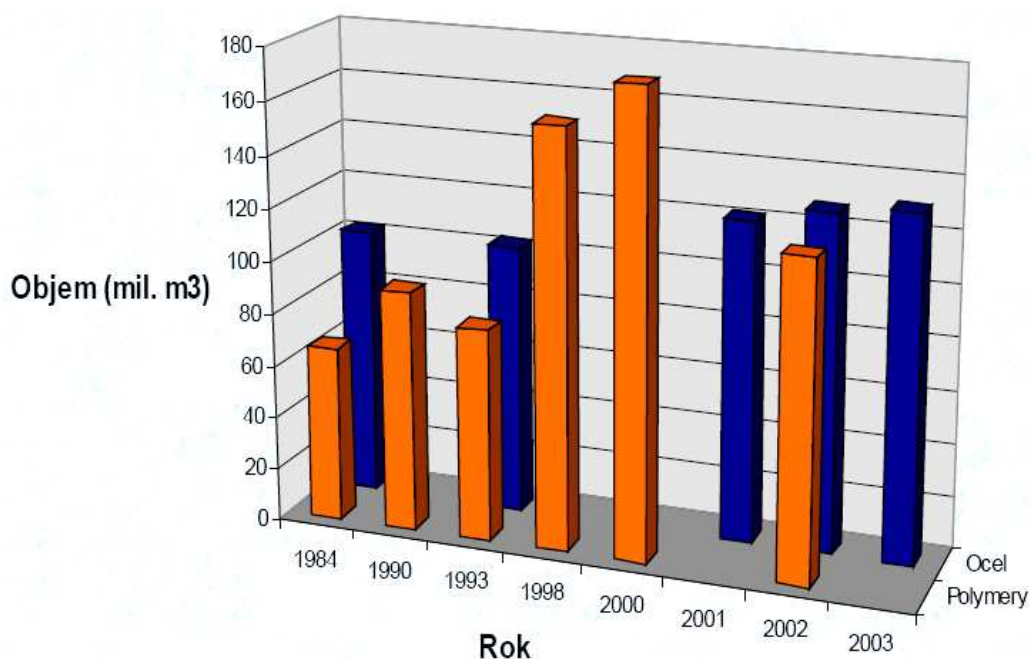
## 1.6 Materiály pro výrobu forem a modelů

### 1.6.1 Hmoty k výrobě měkké formy

Pro výrobu tzv. „měkkých forem“, používaných k výrobě modelů je k dispozici mnoho polymerních materiálů.



*Obr.1.6-1 Hmotnostní světová produkce polymerů (oranžová) a ocelí (modrá) [28]*



*Obr.1.6-2 Objemová světová produkce polymerů (oranžová) a ocelí (modrá) [28]*

Polymery jsou makromolekulární látky. Jejich molekuly jsou poskládané jako řetěz z jednotlivých dílů (poly – mnoho – řetěz - makromolekula, mer – jeden – článek řetězu - monomerní jednotka). Vzhledem k obrovské strukturní variabilitě vykazují polymerní látky značně odlišné vlastnosti. Ke vzniku polymerů dochází syntézou což je chemický proces, kdy se jednodušší monomerní jednotky spojují v makromolekuly (= polymerace).

Polymery lze dělit podle různých hledisek, avšak všechny způsoby třídění mají své nedostatky [27]. Nejčastější dělení je podle základních technických vlastností na:

1) elastomery – polymery, které rychle obnovují svůj původní tvar, který měly před deformací malým napětím – vratná deformace (kaučuky, pryže )

2) plastomery – polymery, které zůstávají deformované, i když deformující napětí přestalo působit – nevratná deformace (plasty). Plasty lze dále rozdělit na termoplasty (působením tepla měknou a lze je opakovaně roztavit) a reaktoplasty (zahříváním nevratně přecházejí do netavitelného stavu).

Při výrobě „měkkých forem,, se nejčastěji používají silikonové elastomery, což jsou všechny organokřemičité sloučeniny. Formy lze zhotovovat také z epoxidových pryskyřic a polyuretanů. Křemík je druhý nejrozšířenější prvek na Zemi (28%). Nejvýznamnější silikonové elastomery jsou tzv. polyorganosiloxany, tedy polymery, u nich jsou křemíkové atomy spojeny kyslíkovými atomy a zbylé valence jsou vázány na uhlovodíkové zbytky. Připravují se nejčastěji hydrolyzou alkyl- a arylchlorsilanů, získávaných zpravidla přímou syntézou alkyl- nebo arylchloridů a elementárního křemíku a mědi jako katalyzátorem za teplot 250 až 450 °C [27].

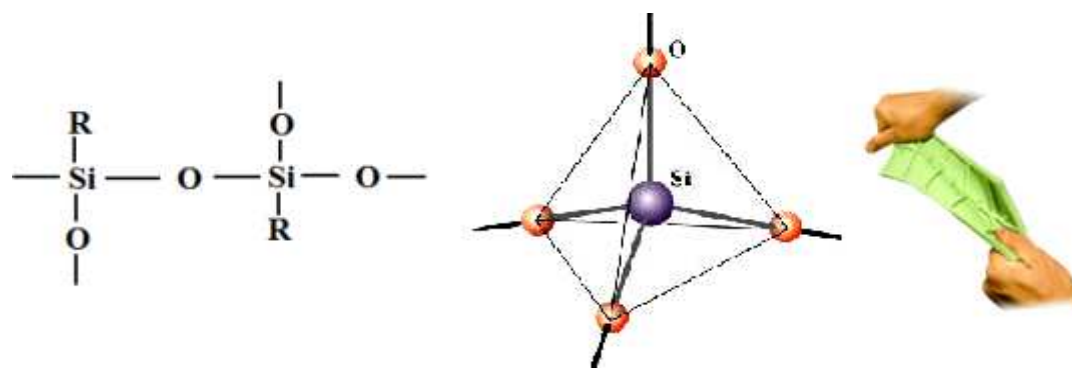
Podle poměru organických radikálů (radikál - atomy, molekuly nebo jejich fragmenty, které mají jeden nebo více nepárových elektronů a jsou schopné jen krátkodobě samostatné existence, jsou vysoce reaktivní) ke křemíku, lze silikony rozdělit na :

- a) silikonové oleje ( poměr -R/S- > 2 )
- b) silikonové kaučuky ( -R/S- = 2 )
- c) silikonové pryskyřice ( -R/S- < 2 )

Silikony se obecně vyznačují :

- výbornou odolností proti teplu, malou závislostí mnohých fyzikálních veličin na teplotě
- nesnášenlivostí s většinou jiných polymerů
- výbornými elektroizolačními a tepelněizolačními vlastnostmi
- chemickou a fyziologickou indiferentností





**Obr.1.6-3** Silanový monomer – základní složka silikonů [27]

### Silikonové pryskyřice

Jsou připravované na bázi polymetylsiloxanů nebo polyfenylmethylsiloxanů. Různou kombinací výchozích dvoufunkčních a trojfunkčních methyl- a fenylchlorsilanů za přítomnosti organických rozpouštědel se připravuje mnoho typů s různými vlastnostmi. Dodávají se ve formě roztoků, ve kterých mají pryskyřice ještě reaktivní skupiny  $-\text{Si}-\text{OH}$ . Dokončení kondenzačních reakcí, až do vzniku zesíťovaného makromolekulárního stavu proběhne až po odpaření rozpouštědla a po zahřátí na určitou teplotu. Vytvrzené pryskyřice se vyznačují vysokou tepelnou odolností, výbornými elektroizolačními vlastnostmi.

### Silikonové kaučuky

Připravuje se z čistých cyklických siloxanů polymerací. Lze je dělit na typy vulkanizovatelné za zvýšené teploty a vulkanizovatelné při pokojové teplotě. Vulkanizace (vytvrzování) se často urychluje pomocí různých katalyzátorů.

Jak již bylo řečeno vlastnosti jsou velice rozmanité a je třeba předem zvážit které vlastnosti jsou preferované pro danou technologii. Na stránkách výrobců lze najít kompletní popis vlastností „formovací směsi“, včetně ceny.

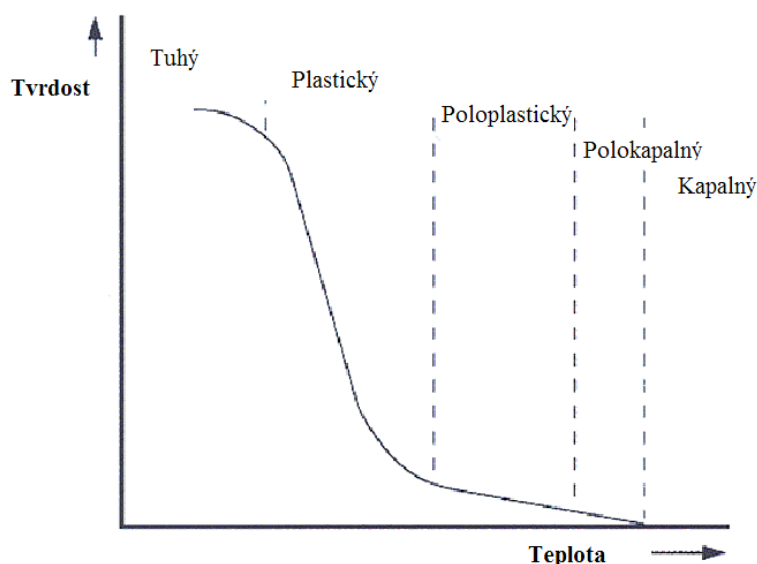
Mezi základní sledované vlastnosti patří:

- doba zpracovatelnosti
- doba vytvrzení
- viskozita
- barva
- tvrdost
- lineární smrštění
- teplotní odolnost
- vhodnost pro určitý druh odlévaného materiálu

V příloze diplomové práce **P4** je uveden technologický postup doporučený společností Lučební závody Kolín a.s., při výrobě forem ze silikonového dvousložkového kaučuku. Příloha **P5** ukazuje pracovní postup zhotovení modelu v silikonové formě [29].

### 1.6.2 Voskové směsi

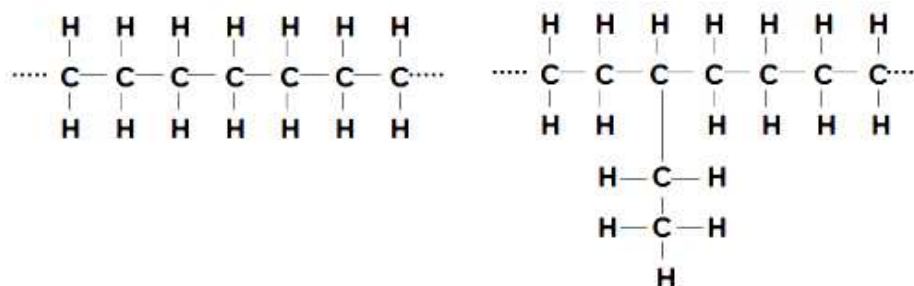
Vosk je nejstarším, člověkem využívaným termoplastickým materiálem. Vosk byl a může být zpracováván ve stavu kapalném, polokapalném, poloplastickém, plastickém a tuhém.



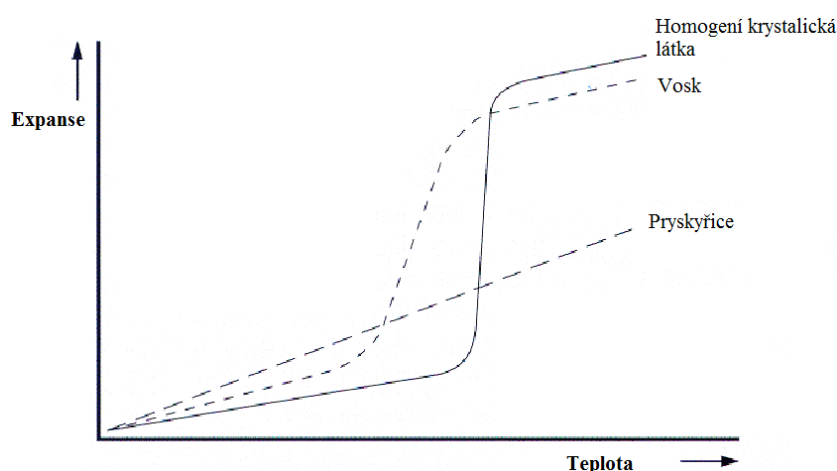
**Graf 1.6-1** Závislost tvrdosti vosku na teplotě [1]

V současnosti se používá v přesném lití název vosk pro mnohosložkové směsi (běžně 3 až 15 složek), které mají podobné vlastnosti jako včelí vosk. Moderní voskové směsi na výrobu vytavitelného modelu obsahují mnoho různých komponent, ať již přírodních (přírodní vosky uhličitě, esterové, parafínové, ... , přírodní pryskyřice, organické plnivové materiály, vodu, ...) nebo umělých (umělé pryskyřice, plniva, ...). Tavení tedy neprobíhá při konstantní teplotě jako u čistých látek ale postupně, jednotlivými stavy (**Obr.1.6-1**).

Typickou vnitřní strukturu tvoří řetězce uhlíkových atomů, jejíž uspořádání má vliv na výsledné vlastnosti voskové směsi (tvrdost, viskozita, průběh likvidu, solidu, ...). Obecně lze říci že kratší řetězce zapříčiňují nižší teplotu tavení a menší tvrdost vosku (**Obr.1.6-4**).



**Obr.1.6-4** Typické uhlíkové řetězce vosků: parafín, mikrokrystalický (ceresín)



**Graf 1.6-2** Porovnání teplotní expanze [1]

Moderní vosky mohou nejčastěji obsahovat tyto komponenty:

- Parafinové vosky ( ropné vosky )

Parafinový vosk lze zařadit mezi vosky přírodní měkké, stejně jako ceresin. Je směs nasycených uhlovodíků. Krátký přímý uhlíkový řetězec obsahuje 20 až 36 atomů uhlíku (řetězce přirozeně alifatické). Tvoří velké krystaly, díky nim je křehký, drobný s nízkou tvrdostí (12 až 25 jednotek). Získává se sublimací parafinových naft (jako vedlejší produkt při zpracovávání ropy na mazací oleje) nebo destilací hnědého uhlí či uhelných břidlic. Syntetický parafin se vyrábí například redukcí oxidu uhelnatého vodíkem. Typické oblast tavení je 32°C až 66°C .Obsah popela pod 0,1%. Relativní molekulová hmotnost 300 až 500 v závislosti na čistotě. (Relativní molekulová hmotnost látky je součet relativních atomových hmotností prvků, které tvoří molekulu, podle jejich poměrného zastoupení.) Je velmi tekutý a rychle tuhne [10], [11].

- Mikrokrystalické vosky (ceresin, také patří mezi ropné vosky)

Tento uhlovodík je v čistém stavu je složen z malých krystalů jehličkovitého tvaru. Oproti parafinu má vyšší teplotu tuhnutí a je odolnější vůči

deformacím. Má ale nízkou pevnost, plastičnost (ale vyšší než parafínové vosky) a značné lineární smrštění (až 3,5%). Získává se také z ropy. Obsahuje 31 až 50 atomů C v řetězci. Relativní molekulová hmotnost je 450 až 700 v závislosti na čistotě. Bod tavení leží mezi 60 až 93 °C a typická tvrdost je 2 až 75 jednotek [10], [11].

#### - Tvrdé vosky

Tvrdé vosky mohou být přírodní nebo syntetické. Do této skupiny patří například: montání vosky, ramonta, kalafuna, karnuba, chemicky modifikované vosky.

Montání vosk je směs voskových a pryskyřičných látek s podílem látek asfaltických (zvýšený obsah asfaltických látek je nežádoucí). Jejich vzájemný poměr určuje kvalitu a vlastnosti. Používá se jako hlavní složka modelových směsí používaných na vstřikolisech. Dává směsi charakteristické vlastnosti jako je úzký interval tuhnutí, tvrdost, křehkost, rozměrovou stabilitu za normální i zvýšené teploty. Typická tvrdost je menší než 1. Bod tavení leží v oblasti mezi 65 až 120°C.

Ramonta je směs monokarbidické kyseliny, hydrokyseliny a jejich esterů, montání pryskyřice a asfaltických látek. V kombinaci s ceresínem vzniká rychle tuhnutí binární sloučenina. Rychlé tuhnutí ale může způsobovat praskání gravitačně litých modelů. K zvětšení intervalu tuhnutí se proto často přidává kalafuna.

Kalafuna je tvrdá složka smoly jehličnatých stromů (nejčastěji se používá borová kalafuna) [10], [11].

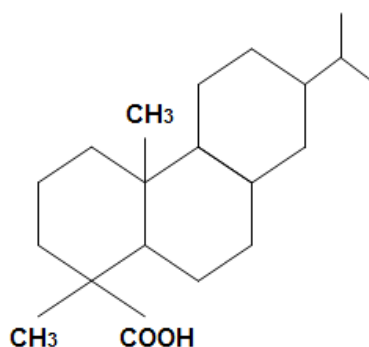
#### - Pryskyřice

Pryskyřice lze v zásadě rozdělit na přírodní, částečně syntetické (uhlovodíkové) a plně syntetické.

Částečně syntetické pryskyřice obsahují řetězce přímé, větvené i prstencovité struktury. Relativní molekulová hmotnost je od 390 do 1615, bod měknutí je mezi 18°C až 178 °C. Částečně syntetické pryskyřice mohou být např.: hydrogenované, čistě monomerní, alifatické (s otevřeným uhlíkovým řetězcem), aromatické ...

Syntetické pryskyřice obsahují organické látky. Řetězce mohou být přímé, větvené nebo prstencovité. Relativní molekulová hmotnost je 350 až 1750, bod měknutí leží v oblasti od 25°C do 190°C. Příkladem mohou být modifikované, polymerizované pryskyřice či jejich estery.

Přírodní pryskyřice je komplexní směs organických složek s řetězci přímými, větvenými a prstencovými. Relativní molekulární hmotnost 250 až 1575, bod měknutí 80°C až 180 °C. Patří sem například modifikovaná pryskyřice, hydrogenované či polymerované pryskyřičné estery, a další.



**Obr.1.6-5** Příklad řetězce hydrogenované pryskyřice [10]

Obecně lze říci, že pryskyřice dodávají voskům pevnost a redukují tepelné smršťování a tvorbu propadlin [10], [11].

#### - Polymery

Polymery zlepšují viskozitu tvárnost a houževnatost, ovlivňují fyzikální vlastnosti. Mezi nejznámější a nejvíce používané patří etylén vinyl acetát (zkráceně EVA). Relativní molekulární hmotnost 50 až 2500, bod měknutí 50°C až 200 °C, oblast tvrdostí je mezi 5 až 50.

#### - Plniva

Plniva jsou organické látky, jež se do voskových směsí přidávají hned z několika důvodů. Snižují vytváření dutin v úzkých stěnách modelu, neboť plněné směsi mají nižší smrštění. Plněné směsi mají výrazně nižší změny objemu, což je podstatné i při vytavování, kdy by mohlo dojít k popraskání skořepiny. Zvyšují tekutost, čímž značně usnadňují plnění formy při vstřikování. Dále zlepšují kvalitu povrchu modelu, zlepšují mechanické vlastnosti. Plniva lze rozdělit na plynná, kapalná a tuhá.

Plynným plnivem je nejčastěji vzduch, který se do směsi dostává při teplotě v horní oblasti rozmezí tuhnutí. Při teplotě nad bodem tuhnutí je viskozita příliš nízká a vzduch by unikl.

Výhodou vzduchem plněných směsí je zvýšená odolnost proti povrchovým deformacím a při plnění forem lze použít nižších vstřikovacích tlaků.

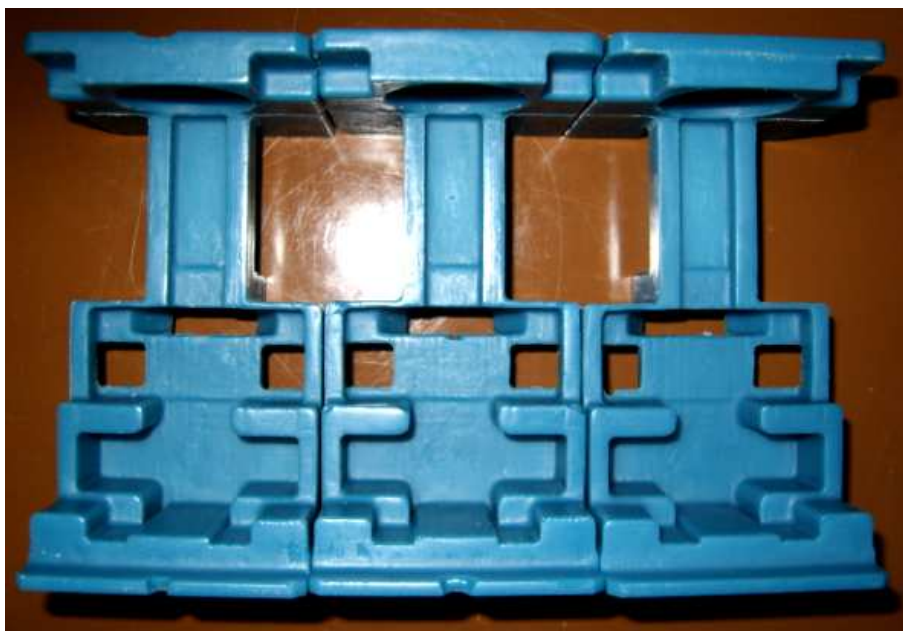
Kapalným plnivem je nejčastěji voda. Vosky s jemně rozptýlenou vodou se pak nazývají emulzifikované a vyznačují se minimálním smrštěním a kvalitním povrchem.

Tuhá plniva jsou většinou plastické hmoty (polyetylén, polypropylen, polystyren, polyvinilacetát,... konkrétně např.: XLA, XLPS, XLMA, Bisphenol A, Terephthalic Acid ...). Obecně ve směsi zvyšují teplotu tavení, prodlužují čas tuhnutí, snižují smrštění. Směs je nutno neustále míchat z důvodu zabránění usazování tuhých plniv.

Všechny moderní plniva používané při výrobě voskových směsí pro přesné lití jsou chemicky inertní vůči ostatním složkám směsi. Musí být organického původu pro jejich dokonalé odstranění při žihání.



**Obr.1.6-6** Při výrobě modelu 019 – C 002 CROWN CENTRE ve slévárně FIMES, byla použita vosková směs složená z Parafinu, Stearinu, Romoty a Ceresinu



**Obr.1.6-7** Metodou RP byl model „CROWN,, vyroben v silikonové formě za použití plněného vosku A7-RT/26 od anglické společnosti Blayson, jeho chemické složení je výrobním tajemstvím

### ***Dělení voskových směsí v přesném lití***

Základní typy vosků pro přesné lití lze rozdělit např.:

- modelový (lze dále rozdělit na: přímý = neplněný, emulsifikovaný, plněný)
- na vtokové soustavy
- regenerovaný
- rekonstituovaný
- speciální ( namáčecí, na opravy, pro lepení, vodou rozpustný, ...)

#### *Přímé vosky*

Jsou složeny z mnoha komponent. Povrch modelu je většinou lesklý a hladký. Mohou být rekonstituovány a regenerovány a následně opětovně použity pro výrobu modelů i částí vtokové soustavy [1], [10].

#### *Emulsifikované vosky*

Mají podobné složení jako přímé vosky a navíc obsahují vodu (většinou 7 až 12 %). Voda působí jako plnivo díky němuž získávají modely extrémně jemný povrch a odolnost proti vzniku propadlin, dutin. Emulsifikace je jednoduchá, provádí si ji samy slévárny. Vyznačují se také nízkou adhezí k formě. Vosky lze regenerovat i rekonstituovat a opětovně použít na model či vtokovou soustavu [1], [10].

#### *Plněné vosky*

Složení je opět podobné jako u předešlých materiálů, ale navíc obsahují organické nerozpustné práškové, k ostatním složkám inertní plnivo. Plniv může obsahovat i více druhů. Důležitá je velikost částic plniva ( kvalita povrchu ), hustota ( usazování ), složení ( co nejméně popela po vypálení, vlastnosti předávající voskové směsi ). Jsou komerčně velmi rozšířené, mají vynikající vstřikovací charakteristiky a pomocí pokročilých metod lze také regenerovat a rekonstituovat [1], [10].

#### *Vosky na vtokové soustavy*

Většinou na ně nejsou kladeny takové nároky jako na modelové vosky a proto se často používají regeneráty. Vyrábí se samozřejmě i speciální panenské vosky, kde jsou konkrétní vlastnosti nastaveny dle požadavku zákazníka. Obecně mají nižší bod tavení a nižší viskozitu pro snadné vytavení ze skořepiny ( odvoskování ). Mohou být přímé nebo s obsahem plniva pro zlepšení vstřikování, vyšší pevnost či rychlejší tuhnutí. Dále mohou být se speciálními aditivami která ovlivňují pevnost, pružnost, bod tavení, reologii ... [1], [10].

### Regenerované a rekonstituované vosky

Regenerace vosku spočívá v odstranění nežádoucích tuhých podílů a vody a přidání části nového vosku. Regeneraci si většinou provádějí slévárny samy. Regenerované vosky nedosahují kvalit nových vosků, a proto se používají především pro výrobu částí vtokové soustavy. Pro rekonstituci musí být vosk odeslán prodejci vosku. Po rekonstituci u výrobce má vosk shodné parametry jako vosk panenský při nižší ceně [1], [10].



**Obr.1.6-8** Použití regenerovaného vosku při výrobě částí vtokové soustavy, slévárna Fimes

### Speciální vosky

Jsou vosky vyvinuté pro konkrétní použití. Například vodou rozpustné vosky se používají pro výrobu složitých vnitřních tvarů. Namáčecí vosky se používají pro vytvoření slabé vrstvičky na stromečku, která se při vytavování vosku velice rychle odtaví a tak zabrání popraskání skořepiny.

### **Kontrola vlastností slévárenských vosků**

Vosky jsou velice složité materiály s rozdílnými vlastnostmi. Jednotlivé komponenty se vzájemně ovlivňují a jejich podíly určují výsledné vlastnosti směsi. Konstantní vlastnosti vosku mají zásadní význam pro výrobu kvalitního odlitku. Proto je třeba vosky zkoušet, a to nejen při výrobě, ale také po opětovném použití, regeneraci.

BICTA (British Investment Casting Trade Association) doporučuje testovat oblast tuhnutí, obsah popela a viskozitu.

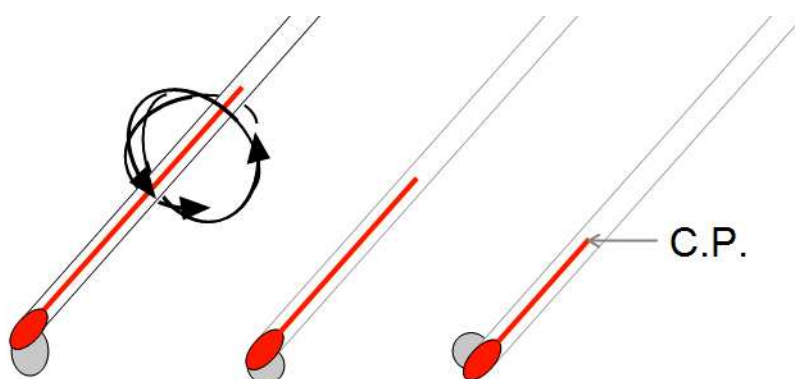
Dalšími testovanými parametry jsou smršťování, kavitace, tvrdost, elasticita, kvalita povrchu, stabilita, regenerovatelnost, zkoušky tvrdosti, pevnosti, křehkosti, ...



### 1) Oblast tuhnutí

#### 1a) Bod skápnutí

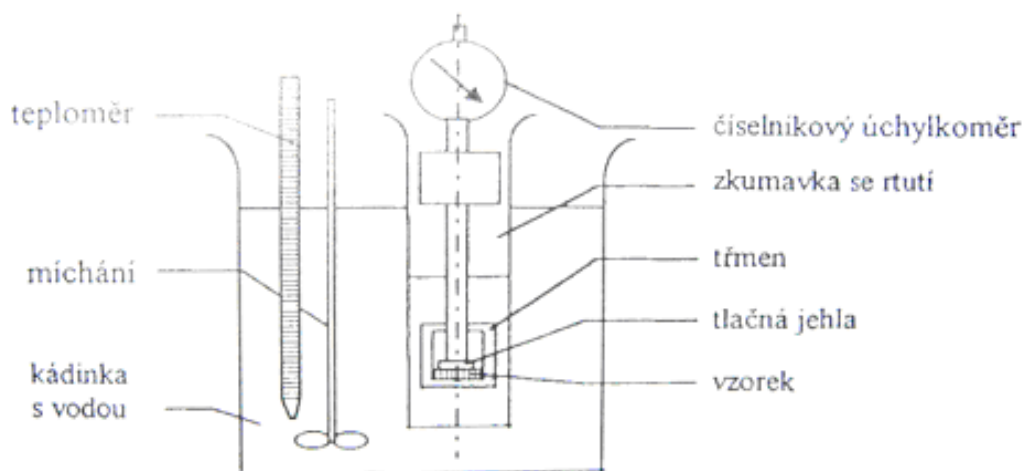
Voskové směsi obsahují větší počet komponent. Jednotlivé složky se taví při různých teplotách, a proto se místo bodu tavení často měří bod skápnutí. Určení intervalu tuhnutí je důležité pro stanovení teploty vstřikování vosků. Bod skápnutí je teplota, při níž skápne první kapka zahřívající hmoty z teploměru, lze ji označit jako počátek teplotního intervalu tání/tuhnutí směsi (**Obr.1.6-9**).



**Obr.1.6-9** Princip určení bodu skápnutí [42]

#### 1b) Stanovení bodu tání penetrometricky

Metoda slouží pro stanovení teploty v dolní oblasti intervalu tuhnutí. Měří se hloubka vniku normalizovaného tělíska do zkoušeného vzorku v závislosti na teplotě. Bod tání určený touto metodou je závislý na použitém tlaku s nímž vniká tělíska (jehla) do vzorku, pro určení bodu tání musí být tedy provedeno více měření s různými velikostmi zatížení (**Obr.1.6-10**).



**Obr.1.6-10** Určení bodu tání penetrometricky [41]

### 2) Obsah popela

Obsah popela je definován jako procento hmotnosti, které zůstane po spálení vosku. U moderních voskových směsí se běžně pohybuje do 0,05%. Obsah popela je třeba sledovat zejména u regenerovaných voskových směsí, protože během technologického cyklu se vosk znečišťuje.

### 3) Viskozita

Odpor proti tečení vosku za různých teplot je velmi důležitý parametr vzhledem k nastavení optimálního vstřikovacího cyklu (tlak, teplota).

K určení viskozity slévárenských vosků se používají různé postupy. V současnosti se stále využívá mnoho nestandardizovaných metod, jednotlivé přístroje jsou odlišné a určená viskozita je pouze orientační hodnota závisící na konkrétním použitém přístroji. Mezi nejprimitivnější metody patří např. určení pomocí Hopplerova viskozimetru, kdy se vtlačuje kulička do ohřátého voskového vzorku.

Z uvedeného plyne, že ani výrobci nejsou schopni poskytnout údaje nutné k provedení simulace a pro získání požadovaných informací je nutné se obrátit na specializované chemické laboratoře.

Další informace a popis konkrétních metod testování lze nalézt např. v [1], [10] a u výrobců vosků.

## 2 PRAKTICKÁ ČÁST

### 2.1 Úvod do praktické části

Hlavním cílem praktické části je sestavení simulace plnění silikonové formy voskovou směsí ve vakuu. Tato RP metoda pro výrobu prototypových odlitků (několik kusů odlitků) se stává stále více využívanou. Vznikají specializované firmy, jejíž úkolem je zhotovit v krátkém čase fyzický model podle digitálních dat dodaných zákazníkem. Do silikonové formy lze odlévat celou řadu materiálů, nejčastěji jde o různé druhy plastů a voskové směsi. S rostoucím zájmem o tuto metodu roste i zájem o její zdokonalení. Mezi hlavní problémy, které je třeba řešit patří:

- Správný návrh vtokové soustavy
- Určení míst kde je třeba vytvořit odvzdušnění
- Rozměrová a tvarová přesnost vyrobených modelů
- Zkrácení času, po který model tuhne ve formě – návrh chladicího systému

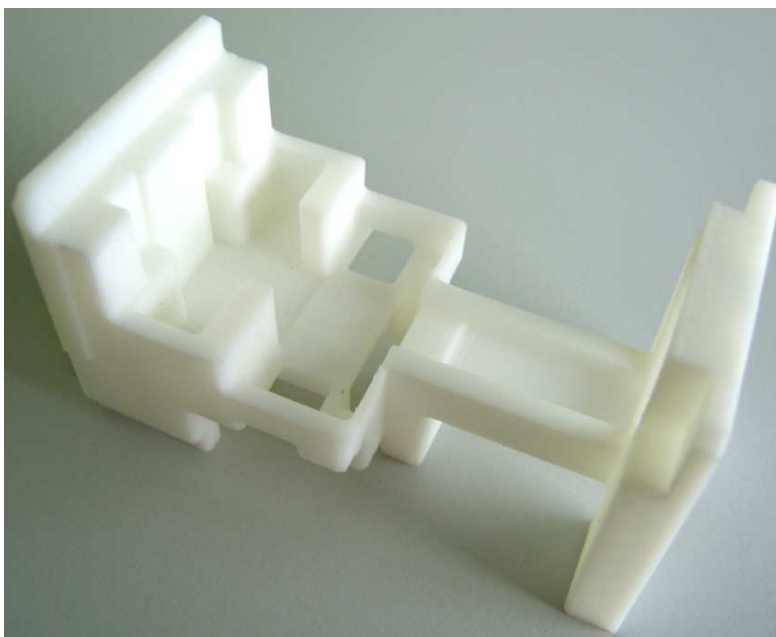
K řešení těchto problémů by měla výrazně přispět počítačová simulace procesu. Simulace této metody zatím nebyla sestavena, je třeba provést její celkový návrh. Hlavním problémem se ukázalo získání potřebných termofyzikálních dat pro odlévanou voskovou směs. Jak je rozebráno v teoretické části diplomové práce (kapitola 1.6.2), vosky jsou velmi různorodé směsi mnoha látek, přičemž potřebná data k provedení simulace v podstatě neexistují. Správná data představují základ pro uskutečnění simulace, jejich měření je finančně náročné a pokud jsou v rámci nějakého projektu naměřena většinou nejsou zveřejněna, či jsou uveřejněna pouze neúplně.

V příloze diplomové práce **P1** je popsán klasický postup výroby odlitku 019–C 002 CROWN CENTRE (dále pro zjednodušení nazýván „C“) metodou vytavitelného modelu ve slévárně přesného lití Fimes a. s. v Uherském Hradišti. Voskový model je zde vyráběn vstříkáním do kovové formy. V kapitole 2.2 je detailně popsán způsob výroby voskového modelu „C“ pomocí Rapid Prototyping technologie litím do silikonové formy ve vakuu. Rozměrové porovnání klasické technologie výroby voskového modelu a technologie RP lze nalézt v [49]. Kapitola 2.3 je věnována problematice simulace lití voskové směsi do silikonové formy.

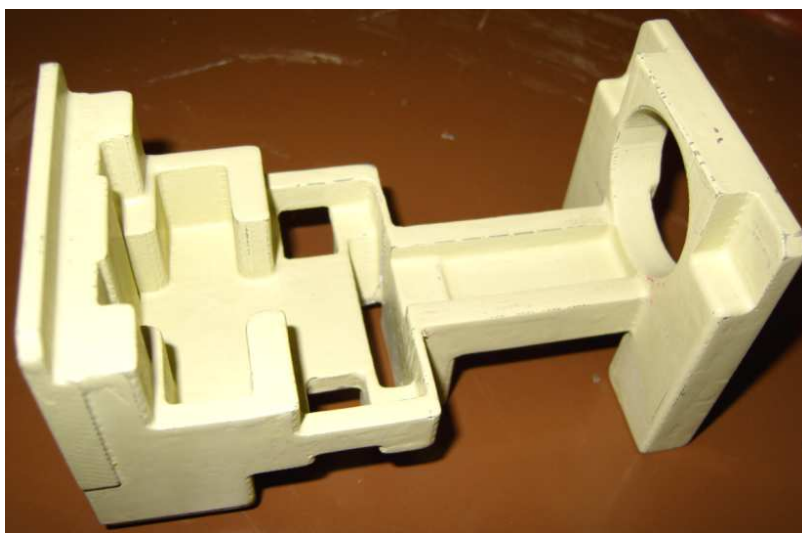
## 2.2 Výroba voskového modelu „C“ metodou RP

### 2.2.1 Výroba matečného RP modelu

Jak je uvedeno v teoretické části diplomové práce v kapitole 1.4.3, výroba matečného modelu pomocí FDM tiskárny se rozděluje na fáze Preprocessingu, Processingu a Postprocessingu. Detailní postup přípravy dat, tisknutí modelu „C“ včetně provedených dokončovacích operací je uveden v příloze diplomové práce **P3**.



**Obr. 2.2-1** FDM model „C“ po vytisknutí a odstranění podpůrného systému v rozpouštěcí lázni



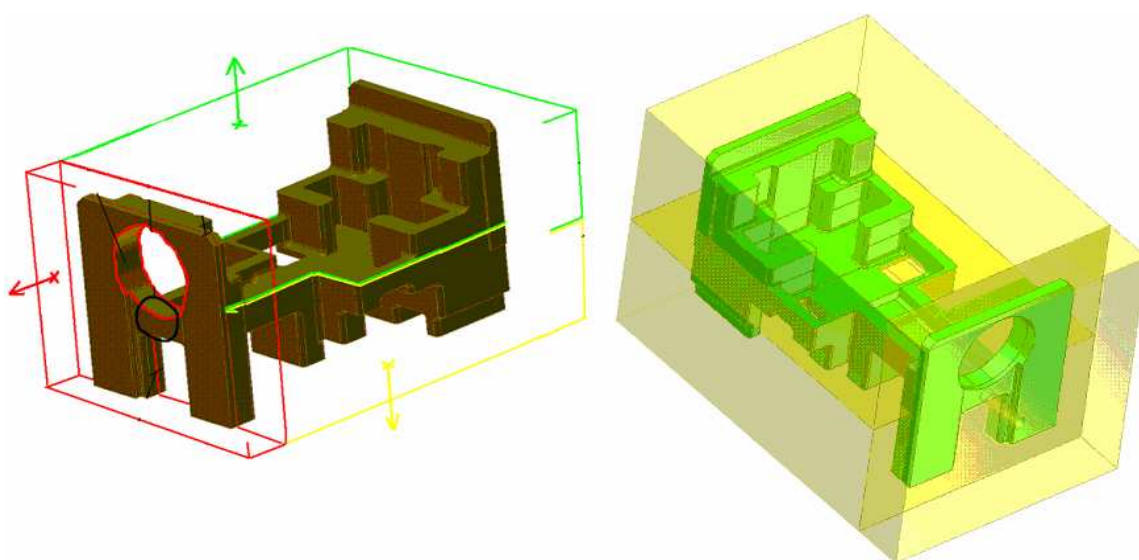
**Obr. 2.2-2** Model po povrchové úpravě – připraven pro zhotovení matečné silikonové formy

## 2.2.2 Výroba matečné formy

### 2.2.2.1 Návrh formy

Silikonové formy se využívá především pro výrobu několika kusů odlitků. Její životnost je závislá na druhu použitého silikonu a na druhu odlévaného materiálu (teplota, chemické složení). S rostoucím počtem odlitých kusů roste opotřebenění formy, klesá kvalita povrchu a přesnost rozměrů.

Tvar dělicích ploch a počet dílů formy byl navržen s ohledem na snadné vyjímání voskového modelu s ohledem na použitou technologii výroby (**Obr. 2.2-3**).



**Obr. 2.2-3** Návrh a 3D model silikonové formy složené ze tří částí

### 2.3.2.2 Prostředky nutné ke zhotovení formy

#### 1) Model odlitku

Model je vytisknut na RP tiskárně a povrchově upraven. Popis tvorby modelu - příloha **P3**.

#### 2) Tvárná hmota

Pro postupnou výrobu jednotlivých částí formy je třeba vytvořit dělicí tvary, které zajistí že silikon zateče pouze do žádaných oblastí. Nejčastěji se využívá děcká modelína s obsahem olejů.

#### 3) Náradí k tvarování modelíny

Využívá se modelářských špachtlí a nože.

#### 4) Skleněné desky

Pro vnější omezení tvaru formy se používá pět skleněných desek.

### 5) Tavná pistole Patex

Ke spojování skleněných desek se může použít tavné pistole s tyčinkovými náplněmi z termoplastu. Hlavní výhodou spočívá v nízké ceně a vysoké rychlosti vytvrzení (do dvou minut).

### 6) Silikonový elastomer

Byl použit silikon SILASTIC T-4 a tvrdidlo T-4 O. Tento materiál i tvrdidlo jsou často používány v prototypové výrobě. Tvrdidlo T-4 O narozdíl od T-4 obsahuje oleje díky nimž nedochází k přilnutí odlévaného vosku k povrchu formy.

#### Charakteristika SILASTICu T-4 :

- průhledný visocopevnostní silikonový dvousložkový elastomer na výrobu forem, speciálně určený pro technologii Rapid Tool Prototyping
- díky nízké viskozitě usnadňuje míchání a odvzdušňování
- vysoká elasticita umožňuje snadné uvolnění formy
- středně vysoká tvrdost, dobrá pružnost a houževnatost
- nízká lineární smršťitelnost
- vytvrzení může být urychleno teplem

#### Typické vlastnosti:

##### a) Základní složka SILASTIC T-4

Viskozita: 70 000  $m \cdot Pa \cdot s$

Specifická hmotnost: 1,1

##### b) Vytvrzovací činidlo T-4, nebo T-4 O

Viskozita: 300  $m \cdot Pa \cdot s$

Specifická hmotnost: 0,96

Poměr základní složky a vytvrzovacího činidla: 100 : 10 hmot. dílů

Viskozita katalyzované směsi: 35 000  $m \cdot Pa \cdot s$

Barva: průsvitná

Doba práce se směsí při teplotě 25°C: 90 min

Vlastnosti po vytvrzení při 25°C po 24 hodinách s vytvrzovacím činidlem T-4:

- tvrdost 40 Shore A, mez pevnosti v tahu 6,7 MPa, poměrné prodloužení při lomu 400 %, pevnost v roztržení  $27 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ , relativní hustota 1,09, lineární smrštitelnost < 0,1 %

Vlastnosti po vytvrzení při 25°C po 24 hodinách s vytvrzovacím činidlem T-4 O:

- tvrdost 40 Shore A, mez pevnosti v tahu 6,5 MPa, poměrné prodloužení při lomu 375 %, pevnost v roztržení  $32 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ , relativní hustota 1,09, lineární smrštitelnost < 0,1 %

### Míchání složek

Míchání může být provedeno ručně nebo pomocí přístroje při teplotě do 35°C. Je doporučeno vmíchávat tvrdidlo do základní složky po malých dávkách při dostatečném čase míchání pro umožnění úniku zachyceného vzduchu. Polapeného vzduchu je doporučeno zbavovat se vakuováním po dobu cca 2 minut, kdy dojde k troj až pětinasobnému zvětšení objemu a k odstranění vzduchu.

Pokud není k dispozici vakuovací komora a je požadována výsledná struktura bez bublin, doporučuje se postupné míchání malého objemu směsi a jeho postupné nanášení v tenkých vrstvách. Vzduch v podobě bublinek za určitý čas samovolně unikne a je možné nanést další vrstvu materiálu.

### Lití a vytvrzování

Po namíchání a vyvakuování by měla být směs co nejrychleji odlita. Odléváme tak, aby nedocházelo k uzavírání vzduch při plnění formy. K vytvrzení dojde po 12 hodinách při teplotě 22-24°C. S rostoucí teplotou se potřebná doba vytvrzování zkracuje a naopak. Příliš vysoká teplota při vytvrzování směsi může způsobit vznik staženin a rozměrové změny.

### Doplňkové informace

Všechny silikonové materiály jsou velmi náchylné k inhibici v případě kontaktu s určitými materiály. K nevytvrzení silikonové směsi může dojít po kontaktu s materiálem, který obsahuje aminy, síru a cín. K nevytvrzení může dojít jak při kontaktu s těmito látkami při přípravě směsi (míchání v nevhodných nádobách), tak při odlévání pokud není materiál formy dostatečně vytvrzen.

Chemická odolnost je relativně vysoká, ale některé agresivní odlévané materiály (pryskyřice) mohou reagovat s povrchem formy, měnit jak fyzikální

vlastnosti a tak i rozměry formy. Během opakovaného odlévání by měla být forma pravidelně kontrolována.

Formy z SILASTICu T-4 mají dobrou odolnost proti zvýšeným teplotám. Při dlouhodobém používání při teplotách kolem 200 °C dochází k postupné ztrátě elasticity. Nedoporučuje se používat při teplotách nad 250 °C.

Materiál neobsahuje závažné zdraví škodlivé látky. Materiál není testován na použití v potravinářském a farmaceutickém průmyslu (kontakt s potravinami a pokožkou). Doba použitelnosti je 12 měsíců od data výroby. Podrobnější informace lze najít na stránkách výrobce (<http://www.dowcorning.com>) a v přílohách diplomové práce **P7, P8, P9**.



**Obr. 2.2-4** Silikon SILACTIC T-4 je dodáván v barelech v hmotnostech 2, 20, 200 kg

Vlastnosti materiálu nutné pro provedení simulace jsou uvedeny v kapitole **2.3.1.2 C))** .

#### 7) Váhy

Pro odvážení potřebného množství silikonu a tvrdidla byly použity digitální váhy Shinko Denshi Vibra SJ-4200CE s rozsahem měření 5 až 4200 g při odchylce 0,1 g.

#### 8) Vakuová licí komora

Slouží k vyvakuování silikonového elastomeru a voskové směsi a poté k odlévání voskových odlitků. Byla použita vakuová komora Vacuum Casting System MK Miny od společnosti MK Technology GmbH (**Obr. 2.2-5**). Komora je navíc opatřena vyhřívaným licím kelímkem. Kelímkem o objemu 1,2 l umožňuje ohřev materiálu do teploty 150 °C.



Technické parametry použité vakuové komory:

- max. hmotnost odlitku: 1 kg
- vnější rozměry ( š x hl x v ): 640 x 600 x 1000 mm
- max. velikost formy ( š x hl x v ): 450 x 470 x 400 mm
- výkon vakuové pumpy: 25m<sup>3</sup>/hod při tlaku < 0,8 hPa
- čas vakuování z 1,013 na 0 hPa: 3 min
- čas průniku z 0 na 1,013 hPa: 25 s
- dosažitelné vakuum: -0,95 hPa
- napájení/příkon: 230 V / 0,8 kW
- hmotnost: 250 kg



**Obr. 2.2-5** Vakuovací komora MK Miny

9) Dělicí prostředek

Dělicí prostředek je vyráběn výrobcem silikonu a dodáván společností Ebalta Kunststoff GmbH.

10) Kovové spony

Pro zpevnění formy v dělicích plochách.

11) Temperovací komora

Pro ohřev silikonové formy před litím, popř. pro zkrácení doby vytvrzování silikonu se používají temperovací komory. Byla použita elektrická

temperovací komora MKT-1 od společnosti Memmert. Komora umožňuje napojení na PC, programování teplotních cyklů a online vyhodnocování stavu. Komoru je možno obsluhovat i manuálně bez nutnosti připojení k PC.

Technické parametry:

- objem komory: 110 l
- vnitřní rozměry ( š x hl x v ): 560 x 400 x 480 mm
- vnější rozměry ( š x hl x v ): 710 x 510 x 760 mm
- rozsah nastavení teplot: 30 – 220 °C
- napájení/příkon: 230 V / 2 kW
- hmotnost: 55 kg

### 2.2.2.3 Postup výroby matečné formy

Pomocí modelovací hmoty připravíme tvar prvního dílu formy pro odlití. Vymezení prvního objemu formy je tvarově a tedy i časově nejnáročnější (cca 1,5 hod). Je třeba dodržet zvolený tvar dělicí roviny, modelína musí ve všech částech těsně přiléhat k povrchu modelu, neboť silikonový elastomer pronikne i do nejdrobnějších dutinek. Je vhodné modelínu před formováním zahřát v peci na teplotu cca 30°C kdy dojde k jejímu změknutí, což značně usnadňuje její formování. Po vytvoření žádané geometrie dělicích ploch se provede seříznutí vnějších hran do rovinného tvaru (**Obr. 2.2-6**).



**Obr. 2.3-6** Zaformovaný model pro výrobu první části silikonové formy

Tvar se ze spodní a z vnějších hran omezí pomocí skleněných desek, které se spojí pomocí tavné pistole. Dále je třeba provést úpravy, utěsnění mezer mezi sklem a modelínou. Je vhodné vytvořit v dělicí rovině tvary, které brání pozdějšímu přesazení částí forem, usnadňují skládání (cca 15 min.).



**Obr. 2.2-7** Zaformovaný model připravený k odlití prvního dílu formy

Dále je třeba připravit silikonový elastomer. Pomocí pravítka se přibližně určí objem odlévané části a podle něj se odváží potřebné množství základní složky Silicastu T-4 (100 hm. dílů) a tvrdidla T-4 O (10 hm. dílů). Do objemu základní složky se postupně vmíchává tvrdidlo. Po dostatečném rozmíchání se směs vakuuje v komoře. První díl byl podle doporučení výrobce vakuován po dobu 3 minut při tlaku  $-0,95$  hPa (Bar) . Během této doby došlo k jednomu zvětšení objemu a k jeho splasknutí. Později, po ztuhnutí formy, se ukázalo, že tento čas je pro odstranění vzduchu nedostatečný – při povrchu ztuhlé formy je velké množství ztuhlých vzduchových bublin.



**Obr. 2.2-8** Během vakuování dojde vlivem odplynování k nárůstu objemu a pak k jeho poklesu

První díl silikonové formy odléváme ihned po vyvakuování a to tak, aby nedocházelo k uzavírání vzduchu v materiálu. Pro dokonalé odstranění vzduchových bublinek je možné vložit formu ihned po odlití do vakuové komory (**Obr. 2.2-9**).



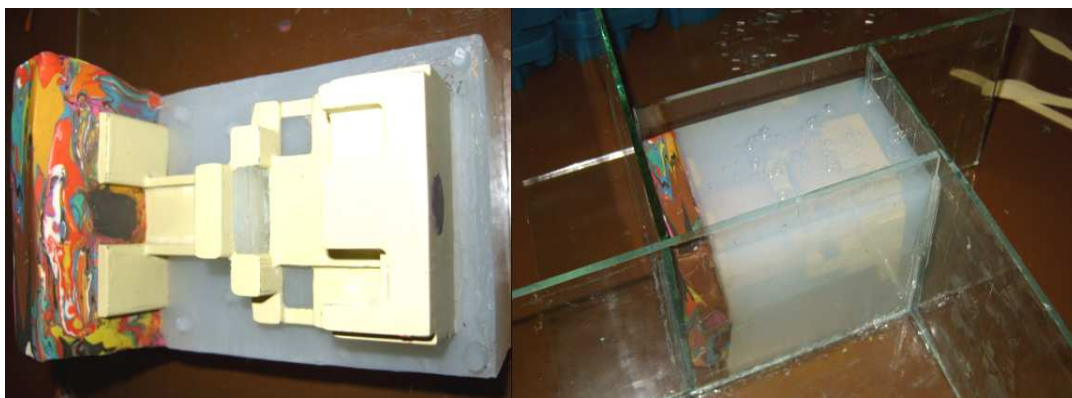
**Obr. 2.2-9** Po odlití po nedokonalém vyvakuování dochází k vyplouvání značného množství vzduchových bublinek

K dokonalému vytvrzení formy dojde cca po 12ti hodinách při pokojové teplotě. Po vyjmutí je třeba odstranit výronky, popř. provést dodatečné vytvoření vodících tvarů v dělicí rovině.



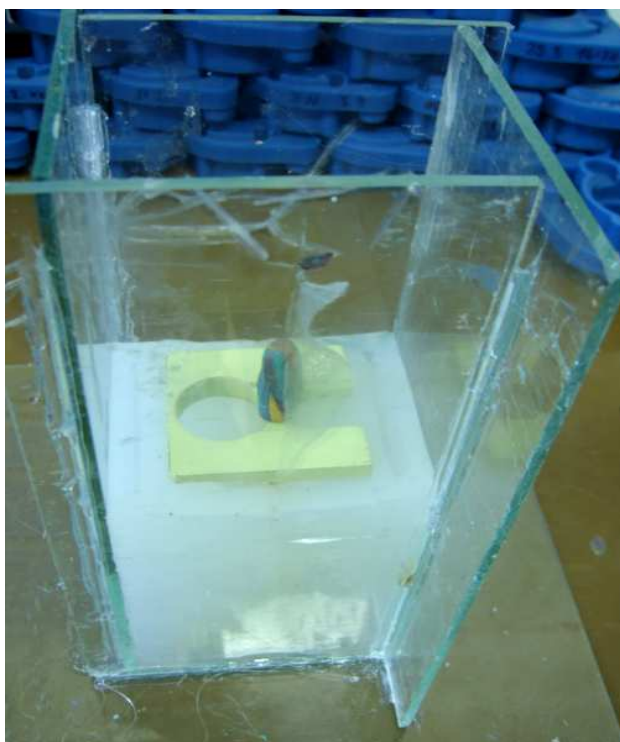
**Obr. 2.2-10** Po odstranění skel a modelíny se provede očištění a odstranění výronků, lze provést i korekce tvaru formy seříznutím

Pro zhotovení zbývajících částí formy se postupovalo stejnými kroky. Pro řádné odstranění vzduchu probíhalo vakuování po dobu 15 minut. Při lití silikonu na hotovou první část formy je třeba použít separační prostředek, aby nedošlo ke spojení silikonových materiálů.



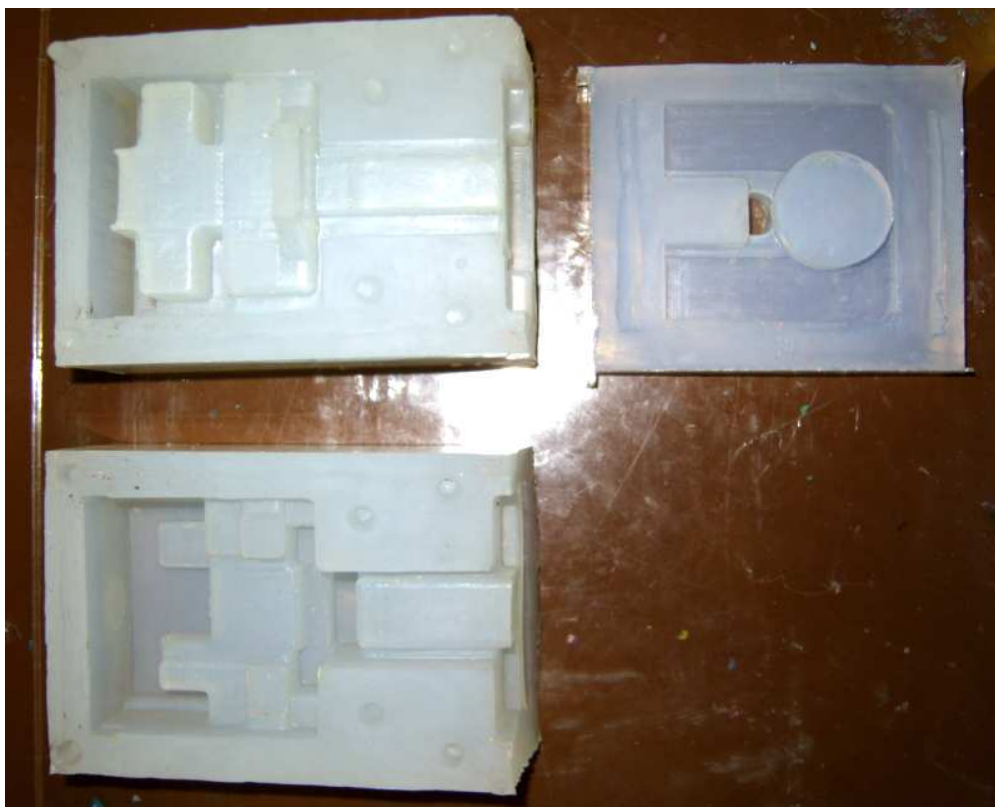
**Obr. 2.2-11** Výroba druhé části formy

Menší z děr nebyla předlévána. Drobná jádra se zhotovují z kovových materiálů obráběním. Aby nedocházelo k ovlivňování tuhnutí materiálu v okolí jádra z důvodu odlišné tepelné vodivosti kovu, byl tvar díry zaslepen modelovací hmotou. K tomuto zjednodušení tvaru jsem se uchýlil z důvodu zrychlení výroby formy a zjednodušení výpočtu simulace. Celkový čas zhotovení zbývajících částí formy cca 1,5 hod. (bez započtení času vytvrzování).



**Obr. 2.2-12** Výroba třetího dílu formy

Po vyjmutí posledního dílu silikonové formy ze skleněného rámu je forma složena a připravena pro odlití prvního zkušební kusu voskového modelu.



*Obr. 2.2-13 Zhotovené tři části formy*

## 2.2.3 Výroba voskových modelů

### 2.2.3.1 První voskový model

Odlití prvního voskového modelu slouží k identifikaci míst pro vytvoření průduchů a průfuků.

Silikonová forma nemá dostatečnou prodyšnost. Při odlévání je doporučeno vakuum -0,7 barů, i přes tuto hodnotu dochází při plnění silikonové formy voskem k uzavření vzduchu. Formu je vhodné odlévat nakloněnou tak, aby se vzduch přemístil do částí, do kterých budou pak zhotoveny průduchy.

Silikonová forma má být předehřána na určitou teplotu pro usnadnění zatékání vosku. Forma byla předhřívána po dobu 1 hod. v temperovací peci o teplotě 70°C.

Aby nedošlo k otevření formy během odlévání, ke vzniku výronků, je třeba jednotlivé díly vzájemně spojit. To se nejčastěji provádí pomocí kovových spon, popř. pomocí lepících pásek. Jednotlivé díly formy byly pospojovány pomocí spon po půlhodině ohřevu v komoře. Do licího otvoru byl umístěn licí trychtýř a forma vložena na další půlhodinu do temperovací komory.



**Obr. 2.2-14** Forma připravená k lití

Před vakuováním je třeba nechat vakuovou pumpu běžet 20 minut s otevřeným vzduchovým ventilem. Poté se provede nadávkování vosku a jeho tavení. Teplota lití vosku je v prvním případě 70 °C. Vosk je vakuován po dobu 20 minut při max. vakuu (-0,95 Bar).

Pro výrobu voskových modelů byl použit panenský plněný vosk A7-RT/26 od anglické společnosti Blayson.

Charakteristika použité voskové směsi:

- rychle tuhne a minimálním sklonem ke vzniku dutin
- vosk byl navržen pro rychlé tavení, minimalizaci vzniku napětí ve skořepinách při odvoskovávání
- minimální přilnavost
- dobrá tekutost
- vosk umožňuje regeneraci a rekonstrukci
- maximální doporučená teplota tavení 100°C

Typické vlastnosti:

- bod tuhnutí: 63 až 68 °C
- bod skápnutí: 64 až 69 °C

- doporučená teplota vstřikování v tekutém stavu: 68 až 72 °C
- doporučená teplota vstřikování v pastovitém stavu: 60 až 64 °C
- penetrace při 50g/10mm: 5 až 10
- obsah plniva 30 až 33 %
- viskozita při 90°C: 0,2 až 0,4 Pa.s
- střední tekutost
- typ plniva XLPS 40 – 100 µm
- obsah popela max.: 0,03 %
- volná lineární kontrakce: 0,6 až 0,8 %

Technická data k voskové směsi – příloha diplomové práce **P10**.

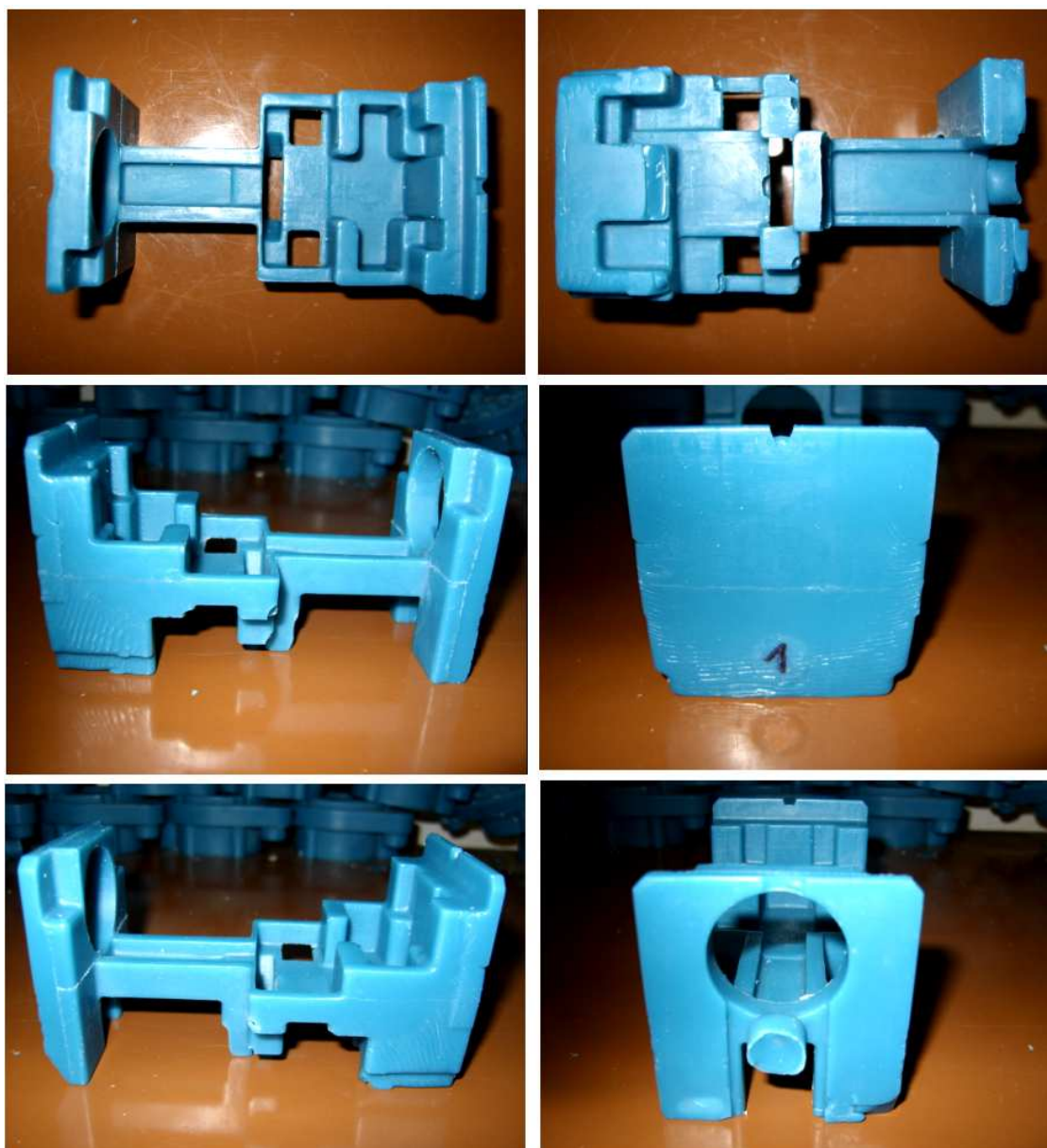
Po vyvakování vosku je do komory umístěna zahřátá silikonová forma. Proveďte se vakuování na max. hodnotu (- 0,95 Bar – 3 min), pak se tlak sníží na hodnotu – 0,6 Bar a provede se odlití manuálním nakloněním licího kelímku. Doba lití cca 2 minuty.



**Obr. 2.2-15** Odlévání voskového odlitku ve vakuové komoře

Po pěti minutách je komora zavzdušněna a forma vyjmuta. Podle velikosti odlitku a druhu materiálů a tloušťky stěny formy lze model vyjmout řádově několik hodin po odlití. Pro urychlení procesu chladnutí lze využít chladničku. Pro chlazení velkých forem lze uvažovat o zavedení vodního chlazení pomocí trubiček zalitých do formy. K optimalizaci chladicího systému bude možno využít simulaci.





**Obr. 2.2-16** První odlitý voskový odlitek, úhel sklonu formy 20°, čas lití cca 120 s, vakuum při lití -0,6 Bar, lící teplota voskové směsi 70 °C, teplota předehřátí formy 70 °C. Forma neprodyšná – bez průduchů.

Na základě polohy uzavřeného vzduchu byly do formy vyvrtány průduchy. Průduchy lze zhotovovat také pomocí injekčních jehel, kdy je pak jejich průměr menší, hladký, nedochází k takovému narušení povrchu formy jako při použití vrtáku. Pro materiál formy Silicast T4 je vnitřní průměr jehly 1 mm nedostatečný k vytvoření funkčního průduchů. Průduch vytvořený jehlou o průměru 1mm se po vytvoření samovolně uzavře. Lze předpokládat, že dostatečný vnitřní průměr jehly je cca 1,5 mm. Průduchy lze také předlévat. Při odlévání jednotlivých dílů formy se připraví kostra na kterou se umísťují do vhodné polohy drátky pro vytvoření průduchů. Drátky je třeba opatřit

separačním prostředkem pro snadné vyjmutí po ztuhnutí silikonu. Stejně tak pomocí kovových jader lze vytvářet dutiny v odlitku.



**Obr. 2.2-17** Zhotovení průduchů do silikonové formy

Průduchy lze doplnit o průfuky. Průfuky se zhotovují u složitějších tvarů odlitků, kdy hrozí nebezpečí poškození odlitku při vyjímání z formy vlivem vzájemného přilnutí. Vytvoří se plnou jehlou průměru cca 2 mm, kdy dojde k vytvoření otvoru, který se však po vytažení jehly samovolně uzavře a na rozdíl od průduchů (pomocí duté jehly dojde k odstranění silikonu o rozměru vnitřního průměru jehly) nám nesnižuje kvalitu povrchu odlitku. Při rozebírání formy se do průfuku přivede tlakový vzduch a dojde k odskočení formy od voskového modelu a tak k snadnému a bezpečnému vyjmutí. Byly vytvořeny čtyři průfuky ve středové části formy, kde byl model přichycen vlivem podtlaku.



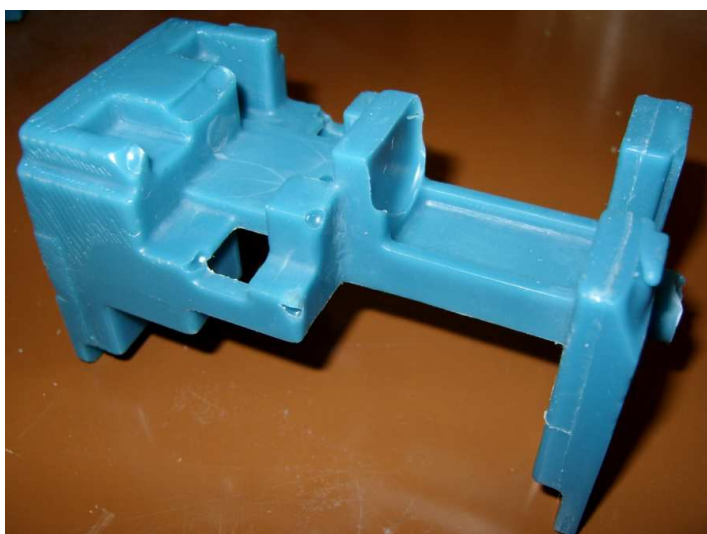
**Obr. 2.2-18** Vytváření průfuků v místech kde hrozí poškození odlitku při vyjímání z formy

***Vyhodnocení prvního kusu***

První voskový model sloužil pouze pro optimalizaci technologie lití. Podle poloh uzavřeného vzduchu byly vytvořeny průduchy. Ve středové oblasti modelu, který je značně členitý a složený z tenkých stěn, došlo při vyjímání k vytvoření podtlaku a model byl při vytahování nalomen. Proto byly ve středové části vytvořeny průfuky. Ve spodní části modelu (na druhé straně od licího otvoru) je patrný zvlněný povrch, studené spoje a nedolití místo. Je otázkou, zda je to způsobeno nízkou prodyšností formy (vzduch může unikat pouze přes netěsnosti v dělicí rovině) nebo nízkou teplotou přehřevu formy, popř. nízkou licí teplotou voskové směsi. S největší pravděpodobností jde o vliv všech faktorů. Druhý model bude odlit za stejných podmínek pouze se silikonovou formou, ve které byl vytvořen systém průduchů pro ověření jeho funkčnosti.



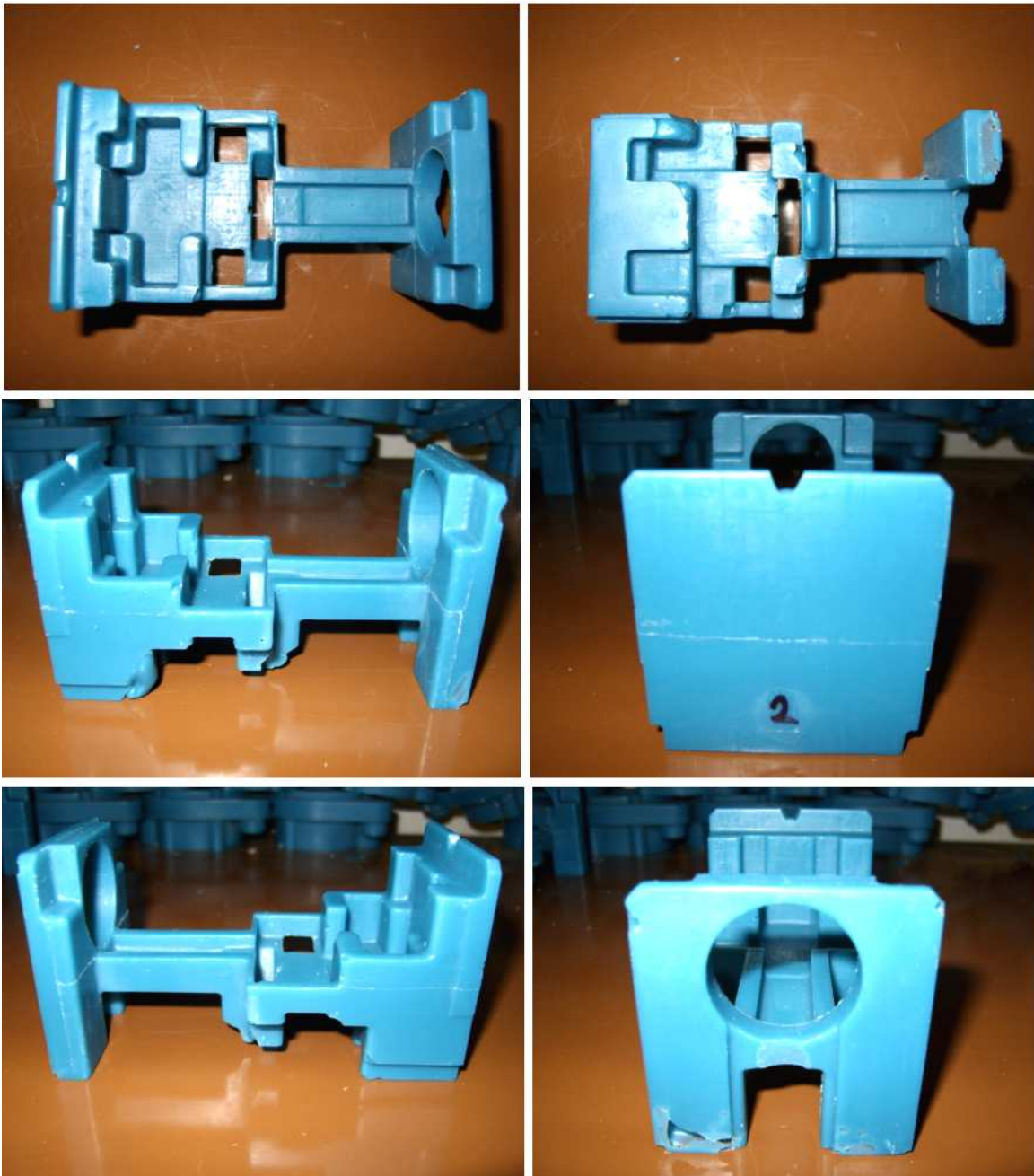
**Obr. 2.2-19** Na dolní straně modelu jsou patrné studené spoje a nedolití



**Obr. 2.2.20** Levá strana odlitku (vzhledem k poloze lití) obsahuje nepřipustné vady

### 2.2.3.2 Druhý voskový model

Před odlitím druhého kusu bylo předpokládáno, že vlivem zhotovení průduchů v kritických místech, dojde již k správnému vyplnění celé dutiny formy bez nutnosti měnit teplotu přehřevu či vosku.



**Obr. 2.2-21** Druhý odlitý voskový model, úhel sklonu formy 20°, čas lití 90 s, vakuum při lití -0,6 Bar, licí teplota voskové směsi 70 °C, teplota přehřátí formy 70 °C. Forma prodyšná – s průduchy.

**Vyhodnocení druhého kusu**

Díky průduchům došlo ke zmenšení oblastí uzavřeného vzduchu. Byla odstraněna i tzv. „kůže“ ve spodní části modelu. Tvar modelu, ale stále není dostatečný proto bude odlit třetí kus za vyšší licí teploty vosku (75°C), za vyššího předehřátí formy (80°C) a za vyššího vakua (0,7 Bar).



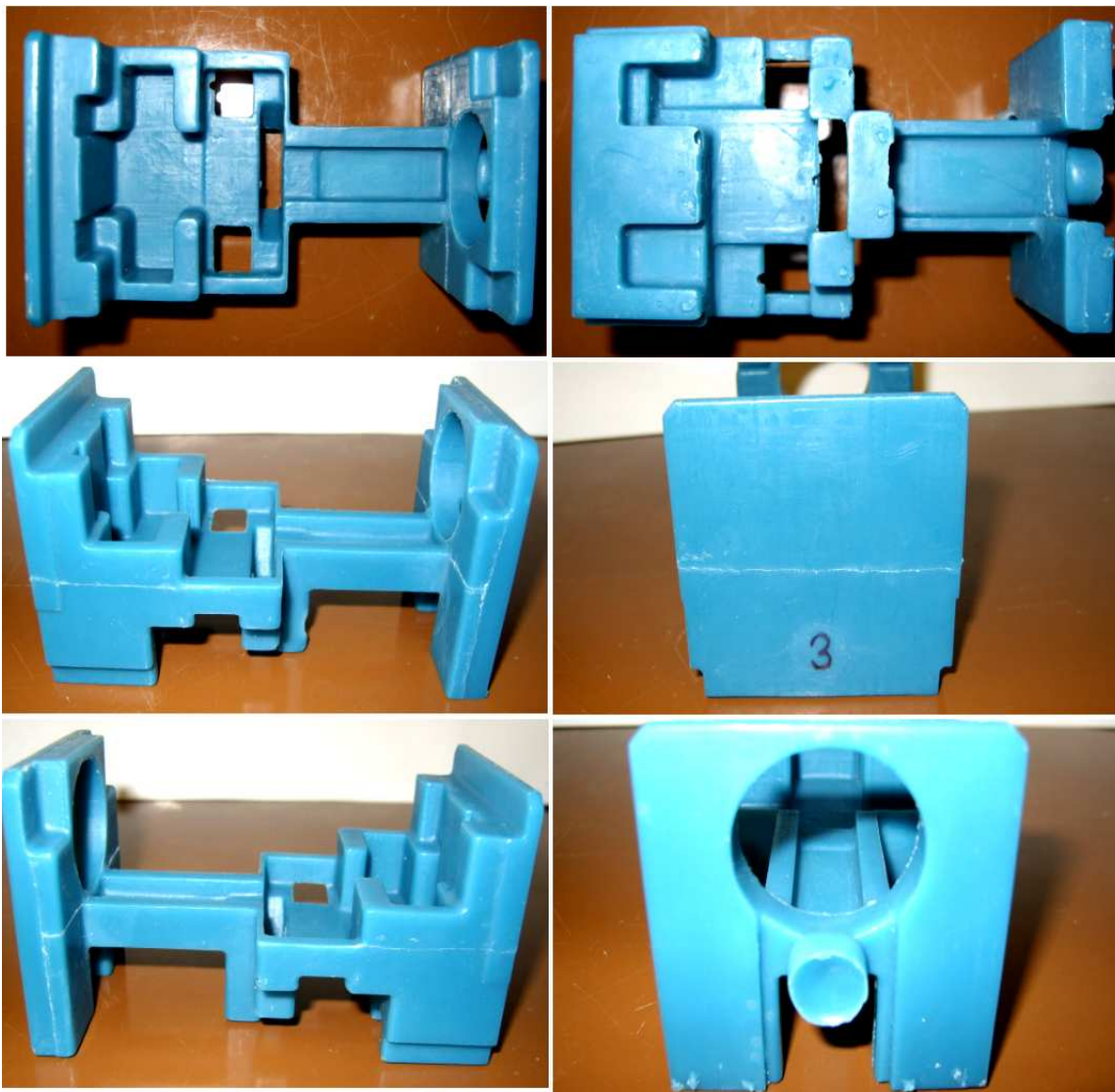
**Obr. 2.2-22** Spodní strana modelu č.2 již neobsahuje „pomerančovou kůru,, je třeba ještě odstranit nedolitě místo, levá strana modelu č.2



**Obr. 2.2-23** Porovnání modelu č.1 a modelu č.2 v kritické levé části

### 2.2.3.3 Třetí voskový model

Třetí kus odlitý z vyšší lící teploty do více předeřtáče formy obsahuje pouze drobné vady, které lze snadno opravit ručním zapravením vosku, začištěním. Obsahuje pouze jednu nepřijatelnou vadu ve střední části modelu.



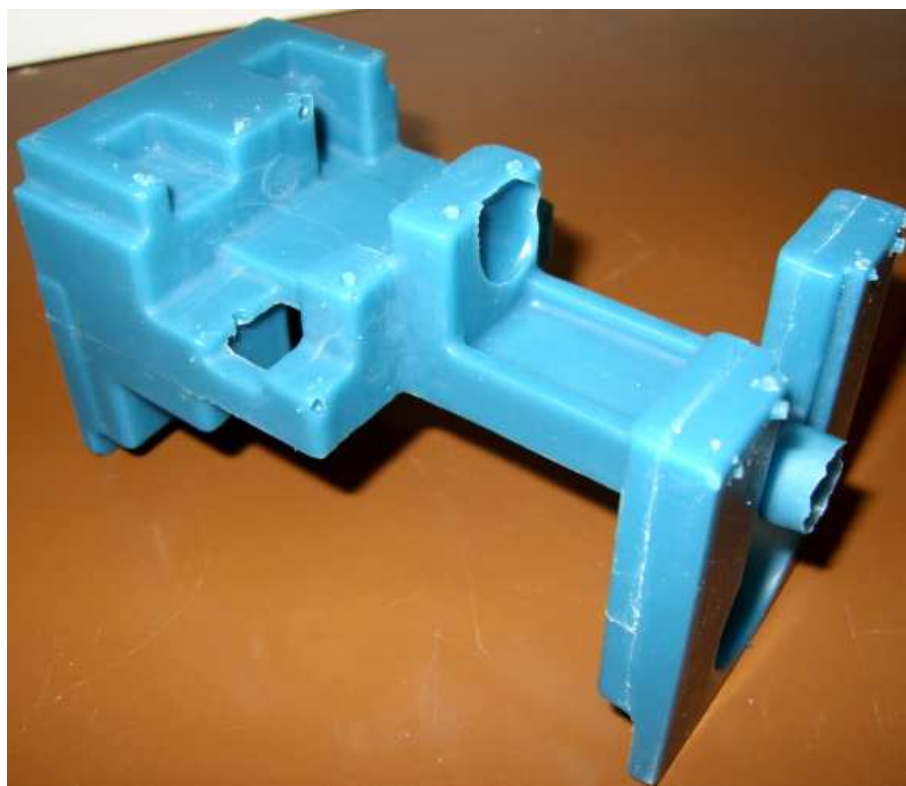
**Obr. 2.2-24** Třetí odlitý voskový odlitek, úhel sklonu formy 20°, čas lití 90 s, vakuum při lití -0,7 Bar, lící teplota voskové směsi 75 °C, teplota předeřtáče formy 80 °C. Forma prodyšná – s průduchy.

#### Vyhodnocení třetího kusu

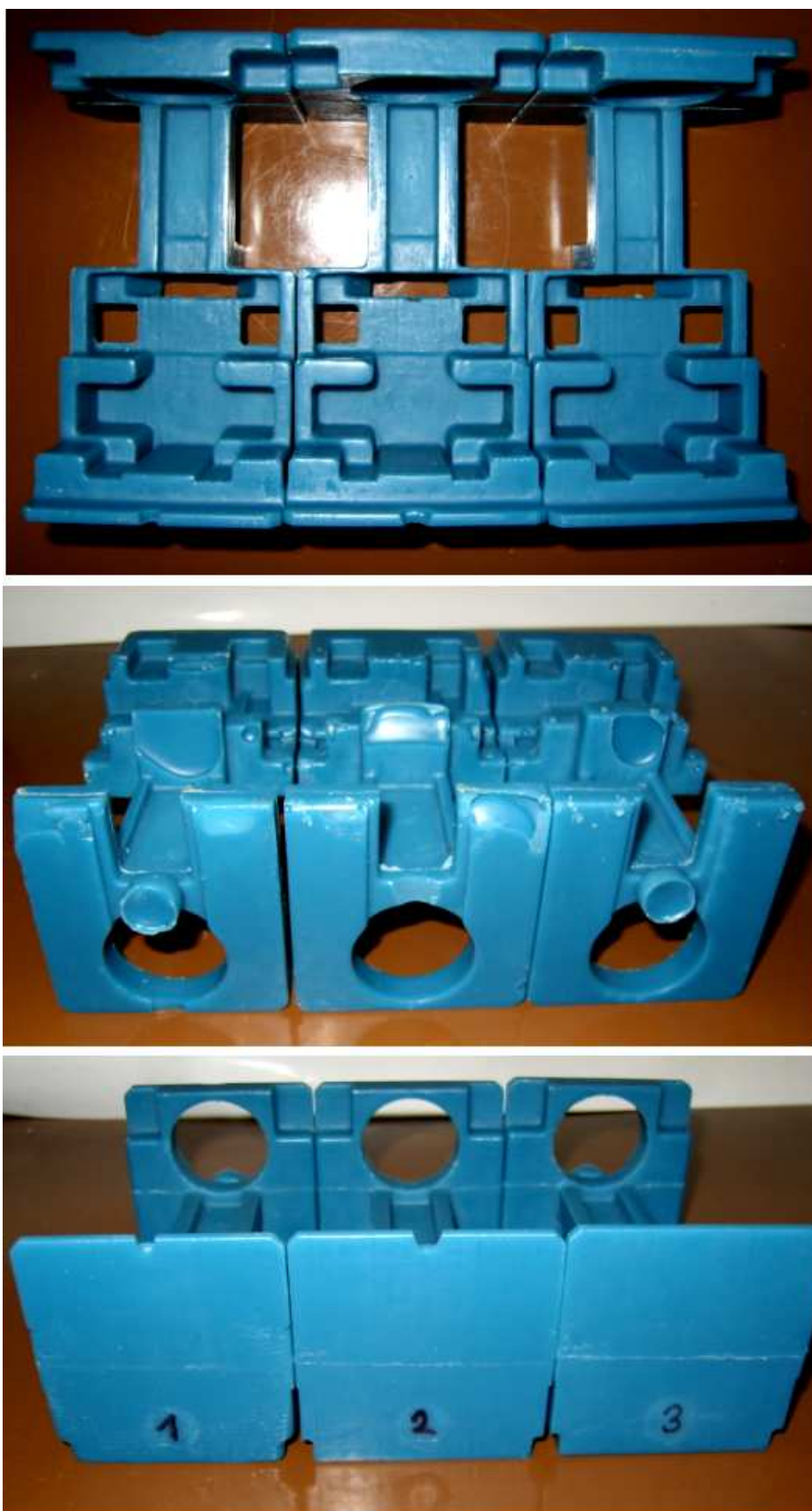
Třetí model lze po několika ručních opravách použít pro výrobu skořepinové formy. Nepřijatelná je vada v středové části. Vada by měla být odstraněna zvětšením průduchů či zvýšením teplot, popř. změnou polohy vtoku (umístění vtoku nad vadu).



**Obr. 2.2-25** Spodní strana modelu č.3 splňuje kvalitativní požadavky



**Obr. 2.3-26** Levá strana modelu č.3 obsahuje nepřijatelnou vadu ve středové části



*Obr. 2.3-27 Porovnání modelů č. 1, 2, 3*



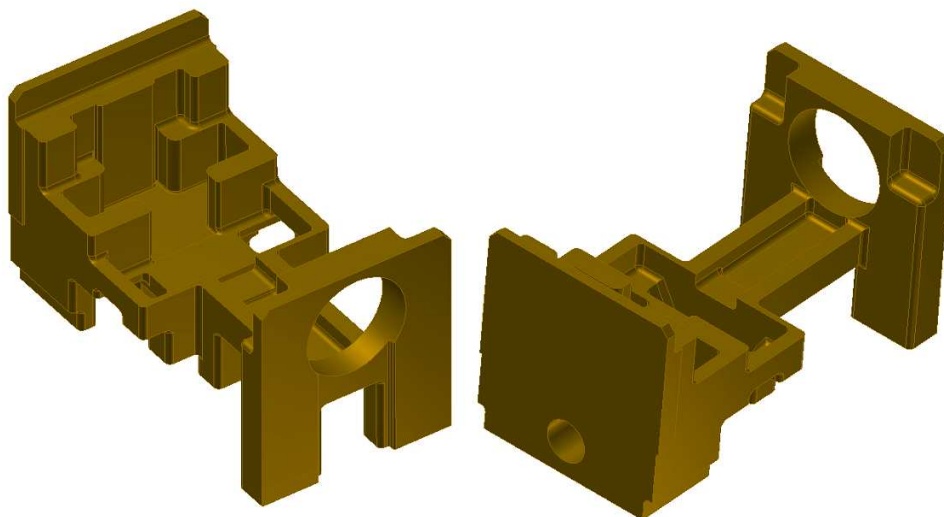
## 2.3 Simulace plnění silikonové formy pro voskový model „C“

### 2.3.1 Preprocessing

#### 2.3.1.1 MeshCAST

##### 1) Načtení formátu

Odlitek, který bude simulován v diplomové práci je vyráběn ve slévárně přesného lití FIMES, a.s. jež patří do společnosti MESIT. Počítačový model odlitku vedeného ve výše jmenované společnosti pod označením 019 – C 002 CROWN CENTRE byl nakreslen v Pro/Engineer. Geometrii jsem obdržel v datovém formátu .step, který lze načíst do ProCASTU (**Obr. 2.3-1**).

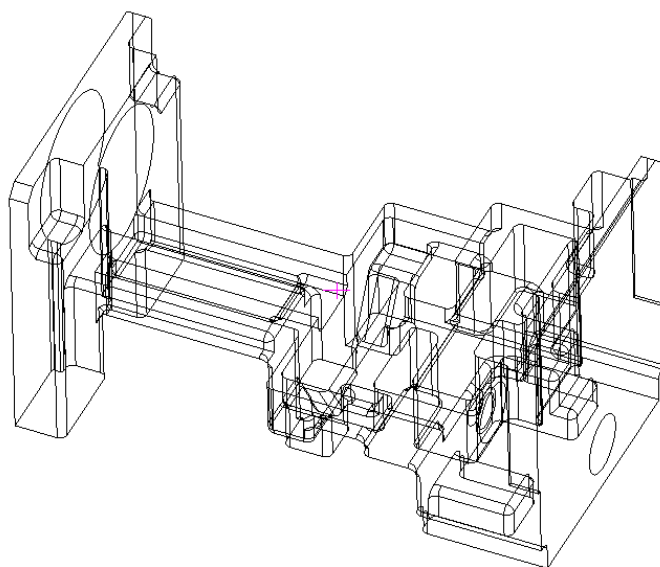


**Obr. 2.3-1** Dva pohledy na 3D model odlitku vyráběného ve společnosti Fimes, a. s. v datovém formátu .step

Po konverzi z formátu .step do formátu .gmrst, se kterým se pracuje v MeshCASTU se vyskytla neočekávaná chyba.

Při konverzi byly nastaveny potřebné parametry (jednotky, tolerance), ale přesto došlo k chybnému nastavení rozměrů modelu. Na chybu nebylo upozorněno v Message Windows (okno kde se zobrazují všechny prováděné operace) a byla zjištěna později, náhodně při měření délky hrany. Proto byl model z formátu .step načten do softwaru GeoMesh. GeoMesh je speciální software sloužící především pro úpravu povrchové meshe, ale také pro konverzi různých formátů. Po přeložení z původního formátu .step do formátu .step v GeoMeshi a opětovném načtení do MeshCASTU byly již rozměry korektní.

Tato „nehoda,, je typickou ukázkou, že i „jeden formát,, z různých zdrojů může být různě načten, k čemuž by samozřejmě docházet nemělo.

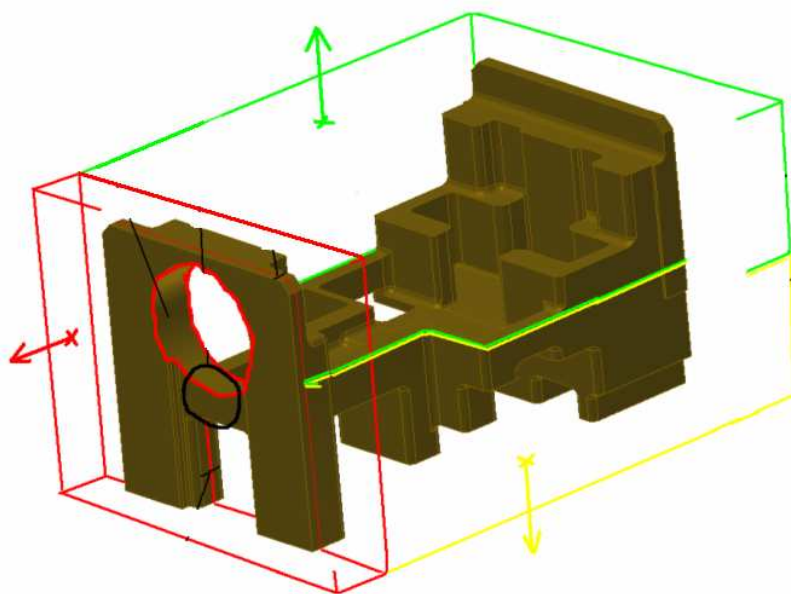


**Obr. 2.3-2** „Drátový,, model načtený v MeshCASTu

## 2) Úprava geometrie

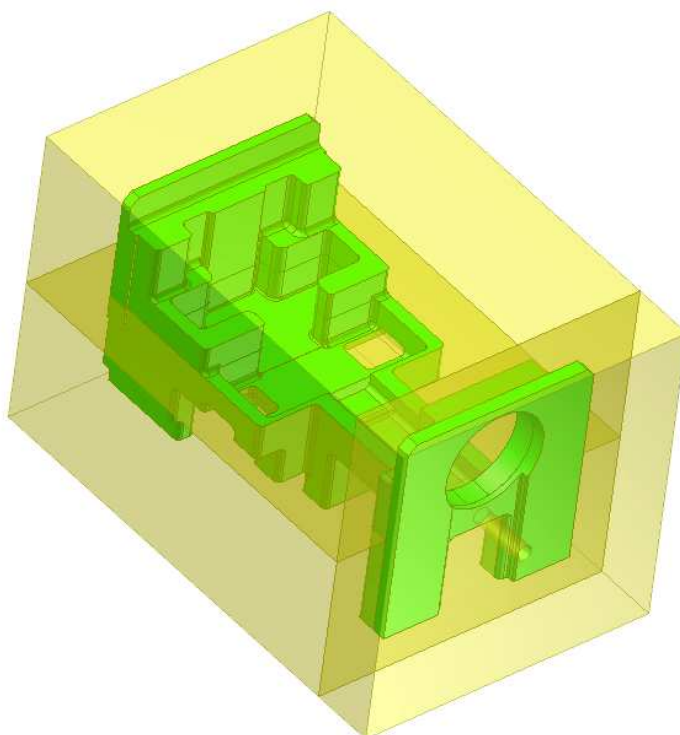
Pro výrobu voskového modelu pomocí vakuového lití do silikonové formy bylo rozhodnuto o zjednodušení geometrie odlitku, které spočívalo v nepředlévání menší díry (průměru 12,7 mm). Menší díra byla v MeshCASTu odstraněna.

Dále muselo být rozhodnuto zda bude model odlitku doplněn o model formy. Model formy není pro simulaci plnění nezbytně nutný (lze použít také tzv. virtuální formu), ale v rámci názornosti a ještě ne zcela upřesněných možností následného využití simulace bylo rozhodnuto o dokreslení modelu formy. Forma byla zvolena třídílná s ohledem na tvar odlitku (**Obr. 2.3-3**).



**Obr. 2.3-3** Návrh formy, dělicí roviny

Prvotní nápad , dokreslení geometrie formy v MeshCASTu se neukázal jako nejvhodnější. MeshCAST je určen pouze pro drobné korekce geometrie čemuž odpovídá množství dostupných funkcí a uživatelské prostředí. Model formy byl proto vytvořen v Pro/Engineeru pomocí Booleanovských operací, odečtením modelu odlitku od kvádru a následném rozdělení kvádru na tři části (**Obr. 2.3-4**).

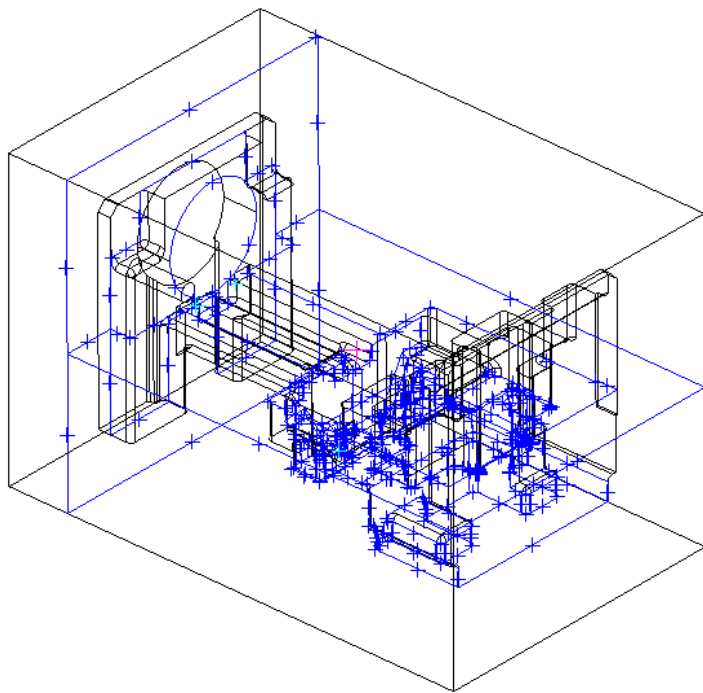


**Obr. 2.3-4** 3D model voskového modelu a formy složené ze tří částí

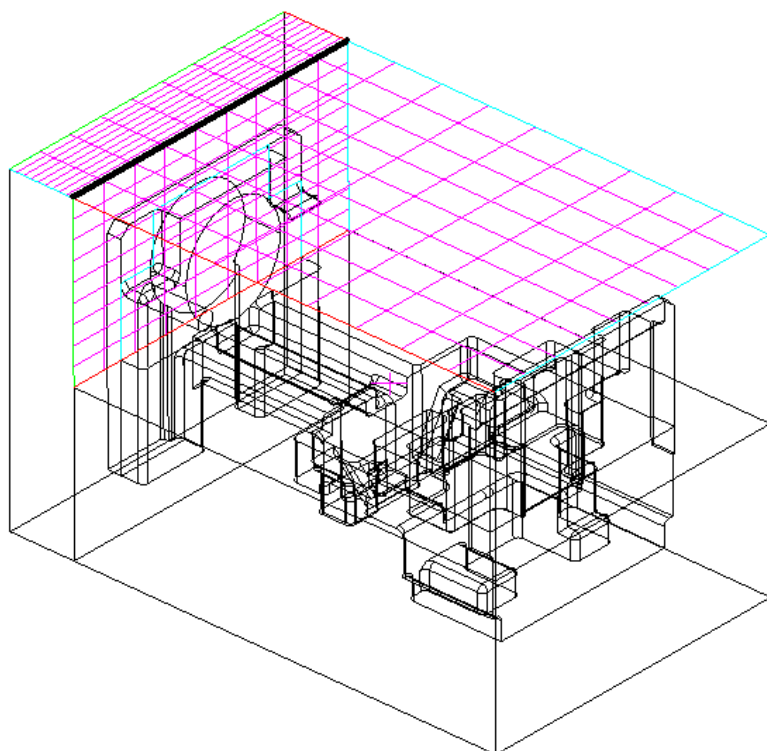
Model i s formou byly načteny do MeshCASTu (viz. první krok **A1**), kde probíhala následná korekce. V prvním stádiu jsou opravovány čáry objektů (tzv. dráty). Je třeba umazat zdvojené, nenavazující či jinak deformované dráty.

### **3) Oprava ploch**

Dále je třeba zkontrolovat stav a počet ploch, které náležejí jednotlivým hranám. Každé hraně musí náležet nejméně dvě plochy (**Obr. 2.4-5** a **Obr. 2.4-6**).

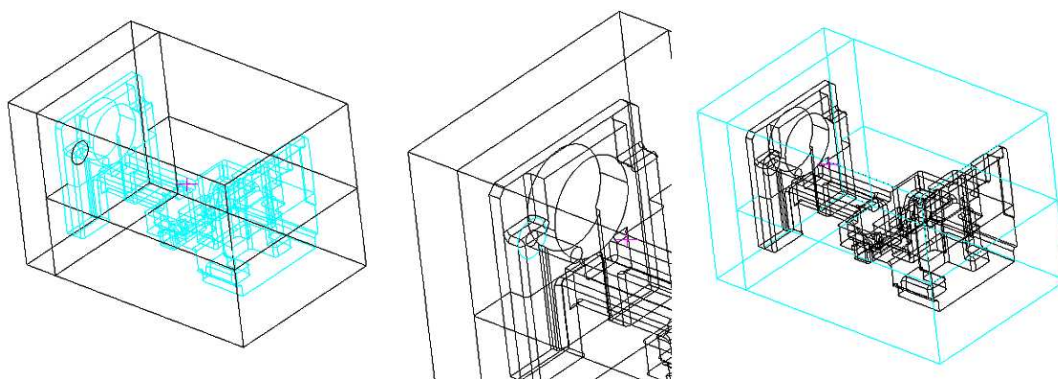


**Obr. 2.3-5** Hrany, které mají jiný počet ploch než dvě, jsou barevně odlišeny

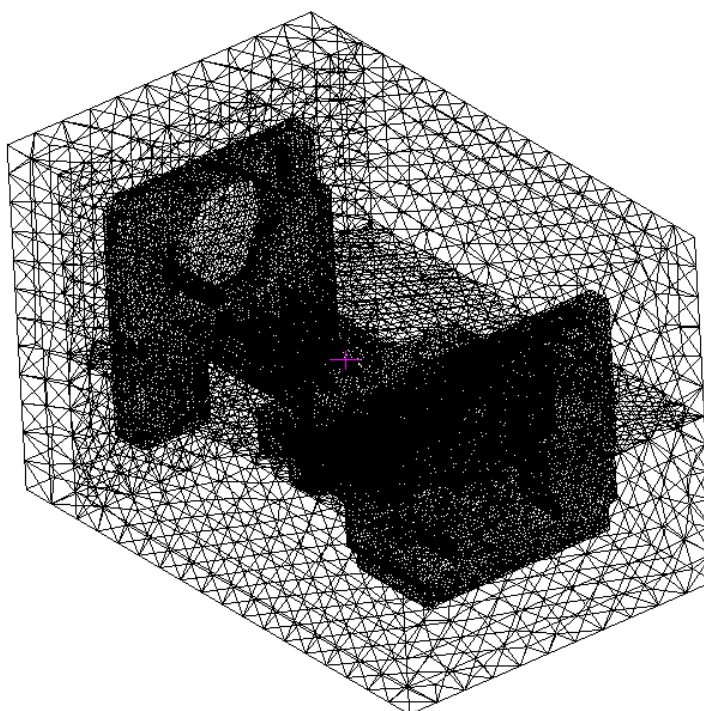


**Obr. 2.3-6** Zobrazení ploch, které náležejí zvýrazněné hraně

Když všem drátům náleží správný počet ploch, je třeba vytvořit jednotlivé EDGE\_SETy a zadat jim správnou délku. EDGE\_SETy jsou skupiny čar a jim příslušných ploch s určitými vlastnostmi (**Obr. 2.3-7**). Po vytvoření povrchové mesche budou jednotlivé plochy tvořeny trojúhelníčky, jejíž velikost je dána délkou EDGE\_SETů (**Obr. 2.3-8**). Je třeba zvolit optimální délku, respektive hrubost mesche (trojúhelníků) pro korektní přesnost výpočtu určené oblasti EDGE\_SETu. Čím vyšší přesnost výpočtu je požadována tím jemnější je mesh (tím drobnější jsou trojúhelníčky). S rostoucí přesností výpočtu (s klesající velikostí trojúhelníků) roste výpočtový čas. Pro zkrácení výpočtových časů je třeba správně zvolit oblasti, kde může být použita mesh hrubší při zachování dostatečné přesnosti výpočtu. V simulaci byly zvoleny tři EDGE\_SETy a to s nejmenší délkou pro oblast odlitku, se střední délkou v okolí vtokového otvoru a s největší délkou pro oblast formy.

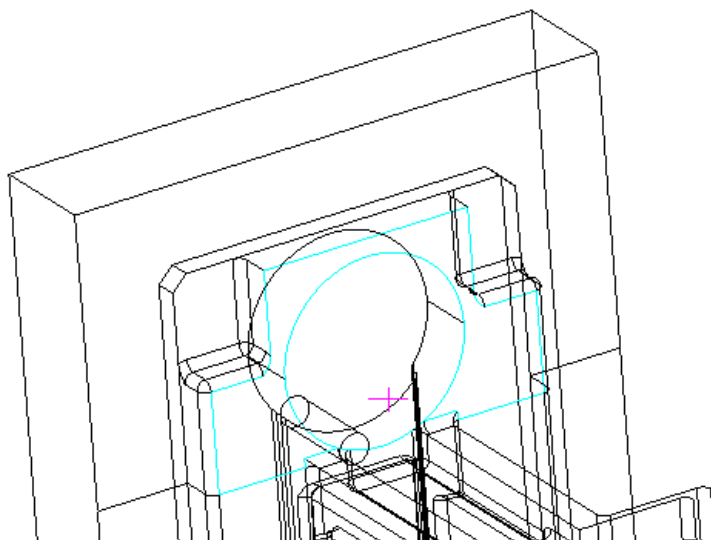


**Obr. 2.3-7** Jednotlivé EDGE\_SETy jsou zobrazeny modrou barvou



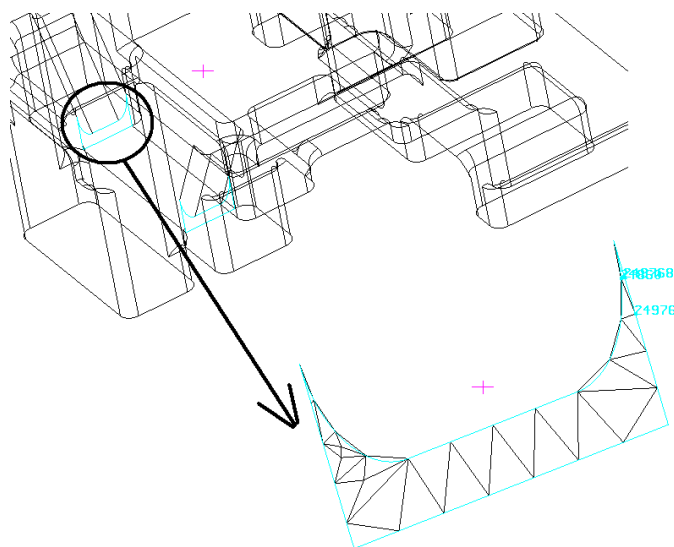
**Obr. 2.3-8** Povrchová mesh těles

Po rozdělení modelu do jednotlivých EDGE\_SETŮ je poprvé spuštěno generování povrchové meshe – generování trojúhelníků jimiž je povrch popsán. Při generování povrchové meshe může dojít ke vzniku chyb, a to dvojího druhu. Prvním druhem je nevygenerování povrchové meshe v určité ploše (**Obr. 2.3-9**). Tato chyba je většinou způsobena nevhodným tvarem ploch, špatně přiřazenými hranami nebo špatně zvolenou délkou EDGE\_SETŮ.



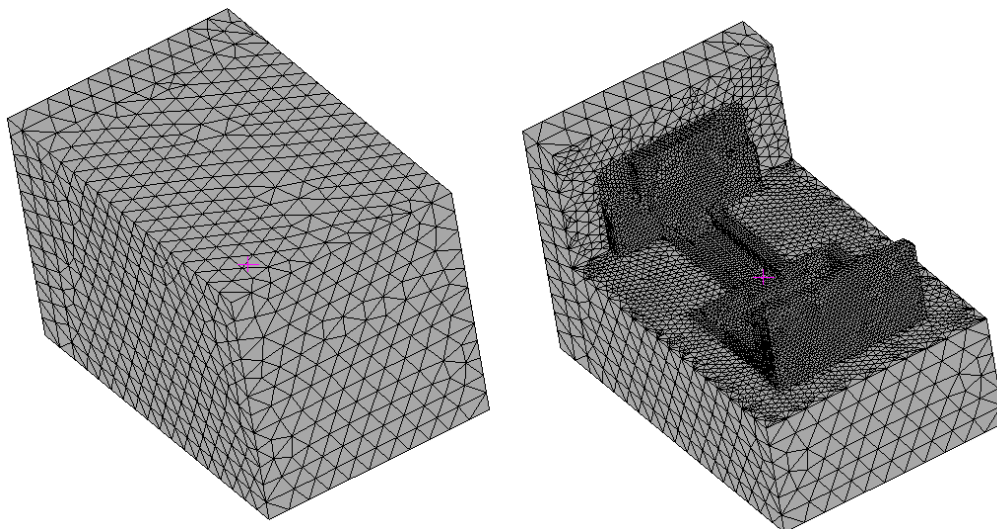
**Obr. 2.3-9** Modře zvýrazněná plocha nebyla zmešována

Druhou skupinu tvoří špatně zmešované oblasti (**Obr. 2.3-10**). Vznikají u nevhodných tvarů, jako jsou malé úzké oblasti, kam lze obtížně vepsat trojúhelník žádaného tvaru. Řešením je buď geometrická úprava daného tvaru, změna délky EDGE\_SETŮ či následné ruční vepsání trojúhelníku.



**Obr. 2.3-10** Špatně zmešovaná plocha

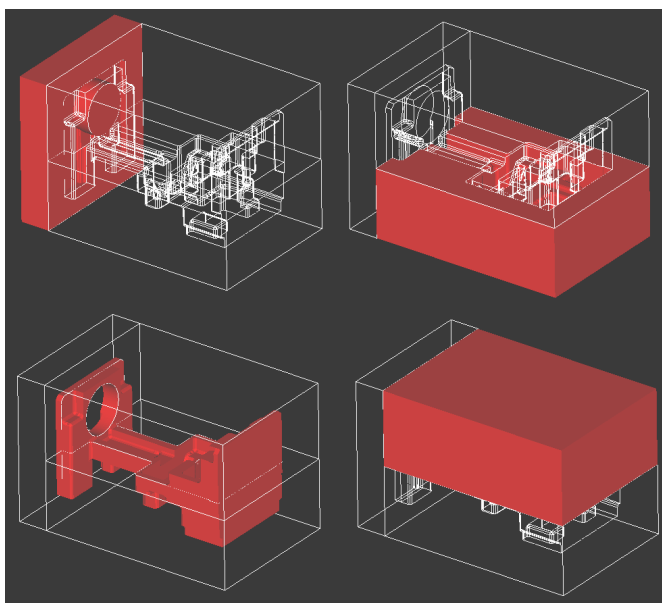
Bezchybně připravená mesh je první z mnoha podmínek, které musí být splněny pro provedení dobré simulace (**Obr. 2.3-11**). Vytvořením povrchové meshe vznikne soubor s koncovkou .mesh .



**Obr. 2.3-11** Povrchová mesh v režimu zobrazení Solid

#### 4) Objemová mesh

V dalším kroku se přechází do modulu výpočtu objemové meshe. Zde jsou vytvořeny jednotlivé objemy. Objem je oblast vymezená plochami, zpravidla lišící se buď materiálem, který bude objem obsahovat, nebo kvalitou meshe. V tomto kroku je ještě možné korigovat stav povrchové meshe. Vzniká soubor s koncovkou .sm (**Obr. 2.4-12**).



**Obr. 2.4-12** Jednotlivé objemy – odlitek a forma ze tří částí

Tímto krokem se uzavírá oblast Preprocessingu tykající se přípravy geometrie a generování meshe (modul MeshCAST). Následuje fáze preprocessoru ProCAST, kde proběhne samotné nastavení výpočtů simulace.

```
.gmrst
.mesh
.sm
```



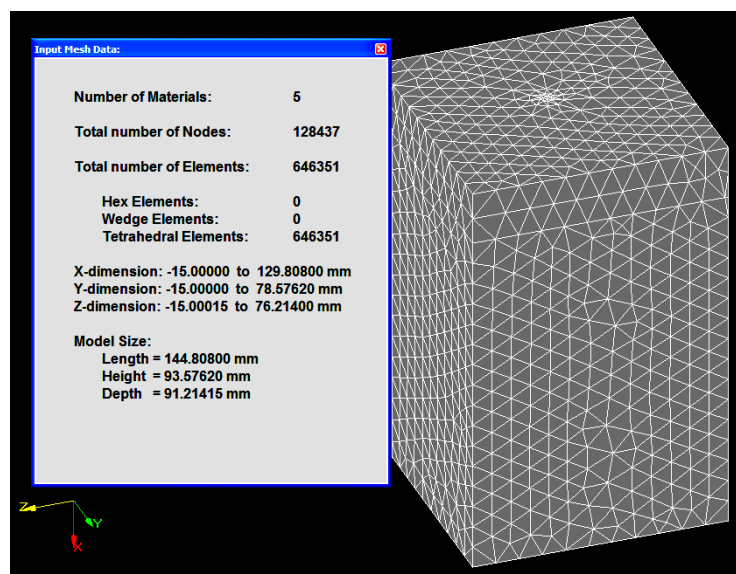
**Obr. 2.3-13** Přechod do modulu PreCAST

### 2.3.1.2 PreCAST

K simulaci plnění a chladnutí vosku do silikonové formy nejsou známy žádné bližší údaje. Ani na internetu bylo nalezeno, že by se někdo již touto problematikou zabýval.

Po načtení dat ve formátu .mesh do modulu PreCAST je zobrazena tabulka udávající základní vstupní informace (**Obr. 2.3-14**):

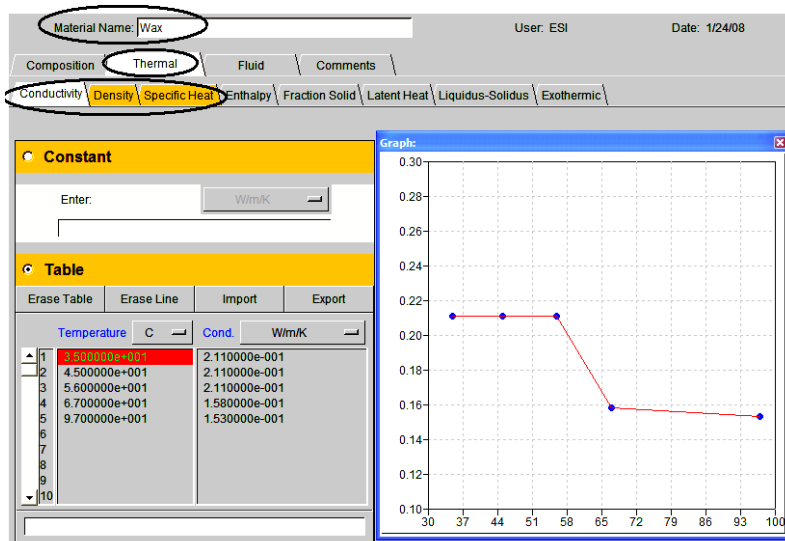
- počet oddělených objemových oblastí : 5
- celkový počet uzlových bodů : 128 437
- celkový počet elementů : 646 351
- rozměry dílu v souřadných osách: X, Y, Z
- rozměry dílu jako : délka, výška, šířka



**Obr. 2.3-14** Tabulka vstupních údajů







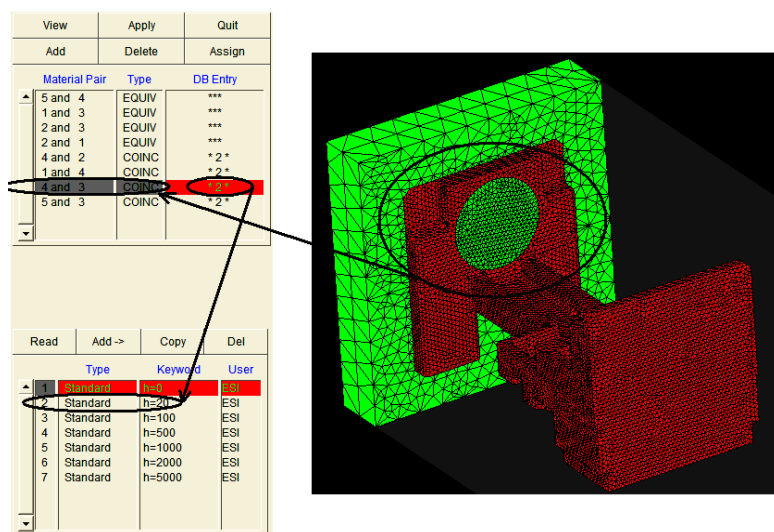
**Obr. 2.3-17** Veškerá data dostupná k vosku v databázi ProCASTu 2008

Materiálové vlastnosti pro silikonovou formu nejsou k dispozici v databázi žádné a musí být pro provedení simulace zcela zadány (viz kapitola 2.4.1.2 A)).

## 2) Definování rozhraní

Dále je třeba definovat Interface, tj. vlastnosti ploch (domén) mezi jednotlivými objemy modelu.

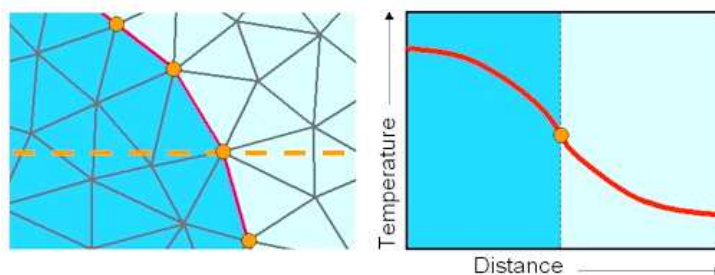
Při generování v MeshCASTu mohou být vygenerovány elementy, jež mohou náležet ploše, která tvoří rozhraní mezi dvěma objemy. Jednotlivým materiálovým rozhraním je třeba přiřadit typ rozhraní, tj. EQUIV, CONIC nebo NCONIC (**Obr. 2.3-18** až **Obr. 2.3-21**).



**Obr. 2.3-18** Definice Interface

## a) Typ rozhraní EQUIV (ekvivalentní)

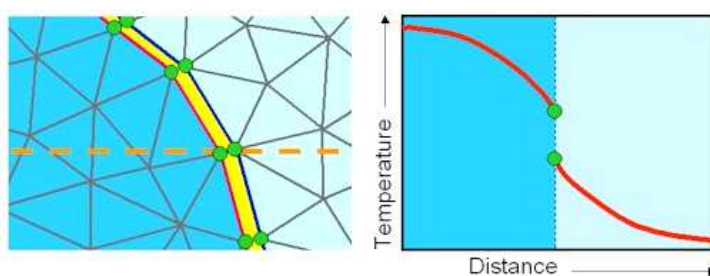
- se použije pokud dvě domény jsou součástí jedné entity (např. obě entity patří do oblasti odlitku, jejich oddělení zmešování proběhlo pouze z technických důvodů) (**Obr. 2.3-19**). Pro výpočet to znamená, že bude kontinuální přechod mezi oběma doménami (kontinuální přechod teplotního a rychlostního profilu).



**Obr. 2.3-19** Rozhraní EQUIV

## b) Typ rozhraní CONIC (koincidentní)

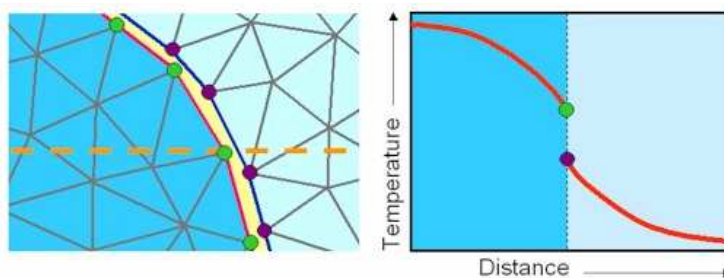
- pro rozhraní mezi dvěma rozdílnými materiály (např. mezi odlitkem a formou), kde je obvykle teplotní skok (**Obr. 2.3-20**). Po přiřazení tohoto typu jsou nody zdvojeny z důvodu oddělení výpočtu rozdílných teplot.



**Obr. 2.3-20** Rozhraní CONIC, žlutá plocha je pouze pro názornost (má nulovou tloušťku)

## c) Typ rozhraní NCONIC (nekoincidentní)

- elementy na obou doménách nejsou spojeny do stejného bodu (nodu), (**Obr. 2.3-21**). Tohoto typu se využívá při společném meshování rozdílných meshí.



**Obr. 2.3-21** Rozhraní NCONIC

Dále byl zadán součinitel přestupu tepla  $h$  ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ) mezi koincidentními (popř. NCONIC) oblastmi. Lze jej nadefinovat jako konstantu, časovou závislost nebo pomocí libovolné uživatelské funkce. Pro přestup tepla mezi voskovým odlitkem a silikonovým materiálem byla zvolena hodnota  $h = 20 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ .

### 3) Definování okrajových podmínek

Okrajové podmínky jsou parametry, které pomáhají definovat konkrétní slévárenský proces. Okrajové podmínky jsou rozděleny dle místa aplikace na:

a) Okrajové podmínky definované na plochu

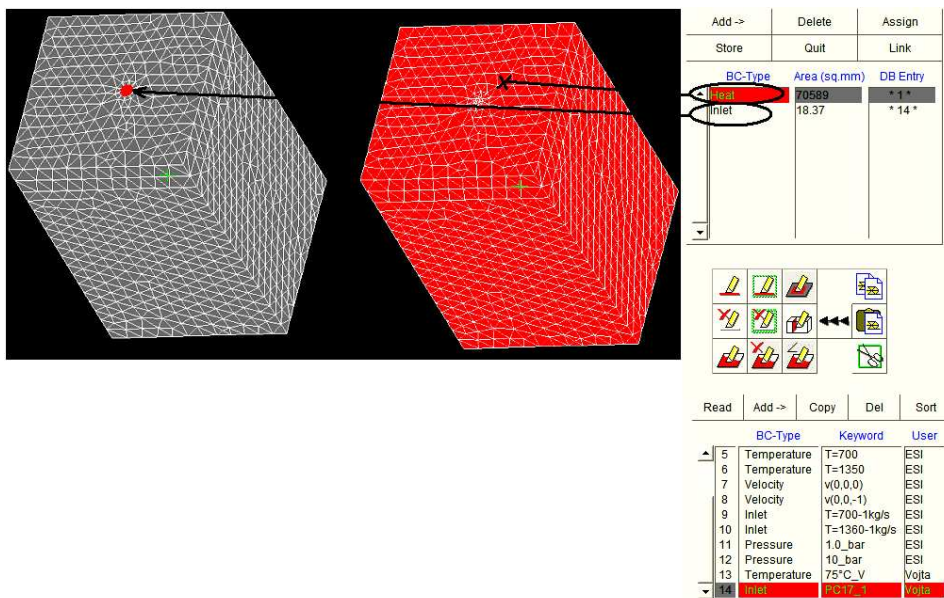
- symetrie, periodičita, teplota, teplo, rychlost, tlak, inlet, stěna, průduch, vstřík, turbulence, nahrazení, bodové zatížení, plošné zatížení, proudová hustota, napětí, magnetický potenciál, nukleace

Byly zadány podmínky (**Obr. 2.3-22**):

Teplo – chlazení na vzduchu na celý vnější povrch formy, při teplotě okolí 20°C a součiniteli přestupu tepla  $h = 1 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$

Teplota – teplota voskové směsi 75°C

Rychlost – rychlost lití 62 mm/s



**Obr. 2.3-22** Zadání okrajových podmínek definovaných na plochu

b) Okrajové podmínky definované na objem

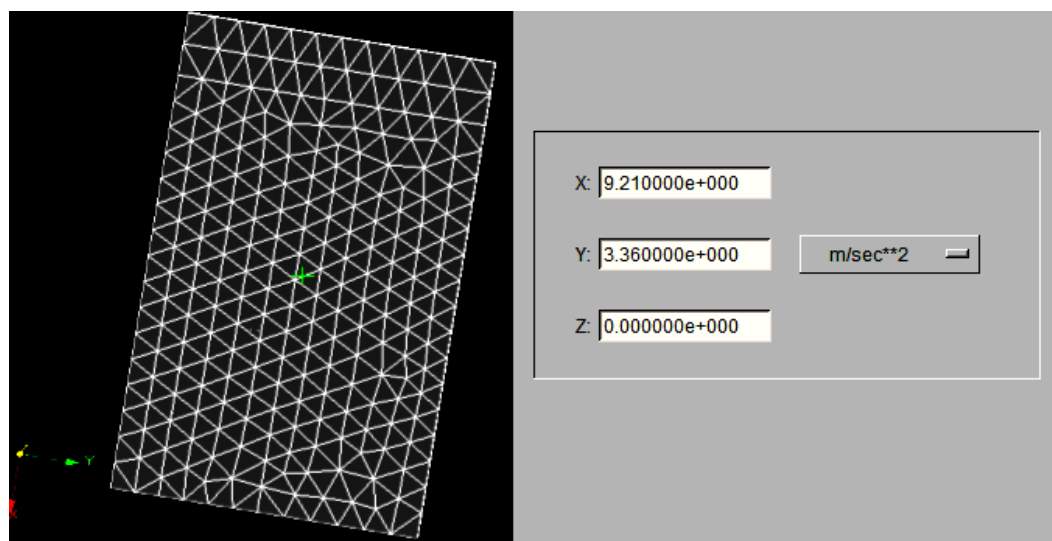
Objemové teplo, povrchové teplo, momentový zdroj, objemový zdroj, teplo filtru. Z těchto okrajových podmínek nebylo třeba aplikovat žádnou.

c) Okrajové podmínky definované na tzv. enclosure (virtuální těleso vytvořené kolem odlitku)

Jsou podmínky sloužící k popisu tepelné radiace

#### 4) *Gravitace*

Byl nastaven vektor gravitace podle polohy formy při lití – sklon formy 20° (**Obr. 2.3-23**).



**Obr. 2.3-23** Definování vektoru gravitace

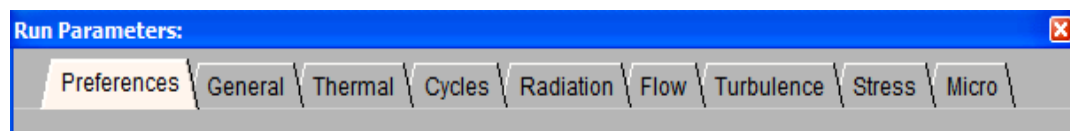
#### 5) *Počáteční podmínky*

Počáteční teplota silikonové formy: 75 °C

Počáteční teplota vosku (licí teplota): 75 °C

#### 6) *Výpočtové parametry*

Umožňují bližší specifikaci výpočtu, ošetření možných situací. Pro jednotlivé slévárenské procesy jsou vždy stěžejní pouze některé parametry (**Obr. 2.3-24**).



**Obr. 2.3-24** Modulové uspořádání výpočtových parametrů

Uspořádání výpočtových parametrů je opět modulové:

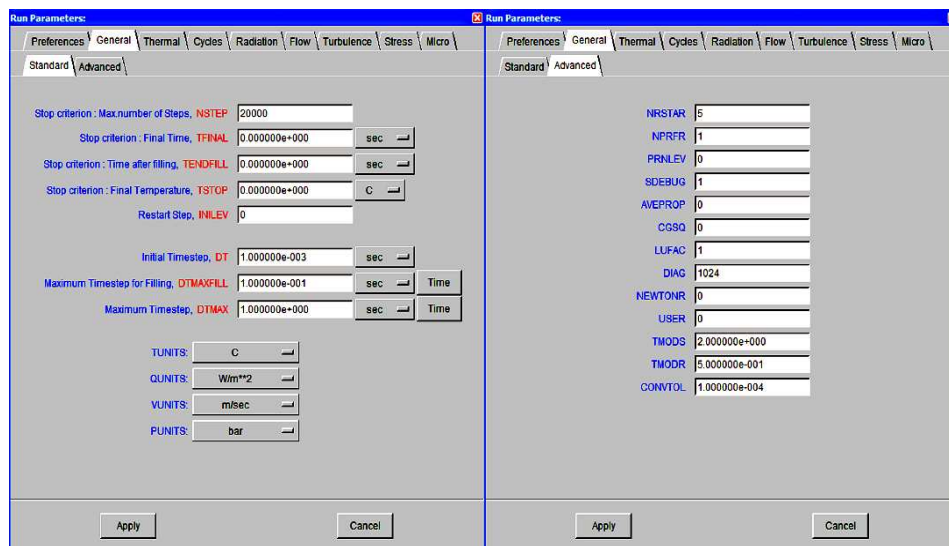
#### a) Preference

Je modul, který umožňuje zvolit slévárenskou metodu a tím automaticky přednastavit vhodné parametry: defaultní obecné nastavení, gravitační lití, (simulace teplotního pole), gravitační lití (simulace plnění), vysokotlaké lití (cyklování formy), vysokotlaké lití (simulace plnění), nízkotlaké lití (simulace plnění), sklopné lití, odstředivé lití.

Bylo zvoleno předběžné nastavení parametrů pro gravitační lití.

#### b) Obecné parametry

V této skupině parametrů je možné definovat kritéria pro velikost výpočtových kroků, pro ukončení výpočtu a nastavit jednotky, v níž budou zobrazovány výsledky simulace (**Obr. 2.3-25**).



**Obr. 2.3-25** Obecné výpočtové parametry se dále rozdělují na Standardní a Pokročilé

Z důvodu neznámé výpočtové náročnosti bylo předběžně nastaveno stop kritérium na dvě vteřiny po ztuhnutí odlitku nebo na celkový maximální počet výpočtových kroků 200 000.

Ostatní kritéria a jednotky byly ponechány defaultní.

#### c) Tepelné parametry

Umožňují nastavit hodnoty týkající se simulace tuhnutí materiálu (např. parametry týkající se porosity, frekvence ukládání vypočtených kroků, ... ). Dělí se dále na základní a pokročilé.

Pro první předběžnou simulaci bylo ponecháno defaultní nastavení.

## d) Cyklování

Umožňují optimalizovat simulaci teplotního pole forem při opakovaném ostříknutí.

Pro moji simulaci nemají význam a byly ponechány vypnuté.

## e) Radiace

Parametry umožňující optimalizaci ovlivňování odlitků tepelným sáláním.

## f) Proudění

Slouží především k definici vlastností materiálu souvisejících s plněním odlitku.

Byl aktivován parametr NNEWTON jež definuje neneutonský způsob proudění materiálu, kdy viskozita je funkcí smykové rychlosti.

## g) Turbulence

Umožňuje optimalizaci proudění.

## h) Napětí

Parametry tykající se napětí v odlitku.

## ch) Mikrostruktura

Parametry používané při simulaci mikrostruktury odlitku.

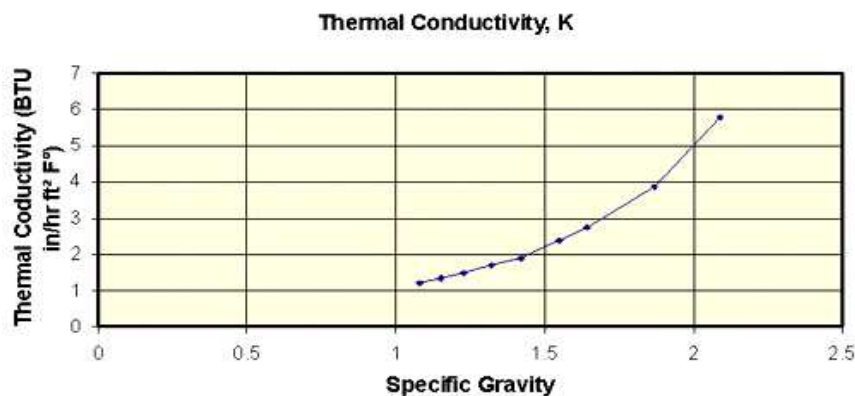
**A) Dostupné vlastnosti silikonu**

Pro výrobu formy byl použit silikonový elastomer SILASTIC T-4 a tvrdidlo T-4 O. Popis materiálu je v kapitole **1.6.1** a v přílohách **P7, P8, P9**.

Nezbytné parametry k provedení simulace jsou :

## 1) Tepelná vodivost

Tepelná vodivost se u silikonů SILASTIC se běžně pohybuje mezi 0,2 až 0,7  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ , u speciálně upravených elastomerů zhruba do 2  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$  (**Graf. 2.4-1**).



**Graf. 2.4-1** Závislost tepelné vodivosti silikonů SILASTIC na měrné hmotnosti [38]

## 2) Hustota formovací směsi

Hustota základní složky SILASTIC T-4 je:  $1100 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$

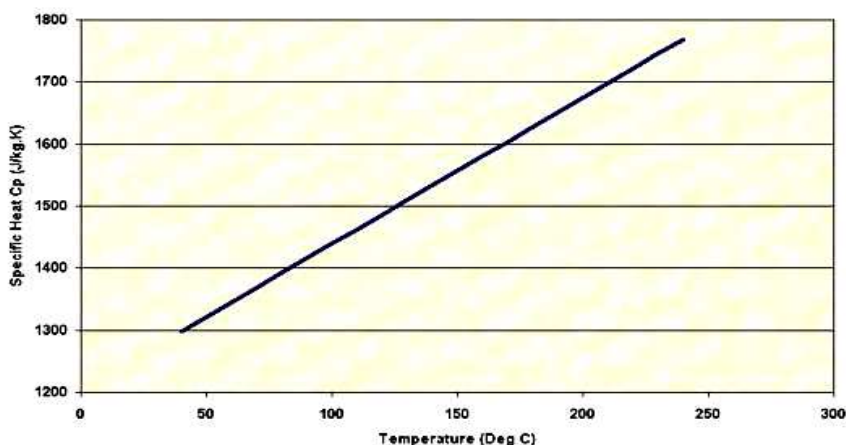
Hustota vytvrzovacího činidla T-4 O je:  $960 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$

Hustota výsledné směsi, při poměru míchání 100 : 10 je:  $1087 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$

Hustota do PreCASTu byla zadána:  $1100 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$

## 3) Specifické (měrné) teplo

Specifické měrné teplo SILASTICů je v oblasti od 0,28 do 0,35  $\text{cal} \cdot \text{g} \cdot ^\circ\text{C}$ . Tvrdší silikony (60 a více jednotek tvrdosti podle Shoreho) se většinou pohybují v dolní oblasti intervalu a měkčí pak v horním (**Graf. 2.4-2**).



**Graf. 2.4-2** Závislost specifického tepla silikonů SILASTIC na teplotě [38]

Do PreCASTU byla zadána závislost specifického tepla podle grafu 2.



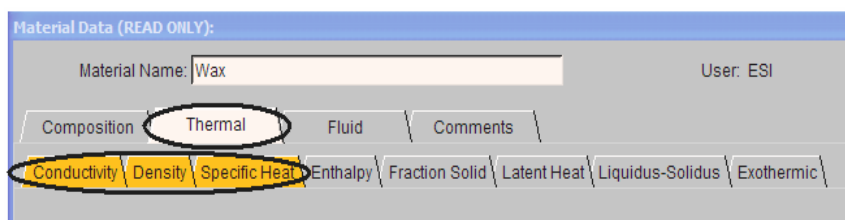
## B) Dostupné vlastnosti vosku

Přesně zadané materiálové vlastnosti jsou jedním z pilířů provedení simulace odpovídající skutečnému průběhu procesu. Prvotní představa o dostupnosti parametrů týkajících se voskových směsí se ukázala jako velmi naivní. Volně dostupné dokumenty zabývající se výzkumem či simulací většinou obsahují neúplné informace a často vůbec neobsahují konkrétní číselné hodnoty, pouze obecné závěry a hodnocení.

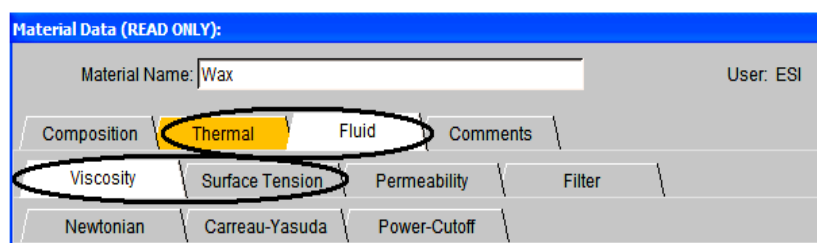
Na řešení problematiky týkající se voskových směsí používaných v Investment casting se výrazně podílejí M. R. Jolly, A. S. Sabau a S. Viswanathan (viz např. články [22], [23], [24], [25], [26]).

Zajímavé výsledky studia problematiky přesného lití na vytavitelný model pocházejí z univerzity v Birminghamu z oddělení Interdisciplinary Research Centre (IRC) in Materials of Birmingham. Velice zajímavý je i nedávný výzkumný projekt FOCAST (Fundamentals Of Investment Casting Project), jež komplexně analyzuje celou technologii. Bohužel výsledky zatím nejsou zcela přístupné, části projektu jsou postupně prezentovány na různých konferencích.

V ProCASTu 2008 obsahuje materiálová databáze pouze jeden obecný (bez jakékoliv bližší specifikace) materiál vosk. Obsahuje pouze data v modulu THERMAL (tepelná data – tepelná vodivost, hustota, specifické teplo), (**Obr. 2.4-26**). Pro provedení simulace plnění formy je třeba databázi doplnit – doplnit modul FLUID (**Obr. 2.4-27**), přičemž nezbytná data do modulu FLUID jsou povrchové napětí a viskozita.



**Obr. 2.4-26** Dostupná data pro obecný materiál vosk v ProCASTu 2008



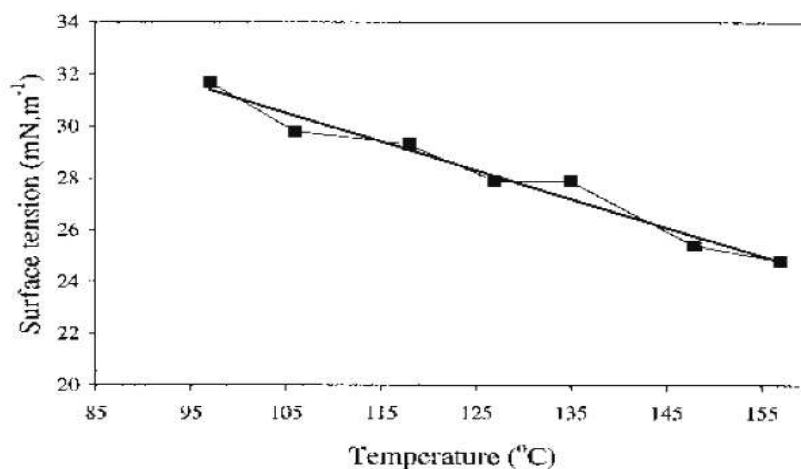
**Obr. 2.4-27** Nezbytná data pro provedení simulace plnění a tuhnutí

Vzhledem k velice širokým možnostem chemického složení vosků (viz kapitola 1.6.2) se samozřejmě budou lišit i jejich vlastnosti a nelze tedy předpokládat, že data obsažená v databázi budou přesně odpovídat konkrétní

voskové směsi. Stejně tak data, která budou zadána v první fázi sestavování simulací do modulu FLUID budou získána z různých zdrojů a k odlišným druhům vosků. Z těchto důvodů nelze tedy provést pouze jednu simulaci, je jich třeba provést několik a vyhodnotit výsledky, provést nezbytnou korekci parametrů. Ideálním řešením je samozřejmě veškeré hodnoty pro konkrétní voskovou směs změřit.

### 1) Povrchové napětí

Je zvláště významné při plnění tenkých profilů (lopatky turbín).



**Graf 2.4-3** Povrchové napětí v závislosti na teplotě [26]

### 2) Viskozita

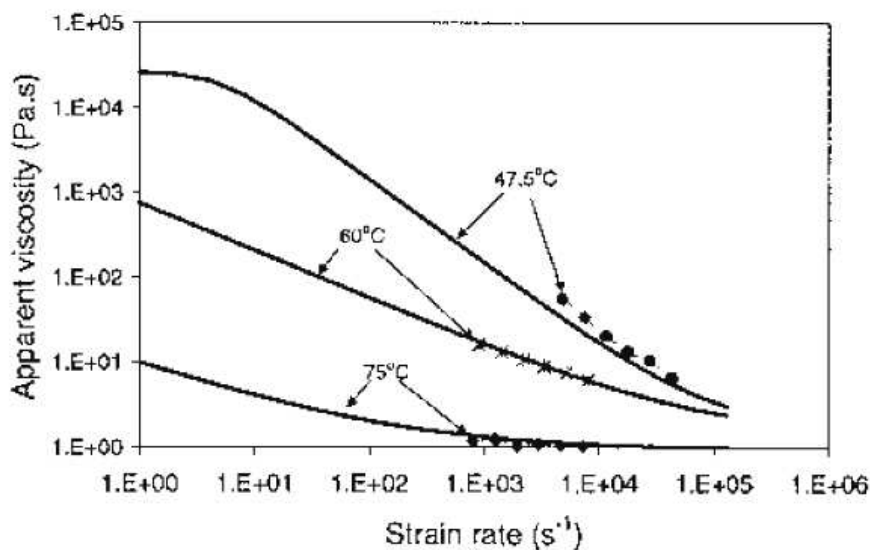
Pro popis viskozity byla nalezena data v [26]. Tento zkoušený vzorek vykazoval plató při vysokých a nízkých hodnotách smykové rychlosti a byl tedy použit čtyřparametrový model Carreau-Yasuda ve tvaru podle rovnice (2-1). Popis modelu je uveden v kapitole 1.5.4.3 A).

$$\eta_a = \eta_\infty + (\eta_0 - \eta_\infty) \left( 1 + \lambda^2 \dot{\gamma}^2 \right)^{\frac{n-1}{2}} \quad (2-1)$$

**Tab. 2.4-1** Parametry pro model Carreau-Yasuda byly v [26] uvedeny pomocí rovnic

Parameter	Value or Function
$\eta_0$ (Pa·s)	$10^{11} \exp(-1.95T^{0.6})$
$\eta_\infty$ (Pa·s)	$3.2 - 0.03T$
$\lambda$ (s)	$\sqrt{6.0 \times 10^{-15} \exp(0.62 \times T)}$
$n$	$0.55 \times \tanh\left(\frac{T - 47}{12}\right)$

Do rovnic z **Tab. 2.4-1** byla dosazena teplota v softwaru MathCAD 14 a získané údaje pak zadány do databáze ProCASTu 2008.



**Graf 2.4-4** Znárodnění závislosti zdánlivé viskozity ( $\eta_a$ ) a smykové rychlosti při různých teplotách [26]

### C) Měření vlastností voskové směsi

#### C1) První měření viskozity

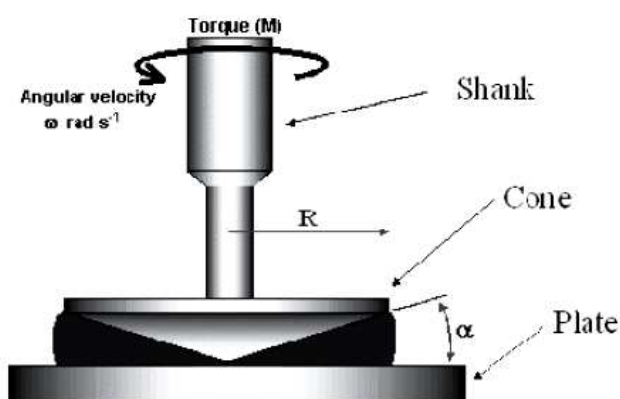
##### Cíl měření

Cílem měření bylo získat praktickou představu o způsobu měření viskozity polymerního materiálu a v rámci možností také hodnoty jednotlivých parametrů pro model Carreau-Yasuda pro vosk A7-RT/26 v intervalu teplot, mezi teplotou lití a teplotou solidu. Viskozita polymerních materiálů (tedy i voskových směsí) se mění v závislosti na: struktuře konkrétního materiálu, teplotě, tlaku, velikosti namáhání (smykové napětí, smyková deformace  $\tau$ ), gradientu rychlosti namáhání (smyková rychlost  $\dot{\lambda}$ ).

Pro získání korektních hodnot viskozity je třeba při měření zohlednit konkrétní podmínky, za kterých bude vosk použit. Vosk bude odléván gravitačním litím (smyková rychlost  $\dot{\lambda}$  je řádově desítky  $s^{-1}$ ) ve vakuu (cca – 0.7 Bar), při teplotě lití vosku 75 °C.

Pro měření byl použit viskozimetr Bohlin Gemini 150 od anglické společnosti MALVERN INSTRUMENTS (**Obr. 2.4-29**). Viskozimetr je napojen na PC a dále vybaven vytápěním a tlakovým přidržovačem nehybné části měřící geometrie.

Pro „málo“ viskózní materiály je používána geometrie kužel – deska (výrobce voskové směsi uvádí viskozitu 0,2 až 0,4 Pa.s při teplotě 90°C). Byla použita nehybná deska průměru 40 mm a kužel se skosením 2,5° shodného průměru (**Obr. 2.4-28**).



**Obr. 2.4-28** Při měření byla použita geometrie kužel – deska [48]



**Obr. 2.4-29** Viskozimetr Bohlin Gemini 150, detail na použitou geometrii

Z geometrie a rychlosti otáčení se určí rychlost smykové deformace  $\dot{\gamma}$ .

Z kroutícího momentu, který vyjadřuje velikost odporu materiálu při určité smykové deformaci, se získá smykové napětí  $\tau$ . Z těchto parametrů se pak vypočte viskozita.

#### Příprava měření

Pro typ geometrie deska – deska, deska – kužel se pro zajištění požadované velikosti mezery často používají u polymerních materiálů vzorky, které se vyříznou z lisované desky dané tloušťky. Vzhledem k dobrému tavení voskových směsí bylo určité množství vzorku umístěno přímo na vyhřívanou desku, kde došlo k jeho natavení. Přebytečné množství bylo odstraněno pomocí stěrky.

Teploty pro proměření byly určeny kolem teploty lité vosku. Teplota lité vosku je 75 °C, měření proběhlo při teplotách 70, 75, 80, 85 °C. Veškeré výstupy z měření jsou uvedeny v příloze **P11**. Pro každou teplotu budou provedena dvě měření při shodných podmínkách.

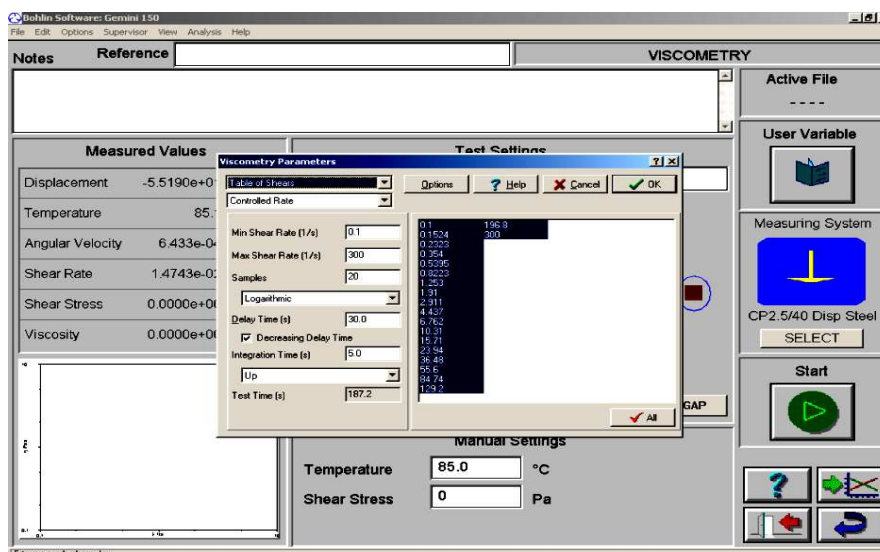
Na základě dat výrobce známe přibližně hodnotu viskozity při 90°C, měřit tedy začneme od vyšších teplot k nižším. Je třeba provést kalibraci polohy viskozimetru, určí se jakým způsobem vzorek namáhat, při jaké teplotě, po jakou dobu. Proměřovaná oblast smykových rychlostí  $\dot{\gamma}$  od 0,1 do 300  $s^{-1}$ .



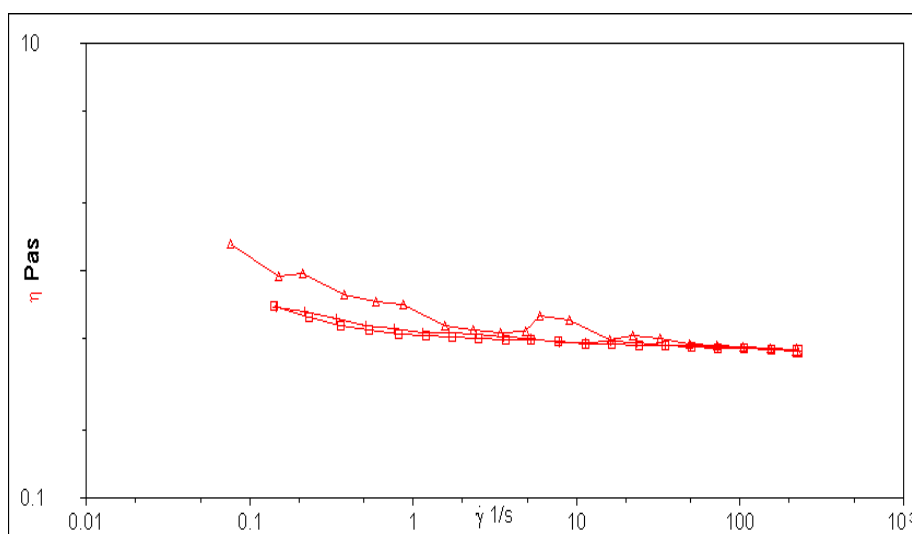
**Obr. 2.4-30** Po vytemperování vzorku se přistoupilo k měření

### Průběh měření, naměřené hodnoty

Optimalizace nastavení viskozimetru byla prováděna při teplotě 85°C, proto měření při této teplotě proběhlo celkem třikrát. Je nastaven rozsah smykových rychlostí, časové zpoždění mezi jednotlivými intervaly měření při změněné smykové rychlosti (vliv tixotropie), způsob zobrazování naměřených dat (**Obr. 2.4-31**).

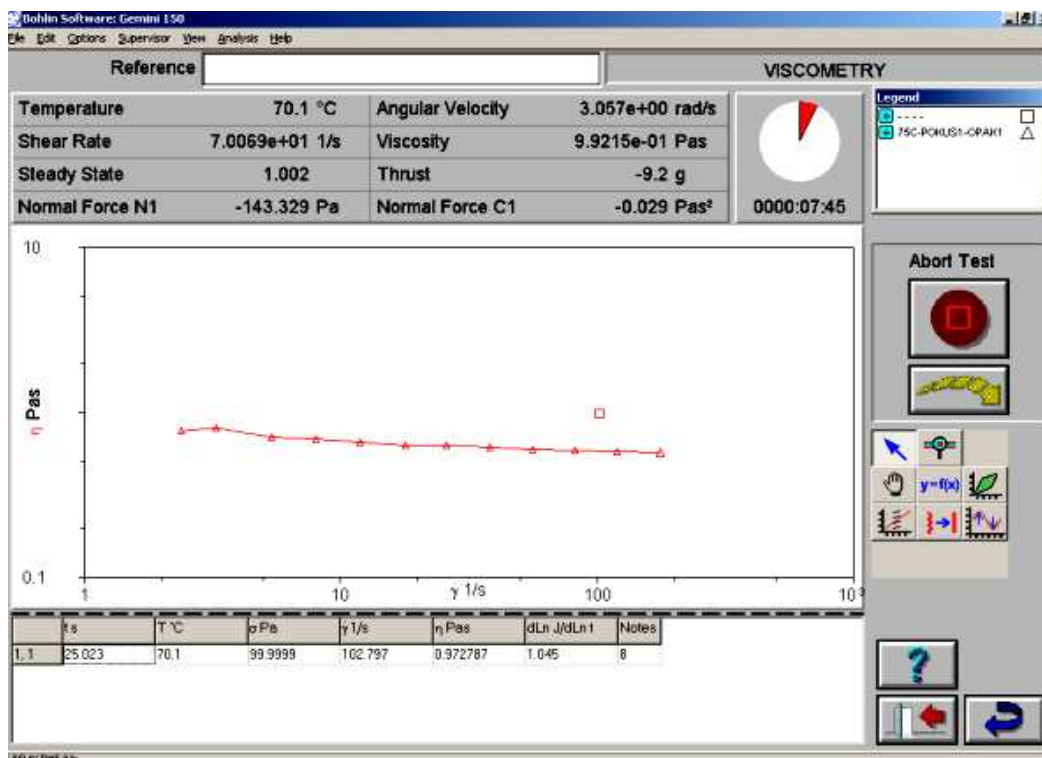


**Obr. 2.4-31** Optimalizace nastavení viskozimetru



**Graf 2.4-5** Průběh viskózních křivek voskové směsi A7-RT/26 při teplotě 80°C

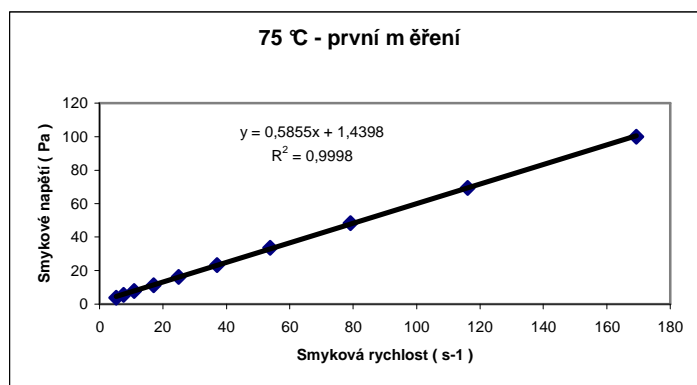
Výsledky měření jsou překvapující (viz např. **Graf 2.4-5** a příloha **P11**). Závislost viskozity je v podstatě lineární a k fitování hodnot není třeba použít model Carreau-Yasuda. Viskozitu lze do ProCASTu zadat pouze pomocí modulu Newtonian jako lineární závislost na teplotě.



**Obr. 2.4-32** Menu zobrazující informace z průběhu měření

### Vyhodnocení

Z naměřených hodnot viskozity a smykové rychlosti (při konstantní teplotě) plyne, že k vyhodnocení jejich závislosti není vhodné použít proložení modelem Carreau-Yasuda, protože na proměřeném intervalu smykových rychlostí vykazuje závislost téměř lineární průběh (viz např. **Graf 2.4-5 a P11**, tedy vykazuje proudění jako newtonovská kapalina). Je možné pro proměřenou oblast smykových rychlostí použít lineární závislost mezi smykovou rychlostí a smykovým napětím, tedy definovat tok vosku jako proudění newtonské kapaliny ( $\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$ ), (**Graf 2.4-12**).



**Graf 2.4-6** Toková křivka vykazuje lineární průběh = newtonské proudění směsi

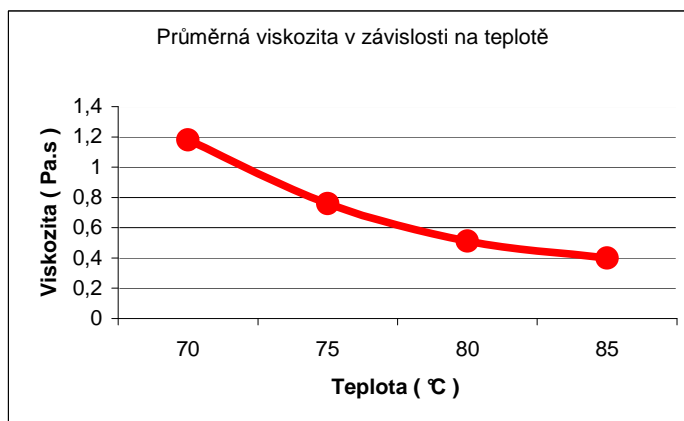
Z měření při jednotlivých teplotách byla stanovena průměrná viskozita, která bude zadána do ProCASu do modulu Newtonian (**Graf 2.4-13**).

Průměrná viskozita při 70°C:  $\bar{x}_{70} = 1,18 Pa \cdot s$

Průměrná viskozita při 75°C:  $\bar{x}_{75} = 0,76 Pa \cdot s$

Průměrná viskozita při 80°C:  $\bar{x}_{80} = 0,51 Pa \cdot s$

Průměrná viskozita při 85°C:  $\bar{x}_{85} = 0,40 Pa \cdot s$



**Graf 2.4-7** Závislost viskozity na teplotě zadaná do ProCASTu

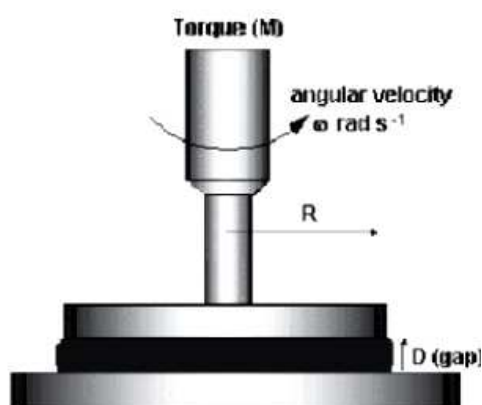
## C2) Kontrolní měření viskozity voskové směsi

### Cíl měření

Druhé měření viskozity bylo provedeno na sofistikovanějším reometru, s cílem ověřit hodnoty prvního měření, a ověřit jestli je možné aplikovat model Carreau-Yasuda na hodnoty naměřené na širším intervalu smykových rychlostí.

### Příprava měření

Pro určení viskozity byl použit moderní reometr AR-G2/AR 1500ex od společnosti TA Instruments (detailní popis na stránkách výrobce [48]). (**Obr. 2.4-33**). Teploty pro proměření byly určeny od teploty lití vosku k teplotě tuhnutí. Teplota lití vosku je 75 °C, měření proběhlo při teplotách 67, 71, 75 °C. Proveďte se kalibrace vyhřívacího systému, polohy zvolené geometrie deska – deska a natavení odměřeného vzorku voskové směsi. Velikost mezery mezi geometriemi 0,5 mm (**Obr. 2.4-33**).



**Obr. 2.4-33** Reometr AR-G2 s nadávkovaným vzorkem voskové směsi a schéma použité geometrie deska – deska [48]

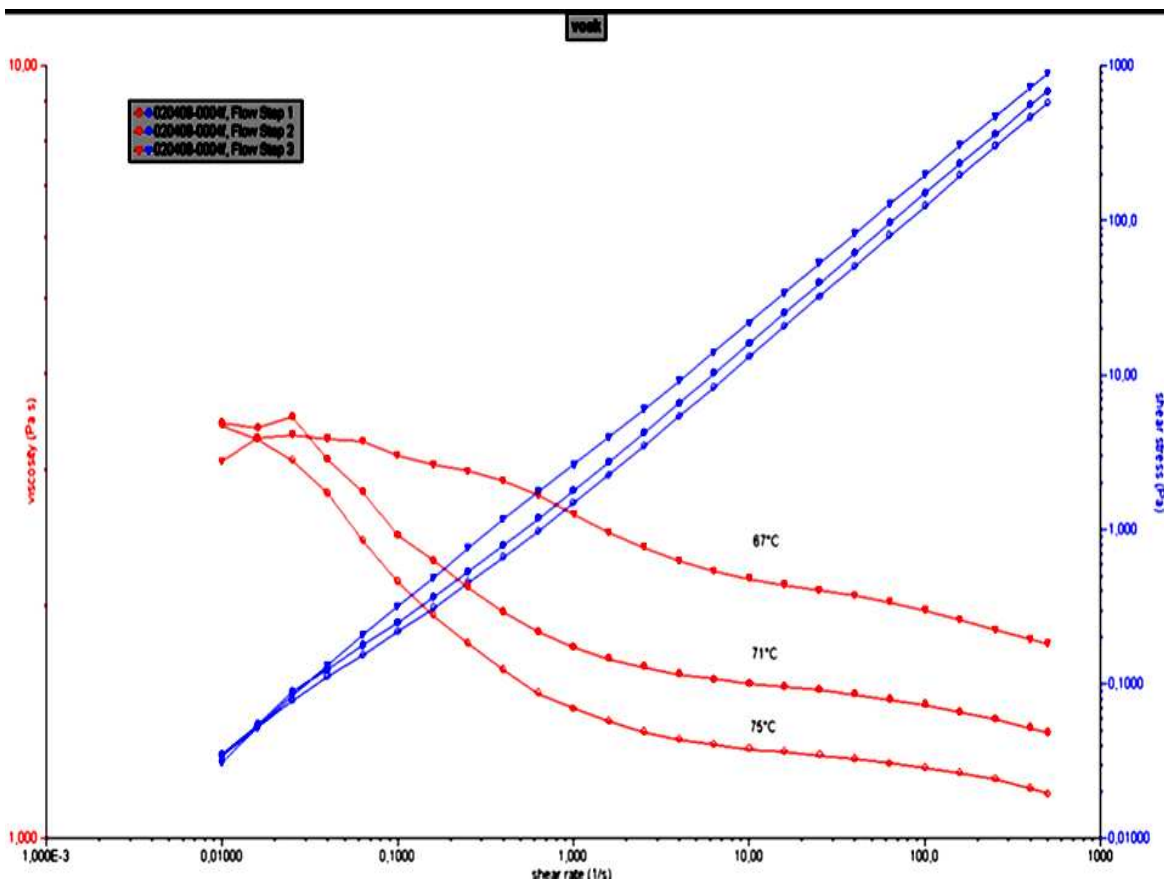
### Průběh měření, naměřené hodnoty

V první fázi měření byl proveden tzv. teplotní sken, tj. proměření viskozity u neznámého vzorku (hodnota viskozity není u voskové směsi známa) v určitém intervalu teplot (68 až 80 °C) při jedné konstantní smykové rychlosti ( $\dot{\gamma} = 100\text{s}^{-1}$ ), při rychlosti chlazení 0,5 °C za minutu (viz příloha **P12**). Podle teplotního skenu se optimalizuje nastavení měření viskozity při konstantních teplotách s proměnou hodnotou smykové rychlosti.



Viskozity při teplotách 67, 71, 75 °C byly měřeny v intervalu smykových rychlostí 0,01 až 500  $s^{-1}$  (příloha **P12**). V tomto intervalu již naměřené hodnoty závislosti viskozity na smykové rychlosti umožňují proložení pomocí modelu Carreau-Yasuda.

Model Carreau-Yasuda nebyl dostupný v předdefinované databázi modelů. Je možné jej do databáze nadefinovat ručně, bohužel vzhledem k časovému zaneprázdnění ing. Ch. byl pro vyhodnocení použit pouze model Carreau. Tento model je shodný s modelem Carreau-Yasuda pouze neobsahuje parametr  $a$ , parametr  $a$  je v něm zadán jako konstantní hodnota (bližší popis modelů viz kapitola **1.5.4.3 A**).



**Graf 2.4-14** Graf zobrazuje závislost viskozity (červená) a smykového napětí (modrá) na smykové rychlosti při teplotách 75, 71 a 67 °C.

### Vyhodnocení

Proložení naměřených dat modelem Carreau byly získány parametry potřebné k definici neneutonského proudění kapaliny do simulačního software ProCAST.

Parametry získané proložení modelem Carreau:

a) Teplota voskové směsi 75 °C

- nulová viskozita ( zero viscosity ): 3,575  $Pa \cdot s$

- limitní viskozita ( infinite viscosity ): 1,240  $Pa \cdot s$
- charakteristický čas ( phase shift ): 38,10  $s$
- rychlostní index ( power ): 0,6087

Standardní chyba proložení naměřených dat modelem: 7,153

Pro přijatelnou přesnost proložení dat modelem je doporučena maximální chyba 20.

$$\frac{\left[ \frac{\sum (x_m - x_c)^2}{n - 2} \right]^{1/2}}{\text{Range}} \times 1000 \quad (2-1)$$

$X_m$  ... změřená hodnota

$X_c$  ... vypočtená hodnota

$n$  ... počet naměřených bodů

Range ... je rozdíl maximální a minimální hodnoty  $X_m$

b) Teplota voskové směsi 71 °C

- nulová viskozita ( zero viscosity ): 4,224  $Pa \cdot s$
- limitní viskozita ( infinite viscosity ): 1,493  $Pa \cdot s$
- charakteristický čas ( phase shift ): 60,65  $s$
- rychlostní index ( power ): 0,5505

Standardní chyba proložení naměřených dat modelem: 11.58

c) Teplota voskové směsi 67 °C

- nulová viskozita ( zero viscosity ): 3,253  $Pa \cdot s$
- limitní viskozita ( infinite viscosity ): 1,834  $Pa \cdot s$
- charakteristický čas ( phase shift ): 5,474  $s$
- rychlostní index ( power ): 0,3553

Standardní chyba proložení naměřených dat modelem: 22,41

Měřením byly získány potřebné parametry, které budou zadány do simulace.

Je možné, stejně jako u prvního měření, určit průměrnou viskozitu na určitém intervalu smykových rychlostí pro jednotlivé konstantní teploty, tedy určit viskozitu jako proudění newtonské kapaliny (zanedbání závislosti viskozity na velikosti smykové rychlosti, na určitém intervalu smykových rychlostí proudí vosková směs jako newtonská kapalina). Pak simulovat jak proudění s viskozitou zadanou pomocí parametrů modelu Carreau-Yasuda (nenewtonské proudění), tak simulovat proudění pomocí zadání viskozity nezávislé na smykové rychlosti (newtonské proudění). Výsledky porovnat a určit jestli zjednodušení na newtonské proudění je akceptovatelné (validace se skutečným průběhem plnění formy). Toto zjednodušení může mít nejen negativní dopad na průběh proudění, ale i velmi pozitivní vliv na celkový výpočtový čas simulace, neboť matematický popis newtonovského proudění je značně jednodušší. Bylo by tedy vhodné provést výpočet obou případů a provést vyhodnocení přijatelnosti zjednodušení pro výpočty prováděné později ve slévárenské praxi, kdy čas hraje velmi významnou roli v celém výrobním procesu. Lze předpokládat, že vzhledem k malým smykovým rychlostem, které vznikají při gravitačním lítí, lze s dobrou přesností zavést popis newtonovského proudění pro nenewtonovskou voskovou směs. Pak ale s vysokou pravděpodobností nebude možné použít tuto definici proudění vosku u simulací jiných technologií výroby voskových modelů. Např. při výrobě voskových modelů pomocí tlakového vstřikování jsou dosahované smykové rychlosti v řádech tisíců a při těchto rychlostech lze již předpokládat značný vliv smykové rychlosti na proudící voskovou směs (nehledě na pravděpodobný vliv tlaku i na další vlastnosti vosku). Bylo by tedy vhodné provést proměření viskozity na širokém intervalu smykových rychlostí, aplikovat model Carreau-Yasuda a dosáhnout tak vyšší univerzálnosti definice voskové směsi.

### ***C3) Termická analýza***

#### ***Cíl měření***

Cílem měření na DSC bylo získat časovou závislost měrného (specifického) tepla na teplotě, popř. závislost entalpie voskové směsi na teplotě. Jak je uvedeno v kapitole **1.5.4.2 D)** je možno do ProCASTu zadefinovat buď měrné teplo a latentní teplo nebo pouze entalpii.

#### ***Příprava měření***

Pro měření byl použit diferenční skenovací kalorimetr DSC Q200 typu Heat-flux od společnosti TA Instruments (**Obr. 2.4-34**). Princip měření spočívá v přivádění určitého tepelného toku do testovaného vzorku (vosková směs A7-RT/26) a tepelného toku do porovnávacího vzorku (safír) o známé tepelné kapacitě podle přednastaveného tepelného programu. Oba tepelné toky jsou automaticky počítány, tak aby průběh teploty s časem u obou vzorků byl shodný. Je třeba správně nastavit velikost nárůstu teploty za čas, tak

abychom mohli na křivce tepelný tok – teplota (nebo čas) zřetelně pozorovat fázové přeměny (mění se tvar píků).

Vyhodnocování se pak provádí z křivek závislosti velikosti tepelného toku na teplotě (nebo čase) pro oba vzorky.



**Obr. 2.4-34** Heat-flow DSC z řady Q Series od TA Instruments, detailní pohled na testovací komoru (podrobný popis na stránkách výrobce [48])

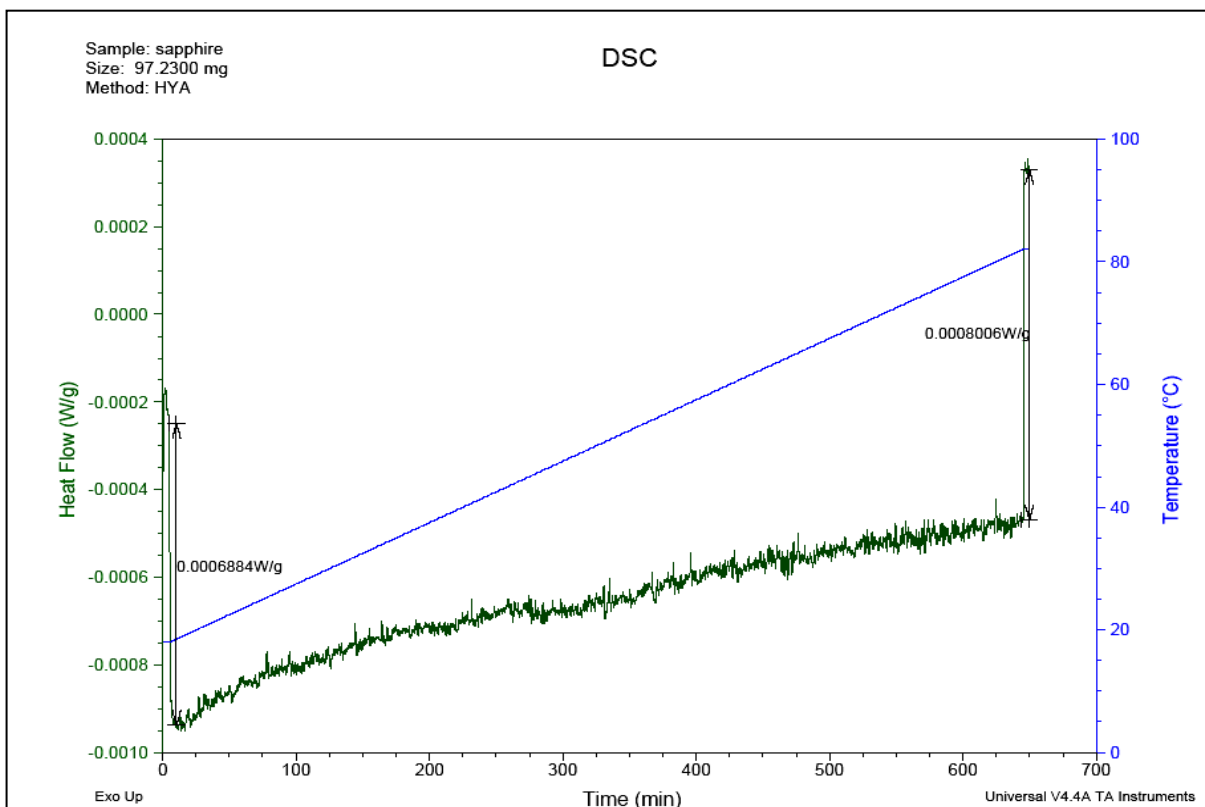
#### Průběh měření, naměřené hodnoty

Prvním krokem po zapnutí DSC je provedení kalibrace přístroje. Kalibrace je zcela automatická.

Druhý krok představuje proměření známého referenčního vzorku (v mém případě safír), s jehož pomocí se vyhodnocuje velikost tepelné kapacity neznámého vzorku. Navolí se režim měření, tedy za jaký čas se zkoumaný vzorek ohřeje z teploty A do teploty B. Režim měření musí být shodný pro oba vzorky, je tedy třeba provést jeho volbu s ohledem na zkoumaný vzorek (**Graf 2.4-15** a **Graf 2.4-16**). Počáteční teplota měření byla zvolena  $+18^{\circ}\text{C}$  a konečná teplota  $+80^{\circ}\text{C}$ . Velikost nárůstu teploty byla zvolena  $1^{\circ}\text{C}$  za 10 minut.



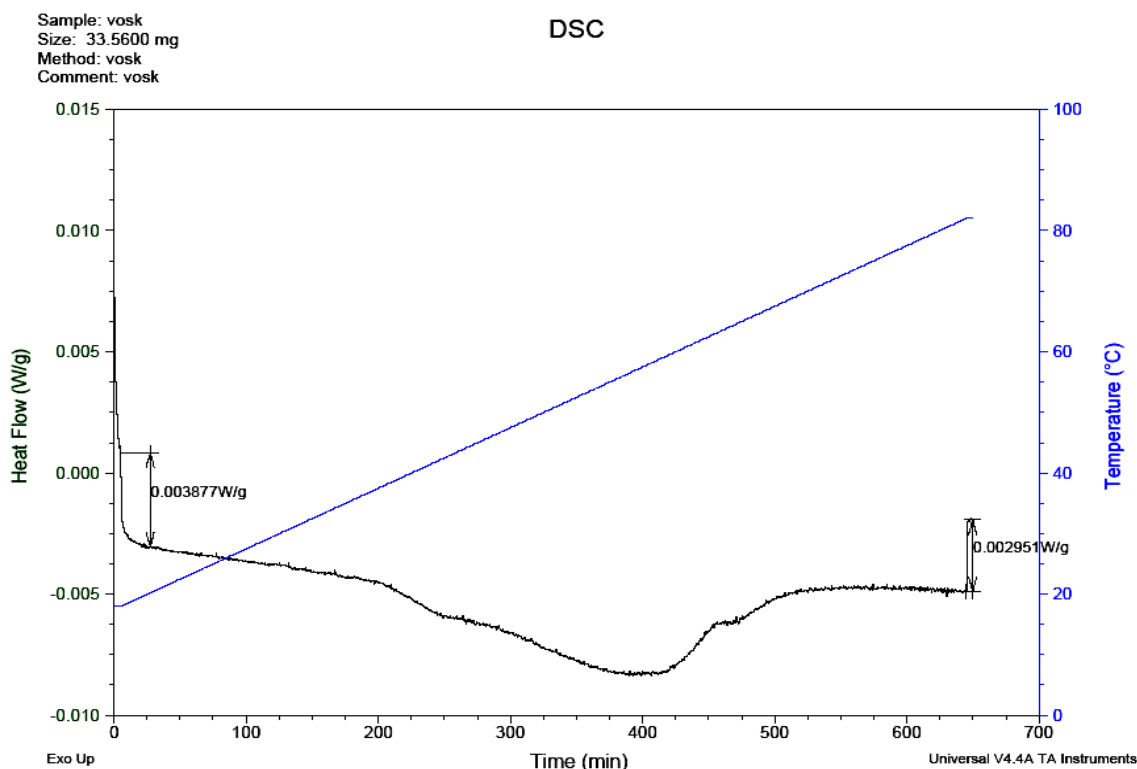
**Obr. 2.4-35** Vzorek testované voskové směsi nadávkovaný v komůrce kalorimetru



**Graf 2.4-15** Závislost tepelného toku na čase a teplotě pro porovnávací vzorek – safir

Třetí krok představuje proměření vzorku o neznámé tepelné kapacitě - vosková směs A7-RT/26. Provede se nadávkování určitého množství vyhodnocovaného vzorku do vyhřívané komůrky. Vosková směs A7-RT/26 je dodávána výrobcem ve formě „čoček,“. Velikost jedné čochky ideálně odpovídala požadovanému množství (**Obr. 2.4-35**).

Pro dokonalý přestup tepla by měl vzorek rovnoměrně vyplňovat celou dutinu komůrky (tzv. pánvičku). Proto se nejdříve provede řízené roztavení a následné ochlazení vzorku v komůrce. Pro určení velikosti měrné tepelné kapacity je třeba nastavit stejný režim měření jako pro porovnávací vzorek.



**Graf 2.4-16** Závislost tepelného toku na čase a teplotě pro zkoumaný vzorek – voskovou směs A7-RT/26

Porovnáním těchto dvou grafů (resp. tabulek hodnot v příloze **P13**) lze stanovit závislost tepelné kapacity neznámého vzorku na teplotě.

$$\Delta HF_S = m_S \cdot c_{pS} \cdot \beta \quad (2-2)$$

$\Delta HF_S$  ... změna tepelného toku do saříru

$m_S$  ... hmotnost sařírového vzorku

$\beta$  ... rychlost ohřevu

$$\Delta HF_W = m_W \cdot c_{pW} \cdot \beta \quad (2-3)$$

$\Delta HF_W$  ... změna tepelného toku do voskové směsi

$m_W$  ... hmotnost voskového vzorku

$\beta$  ... rychlost ohřevu

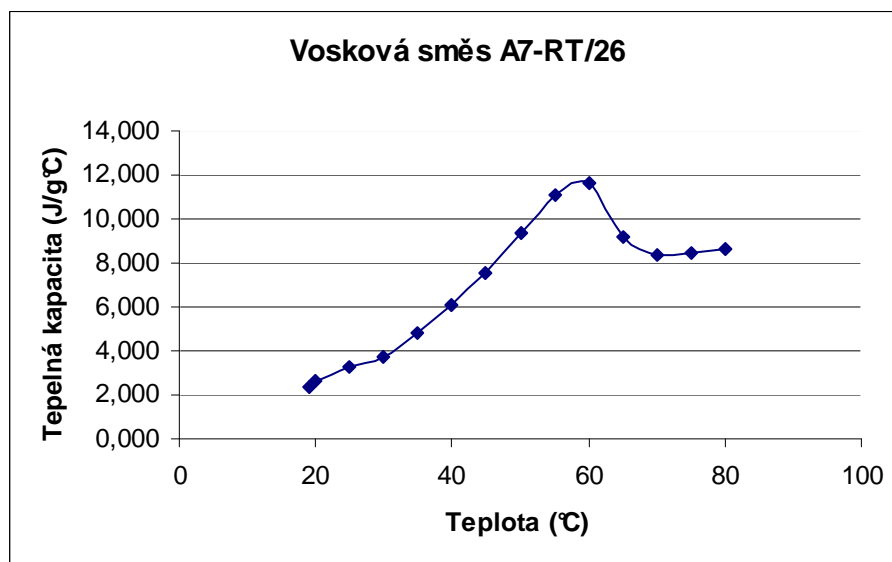
Neznámou v těchto dvou rovnicích představuje pouze měrná tepelná kapacita voskové směsi:

$$c_{pw} = \frac{\Delta HF_W \cdot c_{pS}}{\Delta HF_S} \quad (2-4)$$

Pokud budeme vycházet striktně z definice specifického měrného tepla, které je definováno jako množství tepla dodané látce, aby její teplota vzrostla o 1°C, pak je možné stanovit jej pouze pro teplotu při které nedochází k fázovým přeměnám (viz kapitola **1.5.4.2 A**). Z definice plane, že v případě probíhající fázové přeměny není tepelná kapacita definována. K fázovým přeměnám nedochází podle naměřeného grafu voskové směsi zhruba do teploty 40°C a pak zhruba od teploty 70°C.

### Vyhodnocení

Tepelnou kapacitu lze do ProCASTu zadat jako konstantu nebo jako závislost na teplotě. Zároveň musí být zadáno také latentní teplo, to lze zadat pouze jako konstantu. Otázkou zůstává, jakým způsobem program dále pracuje s těmito daty vzhledem k tomu, že latentní teplo je zadáno jako konstanta bez vztahu k teplotě při které se vylučuje a tepelná kapacita určená z DSC v sobě zahrnuje i latentní teplo (**Graf 2.4-20**).



*Graf 2.4-20 Závislost „tepelné kapacity,, na teplotě pro zadání do ProCASTu*

Z fyzikálního hlediska se jako korektnější jeví zadání entalpie, namísto latentního a specifického tepla. Změnu entalpie lze numericky určit z grafu, kdy její velikost odpovídá ploše nad křivkou. Určování entalpie z naměřených hodnot je naznačena v příloze **P13**.

## 2.3.2 Processing

Samotný výpočet procesu se provádí v modulu DataCAST. Rychlost výpočtu závisí na typu simulovaného děje (např. při výpočtu plnění záleží jestli je proudění zadefinováno jako newtonské či neneutonské, jestli je viskozita zadána pomocí konstanty či v závislosti na teplotě, jestli uvažujeme povrchové napětí, vliv odporu vzduchu ve formě, .... ), a na výkonu výpočetní stanice. Výpočet první simulace byl zahájen na počítači jež poskytla společnost MECAS ESI s.r.o.:

Název: Avogadro

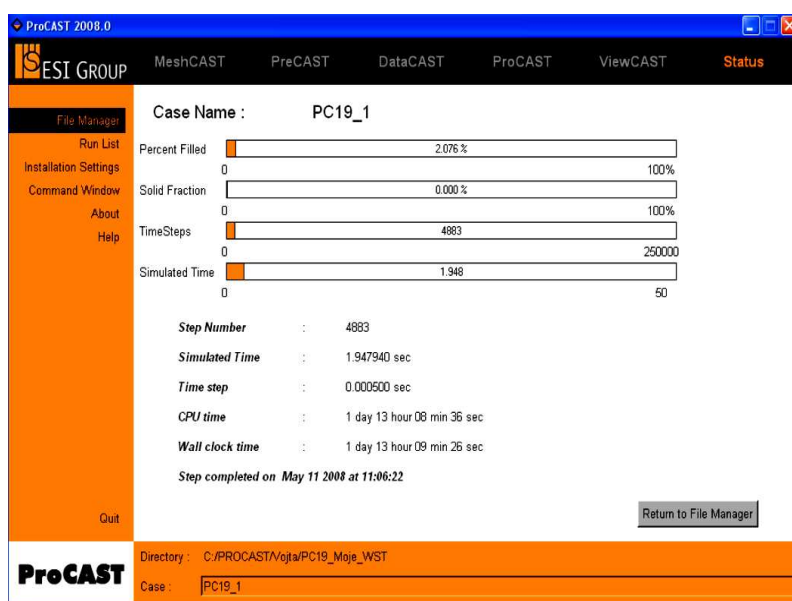
Procesor: jednojádrové Pentium 4 1,8 GHz

Paměť: 1GB

Grafická karta: SiS 315 32 MB

Neneutonské proudění není běžně simulováno, stejně jako vliv povrchového napětí se často zanedbává. Bylo předpokládáno, že výpočtový čas bude jen nepatrně vyšší než u běžně prováděných simulací (hodiny, max. dny).

Při výpočtu první simulace, která byla navíc zjednodušena o neuvažování vlivu povrchového napětí, se ukázalo, že výpočtová náročnost neneutonského proudění je mnohonásobně vyšší. Výpočet plnění silikonové formy, složené z 643 351 elementů, by trval na uvedeném počítači minimálně 1789,5 hodin, tj. 74,6 dní (čas bude pravděpodobně ještě delší, protože při určování celkového času jsem vycházel z lineární závislosti mezi časem a napočítanými procenty naplnění). Jiný počítač nebyl k dispozici. Tato vysoká výpočtová náročnost znamenala „jistě“ zdržení při optimalizaci simulace (**Obr. 2.4-36**).



**Obr. 2.4-36** Zobrazení informací s průběhu výpočtu



Později Brněnská pobočka společnosti MECAS ESI s.r.o obdržela novou výpočetní stanici, kterou mi umožnila v rámci možností používat.

Název: -

Procesor: 4 x dvoujádrové Intel XEON E5440 2,83 GHz

Paměť: 16 GB

Grafická karta: GeForce 8600 GT

Na této stanici je možné výpočet rozdělit až mezi osm jader čtyř dvoujádrových procesorů.

**Tab. 2.4-1** Vliv počtu procesorů na výpočtový čas simulace

Jádro	Přibližný výpočtový čas simulace č.1 (hod)
Pentium 4 1,8 GHz	1790
XEON 2,83 GHz	759
2x XEON 2,83 GHz	335
4x XEON 2,83 GHz	210
6x XEON 2,83 GHz	89

### 2.3.3 Postprocessing

Zobrazování a vyhodnocování výsledků bylo provedeno v modulu ViewCAST.

Pro porovnání se skutečným průběhem plnění silikonové formy byly pomocí digitální kamery natočeny dva záznamy plnění formy:

- 1) Video\_Realita\_BP = pohled na formu z boku
- 2) Video\_Reality\_ZP= pohled na formu ze zadu

Videa jsou přiložena k diplomové práci v přílohách **P14**, **P15**.

Kameru nebylo možné umístit do použité vakuové komory, proto bylo filmování provedeno při lití na vzduchu.

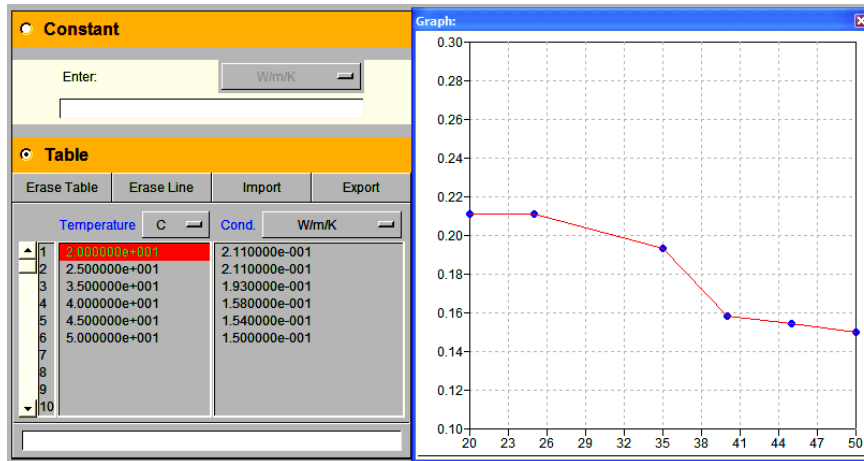
Vzhledem k vysoké časové náročnosti výpočtu, je jako kritérium pro ukončení výpočtu stanovena doba 50s od začátku plnění.

#### 2.3.3.1 Simulace č.1

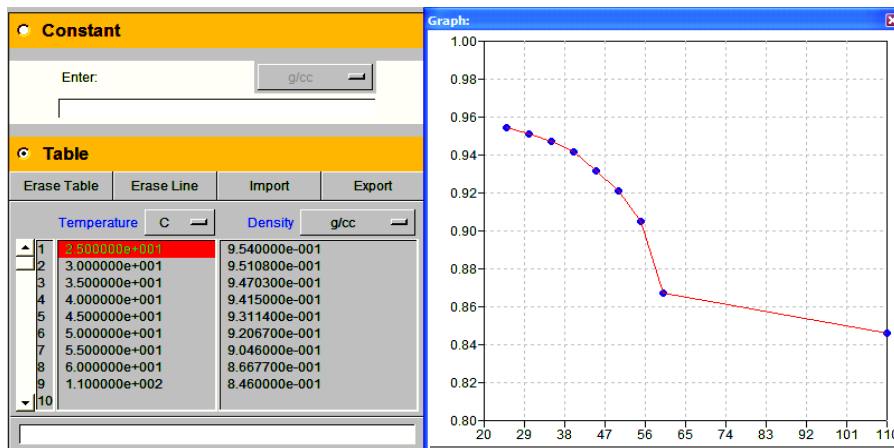
V jednotlivých simulacích jsou veškerá nastavení a hodnoty shodné, měněny jsou pouze vlastnosti voskové směsi. Případné jiné změny budou u jednotlivých simulací rovněž uvedeny.

### Nastavení modulu THERMAL

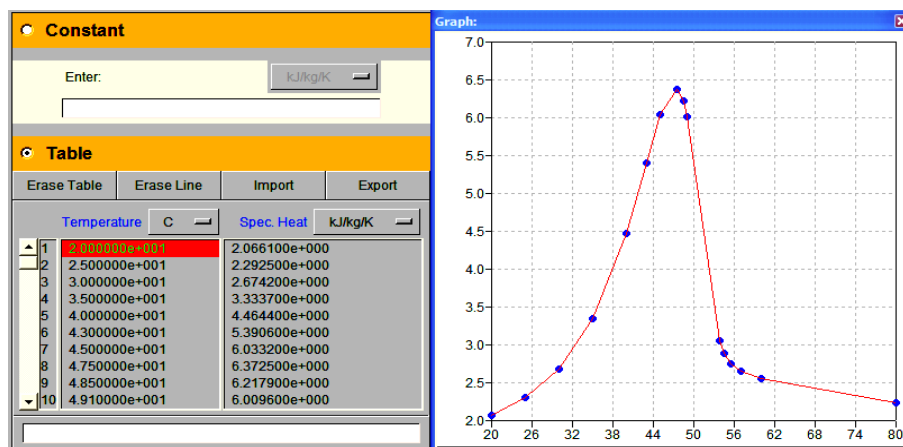
Latentní teplo – simulace č.1: 0,08 kJ/kg



Obr. 2.4-37 Tepelná vodivost – simulace č.1

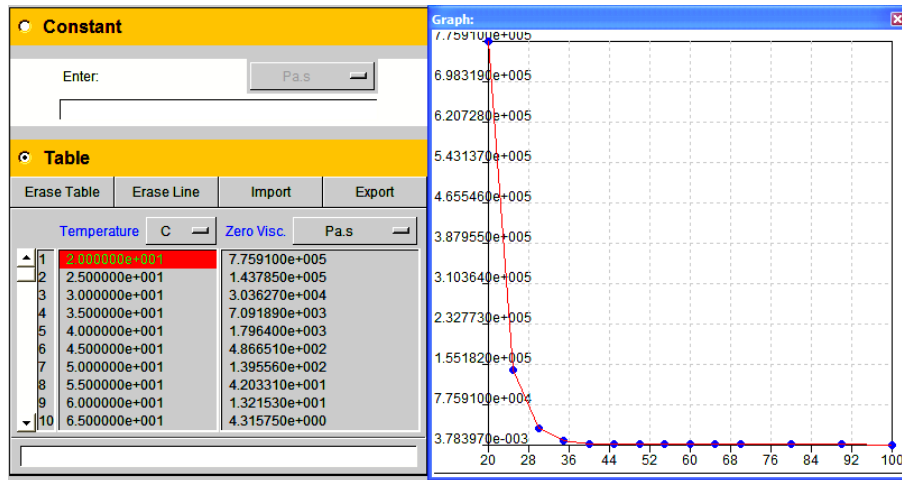


Obr. 2.4-38 Hustota – simulace č.1

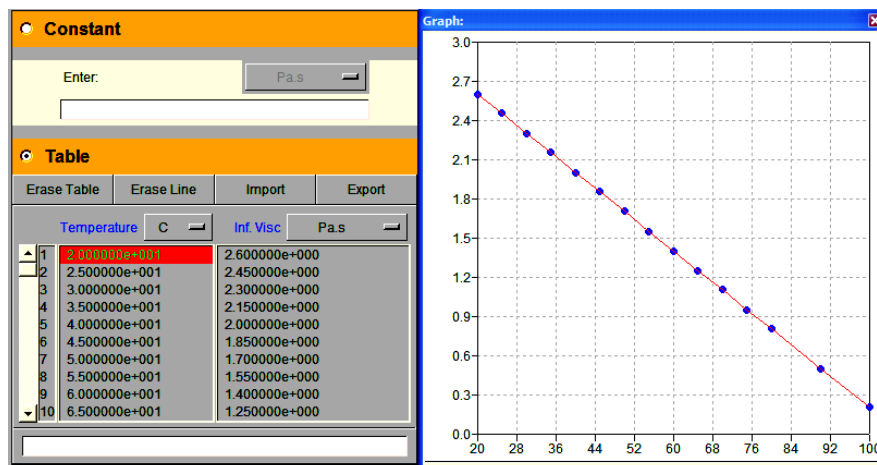


Obr. 2.4-39 Specifické teplo - simulace č.1

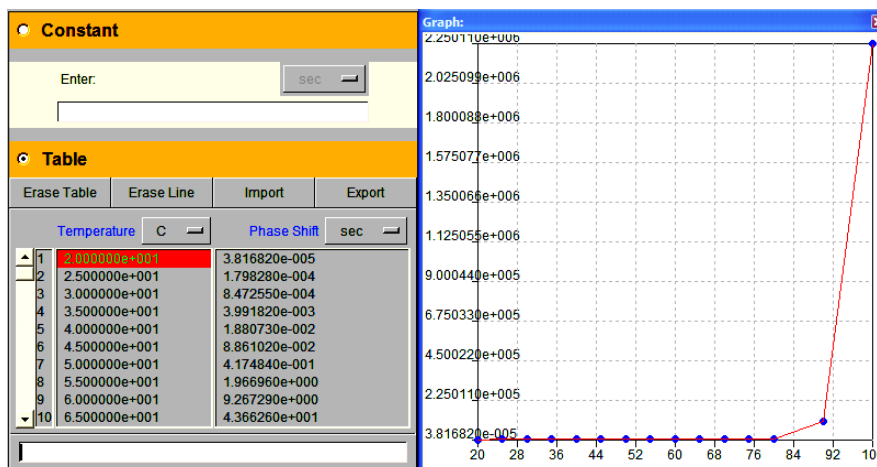
### Nastavení modulu FLUID



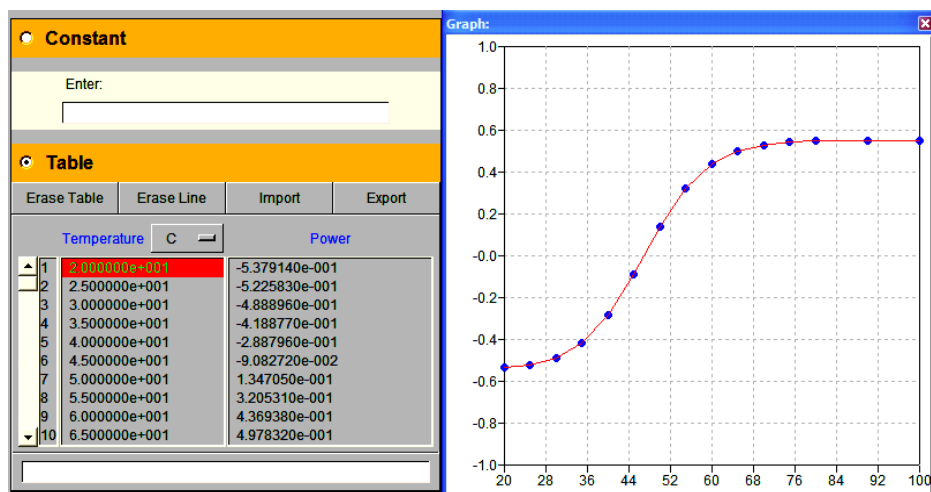
Obr. 2.4-40 Viskozita při nulové deformační rychlosti – simulace č. 1



Obr. 2.4-41 Viskozita při nekonečné deformační rychlosti – simulace č. 1

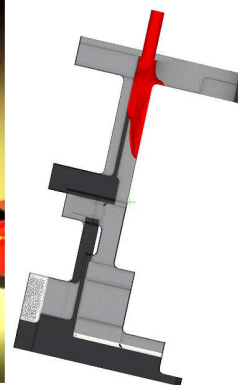
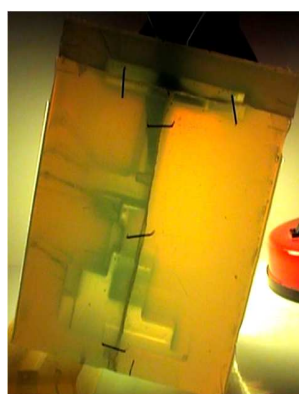
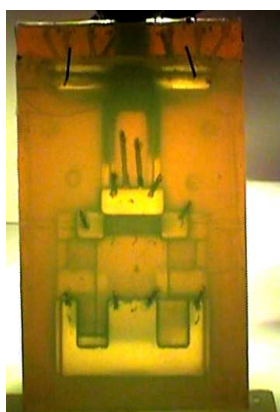


Obr. 2.4-42 Fázový posuv – simulace č. 1



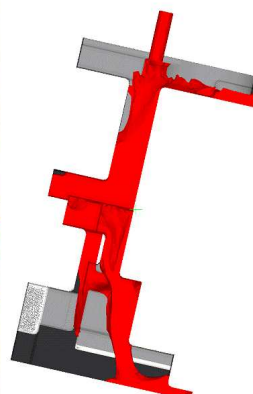
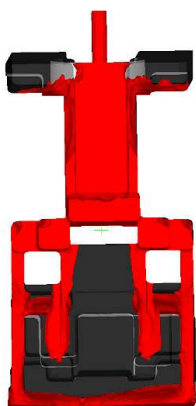
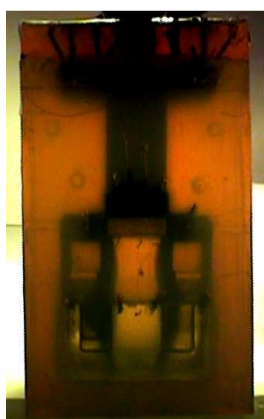
**Obr. 2.4-43** Mocninný koeficient – simulace č.1

### Validace výsledků simulace č.1



**Obr. 2.4-44** Skutečnost - 2s

sim. č.1 - 2s



**Obr. 2.4-45** Skutečnost – 20s

sim. č.1 - 22s

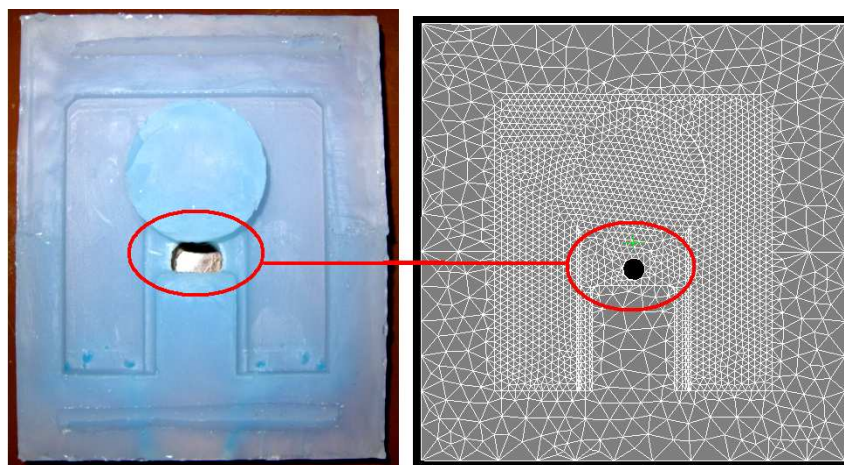
Detailní snímky a videa jsou v přílohách P14, P15 a P16, P17, P18.

### **Zhodnocení simulace č.1**

Vzhledem ke značné časové náročnosti nebyl simulován průběh celého plnění formy, ale ukončení simulace bylo stanoveno na 50 s od zahájení lití.

Ze snímků je patrné, že se průběh proudění se jen blíží realitě. V úzké středové části se vytváří při plnění dva proudy (**Obr. 2.4-44**), mezi nimiž vzniká dutina. V nižší části se ve shodě s realitou vytváří celkem čtyři proudy vosku (**Obr. 2.4-45**). V čase 12 sekund dojde u skutečného plnění k „ukápnutí,, dvou středových proudů. Toto „ukápnutí,, pravděpodobně simulační program neumí zohlednit a dojde k zastavení obou středových proudů, což neodpovídá realitě. Plnění v simulovaném procesu poté probíhá pouze dvěma bočními proudy (**Obr. 2.4-45**). Plnění horní části formy realitě neodpovídá vůbec (**Obr. 2.4-45**), ve skutečnosti dochází k postupnému plnění horní části již od počátku lití a oblast je zaplněná zhruba během dalších 7s. V simulaci k zaplnění horní části dojde až v úplném závěru lití.

Jako nejpravděpodobnější důvod časové disproporce mezi skutečným a simulovaným průběhem lze spatřovat v rozdílném průřezu vtokového otvoru. Tato neshoda je z důvodu vytvoření geometrie formy před jejím fyzickým vyrobením (**Obr. 2.4-46**). Tato geometrická neshoda bude napravena (opravena od simulace č.6).



**Obr. 2.4-46** Vtokový otvor na skutečné formě a na počítačovém modelu

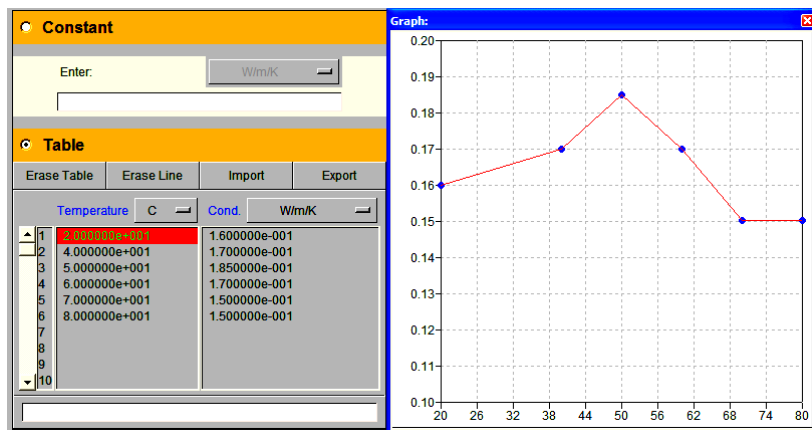
### **2.3.3.2 Simulace č.2**

Tuto druhou definici voskové směsi jsem získal od švýcarské společnosti CALCOM, která se podílí na vývoji softwaru ProCAST .

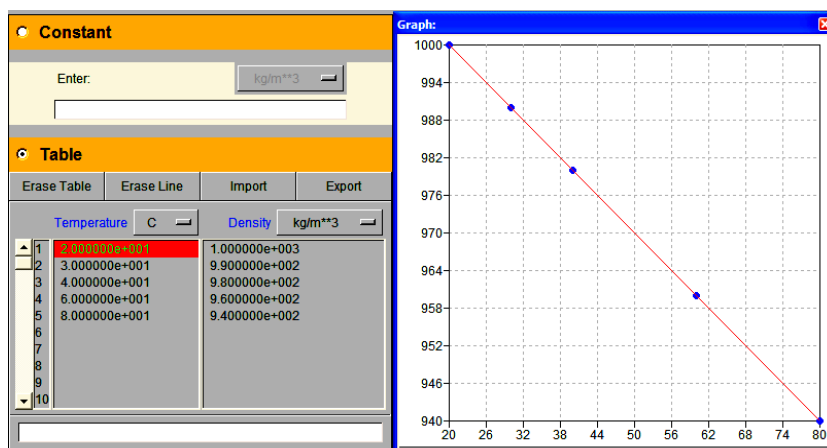
Jak je patrné z předložených hodnot (**Obr. 2.4-37** až **Obr. 2.4-43** a **Obr. 2.4-47** až **Obr. 2.4-53**), rozdíl mezi daty mezi simulací č.1 a č.2 je pouze v modulu THERMAL. V modulu FLUID jde o stejné hodnoty, které jsou pouze přesněji zadány (v simulaci č. 1 jsem vycházel z rovnic nalezených v článkách [24], [25] do kterých jsem dosadil). Vzhledem k tomu, že je simulováno pouze

proudění lze předpokládat, že odlišně definovaný modul THERMAL nebude mít výrazný vliv na průběh proudění.

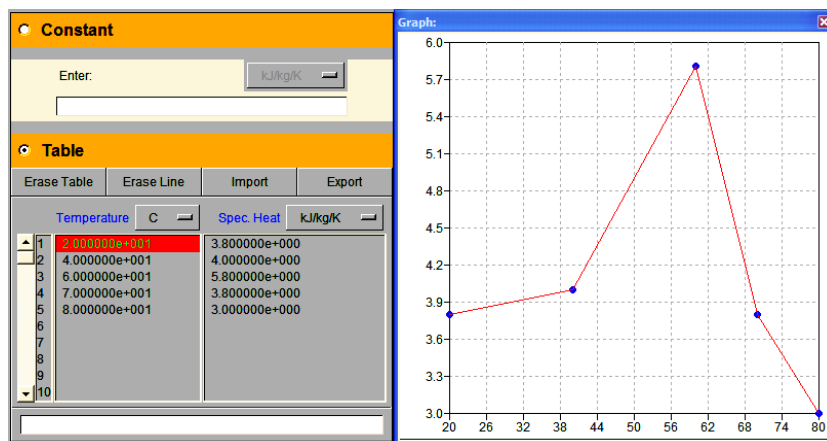
### Nastavení modulu THERMAL



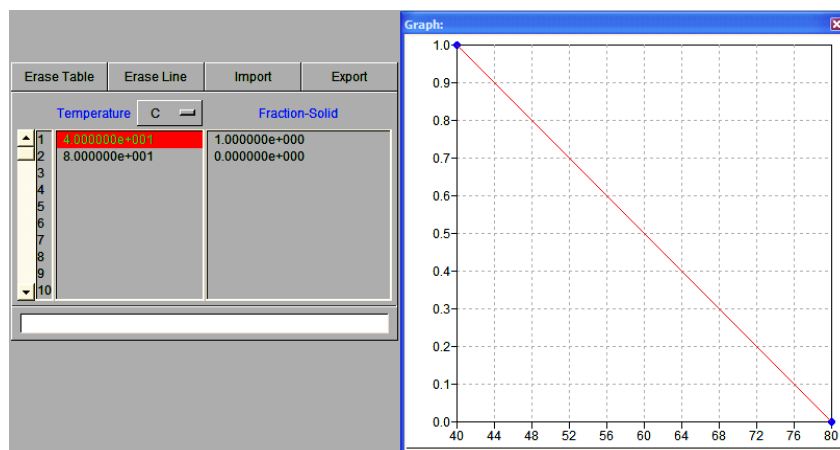
Obr. 2.4-47 Tepelná vodivost – simulace č.2



Obr. 2.4-48 Hustota – simulace č.2



Obr. 2.4-49 Specifické teplo – simulace č.2

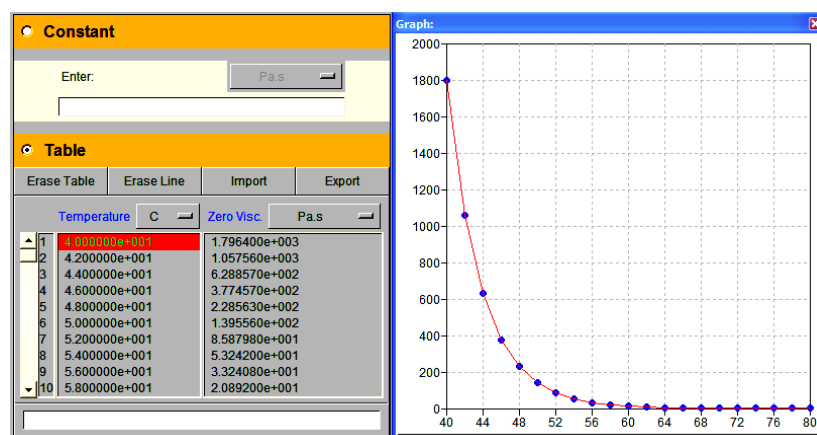


**Obr. 2.4-50** Frakce solidu – simulace č.2

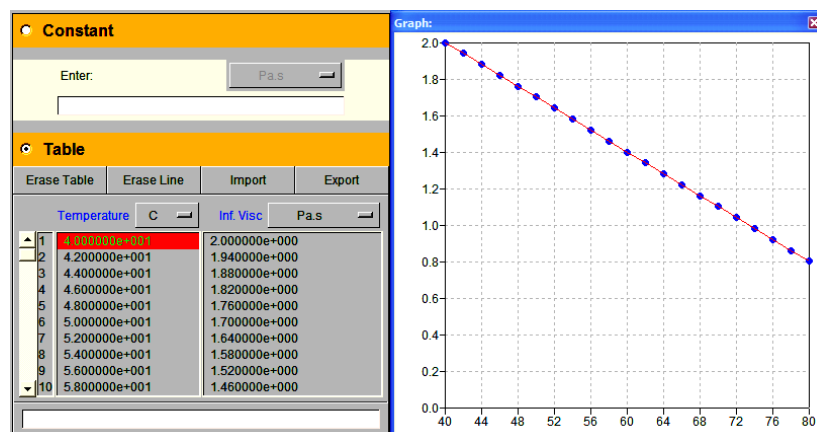
Latentní teplo – simulace č.2 = 50 kJ/kg

Teplota likvidu: 80 °C Teplota solidu: 40 °C

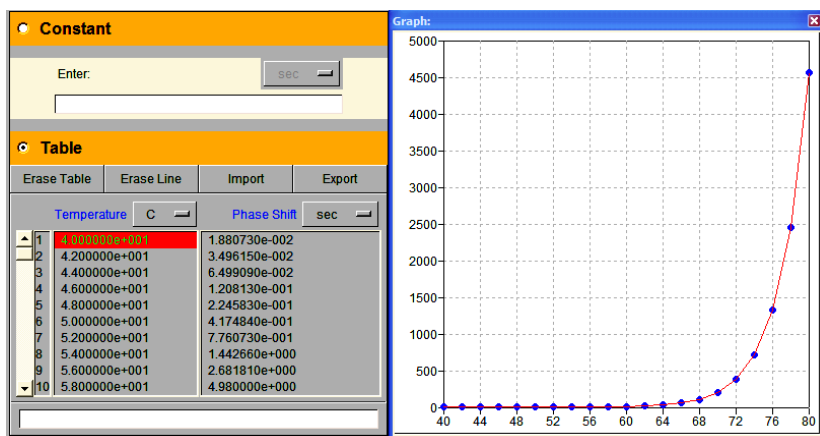
### Nastavení modulu FLUID



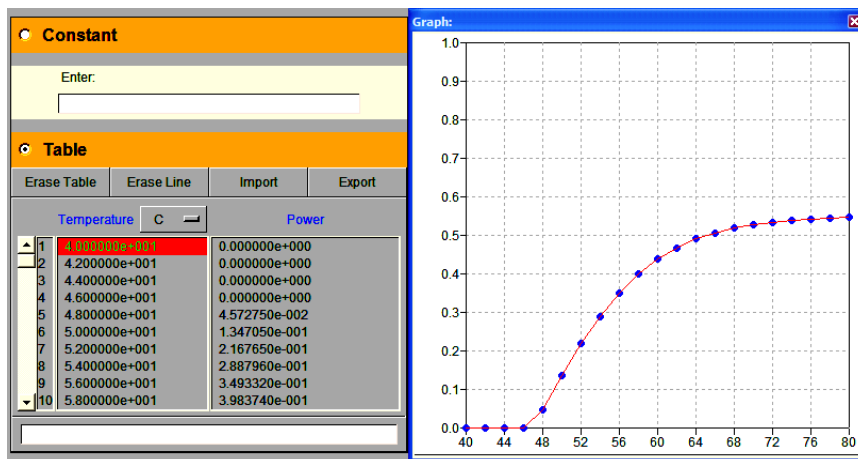
**Obr. 2.4-50** Viskozita při nulové deformační rychlosti – simulace č.2



**Obr. 2.4-51** Viskozita při nekonečné deformační rychlosti – simulace č.2



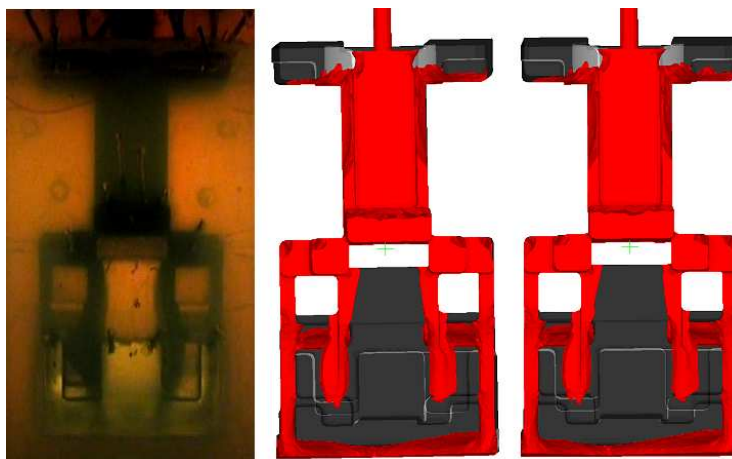
Obr. 2.4-52 Fázový posuv – simulace č.2



Obr. 2.4-53 Mocninný koeficient – simulace č.2

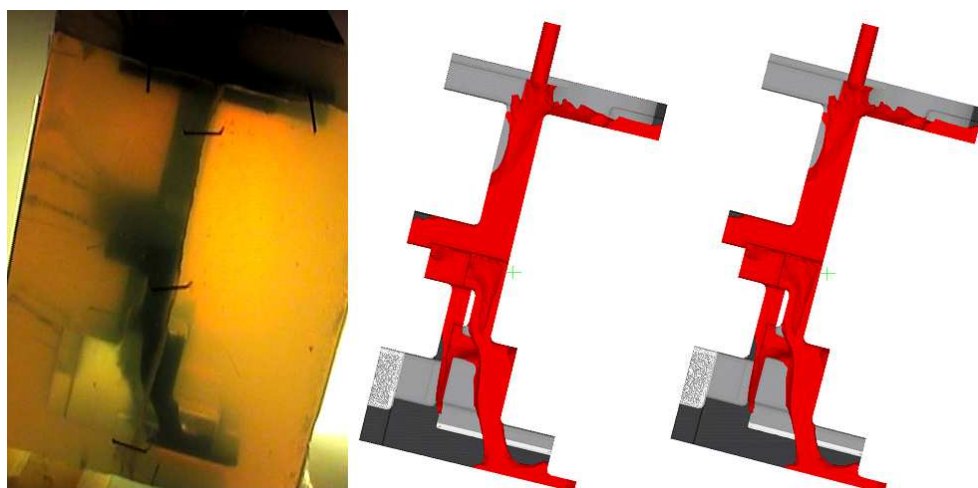
Yasuda koeficient v simulaci č.2 je roven 2

### Validace výsledků simulace č.2



Obr. 2.4-54 Skutečnost – 19s    sim. č.2 - 22s    sim. č.1 – 22s





**Obr. 2.4-55** Skutečnost – 19s    sim. č.2 - 22s    sim. č.1 – 22s

Detailní snímky a videa jsou v přílohách **P14**, **P15** a **P19**, **P20**, **P21**.

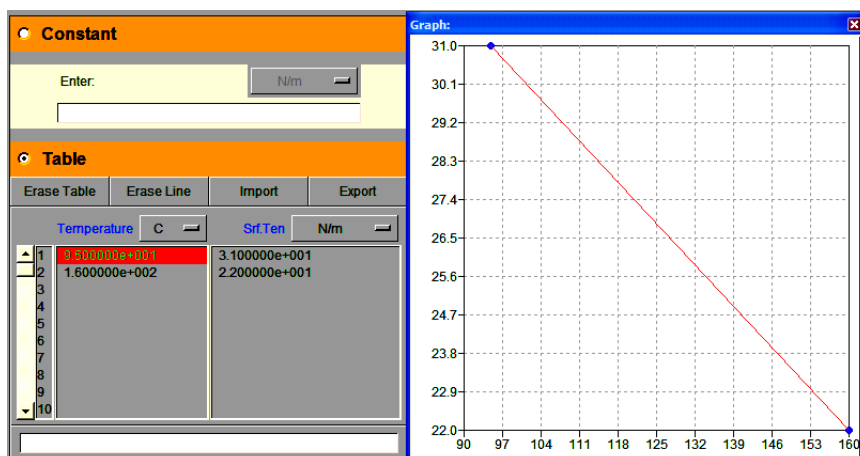
### **Zhodnocení simulace č.2**

Jak je patrné příloh a z uvedených snímků (**Obr. 2.4-54**, **Obr. 2.4-55**) porovnávající první a druhou simulaci, rozdíly v definici v modulu THERMAL nemají podstatný vliv na průběh plnění.

### **2.3.3.3 Simulace č.3**

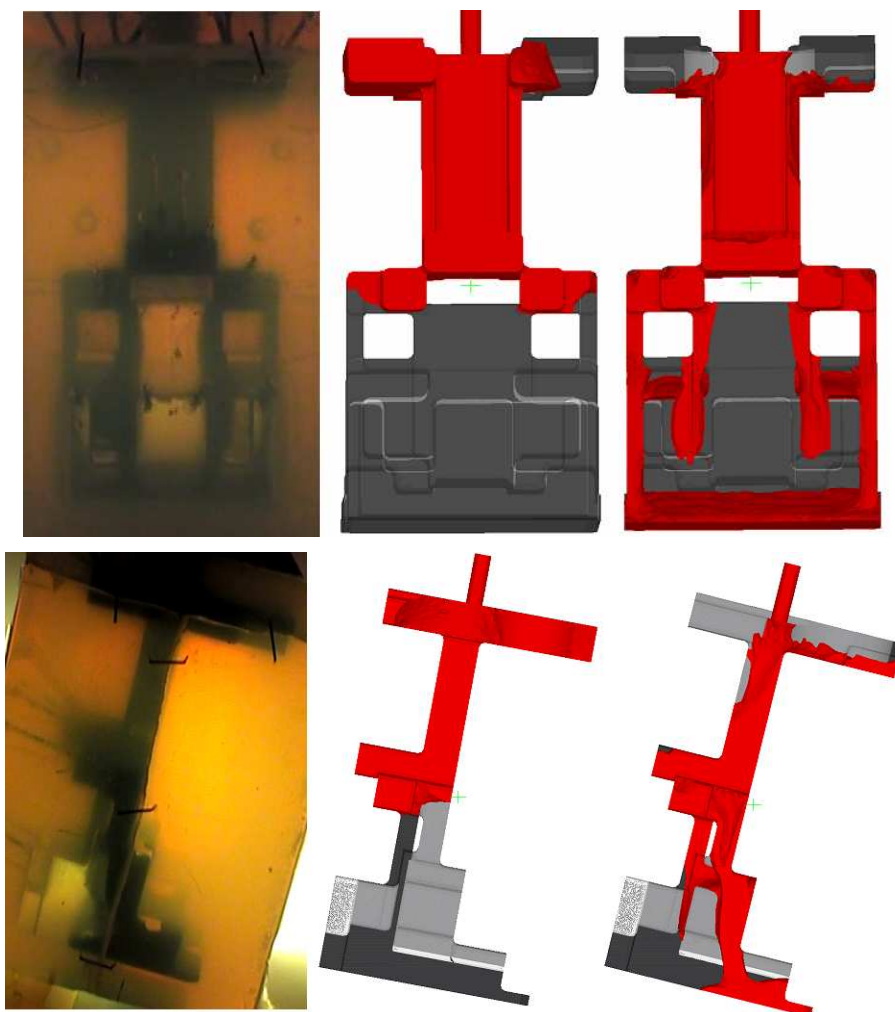
Shodné nastavení jako u první simulace, ale navíc zadán vliv povrchového napětí. Vliv povrchového napětí na průběh plnění v simulaci nebyl znám proto jsem volil velmi vysoké hodnoty, aby byl patrný možný vliv. V článku [26] byly uvedeny hodnoty mimo teplotní interval při kterém probíhá lití. ProCAST by měl umět v případě lineárního zadání hodnot veličiny mimo odpovídající interval sám dopočítat pro požadované teploty. Tato funkce bude také v této simulaci ověřena.

Při výpočtu simulace proudění s uvažováním povrchového napětí není možné výpočet rozdělit mezi více procesorů, výpočet musí běžet pouze na jednom. To znamená nárůst výpočtového času.



**Obr. 2.4-56** Povrchové napětí– simulace č.3

### Validace výsledků simulace č.3



**Obr. 2.4-57** Skutečnost – 26s      sim. č.3 - 26s      sim. č.1 – 26s

Detailní snímky a videa jsou v přílohách P14, P15 a P22, P23, P24.

### Zhodnocení simulace č.3

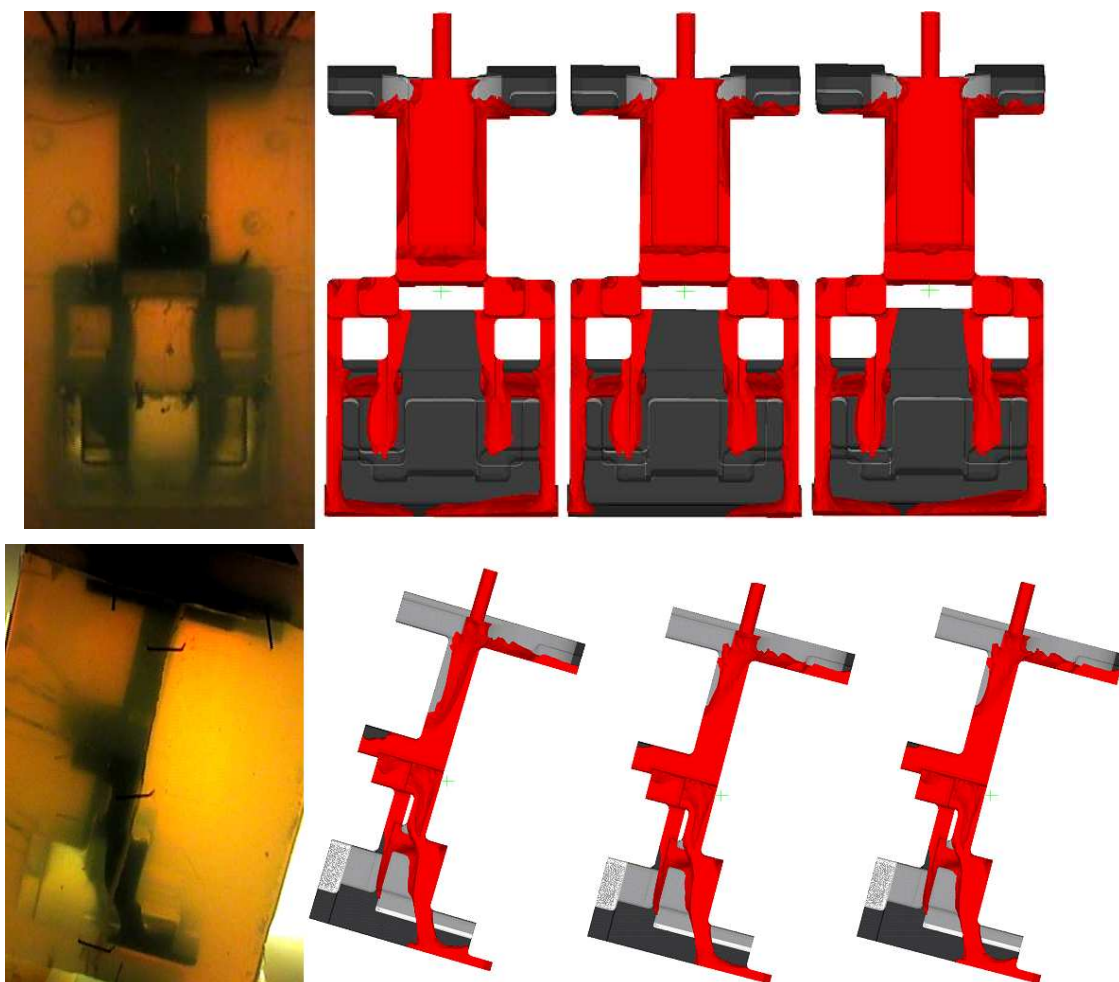
Jak je patrné z uvedených výsledků (**Obr. 2.4-57** a přílohy **P22**, **P23**, **P24**) povrchovým napětím lze zcela zásadně ovlivnit průběh proudění. Zde se opět potvrzuje, že přesná data jsou základem kvalitní simulace.

#### 2.3.3.4 Simulace č.4

Vzhledem k naměřeným hodnotám viskozity (viz kap. **2.4.1.2 C**), kdy pro určitý interval smykových rychlostí je průběh lineární, v této simulaci bude ověřena možnost zadat proudění jako newtonské, tzn. že viskozita voskové směsi se nemění se změnou smykového namáhání (**Obr. 2.4-62**). Zadání proudění jako proudění newtonské kapaliny znamená úsporu výpočetního času (**Tab. 2.4-2**).

Shodné nastavení jako u prvních dvou simulací (tj. bez povrchového napětí), proudění zadáno naměřenými hodnotami jako newtonské.

#### Validace výsledků simulace č.4



**Obr. 2.4-58** Skut.–20s, sim. č.4– 19,8s, sim. č.1– 19,8s, sim. č.1– 21,7

Detailní snímky a videa jsou v přílohách **P14, P15 a P25, P26, P27**.

#### **Zhodnocení simulace č.4**

Z uvedených snímků (**Obr. 2.4-58**) a příloh (**P16, P17 a P25, P26, P27**) vidíme, že rozdíl v zadefinování proudění jako nenewtonského (simulace č.1) a newtonského (simulace č.4) je naprosto zanedbatelný a v dalších simulacích bude proto uvažováno newtonské proudění, která znamená nižší výpočtový čas.

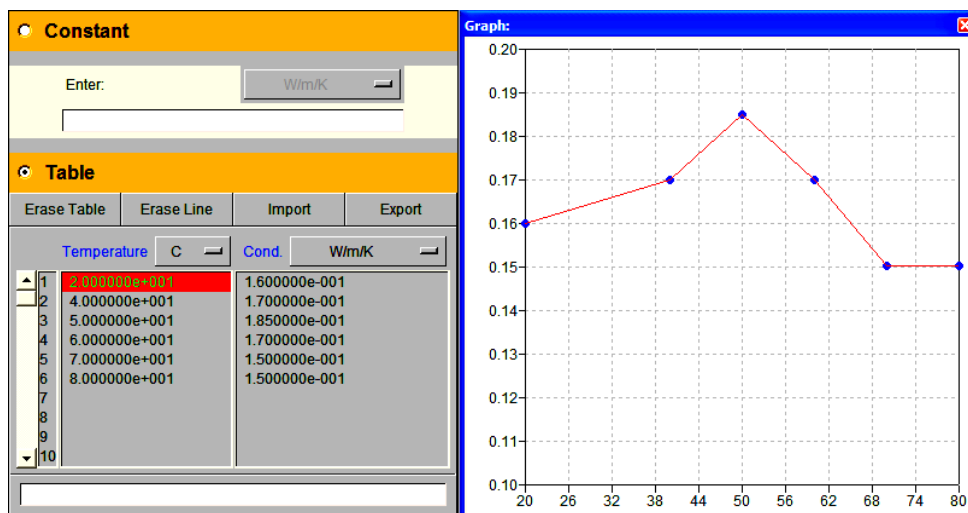
#### **2.3.3.5 Simulace č.5**

V této simulaci bylo podle naměřených hodnot zadáno do modulu THERMAL specifické měrné teplo, latentní teplo a teplota solidu, likvidu (viz kap. **2.4.1.2 C**). Do modulu FLUID byla zadána viskozita pro newtonské proudění podle naměřených hodnot, povrchové napětí bylo odvozeno podle informací nalezených v článku [26].

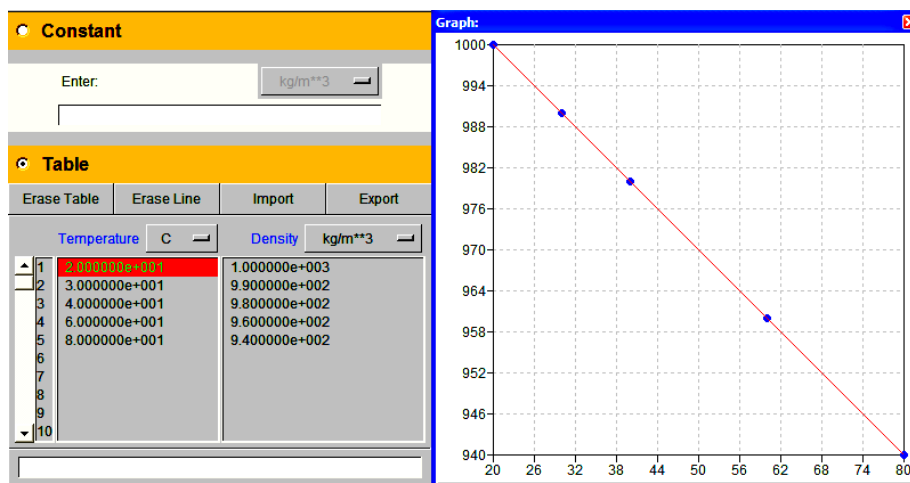
#### **Nastavení modulu THERMAL**

Latentní teplo – simulace č.5 – 4 kJ/kg

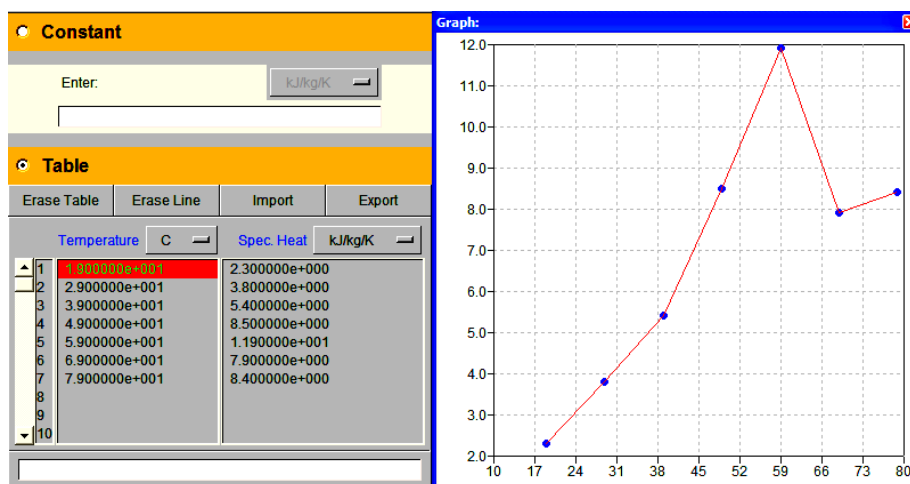
Teplota likvidu: 69 °C Teplota solidu: 63 °C



**Obr. 2.4-59** Tepelná vodivost – simulace č.5

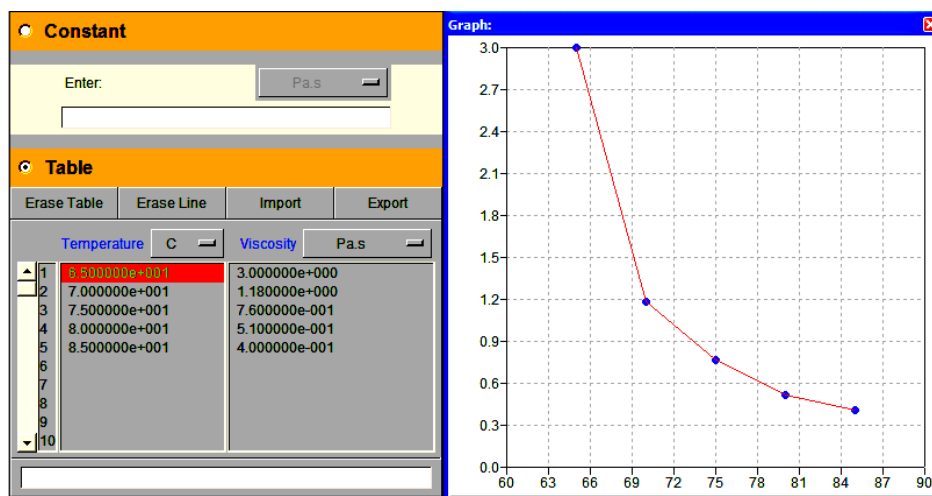


Obr. 2.4-60 Hustota – simulace č.5

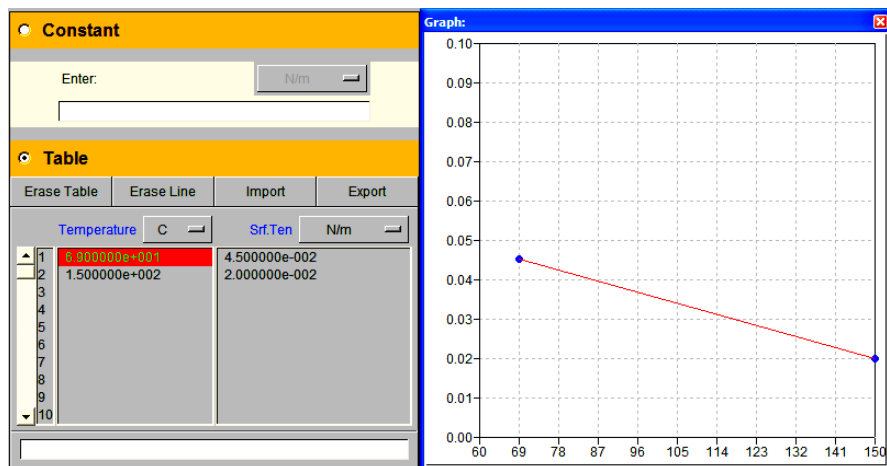


Obr. 2.4-61 Specifické teplo – simulace č.5

### Nastavení modulu FLUID

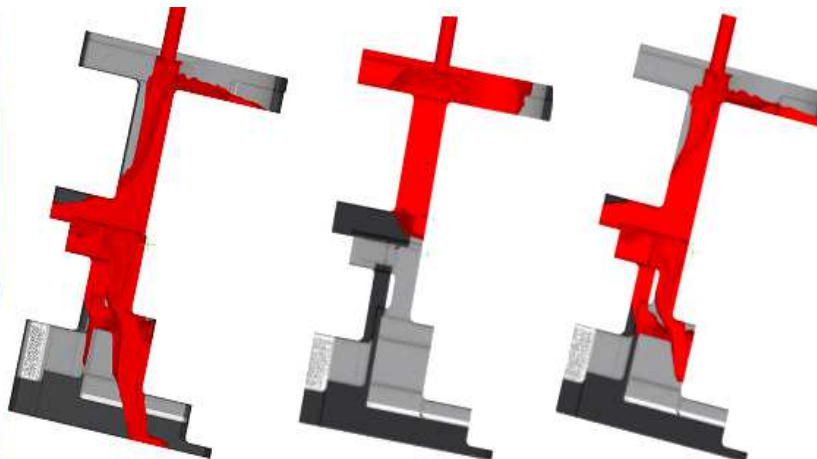
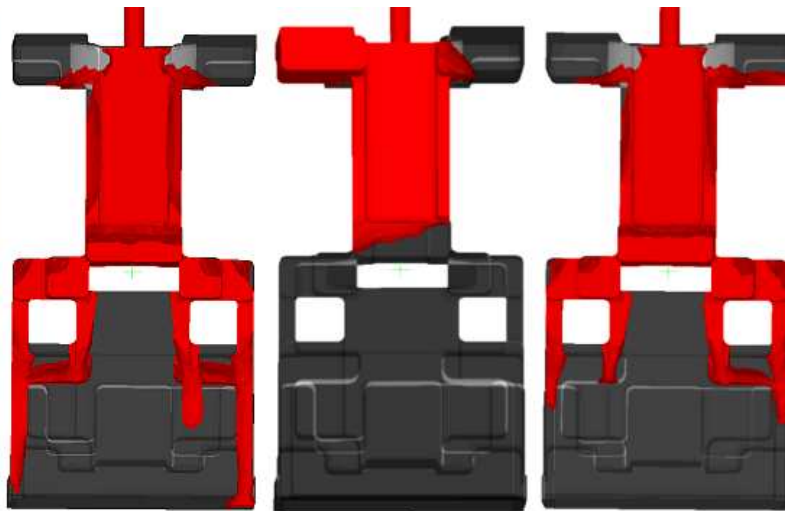


Obr. 2.4-62 Viskozita, newtonské proudění – simulace č.5



Obr. 2.4-64 Povrchové napětí – simulace č.5

### Validace výsledků simulace č.5



Obr. 2.4-65 15s: Skut., sim. č.5, sim. č.3, sim. č.1

Detailní snímky a videa jsou v přílohách P14, P15 a P28, P29, P30.

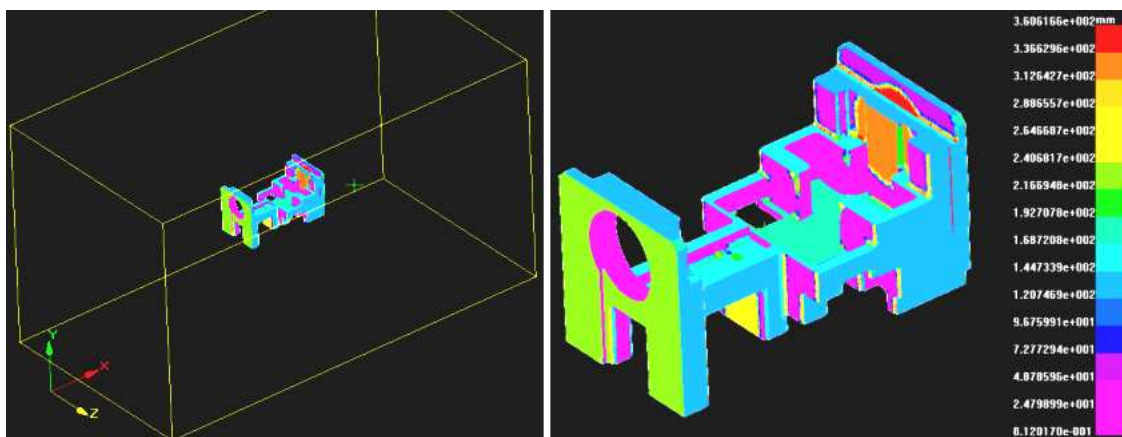
### **Zhodnocení simulace č.5**

Z obrázku (**Obr. 2.4-65**) a příloh (**P16, P17 a P28, P29, P30**) je patrné, že simulace č.5 se téměř neliší od simulace č.1, u které nebylo zadáno povrchové napětí. Bylo by tedy vhodné skutečné povrchové napětí voskové směsi změřit. Bohužel na FS VUT Brno není možné toto měření provést, proto bude povrchové napětí odhadnuto s pomocí dalších simulací.

### **2.3.3.6 Simulace č.6**

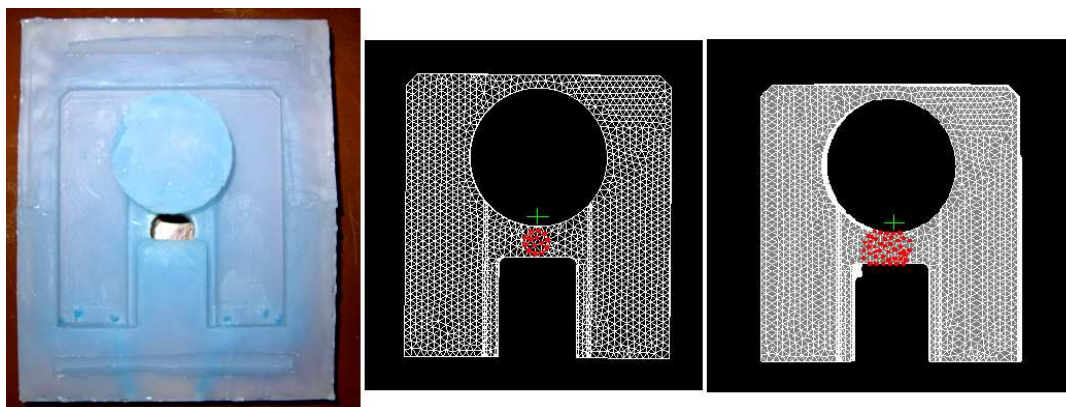
V rámci snížení výpočtového času a vzhledem k tomu, že je simulován pouze průběh plnění formy, bylo provedeno nahrazení skutečného tvaru silikonové formy formou virtuální (**Obr. 2.4-66**).

Vytvoření virtuální formy spočívá ve vytvoření kvádrového obalu kolem odlitku, a to až v modul PreCAST. Při výpočtu je pak uvažováno, že veškeré teplo je pohlceno formou a vnější povrch formy není ochlazován.



**Obr. 2.4-66** Virtuální forma kolem modelu „C“, zobrazení tzv. tepelné hloubky = vzdálenost povrchu odlitku k vnější hraně virtuální formy

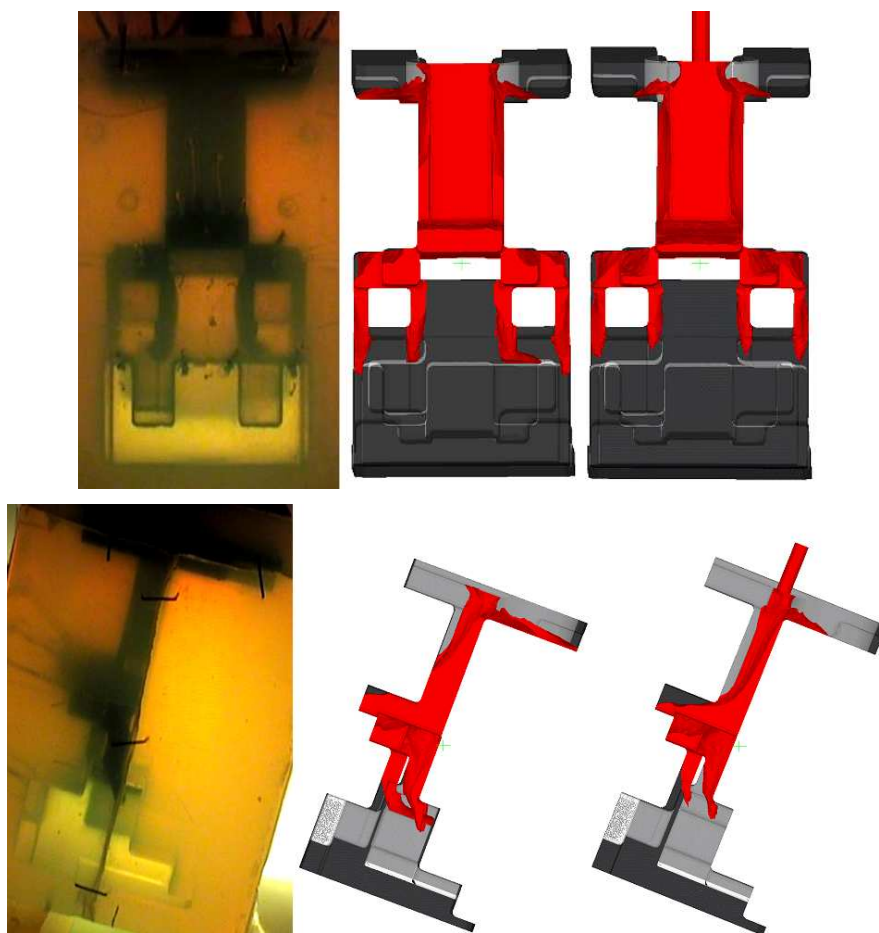
Dále byla upravena velikost licího otvoru, tak aby lépe vystihovala skutečný tvar (**Obr. 2.4-67**).



**Obr. 2.4-67** Vtokový otvor na skutečné formě, původní vtokový otvor použitý u simulací č.1 až 5, upravený otvor používaný od simulace č.6

Ostatní nastavení jsou shodná se simulací č.5.

#### **Validace výsledků simulace č.6**



**Obr. 2.4-68** 10s: Skut.

sim. č.6

sim. č.5

Detailní snímky a videa jsou v přílohách P14, P15 a P31, P32, P33.



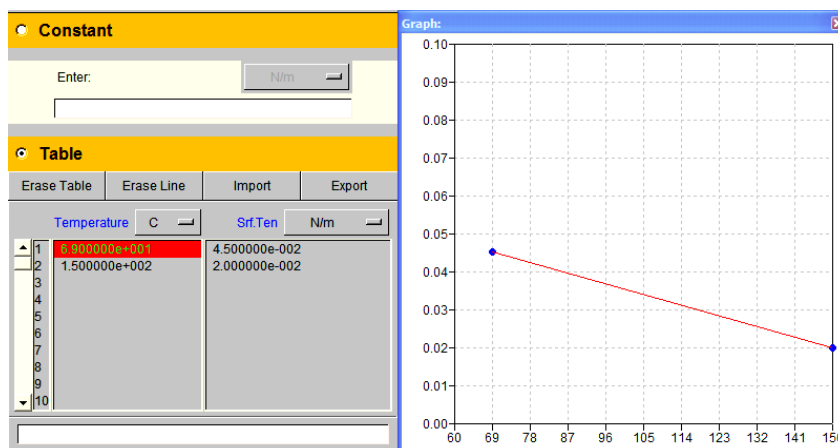
### Zhodnocení simulace č.6

Zpřesněním tvaru vtokového otvoru bylo dosaženo časové shody mezi simulovaným a skutečným průběhem plnění. Je patrný i pozitivní dopad na tvar proudu, který se již velmi blíží skutečnému průběhu. Plnění vrchní části stále neodpovídá skutečnosti (**Obr. 2.4-68**).

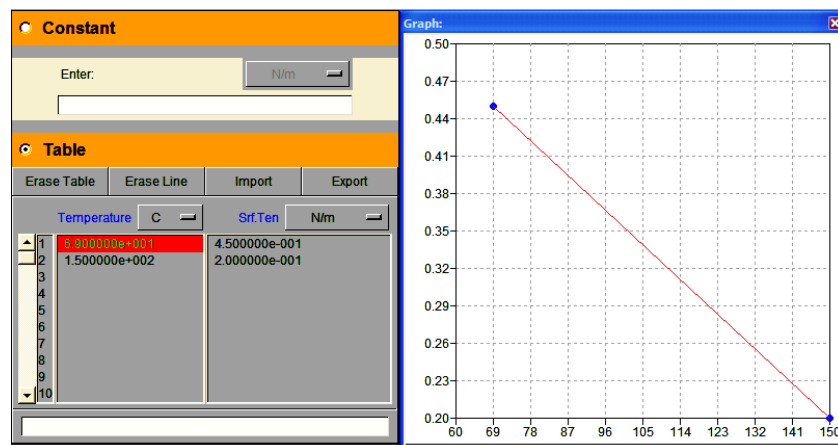
### 2.3.3.7 Simulace č.7

Hlavní vliv na průběh plnění ze zadávaných parametrů má viskozita a povrchové napětí. Vzhledem k tomu, že viskozita pro danou směs byla naměřena a povrchové napětí pouze odhadnuto, budou měněny hodnoty povrchového napětí tak, aby bylo dosaženo zaplňování dutiny formy s co největším souladem se skutečností. V simulaci č. 7 bylo zvýšeno povrchové napětí 10x oproti simulaci č. 6 (**Obr. 2.4-69** a **Obr. 2.4-70**).

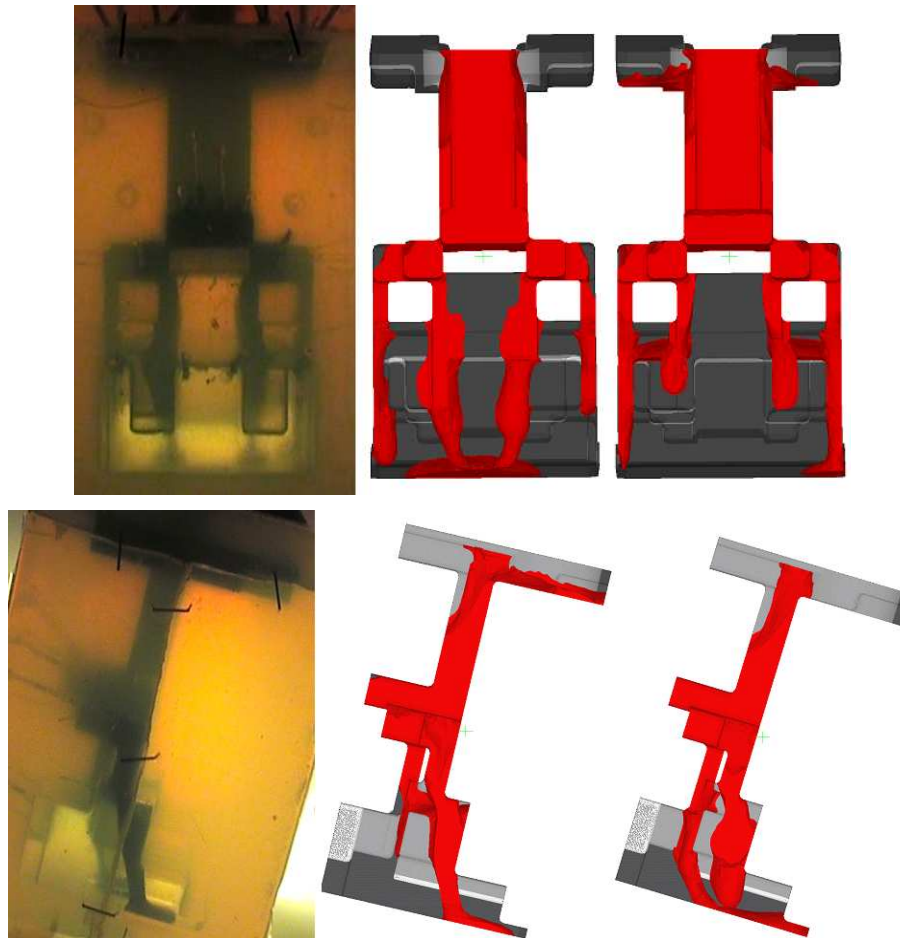
Ostatní nastavení jsou shodná se simulací č.6.



**Obr. 2.4-69** Povrchové napětí – simulace č.6



**Obr. 2.4-70** Povrchové napětí – simulace č.7

**Validace výsledků simulace č.7**

**Obr. 2.4-71** 13s: Skut. sim. č.7 sim. č.6

Detailní snímky a videa jsou v přílohách **P14**, **P15** a **P34**, **P35**, **P36**.

**Zhodnocení simulace č.7**

Z pohledu simulace lze odhadnout, že velikost povrchového napětí pro teploty 69°C a 150°C v intervalech:

69°C: ( 0,045 , 0,45 ) N/m

150°C: ( 0,02 , 0,2 ) N/m

Hodnotu povrchového napětí je nutné upřesnit.

**2.3.3.8 Simulace č.8**

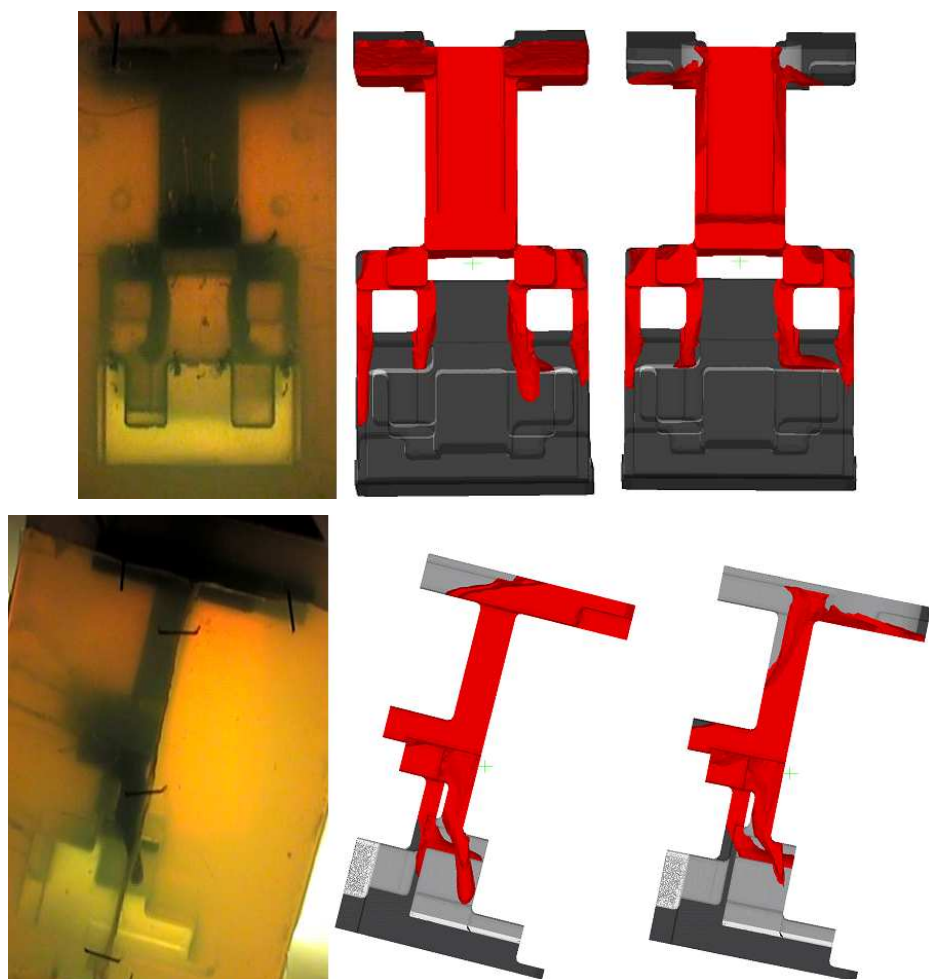
Doposud bylo plnění zadáno rychlostní podmínkou (rychlost plnění = 17,95 mm/s), která byla vypočtena v PreCastu pomocí rychlostního kalkulátoru, do kterého se zadá skutečná doba plnění odlitku a plocha průřezu

kterým proudí tavenina. Software pak při výpočtu vychází z rovnice kontinuity (viz. rovnice **(1-3)**). Plnění horní části formy stále neodpovídá skutečnosti i když průběh plnění zbývajících částí je s realitou téměř identický. Další možností je definovat plnění pomocí tlakové podmínky, kdy se na průřez, kterým je odlitek plněn, zadá odpovídající velikost tlaku. Předběžně byla velikost tlaku stanovena z rovnice :

$$p = h \cdot \rho \cdot g = 60 \cdot 10^{-3} \cdot 950 \cdot 9,81 = 559,2 Pa \quad (2-1)$$

Tato hodnota se na základě provedené simulace ukázala jako příliš vysoká. Následující simulaci je zadána tlaková podmínka, tlakem o velikosti 50 Pa. Povrchové napětí a ostatní nastavení jsou shodná se simulací č.6, liší se tedy pouze rychlostní (simulace č.6) a tlakovou definicí (simulace č.8), jež jsou zadány na shodné plochy.

#### Validace výsledků simulace č.8



**Obr. 2.4-72** Skut.– 10s      sim. č.8 - 5s      sim. č.6 – 10s

Detailní snímky a videa jsou v přílohách **P14, P15 a P37, P38, P39.**

### Zhodnocení simulace č.8

Aplikací tlakové podmínky došlo k zaplňování horní oblasti formy (**Obr. 2.4-72**). Došlo také k pozitivnímu ovlivnění čel proudů (zakulacený tvar čel). Došlo ke zkrácení času plnění. Je třeba určit optimální hodnotu tlaku z hlediska zaplnění horní části formy a doby plnění.

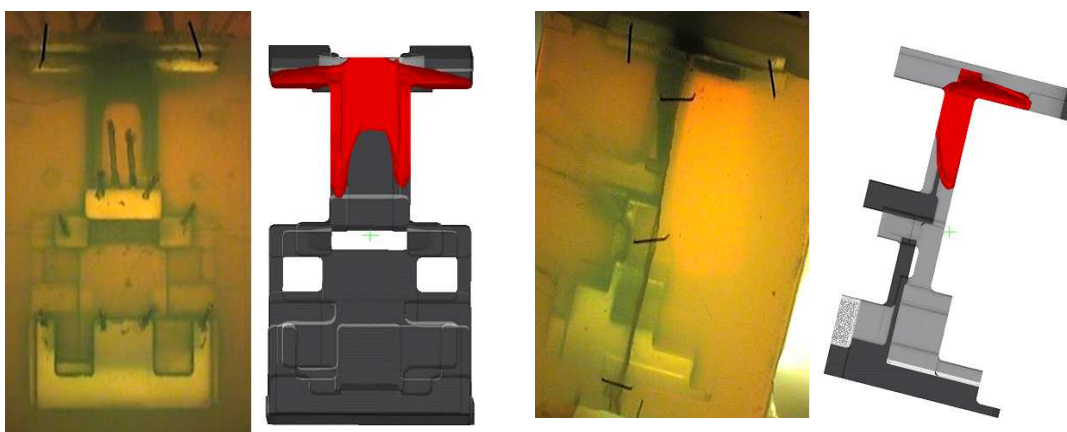
### 2.3.3.9 Simulace č.9

Dále bylo, stejným postupem jako u předešlých, provedeno několik simulací, jejichž cílem bylo nalézt optimální velikost tlaku a povrchového napětí.

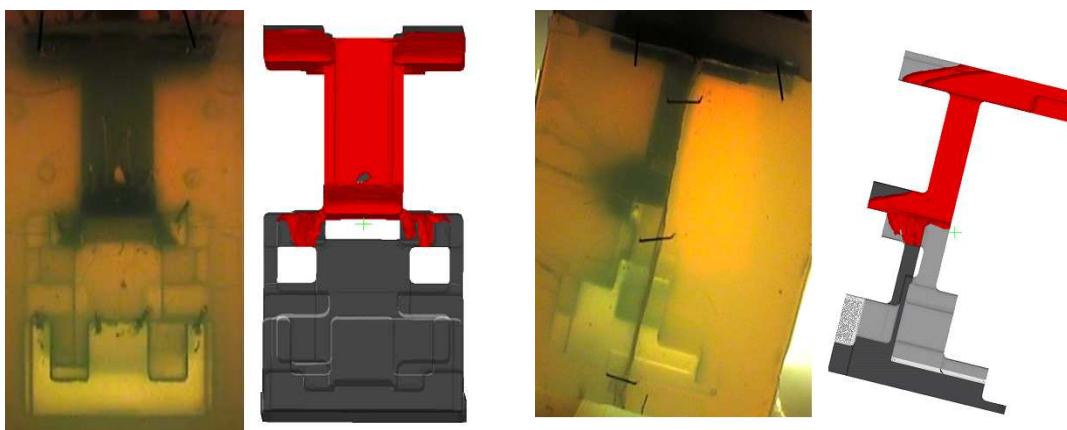
Z provedených simulací bylo jako nejlepší nastavení parametrů vyhodnoceno: - povrchové napětí: 69°C – 0,045 N/m - tlak: 150 Pa

150°C – 0,02 N/m

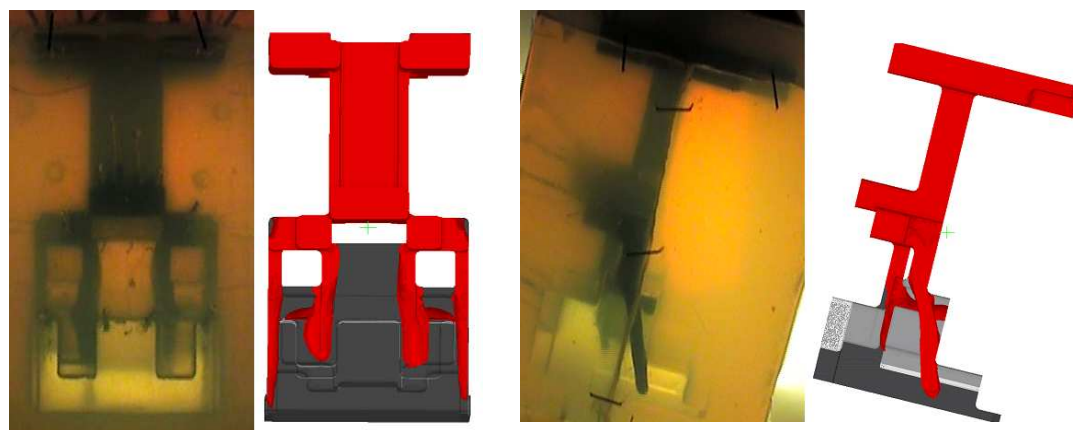
### Validace výsledků simulace č.9



Obr. 2.4-73 Skut.– 1s sim. č.9 – 0,4s



Obr. 2.4-74 Skut.– 6s sim. č.9 – 1,9s



**Obr. 2.4-75** Skut.– 11s sim. č.9 – 4,5s

Detailní snímky a videa jsou v přílohách **P14**, **P15** a **P40**, **P41**, **P42**.

#### **Zhodnocení simulace č.9**

Proudění voskové směsi v silikonové formě v simulaci č.9 již s dostatečnou přesností odpovídá realitě (**Obr. 2.4-73** až **Obr. 2.4-75** a uvedené přílohy). Je třeba ještě odstranit časový rozdíl mezi simulací a skutečností.

#### **2.4.4 Zhodnocení dosažených výsledků simulací**

Stanoveného cíle sestavit simulaci plnění silikonové formy ve vakuu bylo dosaženo. Nastavované parametry byly zoptimalizovány s ohledem na průběh plnění a zkrácení výpočtového času (viz. **Tab. 2.4-2**).

Tab. 2.4-2 Provedené simulace

Simulace číslo:	S formou	Bez formy	Rychlostní podmínka	Tlaková podmínka	Nenewton. proud.	Newton. proud.	Povrchové napětí	Čas výpočtu hod
<b>1</b>	A		A		A			759
<b>2</b>	A		A		A			764
<b>3</b>	A		A		A		A	1162
<b>4</b>	A		A			A	A	302
<b>5</b>	A		A			A	A	310
<b>6</b>		A	A			A	A	231
<b>7</b>		A	A			A	A	216
<b>8</b>		A		A		A	A	106
<b>9</b>		A		A		A	A	97

Ve všech provedených simulacích dojde k zastavení dvou středových proudů ve spodní části formy. Při skutečném plnění formy (příloha **P14**, **P15**) dojde k opakovanému ukápnutí. Otázkou zůstává, zda tento rozdíl souvisí

přesností definovaných parametrů voskové směsi či s možnostmi matematického popisu užitého pro proudění v ProCASTu.

Časová disproporce mezi skutečným průběhem a simulací (např. příloha **P40**) je nejpravděpodobněji způsobena tím, že natáčení plnění silikonové formy probíhalo při atmosférickém tlaku (běžnou videokameru nelze umístit do vakuové komory) a v simulacích bylo nastaveno vakuum (nulový odpor vzduchu).

Dále je třeba testovat výpočtové parametry (Run Parameters), které byly v uvedených simulacích přednastaveny defaultně, a pomocí kterých lze ovlivňovat průběh proudění (především parametry WALLF, WSHEAR, GAS, které byly nastaveny 0,8, 2, 0 ve všech simulacích). Je třeba otestovat zadání neneutonského proudění pomocí modelu Carreau-Yasuda při současné aplikaci tlakové podmínky.

Jak je z uvedených výsledků patrné (viz také přílohy **P143** až **P42**), mají materiálové vlastnosti zcela zásadní vliv na průběh plnění. Zvláště u voskových směsí, které se vyznačují značně odlišnými vlastnostmi, je třeba pro konkrétní směs naměřit přesné hodnoty požadovaných veličin. Pak lze provádět pouze optimalizaci parametrů lití a výpočtových parametrů sloužících k optimalizaci sestavované simulace. S rostoucím počtem neznámých roste počet možných kombinací a tedy i simulací, které musí být sestaveny.

### 3 SHRnutí A ZávĚR

Hlavním cílem diplomové práce bylo sestavení simulace gravitačního lití voskové směsi do silikonové formy ve vakuu. Tato simulace byla sestavována z důvodu optimalizace nové Rapid Prototyping metody, kdy se pomocí silikonové formy vytváří prototypové voskové modely pro technologii přesného lití na vytavitelný model.

V úvodní teoretické části práce je zmapován vývoj trhu s přesnými odlitky a Rapid Prototyping zařízeními. Z uvedených údajů lze usuzovat na další růst obou trhů, a tedy i na účelnost vytvoření této práce. Jsou ukázány možnosti technologií RP s ohledem na jejich aplikaci ve slévárenství. Dále je rozebrána problematika simulací slévárenských procesů se zaměřením na software ProCAST, který je využíván v praktické části. Je rozebráno určování a následné zadávání vlastností nových materiálů do materiálové databáze ProCASTu (moduly THERAL, FLUID). Jsou popsány metody jakými je možné požadované veličiny pro voskové směsi stanovit. Závěrečná kapitola ukazuje široké možnosti ve složení a vlastnostech voskových směsí používaných ve slévárenství pro výrobu voskových modelů.

Úvod praktické části je věnován popisu klasického postupu výroby kovového odlitku 019–C 002 CROWN CENTRE (v práci zjednodušeně nazýván „C“) ve slévárně přesného lití Fimes a.s. v Uherském Hradišti. Voskový model „C“ je poté zhotoven technologií RP. Je detailně popsána výroba matečného modelu na FDM tiskárně a jeho další úpravy pro zhotovení kvalitní matečné silikonové formy. Díky praktickému zhotovení silikonové formy a voskových modelů jsou rozpoznány slabá místa této RP metody k jejíž odstranění bude sloužit sestavovaná simulace (správné umístění a velikost vtokové soustavy, volba odvzdušnění, urychlení ochlazování formy). Největší část práce je věnována celkovému popisu tvorby simulace gravitačního odlití voskového modelu „C“ do silikonové formy ve vakuu. Z provedených simulací je patrný zásadní vliv přesnosti termofyzikálních dat zadávaných do materiálové databáze. Nepřesnosti v zadání se projevují odlišnostmi proudění směsi v simulaci od skutečného plnění silikonové formy. V případě, že některou zadávanou hodnotu neznáme (např. povrchové napětí voskové směsi) lze ji provedením několika simulací přibližně stanovit, ale výrazně narůstá časová náročnost sestavování simulace (musí být navíc provedeno několik dalších simulací pro upřesnění neznámého parametru materiálu). S rostoucím počtem neznámých či nepřesných údajů zadávaných do simulace roste počet možných kombinací hodnot nastavovaných parametrů a sestavení korektní simulace se komplikuje. V praktické části bylo provedeno měření viskozity a měrného tepla voskové směsi použité pro odlití prototypových voskových modelů. Viskozita odlévané směsi má zásadní vliv na průběh proudění a u jednotlivých druhů vosků se může i výrazně lišit. Ostatní zadávané parametry byly získány od výrobce voskové směsi, od společnosti CALCOM ESI, z různých zdrojů na Internetu a některé byly stanoveny pomocí simulace (povrchové napětí). Simulace plnění byl sestavena a validována se skutečným průběhem plnění formy. Byla konstatována dostatečná shoda mezi simulací a skutečností. Do materiálové databáze ProCASTu byly přidány dva

nové materiály – plněná vosková směs A7-R27 a silikonový kaučuk SILASTIC T-4, které mohou být používány i při simulacích dalších výrobních procesů.

Dále je třeba pokračovat v sestavování simulace tuhnutí a chladnutí, pak bude možné využít simulaci pro optimalizaci, zvýšení efektivity celé RP technologie. Pomocí simulace bude možné navrhnout správnou polohu odlévaného modelu, tvar a umístění vtokové soustavy, optimální rozmístění průduchů, bude možné zobrazit teplotní pole ve formě, navrhnout a optimalizovat chladicí systém formy. Práce je rozsáhlá neboť představuje ucelený podklad pro přípravu dalších simulací a jejich následnou aplikaci na optimalizaci uvedené technologie RP.



## Seznam použitých zdrojů

- [1] BEELEY P.R., SMART R. F., *Investment Casting*, 1st ed., The University Press Cambridge, 1995, 486 s., ISBN 0 901716 66 9
- [2] [www.industrialmetalcasting.com](http://www.industrialmetalcasting.com) [ online ] 23.2.2008
- [3] [www.metrocast.it](http://www.metrocast.it) [ online ] 23.2.2008
- [4] [www.hitchiner.com](http://www.hitchiner.com) [ online ] 23.2.2008
- [5] HORÁČEK M., *Technologie vytavitelného modelu – technologie pro nové tisíciletí*, Slévárenství, číslo 10, 2001, str. 570-583, Brno, ISSN 0037-6825
- [6] HORÁČEK M., *Rozměrové změny v průběhu technologie vytavitelného modelu*, Slévárenství, číslo 1, 2005, str. 7-18, Brno, ISSN 0037-6825
- [7] WILLIAMS R., *World Investment Casting Markets Review*, CMRDI Cairo, prezentace, 2007
- [8] WILLIAMS R., *World Investment Casting Markets Review*, prezentace, 2003
- [9] HORÁČEK M., *Současné trendy v technologii vytavitelného modelu*, Sborník přednášek – Seminář přesného lití, Kuřim, 2007
- [10] RICHARD H., *EICF Best Practice Workshop*, Dusseldorf, prezentace, 2004
- [11] MATULA L., *Vliv technologických parametrů na konečné rozměry odlitků zhotovených metodou vytavitelného modelu*, Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojní, Ústav materiálového inženýrství, 1999
- [12] NOVÁ I., *Tepelné procesy ve slévárenských formách*, 1. vydání, Technická univerzita v Liberci, Vysokoškolský podnik s. r. o. Liberec, 2003, 133 s., ISBN 80 7083 662 8
- [13] KRUTIŠ V., *Přednášky k předmětu Matematické modelování*, VUT Brno, FSI, 2007
- [14] [www.esi-group.com](http://www.esi-group.com) [ online ] 12.3.2008
- [15] *User's Manual ProCAST 2008.0*, ESI Group, 2008
- [16] KAVIČKA F., *Termokinetika tuhnutí, ochlazování a ohřevu*, 1. vydání, Nakladatelství Vysokého učení technického v Brně, 1993, 153 s., ISBN 80 214 0531 7
- [17] DRÁPELA M., *Modul Rapid Prototyping*, Centrum vzdělávání a poradenství Vysokého učení technického v Brně, Opatření 3.3 s registračním číslem CZ.04.1.03/3.3.11.1./2641, Brno, 2006
- [18] PÍŠKA Z., *Rychlá výroba prototypů*, Studijní opora, VUT Brno Fakulta strojní, 2006

- [19] WOHLERS T., *Wohlers report 2006 - Rapid Prototyping and Manufacturing Annual Worldwide Progress Report*, Wohlers Associates, Inc., Colorado 80525, 2006, ISBN 0-9754429-2-9
- [20] <http://intl.stratasys.com> [online] 21.3.2008
- [21] GEBELIN J., CENDROWICZ, M., JOLLY M., *Modelling of the wax injection process for the investment casting process: prediction of defects*, IRC in Materials, The university of Birmingham, Edgbaston, Birmingham B15 2TT
- [22] SABAU S. A., CANNEL N. , *Final Technical Report : Predicting Pattern Tooling and Casting Dimensions for Investment Casting, Phase II*, Oak Ridge National Laboratory, Edison Materials Technology Center (EMTC) 3155 Research Blvd. Kettering, OH 45420 , 2006
- [23] SABAU S. A., *Tests for determining viscoelastic properties of investment casting waxes*, Metals and Ceramics Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 37831-6083, 2004
- [24] SABAU S. A., VISWANATHAN S., *Temperature Measurements in Wax Patterns and Wax-die Interfacial Heat Transfer Coefficients in Investment Casting*, Metals and Ceramics Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 37831-6083, 2003
- [25] SABAU S. A., VISWANATHAN S., *Material properties for predicting wax patterndimensions in investment casting*, Metals and Ceramics Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 37831-6083, 2003
- [26] GEBELIN J.-C., JOLLY M.R., CENDROWICZ A. M., CIRRE J. and BLACKBURN S., *Simulation of die filling for the wax injection process: Part I models for material behavior*, IRC in Materials Processing, University of Birmingham, 2004
- [27] MLEZIVA J., *Polymery – výroba, vlastnosti, struktura a použití*, 1. vydání, Sobotáles, Brno, 1993, 528 s.
- [28] <http://www.kmt.vslib.cz/sekce/dopluky/Polymery.pdf> [online] 28.3.2008
- [29] <http://www.freemansupply.com/video.htm> [online] 28.3.2008
- [30] <http://www.kme.zcu.cz/granty/biofrvs/pdf> [online] 28.3.2008
- [31] <http://www.mcae.cz/> [online] 28.3.2008
- [32] <http://www.materialise.com/materialise/view/en/92074-Magics.html> [online] 28.3.2008
- [33] WEIN O., *Úvod do reologie*, 1. vydání, Malé centrum, Chemická fakulta VUT v Brně, 84 s., 1996
- [34] WOHLERS T., *Wohlers Report 2006 Rapid Prototyping & manufacturing state of the Industry Annual Worldwide Progress Report*, Wohlers Associates, Inc., Oak Ridge Business Park, 1511 River Oak Drive Fort Collins, Colorado 80525, USA , ISBN 0-9754429-2-9

- [35] NĚMEČEK Z., *Měření viskozity*, VUT Brno, FSI, Ústav procesního a ekologického inženýrství, 2007, 57 s.
- [36] <http://www.labo-ms.cz/page.php?intlID=312&intlIDWeb=1> [ online ] 1.4.2008
- [37] PTÁČEK a kol., *Nauka o materiálu I.*, Akademické nakladatelství CERM, s. r. o., Brno, 2003, 516 s., ISBN 80-7204-193-2
- [38] <http://www.dowcorning.com> [ online ] 2.4.2008
- [39] ŠOB, F., *Hydromechanika*, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Akademické nakladatelství CERM s. r. o., Brno, 2002, ISBN 80-214-2037-5
- [41] DOŠKÁŘ, J., GABRIEL, J., HOUŠŤ M., PAVELKA M., *Výroba přesných odlitků*, SNTL – nakladatelství technické literatury, Praha, 1976 313 s.
- [42] HIRST R, Composition, *Control and Use of Investment Casting Wax*, prezentace Blayson
- [43] KRUTIŠ, V., *Numerická simulace přesného lití*, Seminář přesného lití, Kuřim, 2007
- [44] CARREAU J. P., KEE C. R. D., CHHABRA R. P., *Rheology of Polymeric Systems – Principles and Applications*, Hanser publisher, Munich Vienna, New York, 2000
- [45] BARTOVSKÁ, L., ŠIŠKOVÁ, M., *Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav*, Vysoká škola chemicko-technologická v Preze, čtvrté vydání, 2002, 192 s., ISBN 80-7080-475-0
- [46] JOLLY, M., 2nd FOCASST Miny-Conference, *The University of Birmingham IRC in Materials processing*, November, 2001
- [47] EHRENSTEIN W., REIDEL G., PIA T., *Thermal Analysis of Plastics – Theory and practice*, Carl Hanser Verlag, Mnichov, 2004, ISBN 3-446-22673-7
- [48] [www.tainstruments.co.uk](http://www.tainstruments.co.uk) [ online ] 19.4.2008
- [49] SMRČKA, V. Technologie rychlého prototypování za použití metody FDM a současně technologie vytavitelného modelu, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008, 77 s.

## Seznam příloh

- P1. Klasická metoda výroby kovového odlitku „C“
- P2. Tuhnutí, chladnutí odlitku ve formě
- P3. Výroba matečného modelu pomocí tiskárny FDM
- P4. Technologický postup pro výrobu forem ze silikonového kaučuku
- P5. Video\_Výroba modelu pomocí silikonové formy
- P6. Magics12
- P7. Produktové informace Silastic T-4
- P8. Silastic T-4\_Základní materiál
- P9. Silastic T-4\_Tvrdidlo
- P10. Vosková směs\_A7-R27\_Technická data
- P11. První měření viskozity
- P12. Druhé měření viskozity
- P13. Diferenciální skenovací kalorimetrie
- P14. Video\_Realita\_BP
- P15. Video\_Realita\_ZP
- P16. Video\_Simulace č.1\_BP
- P17. Video\_Simulace č.1\_ZP
- P18. Snímky\_Simulace č.1
- P19. Video\_Simulace č.2\_BP
- P20. Video\_Simulace č.2\_ZP
- P21. Snímky\_Simulace č.2
- P22. Video\_Simulace č.3\_BP
- P23. Video\_Simulace č.3\_ZP
- P24. Snímky\_Simulace č.3
- P25. Video\_Simulace č.4\_BP
- P26. Video\_Simulace č.4\_ZP
- P27. Snímky\_Simulace č.4
- P28. Video\_Simulace č.5\_BP
- P29. Video\_Simulace č.5\_ZP
- P30. Snímky\_Simulace č.5
- P31. Video\_Simulace č.6\_BP
- P32. Video\_Simulace č.6\_ZP

- P33. Snímky\_Simulace č.6
- P34. Video\_Simulace č.7\_BP
- P35. Video\_Simulace č.7\_ZP
- P36. Snímky\_Simulace č.7
- P37. Video\_Simulace č.8\_BP
- P38. Video\_Simulace č.8\_ZP
- P39. Snímky\_Simulace č.8
- P40. Video\_Simulace č.9\_BP
- P41. Video\_Simulace č.9\_ZP
- P42. Snímky\_Simulace č.9