

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

**Doc. Ing. Milan Horáček, CSc**

**ROZMĚROVÁ PŘESNOST ODLITKŮ  
VYRÁBĚNÝCH METODOU VYTAVITELNÉHO MODELU**

DIMENSIONAL ACCURACY OF INVESTMENT CASTINGS

ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE



BRNO 2004

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

technologie vytavitelného modelu, technologie lití "na hotovo", rozměrová přesnost, voskový model, skořepinová forma

## **KEY WORDS**

investment casting technology, "net-shape" casting, dimensional accuracy, wax pattern, ceramic shell

## **MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE**

oddělení pro vědu a výzkum FSI VUT v Brně

## OBSAH

<b>1</b>	<b>TECHNOLOGIE VYTAVITELNÉHO MODELU .....</b>	<b>4</b>
1.1	Obecný popis .....	4
1.2	Historie technologie vytavitelného modelu.....	6
1.3	Současné světové trendy a situace v ČR.....	6
<b>2</b>	<b>ROZMĚROVÉ ZMĚNY V PRŮBĚHU TECHNOLOGIE .....</b>	<b>8</b>
2.1	Přesnost odlitků obecně .....	8
2.2	Přesnost metody vytavitelného modelu.....	8
2.2.1	Rozbor rozměrových změn v průběhu technologie.....	8
2.2.2	Rozměrová přesnost voskových modelů .....	12
	A / Vliv voskové hmoty .....	12
	B / Vliv tvaru a rozměru součástí.....	12
	C / Vliv způsobu výroby voskového modelu.....	12
<b>3</b>	<b>MOŽNOSTI OVLIVNĚNÍ ROZMĚRŮ .....</b>	<b>14</b>
3.1	Experimenty ke sledování rozměrových změn.....	14
3.1.1	Zkušební těleso .....	14
3.1.2	Těleso pojistky .....	17
3.1.3	Lopatka.....	19
3.1.4	Stěrák .....	21
3.1.5	Spojovací kus.....	24
3.2	Shrnutí experimentálních výsledků .....	29
3.2.1	Zkušební těleso .....	29
3.2.2	Těleso pojistky .....	29
3.2.3	Lopatka.....	29
3.2.4	Těleso stěráku .....	30
3.2.5	Spojovací kus .....	30
<b>4</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>31</b>
	<b>LITERATURA.....</b>	<b>32</b>
	<b>SUMMARY .....</b>	<b>34</b>
	Investment casting technology –one of the “net-shape” processes .....	34
	Summary of Results for Individual Components Investigated.....	34
	Conclusions .....	35
	<b>PŘEDSTAVENÍ AUTORA .....</b>	<b>36</b>

# ROZMĚROVÁ PŘESNOST ODLITKŮ VYRÁBĚNÝCH TECHNOLOGIÍ VYTAVITELNÉHO MODELU

## 1 TECHNOLOGIE VYTAVITELNÉHO MODELU

### 1.1 Obecný popis

Technologie vytavitelného modelu („na ztracený vosk“ nebo také „přesné lití“) zaujala bezesporu jedno z předních míst mezi moderními slévárenskými technologiemi. Za posledních více jak 50 let se tato výrobní metoda vyvinula z technologie považované za metodu vysoce specializovanou na technologii v dnešní době běžně rozšířenou, reflektující požadavky zákazníků na odlitky jak z pohledu tvarové a rozměrové přesnosti, tak i materiálové náročnosti [ 1 ].

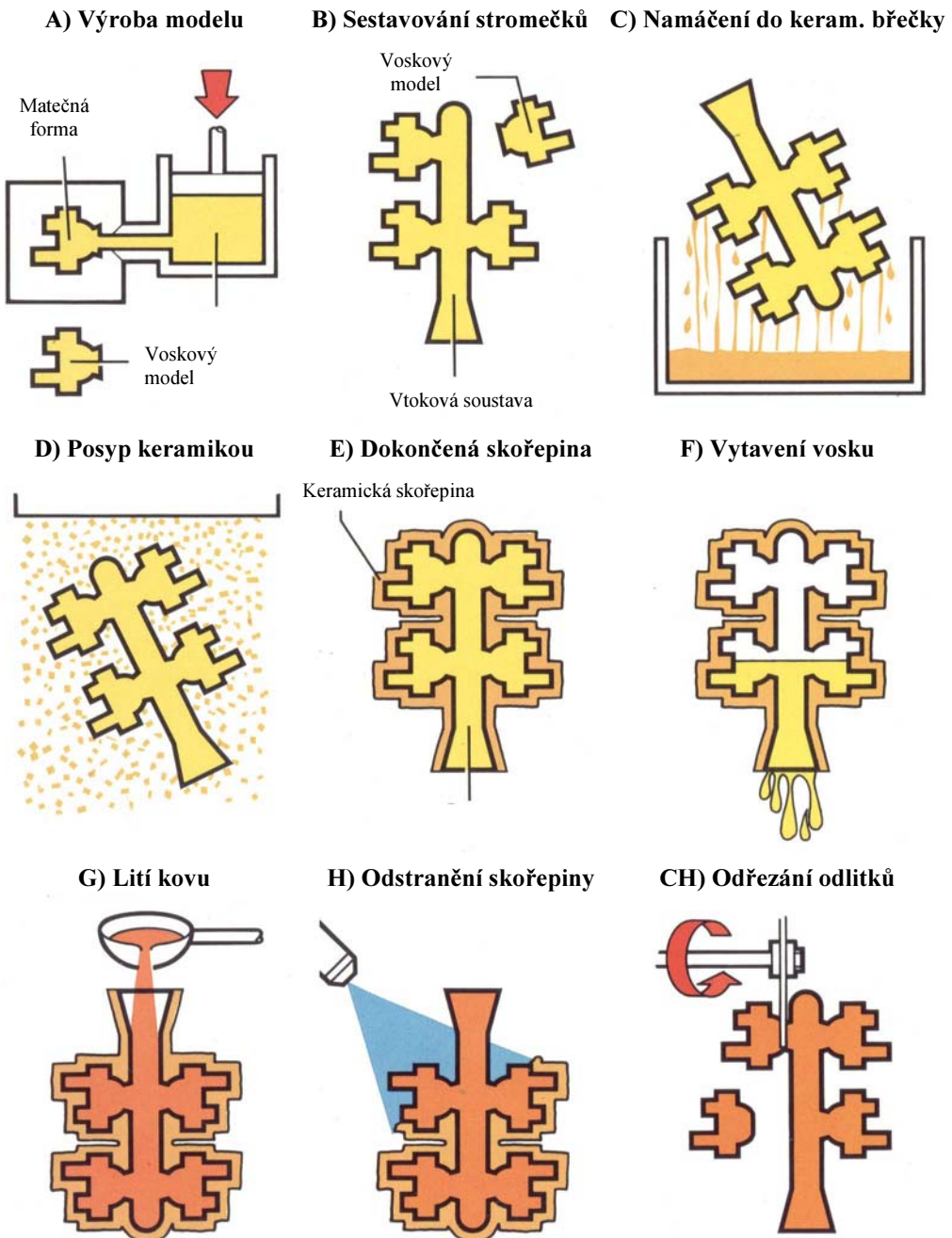
Cílem slévačů je stále více výroba odlitků „téměř na hotovo“ („near- net- shape“), tzn. bez nutnosti dalších dokončujících operací. Jedná se tak o poskytnutí odběratelům metody vedoucí k přímé, efektivní a ekonomické výrobě konečné součásti.

Vlastní termín „investment casting“ v anglickém originále (česky „metoda vytavitelného vosku“ nebo také častěji „přesné lití“) vznikl z charakteristiky procesu, kdy na voskový model je postupně nanášena (nanášet-„to invest“) keramická hmota.

Ve stručnosti lze popsat technologii tak, že nejdříve vytvoříme voskový model (vstříkáním vosku do matečné formy) –**Obr.1-1/A**, ten se pak spolu s dalšími modely připojí ke vtokové soustavě (také z vosku) –**Obr.1-1/B** a takto vytvořený voskový stromeček se pak postupně obaluje keramickou hmotou –**Obr.1-1/C,D,E**.

Poté následuje vytavení vosku z keramické formy –**Obr.1-1/F** a její tepelné zpracování žíháním.

Odlévá se převážně do žhavých forem **Obr.1-1/G**. Následují dokončující operace tj. odstranění skořepiny **Obr.1-1/H** a tryskání povrchu odlitků, které se před touto operací odstraní od vtokové soustavy většinou odřezáním **Obr.1-1/CH**.



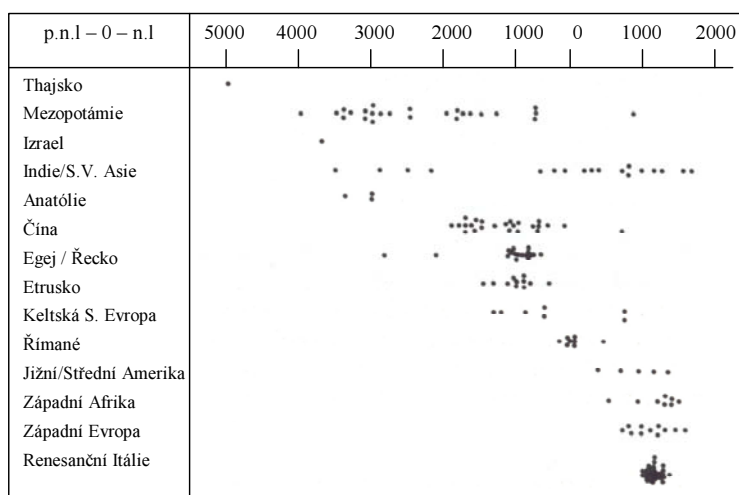
Obr. 1-1 Princip technologie vytavitelného modelu

## 1.2 Historie technologie vytavitelného modelu

Jak uvádí DOŠKÁŘ [ 2 ] je lití metodou vytavitelného modelu známo lidstvu už několik tisíciletí.

Důkazem jsou především umělecká díla dávno zaniklých národů a kultur ( Eufkrat, Egypt, Palestina, Španělsko, Persie, Čína, Mexiko a jinde). Dávnověká technologie byla přitom shodná s dnešní moderní technologií jen v principu – na originální model ze včelího vosku byla ručně nanášena vhodná hlína a tak vyrobena forma. Duté odlitky byly zhotoveny s pomocí hliněných jader. Později, v době raného novověku, bylo nalezeno dost důkazů o existenci metody vytavitelného modelu, především v renesanční Itálii [ 3 , 4 ].

Podrobněji se o historii technologie vytavitelného modelu zmiňují ve své knize „Investment Casting“ její autoři BEELEY a SMART [ 1 ]. Je zde také uveden souhrnný historický přehled nálezů odlitků zhotovených vytavitelným modelem- viz **Tab. 1-1**.



**Tab. 1-1** Odhadované stáří technologie vytavitelného modelu [1]

## 1.3 Současné světové trendy a situace v ČR

Výroba odlitků metodou vytavitelného modelu se ve světovém měřítku neustále rozšiřuje a v roce 2000 dosáhla hodnoty obrátu okolo 5 miliard USD [ 5 , 6 , 7 , 8 , 9 , 10 , 11 , 12 , 13 , 14 ].

Z hlediska geografie lze výrobu touto technologií rozdělit do několika teritorií, seřazeno procentuálně dle vyráběného objemu odlitků (obratu ) – viz **Obr.1-2**. Možné odchylky od skutečného stavu jsou dány faktem, že neexistují spolehlivé údaje o výrobě především v Rusku a Číně.

Pozice České republiky je v celosvětovém měřítku zdánlivě nevýznamná -

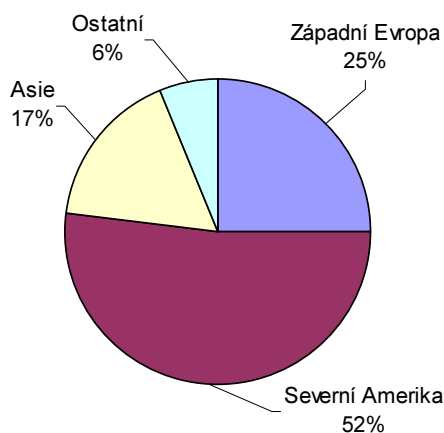
(0.4% podíl na celosvětové výrobě odlitků technologií vytavitelného modelu). Nicméně v přepočtu na jednoho obyvatele docházíme k srovnatelným hodnotám s nejvyspělejšími státy Evropy [ 15 , 16 , 17 , 18 , 19].

Pokud se týká rozvoje technologie je nutné mít na zřeteli, že tento byl silně ovlivněn existencí „železné opony“ v letech 1948-1989, což mělo dopad i na možnost transferu informací včetně „strategických technologií“, mezi které přesné lití patří. To vedlo k nutnosti samostatného vývoje, kde Československo sehrávalo ve svém teritoriu jednu z vůdčích rolí.

Jako příklad by bylo možné uvést vývoj technologie v oblasti používání nutných surovin (vosky, pojivové a posypové materiály, odlévané slitiny, atd.), stejně jako vývoj a výrobu potřebných zařízení (vstřikolisy, obalovací linky, atd.) .

Ačkoliv kvalita odlitků vyráběných touto technologií byla poměrně vysoká, naráží její další používání na určitá omezení z hlediska potřeb dnešního, stále náročnějšího světového trhu (tvarová, rozměrová a materiálová náročnost – především u nejnáročnějších odlitků průmyslu leteckého, energetického a dalších).

Zavádění nejnovějších surovin a zařízení, používaných v nejvyspělejších státech světa, je tak otázkou nutnosti pro dlouhodobé přežití ve velmi tvrdé konkurenci, která v oblasti této technologie ve světě panuje (existence větší světové výrobní kapacity s ohledem na současné potřeby trhu – i když stále rostoucího).



**Obr. 1-2** Přehled světové výroby odlitků metodou vytavitelného modelu

Z hlediska zákazníků patří k nejvýznamnějším průmysl letecký / kosmický, energetický, automobilový, „sportovní/ zábavný“ a obecně strojírenský.

## 2 ROZMĚROVÉ ZMĚNY V PRŮBĚHU TECHNOLOGIE

### 2.1 Přesnost odlitků obecně

Odlitek není nikdy dokonalý pokud se týká jeho velikosti a tvaru. Také proto se musí uvádět na výkresech tolerance. Určité důvody pro nedodržení těchto tolerancí jsou elementární chyby (jako špatná pozice zaváděcích kolíků, atd.), které vedou k chybám systematickým. Ty lze ovšem odstranit poměrně snadno úpravou modelového zařízení. Ostatní chyby již tak lehce odstranit nelze, tyto se nazývají chybami náhodnými.

Žádné dva odlitky nejsou přesně stejné. To platí i pro výrobky ostatních technologií včetně přesného obrábění. ISO normy pro tolerance odlitků uvádějí, že ačkoliv různé technologie vykazují různé možnosti dosahovaných přesností, obecně platí, že se vzrůstajícím jmenovitým rozměrem obecně „nepřesnosti“ odlitků rostou [ 20 ].

Také BEELEY a SMART [ 1 ] konstatují, že rozměry jakékoliv součásti se vždy ve větším či menším rozsahu liší od nominálních hodnot díky proměnným ve výrobním procesu. Tento problém se řeší, jak už bylo uvedeno, pomocí konceptu tolerančních polí.

Chyby rozměrů odlitků (t.j. odchylky od nominálních hodnot) jsou dvojího typu: statistické a systematické. První (t.j. statistické) odchylky vznikají od nevyhnutelných malých odchylek proměnných v procesu a způsobují rozptýl výsledků, obecně s normálním rozdělením okolo střední hodnoty.

Druhé (t.j. systematické) chyby / odchylky posouvají maximální hodnotu rozdělení od nominální hodnoty k vyšším nebo nižším hodnotám. Tyto odchylky systematické jsou způsobeny variacemi rozměrů modelu, ale hlavně plynou z nejistoty spojené s tolerancemi pro smrštění odlitku. To je dáno tím, že se berou hodnoty „čistého“ smrštění pro určitou slitinu bez ohledu na problematiku možných plastických deformací při brzděném smršťování atd.

### 2.2 Přesnost metody vytavitelného modelu

Metoda „vytavitelného modelu“ nebo „přesného lití“ je jednou z metod výroby přesných součástí z hlediska dosažitelnosti velmi úzkých rozměrových tolerancí (tzv. „NET-SHAPE“ technologií – technologií výroby „na hotovo“).

#### 2.2.1 Rozbor rozměrových změn v průběhu technologie

Jak již bylo konstatováno dříve je metoda výroby odlitků „litím na vytavitelný model / vosk“ přímo předurčena k tzv. výrobě odlitků „NA HOTOVO“, kdy se další opracování většinou nepředpokládá a tedy odlitek musí být zhotoven už „v litém stavu“ ve velmi úzkých rozměrových tolerancích [ 21, 22, 23, 24 ]. Znalost chování voskového modelu při jeho výrobě je z hlediska přesnosti dosahovaných rozměrů konečného odlitku pouze jednou ze součástí nutné komplexní znalosti rozměrových změn v průběhu celého technologického toku. To znamená, že je nutná nejen znalost rozměrových změn při výrobě voskového modelu ale i při výrobě skořepiny [ 25, 26, 27, 28, 29 ] (obalování, vytavování vosku, schnutí a žíhání skořepiny) a dále po nalití tekutého kovu (odolnost formy vůči tlaku tekutého kovu a v průběhu tuhnutí, vlastní objemové smršťování odlité slitiny v průběhu tuhnutí). Nezanedbatelným je přitom dále „faktor tvarový“, kdy rozměrové



změny je vždy třeba posuzovat třídimenzionálně (jiné hodnoty smrštění délky, šířky a tloušťky) - vše navíc komplikováno za určitých podmínek/geometrické konfigurace smrštěním „bržděným“. Pouhé znalosti hodnot lineárního (nebo objemového) smrštění/roztažení základních užitých materiálů (tzn. vosku, skořepiny a odlévané slitiny) tak nestačí pro predikci výsledných dosažitelných rozměrů a tolerančních mezí.

Nejvýznamnějšími fázemi z hlediska rozměrových změn jsou fáze výroby voskového modelu, zhotovení keramické formy a dále fáze tuhnutí a chlazení odlité slitiny.

### **Fáze I – matečná forma-voskový model**

Konečné rozměry a dosažitelná přesnost matečné formy je dána zvolenou technologií její výroby. Konečné rozměry a dosažitelná přesnost voskových modelů závisí na způsobu výroby voskového modelu (nejčastěji vstřikování) a zvolených parametrech vstřikování. Vstřikovací parametry a jejich změny jsou prakticky jedinou možností ovlivňování konečných rozměrů voskového modelu a tedy i konečného odlitku.

### **Fáze II – voskový model-skořepinová forma**

Rozměrové změny jsou dány především typem použité keramiky (posypu a pojiva) a dále předepsaným způsobem jejího tepelného zpracování (sušení a žíhání).

### **Fáze III – skořepinová forma - odlitek**

Při odlití kovu do skořepinové formy je smrštění slévárenské slitiny dáno jejím chemickým složením a zvolenou teplotou lití, jejíž optimální hodnota závisí především na velikosti a tvaru odlitku a musí být udržována v poměrně úzkém rozmezí s ohledem na možný výskyt vad (nezaběhnutí, staženiny atd.)

Rozměry matečné formy v sobě musí zachycovat všechny následné rozměrové změny tak, aby nakonec technologického toku při zhotovení odlitku bylo dosaženo zákazníkem požadovaných rozměrů v rámci předepsaných tolerančních polí – **Obr. 2-1 [ 30 ]**.





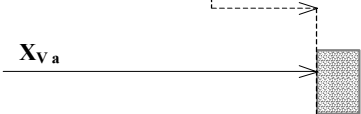

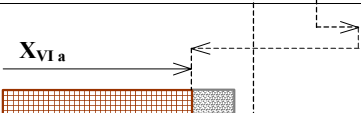
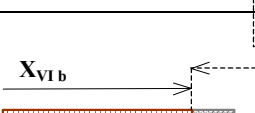
Rozměrové změny v průběhu technologie vytavitelného modelu jsou velmi dobře patrné také z **Obr. 2-2 [ 32 ]**.

Rozebereme-li jednotlivé fáze „technologie vytavitelného modelu“ detailněji zjistíme, že jedinou praktickou možností řízeného ovlivnění polohy tolerančního pole výsledného odlitku je ovlivnění rozměrů voskového modelu změnou vstupních parametrů při jeho výrobě (typ vosku, parametry vstřikování – teplota vosku, vstřikovací tlak, rychlost plnění, doba dotlaku, tvar a zaústění vtoku, chlazení formy).

U ostatních fází výrobního postupu je potřeba zajistit co nejvyšší konstantnost /stabilitu výrobních parametrů a tím i dosažení co nejužších rozměrových tolerancí .

č.	OPERACE	VLIV NA SMRŠTĚNÍ / ROZTAŽENÍ	OČEK. ZMĚNA ROZMĚRŮ	ZVOLENÁ HODNOTA smrštění/roztahnutí	PŘÍKLAD	
					INDIVIDUÁLNÍ VLIVY (1,2,3a,3b,4)	SOUHRNNÉ VLIVY (1+2+3a+3b+4)
1.	VÝROBA MATEČNĚ FORMY	- Užitá technologie při výrobě matečné formy	0 % ( $\pm \Delta \text{Man.}$ )	0 % ( $\pm 0.02 \text{ mm}$ )		
2.	VOSKOVÝ MODEL	- Typ vosku - Doba odstřihu vosku - Rychlost vstřikování - Vstřikovací cyklus - Vstřikovací tlak	- W % ( $\pm \Delta W$ )	- 1.2 % ( $\pm 0.1$ )		
3. a)	SUŠENÍ SKOŘEPINY	- Druh materiálu - Systém sušení	- S <sub>d</sub> % ( $\pm \Delta S_d$ )	- 0.3 % ( $\pm 0.1$ )		
3. b)	ŽÍHÁNÍ SKOŘEPINY	- Druh materiálu - Systém žíhání	+ S <sub>f</sub> % ( $\pm \Delta S_f$ )	+ 0.7 % ( $\pm 0.1$ )		
4.	LITÍ KOVU	- Chem. složení slitiny - Lící teplota	- A % ( $\pm \Delta A$ )	- 1.5 % ( $\pm 0.1$ )		

**Obr. 2-1** Posuvy tolerančních polí rozměrů v průběhu technologie vytavitelného modelu dle [30]

FÁZE TECHNOLOGIE	GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ ROZMĚROVÝCH ZMĚN	POPIS PROCESU
<b>I. MATEČNÁ FORMA</b>		<b>X<sub>I</sub> = ROZMĚRY MATEČ. FORMY</b> - přesnost závisí na mat. formě a na použité metodě výroby
<b>II. VOSKOVÝ MODEL</b>		<b>X<sub>II</sub> = ROZMĚRY VOSK. MODELU</b> - smrštění vsťáknutého vosku $\Delta T$ : ~ 70 °C na 20 °C $\Delta T$ = teplotní rozsah
<b>III. SKOŘEPINA</b> - včetně vosku		<b>X<sub>III</sub> = ROZM. SKOŘEPINY - VNITŘNÍ</b> - prakticky žádné rozměrové změny $\Delta T$ : ~ 30 °C na 20 °C
<b>IV. DUTINA SKOŘEPINY</b> - po vytavení vosku +24 hod. prosychání		<b>X<sub>IV</sub> = ROZMĚRY DUTINY SKOŘEPINY</b> - smrštění v průběhu vysušování pojiva $\Delta T$ : ~ 25 °C na 20 °C
<b>V. a) DUTINA SKŘEPINY</b> - po vyžhání		<b>X<sub>V a</sub> = DUTINA SKOŘ. PO VYŽÍHÁNÍ</b> - expanze skořepiny v průběhu procesu žhání $\Delta T$ : ~ 20 °C na 1000 °C
<b>V. b) DUTINA SKŘEPINY</b> - po vychladnutí (jen u Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> skořepiny)		<b>X<sub>V b</sub> = "VYCHLADLÁ" DUTINA SKOŘ.</b> - smrštění skořepiny v průběhu jejího ochlazování po vyžhání $\Delta T$ : ~ 1000 °C na 20 °C
<b>VI. a) ODLITEK PO</b> - lítí + tuhnutí + smršťování (při lítí do "horké" formy)		<b>X<sub>VI a</sub> = ROZM. ODLITKU - HORKÁ FORMA</b> - mírné počáteční roztažení skoř. a konečné smrštění kovu po odlití $\Delta T$ : ~ 800 na 1500 na 20 °C
<b>VI. b) ODLITEK PO</b> - lítí + tuhnutí + smršťování (při lítí do "studené" formy)		<b>X<sub>VI b</sub> = ROZM. ODLITKU - STUDENÁ FORMA</b> - mírné počáteční roztažení skoř. a konečné smrštění kovu po odlití $\Delta T$ : ~ 20 na 1500 na 20 °C

Obr. 2-2. Rozměrové změny v průběhu technologie vytavitelného modelu dle [32]

## 2.2.2 Rozměrová přesnost voskových modelů

Rozměrová stabilita voskových modelů – tedy schopnost opakované výroby voskových modelů, jejichž rozměry se budou pohybovat v předpokládaných (řízených) rozměrových tolerancích – je základním předpokladem výroby konečného odlitku s požadovanými rozměry.

Výsledný rozměr a dosažení rozměrové tolerance konkrétního voskového modelu je ovlivněn třemi základními faktory ( **Obr. 2-3 A ,B, C**):

A/ Typem použité modelové hmoty (vosku)

B/ Tvarem a rozměry součásti (rozložením teplotního pole při tuhnutí vosk. modelu)

C/ Způsobem výroby voskového modelu (především parametry odstříku)

### A / Vliv voskové hmoty

Struktura a složení voskové hmoty má vliv na její roztažnost (při ohřevu) a smrštivost (při chladnutí) [ 27 ] . Průběh roztahování a smršťování vosků v intervalu od 20°C do teploty jejich tavení není lineární, ale mění se v tomto teplotním rozsahu podle jejich struktury.

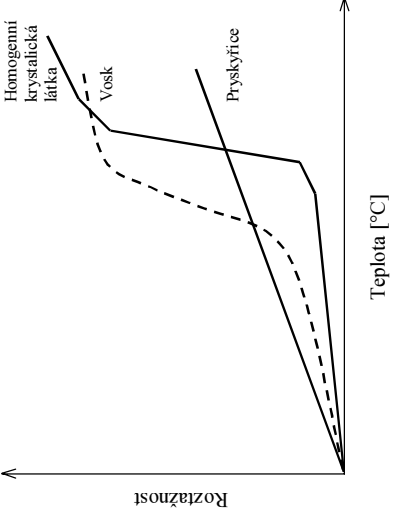
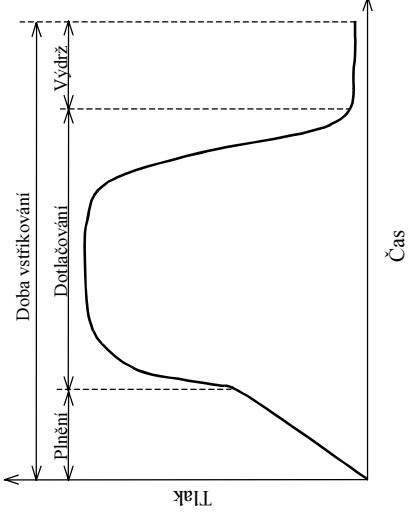
### B / Vliv tvaru a rozměru součásti

Je všeobecně známou skutečností, že velikost hodnoty lineárního smrštění vosku je třeba brát jen jako údaj orientační (stejně tak u odlévané slitiny). Skutečné hodnoty smrštění v jednotlivých základních rovinách (délka, šířka, výška), pak závisí na tvaru a velikosti součásti a dále na zaústění vtokové soustavy.

### C / Vliv způsobu výroby voskového modelu

Vzhledem k tomu, že převážná část voskových modelů se dnes vyrábí na vstříkolisech, pod pojmem způsob výroby rozumíme jednak způsob přivedení vosku do dutiny matečné formy a především parametry vstříkování z nichž dominantní úlohu mají:

- 1) teplota vstříkovaného vosku
- 2) teplota matečné formy (počáteční + způsob chlazení v průběhu tuhnutí vosku)
- 3) vstříkovací tlak vosku
- 4) rychlost vstříkování (rychlost zaplnění dutiny formy)
- 5) velikost a doba působení dotlaku
- 6) doba prodlevy (po ukončení dotlaku do otevření matečné formy)

A) Typ vosku	B) Chladící režim	C) Parametry vstříkávání
<p><u>Složení vosku:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Přímý (neplněný)</li> <li>- Emulzifikovaný</li> <li>- Plněný</li> </ul> 	<p>Teplotní pole v soustavě MATEČNÁ FORMA – VOSKOVÝ MODEL</p> <p><u>Ovlivňováno:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- teplotou vstříkovaného vosku</li> <li>- konstrukcí vtokové soustavy</li> <li>- systémem chlazení matečné formy</li> <li>- velikostí a tvarem voskového modelu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Teplota vosku</li> <li>- Rychlost proudění vosku</li> <li>- Doba vstříkování</li> <li>- Tlak vstříkování</li> </ul> 

**Obr. 2-3** Možnosti ovlivnění rozměrů voskového modelu

### 3 MOŽNOSTI OVLIVNĚNÍ ROZMĚRŮ

Problematikou ovlivnění rozměrových změn v průběhu technologie vytavitelného modelu se autor práce zabývá už delší dobu. Dosažené dílčí výsledky, jejichž souhrn je obsahem této kapitoly, byly postupně prezentovány na významných světových konferencích zaměřených na technologii vytavitelného modelu [ 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36 ] a dále ve výzkumné zprávě [37] a časopisech Slévárenství [38] a Foundry Trade Journal [39].

#### 3.1 Experimenty ke sledování rozměrových změn

Rozměrové změny v průběhu technologie vytavitelného modelu byly postupně sledovány na speciálním „zkušebním tělese“ a dále na čtyřech vybraných odlitcích sériově vyráběných ve slévárnách I.B.S.Velká Bíteš a KDYNIUM Kdyně.

Změny rozměrů byly především sledovány ve fázi výroby voskových modelů a dále při výrobě skořepinové formy.

Členění kapitol odpovídá jednotlivým zkušebním odlitkům u nichž byly sledovány buď pouze změny rozměrů voskových modelů s ohledem na proměnné parametry vstřikování („zkušební těleso“ - kap.3.1.1, „těleso pojistky“ - kap.3.1.2, „lopatka“ - kap.3.1.3.) nebo kromě rozměrových změn voskových modelů také změny rozměrů skořepinové formy s ohledem na použitou keramiku, počet obalů atd. („stěrák“ – kap.3.1.4. , „spojovací kus“ – kap.3.1.5.)

##### 3.1.1 Zkušební těleso

###### POPIS EXPERIMENTŮ

###### „Zkušební těleso“- definice měřených profilů

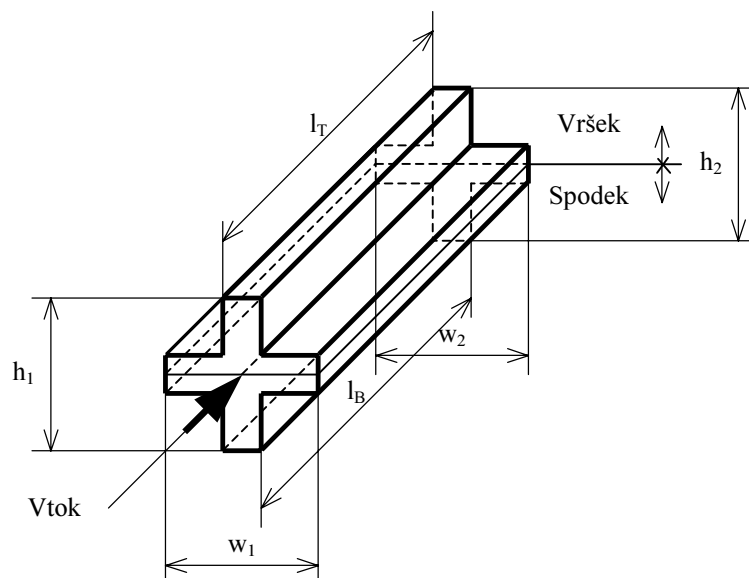
K prvému sledování rozměrových změn voskových modelů bylo použito speciální zkušební těleso (viz. **Obr. 3-1A** ), na kterém byly měřeny charakteristické / hlavní rozměry ve třech navzájem kolmých rovinách.

###### Celkové zhodnocení dosažených výsledků

Příklad naměřených hodnot hlavních rozměrů zkušebního tělesa (každá hodnota je průměrem z deseti měření) a vypočtených hodnot smrštění je uveden na **Obr. 3-1B**.

Takto získané výsledky byly vyneseny do grafu – viz. **Obr. 3-1C**.

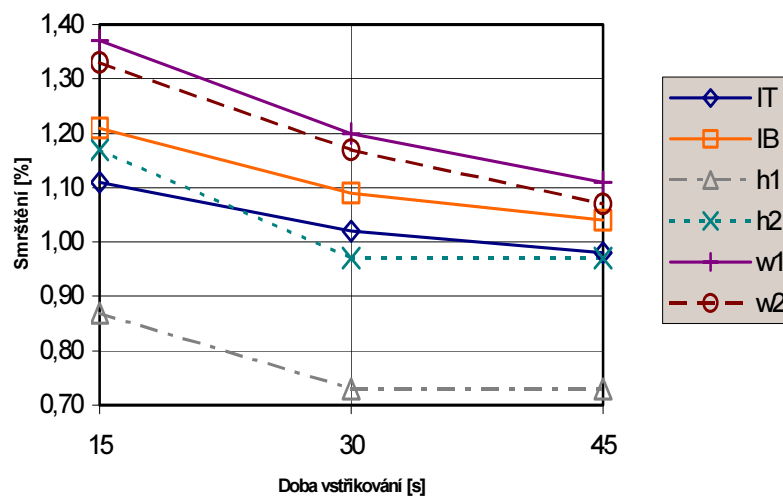
Hodnotíme-li všechny faktory ovlivňující výslednou hodnotu smrštění voskového modelu je nutné mít na paměti, že musí být uvažováno jejich „současné“ působení. **Obr. 3-2** znázorňuje „DOSAZITELNÉ“ změny ve smrštění kombinujeme-li výše uvedené proměnné (dobu, teplotu a tlak vstřikování).

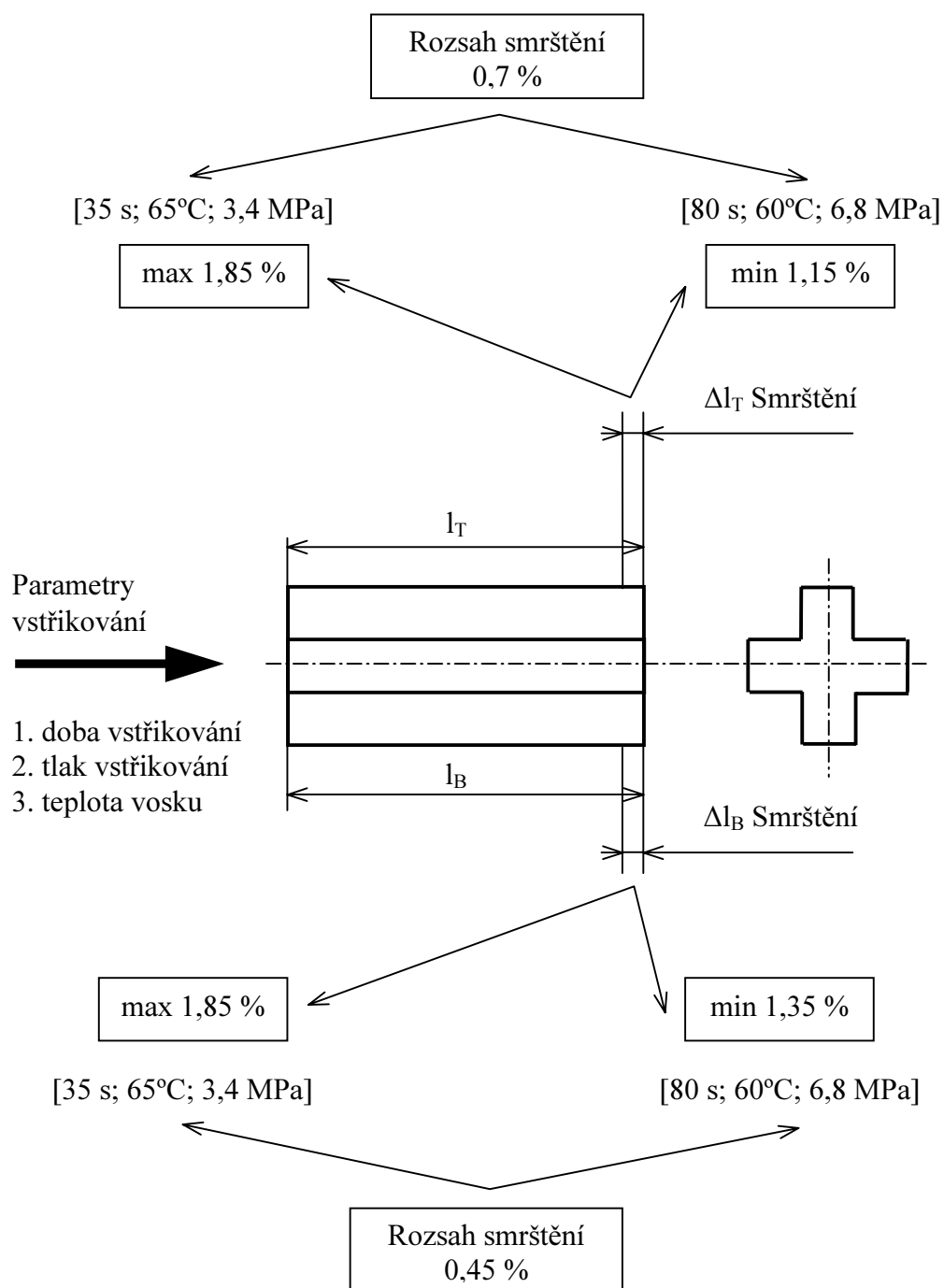


Obr. 3-1A Rozměry zkušebního tělesa

Čas vstřikování [s]	Rozeřměr	Hodnota	$l_T$	$l_B$	$h_1$	$h_2$	$w_1$	$w_2$
	Matečná forma [mm]		100	100	30	30	30	30
15	Průměrný rozeřměr [mm]		98,89	98,79	29,74	29,65	29,59	29,60
	Var.rozpětí [mm]		0,05	0,07	0,07	0,09	0,05	0,05
	Smrštění [%]		1,11	1,21	0,87	1,17	1,37	1,33
30	Průměrný rozeřměr [mm]		98,98	98,81	29,78	29,71	29,64	29,65
	Var.rozpětí [mm]		0,06	0,17	0,05	0,04	0,04	0,04
	Smrštění [%]		1,02	1,09	0,73	0,97	1,20	1,17
45	Průměrný rozeřměr [mm]		99,02	98,96	29,78	29,71	29,67	29,68
	Var.rozpětí [mm]		0,04	0,06	0,01	0,01	0,03	0,05
	Smrštění [%]		0,98	1,04	0,73	0,97	1,11	1,07

Obr 3-1B Příklady naměřených hodnot smrštění





**Obr. 3-1C** Grafické znázornění výsledků

Souhrnné hodnocení	
Maximální smrštění	Minimální smrštění
Minimální doba odstříku	Maximální doba odstříku
Maximální teplota vosku	Minimální teplota vosku
Minimální tlak vstřikování	Maximální tlak vstřikování

**Obr. 3-2** Dosažitelné změny ve smrštění při kombinaci parametrů vstřikování

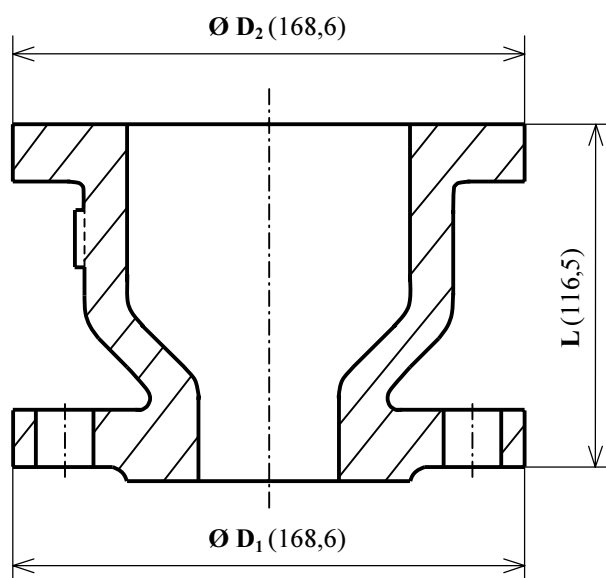


### 3.1.2 Těleso pojistky

#### POPIS EXPERIMENTŮ

#### Odlitek „tělesa pojistky“- definice měřených rozměrů

Hlavní měřené rozměry odlitku pojistky jsou uvedeny na **Obr. 3-3** (v závorkách rozměry matečné formy).



**Obr. 3-3** Hlavní rozměry odlitku pojistky DN 50 (v závorce jsou rozměry matečné formy)

#### Volba rozsahu měření – plán experimentu

Jako proměnné byly zvoleny následující parametry vstřikování:

- teplota vosku ( 63, 65, 67 °C)
- doba vstřikování ( 230, 270, 310 s)
- tlak vstřikování ( 600, 750, 900 p.s.i.-viz POZN.)

POZN.: Hodnoty tlaků ponechány u experimentů v kap.3.1.2 a 3.1.3. v jednotkách **p.s.i.** (pound per square inch) vzhledem k cejchování použitého vstřikolisu v těchto jednotkách. Pro převod platí **100 p.s.i.=0,6897 MPa**.

Plán experimentu sestával ve stanovení kombinací proměnných vstřikovacích parametrů, ve kterých bylo třeba realizovat experiment. Cílem „plánování experimentu“ bylo získat co nejvíce informací při minimálním počtu realizovaných měření.

## DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

Pomocí programu Statgraphic byla z naměřených hodnot provedena regresní analýza, jejímž výsledkem bylo nalezení regresních modelů pro jednotlivé rozměry D1, D2 a L – viz. **Tab. 3-I**.

**Součást:** těleso pojistky

**Vstříkolis:** S.O.M. 35T-20

**Vosk:** CK7/E emulzifikovaný

$$D_1 = \gamma_0 + \gamma_1 T + \gamma_2 p + \gamma_3 \tau + \gamma_4 T p$$

$$D_2 = \gamma_0 + \gamma_1 T + \gamma_2 p + \gamma_3 \tau$$

$$L = \gamma_0 + \gamma_1 T + \gamma_2 p + \gamma_3 \tau + \gamma_4 T \tau + \gamma_5 p \tau$$

T..... teplota vstříkovaného vosku [°C]

p..... vstříkovací tlak [p.s.i.]

$\tau$ ..... doba vstříkování (plnění + dotlak) [s]

Koeficient	D <sub>1</sub> [mm]	D <sub>2</sub> [mm]	L [mm]
$\gamma_0$	173,204	169,558	115,273
$\gamma_1$	-0,045	-0,111	-0,048
$\gamma_2$	-0,0066	0,038	0,126
$\gamma_3$	0,0014	0,029	0,054
$\gamma_4$	0,00013		-0,0731
$\gamma_5$			-0,096

**Tab. 3-I** Rovnice pro výpočet hlavních rozměrů tělesa pojistky

## HODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Dosažené výsledky u odlitku tělesa pojistky demonstrují možnost stanovení rozměrů voskového modelu konkrétní součásti v závislosti na změně parametrů vstříkování (**Tab.3-I**).

Pomocí regresní analýzy byly stanoveny matematické vztahy (blíže viz [37]), zachycující vliv teploty, tlaku a doby vstříkování na výsledné nejdůležitější rozměry voskového modelu D1, D2 a L.

Souhrnně lze konstatovat, že změnou parametrů vstříkování v uvedených rozsazích (kdy voskový model musel samozřejmě splňovat podmínku bezvadnosti, tzn. rozsah parametrů vstříkování byl volen tak, aby na voskovém modelu nevznikly žádné vady) bylo u rozměru D1 dosaženo rozmezí 166,11 – 166,45 mm, tedy rozdílu  $\Delta D_1 = 0,34$  mm ( $\Delta\% = 0,21$ ).

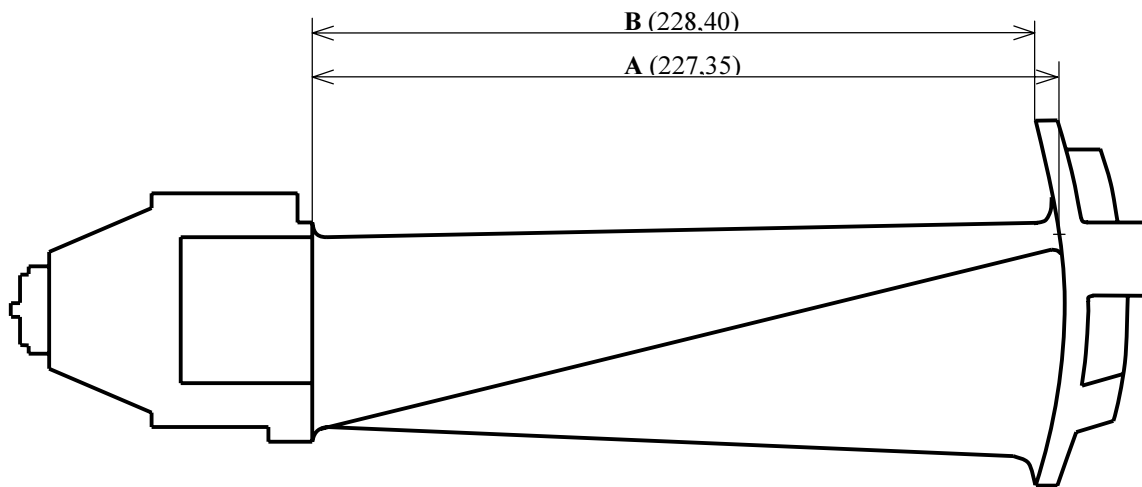
Podobně lze vyhodnotit i ostatní kritické rozměry D2 a L .

### 3.1.3 Lopatka

#### POPIS EXPERIMENTŮ

#### Odlitek „lopatky“- definice měřených profilů

K dalším experimentům byl zvolen „náročný“ odlitek statorové lopatky 2.stupně rozváděcího kola turbíny. Tvar odlitku a sledované hlavní dva délkové rozměry A a B jsou znázorněny na (Obr. 3-4).V závorce jsou uvedeny výchozí rozměry, odpovídající hodnotám nulového smrštění, totiž rozměry matečné formy.



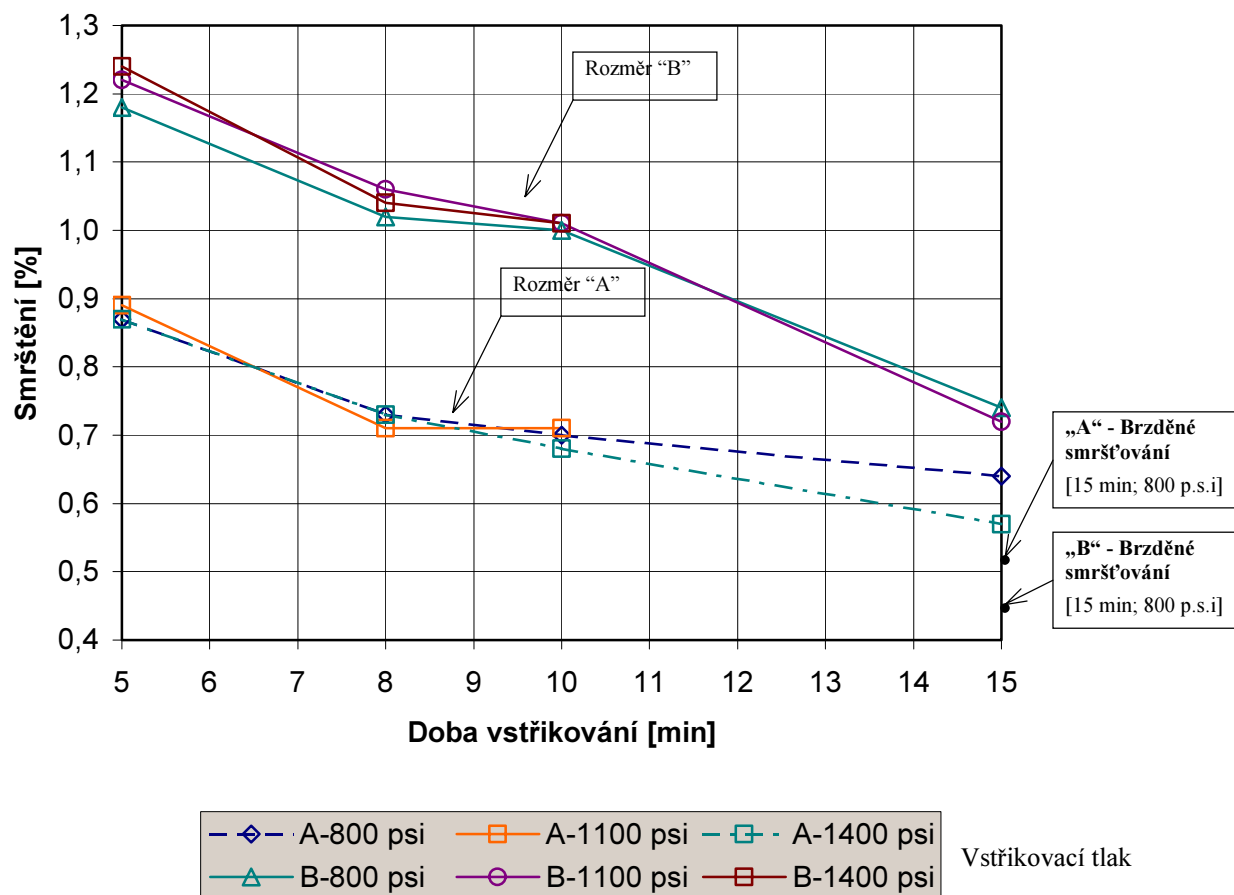
Obr. 3-4 Hlavní rozměry odlitku lopatky (v závorce rozměry matečné formy)

Na základě provozních zkušeností a s ohledem na možnosti vstřikovacího stroje byly zvoleny následující proměnné vstřikovací parametry:

- vstřikovací doba (doba plnění + působení dotlaku) : 5 , 8 , 10 , 15 /min/
- vstřikovací tlak : 800 , 1100 , 1400 /p.s.i./

## DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

Naměřené výsledky jsou přehledně uvedeny v **Tab. 3-II**, grafické znázornění uvádí **Obr. 3-5**.



**Obr. 3-5** Smrštění rozměrů A a B statorové lopatky 2. stupně

## HODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

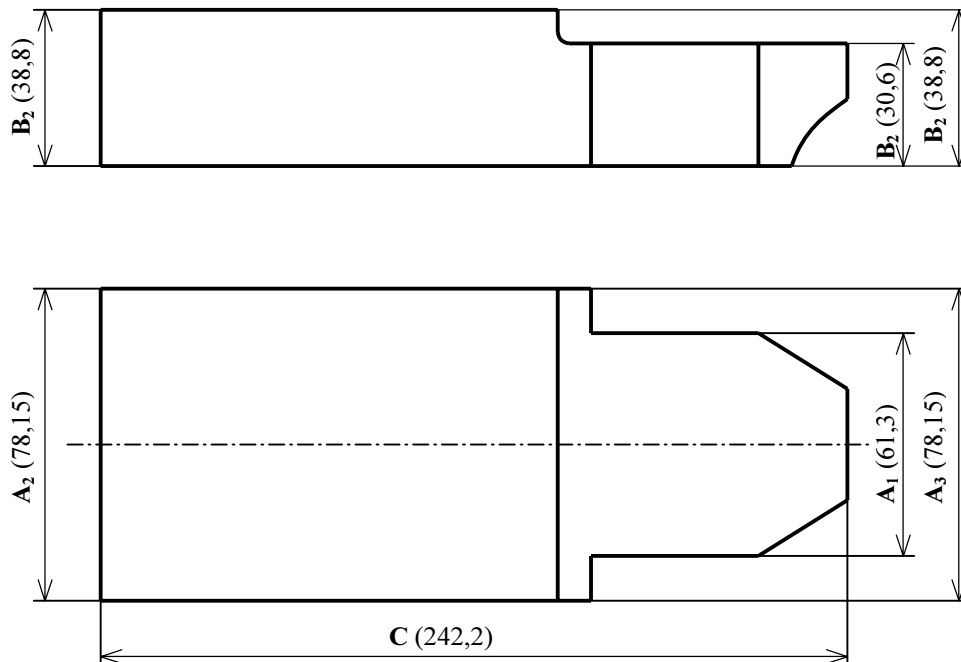
Z **Obr. 3-5** je zřejmý značný vliv doby vstřikování (plnění + dotlak) na konečné hodnoty smrštění délkových rozměrů A a B (přičemž smrštění rozměru B je vyšší, což je dáno konfigurací tělesa lopatky). Prodloužení doby vstřiku z 5 min. na 15 min. vedlo ke snížení smrštění asi o 0.5% (z 1.2% na 0.7%) u rozměru B, a asi o 0.3% (z 0.9% na 0.6%) u rozměru A.

Fixací voskového modelu do přípravku po vytažení z matečné formy (brzděné smršťování) bylo dosaženo hodnot smrštění 0.45% u rozměru B a 0.52% u rozměru A. Potvrdil se tak význam v praxi běžně užívaného systému vkládání voskových modelů po jejich vytažení z matečné formy do speciálních fixačních přípravků pro stabilizaci jejich rozměrů.

### 3.1.4 Stěrák

#### Odlitek „stěráku“- definice měřených profilů

Měřené rozměry jsou patrné z **Obr. 3-6** – v závorkách jsou uvedeny rozměry matečné formy.



**Obr. 3-6** Rozměry dutiny matečné formy zkušebního tělesa (stěrák)

## SLEDOVÁNÍ ZMĚN ROZMĚRŮ SKOŘEPINOVÉ FORMY

### Volba rozsahu měření

Jako proměnné byly zvoleny:

- typ užitého posypu (  $\text{SiO}_2$  a molochit)
- počet obalů skořepiny

Experimenty byly rozděleny do dvou typů podle uspořádání stromečku:

#### EXPERIMENT TYP I

3 ks modelů na stromečku vždy se stejným počtem obalů  
(počty obalů 6 ; 8 ; 10 )

#### EXPERIMENT TYP II

3 ks modelů na stromečku – u každého modelu jiný počet obalů  
(tzn. na jednom stromečku současně modely s 6 , 8 a 10 obaly)

### DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

Dosažené výsledky pro EXPERIMENT TYP I shrnují **Tab. 3-IV-a** – pro  $\text{SiO}_2$ -křemen a **Tab. 3-IV-b** – pro molochit. Graficky jsou dosažené výsledky souhrnně pro oba materiály zobrazeny na **Obr. 3-7**.

Souhrnné výsledky EXPERIMENTU TYP II pro oba posypy (křemen a molochit) jsou graficky zobrazeny v **Obr. 3-8**.

Počet obalů	6 obalů				8 obalů				10 obalů			
Fáze technologie	Rozměr	Ø	Rozdíl v		Rozměr	Ø	Rozdíl v		Rozměr	Ø	Rozdíl v	
	[mm]	[mm]	[mm]	[%]	[mm]	[mm]	[mm]	[%]	[mm]	[mm]	[mm]	[%]
voskový model	239,51	239,44	-0,34	-0,14	239,36	239,43	-0,46	-0,19	238,80	239,35	-1,02	-0,43
	239,15				239,54				239,38			
	239,62				239,38				239,87			
vysušená skořepina	239,17	239,10	3,75	1,57	238,90	238,97	3,81	1,59	237,78	238,33	4,48	1,88
	238,81				239,08				238,36			
	239,31				239,92				238,85			
vyžíhaná skořepina	-	242,85*			-	242,78*			-	242,81*		
	-				-				-			
	-				-				-			
odlitek	237,60	237,64	-5,21	-2,20	237,50	237,57	-5,21	-2,20	237,16	237,60	-5,21	-2,20
	237,45				237,75				237,47			
	237,88				237,45				238,16			

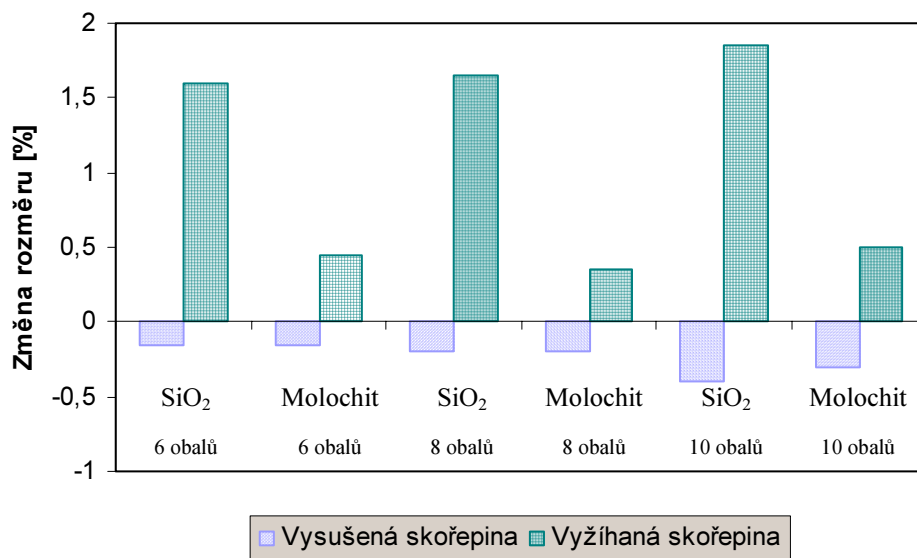
POZN.: \* vypočteno z rozměrů odlitku (+2,2 % smrštění odlévané slitiny)

**Tab. 3-IV-a** Výsledky rozměru „C“ pro SiO<sub>2</sub> – Experiment č.1

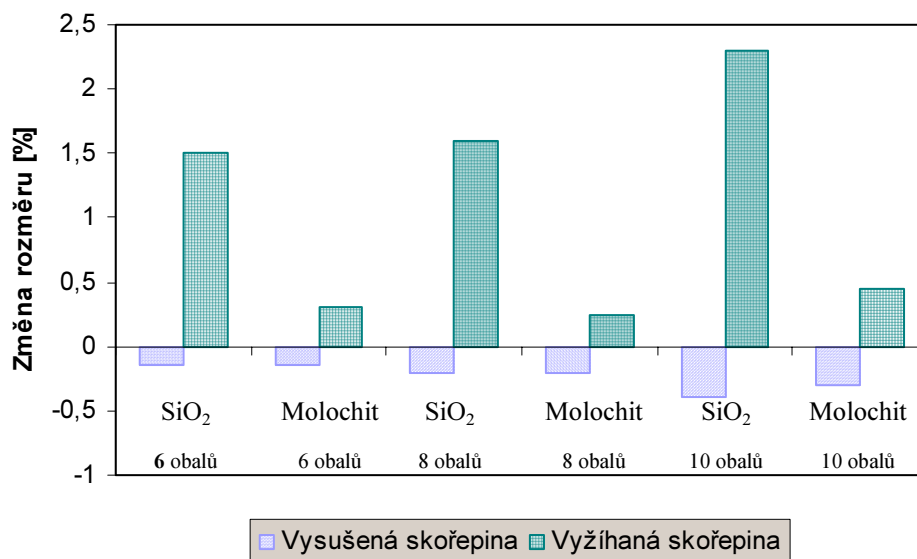
Počet obalů	6 obalů				8 obalů				10 obalů			
Fáze technologie	Rozměr	Ø	Rozdíl v		Rozměr	Ø	Rozdíl v		Rozměr	Ø	Rozdíl v	
	[mm]	[mm]	[mm]	[%]	[mm]	[mm]	[mm]	[%]	[mm]	[mm]	[mm]	[%]
voskový model	239,33	239,32	-0,32	-0,13	239,69	239,87	-0,46	-0,19	239,81	239,86	-0,55	-0,23
	239,32				239,83				239,88			
	239,31				240,08				239,88			
vysušená skořepina	239,01	239,00	0,80	0,33	239,24	239,41	0,70	0,29	239,26	239,31	0,92	0,38
	238,00				239,38				239,33			
	238,99				239,63				239,33			
vyžíhaná skořepina	-	239,80*			-	240,11*			-	240,23*		
	-				-				-			
	-				-				-			
odlitek	234,97	234,65	-5,14	-2,20	234,68	234,96	-5,15	-2,20	235,14	235,06	-5,17	-2,20
	234,40				235,11				235,14			
	234,57				235,09				234,91			

POZN.: \* vypočteno z rozměrů odlitku (+2,2 % smrštění odlévané slitiny)

**Tab. 3-IV-b** Výsledky rozměru „C“ pro molochit – Experiment č.1



**Obr. 3-7** Smrštění / roztažení keramické skořepiny v průběhu sušení a žíhání – experiment č.1 (Rozměr “C”)

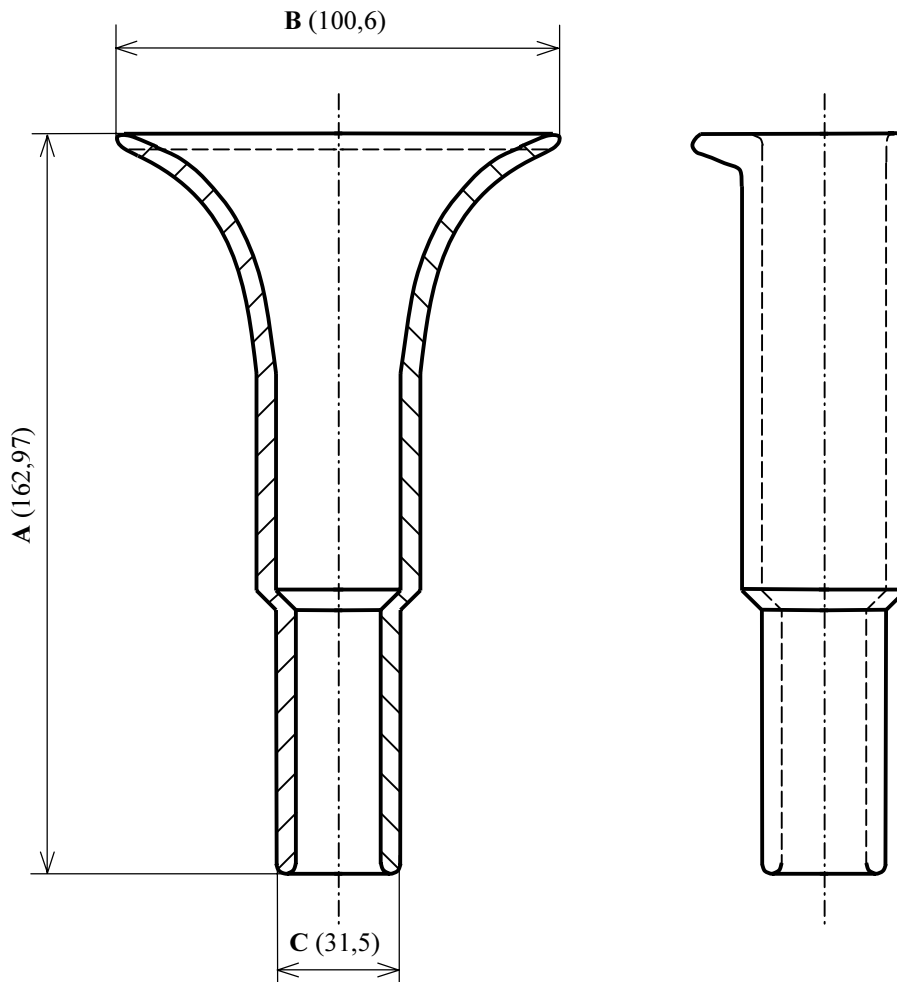


**Obr. 3-8** Smrštění / roztažení keramické skořepiny v průběhu sušení a žíhání – experiment č.2 (Rozměr “C”)

### 3.1.5 Spojovací kus

#### Odlitek „spojovacího kusu“ – definice měřených profilů

Pro další měření byl vybrán odlitek „spojovací kus“. Měřené rozměry jsou patrné z **Obr. 3-9** - v závorkách jsou uvedeny rozměry matečné formy.



**Obr. 3-9** Hlavní rozměry odlítka „spojovací kus“ (v závorce rozměry matečné formy)

#### A) SLEDOVÁNÍ SMRŠTĚNÍ VOSKOVÉHO MODELU

Každé měření pro určité nastavené parametry (doba a tlak vstříkování) bylo opakováno za stejných podmínek 10 x tzn. celkem bylo zhotoveno a proměřeno 150 voskových modelů (10 x 5 (vstříkovací doby) x 3 (vstříkovací tlaky) = 150).

#### DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

Výsledky sledování smrštění vybraného rozměru „A“ součásti spojovacího kusu uvádí **Obr. 3-10**.



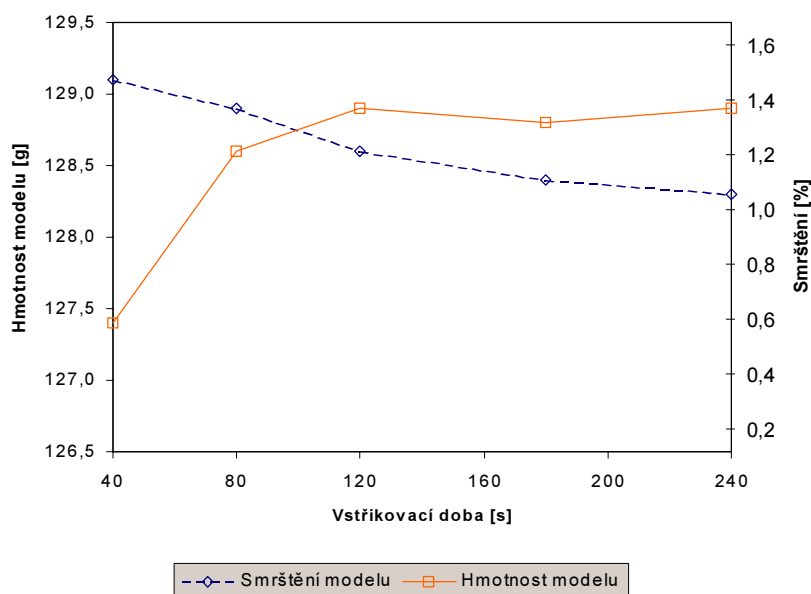
Výsledky doplňkových měření, při kterých byla zaznamenávána hmotnost odstříknutých voskových modelů jsou shrnuty na **Obr. 3-11**.

## HODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Z dosažených výsledků (viz **Obr. 3-10**) je zřejmé, že jak tlak vstřikování vosku tak především vstřikovací doba měly značný vliv na hodnoty smrštění sledované délky „A“.

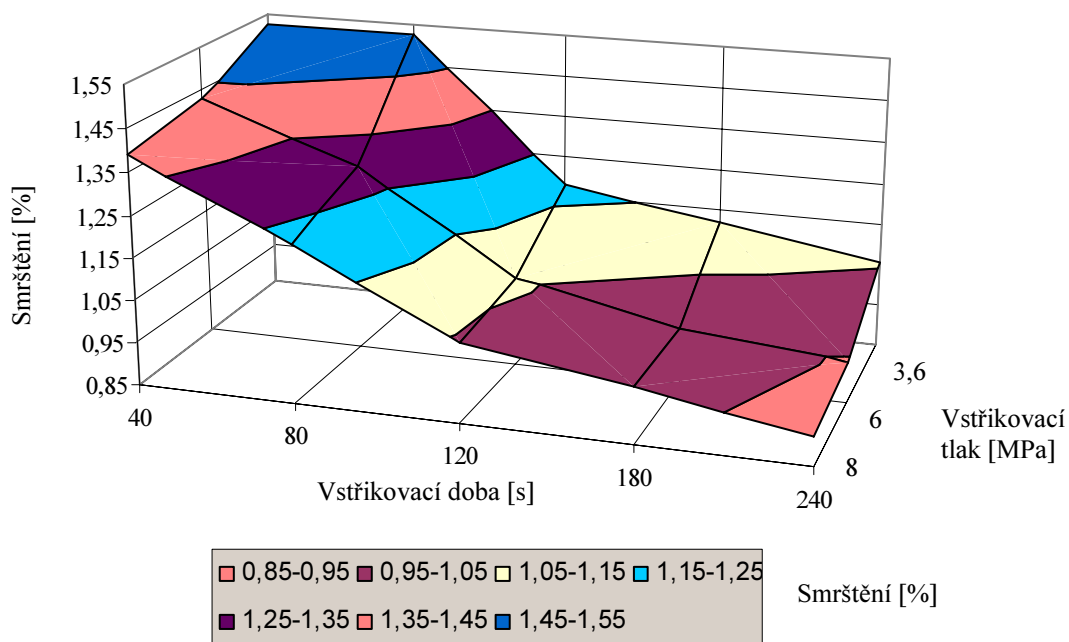
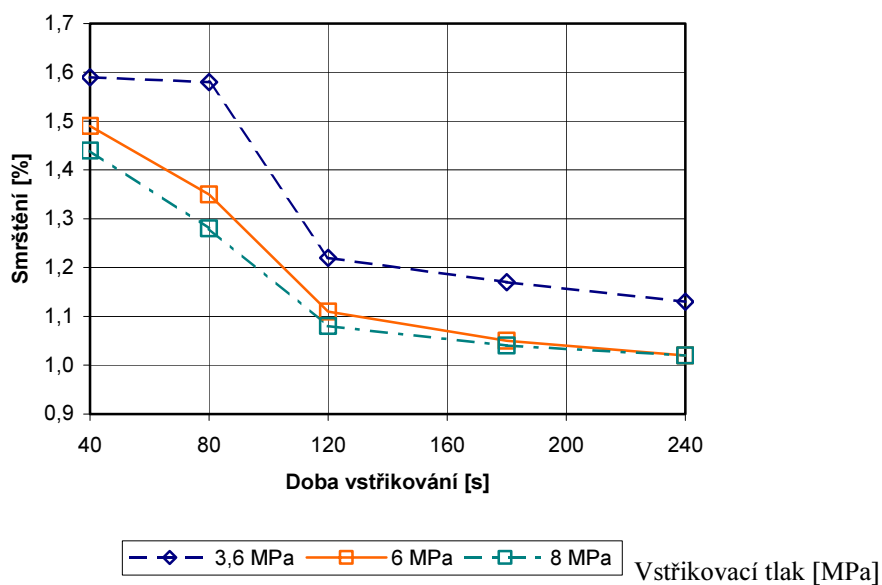
S rostoucí dobou vstřikování (čas zaplnění + působení dotlaku)- ze 40 na 240 s došlo ke zmenšení velikosti smrštění zhruba o 0,5 %. Při celkové hodnotě délky „A“ 163 mm to znamená nezanedbatelnou délkovou hodnotu 0,8 mm.

Také vliv vstřikovacího tlaku byl poměrně výrazný. Zvýšení tlaku z 3,6 na 8 MPa znamenal posun k nižším hodnotám smrštění zhruba o 0,2%. Výsledky potvrdily předpoklad, že čím více vosku se podaří vpravit do dutiny matečné formy (tzn. prodloužením vstřikovacího cyklu a zvýšením tlaku vstřikování) tím menší budou konečné hodnoty smrštění voskového modelu. Tento předpoklad navíc potvrdily doplňkové pokusy sledování hmotnosti voskových modelů. Z **Obr. 3-11** je patrný vzrůst hmotnosti modelů s rostoucí dobou vstřikování a zvyšujícím se tlakem. Dosažené hodnoty smrštění a hmotností voskových modelů při různých parametrech vstřikování jsou prakticky „zrcadlově“ shodné –**Obr. 3-12**.



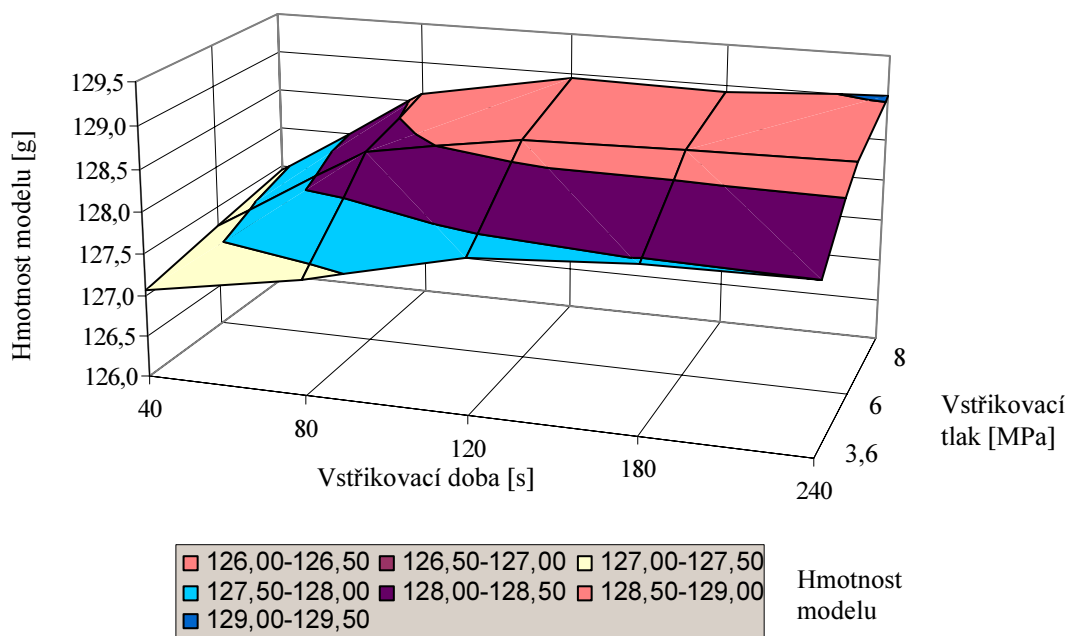
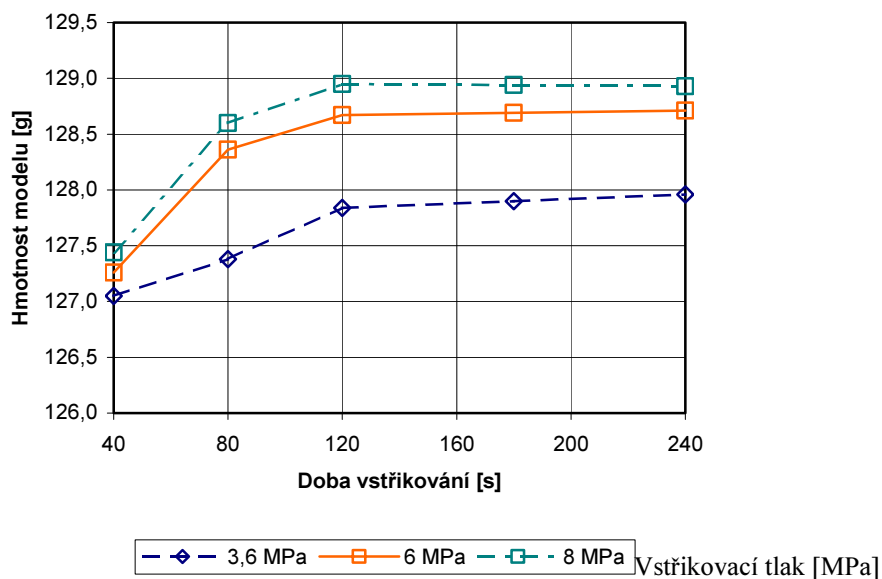
**Obr. 3-12** Porovnání hmotnosti voskového modelu a jeho smrštění

Vstřikovací doba [s]	Vstřikovací tlak [MPa]		
	3,6	6	8
40	1,528	1,429	1,391
80	1,528	1,294	1,221
120	1,179	1,062	1,038
180	1,117	0,982	0,982
240	1,056	0,945	0,919



Obr. 3-10 Smrštění rozměru „A“ jako funkce parametrů vstřikování

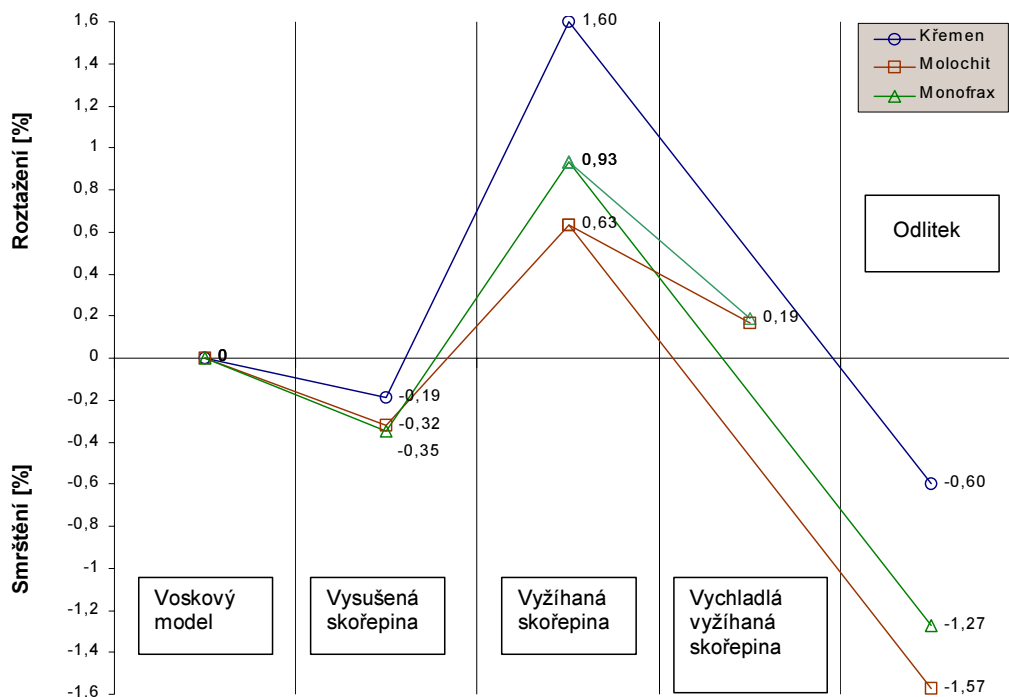
Vstřikovací doba [s]	Vstřikovací tlak [MPa]		
	3,6	6	8
40	127,05	127,26	127,44
80	127,38	128,36	128,60
120	127,84	128,67	128,95
180	127,96	128,71	128,93
240	128,00	128,75	129,03



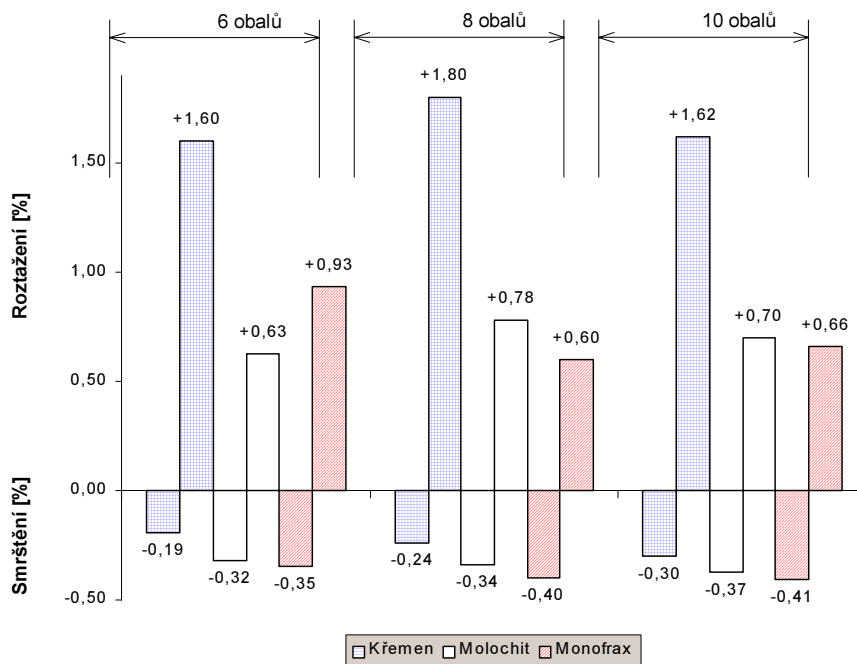
Obr. 3-11 Hmotnost voskového modelu funkcí parametrů vstřikování

## B) SLEDOVÁNÍ ZMĚN ROZMĚRŮ SKOŘEPINOVÉ FORMY

Dosažené výsledky jsou souhrnně zachyceny graficky v **Obr. 3-13** – vliv typu použité pro všechny druhy skořepin a různé počty obalů skořepiny na rozměrové změny v průběhu technologie a **Obr. 3-14** – vliv počtu obalů na velikost rozměrových změn u jednotlivých typů skořepin.



Obr. 3-13 Rozměrové změny v průběhu technologie – 6 obalů



Obr. 3-14 Rozměrové změny skořepiny v průběhu sušení a žihání

### 3.2 Shrnutí experimentálních výsledků

Obecně můžeme konstatovat, že dosažené praktické výsledky mají rozhodující význam při stanovování rozměrů matečné formy. Ty musí být zvoleny tak, aby výsledné rozměry odlitku ležely v požadovaných tolerancích. Rozměry matečné formy tak v sobě musí zahrnovat všechny rozměrové změny, ke kterým u technologie vytavitelného modelu dochází.

#### 3.2.1 Zkušební těleso

Zde byl zkoumán vliv vstřikovacích parametrů na velikost smrštění jednotlivých rozměrů voskového modelu zkušební tělesa.

Z **Obr.3-2** je zřejmé, že vhodnou kombinací parametrů vstřikování (vstřikovací doba - doba plnění a dotlaku, teplota vstřikovaného vosku a tlak vstřikování) se dá celková hodnota volného smrštění měnit o hodnoty 0,5 – 0,7 % ( v rozmezí 1,15-1,85 % u horního profilu a v rozmezí 1,35-1,85% u dolního profilu).

#### 3.2.2 Těleso pojistky

I zde byly zkoumány vlivy parametrů vstřikování (doba, teplota, tlak) na velikost jednotlivých rozměrů voskového modelu.

Hlavním výsledkem těchto experimentů bylo získání dostatečného souboru naměřených hodnot rozměrů voskového modelu, umožňujícího provedení následné regresní analýzy. Výsledkem bylo nalezení rovnic pro výpočet jednotlivých rozměrů zkoumaného voskového modelu v závislosti na vstřikovacích parametrech – **Tab.3-I** .

Vhodnou kombinací vstřikovacích parametrů lze u tohoto tělesa „pohybovat“ např. s průměrem D1 v rozsazích 166,11 – 166,45 mm tedy o rozdíl  $\Delta D1=0,34$ mm. – to vše bez nákladné změny rozměru matečné formy.

#### 3.2.3 Lopatka

Odlitek statorové lopatky 2.stupně rozváděcího kola turbíny je vysoce náročný na technologii výroby především z hlediska dosažení konečných rozměrů „A“ a „B“ ( **Obr.3-4**).

Základem úspěchu je samozřejmě vyrobení voskového modelu s takovými rozměry, které zaručí dosažení konečných rozměrových tolerancí odlitku po všech rozměrových změnách, které výrobu odlitku dále provází v průběhu technologie (změny rozměrů skořepiny v průběhu sušení a žíhání, smršťování tuhnutí kovu po nalití do formy).

V průběhu těchto experimentů byla prokázána možnost korekce rozměrů odlitku pomocí změny velikosti smršťování voskového modelu. Byl prokázán značný vliv vstřikovacího cyklu (především doby působení dotlaku) na konečné hodnoty smrštění délkových rozměrů „A“ a „B“ – **Obr.3-5**. Prodloužením doby vstřiku a dotlaku z 5 min. na 15 min. bylo dosaženo snížení smrštění o asi 0,5% (z 1,2 na 0,7%) u rozměru „B“ a o asi 0,3% (z 0,9 na 0,6%) u rozměru „A“. V přepočtu na skutečnou délku to činí rozdíl 1,14 mm u rozměru „B“ a 0,7 mm u rozměru „A“.

Ještě větších rozdílů ve smrštění bylo dosaženo tzv. „bržděným smršťováním“ tj. fixací voskového modelu do speciálního přípravku po jeho vytažení z matečné formy. U rozměru „B“ bylo dosaženo hodnoty „bržděného smrštění“ 0,45% (tzn. rozmezí smrštění od volného po bržděné u „B“:  $1,2\% - 0,45\% = 0,75\%$  - odpovídající délkové změně 1,7 mm). U rozměru „A“ bylo dosaženo hodnoty „bržděného smrštění“ 0,52% (tzn. rozmezí u „A“  $0,9\% - 0,52\% = 0,38\%$  - odpovídající délkové změně 0,9 mm).

### 3.2.4 Těleso stěráku

U tělesa stěráku byly sledovány jak změny rozměrů voskového modelu v závislosti na parametrech vstřikování, tak zejména změny rozměrů skořepinové formy.

Při sledování voskového modelu nebyly zjištěny ve zvolených rozsazích vstřikovacích parametrů prakticky žádné významnější změny ve smrštění. Zvolené rozsahy vstřikovacích parametrů – vstřikovací doba 60-120 s a vstřikovací tlak 8-9,2 MPa – byly zřejmě příliš malé.

Při sledování změn rozměrů skořepinové formy v průběhu technologie (popis měření viz kap.3.1.4) byly zjištěny důležité kvantitativní údaje a závislosti pro oba zkoumané typy skořepin (křemen, molochit) – **Obr.3-7 a 3-8**.

Po sušení obou typů skořepin dojde nejdříve k mírnému smrštění rozměrů dutiny ve skořepině, přičemž toto roste s rostoucím počtem obalů tj. s rostoucí tloušťkou skořepiny (od – 0,15% při 6 obalech po – 0,40% při 10 obalech). Vliv materiálu posypu je zde zanedbatelný, což je způsobeno mechanismem vysoušení ovlivněným především typem a množstvím pojiva (ETS 40 u obou typů skořepin).

Po žíhání skořepiny naopak dochází k jejímu roztažení, přičemž skořepina křemenná vykazuje hodnoty značně vyšší oproti skořepině molochitové - **Obr.3-7, 3-8**. To je dáno rozdílnými koeficienty teplotní roztažnosti obou materiálů.

### 3.2.5 Spojovací kus

Stejně jako u předchozí součásti stěráku byly i zde sledovány jak změny rozměrů voskového modelu tak skořepinové formy.

Podrobné hodnocení dosažených výsledků u voskových modelů je uvedeno v kap.3.1.5. Celkem bylo proměřeno při různých parametrech vstřikování 150 modelů (Rozsahy parametrů vstřikování: vstřikovací doba 40-240 s, vstřikovací tlak 3,6-8 MPa). Sledovány byly především rozměrové změny ale také byla sledována hmotnost modelů.

**Obr.3-10** shrnuje dosažené výsledky – především vliv vstřikovací doby na velikost smrštění byl prokázán jako dominantní (změna smrštění o hodnotu 0,5% -tedy na rozměru „A“ 163mm o hodnotu 0,8mm). Svůj význam potvrdil i vstřikovací tlak – jeho zvýšení z 3,6 na 8 MPa vedlo ke snížení smrštění o 0,2%.

Experimentálně tak byl potvrzen předpoklad, že „čím více vosku bude vpraveno do dutiny matečné formy, tím menší budou i konečné hodnoty smrštění“.

Tomuto tvrzení navíc odpovídá i doplňkové měření hmotnosti voskových modelů. Při určitých parametrech vstřikování dosažené hodnoty smrštění a hmotností voskových modelů jsou „zrcadlově“ shodné – **Obr.3-12** .

Potvrzuje se tak oprávněnost praxe zavedené v několika zahraničních slévárnách, kdy měřítkem správného rozměru voskového modelu je jeho hmotnost. Rychlým zvážením (na rozdíl od náročných měření rozměrů) se tak eliminují modely nacházející se mimo stanovený hmotnostní limit (předpokládá se , že jsou i mimo limit rozměrový).

Výsledky sledování skořepinových forem jsou přehledně shrnuty do **Obr.3-13** a **3-14**. Jsou zde uvedeny konkrétní hodnoty rozměrových změn v průběhu technologie pro tři typy zkoumaných skořepin (křemen, molochit, monofrax).

Hlavním přínosem experimentů je získání konkrétních hodnot smrštění / roztažení různých typů skořepin.

#### 4 ZÁVĚR

Technologie vytavitelného modelu patří k progresivním technologiím výroby odlitků umožňujícím splnění vysokých požadavků zákazníka především na složitost tvaru a rozměrovou přesnost. O progresivnosti technologie svědčí i fakt, že i přes současné ekonomické problémy ve světě dochází u výroby odlitků touto technologií k jejímu neustálému nárůstu.

Jedním ze základních předpokladů úspěchu technologie vytavitelného modelu je možnost zhotovení odlitku „na hotovo“ („net shape“), tj. dosažení jeho požadovaných rozměrových tolerancí ihned po odlití („as cast“). To ovšem znamená dokonalé pochopení a zvládnutí všech rozměrových změn, které technologii provázejí v jejích jednotlivých fázích (matečná forma – voskový model – skořepinová forma – odlitek). Jen tak lze správně – nejlépe hned napoprvé - stanovit rozměry matečné formy pro výrobu voskového modelu , které povedou ke konečným požadovaným rozměrům odlitku.

Předložená práce shrnuje několikaleté dosažené experimentální výsledky v této oblasti. Ty prokazují především možnost určitého ovládnutí rozměrů voskových modelů volbou parametrů vstřikování (bez nutnosti drahého zásahu do rozměrů matečné formy). V práci jsou dále objasněny a kvantifikovány rozměrové změny skořepinové formy při použití různých druhů materiálů.

Problematika rozměrových změn v průběhu technologie vytavitelného modelu je natolik složitá, že její vyřešení je záležitostí dlouhodobějších výzkumných projektů. O jednom plánovaném projektu v USA na toto téma bylo podrobně referováno na nedávné konferenci „přesného lití“ v Chicagu [26]. Ke spolupráci na přípravě dalšího podobného projektu v této oblasti (v rámci VI.rozvojového programu EU) byl na základě referencí [34,35,36] autor práce vyzván Universitou v Birminghamu .

Předložená práce si neklade za cíl konečné vyřešení problematiky rozměrové přesnosti odlitků zhotovených technologií vytavitelného modelu. Práce by nicméně měla přispět k jejímu bližšímu objasnění a pochopení. Dosažené výsledky mají navíc bezesporu svůj velký praktický význam pro výrobce odlitků touto technologií ať už uvedenými dosaženými hodnotami smrštění atd., tak především použitou metodikou měření a objasněním rozměrových změn v jednotlivých fázích technologie.

## LITERATURA

- [1] Beeley, P.R. - Smart, R.F.: Investment Casting, The Institute of Materials, The University Press Cambridge UK, 1995
- [2] Doškář, J.- Gabriel, J.- Houšť, M.- Pavelka, M.: Výroba přesných odlitků, SNTL Praha, 1976
- [3] Baker, J.: Pět tisíc let přesného lití, Slévárství 10, 1997, s.362
- [4] Engels, G.: 5000 Jahre Giessen von Metallen, 1994, Giesserei Verlag GmbH, Dusseldorf
- [5] Williams, R.: Investment Casting Markets 2000, 10<sup>th</sup> World Conference on Investment Casting, Monte Carlo, May 2000
- [6] Perry, M.: North America, 10<sup>th</sup> World Conference on Inv. Cast., Monte Carlo, 2000
- [7] Ishikawa, K.: Japan, 10<sup>th</sup> World Conference on Inv. Cast., Monte Carlo, 2000
- [8] Zhang, S.F.: China, 10<sup>th</sup> World Conference on Inv. Cast., Monte Carlo, 2000
- [9] Takayanagi, T.: Other Asian Countries, 10<sup>th</sup> World Conference on Inv. Cast., Monte Carlo, 2000
- [10] Swanson, N.: United Kingdom, 10<sup>th</sup> World Conference on Inv. Cast., Monte Carlo, 2000
- [11] Deponge, J.G.: France, 10<sup>th</sup> World Conference on Inv. Cast., Monte Carlo, 2000
- [12] Nicolai, H.P.: Germany, 10<sup>th</sup> World Conference on Inv. Cast., Monte Carlo, 2000
- [13] Sabatti, A.: Italy, 10<sup>th</sup> World Conference on Inv. Cast., Monte Carlo, 2000
- [14] Horáček, M.: Investment Casting Market Review Eastern and Central Europe, JACT Investment Casting Seminar, Tokyo, paper no. 11, Sep. 13-14, 2001
- [15] Doškář, J.: New Ways of Metal Casting, Praha, 1955
- [16] Horáček, M.: Investment Casting in Czech Republic, INCAST, Jan/Feb 1997
- [17] Horáček, M.- Rous, S.: Investment Casting in Czech Republic, 23rd BICTA conference, Cambridge, 1997
- [18] Horáček, M.: Central and Eastern Europe, 10th World Conference on Inv. Cast., Monte Carlo, 2000
- [19] Horáček, M.: Technologie vytavitelného modelu v České republice, Bulletin – Czech Investment Casting Association, 1999
- [20] Campbell, J.: Castings, Butterworth - Heinemann Ltd., 1991
- [21] Voight, R.C.: Factors Influencing the Dimensional Variability of Investment Castings, 45<sup>th</sup> Technical Meeting, Investment Casting Institute, 1997
- [22] Piwonka, T.S.: Factors Affecting Investment Casting Pattern Die Dimensions, INCAST, June, 1998
- [23] Hill, J. L.: Knowledge - Based Design of Rigging Systems for Investment Casting, Transactions AFS, 1994, p.109 -112
- [24] Dudley, J. - Bennet, J.: Dimensional Integrity of Precision Castings, Foundry Trade Journal, March 15, 1992, p. 300 - 304



- [25] Snow J. D.: How the Shell Affects Casting Dimensions. In: 43<sup>rd</sup> Annual Technical Meeting, ICI, 1991
- [26] Oti, J.A.: The Science, Mechanics and Construction of Investment Casting Tooling without Rework, 50<sup>th</sup> ICI Conference, Chicago, Sept., 2002
- [27] Williams, R.B.: Review of Investment Casting Waxes, PRECAST Conference, Brno, 1993
- [28] Huber, A.: Influence of Tool Design and Process Parameters on Wax Patterns, 50<sup>th</sup> ICI Conference, Chicago, Sept., 2002
- [29] Williams, R.B. a další: Introduction of Reconstituted Wax into an SPS Foundry, 22<sup>nd</sup> BICTA Conference, Bath, Sept., 1995
- [30] Horáček, M. - Štefan, L.: Influence of Injection Parameters to the Dimensional Stability of Wax Parameters, 9<sup>th</sup> World Conference on Inv.Casting, San Francisco, 1996
- [31] Horáček, M.: Accuracy of Castings Manufactured by Lost Wax Process, 23<sup>rd</sup> BICTA Conference, Cambridge, 1997
- [32] Horáček, M. - Helán, J.: Dimensional Accuracy and Stability of Investment Casting, 46<sup>th</sup> Annual Technical Meeting, ICI, 1998, Orlando
- [33] Horáček, M. - Čilecek, J.: Prerequisites for the Use of Investment Casting to Manufacture Components Currently Produced by Other Technologies, 24<sup>th</sup> E.I.C.F. Conference on Investment Casting, Roma, 1999
- [34] Horáček, M.: Investment Casting Accuracy, 10<sup>th</sup> World Conference on Investment Casting, Monte Carlo, 2000
- [35] Horáček, M.: Investment Casting Technology – The Technology For The New Millennium, 2001 JACT Investment Casting Seminar, Tokyo, Sep. 13-14, 2001
- [36] Horáček, M.: Investment Casting Technology in the Czech Republic, 50<sup>th</sup> ICI Technical Conference, Chicago, Sept. 2002
- [37] Horáček, M.- Helán, J.: Rozměrová přesnost odlitků vyráběných metodou vytavitelného vosku, Závěrečná zpráva úkolu FP 379715, leden 1998, Brno
- [38] Horáček, M.: Technologie vytavitelného modelu- technologie pro nové tisíciletí, Slévárství 10, 2001, s.570 –580
- [39] Horáček, M.: Accuracy of castings manufactured by the lost wax process, Foundry Trade Journal 3535, October,1997, p.424 - 429

## SUMMARY

### Investment casting technology –one of the “net-shape” processes

The process of investment casting has come to occupy a key position in the range of modern metal casting techniques. Over the half-century dating from 1940, what had been a small and highly specialised sector of casting activity developed into a worldwide and distinctive industry, reflecting the importance of the product in the intensifying search for close accuracy of shape and dimensions in materials forming. The near-net-shape objective is seen, as a means of providing the engineer with a direct, efficient and economical route to the manufacture of a finished component.

The method of manufacturing castings by the „lost wax process,, or „investment casting process,, seems to be one of the best technologies for manufacturing various components, particularly from the point of view of its narrow dimensional tolerances (the so called NET-SHAPE technology).

A closer look at individual stages of investment casting will, however, show us that such narrow dimensional tolerances are not at all easy to achieve.

Dimensional changes occur in practically every phase of the technology. From this point of view, the most important ones are the fabrication of the wax pattern, the fabrication of the ceramic shell and the process of solidification and cooling of the cast metal alloy.

Dimensional changes in the last of them, that is to say in the "casting + solidification + cooling" phase, depend to a large extent on the chemical composition and pouring temperature and cannot therefore be "purposefully" controlled (the range of the pouring temperature must be kept as narrow as possible to guarantee perfect metal fluidity of all details in the ceramic shell cavity).

Dimensional changes in first two technology phases, i.e. during the fabrication of the wax pattern and of the shell mould, have been studied for a very long time and have also been dealt with on a long-term basis at the Dept. of Foundry Engineering of the Technical University in Brno (in co-operation with foundries in the Czech Republic).

### Summary of Results for Individual Components Investigated

TEST PIECE: The regression analysis of the results yielded a mathematical model for the calculation of the shrinkage of the upper length of the test piece for individual injection machines used in the experiments.

FUSE BODY: Based on experiments where the influence of injection parameters  $T$ ,  $p$ ,  $\tau$  on dimensional changes was studied, a mathematical formula for the calculation of the main dimensions was proposed.

SCRAPER: A scraper body was mainly used for experiments on ceramic shell behaviour. Generally speaking, the results of both types of experiments told us the same thing, namely they confirmed the well-known fact that the expansion-after-firing of  $\text{SiO}_2$  shells is bigger by an order of magnitude than that of molochite shells. The increase in the rate of expansion in relation with the number of coats was observed mainly in  $\text{SiO}_2$  shells, while the molochite shells do not behave in exactly the same way.

BLADE: Compared to the previous example, injection parameters in this case proved a very important factor influencing final dimensions of the wax pattern. The results clearly demonstrate the relation between a decrease in shrinking and longer injection (filling and packing) times. In this experiment, also the influence of the so-called "braced contraction" was studied, whereby the wax pattern removed from a die is braced in the longitudinal direction. The length of the brace

exactly matches the size of the die. That significantly reduces the extent of the wax pattern shrinking and it is often used in preventing pattern deformations.

## **Conclusions**

The lost wax process has a long tradition of over 5,000 years and at least as many years of future development.

In spite of the fact that information is easily accessible and there is practically only one market, that is a global market, a number of geographical differences prevail, particularly in the degree of development of the lost wax technology and, consequently, the ability to make a full use of all of its advantages. These are embodied in the high competitive advantage offered by the final product of the process, i.e. in the casting with a net shape and a very high utility value (complicated shapes, broad range of materials).

This work presents an attempt to demonstrate the ability of investment casting technology to be one of the most progressive technologies of manufacturing "net-shape" castings for the third millennium.

## PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Doc.Ing.Milan Horáček,CSc se narodil 29.října 1948 v Přerově. Po absolvování ZDŠ v Hulíně v letech 1963-67 absolvoval SPŠ slévárenskou v Brně, kde pokračoval ve studiu na FS VUT (ve stejném oboru,tj. slévárenství).

Studium zakončil s vyznamenáním v roce 1972 a byl následně v konkurzním řízení vybrán pro studium interní aspirantury ( školitel prof.Aleš Vetiška, DrSc.). Disertační práci na téma,„Vliv stupně průtočnosti na průběh krystalizace šedé litiny“obhájil v roce 1977 po návratu ze základní vojenské služby (1975/76).

V tomto roce (1977) byl také přijat na místo odborného pracovníka katedry slévárenství FS VUT, od roku 1979 převeden na místo odborného asistenta a roku 1983 jmenován docentem pro obor strojírenské technologie.

V letech 1983-85 úspěšně absolvoval postgraduální kurz angličtiny na UK v Praze obhájením závěrečné práce a složením státních zkoušek.

Po celou dobu působení na VUT FSI se zabýval přednášením a cvičením předmětů z oboru slévárenské technologie pro všechny specializace FSI (v nižších ročnících) a především pro specializace materiálového inženýrství a slévárenské technologie ve druhém stupni studia.Je autorem a spoluautorem 8 skript. Doc.Horáček každoročně vede diplomanty a studenty v rámci odborné vědecké činnosti. Je školitelem doktorandů v oboru strojírenské technologie a předsedou zkušební komise pro SZZ.

V oblasti vědecko-výzkumné činnosti lze hlavní aktivity doc.Horáčka shrnout do následujících oblastí a časových období:

- |   |              |
|---|--------------|
| - Tepelně akumulací vlastnosti formovacích směsí              | 1970-74      |
| - Stupeň průtočnosti a jeho vliv na krystalizaci šedé litiny  | 1972-76      |
| - Vliv rychlosti tuhnutí na strukturu odlitků ze slitin Al-Si | 1974-75      |
| - Problematika tuhnutí tepelných uzlů                         | 1975-78      |
| - Studium skořepinových forem pro usměrněnou krystalizaci     | 1977-79      |
| - Tuhnutí odlitků ve skořepinových formách                    | 1978-81      |
| - Výpočet vtokových soustav (modelování,tvorba software)      | 1983-90      |
| - Filtrace tavenin ve skořepinových formách                   | 1986-90      |
| - Řízení jakosti výroby ve slévárně přesného lití             | 1991-93      |
| - Přesnost odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu    | 1995-doposud |

Z organizační činnosti doc.Horáčka pro potřebu oboru a fakulty je možné jmenovat projekty, podporující obor slévárenství na FSI:

- Mezinárodní projekt TEMPUS –PHOENIX-Anglie,Itálie,(1990-93),zaměřený na výchovu v oblasti managementu, marketingu a financování (celkem 95 absolventů, vybavení počítačové laboratoře, knihovna, technika – vše v hodnotě okolo 2,5 mil. Kč)
- Mezinárodní projekt QUALICAST –Anglie,Portugalsko,(1994-1995), zaměřený na kvalitu výrobního procesu.

Z bohaté a dlouholeté činnosti doc.Horáčka ve slévárenských společnostech je možné jmenovat jeho členství ve Výkonném výboru České slévárenské společnosti (první místopředseda od 1994) a členství v Radě Sdružení přesného lití (viceprezident od 1998). Od roku 2002 se doc.Horáček stal členem exekutivy (řídícího orgánu) Světové slévárenské organizace – WFO (World Foundry Organization).Od roku 1996 je také členem mezinárodní komise pro ekologii ve slévárenství při WFO.

Doc.Horáček je dlouholetým odborným garantem hlavní výroční odborné akce slévačů ČR – Slévárenských dnů (od 1993 ). Je také členem redakční rady časopisu Slévárenství. Celkem publikoval více jak 100 článků v mezinárodních a domácích časopisech a ve sbornících konferencí .