



**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

Ústav strojírenské technologie

## **Habilitační práce**

Tvarová přesnost složitých odlitků pro energetiku

Ing. Aleš Herman, Ph.D.

Praha, 2017

# Obsah

1. Úvod .....	8
2. Technologie přesného lití na vytavitelný model .....	10
2.1 Podstata a pojetí přesného lití .....	10
2.2 Popis procesu a technologie.....	11
2.2.1 Formy a jejich materiály na výrobu modelů.....	11
2.2.2 Materiály pro výrobu voskových modelů.....	18
2.2.3 Charakteristika voskové směsi .....	22
2.2.4 Vliv mikrostruktury vosku na vlastnosti směsi .....	22
2.2.5 Rozdělení voskových směsí .....	23
2.2.6 Zkoušky voskových směsí .....	24
2.3 Výroba voskových modelů .....	27
2.3.1 Sestavování voskových modelů.....	29
2.3.2 Výroba keramických forem a jejich materiály .....	31
2.3.3 Vytavování voskové hmoty ze skořepin .....	36
2.3.4 Vypalování keramických skořepin .....	37
2.3.5 Tavení a odlévání.....	38
2.3.6 Dokončovací operace .....	38
2.3.7 Kontrola odlitků.....	41
2.4 Využití odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu .....	42
2.5 TECHNOLOGIČNOST PŘESNÝCH ODLITKŮ .....	43
2.5.1 PŘESNOST METODY ODLÉVÁNÍ NA VYTAVITELNÝ MODEL .....	48
2.5.2 PŘÍČINY ODCHYLEK.....	51
2.5.3 PŘÍČINY ODCHYLEK PŘI PŘESNÉM LITÍ .....	53
2.5.4 VADY A NEDOSTATKY ODLITKŮ ZPŮSOBENÉ SMRŠŤOVÁNÍM CHLADNOUCÍHO KOVU	54
2.5.5 PŘÍČINY VZNIKU PNUTÍ.....	61
2.5.6 ZÁSADY KONSTRUKCE S OHLEDEM NA POTLAČENÍ VZNIKU PNUTÍ PŘI CHLADNUTÍ	
ODLITKŮ	65

2.6	PŘÍČINY DEFORMACÍ ODLITKŮ .....	68
2.6.1	DEFORMACE ZPŮSOBENÉ ROZDÍLNÝMI RYCHLOSTMI CHLADNUTÍ.....	68
2.6.2	DEFORMACE ZPŮSOBENÉ ODPOREM FORMY.....	71
2.7	ZÁSADY KONSTRUKCE PŘESNÝCH ODLITKŮ .....	76
2.8	PROBLEMATIKA PŘESNOSTI LOPATEK.....	77
2.9	Cíl habilitační práce .....	80
3.	Problematika simulací slévárenského procesu a simulací lisování a chování voskových modelů	81
3.1	Metody numerické simulace .....	82
3.1.1	Metoda konečných prvků (MKP).....	82
3.1.2	Metoda konečných diferencí (MKD) .....	83
3.1.3	Porovnání metod MKP a MKD.....	83
3.2	Charakteristické rysy výpočtového řešení simulací.....	84
3.3	Podmínky pro vytvoření simulace .....	85
3.3.1	Matematické modely a postupy.....	85
3.3.2	Materiálová databáze.....	85
3.3.3	Počáteční podmínky .....	85
3.3.4	Okrajové podmínky .....	85
3.3.5	Testovací zařízení pro validaci .....	86
3.4	Materiálový model tekutiny .....	86
3.5	Fyzikální model proudění tekutin ve slévárenských procesech .....	87
3.5.1	Rovnice popisující pohyb kapaliny.....	87
3.5.2	Zachování hmoty .....	88
3.5.3	Zachování hybnosti.....	89
3.5.4	Zachování energie .....	90
3.6	Přenos tepla během lití .....	91
3.6.1	Kondukce .....	91
3.6.2	Konvekce .....	92
3.6.3	Sálání .....	92

3.6.4	Rovnice vedení tepla .....	93
3.6.5	Přenos tepla mezi materiálem a tepelným odporem.....	94
3.6.6	Tuhnutí a dosazování kovu do odlitků.....	95
3.6.7	Staženiny .....	95
3.7	Slévárenský simulační software .....	98
3.7.1	AutoCAST-X1.....	98
3.7.2	EKKcapcast.....	98
3.7.3	CastCAE.....	98
3.7.4	Flow-3D Cast.....	99
3.7.5	MAGMA.....	99
3.7.6	NovaFlow&Solid .....	99
3.7.7	ProCAST, QuikCAST.....	99
3.7.8	WinCast .....	100
3.7.9	SOLIDCast .....	100
3.8	Viskoelastická.....	102
3.8.1	Porovnání elastického a viskoelastického chování.....	104
3.8.2	Typy modelů viskoelastické.....	104
3.9	Komplexní moduly.....	105
3.10	Dílič modely lineární viskoelastické .....	105
3.10.1	Maxwellův model .....	106
3.10.2	Kelvinův–Voigtův model.....	107
3.10.3	Standardní lineární pevný model (Zenerův model).....	108
3.10.4	Zobecněný Maxwellův model.....	108
3.10.5	Pronyho řada .....	109
3.10.6	Vliv teploty na viskoelastické chování .....	109
3.10.7	Viskoelastické tečení .....	110
3.10.8	Měření .....	110
3.11	Simulační software ProCAST .....	111

3.11.1	Charakteristika softwaru ProCAST.....	111
3.11.2	Geometrie a síťování v MashCAST .....	111
3.11.3	PreCAST .....	111
3.11.4	DataCAST / ProCAST .....	112
3.11.5	VisualCAST .....	112
3.12	Základní vstupní data použitých podmodulů .....	112
3.12.1	Fluid flow .....	112
3.12.2	Thermal.....	113
3.12.3	Stress .....	113
4.	Experimentální zjištění viskoelastických vlastností vosků.....	114
4.1	MĚŘENÍ VIZKOZITY SMĚSI B417 .....	114
4.1.1	Kapilární viskozimetr .....	115
4.1.2	Rotační viskozimetr .....	115
4.1.3	Vibrační viskozimetr .....	116
4.1.4	Naměřená data viskozity .....	117
4.1.5	DIFERENCIÁLNÍ SKENOVACÍ KALORIMETRIE (DSC) PRO SMĚS B417 .....	118
4.1.6	4.1 Vlastní měření DSC .....	120
4.1.7	EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ KOEFICIENTU TEPELNÉ ROZTAŽNOSTI .....	121
4.1.8	Příprava voskových vzorků a jejich měření .....	122
4.1.9	Měření .....	123
4.1.10	Zhodnocení.....	124
5.	Experimentální řešení modelu segmentu lopatky .....	125
5.1	Popis voskového modelu.....	125
5.2	Popis pracoviště pro výrobu voskových modelů.....	126
5.3	Návrhy technologických podmínek a jejich ověření.....	127
5.4	Zhotovení voskových modelů.....	127
5.5	Hodnocení teplotního pole chladnoucího modelu.....	129
5.6	Měření voskového modelu.....	132

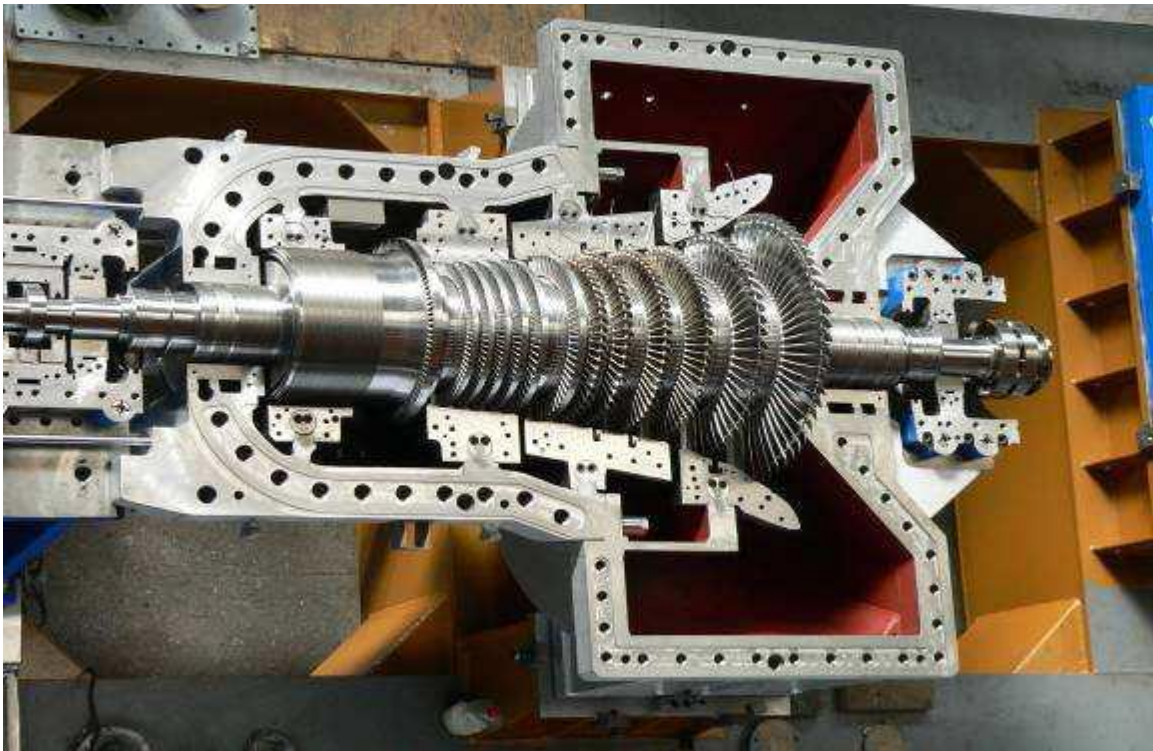
5.6.1	Popis měření.....	132
5.6.2	Snímané kontrolní body a deformační křivky.....	134
5.7	Hodnocení naměřených odchylek.....	137
5.7.1	Hodnocení kontrolních bodů.....	137
5.7.2	Hodnocení deformačních křivek.....	141
6.	Simulace segmentu lopatky.....	145
6.1	Simulace procesů probíhajících v matečné formě .....	146
6.1.1	Plnění dutiny formy .....	146
6.1.2	Teplotní pole.....	146
6.1.3	Napětí .....	148
6.2	Simulace procesů probíhajících mimo formu.....	148
6.2.1	Teplotní pole.....	149
6.2.2	Napětí .....	151
7.	Řešení modelů tepelných štítů plynových turbín.....	153
7.1	Výrobní postup voskového modelu.....	154
7.2	Měření voskových modelů na SMS .....	156
7.3	Měření voskových modelů laserovým skenerem.....	157
7.4	Porovnání měření lasercan vs. SMS stroj .....	159
7.5	Vyhodnocování výsledků měření pomocí SMS.....	159
7.5.1	Nominální voskový model .....	161
7.5.2	Vliv doby pobytu ve vodě na deformace.....	164
7.5.3	Doba vstřikování a její vliv na deformace.....	167
7.5.4	Vliv výdrže modelu ve formě na deformace .....	170
7.5.5	Vstřikovací tlak a jeho vliv na deformace modelu.....	171
7.5.6	Chlazení modelu na vzduchu.....	174
7.6	Určení povolených deformací modelů .....	177
7.7	Měření CP bodů.....	178
8.	Návrhy řešení výroby modelů štítu .....	184

8.1	Doba mezi vylisováním a upnutím .....	184
8.2	Konstrukční úprava fixačního přípravku.....	184
8.3	Vliv lisovacích parametrů na deformace modelů.....	187
9.	Simulace výroby modelů štítů .....	188
9.1	Postup tvorby simulace .....	188
9.2	Vlastnosti voskové směsi.....	188
9.3	Simulace průběhu plnění a tuhnutí za běžných podmínek .....	190
9.3.1	Chladnutí modelu během jeho umístění ve vodě .....	191
9.3.2	Vznik deformací během chladnutí ve vodě .....	194
9.3.3	Zbytkové napětí v modelu .....	195
9.4	Simulace průběhu tuhnutí (nový přípravek) .....	197
9.5	Vyhodnocení simulace a technologická opatření.....	199
9.6	Shrnutí poznatků z výroby modelu štítu .....	200
10.	Závěr .....	204
11.	Použitá literatura .....	208
11.1	Literatura ke kapitole 2 .....	208
11.2	Literatura ke kapitole 3 .....	211
12.	Publikace autora citované v habilitační práci.....	213
13.	Publikace autora vztahující se k habilitační práci (počítačové simulace slévání + technologie přesného lití) .....	216

# 1. Úvod

Habilitační práce shrnuje poznatky autora v oblasti technologie přesného lití na vytavitelný model. Je orientována na odlitky pro energetiku, kde se používají odlitky ze speciálních žárovevých materiálů na bázi superslitin Ni a Co. Odlitky z těchto materiálů jsou tvarově složité a velmi obtížně obrobitelné. Proto jsou ze strany energetického průmyslu zvyšující se požadavky na zpřesňování dodaných odlitků a minimalizaci technologie obrábění.

Hlavní požadavek na rozměrovou přesnost odlitků vychází z množství a rozmanitosti odlitků, které např. v plynových turbínách mohou být poměrně ve velkém počtu. Pokud bychom vzali průměrnou turbínu, tak v ní bude řádově několik set přesných odlitků (viz obr. 1.1) – budou to odlitky lopatek složitých tvarů, statorových segmentů a tepelných štítů.



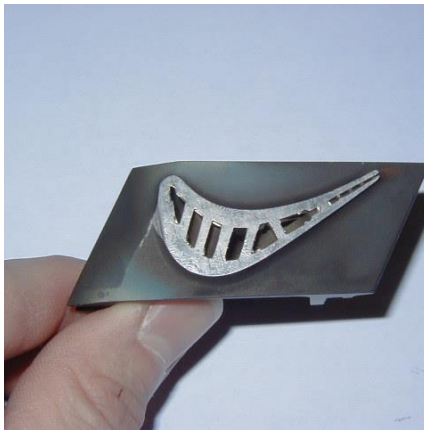
**Obr. 1.1 Pohled na hřídel s lopatkami plynové turbíny <sup>1</sup>**

Vždy se jedná o poměrně složité a rozměrově relativně malé tvary (hmotnostně max. do 1 kg), které využívají vnitřní chlazení (viz obr. 1.2 a 1.3). Pokud na složeném statorovém segmentovém kole je několik desítek odlitků segmentů, sebemenší deformace a se pak projeví na možnosti smontovatelnosti. Dříve se odlitek odlil s přídavkem na obrábění (v závislosti na velikosti odlitku řádově v milimetrech) a všechny sesazovací plochy se obráběly. To ovšem vnáší do výrobního procesu

<sup>1</sup> Necitované a neoznačené fotografie z autorova archívu



poměrně vysoké výrobní náklady, neboť tyto složité tvary nelze obrobit na jedno upnutí a je nutné využívat víceosá (5 – 6osá) obráběcí centra. Proto na slévárny přesného lití vzrostly požadavky na zpřesnění výroby odlitků. V roce 2000 byla standardní tolerance na 100 mm dlouhé lopatce na zámku a bandáži  $\pm (1 - 2)$  mm s tím, že tvar bandáže se nepředléval. Obdobně tolerance u tepelných štítů a segmentů byly řádově v mm. Nyní je spíše požadavek dodávat vše s tolerancemi  $\pm (0,1 - 0,3)$  mm. Tyto hodnoty tolerancí však odpovídají dle ČSN ISO 2768 – 1 pro délkové rozměry stupeň jemná tolerance, dle normy ČSN EN ISO 286-1 tomu odpovídá toleranční stupeň IT 10 – IT 11. S tím, že pouze některé plochy se dobrousí a většina tvarů je odlita tzv. na čisto.



**Obr. 1.2** Vnitřní chlazení v odlitku segmentu



**Obr. 1.3** Sestava chlazených segmentů v turbíně

## 2. Technologie přesného lití na vytavitelný model

Metoda vytavitelného modelu neboli také “lost wax“ nebo “investment casting“ dnes zastává klíčovou pozici na poli moderních technologií lití kovů. Lze ji začlenit mezi technologie near-net-shape (produkty blízké hotovým výrobkům), kdy se přeměna materiálu realizuje na tvary a rozměry blízké hotovým výrobkům. Termín near-net-shape nelze chápat pouze jako prostředek k zajišťování přímé, účinné a ekonomické cesty k výrobě hotové součásti, ale rovněž jako úsporu drahých materiálů a energií [2.1].

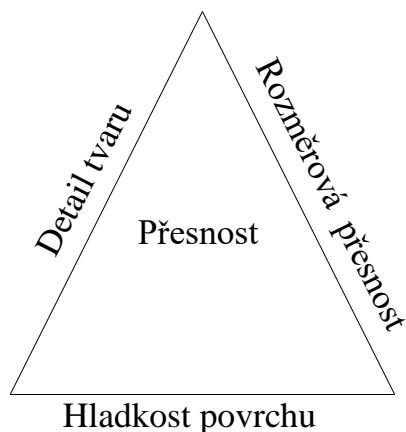
Při výrobě součástí se stále prosazují vyšší požadavky na jakost, kvalitu povrchu, rozměrovou přesnost, vnitřní jakost, vyšší funkční parametry, to vše při silném ekonomickém tlaku, aby výrobní náklady zůstaly stabilní. U některých strojírenských součástí se musí stále uplatňovat progresivní výrobní způsoby strojírenské metalurgie, které jsou schopny uведенé požadavky splňovat. Mezi progresivní způsoby lze zařadit také přesné lití vytavitelným modelem, jenž při efektivním uplatnění umožňuje podstatné úspory materiálu a dokončujících výrobních operací.

### 2.1 Podstata a pojetí přesného lití

Přesné lití lze charakterizovat jako technologii, která umožňuje vyrábět tvarově složité součásti, u nichž se část funkčních ploch vyrábí již při lití s takovou rozměrovou tolerancí a s takovou drsností povrchu, že dokončování obráběním není nutné. U ostatních ploch, které je potřeba obrábět, jsou přídatky na obrábění relativně malé a spotřeba času na jejich odstranění a s tím spojené náklady zřetelně nižší než u jiných způsobů lití. [H1].

Přesné lití metodou vytavitelného modelu je tedy metoda, která umožňuje vyrábět odlitky tvarově velmi složité, s malými rozměrovými tolerancemi a s velmi dobrou jakostí povrchu. Používá se zejména tam, kde se zřetelem na složitý tvar a obtížně obrobitelný materiál je výroba součástí jinou technologií mimořádně nákladná, nebo dokonce zcela nemožná [2.2].

Pojetí přesnosti je znázorněno na obrázku 2.1.1. a nejedná se pouze o aspekt rozměrové přesnosti a tolerance, ale též o aspekt kvality povrchu a způsobilosti reprodukovat komplikované části odlitku (tvarový detail). Všechny tyto tři vlastnosti jsou významné z hlediska dalších operací obrábění, určují referenční bod a ustavení v přípravku, nebo určují, zdali je vůbec další obrábění potřebné.



*Obr. 2.1.1 Aspekty přesnosti u odlitku [2.1]*

## 2.2 Popis procesu a technologie

Výrobní proces je rozdělen do několika fází – viz obr. 2.2.1 a 2.2.2. V dalších podkapitolách jsou jednotlivé fáze procesu postupně kriticky zhodnoceny.

### 2.2.1 Formy a jejich materiály na výrobu modelů

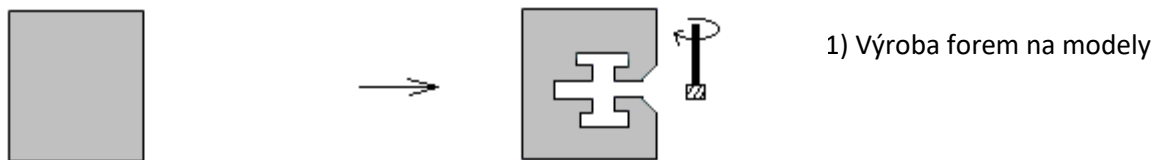
Výroba modelového zařízení je první důležitou operací v technologickém sledu výroby přesných odlitků. Prvotním předpokladem pro výrobu přesného odlitku je přesný model s dokonalým povrchem a s přesně dodržnými rozměry. Ke zhotovení takového modelu je potřeba velmi přesně vyrobená forma. Tvar dutiny je shodný s budoucím tvarem součástky.

Modelové zařízení je kritickým faktorem mezi výrobcem a jeho zákazníkem. Použité modelové zařízení má významný vliv na cenu a kvalitu odlitku. Požadavky na volbu modelového zařízení by měly obsahovat následující informace [2.3]:

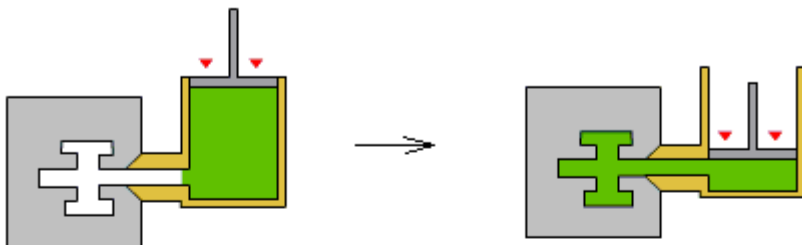
- Odhadovaný celkový počet kusů
- Počet kusů v dávce
- Koncové použití odlitku
- Požadavky na kvalitu odlitku

Formy na vytavitelný model musí splňovat následující požadavky:

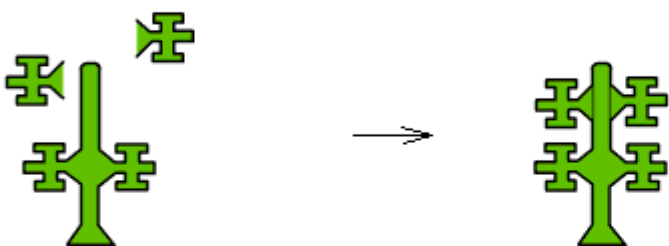
- umožnit výrobu kvalitních zdravých modelů s bezvadným povrchem, bez staženin, vzduchových bublin, propadlin a ostatních povrchových vad a s požadovanou přesností rozměrů
- doba nutná k setrvání vyrobených modelů na vstřikolise ve formě má být co nejkratší.



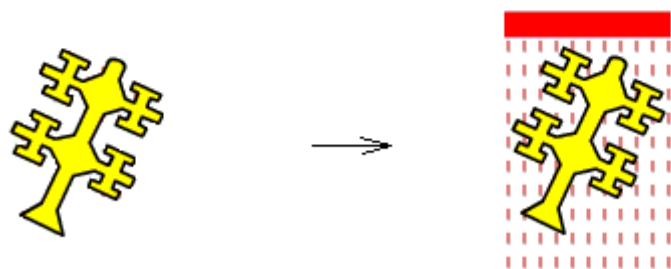
1) Výroba forem na modely



2) Výroba voskových modelů



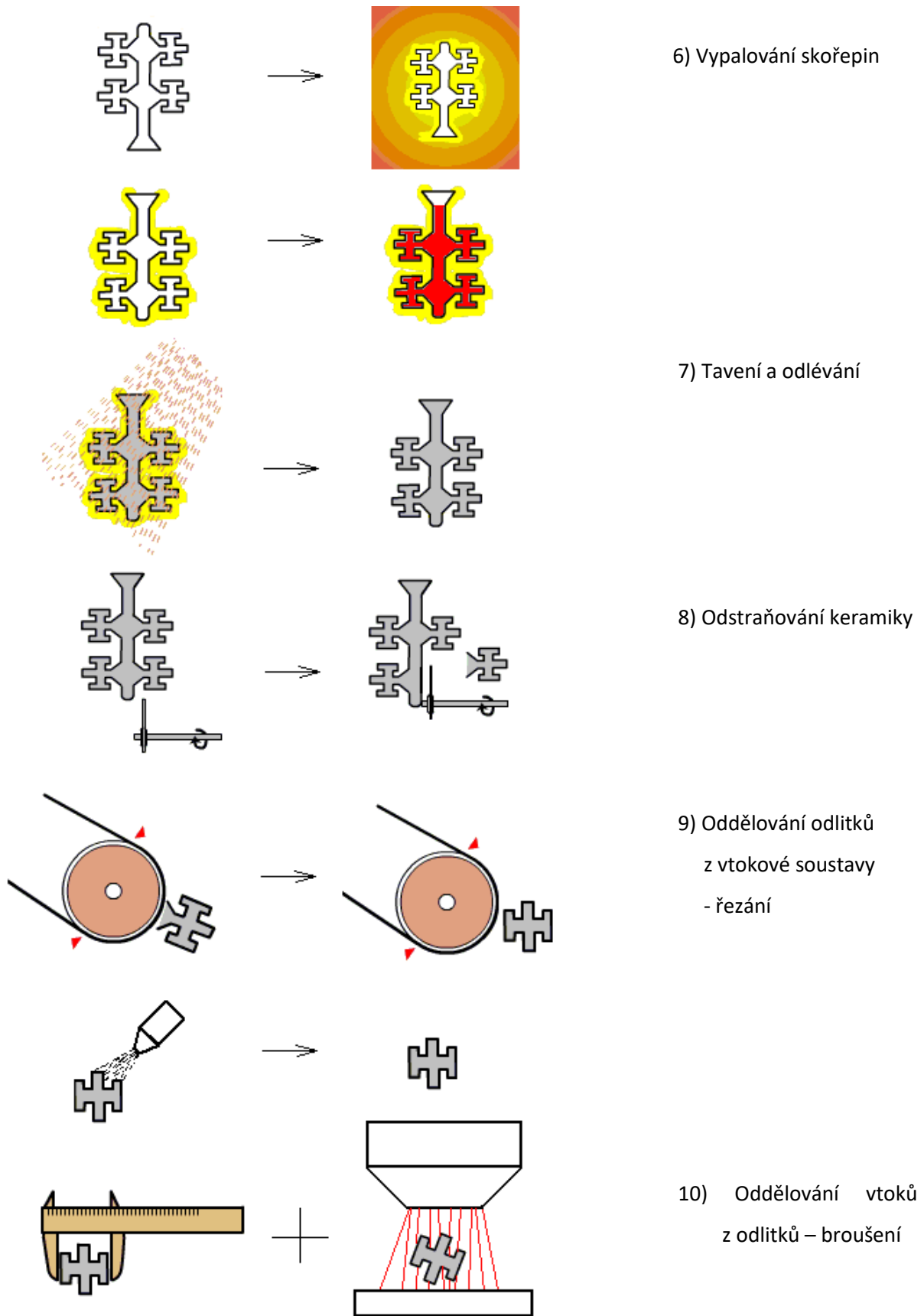
3) Sestavování modelů  
do stromečků



4a) Výroba skořepin – namáčení  
voskových modelů do  
keramické břechky



Obr. 2.2.1 Procesní schéma technologie lití na vytavitelný model [2.4], [H1]



Obr. 2.2.2 Procesní schéma technologie lití na vytavitelný model [2.4], [H1]

Formy lze dále rozdělit:

Podle konstrukce:

- samostatné formy pro jeden model
- samostatné formy pro více modelů (etážový odstřík)
- ve formě výměnných vložek do upínacích stolic vstřikolisů

Podle účelu a použití:

- formy k výrobě vlastních modelů
- formy k výrobě vtoků, nálitků, kolektorů apod.

Podle stupně mechanizace: - s ručním vyjímáním modelů

- s vyhazovači modelů
- s jádry a částmi forem ručně nebo mechanicky rozebíratelnými
- celkově mechanizované nebo automatizované

Podle způsobu výroby:

- obráběním (podle výkresu)
- odléváním (podle matečního modelu)
- galvanoplastika, metalizace

Podle materiálu formy:

- ocel
- hliníkové slitiny
- nízkotavitelné slitiny
- zinkové slitiny
- plastické hmoty
- sádra
- kaučuk

#### Formy vyrobené obráběním

Jsou používány tam, kde jsou požadavky na velkosériovou produkci a dlouhou životnost, a pro výrobu odlitků požadující tu nejvyšší přesnost. Modely vyráběné v těchto formách jsou nejpřesnější, avšak jedná se o technologii nejvíce nákladnou. Výroba forem pro jednoduché modely bez vnitřních dutin je relativně nenáročná. Modely s vnitřními dutinami nebo tvarovým členěním, jejichž osy jsou například mimo dělicí rovinu, musí obsahovat výsuvná jádra, která vyžadují přesnou výrobu a náročné lícování ve formě. Pro výrobu forem obráběním (obr. 2.2.3) se používá ocel a slitiny hliníku [2.1].



**Obr. 2.2.3. Forma s výsuvnými částmi vyrobená obráběním**

Výhody hliníku oproti oceli jsou:

- Hliník je možno obrábět jednodušeji a rychleji, to znamená, že hliníkové formy budou méně nákladné.
- Výroba voskových modelů je zřetelně rychlejší, protože hliník má lepší tepelnou vodivost.
- Formy se snadněji instalují na lisovací stroj, manipulace je celkově lepší díky nižší hmotnosti hliníku.

Výhody oceli oproti hliníku jsou:

- Ocel je méně náchylná k deformaci a poškození než hliník.
- Oprava je všeobecně jednodušší vzhledem k tomu, že ocel je snadněji svařitelná v porovnání s hliníkem.
- Spojovací hrany jsou méně náchylné na poškození [2.5].

### Formy z nízkotavitelných slitin

Mají výhodu v relativně jednoduché a rychlé výrobě. Jejich výroba spočívá v zalití kovového matečného modelu nízkotavitelnou slitinou, matečný model je usazen v ocelovém plášti. Voskové modely vyrobené v takových formách mají kvalitní povrch a vyhovují po stránce rozměrové přesnosti. Mezi nevýhody patří nepříliš dlouhá trvanlivost, proto se používají k výrobě menšího počtu voskových modelů.

### Formy ze zinkových slitin

Jsou vyráběny zalitím matečného modelu zinkovou slitinou. Zinkové formy jsou tvrdší a lépe odolávají opotřebením a poškozením ve srovnání s formami z nízkotavitelných slitin. Mají tedy i větší životnost, a proto jsou používány na větší série. Nejsou vhodné pro výrobu modelů s velkými dutinami nebo s bočními a šikmými jádry [2.1].

### Formy z plastických hmot

Jsou vyráběny zalitím matečného modelu dentakrylem nebo epoxidovou pryskyřicí. Jejich výroba je poměrně jednoduchá a levná. Trvanlivost těchto forem je však nízká, a tak jsou vhodné pro výrobu modelů v malých sériích. Nevýhodou je menší přesnost, než mají formy z nízkotavitelných slitin a nižší tepelná vodivost.

### Formy ze sádry

Jsou vyráběny zalitím matečního modelu ze sádry. Používají se na výrobu jednotlivých modelů bez nároků na rozměrovou přesnost. Životnost forem je minimální, a proto se často používají při ověřování navrhované technologie výroby. Nepoužívají se na vstříkovacích lisech, používají se na výrobu modelů volným gravitačním litím.

### Formy ze silikonového kaučuku

Jsou vyráběny zalitím matečného modelu silikonovým kaučukem. Tyto formy jsou používány pro ověřování navržené technologie odlitku nebo pro modely předmětů v bižuterii. Výběr forem ze silikonového kaučuku má své opodstatnění tehdy, když má být vyráběno malé množství kusů, u nichž nezáleží na rozměrové přesnosti.

Hlavní výhody forem ze silikonového kaučuku jsou:

- Umožňují výrobu forem s negativními úkosy – forma je pružná
- Krátká doba výroby
- Komplikované dělicí roviny jsou relativně snadné pro výrobu
- Změny, úpravy a modifikace formy jsou lehce dosažitelné

Hlavní nevýhody forem ze silikonového kaučuku jsou:

- Malá tepelná vodivost formy prodlužuje výrobní cyklus.
- Životnost forem je podstatně nižší než u forem ze slitin hliníku nebo z oceli.



- Modely vyžadují obvykle ořezávání.
- Rozměrové tolerance konečného produktu jsou obtížně reprodukovatelné.

#### Formy vyráběné galvanoplasticky

Jsou vyráběny jako kovové skořepiny z niklu, oceli nebo mědi v galvanické lázni. Tyto formy lze použít na komplikované a velmi přesné modely, jejichž váha není příliš velká. Nehodí se na výrobu modelů se zářezy, otvory a hlubokými drážkami.

#### Formy vyráběné metalizací

Jsou výbornou alternativou pro výrobu modelů tam, kde jsou požadavky na komplikované dělicí roviny a použití celokovové formy je příliš nákladné. Všeobecně je výroba modelů ve formách vyráběných metalizací rychlá a konzistentní podobně jako v celokovových formách. Základním principem výroby forem metalizací je vrhání roztavených částic kovu na mateční model metalizační pistolí. Kov se taví plamenem či obloukem. Rozprášené tekuté částice jsou nosným plynem vrhány na základní materiál, kde se vlivem kinetické energie deformují, spojují se a vytváří pevnou souvislou vrstvu, která přesně reprodukuje všechny tvary [2.2]. Tloušťka vrstvy je okolo 3 mm. Nejčastěji se jako médium používá zinek. Takto vzniklá kovová skořepina je zalita epoxidovou pryskyřicí plněnou kovovým práškem nebo nízkotavitelnou slitinou. Životnost forem je extrémně vysoká, v závislosti na složitosti formy se pohybuje v rozmezí od 10 000 do 100 000 vstřiků [2.1, 2.11].

Hlavní výhody forem vyráběných metalizací jsou:

- Poměrně nízká cena formy
- Přijatelná kvalita voskového modelu
- Krátká doba výroby
- Dobrá životnost
- Složité formy jsou poměrně málo nákladné

Hlavní nevýhody forem vyráběných metalizací jsou:

- Modely vyžadují obvykle odstranění výronků či přetoků vosku v dělicí rovině.
- Úprava formy je obtížná.
- Opravy se všeobecně provádí pomocí epoxidové pryskyřice.

K výběru modelového zařízení existuje tedy několik metod a typů výroby modelového zařízení.

Při navrhování druhu formy rozhodují tato kritéria:

- Velikost série a předpokládané celkové množství
- Velikost odlitku a jeho členitost
- Vyžadovaná rozměrová přesnost odlitku

- Tepelné vlastnosti forem
- Náklady na výrobu forem
- Vstřikovací stroj

V současnosti se v drtivé většině používají kovové formy vyrobené technologií obrábění (dnes nejčastěji vysokorychlostní frézování na CNC obráběcích centrech), nejvíce používaným materiálem jsou slitiny hliníku, popřípadě ocel.

## 2.2.2 Materiály pro výrobu voskových modelů

### Voskové směsi

Voskové modely se zhotovují z voskových směsí – obr. 2.2.4., protože samostatný vosk nesplňuje všechny požadavky kladené na modelovou hmotu. Moderní voskové směsi jsou sloučeniny více komponentů, jako je syntetický vosk, přírodní vosk – uhlovodík, přírodní vosk – ester, přírodní a syntetická pryskyřice, montánní vosk, organické plnivo a voda. Existuje více variant takových sloučenin, které splňují požadavky; vlastnosti kladené na voskové směsi jako je bod tavení, tvrdost, viskozita, roztahování/smršťování. [2.17]



**Obr. 2.2.4 [2.4] Ukázky voskových směsí**

K výrobě voskových modelů existuje několik druhů voskových směsí lišící se použitelností a materiálovými vlastnostmi:

- Vosky na modely
  - čisté (neplněné)
  - plněné
  - emulgované
- Vosky na vtoky, vtokové soustavy – obvykle recyklované

- Rekultivované vosky
- Speciální vosky
  - adhesní (lepivý)
  - namáčecí
  - opravný
  - vosky na jádra
  - rozpustné vosky

#### Neplněné modelové vosky

Jsou komplexní sloučeniny více vosků a pryskyřičných komponentů. Povrch modelů z těchto vosků je obvykle více lesklý než standardní voskové směsi.

#### Emulgované modelové vosky

Mají základní materiály podobné jako výše uvedené vosky neplněné, ale jsou emulgovány vodou, obvykle mezi 7 až 12%. Povrch modelů je mimořádně hladký.

#### Plněné modelové vosky

Mají základní materiál podobný jako výše uvedené vosky, avšak do směsi je přidáváno míchané práškové plnivo, nerozpustné v základním vosku. Plnivo zvyšuje stabilitu směsi a snižuje její kavitaci. Povrch modelů je oproti emulgovaným voskům nepatrně hrubší.

#### Vosky na vtoky

Mají základní materiály podobné jako neplněné vosky, jsou smíšené pro zajištění požadavku na pevnost vtokového systému.

#### Rekultivované vosky

Jedná se v podstatě o servis poskytovaný výrobcem vosků. Použité vosky jsou důkladně čištěny, míchány a uvedeny do původního stavu. Poté jsou vráceny a znovu používány na vtokové systémy a modely.

#### Adhesní vosky

Jsou lepivé vosky pro spojování modelů z podobných nebo nepodobných vosků. Primárně se používá pro modely a vtokové systémy.

#### Namáčecí vosky

Jsou velmi tekuté, proto mají schopnost téct do hůře dostupných míst, kde zaplňují otevřené spoje.

### Opravné vosky

Opravné vosky tvrdé nebo měkké, se používají pro opravu modelů nebo pro utěšňování vtokové soustavy.

### Vosky na jádra

Vosky na jádra se používají k utěšňování keramických jader vkládaných do modelu, zlepšují povrch a snižují možnost praskání.

### Vodou rozpustné vosky

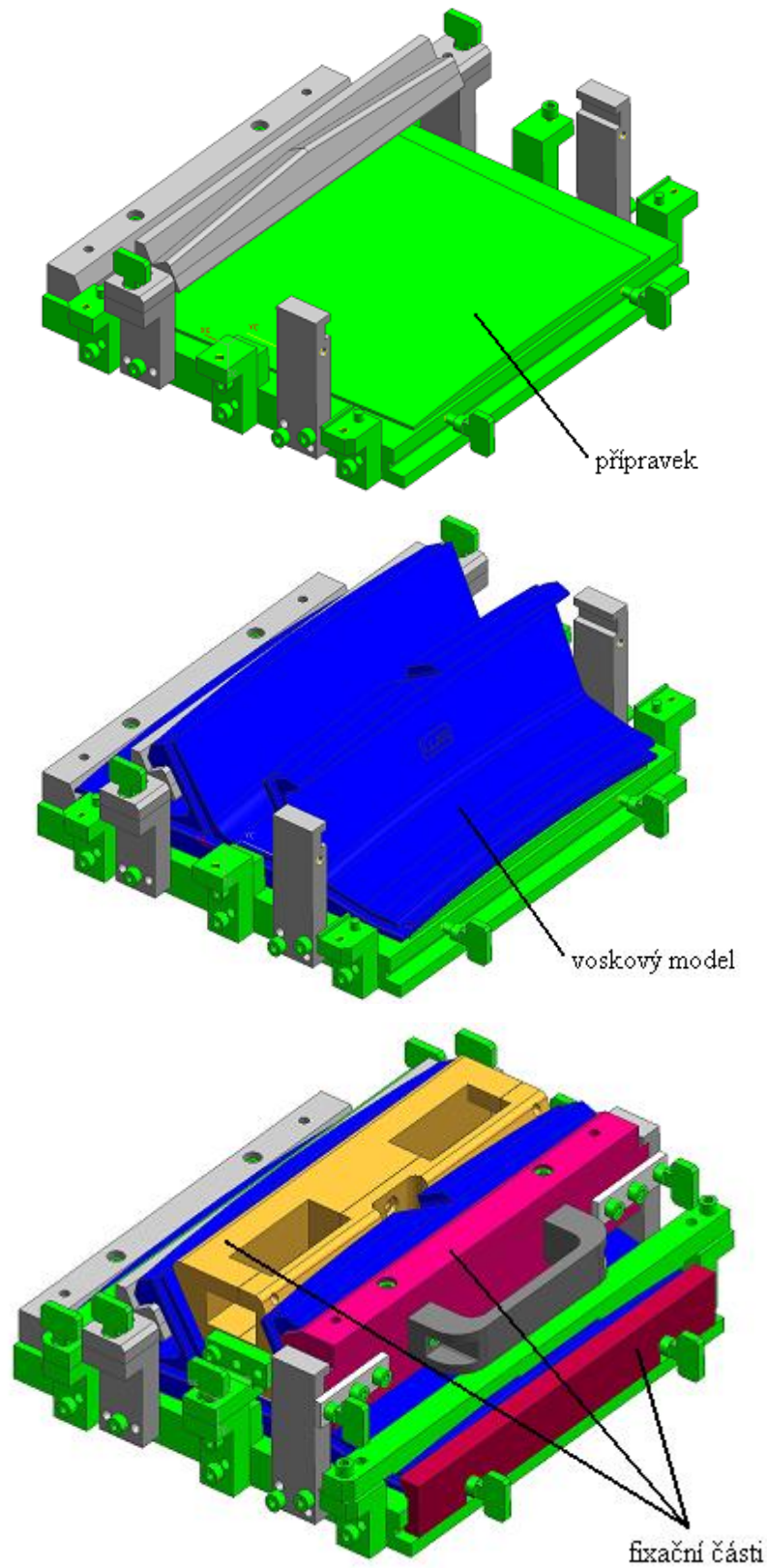
Vodou rozpustné vosky se používají pro vytvoření vnitřních tvarů tam, kde by bylo obtížné aplikovat jiné prostředky. Používají se jádra vkládána do dutiny formy před vstříknutím standardního vosku a následně (později) dojde k jeho rozpuštění, a tím dochází k dostatečnému zaplnění dutin [2.10], [2.15], [2.18].

Hmota na výrobu voskových modelů má mít následující charakteristiky:

- Dostatečnou pevnost a tvrdost
- Dostatečnou stabilitu.
- Dostatečnou pružnost pro manipulaci
- Malé smrštění během tuhnutí a tím i malou roztažnost za vyšších teplot
- Nízké procentu popelu
- Vhodnou viskozitu
- Odolnost proti oxidaci
- Nesmí se lepit na stěny kovové formy.
- Nesmí reagovat s obalovými hmotami.
- Musí přesně reprodukovat tvar formy.
- Regenerace vosku – je důležitá z hlediska ekonomického a ekologického.

Většina používaných modelových hmot v současnosti výborně reprodukuje dutinu formy a zajišťuje kvalitní povrch modelu. Rozměry modelů se dají s dostatečnou přesností zajistit. Nejobtížnější je dodržení přesného geometrického tvaru, protože modelová hmota při tuhnutí mění rozměr. To se projevuje velmi nepříznivě u hmotných modelů a u modelů s rozdílnými tloušťkami stěn. Částečně se tvorbě deformací brání zvyšováním tlaku při vstřikování vosku do formy, nebo jak už bylo zmíněno, vkládáním voskových jader do formy před vstříknutím. Trendem v této oblasti je tzv. chladicí přípravek viz obr. 2.2.5. Jedná se v podstatě o fixační přípravek, do kterého se vkládá voskový model ihned po vyjmutí z formy. Přípravek je konstruován tak, aby zabránil deformacím v kritických místech, popřípadě aby zajistil požadovanou předdeformaci na požadovaných místech modelu [2.2],[2.3]. Výroba přípravku je poměrně nákladná a náročná na přesné lícování dosedacích ploch, materiálem je obvykle

slitina hliníku. Model se do přípravku vkládá ihned po vyjmutí ze vstřikovacího lisu většinou na dobu 24 hodin, tzn. že pro větší sériovost je potřeba mít více fixačních přípravků.



**Obr. 2.2.5 Chladící (fixační) přípravek**

### 2.2.3 Charakteristika voskové směsi

Nejčastěji používanou hmotou na výrobu vytavitelných modelů je vosková směs (někdy i nízkotavitelné slitiny), která má dosahovat řady vlastností. Všechny tyto vlastnosti však nespĺňuje žádný jednoduchý vosk. Při výběru modelové hmoty je kladen důraz na velkou škálu základních požadavků [2.8], [2.9] (včetně požadavků uvedených v textu výše):

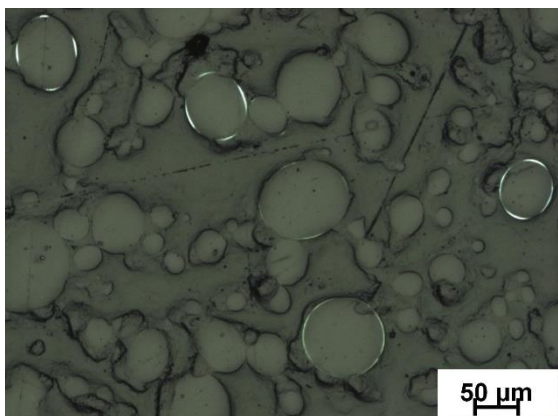
- Přesná reprodukovatelnost stěn formy.
- Co nejkratší doba tuhnutí po vstříknutí do formy.
- Nesmí ulpívat na stěnách matečné formy ani způsobovat korozi.
- Směs by měla být co nejlehčí, aby vlivem vlastní hmotnosti nedocházelo k deformaci modelu.
- Modelová hmota by měla odolávat oxidaci.
- Výsledný model by měl mít vysokou smáčivost s keramickou břečkou.
- Nesmí chemicky reagovat s obalovými hmotami.
- Po vytavení nesmí zanechávat žádný zbytek směsi ve skořepinové formě.
- Musí být ve všech stavech zdravotně nezávadná.
- Musí být dostupná a cenově únosná.

Je však velmi obtížné nalézt správnou směs, která by v co největší míře splňovala veškeré požadavky.

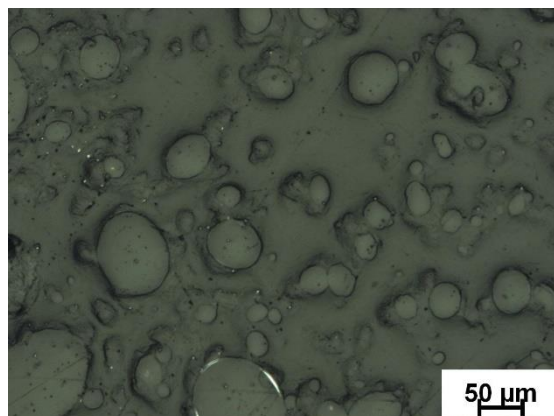
### 2.2.4 Vliv mikrostruktury vosku na vlastnosti směsi

Používané slévárenské voskové směsi jsou mnohokomponentní sloučeniny cerezínu, parafínu, přírodního uhlovodíkového vosku, včelího vosku, syntetického vosku, pryskyřice, organického plnidla (obvykle na bázi PS) a vody – foto výbrusů voskové směsi viz obr. 2.2.6 a 2.2.7. Jednotlivé složky upravují fyzikální a mechanické vlastnosti směsi jako je bod tání, tvrdost, viskozita, objemové změny a další. Vlastnosti jednotlivých složek vyplývají z jejich atomární struktury, která je tvořena většinou řetězovou, někdy i kulovitou strukturou uhlíkových atomů. Platí, že čím delší jsou atomární řetězce řetězové struktury, tím je vyšší bod tání, bod tuhnutí a tvrdost [2.11]. Výsledná směs se chová jako heterogenní sloučenina. Příkladem je chování směsi v závislosti mezi tvrdostí a teplotou, která je znázorněna na obr. 2.2.8.

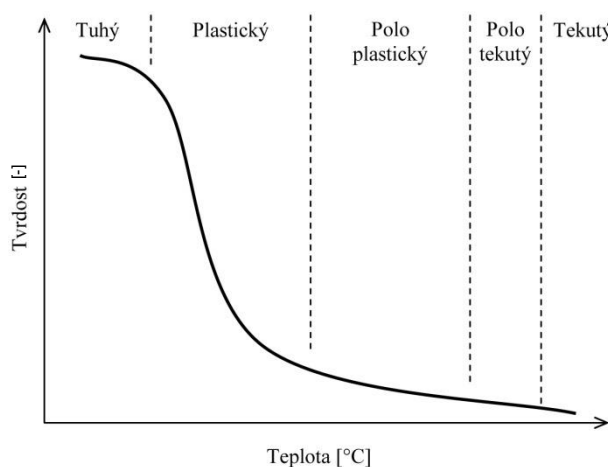
Mikrostruktura také ovlivňuje tepelnou roztažnost voskových směsí, která je v porovnání s kovovými materiály mnohem větší. Roztažnost jednotlivých složek voskových směsí zobrazuje obr. 2.2.9. Kombinací těchto složek vzniká výsledná roztažnost směsi.



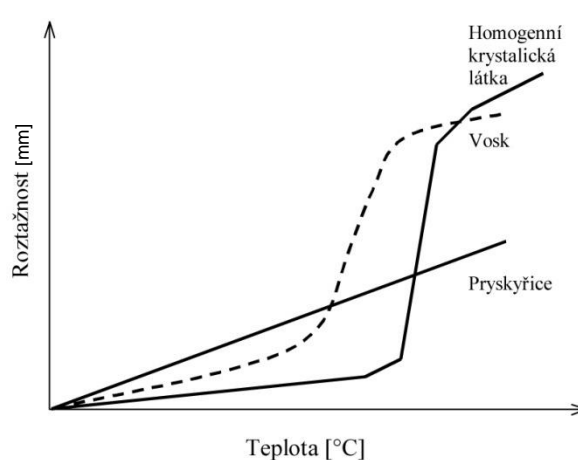
Obr. 2.2.6 Struktura panenského vosku



Obr. 2.2.7 Struktura rekonstituovaného vosku



Obr. 2.2.8 Závislost tvrdosti na teplotě směsi [2.11]



Obr. 2.2.9 Závislost roztažnosti složek směsi na teplotě [2.13]

- **Homogenní krystalické látky** jsou provázeny lineární roztažností až k bodu tavení, následuje rychlý přechod do tekuté fáze, který je provázen prudkým nárůstem objemu. V tekuté fázi je nárůst objemu opět malý.
- **Vosk** s krátkými uhlíkovými řetězci měkne již při nižších teplotách a postupným nárůstem objemu. Vosk s delšími uhlíkovými řetězci je provázen strmějším sklonem křivky přechodu. Po dosažení teploty tekuté fáze se opět vrací změna objemu k pozvolnému lineárnímu sklonu. Plněné voskové směsi vykazují nižší hodnoty změny objemu.
- **Amorfni pryskyřice** má při zahřívání poměrně malý lineární charakter bez prudkého nárůstu objemu.

### 2.2.5 Rozdělení voskových směsí

K výrobě voskového modelu se používá několik druhů voskových směsí lišících se především použitelností a jejich vlastnostmi. Lze je rozdělit do čtyř hlavních skupin [2.16]:

- **Vosky na modely** – Dělí se na plněné (plnivo zvyšuje rozměrovou stabilitu a jsou vhodné pro tvarově nejsložitější tenkostěnné modely), neplněné (umožňují snadnou regeneraci a vysokou

kvalitu povrchu) a emulgované (jde o neplněné vosky emulgované 7 až 12 % vody ve směsi). Díky jejich kvalitě se používají výhradně na výrobu modelů [2.13].

- **Vosky na vtoky a vtokové soustavy** – Směsi mají zvýšenou pevnost, aby nedocházelo k deformaci stromečku při jeho manipulaci, a nižší hodnotu tavení, aby se při vytavování vtoková soustava vytavovala jako první a nevznikalo tak nebezpečí poškození skořepiny [2.14].
- **Rekultivované vosky** – Výrobce vosku umožňuje regeneraci voskových směsí, které se znovu použijí na vtokové soustavy a modely [2.16].
- **Speciální vosky** – jsou navrženy pro konkrétní použití. Dělí se na adhesní, namáčecí, opravné, vosky na jádra a vodou rozpustné vosky.

## 2.2.6 Zkoušky voskových směsí

K získání znalostí chování voskových směsí doporučuje institut ICI (Investment Casting Institute) provádět následující standardizované zkoušky [2.14]:

- Test tekutosti - zabíhavost směsi
- Bod měknutí - teplota, při níž dochází k měknutí
- Penetrace - hloubka proniknutí jehly do vzorku o definované teplotě
- Specifická hmotnost
- Obsah plniva
- Test propadání - zakřivení rovného povrchu vzorku po určitém čase
- Rozměrová stabilita - odpor proti porušení vzorku při zatížení
- Obsah popela – zbytky po spálení voskové směsi

Pro testování voskových směsí používají někteří výrobci podle vlastních norem standardizované inertní zkoušky, které jsou optimalizovány podle jejich zkušeností a potřeb. Jsou to převážně specializované zkoušky se zaměřením na určení potřebných charakteristik voskových směsí, pro potřeby technologie vytavitelného modelu, neboť umožňují získat informace, jak se bude tato směs chovat v jednotlivých krocích technologického procesu. Zkoušky jsou zároveň základním zdrojem informací k úpravě výrobních podmínek, aby bylo dosaženo požadované stability a kvality výrobního procesu. Následně lze tyto zkoušky rozdělit do skupin [H1]:

- 1) Standardizované zkoušky
- 2) Testy mechanických vlastností
- 3) Zkoušky fyzikálních vlastností:
  - Reologické zkoušky – viskozita a oscilační zkouška
  - Termální analýza – zkouška DSC
  - Skenovací elektronová mikroskopie
- 4) Testování technologických vlastností směsí



## *Standardizované zkoušky*

Jedná se o měření základních charakteristik, které jsou doporučeny od institutu ICI, jejichž výsledky převážně dodává i výrobce:

- **Obsah popela** – Po vytavení voskové směsi a vyžhání skořepiny by hodnota obsahu popela neměla přesahovat 0,03 hm. %. K určení obsahu popela se používá gravimetrická analýza.
- **Obsah plniva** – Kladně ovlivňuje vlastnosti voskových směsí, jako je rozměrová stálost, mechanické vlastnosti, viskozita, objemová roztažnost a obsah popela. Výrobce tuto hodnotu sice zveřejňuje, ale skutečné výsledky se mohou lišit.
- **Bod tuhnutí** – Znalost této hodnoty teploty, při které vosková směs přestává téci, je nezbytná pro optimalizaci vstřikovacích parametrů.
- **Bod skapání** – Je teplota změny stavu voskové směsi z pevného skupenství na kapalné.

## *Zkoušky mechanických vlastností*

Voskové modely vyžadují ideální poměr mezi křehkostí a pružností, neboť při jejich vyjímání z matečné formy a následné manipulaci pro potřeby skladování, vytvoření stromečku a jeho obalování, podléhají různým způsobům mechanického namáhání. Mezi nejčastější mechanické zkoušky voskových směsí patří [2.14]:

- **Zkouška ohybem** – Jde o nejčastější zkoušku mechanických vlastností. Zkouška se provádí metodou tříbodového ohybu vzorků zhotovených způsobem odléváním i vstřikováním. Pomocí této zkoušky lze hodnotit maximální zatížení před porušením vzorku, průhyb, ohybové napětí v závislosti na deformaci, Youngův modul pružnosti v ohybu, ohybová tuhost, mez pevnosti, deformační práce, průtažnost, tuhost / křehkost voskové směsi a modul pevnosti v ohybu.
- **Zkouška penetrační** – Je druhou nejčastější zkouškou mechanických vlastností. Účelem této zkoušky je při určité teplotě stanovit tvrdost voskové směsi, která poskytuje odhad odolnosti vůči poškrábání modelu. Zároveň má vysoká tvrdost voskové směsi pozitivní vliv na odolnost proti deformaci a rozměrovou stabilitu.
- **Zkouška tahem** – Jedná se o klasickou tahovou zkoušku s předem definovanými rozměry vzorku. Pomocí této zkoušky je hodnocena především tažnost, kontrakce, mez pevnosti a mez kluzu.

Z těchto zkoušek se pro potřeby simulace používá pouze konstanta Youngova modulu pružnosti v závislosti na teplotě.

## *Zkoušky fyzikálních vlastností*

- **Oscilační zkouška** – Popisuje visko-elastické vlastnosti voskových směsí. Vzorek je upnut do čelistí reometru, přičemž jedna z čelistí je otočná. Z úhlu natočení rotoru a smykové rychlosti je automaticky dopočítán krouticí moment, jehož vlivem ve vzorku vzniká napětí. Výsledkem je kontrola deformace vzorku bez porušení jeho vnitřní struktury při měření za různých teplot od

tuhé až po tekutou fázi. Získaná data je možno použít u simulačních programů k výpočtům, jenž jsou spojeny s predikcí rozměrových změn a deformací [2.18].

- **Viskozita** – Slouží k porovnání tekutosti jednotlivých druhů voskových směsí za daných podmínek a k předvídání zabíhavosti, uzavření vzduchu či kvality povrchu modelu. Měří se potřebný krouticí moment k udržení konstantní úhlové rychlosti otáčení rotoru. Vnitřní struktura směsi je při zkoušce porušena [2.17].
- **Kalorimetrická zkouška** – Na diferenčním skenovacím kalorimetru (DSC) je měřena termická analýza. Měří se příkon potřebný k ohřevu dvou kalíšků, s měřeným materiálem a známým referenčním materiálem, které jsou udržovány na stejné teplotě. Výstupem měření jsou grafické závislosti příkonu při referenční teplotě v podobě izotermické ohřívací a ochlazovací křivky.

### **Zkoušky technologických vlastností**

Zkoušky technologických vlastností jsou často označovány jako tzv. vstřikovací zkoušky, mezi které patří [2.18]:

- **Zkouška volného lineárního smrštění** – Je prováděna ve speciální formě při stanovených podmínkách vstřikovacího procesu, mezi něž patří teplota voskové směsi a formy, vstřikovací tlak a další, které se liší pouze dobou vstřikování použité zkoušky. Odstříknuté vzorky jsou 24 hodin ponechány na teplotě 21 °C. Následně se vypočte volné procentuální smrštění voskové směsi změřených délek vyhotovených vzorků oproti rozměru formy.
- **Zkouška zabíhavosti** – Je kromě doby vstřikování prováděna za shodných podmínek parametrů vstřikování na speciální vstřikovací formě, která má dutinu ve tvaru spirály s délkovou stupnicí. Výsledkem měření je vyhodnocení průměrné hodnoty zabíhavosti měřených vzorků použité voskové směsi.
- **Zkouška na zařízení MPI20-20** – Je speciální zkouška od výrobce MPI Smart Systems, která je kompatibilní pouze s vstřikolisy tohoto výrobce. Zařízení umožňuje během vstřikovacího cyklu snímat průběh tlaku, průtoku a teploty v závislosti na čase. Naměřené hodnoty této zkoušky jsou velice přínosné pro potřeby predikce numerické simulace průběhu plnění formy a s tím spojené vyhodnocování vlivu parametrů vstřiku voskového modelu.

### **Nové metody zkoušení**

Jedná se spíše o zkoušky potřebné pro stanovení správných parametrů, například pro vytavování voskové směsi v autoklávu. Výsledek těchto zkoušek však nelze použít pro potřeby numerické predikce, neboť např. pro závislost objemové změny na teplotě je nutno také znát její závislost na tlaku. Mezi nové specializované metody zjišťování vlastností se zařazují následující zkoušky: [B]

- **Zkouška objemové roztažnosti** – poskytuje stanovení průběhu objemové roztažnosti voskové směsi během jejího ohřevu. Vlivem ohřevu se vosková směs rozpíná a tlačí tak na píst, jehož posuv je snímán laserem. Cílem je získat závislost průběhu objemové roztažnosti v % na teplotě ve °C, kterou je nezbytné znát pro nastavení parametrů vytavování voskové směsi ze skořepiny a předejít tak jejímu prasknutí [2.11].
- **Zkouška rychlosti tavení** – spočívá v umístění tvarově a hmotnostně definovaného voskového vzorku do speciálního pohárku s malým otvorem na dně, v němž je vzorek ohřát definovanou rychlostí na stanovenou teplotu. Skrz otvor pohárku skapává tavený vosk na digitální váhu, která zaznamenává hmotnost nakapaného vosku. Výsledkem měření je vyhodnocení gradientu závislosti hmotnosti skapaného vosku a teploty [2.18].
- **Chemické složení voskové směsi** – dodatečná zkouška umožňující definovat spektrální analýzou chemické složení materiálu pomocí metody infračervené spektrometrie [2.18].

## 2.3 Výroba voskových modelů

Voskové modely se vyrábějí dvěma způsoby:

- a) vstřikováním do formy
- b) gravitačním litím do formy

### *Gravitační lití modelů*

Je používáno už jen velice zřídka a to většinou při výrobě pomocných modelů jako jsou např. vtokové kanály apod.

### *Vstřikování do formy*

Výroba voskových modelů vstřikováním vosku do formy je hlavní metodou výroby voskových modelů. Výroba se uskutečňuje na speciálních vstřikovacích lisech, které vstřikují roztavený vosk pod tlakem do formy. Teplota vosků při vstřikování je v rozmezí 55 – 90°C. Po ztuhnutí je model vyjmut z formy. Vstřikovací lisy jsou klasifikovány dle stavu vosku, který je stroj schopný vstřikovat. Existují tři základní typy strojů pracujících s voskem:

- tekutým
- kašovitým
- pevným

#### Vstřikovací stroj pracující s tekutým voskem

Tento stroj obsahuje ohřívání zásobník vosku, v němž je vosk promícháván. Vosk je dále přepravován ze zásobníku do vstřikovacího válce pomocí tlaku vytvořeného hydraulickým nebo pneumatickým válcem a také pomocí vlastní váhy vosku (napájení samospádem). Když je vstřikovací válec plný, dojde k uzavření ventilů na vstřikovací jednotce a tím k oddělení vstřikovací jednotky od

zásobníku, stroj je pak připraven k vstřikování. Forma je vložena a upnuta do stroje. Po dosažení potřebného tlaku ke spojení formy stlačí vstřikovací válec dle předem nastaveného tlaku vosk do vstřikovací jednotky. Vstřikovací trysky se přesunou dopředu a spojí s formou, poté se otevře vnitřní ventil trysky, kterým bude roztavený vosk proudit do formy. Stroj po vstřiknutí vosku dále působí tlakem po předem určenou dobu výdrže, vosk ztuhne a zchladne až do stavu, v kterém může být vyjmut z formy. Na konci tohoto cyklu vstřikovací jednotka sníží tlak, otevře se forma a vyjme model.

Tento vstřikovací stroj je nejvíce používán v dnešních slévárnách přesného lití na vytavitelný model. Výhodou vstřikovacího stroje pracujícího s tekutým voskem je jednoduchost, která spočívá v čerpání vosku přes potrubí z centrálního zásobovacího systému do stroje, což má za následek snadné udržení stavu vosku ve stroji a minimální podíl lidských zásahů. Nevýhodou u těchto strojů pracujících s tekutým voskem je to, že při použití příliš horkých vosků se zvyšuje pracovní cyklus a zvyšuje možnost výskytu staženin. Tento problém se dá zredukovat přidáváním různých plniv, které snižují staženiny ve vosku. Použití příliš studených vosků může být příčinou vzniku vzduchových bublin ve voskovém modelu.

#### Vstřikovací stroj pracující s kašovitým voskem

Dnes jsou na trhu 2 typy strojů pracujících s kašovitým voskem. První je typ 'kanystr'. Kanystr, nebo válec, je naplněn tekutým voskem a následně vložen do temperovací pece do té doby, než vosk dosáhne určitého stavu pomocí předem nastavené teploty. Po splnění této podmínky je kanystr vložen do vstřikovacího stroje, který má stejnou teplotu jako temperovací pec. Kanystr je v podstatě vstřikovací válec, obsahující vstřikovací píst spojený s hydraulickým válcem, který je permanentně spojen se strojem. Po vložení kanystru do stroje a zapnutí příslušného ovládacího prvku začne hydraulický válec stlačovat vosk v kanystru, odkud se vosk dostává do vstřikovacích trysek a dále do formy.

Druhý typ je hybridní stroj, který má dvě části zásobníku. Horní část zásobníku slouží k udržování tekutého vosku. Spodní část zásobníku obsahuje tepelný výměník, který vosk ochlazuje a zpět ho vrací do horního zásobníku, kde je vosk smíchán s teplejším voskem, aby tak docházelo k vytvoření hladké pasty. Tento typ stroje musí být spojen se zásobovačem tekutého vosku, který udržuje horní zásobník stroje na požadované úrovni tak, aby celý zásobník stroje pracoval správně. Nevýhodou obou strojů je požadavek na temperovací pec.

#### Vstřikovací stroj pracující s tuhým voskem

Tento stroj používá předpřipravené ohřáté voskové polotovary, které jsou vkládány do vstřikovací komory. Polotovar je dále lisován pod tlakem přes vstřikovací sestavu a vstřikovací trysku do formy. Nevýhodou těchto strojů je ztráta přibližně 20% materiálu polotovarů pro zhotovení akceptovatelného modelu.

Dle typu upínání lze vstřikovací stroje rozdělit na 3 typy. Jedná se o čtyřstožanový horizontální typ. Forma u tohoto typu musí být permanentně upevněná (přišroubovaná ke stolu). Tato konfigurace se používá z toho důvodu, že k vyjmutí modelu z formy je použito automatických vyhazovačů. Dalšími typy jsou vertikální čtyřstožanový typ a C-rám, který je nejvíce rozšířený. Formy zde mohou být buď permanentně připevněné, nebo lze s formami manipulovat za účelem rozmontování.

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

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

### **2.3.1 Sestavování voskových modelů**

Modely se vyrábějí ve formách většinou jednotlivě a musí se připojit na vtokovou, popřípadě na nálitkovou soustavu. Podle počtu modelů v jedné licí soustavě se rozlišují:

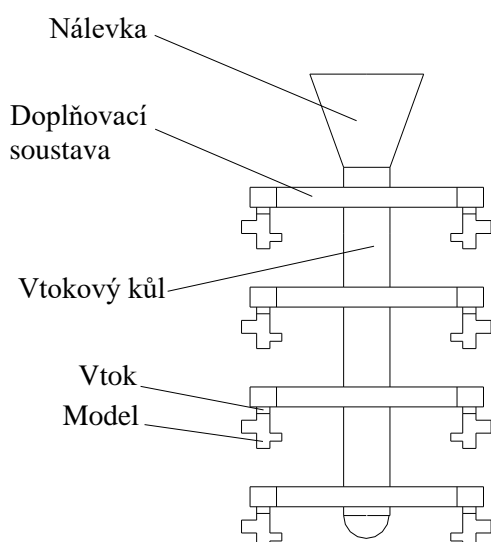
- sestavy jednotlivých modelů
- sestavy více modelů do tzv. stromečků

#### Sestavování jednotlivých modelů

Používá se v případě rozměrnějších odlitků. Jsou to převážně odlitky, u nichž velké nároky na kvalitu nebo rozměrovou přesnost vylučují použití jiné technologie. Vtoková soustava s různými druhy nálitků se vyrábí ve zvláštních formách a na model se připojí pájením nebo lepením.

#### Sestavování modelů do stromečku

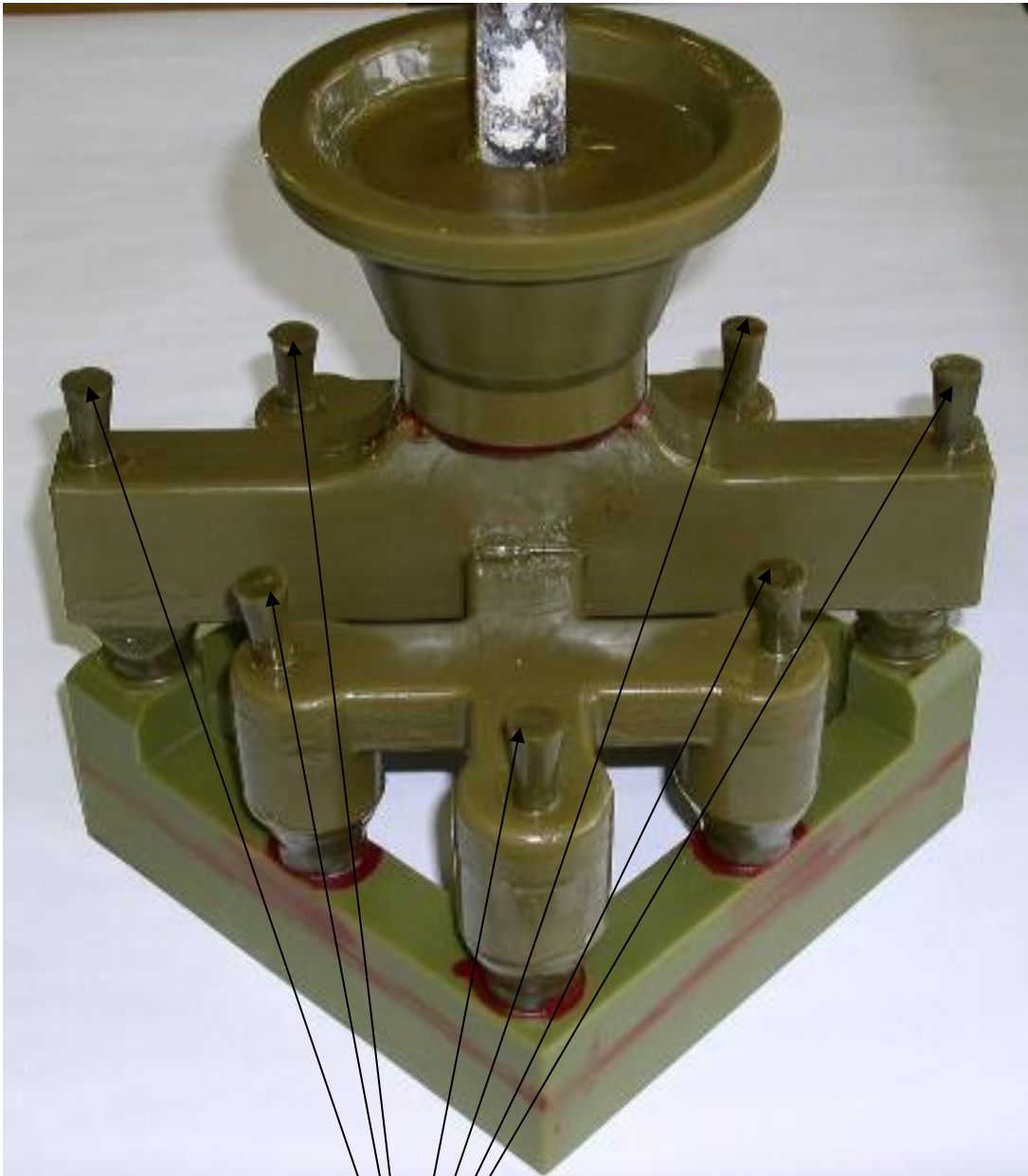
Stromeček se skládá z většího počtu modelů, spojených jednotlivými vtoky s vtokovou soustavou. Jednotlivé části stromečku jsou na obr. 2.3.3.1.



**Obr. 2.3.3.1. Jednotlivé části „stromečku“**

Modely se na vtokovou soustavu připojují buď lepením, nebo pájením. Při pájení se modely připojí na vtokovou soustavu tak, že se mezi vtok modelu a vtokový systém vloží pájedlo, model se přitlačí na pájedlo, které je přiloženo na místo vtokového systému, kde bude model připojen. Po natavení dosedacích ploch se pájedlo vytáhne a model se přitiskne k vtokovému systému. Při lepení se užívá pistole, která ke spojení modelu a vtokového systému používá roztavené lepidlo, které je nanášeno na stykové plochy. Tvar stromečku by měl být navržen tak, aby byl k připojení modelů umožněn dobrý přístup, přičemž se nesmí při lepení či pájení poškodit modely, které jsou na stromečku již přilepeny. Z hlediska následující operace obalování by měly být modely na stromečku přilepeny dutinami dolů. Obalová hmota musí stékat, aby nedocházelo ke zvětšování tloušťky obalu v dutinách, která ovlivňuje nepříznivě posunutí tepelné osy následkem nahromadění žhavé keramiky. Vzdálenost mezi modely na stromečku nesmí být příliš malá, aby i po nanesení posledního obalu byla mezi jednotlivými modely mezera. Vzdálenost etáží musí být taková, aby bylo zajištěno dokonalé posypání obalů a sušení. Pro obalování a manipulaci se stromečkem (modelem) se používá rukojeti, která se zašroubuje do matice, zalité do nálitku nebo vtoku, pokud je v ose sestavy.

Sestavení modelů a vtoková soustava musí dovolit bezproblémové vytékání vosku při vytavování modelů ze skořepiny. Není-li možné vhodnou polohou modelu na stromečku dosáhnout dokonalého odstranění vosku, je potřeba k modelu připojit pomocný výfuk, který umožní odstranění vosku z formy. V případě, že ani pomocný výfuk nestačí k dokonalému odstranění vosku, je potřeba vytvořit na vtokové soustavě nebo modelu pomocné výtokové otvory, obr. 2.3.3.2. Aby bylo možno pomocné výtokové otvory vytvořit bez poškození odlitku, musí mít model výstupku vhodný tvar. Po vytavení vosku se pomocné výtokové otvory důkladně zatmelí.



Výstupky pro budoucí výtokové otvory

*Obr. 2.3.3.2. Výstupky pro budoucí výtokové otvory*

### **2.3.2 Výroba keramických forem a jejich materiály**

Keramická skořepina je ve výrobě odlitků metodou vytavitelného modelu rozhodujícím faktorem. Je to právě keramická skořepina, která dává této metodě možnost vyrábět širokou škálu odlitků a používat k výrobě velký výběr slitin.

Voskové směsi mají velký koeficient tepelné roztažnosti, zatímco keramika má malý koeficient tepelné roztažnosti; slitiny jsou s hodnotou koeficientu tepelné roztažnosti uprostřed mezi voskem a keramikou. Tyto rozdíly vytváří ve výrobě odlitků nerovnováhu, kterou je potřeba kontrolovat.

Jedním z důsledků rozdílné tepelné roztažnosti vosku v porovnání s keramikou je to, že kdykoliv po výrobě skořepiny při zvýšení okolní teploty může uzavřený voskový model způsobovat praskání okolní křehké keramiky. Většina obaloven proto teplotu neustále monitoruje, aby se zabránilo případným problémům.

Při tuhnutí a chladnutí kovu ve formě může docházet vlivem smršťování kovu ke změnám geometrie odlitku, protože forma (skořepina) se smršťuje v mnohem menším poměru. Tento rozdíl může být příčinou vzniku vad v odlitku, jako jsou trhliny vzniklé smršťováním. Kontrola pevnosti formy je důležitým faktorem ve výrobě odlitků metodou vytavitelného modelu. Forma musí být pevná, odolná proti případnému poškození (rozbití) při manipulaci a stejně tak musí být resistantní proti rozpínání vosku při jeho vytavování, což je v rozporu s použitím slabších (měkčích) forem, které se lépe vyvarují prasklinám nebo trhlinám skořepiny a snadněji jsou odstranitelné po odlití.

Další charakteristika procesu se týká rozměrové změny – kontrakce. Kov se smršťuje při jeho chladnutí, forma z keramické skořepiny se smršťuje při vypalování a voskový model se také smršťuje po vstříknutí. Výsledný rozměr odlitku proto není shodný s rozměrem voskového modelu. To znamená, že větší odlitky budou mít větší zmenšení, a tím bude obtížnější dodržet tolerance.

### Materiál keramických forem

Formovací hmoty pro výrobu skořepin se obecně skládají z plniva a pojiva.

### Plniva

Základní vlastnosti keramických skořepin jsou dány hlavně charakterem žáruvzdorného materiálu obalové hmoty, méně již kapalným pojivem. Pro výběr vhodného žáruvzdorného materiálu jsou směrodatné následující vlastnosti:

- Tepelná roztažnost
- Teplota tavení
- Chemická netečnost vůči odlévaným kovům

Na výrobu skořepin se jako žáruvzdorné materiály používají hlavně směsi oxidů a křemičitany. Pro praktické průmyslové použití se z oxidů využívá především  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – oxid hlinitý,  $\text{ZrO}_2$  – oxid zirkoničitý. Z křemičitanů se využívá nejvíce mullitu, zirkonu, silimanitu a hlavně molochitu. Molochit není běžná surovina, je to v podstatě mullit (56%) ve sklovité obálce amorfního oxidu křemičitého (44%) [5].



Materiály používané buď jako plnivo do břechky, nebo jako posypové materiály, mohou i nemusí být stejné. Keramické materiály jsou používány v široké škále kombinací.

Zirkon se vyskytuje v podobě jemnozrnného písku, a v některých případech se používá jako jemný primární posyp stejně tak jako posypový materiál (ve formě prášku). Velikost zrn zirkonového písku je příliš jemná pro jeho výhodné použití jako sekundární posyp, proto jsou používány na sekundární posypy hrubší syntetické materiály

### Pojiva

Pojiva (vazná kapalina) spolu se žáruvzdorným materiálem tvoří vlastní obalovou hmotu pro výrobu keramických skořepinových forem. Pojivo má mít následující vlastnosti:

- Nesmí snižovat žáruvzdornost formy a musí být netečné při vypalování formy k žáruvzdornému materiálu i k roztavenému kovu.
- Musí dát formě po ztuhnutí dostatečnou pevnost jak po vysušení, tak po vypálení.

Jako pojiva formovacích hmot na skořepinové formy se používají především koloidní roztoky oxidu křemičitého, dále také organické sloučeniny hliníku, titanu, zirkonu a některé sloučeniny anorganické [2.1].

Křemičitanová pojiva jsou buď na lihové, nebo vodné bázi. Systém založený na vodní bázi používá k sušení vzduch a nejvíce se používá pro primární obaly. Vodní báze má oproti alkoholové bázi delší dobu sušení. Rychlost vypařování má vliv na kvalitu primárního obalu a nakonec tedy i na povrch odlitku.

Pojiva na alkoholové bázi nemají výhodu pouze v rychlejším sušení, ale také ve vytvrzování, které je zajištěno působením plynného prostředí – amoniakem. Tyto pojiva se používají hlavně pro sekundární obaly zejména tam, kde se obalování aplikuje pomocí robota. Při použití břechky na alkoholové bázi a vytvrzování amoniakem se další obaly mohou nanášet během několika minut [2.1]. Základem koloidních roztoků oxidu křemičitého je nejčastěji kombinace polymerních etylsylikátů s obsahem křemíku kolem 40%. Alkoholický roztok dává s vodou a vhodným hydrolyzačním katalyzátorem velmi stabilní kapalné pojivo pro žáruvzdorné materiály. Podstatou spojení jednotlivých zrn plniva do pevné obalové vrstvy (keramické skořepiny) je gelace pojiva. Gelovaná vrstva, sušením dehydratovaná, je tvořena amorfním  $\text{SiO}_2$ , který po vypálení formy přejde do krystalické formy [2.5].

### Výroba skořepin

Charakteristickým znakem metody ztraceného vosku je nedělená forma. Model použitý pro zhotovení formy se vždy zničí vytavením a je tedy pro každou formu nutno použít nový model.

Keramická jádra se vkládají do voskových modelů. Nejčastěji se používají jako zálitky ve voskovém modelu přímo zastříknutý na vstřikolise při výrobě modelu.

### Obalování

Keramická skořepina se zhotoví okolo celého voskového modelu stromečku. Obalování spočívá v opakovaném *namáčení* modelových stromečků do obalové hmoty, *posypávání* žáruvzdorným materiálem o vhodné zrnitosti a sušení jednotlivých obalů. Tento cyklus se opakuje tolikrát, dokud nemá obal požadovanou tloušťku. Počet vrstev bývá obvykle mezi pěti až patnácti dle požadované pevnosti formy. Velké, těžké odlitky budou pravděpodobně potřebovat více vrstev než odlitky menší. Před obalováním je nutné odstranit z povrchu voskového stromečku zbytky dělicího prostředku, jinak první obal k povrchu voskových modelů dokonale nepřilne; vyschlý obal pak vlivem pnutí popraská, odlupuje se a je příčinou defektů.

Při *namáčení* se čisté voskové stromečky pozvolna ponořují do obalové hmoty při současném otáčení a naklánění tak, aby obalová hmota rovnoměrně pokryla stromeček, aby se neutvořily v koutech, rozích nebo drážkách vzduchové polštáře, nebo aby tam neulpěly vzduchové bublinky. Potom se stromeček (sestava) z obalové hmoty vyjme a manipuluje se s ním tak, aby se obalová hmota rovnoměrně rozdělila a přebytečná odkapala [2.5].

Následuje *posypávání* žáruvzdorným materiálem, které se dříve provádělo mechanicky proudem volně padajících částic. Dnes se posypává fluidně, ponořením do vzduchem načeřeného posypového materiálu. Na první dva lícni obaly, které rozhodují o kvalitě povrchu odlitku, se používá jemný zásypový materiál se zrnitostí většinou 0,1 až 0,25 mm, na další obaly pak 0,25 až 0,5 mm.

Po namočení a posypání dochází k *tuhnutí obalu*. Obaly tuhnou buď jen odpařením disperzního prostředí z kapalného pojiva, které vyvolá stavovou změnu soli v gel, nebo k této změně dojde působením chemického činidla (urychlení) a odpaření disperzního prostředí následuje později. První metoda je realizována sušením, druhá je základem tzv. rychloprocesů [2.27].

Při *sušení* musí každý obal schnout v klimatizovaném prostoru při teplotě 20 až 24°C a při vlhkosti 50 až 70%. Při sušení musí být zajištěno dostatečné proudění vzduchu. Podstatného zkrácení doby sušení se dosáhne sušením v proudu vzduchu s rychlostí proudění alespoň 180 m/min. V mírně ohřátém vzduchu (25 až 27°C), proudícím rychlostí 250 m/min, lze zkrátit dobu sušení mezi jednotlivými obaly na 50 až 55 s [2.28].

Moderní metody pracují s tzv. chemickým tvrzením obalů (*rychloprocesy*). Jedná se o různé způsoby urychlování gelace. Značného zkrácení gelace je dosahováno použitím alkalicky reagujících látek (nejčastěji čpavku) [2.29]. Posypané obaly se pak suší krátkou dobu na vzduchu (volně), pak se vystaví krátkou dobu působení plynného čpavku. Poté následuje odstranění čpavkových par z obalu

působením proudu vzduchu, nové namočení, odkapávání, posypání atd., až má skořepina potřebnou tloušťku. Pak se suší dle rozměrů skořepiny 3 až 8 hodin [2]. Nevýhodou vytvrzování obalů čpavkem je toxicita par čpavku.

### Keramická jádra

Výroba keramických forem na odlitky s otvory a drážkami metodou vytavitelného modelu je omezena průměrem a délkou otvorů, šířkou a hloubkou drážek. Výroba odlitků s úzkými dlouhými otvory a úzkými hlubokými drážkami je obtížná, příčinou je nedokonalé vyplnění úzkých otvorů a drážek formovací hmotou při obalování modelu. Obalová hmota nahromaděná v otvorech a drážkách nemůže ve stanovené době sušení dobře uschnout, to má pak za následek rozpadání formy při vypalování vosku. Tyto deficity odstraňují vkládaná keramická jádra, která proti jádrům vytvořeným obalováním mají přesnější rozměry, povrchy odlitků v dutinách, drážkách a otvorech jsou hladší a jsou odolná proti erozi kovem.

Keramická jádra umožňují vyrábět tak přesné odlitky, které mají takové tvary dutin a otvorů, jež by nebylo možné obráběním vyrobit vůbec, nebo jen velmi obtížně [2.12].

Jádra jsou umísťována do dutiny formy na voskový model před vstříknutím vosku, jádra se tak stanou součástí keramické formy během vytváření voskového modelu, později musí být bezproblémově odstranitelná z odlitku.

Preferovanou výrobou keramických jader je injekční vstřikování. Keramika ve formě těsta je vstřikována pod tlakem do dutiny. To je následováno vypalováním při vysoké teplotě, kde dochází ke zhutňování (sintrování) materiálu.

Jednou z největších oblastí použití keramických jader je letecký a energetický průmysl. Především v leteckém průmyslu se keramická jádra používají pro vytvoření vnitřního chladicího kanálku v lopatce turbíny. – viz obr. 2.3.4.1. a obr. 2.3.4.2.



**Obr. 2.3.4.1. Keramické jádro**



*Obr. 2.3.4.2. Keramické jádro (vložené ve voskovém modelu)*

### **2.3.3 Vytavování voskové hmoty ze skořepin**

Po aplikaci posledního obalu a dokonalém vysušení skořepiny se z ní musí voskový model odstranit. V této části procesu je možnost zjistit existující vady (praskliny) na formě, protože vosk má tendenci detekovat tyto chyby, obzvláště když je používán tmavý vosk, který prosákne skrz formu a zobrazí se jako skvrna na povrchu formy. Základním bodem tohoto procesu je rozdíl mezi menší tepelnou roztažností keramiky a větší tepelnou roztažností vosků. Protože kdybychom keramickou formu jednoduše vložili do pece za účelem vytavení vosku (bod tavení 60 – 90°C), tak by forma popraskala v návaznosti na tyto rozdílné tepelné roztažnosti. Ohřev vosku musí být proto rychlý, aby se zamezilo rozměrové dilataci modelu, která by způsobovala praskání skořepin.

Vytavování voskových modelů lze provést několika způsoby:

- V autoklávu
- Za vysoké teploty – v peci za teploty 900 až 1000°C, tím se spojí vytavení vosku s vypálením skořepiny. Ztráty vosku jsou 10 až 15%; vosková směs je částečně znehodnocována
- Za nízké teploty – vytavování se provádí v roztavené a přehřáté hmotě stejného složení, jako má hmota modelů [2.6]
- Dielektrickým ohřevem – skořepiny se zvlhčí vodou a pak se umístí v poli vysokofrekvenčních oscilací. Vlhká skořepina se rychle ohřeje, vosk se těsně u skořepiny odtaví a vytvoří se dilatační spára, jenž zabrání popraskání skořepiny rozpínajícím se voskovým modelem [2.10]
- Horkým vzduchem – proud horkého vzduchu se zavádí do středu vtoku. Ten se protaví dříve, než se celý model ohřeje, a k odtavování pak dochází z vnitřku

V současnosti se v drtivé většině používá vytavování v autoklávu. Vytavení modelů se provádí tepelným šokem přehřátou párou v zařízení, které se nazývá autokláv nebo bojlerkláv. Protože teplota

páry záleží na jejím tlaku, používají se zařízení, která pracují s tlaky od 0,3 až 0,6 MPa při teplotě páry od 135 do 165°C. Skořepiny jsou v autoklávu umístěny tak, aby z nich vosk mohl volně vytékat. Vytavený vosk se zachycuje ve sběrné nádobě a po regeneraci se znovu používá. Výhodou tohoto způsobu odstraňování modelů jsou menší ztráty na modelovém vosku, menší množství popraskaných skořepin a možnost pracovat s tenčími skořepinami.

### 2.3.4 Vypalování keramických skořepin

Keramické formy je nutno před odléváním vypálit. Výsledné formy jsou pak schopny odolávat velmi vysokým teplotám a při pečlivém výběru skladby keramické břečky a posypového materiálu mohou být používány pro velmi širokou oblast slitin.

Tři základní důvody pro vypalování forem před odléváním:

- Odstranění zbytků voskových materiálů a těkavých látek zbylých po vytavování
- Zhutnění struktury keramiky – dosažení potřebné pevnosti skořepiny
- Předehřátí formy před litím na stanovenou teplotu

Prvním požadavkem je tedy odstranění zbytků vosku po operaci vytavování a odstranění volných těkavých látek. Alkohol je odstraněn při teplotách nižších jak 100°C, ale vodu obsaženou v gelované struktuře křemičitého pojiva nelze při teplotě 100°C kompletně odstranit. Ke kompletnímu odstranění vody je zapotřebí teploty okolo 1000°C.

Dalším důvodem vypalování (žhánění) keramických skořepin je to, že se převede amorfni forma vazné vrstvy SiO<sub>2</sub> na formu krystalickou - zhutnění struktury keramiky[2.9].

Vosky by měly být lepší kvality a neměly by obsahovat více jak 0-1% zbytků popela. Vypalování potřebuje kyslík, a proto je důležité zajistit jeho dostatek ve vypalovacích pecích k odstranění jakéhokoli zuhelnatěného vosku.

Odporové pece mají výhodu v použití účinné ventilace, která je zdrojem volně proudícího vzduchu. Mnohem obtížnější je dosažení požadované úrovně kyslíku u plynových pecí, protože plynový hořák má tendenci volný kyslík pohltit.

Vypalovací atmosféru je potřeba pravidelně kontrolovat, obzvlášť pro odlitky z oceli a vysoce legovaných slitin, protože na povrchu formy je potřeba zabránit reakci kovu se zbytkovým uhlíkem z nedostatečného vypálení vosku. Minimální teplota při vypalování by měla být přes 500°C, avšak výhodnější je zvýšit tuto teplotu na 800°C k zajištění rychlého odstranění zbytků. To je problém u plynových pecí - dodržení přijatelné atmosféry kyslíku při vyšších vypalovacích teplotách. Toto je jedním z důvodů použití dvoufázového vypalovacího procesu; můžeme buď vypálit formu při vysoké teplotě a pak okamžitě odlévat bez ochlazení, nebo můžeme nejprve při nižší teplotě odstranit zbytky, skořepinu ochladit, a znovu ohřát na vyšší teplotu požadovanou pro odlévání. Při druhém vypalování není vyžadována oksyličovací atmosféra a může proběhnout v jednoduché peci [2.1].

Dvojité vypalování s mezi ochlazením má výhodu v možné visuální kontrole. Pro inspekci trhlin a prasklin se používá kapilární barevná metoda. Tyto trhliny mohou zůstat po vytavení vosku neodhalené, avšak po prvním vypálení se mohou „otevřít“, a po odlití mohou způsobit trhliny na odlitku.

Vypalování forem při teplotách 500-800°C není dostačující ke zhutnění struktury keramiky a tím formy nejsou inertní proti roztavenému kovu. Většina sléváren vypaluje formy při teplotách 950-1100°C pro dosažení inertnosti a vysoké stability. Vyšší teploty vypalování okolo 1500°C jsou používány v procesu usměrněného tuhnutí, kde musí roztavený kov po určitou dobu zůstat tekutý.

Speciální slitiny mohou požadovat ještě vyšší teplotu formy, ale použití keramiky na základě křemičitanů je omezeno teplotou okolo 1550°C – která se blíží bodu tavení křemičitanu.

V jiných případech, obzvláště u slitin s nízkým bodem tavení, je maximální teplota vypalování ohraničena hodnotou 850°C, je to v první řadě k omezení zvyšování pevnosti formy při vypalování. Příliš vysoká pevnost skořepiny zde může být příčinou trhlin a prasklin vznikajících při smršťování odlitku.

### **2.3.5 Tavení a odlévání**

Tavení a odlévání kovů je pro výrobu kvalitních přesných odlitků jedním z nejdůležitějších procesů celé technologie. Je to do jisté míry proto, že technologie přesného lití na vytavitelný model se používá pro širokou škálu výrobků a velký výběr slitin.

Odlévá se zpravidla ihned do žhavých skořepin, bezprostředně po vytažení z vypalovací (žíhací) pece. Jak již bylo uvedeno, zmenší se tím teplotní šok při lití, omezí se vznik vnitřních pnutí ve skořepinách a sníží se nebezpečí praskání. Před litím se do žhavých skořepin většinou vkládají keramické filtry předeřáté na teplotu skořepiny.

Ve většině sléváren přesného lití na vytavitelný model se používá elektrických indukčních pecí jádrových či bezjádrových nebo vakuových pecí. Tavení a odlévání slitin s nejvyššími požadavky na kvalitu se provádí ve vakuu. Ve vakuových pecích se odlévají zejména speciální vysokolegované materiály. Malé agregáty s kapacitou několika kilogramů jsou používány pro vysoce kvalitní dentální odlitky a pro odlitky určené pro bižutérii, zatímco větší agregáty jsou používány ve většině sléváren a pro velké objemy.

### **2.3.6 Dokončovací operace**

Dokončovací operace jsou jedny z nejpracnějších operací v technologii lití na vytavitelný model.

Typické pořadí dokončovacích operací je následné:

- Odstranit převážnou část keramické skořepiny, obvykle mechanicky.
- Odstranit odlitky z vtokové soustavy.
- Odstranit zbylou keramiku mechanicky, nebo chemicky.
- Odstranit vtoky z odlitků.
- Tryskání a dokončování

V některých případech bude dokončování obsahovat další operace jako tepelné zpracování, dodatkové obrábění a příprava odlitků pro expedici. Tato kapitola se bude věnovat hlavně výše uvedeným prvním čtyřem bodům. Přesné stanovení pořadí se v různých slévárnách liší, pořadí zde uváděné může být však pokládáno za velmi typické [2.1].

#### Odstraňování keramiky – větší části

Po ztuhnutí kovu je nutno ze stromečku odstranit keramickou vrstvu. Tato operace je někdy poměrně komplikovaná, protože pevnost skořepiny po odlití bývá vysoká. Ve většině případů je keramika odstraňována mechanicky. Účinným způsobem je vibrační oklepávání. Tuto operaci lze označit za nejvíce prašnou a hlučnou ve slévárnách přesného lití na vytavitelný model. V současnosti se proto používá zvukotěsná a prachotěsná kabina, kde je umístěn vibrační stroj či vibrační kladivo. Nově používaným způsobem odstraňování keramické skořepiny je tryskání vysokotlakým paprskem [2.21].

#### Odřezávání odlitků z vtokové soustavy

Ve většině případů jsou odlitky oddělovány z vtokové soustavy kotoučovými nebo třecími pilami. Hliníkové odlitky jsou oddělovány pásovými pilami a někdy též pilami kotoučovými.

- *Kotoučové pily* jsou dvojího druhu, buď je kotouč fixován na stroji, nebo je kotouč upevněn na zvedáku a přibližuje se k odlitku, který je fixován ve svěráku.
- *Třecí (frikční) pily* používají k oddělování teplo vznikající při řezání.

#### Odstranění zbylé keramiky

*Chemické metody* - K odstranění žáropevných zbytků lze použít fluorovodíkové kyseliny, avšak častěji se používá chemické čištění využívající žíravé soli nebo čištění v roztavené formě jako vodní roztok. Odstranění keramiky chemickou metodou se používá až po odstranění většího (prvotního) objemu skořepiny jinou metodou. Je samozřejmě možné odstranit celou skořepinu chemicky, avšak bylo by to nákladově neefektivní.

Existují 2 chemické metody:

- *Lázeň s rozpuštěnou solí* – rozpuštěná sůl je hydroxid sodný, s nebo bez vyrovnávacích aditiv. Sůl je rozpuštěna v ocelové vaně a pracovní teplota lázně je v rozmezí 475 – 600°C. Rozpuštěná sůl dobře odstraní zbytky křemičitanů obsahující keramiku. Doba ponoření odlitek je okolo 20 minut. Po solné lázni jsou odlitky opláchnuty, aby se důkladně odstranil přebytek soli, poté jsou vloženy do neutralizační kyseliny a odstraněny okuje.
- *Horká vodní žíravá lázeň* – tyto lázně operují s alkalickými koncentráty, obvykle s hydroxidem draselným. Pracovní teplota je okolo 80°C a odlitky jsou ponořovány do roztoku na několik hodin k odstranění zbytkového žárovečného materiálu. Po očištění jsou odlitky důkladně oplachovány horkou vodou a následně sušeny. [2.1]

Obě výše uvedené metody jsou schopny odstraňovat i přístupná keramická jádra pod podmínkou, že tato jádra jsou odstranitelná louhováním. Pro obtížnější, nepřístupná jádra, se používá louhovací autokláv. Velký a přerušovaný tlak autoklávu dokáže odstranit většinu složitých jader. Malá koncentrace vodné žíraviny nebo kyseliny fluorovodíkové je úspěšně používána jako louhovací prostředek [2.4].

*Abrazivní metody* – Tyto metody lze rozdělit na dvě odlišné metody, tlakové tryskání a tryskání bez použití vzduchu.

- *Tlakové tryskání* – používá jako média obvykle vzduch nebo vodu, které dopravují velkou rychlostí abrazivo na čistěný povrch
  - *Tryskání s vodním zdrojem* – lze dále rozdělit do dvou skupin: otevřené tryskání vodním paprskem a tryskání vodním paprskem v uzavřené jednotce
    - *Otevřené tryskání* – Tato technika používá k odstranění velké části skořepiny vysokotlaký vodní paprsek. Operátor (vhodně oblečen) otryskává keramiku vysokotlakým vodním paprskem a odebírá postupně velkou část skořepiny. Tato metoda je analogická s metodou odstraňování keramiky pomocí vibračního kladiva.
    - *Uzavřené tryskání* – Používá vysokotlaký vodní paprsek k vytvoření koherentního proudu o vysoké rychlosti, který dopadá na keramiku. Tato technologie byla původně vyvinuta k odstraňování zbytkových materiálů z odlitek. Proces je nyní vylepšený a k odstranění celé keramiky dochází v jedné operaci.



- *Tryskání bez použití vzduchu* – jak název napovídá, stroje pro tuto metodu nepoužívají stlačený vzduch k vrhání abraziva na pracovní povrch. Místo toho jsou abrazivní částice (ocelové broky, keramická drť) vrhány pomocí lopatkového kola.

#### Odstranění vtoků z odlitků – broušení a dokončování

Ve slévárnách přesného lití je k odstraňování vtoků, zbavování se skvrn a čištění a leštění používána široká škála broušicích zařízení. Mezi typické zařízení patří brusky s výkyvným rámem, horizontální, vertikální, zapichovací brusky, a také velký výběr ručních brusek. Jako brusné médium se používá většinou brusných pásů, které nahrazují brusné kotouče.

#### **2.3.7 Kontrola odlitků**

Postupy a požadavky kontroly jsou většinou specifikovány na výkresech a dokumenty dodané zákazníkem. Všeobecně kontrola odlitků zahrnuje kontrolu tvaru a rozměrů spojenou s vizuální kontrolou, která má za úkol kontrolovat kvalitu povrchu a vnější nespojitosti. Základní zkoušky pro zjišťování vlastností materiálu, jako jsou chemické analýzy a mechanické zkoušky, jsou rozšířeny o různé druhy nedestruktivních zkoušek, včetně zkoušek netěsnosti, zkoušek maximálního zatížení, a všech dalších zkoušek, které jsou používány k celkovému vyhodnocení odlitků. Zkoušky se dělí do následujících kategorií:

##### Metody pro rozměrovou kontrolu

Důsledné dodržování rozměrů je nevyhnutelným požadavkem na kvalitu přesných odlitků, dodávaných jako výrobky typu near-net-shape.

Existuje mnoho technik používaných ke kontrole rozměrové přesnosti odlitků. Kontrola se provádí pomocí mikrometrů, ručních či automatických měřidel, souřadnicových měřicích systémů a třírozměrných automatických měřicích systémů.

##### Metody pro zjišťování kvality povrchu

Trhliny a jiné povrchové vady mohou být zjišťovány pomocí velkého počtu metod, jako je vizuální kontrola, chemické leptání, fluorescenční kapilární metoda, zkouška vířivými proudy a magnetická zkouška (která může odhalit vady situované přímo pod povrchem). Všechny tyto metody vyžadují pro platné výsledky čisté a relativně hladké povrchy.

## Metody pro zjišťování vnitřních vad – nedestruktivní metody

Nedestruktivní metody lze systematicky rozdělit na optické, akustické, elektromagnetické, tepelné, radiografické a vzájemně propojené. Slévárenský průmysl používá z velkého počtu technik a alternativ nedestruktivního zkoušení následující metody:

- Vizualní
- Penetrační
- Magnetické
- Vířivé proudy
- Ultrazvukové
- Prozařovací (rentgenové, CT)

Ve slévárnách odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu jsou dominantní metody vizuální, penetrační a rentgenové [2.11].

## **2.4 Využití odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu**

Je pravda, že odlitky komponentů proudových motorů jako jsou lopatky, rozváděcí kola a statorové díly patří ke stěžejním produktům. Metoda vytavitelného modelu však disponuje velmi širokým použitím pro jiné aplikace.

Typické aplikace odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu jsou:

- Letectví
- Automobilový průmysl
- Zbrojní průmysl
- Raketová technika
- Lékařské nástroje
- Implantáty
- Ortopedické produkty
- Jaderná energie
- Hydraul. a pneu. komponenty
- Energetika
- Potravinářství
- Petrochemické zařízení
- Armatury
- Příslušenství lodí
- Části jízdních kol
- Hudební nástroje
- Golfové hole
- Zemědělská technika

Mezi specifické produkty metody vytavitelného modelu lze zařadit odlitky pro stomatologii, chirurgii, bižutérii a umělecké slévárství.

## 2.5 TECHNOLOGIČNOST PŘESNÝCH ODLITKŮ

Skutečná geometrie vyráběných součástí se vždy odlišuje od ideální teoretické geometrie, tj. žádná technologie není schopna dosáhnout absolutní přesnosti. Každý technický rozměr se tak odchyluje od své nominální hodnoty vzhledem k omezeným možnostem výrobních procesů. V sériové výrobě pak vykazují výrobky vždy jisté kolísání rozměrů i kvality. Proto je na výkresech předepisována dovolená nepřesnost formou přípustných úchylek rozměrů (tolerančních polí), tvaru a polohy, a navíc předpisem drsnosti povrchu.

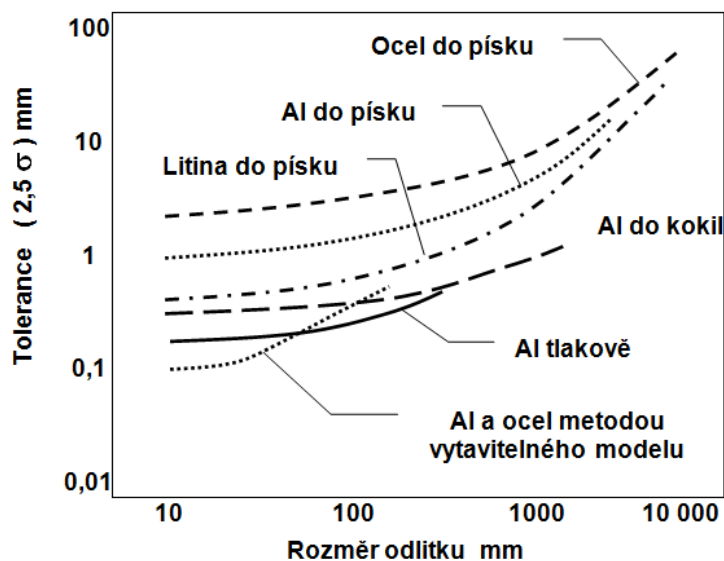
Odlévání nabízí možnost vytvořit téměř jakýkoliv tvar, ale tuto výhodu v některých případech poněkud oslabují výrobní odchylky vyplývající z podstaty slévárenské technologie, které jsou výrazně větší než např. u obrábění. U běžných odlitků tak např. dosahují rozměrové úchyly hodnot uvedených v tab. 2.5.1. Protože rozměrová a tvarová přesnost je jedním z kritických rysů každého odlitku, soustřeďuje se kontrola kvality odlitků vedle hledání vad také na kontrolu jejich rozměrů.

Protože pro odlitky odlévané metodou vytavitelného modelu platí shodná pravidla jako pro ostatní technologie, kde se využívá gravitačního odlévání, bude nutné zopakovat i ta nejdůležitější pravidla zobecněná pro celou slévárenskou technologii.

**Tab. 2.5.1 Orientační hodnoty rozměrových úchylek litinových odlitků v mm dle ČSN EN ISO 8062-3**

Rozměr [mm]	0-25	25-125	125-250	250-500	500-1000	1000-2500
Lití na syrovo	± 1	± 2	± 2,5	± 4	± 6	± 8
Lití do kokil	± 0,4	± 0,8	± 1,0	± 1,5	± 2,5	
Přesné lití	± 0,2	± 0,3	± 0,5	± 1,0		

Zkušenosti s odlitky ukazují, že úchyly tvaru a rozměrů závisí především na použité technologii a na velikosti odlitku (obr. 2.5.1). Dále bývají závislé na typu odlévané slitiny, geometrii odlitku, jakosti modelu nebo trvalé formy a pečlivosti práce ve slévárně. Dosažitelná přesnost každého rozměru přitom závisí i na jeho povaze. [H2]



**Obr. 2.5.1 Závislost průměrné tolerance ( $2,5\sigma$ ) na rozměru odlitku [2.32].**

Podrobné rozborů ukazují, že na odchylkách rozměrů a geometrie odlitků se může podílet kolem třiceti faktorů.

Hlavní zdroje odchylek jsou:

- Chyby modelu (výroba, skladování, opotřebení, poškození)
- Chyby při výrobě jednotlivých částí formy a jejich skládání (kolíky, rámy, lůžka jader, nečistoty mezi dosedacími plochami)
- Nepředvídaný účinek tekutého kovu na formu (deformace formy, deformace a posunutí jader, nedostatečné zatížení formy)
- Neobvyklé smršťování a deformace odlitku při chladnutí (nepřesný odhad smrštění použité slitiny při chladnutí, rozdíly ve smršťování jednotlivých částí odlitku, odpor formy a jader proti smršťování, rozdílný průběh fázových přeměn)
- Dokončovací operace (deformace při uvolňování odlitku, manipulace, čištění, odstraňování povrchových vad)

K dalším zdrojům nepřesností patří např.:

- Pružná deformace modelu při formování
- Deformace formy při vyjímání modelu
- Teplotní dilatace formy a jader
- Uvolnění vnitřních pnutí a fázové přeměny při tepelném zpracování
- Oxidace povrchu při tepelném zpracování
- Drsný povrch znemožňující přesné měření

Vliv některých zdrojů nepřesností je možno potlačovat např.:

- Úpravou modelového zařízení po proměření zkušebních odlitků
- Udržováním technologických podmínek v úzkém rozmezí

Ke zvýšení přesnosti však může přispět i promyšlená konstrukce odlitku. Doporučována jsou zejména následující opatření:

- 1) Malé a rovnoměrné tloušťky, plynulé přechody, symetrické profily, minimální výstupky
- 2) Žebra vyztužující rozsáhlejší plochy a spoje jednotlivých tvarových prvků
- 3) Úsilí, aby plochy, na jejichž vzdálenosti a poloze záleží, byly vytvářeny jedinou částí formy

Podle normy ČSN EN ISO 8062- 3 je stanoveno 16 stupňů tolerancí rozměrů označených CT 1 až CT 16 (tab. 2.5.2). Tolerance nejsou jednoznačně přiřazeny určitým procesům a podmínkám, ale tvoří základ pro dohodu mezi výrobcem a zákazníkem. Informativně je možno slévárenským technologiím přiřazovat stupně přesnosti na základě tab. 2.5.3. Při aplikaci si však musí uživatel uvědomit výše uvedené aspekty ovlivňující přesnost odlitků.

Tab. 2.5.2 Tolerance rozměrů odlitků dle ČSN EN ISO 8062- 3

Základní rozměr hrubého odlitku [mm]		Celková tolerance odlitku [mm] – (mezní úchytky jsou $\pm T/2$ )															
		Stupeň tolerance odlitku CT															
nad	do a včetně	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
-	10	0,09	0,13	0,18	0,26	0,36	0,52	0,74	1,0	1,5	2,0	2,8	4,2	předepisovány individuálně			
10	16	0,10	0,14	0,20	0,28	0,38	0,54	0,78	1,1	1,6	2,2	3,0	4,4				
16	25	0,11	0,15	0,22	0,30	0,42	0,58	0,82	1,2	1,7	2,4	3,2	4,6	6,8	8	10	12
25	40	0,12	0,17	0,24	0,32	0,46	0,64	0,90	1,3	1,8	2,6	3,6	5,0	7	9	11	14
40	63	0,13	0,18	0,26	0,36	0,50	0,70	1,0	1,4	2,0	2,8	4,0	5,6	8	10	12	16
63	100	0,14	0,20	0,28	0,40	0,56	0,78	1,1	1,6	2,2	3,2	4,4	6	9	11	14	18
100	160	0,15	0,22	0,30	0,44	0,62	0,88	1,2	1,8	2,5	3,6	5	7	10	12	16	20
160	250	-	0,24	0,34	0,50	0,70	1,0	1,4	2,0	2,8	4,0	5,6	8	11	14	18	22
250	400	-	-	0,40	0,56	0,78	1,1	1,6	2,2	3,2	4,4	6,2	9	12	16	20	25
400	630	-	-	-	0,64	0,9	1,2	1,8	2,6	3,6	5	7	10	14	18	22	28
630	1000	-	-	-	-	1,0	1,4	2,0	2,8	4	6	8	11	16	20	25	32
1000	1600	-	-	-	-	-	1,6	2,2	3,2	4,6	7	9	13	18	23	29	37
1600	2500	-	-	-	-	-	-	2,6	3,8	5,4	8	10	15	21	26	33	42
2500	4000	-	-	-	-	-	-	-	4,4	6,2	9	12	17	24	30	38	49
4000	6300	-	-	-	-	-	-	-	-	7	10	14	20	28	35	44	56
6300	10000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11	16	23	32	40	50	64

Poznámky:

- Pro tloušťky stěn ve stupních CT1 až CT15 se použije stupeň o jeden vyšší. Jsou-li tedy všeobecné tolerance na výkrese CT10, tolerance tlouštěk bude CT11.
- Není-li stanoveno jinak, musí přesazení odlitků ležet uvnitř tolerancí.

- Není-li stanoveno jinak, musí být toleranční pole rozloženo symetricky kolem základního rozměru.
- Nominální délkou uvažované části na hrubém odlitku se rozumí nejdelší rozměr uvažované části.

**Tab. 2.5.3 Toleranční stupně v běžné výrobě odlitků dle ČSN EN ISO 8062- 3**

Metoda	Výroba	Stupeň tolerance CT				
		Materiál odlitku				
		ocel	litiny	slitiny Cu a Zn	slitiny Al a Mg	slitiny Ni a Co
Lití do písku, ruční formování	velkosériová	11 až 14	11 až 14	10 až 13	9 až 12	11 až 14
Lití do písku, strojní formování a skořepiny	velkosériová	8 až 12	8 až 12	8 až 10	7 až 9	8 až 12
Lití do písku, ruční formování, směsi pojené jílem	kusová a malosériová	13 až 15	13 až 15	13 až 15	11 až 13	13 až 15
Lití do písku, ruční formování, směsi pojené chemicky	kusová a malosériová	12 až 14	11 až 13	10 až 12	10 až 12	12 až 14
Metoda spalitelného modelu		10 - 14	10 - 14			
Metoda vytavitelného modelu		5 - 10				5 - 10
Lití do kovových forem			8 - 12		7 - 11	
Nízkotlaké lití					6 - 10	
Tlakové lití					5 - 10	

Poznámka:

Hodnoty uvedené v tabulce se vztahují na základní rozměry nad 25 mm. Pro menší rozměry může být běžně dodrženo:

- základní rozměr 16 až 25 mm: o jeden stupeň nižší,
- základní rozměr 10 až 16 mm: o 2 stupně nižší,
- základní rozměr pod 10 mm: o 3 stupně nižší.

### 2.5.1 PŘESNOST METODY ODLÉVÁNÍ NA VYTAVITELNÝ MODEL

Technologie lití pomocí vytavitelného modelu umožňuje dosáhnout poměrně složité tvary s dobrou rozměrovou přesností. Odpadá zde totiž několik z uvedených zdrojů nepřesností. Především to je užívání jednodílné formy (bez dělicí roviny). Tak lze splnit jeden z hlavních cílů tohoto způsobu lití, a sice dosažení tvaru a většiny rozměrů v požadovaných tolerancích „na hotovo“ bez potřeby následujícího zpřesňování obráběním. To ale vyžaduje správný odhad všech rozměrových změn v jednotlivých fázích procesu:

matečná forma – voskový model – skořepinová forma – odlitek

Jen tak lze, pokud možno napoprvé, stanovit rozměry matečné formy pro voskové modely, aby vedla ke konečným požadovaným rozměrům odlitku.

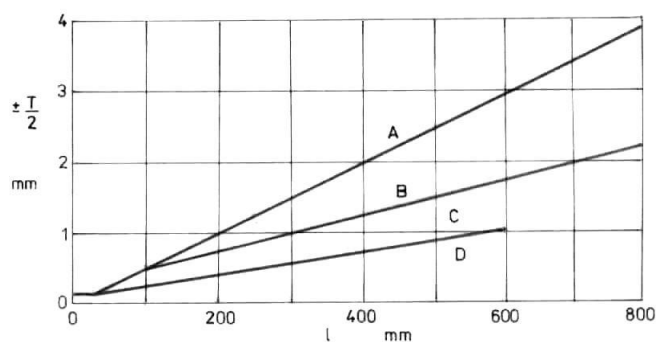
Dosažitelná přesnost rozměrů závisí na velikosti a tvaru odlitku, technologii výroby formy a lití. Z technologických faktorů má vliv:

- teplota vosku
- teplota matečné formy
- vstřikovací tlak při plnění matečné formy voskem
- složení materiálu pro výrobu formy
- teplota vypalování keramické formy
- kolísání vlastností výchozích surovin mezi jednotlivými dávkami
- rychlost chladnutí kovu

Obvyklé tolerance jsou:

- $\pm 0,12$  mm u rozměrů do 25 mm a  $\pm 0,5$  % u rozměrů větších
- Za vhodných podmínek lze však dosáhnout i odchylek menších než  $\pm 0,25$  % jmenovitého rozměru.

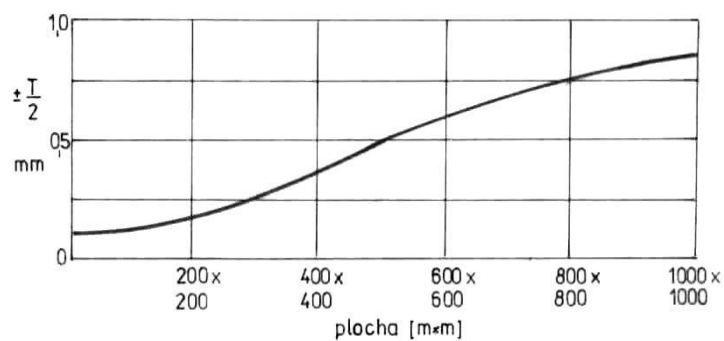




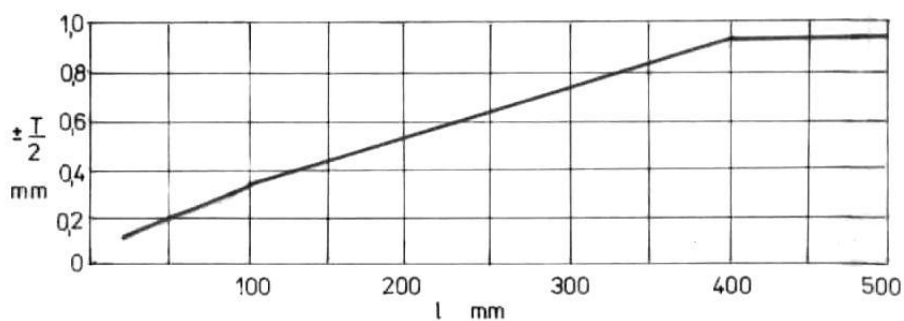
**Obr. 2.5.2 Mezní úchytky přesných odlitků ze slitin Fe, Ni, Cu a Co: A – optimální, B – dosažitelné, C – dosažitelné při lití ve vakuu, D - nutno konzultovat, T – tolerance, L – charakteristický rozměr odlitku [2.23]**

Poznámky k dosahované přesnosti:

- Tloušťka stěn odlitků je ovlivňována deformací stěny keramické formy. Proto její tolerance jsou závislé na velikosti nevyztužené stěny.
- K přesnějšímu dodržování požadovaných tlouštěk se doporučuje vyztužovat rozsáhlejší stěny žebry.



**Obr. 2.5.3 Tolerance T tlouštěk stěn odlitků [2.32]**



**Obr. 2.5.4 Běžně dosahované hodnoty úchyly rovinnosti přesných odlitků-  $T$  – tolerance,  $L$  – charakteristický rozměr odlitku [2.32]**

- Úchyly přímosti a rovinnosti jsou ovlivňovány tvarem a velikostí odlitku i druhem odlévané slitiny. [2.26]
- Rovinnost odlitků je téměř vždy ovlivněna chladnutím vosku a kovu. V teplejších místech se objevují propadliny, které je možno částečně eliminovat pomocí speciálních technik. Obecně se přípustné úchyly nepředepisují, protože se mění v závislosti na tvaru a materiálu odlitku. Zhruba je třeba počítat s propadlinami o hloubce 1 % tloušťky odlitku. Přípustný pokles se přičítá k základní toleranci.
- Dosažení požadované přímosti je u některých odlitků problémem. Někdy se ohne malá tenká část, zatímco dlouhá těžká část zůstane rovná. Na základě zkušeností je možno ohnutí očekávat, ale nelze stanovit, jak bude velké. K potlačení deformace je možno použít výztuhy, ale ty budou bránit mechanickému narovnání, pokud k deformaci dojde. [2.24]
- Velké rovné plochy se doporučuje vylepšit zesílením okrajů, otvory nebo výstupky, které současně přispějí k funkčnosti odlitku.
- Potíže činí odlévání rozsáhlých rovných tenkých ploch. Doporučuje se je opatřovat žebry. Tím se usnadní obalování modelů i plnění formy tekutým kovem a omezí deformace forem i odlitků.
- Úchyly rovnoběžnosti a sklonu závisí na velikosti a vzdálenosti ploch a na konstrukci odlitku. Lze je omezit výztuhami, žebrováním nebo děrováním ploch.
- Mezní úchyly úhlů mezi stěnami jsou  $\pm 15'$  až  $\pm 2^\circ$  podle míry vyztužení jejich spoje.
- Tam, kde je potřeba polohu částí odlitku zpřesnit (vidlice, rozevřené prstence, třmeny apod.), užívají se technologická žebra a příčky, které se po odlití a popř. tepelném zpracování odstraní.
- Další možnost zpřesnění odlitků nabízí jejich dodatečná kalibrace.

- Metoda umožňuje snížit na minimum potřebu obrábění odlitků, což přináší značné úspory především u těžko obrobitelných materiálů a u dílů značně složitých tvarů. [H3]
- Přídavky na obrábění se určují dohodou mezi odběratelem a výrobcem.
- Přídavky pro vrtání bývají 0,25 - 0,30 mm, vystružování do 0,2 mm, broušení 0,1 - 0,2 mm. Soustružení a frézování vyžaduje přídavky 0,25 - 1,0 mm. [2.32]
- Větší přídavky jsou někdy vhodnější, aby nástroj nepracoval pouze v pevné licí kůře.

#### Poznámky k dosahované drsnosti

- Metoda umožňuje dosáhnout velmi kvalitní povrch odlitku s běžnými drsnostmi  $R_a = 6,3$  až  $12,5 \mu\text{m}$ .
- Dodatečné operace mohou povrch odlitku zlepšit tak, že je srovnatelný s výkovkem. [H4]
- Pro dosažení menších drsností:  $R_a = 1,6 - 3,2 \mu\text{m}$  jsou zapotřebí speciální obalové směsi. Při tom však mohou vznikat potíže spojené se zhoršenou prodyšností forem.
- Za zcela mimořádných podmínek byly dosaženy drsnosti dokonce v rozsahu  $R_a = 1 - 1,5 \mu\text{m}$  a u nízkotavitelných slitin pouze  $0,8 \mu\text{m}$ .
- Vzhledem k omezeným možnostem nálitkování malých tepelných uzlů a nemožnosti ovládnutí tuhnutí odlitků chladítky apod. je třeba volit konstrukci odlitku tak, aby zajistila usměrněné tuhnutí směrem k nálitku (vtoku). Je tedy zapotřebí omezovat nahromadění materiálu (naštěstí vylehčování obvykle nečiní žádné potíže a nezvyšuje ani pracnost) a průřezy součástí postupně zvětšovat k místu, kde je možno připojit vtokovou soustavu. Jinak je možno očekávat zhoršení mechanických vlastností a výskyt vnitřních vad. [H3]
- Pro zvýšení hospodárnosti metody je při návrhu odlitku žádoucí zvážit potřebnou složitost formy pro výrobu modelů. Ta by měla při co nejmenším počtu volných částí umožňovat snadné vyjímání modelů bez nebezpečí jejich poškození. Zlepšení přináší např. vhodná orientace výstupků a používání dostatečných úkosů (obr. 2.5.6).

### 2.5.2 PŘÍČINY ODCHYLEK

Podrobný rozbor zdrojů nepřesností odlitků obecně ukazuje dvě skupiny možných odchylek od jmenovitých rozměrů:

Chyby (odchyly) statistické vznikající nevyhnutelnými malými odchylkami proměnných procesů. Způsobují rozptýlení výsledků, obecně s normálním rozdělením okolo střední hodnoty.

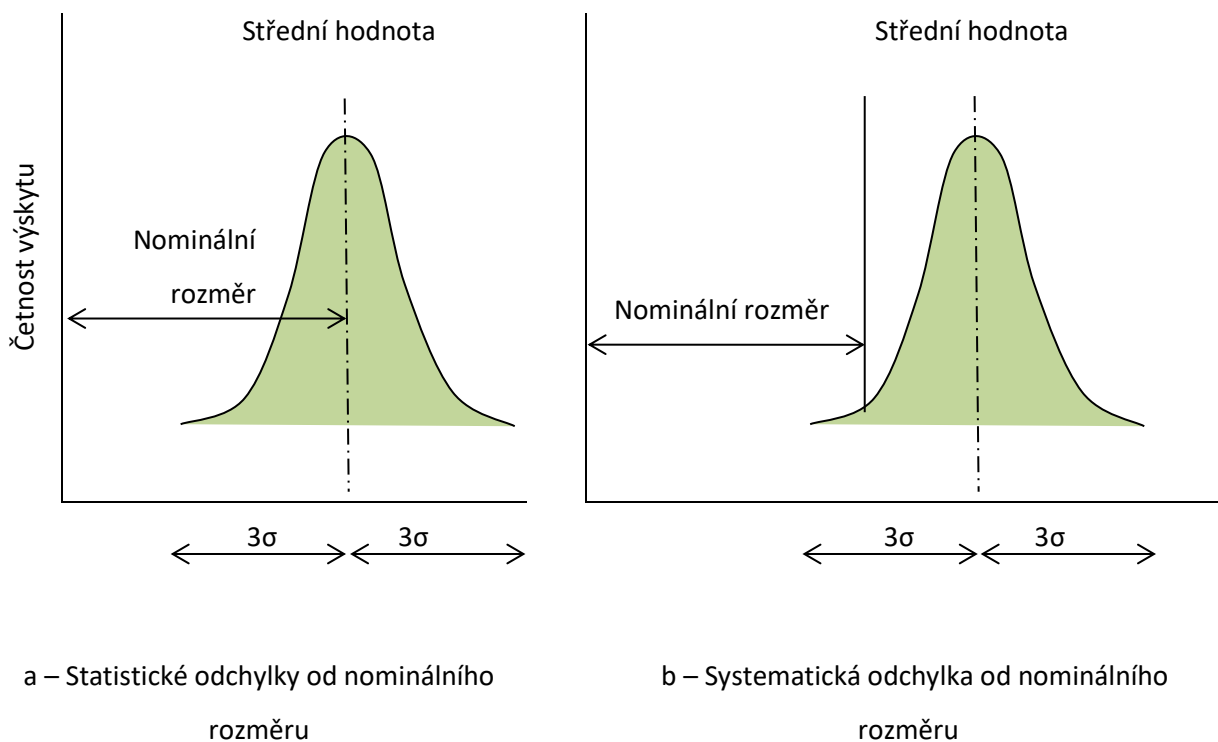
Chyby (odchyly) systematické posouvají střední hodnotu rozdělení od nominální hodnoty.

Každý rozměr odlitku je ovlivňován drobnými nepravidelnostmi výrobních podmínek, což má za následek jeho kolísání kolem určité střední hodnoty, znázorněné při normální frekvenci rozdělení distribuční křivkou. Za předpokladu, že střední hodnota (průměr) je totožný s nominální hodnotou rozměru (Obr. 2.5.5a), určují charakteristiky distribuční křivky dosažitelné tolerance ve výrobě. Tvar této křivky je ovlivňován hlavně operacemi při výrobě formy.

Kromě toho může být střední hodnota navíc posunuta v jednom směru od cílové nominální hodnoty (Obr. 2.5.5b). Hlavní příčinou takovýchto odchylek bývají např. nesprávné rozměry modelu, jeho opotřebení, špatný odhad smrštění určité slitiny nebo odporu formy proti smršťování.

Zkušený slévárenský technik dokáže přibližně odhadnout smrštění kovu u jednotlivých rozměrů, ale pouze proměření reálných odlitků přesně ukáže, jak se chladnoucí kov ve specifickém případě chová. Při lití většího počtu odlitků bývá možno systematické odchylky eliminovat úpravou modelového zařízení po odlití prvních odlitků.

Z toho vyplývá, že předpis povolených úchylek by měl respektovat požadované množství odlitků. Při výrobě jednotlivých kusů se používají širší tolerance, zatímco při výrobě větších sérií existuje možnost přizpůsobit modelové zařízení, a tak kompenzovat nepředvídané odchylky. K malému kolísání rozměrů však bude docházet i po takovéto úpravě.



**Obr. 2.5.5 Podstata kolísání rozměrů ( $\sigma$  – standardní odchylka)**

Na základě zkušeností se rozměrové tolerance odlitků mohou vyjadřovat obecným vztahem [2.27] a [2.32]

$$T = \pm (a + b \cdot x) \quad [\text{mm}]$$

Kde  $x$  je příslušný rozměr,  $a$ ,  $b$  parametry závislé na podmínkách výroby a konstrukci odlitku.

Velikost parametru  $a$  je dána odchylkami způsobenými při výrobě modelu a formy. Její vliv převládá u odchylek malých rozměrů. Pro nejpřesnější slévárenské technologie, jakým je lití metodou vytavitelného modelu a tlakové lití jsou dosažitelné hodnoty  $a \leq 0,1$  mm, u lití do kokil  $a \leq 0,5$  mm, zatímco u běžného lití do pískových forem bývá  $a \geq 1$  mm.

### 2.5.3 PŘÍČINY ODCHYLEK PŘI PŘESNÉM LITÍ

Pro technologii vytavitelného modelu navrhuje [2.27] a [2.32] pro velikost tolerance užívat vztah

$$T = \pm 0,13 + 0,005 \cdot x \quad [\text{mm}]$$

Udávají následující hlavní příčiny rozměrových nepřesností těchto odlitků:

- Nepřesnost vzájemné polohy částí modelu, forem a jader. (Vzhledem k neexistenci dělicí roviny formy u této technologie je tento zdroj nepatrný.)
- Změny tvaru dutiny formy v průběhu procesu. (Deformace skořepin při jejich výrobě i v průběhu lití.)
- Změna tvaru odlitku při chladnutí s následným prohnutím
- Stav povrchu odlitku. Zvýšená drsnost vyžadující opracování

Zdroje rozměrových změn existují prakticky ve všech fázích procesu. V [2.13] [2.2] a [2.3] popisují oblasti příčin změn rozměrů takto:

- Výroba matečné formy: přesnost závisí na použité metodě výroby a kontroly
- Smrštění voskového modelu při chladnutí
- Smrštění skořepiny po vytavení vosku při vysušování pojiva
- Expanze skořepiny při žíhání
- Mírná expanze skořepiny při lití
- Smrštění odlitku při tuhnutí a chladnutí

Znalost rozměrových změn vosku, skořepiny (obalování, vytavování vosku, schnutí, žíhání, působení tlaku tekutého a případně i smršťujícího se kovu) a slitiny je pro dosažení vysoké přesnosti odlitků nezbytná. Nezanedbatelnou roli ale hraje navíc „tvarový faktor“. Jinak se smršťují podélné a příčné rozměry. Smršťování některých rozměrů je brzděno odporem formy nebo ostatními sekcemi

odlitku včetně vtokové soustavy. Pouhý aritmetický součet lineárních (nebo objemových) změn, smršťování/roztahování použitých materiálů (vosk, skořepina, slitina) tak nedává přesnou předpověď výsledných rozměrů. Proto je dosažení úzkých rozměrových tolerancí i u této technologie poměrně složité. [H3]

## **2.5.4 VADY A NEDOSTATKY ODLITKŮ ZPŮSOBENÉ SMRŠŤOVÁNÍM CHLADNOUCÍHO KOVU**

K objemovým změnám dochází u všech typů slévárenských slitin a všech slévárenských technologií. Proto je tato část pojata opět obecněji a na konci kapitoly budou zmíněny specifika technologie lití na vytavitelný model.

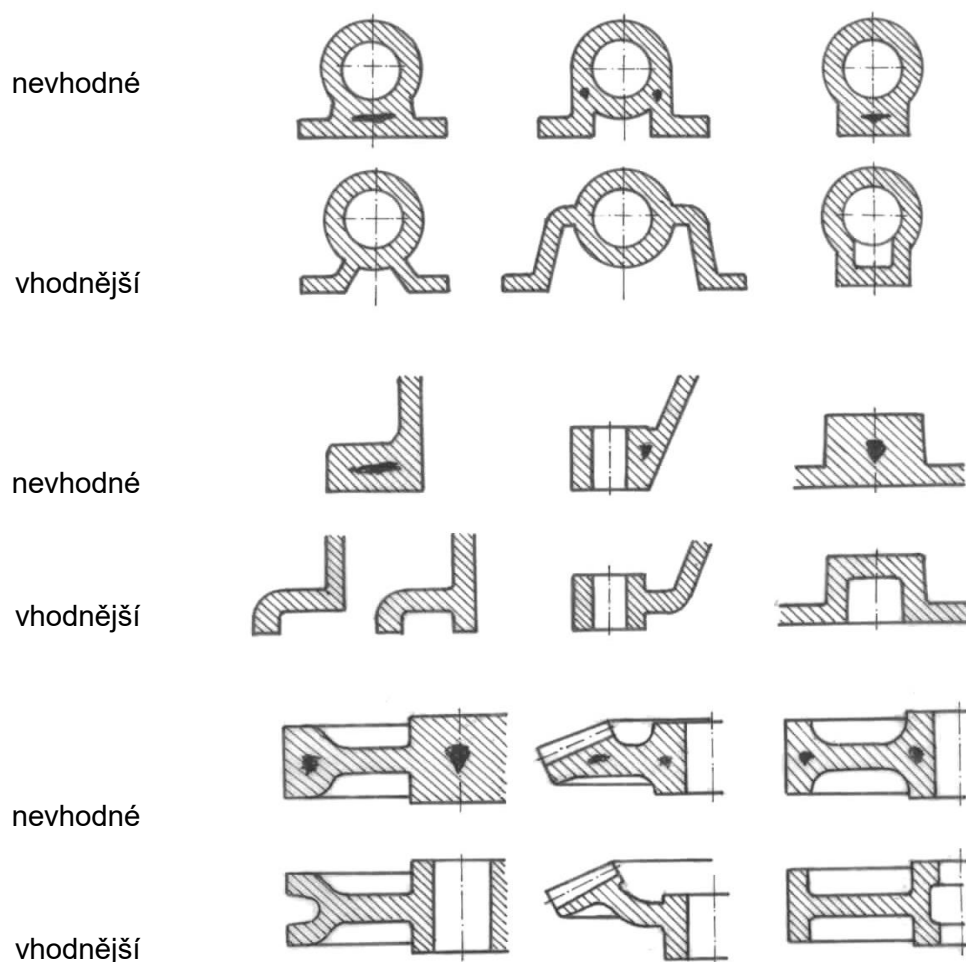
Objemové změny při tuhnutí slévárenských slitin jsou doprovázeny vznikem soustředěných staženin, ředin (shluky nebo řetězce drobných staženin) nebo propadlin na povrchu odlitků. Jejich velikost, charakter a poloha závisí především na typu slitiny a teplotním poli tuhnoucího odlitku. Spolupůsobí i některé další faktory jako např. gravitace, licí teplota, tvar, pevnost, tepelně-fyzikální vlastnosti a objemové změny formy, tlak a proudění kovu, kapilární síly, odměšování apod. Pro zabránění vzniku uvedených vad jsou odlitky opatřovány nálitky, jejichž velikost volí technolog především s ohledem na typ použité slitiny a objem odlitku. Vhodné umístění nálitků se pak určuje podle tvaru a rozměrů odlitku tak, aby mohly dosazovat tekutý kov do celého odlitku během smršťování při tuhnutí. K tomu je potřeba zajistit usměrněné tuhnutí, tj. průřezy odlitku se mají postupně rozšiřovat k místům, kam je možno umístit nálitky. U odlitků malých rozměrů může jako zdroj tekutého kovu pro dosazování sloužit místo nálitků i vtoková soustava.

I když se na první pohled může zdát, že návrh nálitků je ryze technologickou záležitostí, je třeba se otázkou volby materiálu a vhodného tvarování odlitku s ohledem na objemové změny při tuhnutí zabývat již při konstrukci dílu, a to jak z hlediska vytvoření podmínek pro potlačení staženin a ředin, tak i s ohledem na hospodárné využití kovu a snížení pracnosti při dokončovacích úpravách odlitku. Zejména je třeba dbát následujících zásad:

- Volit dle možností přednostně slitiny s malým objemovým smršťováním při tuhnutí.
- Volit pokud možno slitiny s úzkým intervalem tuhnutí, které mají rozsáhlejší oblast působnosti nálitků a nižší sklon ke vzniku porezity způsobené objemovými změnami při tuhnutí zbytku taveniny.
- Minimalizovat tloušťky stěn, místní nahromadění materiálu i celkový objem odlitku (obr. 2.5.6), tj. využívat odlehčení, vhodné profily, výztužná žebra a omezit pokud možno i požadavky na obrábění.

- Omezit konstrukčně počet tepelných uzlů, tj. zesílených částí odlitku, které tuhnou déle než místa sousední (obr. 2.5.7).

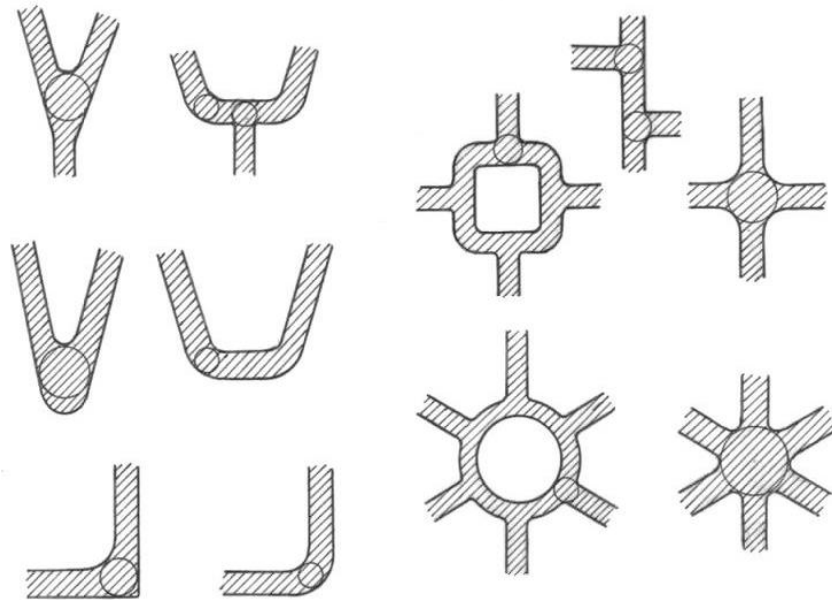
Protože výše uvedená opatření vedle zvýšení nákladů (a často nutnosti ověření na zkušebních odlitcích) přinášejí i rizika výskytu některých vad, bývá vhodné dohodnout se o způsobu ošetření tepelných uzlů se slévárnou. Ta jinak postupuje podle svých zkušeností a u malých tepelných uzlů zpravidla ani žádná opatření neprovádí. Proto musí odběratel upozornit výrobce na taková místa odlitku, kde není přípustná porezita, a dohodnout s ním i otázky použití a odstraňování technologických přídavků.



**Obr. 2.5.6 Zmenšování objemu odlitku a potlačování velikosti tepelných uzlů [2.19] a [2.21]**

Omezit velikost tepelných uzlů, která bývá zjednodušeně posuzována průměrem koule vepsané do příslušného místa odlitku (obr. 2.51). Přesněji lze určovat velikost tepelných uzlů na základě modulů jednotlivých sekcí odlitku, tj. poměru objemu k ochlazovanému povrchu  $M=V/S_{ochl}$ . Tento vztah však neumožňuje stanovit modul nejčastějších tepelných uzlů, kterými jsou spoje a průřezy stěn. Doby tuhnutí jednotlivých částí odlitku přitom bývají zhruba úměrné druhé mocnině průměru vepsané

koule, případně modulu a s dobou tuhnutí roste zpravidla i velikost stažen, které se v těchto místech vytvářejí. Proto už i mírná zesílení vedou k výrazným změnám průběhu tuhnutí a vzniku nežádoucích vad.

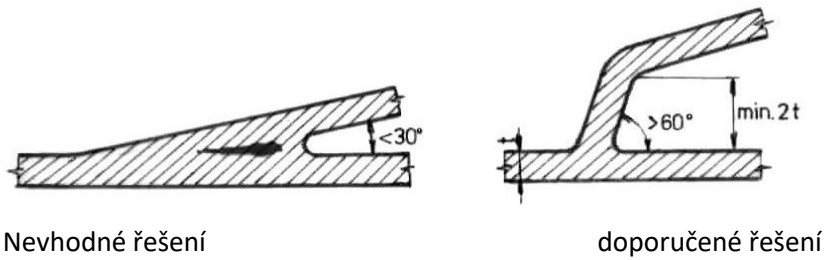


**Obr. 2.5.7 Zmenšování velikosti tepelných uzlů podle průměru vepsaných koulí [2.26]**

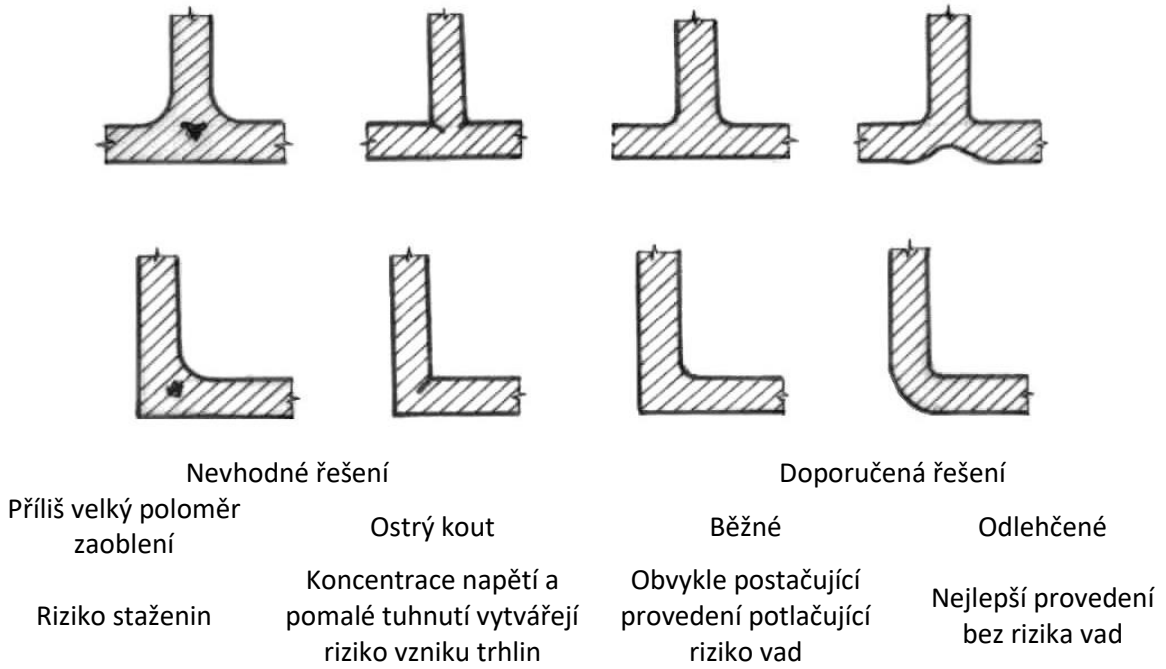
Pro zmenšení velikosti tepelných uzlů se doporučuje zejména:

- Rozložit vhodnou konstrukcí průřezíky tří a více stěn odlitku, kde vznikají těžko nálitkovatelné tepelné uzly (obr. 2.5.7).
- Nespojovat stěny pod ostrými úhly menšími než  $60^\circ$ . V případě potřeby napojení pod menšími úhly se spoje upravují podle obr. 2.5.8.
- Volit co nejmenší poloměry zaoblení v místě styku stěn. S ohledem na potlačení vzniku trhlin a zapečenin jsou však v místě styku stěn určitá zaoblení nezbytná (obr. 2.5.9). Zaoblení koutů jsou žádoucí rovněž s ohledem na pevnost modelu a odlitku i klidné plnění formy. Velké poloměry zaoblení však výrazně prodlužují dobu tuhnutí uzlů a tím i nebezpečí vzniku staženin. Proto jsou optimální řešení těchto míst kompromisem mezi výše zmíněnými požadavky. Pro odlitky ze šedé litiny jsou uvedeny doporučené poloměry zaoblení v průřezích stěn v tab. 2.5.4. Obdobné se užívají i u ostatních odlitků.





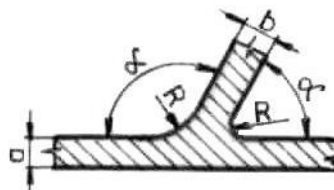
**Obr. 2.5.8 Doporučovaná řešení průsečíků stěn s ostrým úlem styku [2.30]**



**Obr. 2.5.9 Řešení spojů stěn [2.32]**

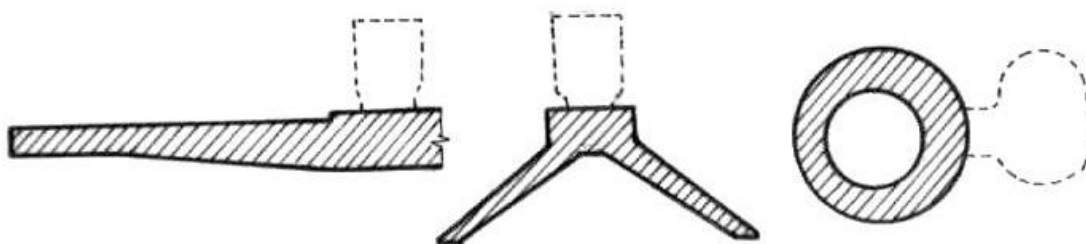
**Tab. 2.5.4 Poloměry vnitřních zaoblení odlitků podle ČSN 01 4909:1955**

Úhel $\alpha$ [°]	Střední tloušťka	Poloměr zaoblení
45 – 90	$s = 0,5 \cdot (a+b)$	$R = 0,5 s$
90 – 120		$R = 1,0 s$
120 – 135		$R = 1,5 s$

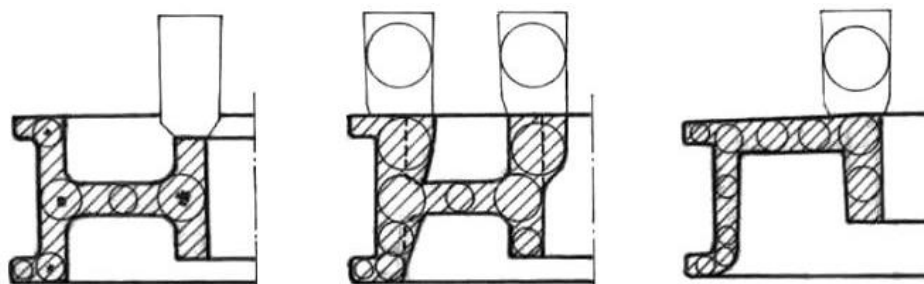


Velikost poloměru se zaokrouhluje na nejbližší vyšší hodnotu normální řady poloměrů:1-2-3-4-5-6-8-10-12-16-20-25-32-40-50 mm. Na jednom odlitku se přitom doporučuje volit poloměry stejné.

- Usilovat o takovou konstrukci odlitku, která umožní usměrněné tuhnutí, tj. od vzdálených míst směrem k nálitkům. Pro splnění této podmínky se mají jednotlivé průřezy odlitku rozšiřovat k místům odlitku, kam je možno umístit nálitky (obr. 2.5.10). U deskovitých odlitků probíhá na kraji tuhnutí rychleji, a proto se v této tzv. koncové zóně odlitek rozšiřovat nemusí. Potřebný úkos, neboli "rychlost rozšiřování průřezu", směrem k nálitkům závisí především na typu slitiny a dále na tvaru a poloze odlitku.
- V jednodušších případech je možno při konstrukci odlitku s ohledem na potlačení vzniku staženin vycházet z pravidla vepsaných koulí, podle kterého se mají koule vepsané do odlitku směrem k nálitku postupně zvětšovat. Ve složitějších případech se vychází ze stanovení modulů jednotlivých částí odlitku, které se obdobně mají směrem k nálitku zvětšovat. Tam, kde tvar odlitku vytažení koule neumožňuje, je třeba průřez stěn zvětšit o technologické přídavky (obr. 2.5.11 a 2.5.12). U metody přesného lití se toto vyskytuje jak u odlitků segmentů, tepelných štítů a statorových kol. Součásti jsou na (obr. 2.5.11 a 2.5.12) připodobněny klasickým odlitkům. Spolehlivost těchto metod se však snižuje s rostoucí složitostí odlitků (např. dutinami, výstupky nebo žebry), a proto způsobuje místní rozdíly v intenzitě odvodu tepla do formy.



**Obr. 2.5.10 Rozšiřování průřezů odlitků pro zajištění usměrněného tuhnutí [2.20]**



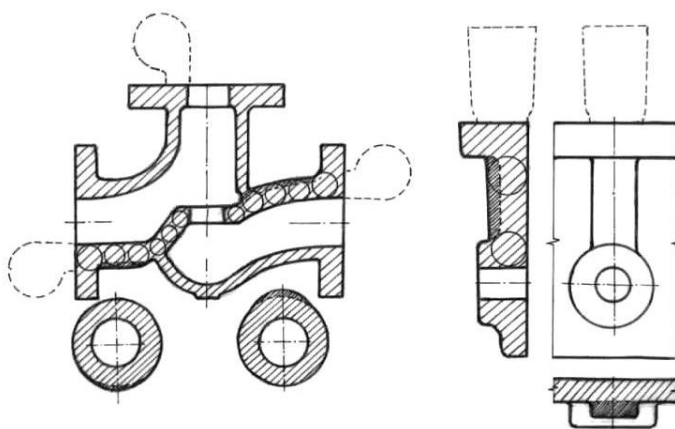
nevhodné řešení (staženiny v průsečících stěn a obtížně odstranitelný nálietek)

potřebná úprava tvaru s ohledem na nálitkování

optimální konstrukce s ohledem na nálitkování

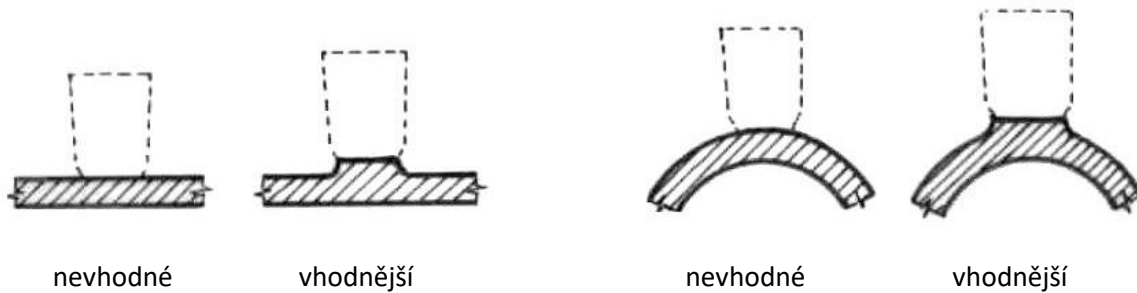
**Obr. 2.5.11 Použití metody vepsaných koulí [2.24]**

- Výhodná je pro hledání optimálního tvaru i složitějších odlitků počítačová simulace tuhnutí, kterou lze zobrazit vývoj teplotního pole v celé formě včetně oblasti očekávaného vzniku staženin a ředin. Na základě jejích výsledků je pak možno upravovat tvar odlitku tak, aby byly zajištěny optimální podmínky pro dosazování kovu z náliťků do všech míst odlitku. V některých případech stačí pro dosažení požadovaného postupu tuhnutí úpravy tvaru a tloušťek stěn, které neovlivní funkci dílu, jindy je třeba změnit celou konstrukci odlitku.



**Obr. 2.5.12 Úpravy tvaru odlitků pro zajištění usměrněného tuhnutí [2.29]**

- Konstrukce odlitku má nabízet i vhodná a snadno přístupná místa pro připojení nálitků. Ty se obtížně usazují např. na šikmých a zakřivených plochách. V místech připojení masivních nálitků na tenké stěny se často tvoří trhliny. Tomu lze předcházet vytvořením dostatečně velkých vodorovných plošek na povrchu odlitku s pozvolným či zaobleným přechodem do stěny odlitku (obr. 2.5.13).



**Obr. 2.5.13 Úpravy tvaru odlitku s ohledem na možnost připojení nálitků [2.24]**

Objemové změny chladnoucího odlitku po ztuhnutí, jejichž příčinou je teplotní roztažnost a případné fázové přeměny slitiny, se projevují nejen změnami všech rozměrů (na které se bere zřetel volbou vhodných přísadků na smrštění při výrobě modelového zařízení), ale i vznikem pnutí, která částečně zůstanou jako pnutí zbytková i ve vychlazeném odlitku. Tam se projevují snížením jeho únosnosti a dále i případnými změnami jeho tvaru během obrábění nebo tepelného zpracování. Dalším průvodním jevem smršťování bývají deformace odlitků (změny tvaru oproti tvaru modelu), v horších případech i vznik trhlin a prasklin.

## 2.5.5 PŘÍČINY VZNIKU PNUTÍ

Nežádoucí projevy smršťování mají dvě základní příčiny, podle nichž jsou klasifikována pnutí v odlitcích:

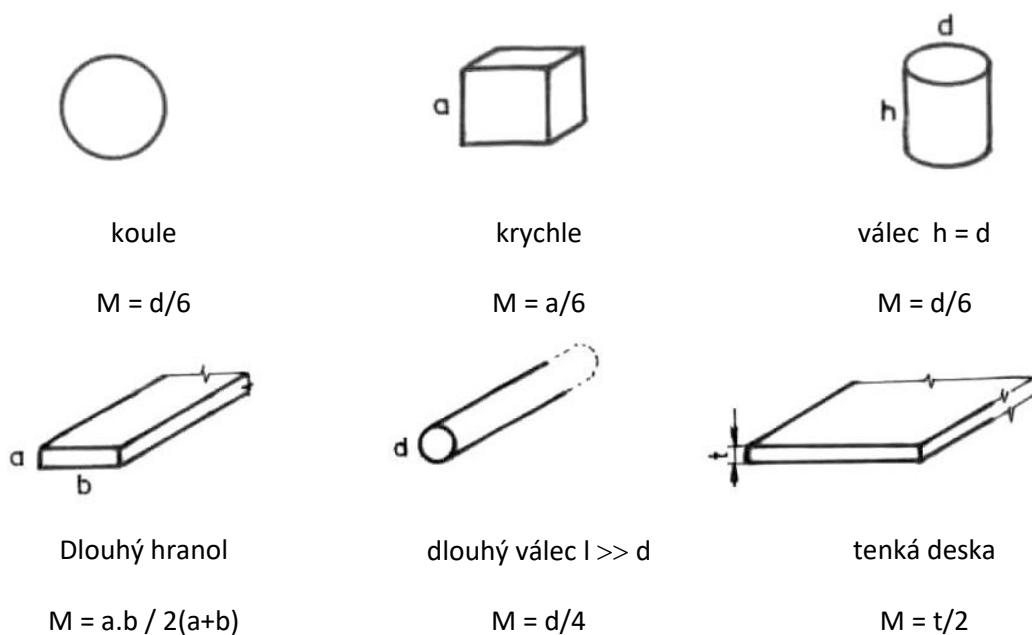
**Vnější pnutí** v odlitcích vzniká účinkem vnějších sil (tlak, gravitace, odstředivá síla apod.). Při tuhnutí a chladnutí odlitků se však jedná především o tlak vyvolaný odporem formy a jader proti smršťování odlitku. Proto se tato pnutí označují též jako smršťovací nebo tepelně mechanická. Jsou zpravidla tahová a zanikají po rozpadnutí jader a uvolnění odlitku z formy. Přestože se jádra i formy pro složité odlitky zpravidla zhotovují z dobře rozpadavých formovacích směsí, je doporučováno vhodnou konstrukcí odlitků odporům proti smršťování předcházet, např. snižováním výšky příčných výstupků a žeber, zejména na dlouhých odlitcích, nebo omezováním tuhosti konstrukce celého odlitku.

Pro potlačení rizika vzniku trhlin vyvolaných odporem proti smršťování je nutné odstranit nebo vhodně zesílit taková místa, kde se při smršťování odlitku vytvářejí špičky napětí. K nejcitlivějším místům s ohledem na vznik trhlin při bržděném smršťování patří kouty v místě styku stěn. Zde je při chladnutí odlitku pomalejší odvod tepla, a tím i nejtenčí tuhá kůra. Navíc tu je možno očekávat i nejvyšší hodnoty tahových pnutí. Proto je nutné kouty ve spojích stěn zaoblovat, ovšem pokud možno tak, aby tu nevznikl tepelný uzel (obr. 2.5.13), kde by se vytvořila staženina.

**Vnitřní pnutí** v odlitcích vznikají vzájemným silovým působením jednotlivých částí odlitku, které se smršťují odlišnou rychlostí. Tato pnutí je možno dále dělit na **teplotní (dilatační)**, způsobená teplotní roztažností a **fázová (transformační)**, jejichž příčinou jsou objemové změny slitiny při fázových přeměnách. [H3]

Velikost teplotních pnutí je závislá na heterogenitě teplotního pole chladnoucího odlitku, jejíž stupeň je možno v určitém okamžiku vyjádřit teplotními gradienty, závislými na fyzikálních vlastnostech materiálu odlitku a formy, součiniteli přestupu tepla mezi odlitkem a formou a konstrukci odlitku, kterou charakterizuje tzv. stupeň neizotermičnosti odlitku vyjadřovaný poměrem modulů dvou na sebe navazujících částí odlitku  $M_j/M_k$ .

Modul je geometrická charakteristika tělesa zachycující vliv jeho tvaru a rozměrů na rychlost chladnutí. U těles jednoduchého tvaru (kde je možno předpokládat konstantní intenzitu odvodu tepla po celém povrchu), jako je např. koule, krychle, válec, deska apod., je modul vyjadřován poměrem objemu k ochlazovanému povrchu  $M = V/S_{\text{ochl}}$  (obr. 2.5.14).



**Obr. 2.5.14 Moduly jednoduchých těles [2.21]**

U složitějších dílů, kde tuhnou jejich jednotlivé části odlišnými rychlostmi, se odlitek rozděluje na vhodná geometricky jednoduchá tělesa, pro která je možno určit jejich moduly  $M_i$  jako poměr objemu k té části povrchu, která je ochlazována formou (nezahrnují se tedy do povrchu plochy, ve kterých byl odlitek rozdělen na dílčí sekce). Jako příklady jsou na obr. 2.5.15 uvedeny výpočty modulů nosníku o průřezu  $I$  a desky s válcovitým výstupkem.

Je-li poměr modulů jednotlivých částí odlitku blízký 1, jedná se o tzv. izotermický odlitek s bezvýznamnými rozdíly rychlostí chladnutí, u něhož (pokud není příliš masivní) bývají teplotní i fázová pnutí nízká. Protože však rychlost chladnutí je nepřímo úměrná druhé mocnině modulu sekce, vyvolávají i poměrně malé rozdíly tloušťek významné rozdíly v průběhu smršťování.

U neizotermického odlitku s výraznými rozdíly modulů vznikají při chladnutí značné teplotní gradienty, a tím i značná vnitřní pnutí. V praxi lze za izotermické odlitky považovat pouze štíhlé tyče, tenké desky konstantní tloušťky a tenkostěnné trubky nebo prstence. (I u nich se však teplotní gradient tvoří, zejména jako důsledek postupu plnění formy.) Všechny odlitky složitějších tvarů mají při chladnutí nezanedbatelné teplotní gradienty, a tedy i sklon ke vzniku vnitřních pnutí, stejně tak jako jednoduché tlustostěnné odlitky, jejichž střed chladne výrazně pomaleji než povrch.

moduly pásnic:

$$M_1 = B \cdot t \cdot L / ((2 \cdot B - b + 2 \cdot t) \cdot L) = B \cdot t / (2 \cdot B - b + 2 \cdot t)$$

modul stojny:

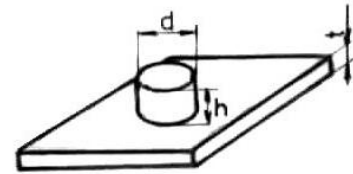
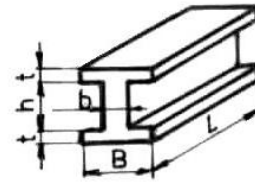
$$M_2 = b \cdot h \cdot L / 2 \cdot h \cdot L = b/2$$

modul stěny:

Ize použit vztah pro tenkou desku:  $M_1 = t/2$

modul výstupku:

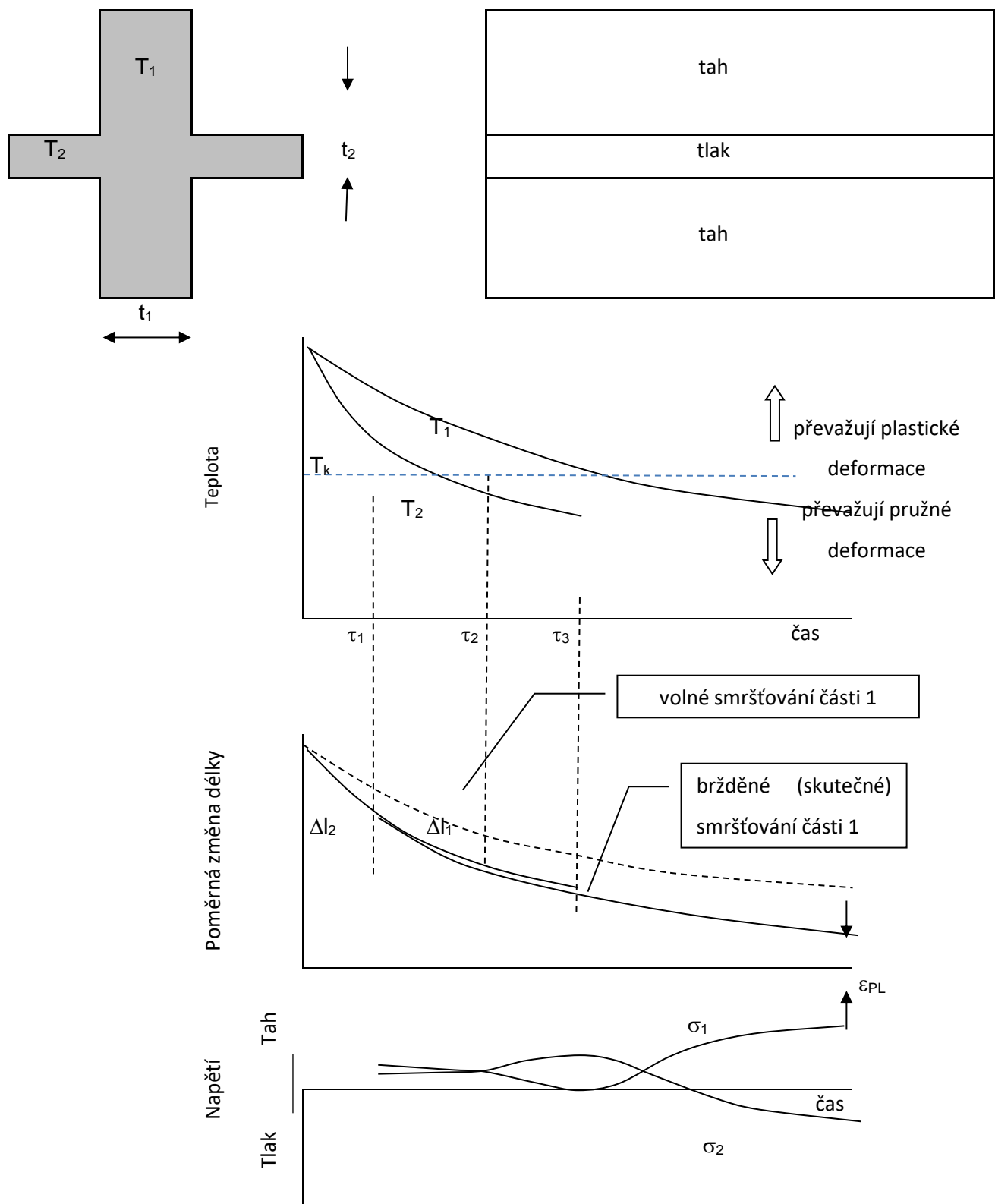
$$M_2 = \pi \cdot d^2 \cdot h / (4 \cdot (\pi \cdot d^2 / 4 + \pi \cdot d \cdot h)) = d \cdot h / (d + 4h)$$



**Obr. 2.5.15 Příklad stanovení modulů částí odlitku**

Zjednodušeně je možno vysvětlit vznik vnitřních pnutí na příkladu odlitku s rozdílnými tloušťkami stěn  $t_1$  a  $t_2$  (obr. 2.5.16). Průběh jeho chladnutí má zhruba exponenciální průběh, ale u silnějších částí je pomalejší než u částí tenčích. Zpočátku se tenčí části chtějí smršťovat rychleji, ale pomaleji se smršťující části jim v tom brání. Za vysokých teplot se však rozdíly ve smršťování vyrovnávají plastickou deformací, takže silnější části se poněkud napěchují a tenčí protáhnou. Pod kritickou teplotou  $T_k$  však již rozdíly ve smršťování vyvolávají pružné deformace, a tím i vnitřní pnutí. Nejprve se to týká tenčích částí.

Od okamžiku  $\tau_1$  se chladnější části chovají jako tuhá tělesa, zatímco teplejší část je ještě poddajná, a proto pokračuje její plastické stlačování bez výrazného nárůstu pnutí. Od okamžiku  $\tau_2$  se pod kritickou teplotu nacházejí všechny části odlitku, a proto se začínají chovat jako tuhá tělesa, v nichž se vztah mezi deformací a napětím řídí Hookovým zákonem. Tenčí části chladnou rychleji a silnější brání jejich smršťování. Proto narůstá ve slabších částech pnutí tahové a v silnějších tlakové. Po vychladnutí tenčích částí v okamžiku  $\tau_3$  však ještě pokračuje smršťování silnějších částí. Proto v nich začnou klesat tlaková pnutí a nakonec se přemění na pnutí tahová, zatímco v tenkých částech tomu bude naopak. Vedle pnutí je výsledkem brzděného smršťování zkrácení silnější části odlitku o hodnotu  $\varepsilon_{PL}$ .



Obr. 2.5.16 Vznik tepelných pnutí v odlitku se symetrickým profilem, kde  $T_1$  a  $T_2$  jsou tloušťky stěn, indexy pro  $l$  a  $\sigma$  jsou vázány na tyto tloušťky [2.32]



Obdobně jako pnutí vnější jsou i vnitřní pnutí úměrná modulu pružnosti a součiniteli teplotní roztažnosti. Zvyšuje je rozdíl teplot mezi silnějšími a tenčími částmi odlitku, který v průběhu chladnutí závisí na poměru druhých mocnin příslušných modulů (resp. tloušťek). Přitom však je snižován teplotní vodivostí slitiny -  $\alpha$ . Proto je možno obecně vyjádřit velikost pnutí funkcí

$$\sigma = E \varepsilon = E \Delta l/l = E \cdot \alpha \cdot \Delta T = E \cdot \alpha \cdot f \left( \frac{M_1^2}{M_2^2}, \frac{1}{a} \right).$$

Síly, které vedou ke vzniku pnutí, mohou také způsobit vznik trhlin, pokud jsou dostatečně velké a působí v kritických místech odlitku. Citlivé na jejich vznik jsou např. náhlé změny průřezu nebo nevhodně provedené styky dvou a více stěn, kde tuhne kov pomaleji a současně vznikají špičky napětí vyvolaného smršťováním.

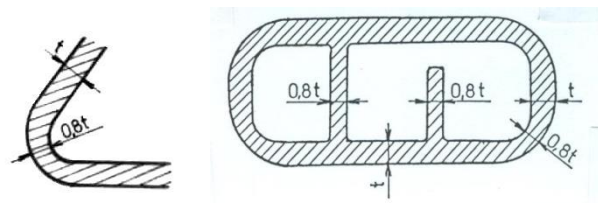
Podobně je tomu i u odlitků s velkým průřezem, kde se projevuje rozdílná rychlost ochlazování vnitřních a vnějších částí. Opět se v pomaleji chladnoucí středové části budou vytvářet tahová napětí a v povrchových částech tlaková, která se již při nízkých teplotách neuvolní plastickou deformací.

## 2.5.6 ZÁSADY KONSTRUKCE S OHLEDEM NA POTLAČENÍ VZNIKU Pnutí PŘI CHLADNUTÍ ODLITKŮ

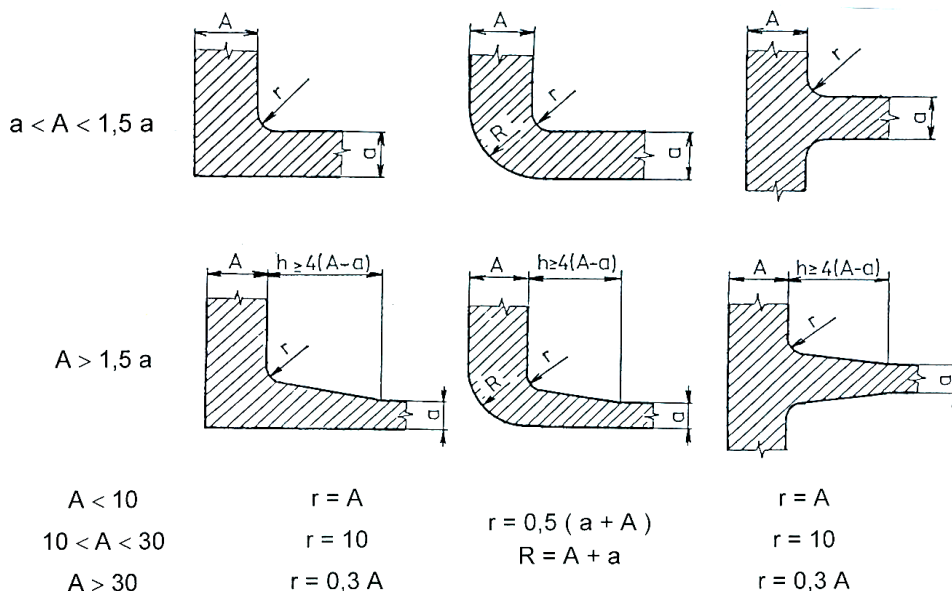
Z uvedeného výčtu podmínek ovlivňujících teplotní pole v chladnoucích odlitcích je patrné, že konstruktér může omezit vznik teplotních i fázových vnitřních pnutí a jejich nepříznivých důsledků následujícími opatřeními:

- Vycházet z potřeby zajištění rovnoměrného chladnutí celého odlitku vhodnou volbou rozměrů jeho jednotlivých částí tak, aby všechny moduly (tloušťky stěn) odlitku byly pokud možno shodné a navíc co možná nejmenší.
- Protože rychlost chladnutí ovlivňuje navíc i vzájemná poloha jednotlivých dílů odlitku, doporučuje se zmenšovat tloušťky (moduly) takových částí odlitku, u nichž je možno očekávat menší intenzitu odvodu tepla, např. kouty, vnitřní žebra a příčky skříňovitých odlitků. Není-li možno užít počítačovou simulaci, je nutné řídit se alespoň podle zde popsaných pravidel (obr. 2.5.17).

**Obr. 2.5.17 Doporučované úpravy tloušťek k vyrovnání rychlosti chladnutí všech částí odlitku [2.44]**



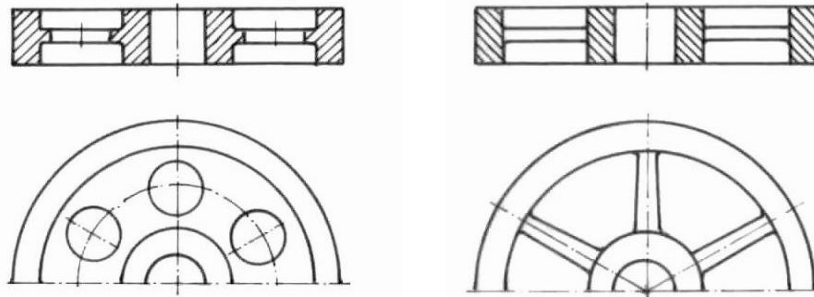
- Velikost vznikajících pnutí mezi takovými částmi odlitku, které mají značně odlišné moduly, je třeba snížit plynulými přechody (obr. 2.5.18). Čím větší je tato přechodová část, tím výraznějšího potlačení vnitřních pnutí je možno dosáhnout. Pro slitiny značně náchylné ke vzniku vnitřních pnutí (ocel, bílé litiny) a trhlin se doporučují na přechodech mezi rozdílnými tloušťkami úkosy min. 1 : 5, pro ostatní slitiny min 1 : 4.



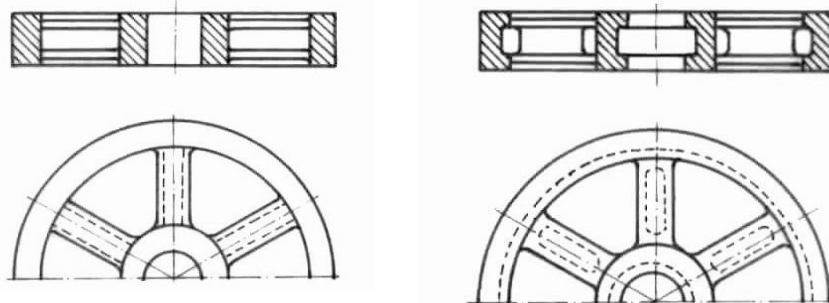
**Obr. 2.5.18 Doporučovaná provedení spojů stěn [2.46]**

- Ke snížení hodnot vznikajících pnutí může přispět poddajnost konstrukce odlitku. Jsou-li jednotlivé části odlitku propojeny tak, že tvoří tuhý rám, je možno očekávat vysokou úroveň vnitřních pnutí mezi částmi odlitku, které chladnou odlišnou rychlostí (např. i v důsledku postupného zaplňování formy). Jsou-li však některé části konstrukce zakřiveny, vyklenuty či vhodně zešíkmeny, pak je tím umožněna zjevná deformace odlitku (zkrivení). Čím více umožňuje konstrukce odlitku tyto deformace, tím nižší pnutí budou v odlitku vznikat (obr. 2.5.19).

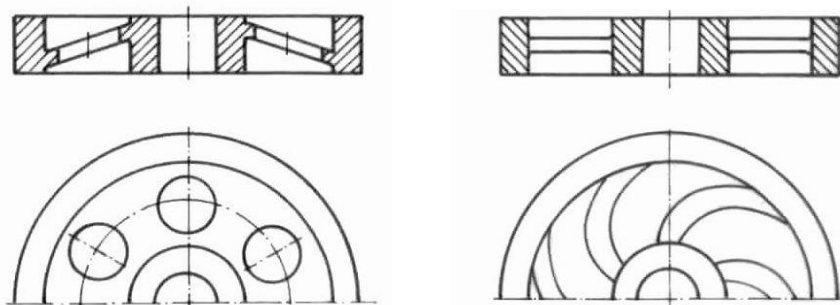
a - nevhodné konstrukce se značnými rozdíly v tloušťkách stěn - mají sklon ke vzniku trhlin



b - vhodnější konstrukce se zmenšenými rozdíly v tloušťkách stěn

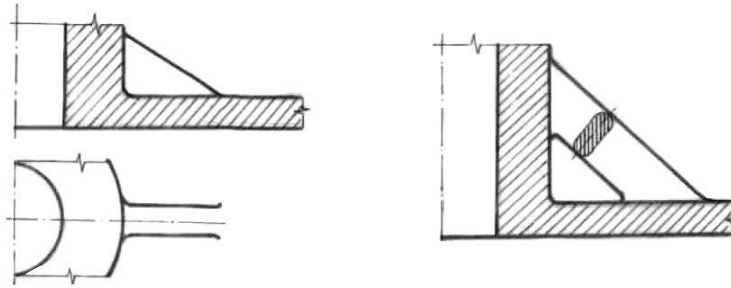


c - vhodnější konstrukce umožňující neškodnou deformaci odlitku



**Obr. 2.5.19 Konstrukce kol s ohledem na vznik vnitřních pnutí [2.45]**

- K zesílení míst, v nichž je možno očekávat vznik trhlin, jakými jsou např. spoje stěn, se doporučuje užívat výztužná žebra (obr. 2.5.20). Tato žebra mají mít menší tloušťku než stěny, které spojují, aby tuhla rychleji a nadměrně neprodužovala dobu tuhnutí v místě připojení. Výjimečně se používají i žebra odlehčená, jejich výroba je ovšem složitější. O ponechání, či případném odstranění těchto žebor po vychladnutí odlitku se musí dohodnout výrobce s odběratelem odlitků.



**Obr. 2.5.20** Použití výztužných žebor [2.47,2.31]

Složité díly, u nichž není možno splnit některé výše uvedené požadavky, je vhodnější rozdělit na několik jednodušších částí, které se odlijí samostatně a dodatečně spojí.

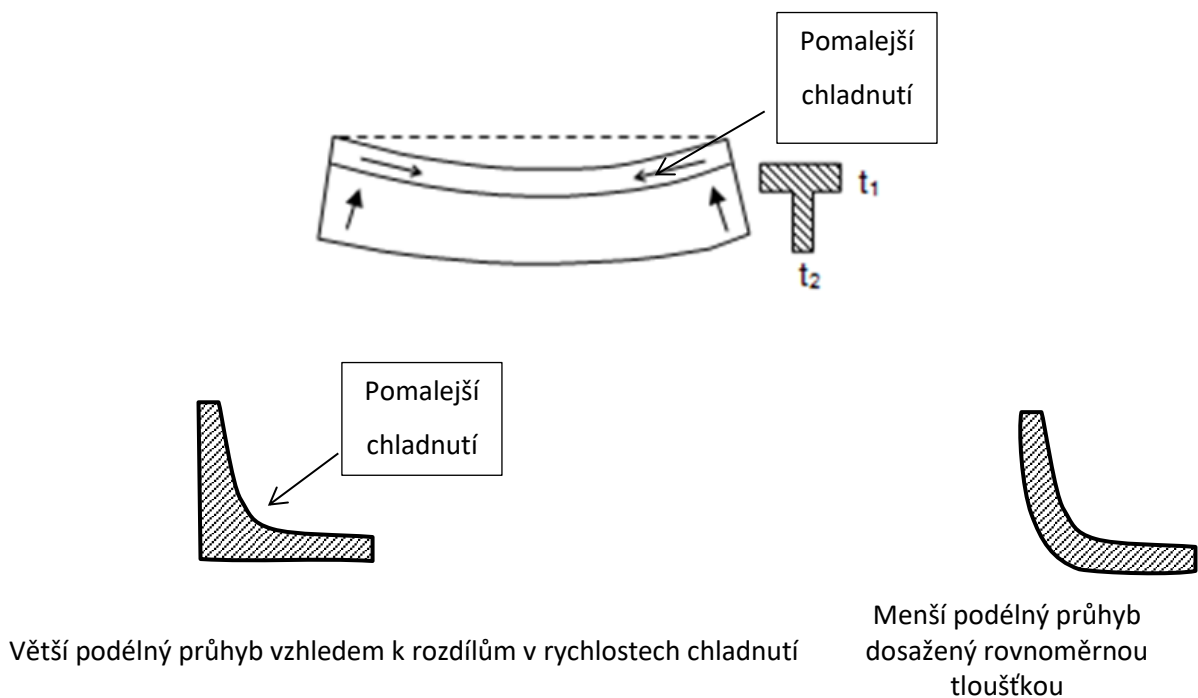
Dodržováním uvedených zásad je možno omezit velikost pnutí vznikajících při chladnutí odlitků na bezpečnou míru, která zabrání především vzniku trhlin a prasklin. Případným žháním je pak možno zbytková pnutí z odlitku prakticky zcela odstranit. Toto tepelné zpracování bývá nezbytné zejména u silnostěnných odlitků, kde vzhledem k rozdílné rychlosti smršťování na povrchu a uvnitř odlitku nelze vzniku pnutí nikdy zabránit.

## 2.6 PŘÍČINY DEFORMACÍ ODLITKŮ

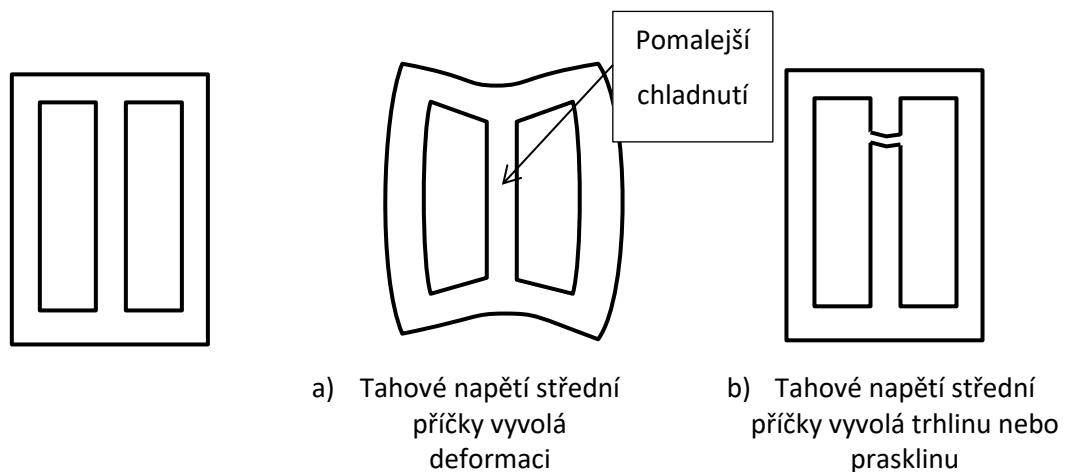
Kdyby se celý objem odlitku ochlazoval stejnou rychlostí a jeho smršťování nebránila forma, tak by po vychladnutí měl oproti modelu menší rozměry, ale zachoval by si svůj tvar. Ve skutečnosti se však při chladnutí odlitku změní i jeho tvar, a to někdy velmi výrazně. Podobně jako v případě pnutí jsou deformace (zborcení) chladnoucích odlitků způsobeny rozdílnými průběhy chladnutí a smršťování různých částí odlitku (včetně vtoku a náliček), nebo odporem nepoddajných částí formy proti přirozenému smršťování kovu.

### 2.6.1 DEFORMACE ZPŮSOBENÉ ROZDÍLNÝMI RYCHLOSTMI CHLADNUTÍ

Nejčastější příčinou deformací odlitků je nerovnoměrné chladnutí jednotlivých sekcí při jejich nesouměrném rozložení vzhledem k podélné ose odlitku nebo ztráta stability dlouhých odlitků s malými momenty setrvačnosti příčného průřezu ( $I_x$ ,  $I_y$ ). V případě odlitku s rozdílnými tloušťkami a asymetrickým profilem, např. T na obr. 2.6.1, vyvolává rozdílný průběh ochlazování a smršťování podélný průhyb. K deformaci dochází proto, že tenká část chladne a smršťuje se podstatně rychleji než silná část. Směr průhybu naznačuje, že jej způsobilo smršťování sekce, která chladla pomaleji. Podobně je možné očekávat větší deformaci u nosníku průřezu L v případě nahromadění materiálu v jednostranně zesíleném koutu (obr. 2.6.2).



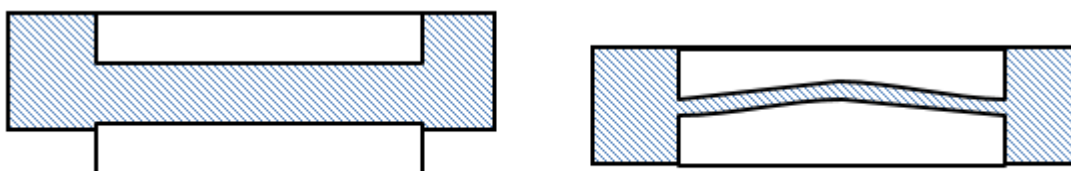
**Obr. 2.6.1 Příklad deformace nesymetrického odlitku a vliv průřezu nosníku L na jeho deformaci [2.32]**



**Obr. 2.6.2 Příklad možných důsledků smršťování odlitku s rovnoměrnou tloušťkou stěn [2.44]**

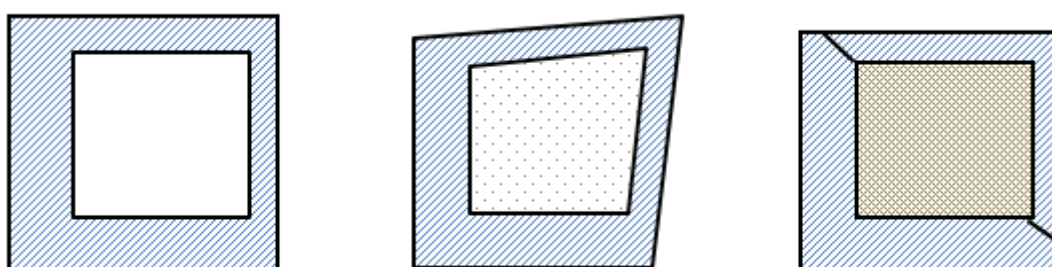
Známým příkladem je chování odlitku na obr. 2.6.3. Jeho vnitřní příčka chladne pomaleji než příčky krajní (a to i při stejné tloušťce vzhledem k omezené možnosti odvodu tepla). Vnější příčky chladnou rychleji a zpočátku stlačují teplejší a poddajnější střední příčku. Ke konci chladnutí vnějších příček se projeví opožděné smršťování střední příčky. To je však brzděno příčkami krajními, které jsou v této fázi chladnější, a proto tužší a pevnější. Ve střední příčce proto vzrůstá tahové napětí. Výsledkem proto bude deformace odlitku nebo jeho porušení v místě, kde tuhnul pomaleji.

Známým problémem je deformace deskovitých odlitků vyztužených nadměrně masívními žebry nebo silnými okraji (obr. 2.6.4), kde pomaleji tuhnutí sekce způsobují vyboulení.



**Obr. 2.6.3 Schéma deformace odlitku s příliš silným okrajem [2.32]**

Na obr. 2.6.5 je schematicky znázorněna deformace skříňovitého profilu způsobená rozdíly v tloušťce stěn. Pokud rozdílné rychlosti chlazenutí nepovedou ke vzniku trhlin nebo prasklin, způsobí odchýlení od čtvercovitého tvaru. Tuhé jádro zde napomůže udržet požadovaný tvar, ale zvýší riziko porušení souvislosti odlitku.



Deformace odlitku  
s rozpadavým jádrem

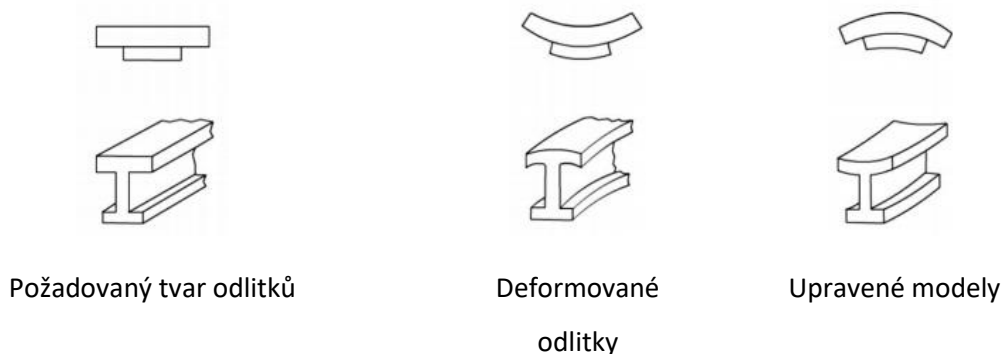
Porušení odlitku s tuhým  
jádrom

**Obr. 2.6.5 Důsledky nerovnoměrného smršťování [2.49]**

K eliminaci úchylek tvaru jsou v takovýchto případech doporučována následující opatření:

- Zmenšení větší tloušťky s případným zvětšením příčných rozměrů profilu k zajištění požadované tuhosti nebo pevnosti
- Chlazení silnější části profilu chladítky
- Zvětšení menší tloušťky a případné dosažení požadovaného profilu obráběním
- Odlehčení silnější části profilu jádry
- Použití modelu prohnutého na opačnou stranu než je očekávaná deformace (obr. 2.6.6)
- Vyrovnání odlitku kalibrací

Pokřivení odlitku může být také vyvoláno nebo eliminováno vtokovou soustavou. Pokud je např. použit silný dlouhý přímý rozváděcí kanálek se zářezy napojenými podél celé délky tenkostěnného odlitku k zajištění rovnoměrného plnění dutiny formy, tuhne odlitek rychleji než tento kanálek (má větší průřez, průtokem kovu se ohřeje forma v jeho okolí, kov tvořící odlitek se dlouhou cestou ochladil). Tento problém může vyřešit např. použití dvou tenčích a kratších rozváděcích kanálků místo jednoho dlouhého s velkým průřezem.

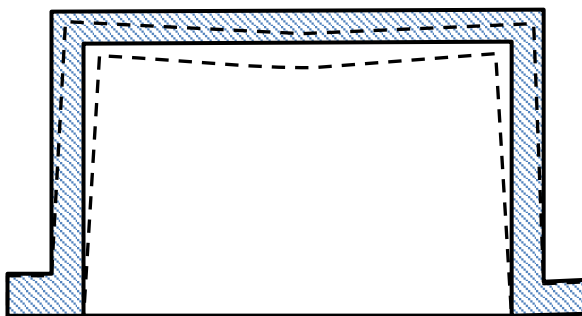


**Obr. 2.6.6 Úpravy modelu pro dosažení požadovaného tvaru odlitku [2.43]**

Vtoky a nálitky mohou ovlivnit deformace i dalším způsobem. Ovlivňují totiž proudění kovu při plnění formy, a tím se podílejí na usměrňování tuhnutí a průběhu smršťování kovu. U přesných odlitků bylo např. zjištěno, že kruhové otvory se stávají mírně eliptickými v závislosti na jejich poloze vzhledem zaústění zářezu.

## 2.6.2 DEFORMACE ZPŮSOBENÉ ODPOREM FORMY

Pokud by tenkostěnný odlitek po ztuhnutí nechladi ve formě ale ve volném prostoru, neměnil by se přitom jeho tvar, ale pouze rozměry. Ve skutečnosti však smršťování odlitku brání odpor formy a jader. Odpory proti smršťování působí různě na jednotlivé části odlitku. Příkladem vlivu odporu může být změna tvaru skříňovitých odlitků (obr. 2.6.7).



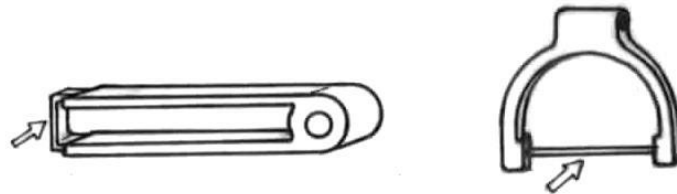
**Obr. 2.6.7 Schéma deformace otevřeného skříňovitého odlitku vyvolané odporem formy [2.36],**

Boční stěny kladou smršťování značný odpor, a proto je smrštění v oblasti spodní příruby výrazně menší, než teoretická hodnota smrštění dané slitiny. Výsledkem nerovnoměrného odporu proti smrštění jednotlivých sekcí odlitku je zešíkmení bočních stěn a průhyb horní vodorovné plochy.

Deformace způsobené odporem formy proti smršťování není možno u složitějších odlitků nikdy zcela potlačit. Omezit je lze např. použitím dobře rozpadavé formovací směsi, dutých jader, prázdných

dutin ve formě a zejména volbou takového tvaru odlitku, jehož smršťování forma brání co nejméně. Nevýhodné jsou z tohoto hlediska především nesymetrické otevřené tvary odlitků, jako např. neuzavřené prstence (podkovy) nebo vidlice, odlitky s vyššími výstupky nebo žebry orientovanými kolmo na podélnou osu a odlitky s prohnutou osou (např. ve tvaru U a S). U odlitku s průřezem U dochází např. k rozevírání jeho bočních ramen. Jednou z možností, jak dosáhnout rovnoběžnosti ramen, je prohnout model na opačnou stranu proti předpokládané deformaci – v případě U udělat sbíhající se ramena, která se při smršťování odlitku vyrovnají. [H3]

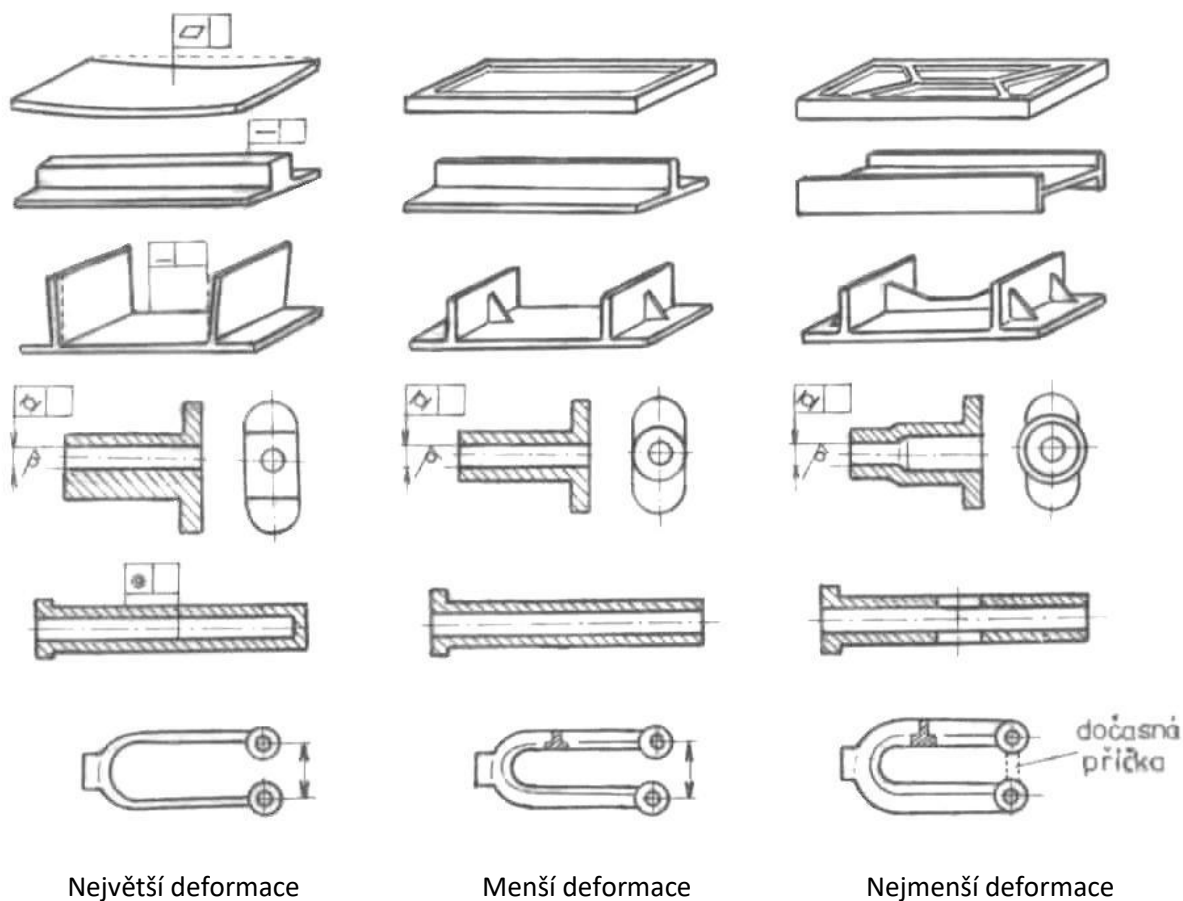
Předcházení je možné pomocí technologických výztužných žeber, nebo (vazných) příček (spojek), které se po odlití před obráběním odstraní (obr. 2.6.8), případně úpravou konstrukce na tvar uzavřený (O). Protože příčky jsou součástí modelu, zpevňují nejen odlitek, ale i samotný model. Výztužná žebra je nutné navrhovat s rozvahou. Pokud tuhnou podstatně dříve než spojované prvky, mohou spíše podpořit než potlačit deformace nebo vznik trhlin.



**Obr. 2.6.8 Příklady potlačení deformace odlitku dočasnými příčkami [2.23]**

Pro udržení přesnosti rozměrů voskových modelů při chladnutí po vyjmutí z formy se také užívají kovové distanční rozpěrky, vhodné přípravky a závaží.










**Obr. 2.6.9 Příkladů úprav konstrukce k eliminaci deformací odlitků [2.30]**

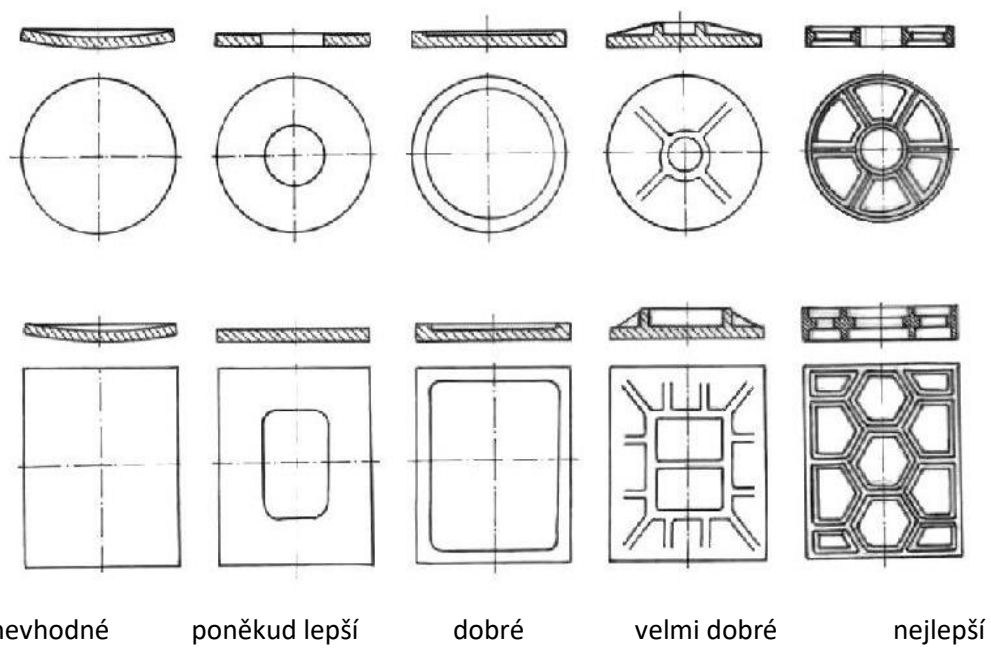
Obecně se vzniku deformací odlitků doporučuje předcházet dodržováním následujících zásad:

- Usilovat o dodržování jednotné tloušťky stěn odlitku, s výjimkou vnitřních stěn a žeber, které by měly být poněkud zeslabeny k vyrovnání rychlosti chladnutí všech částí odlitku.
- Dávat přednost průřezům souměrným podle dvou navzájem kolmých os jako: I, X, H, O, □, u nichž rozdílný průběh smršťování v jednotlivých místech profilu nevytváří ohybový moment (Tab. 2.6.1), zatímco nevhodné jsou např. profily: T, E, L, U.
- U protáhlých odlitků (nebo jejich částí) volit takové příčné průřezy, které mají co nejvyšší momenty setrvačnosti v obou směrech kolmých na podélnou osu odlitku (O, □, H).
- Deformace desek konstantní tloušťky způsobuje vedle nerovnoměrného plnění rychlejší chladnutí jejich okrajů. Někdy postačuje k vyrovnání rychlosti chladnutí vytvoření odlehčujícího otvoru. Spolehlivější je opatřit ploché odlitky (desky, víka, kotouče, kola apod.) zesíleným okrajem, vhodným žebrováním nebo profilem s dostatečně vysokým momentem setrvačnosti ve směru kolmém na předpokládanou deformaci, tj. podélné osy odlitku.

- U dutých tenkostěnných odlitků se doporučuje umožnit dostatečně velkými otvory na protilehlých stranách a pokud možno i na bocích odlitku přesné a pevné uložení jader. Jejich průhyb nebo posunutí způsobuje změny tloušťky stěny odlitku, nesymetrický průběh smršťování, a tedy často i deformaci celého odlitku.

**Tab. 2.6.1** *Vhodnost profilů odlitků s ohledem na deformace a pnutí [2.32]*

Charakteristika profilu	Doporučení	Příklady profilů
Profily málo brzdící smršťování, nenáchylné ke vzniku vnitřních pnutí ani k deformacím	vhodné	
Profily brzdící smršťování, ale málo náchylné ke vzniku vnitřních pnutí a deformací	vhodné	
Profily náchylné k deformacím	méně vhodné	
Profily se sklonem k vnitřním pnutím	málo vhodné	
Profily náchylné k deformacím i vzniku vnitřních pnutí	nejméně vhodné	



**Obr. 2.6.10 Konstrukce odlitků s ohledem na omezení deformací [2.40]**

## 2.7 ZÁSADY KONSTRUKCE PŘESNÝCH ODLITKŮ

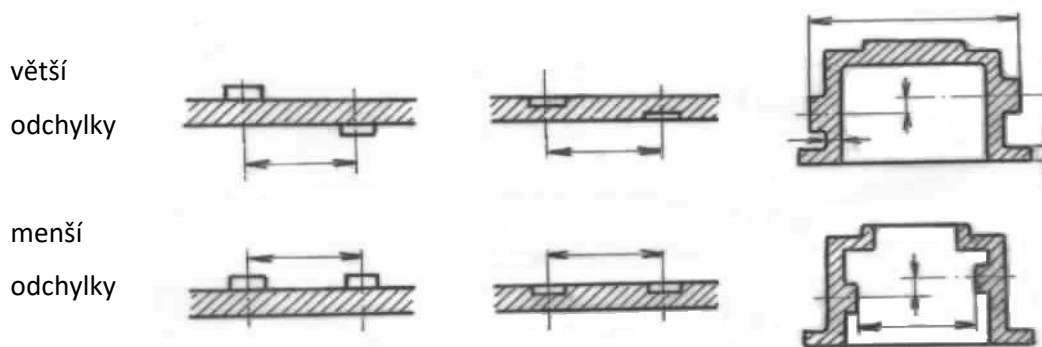
Zvyšování přesnosti odlitků přináší hlavně úspory materiálu a objemu dokončovacích operací, ale často i zlepšení funkce výrobků. Vysoká přesnost je dosahována především při lití do keramických a kovových forem, ale i při klasickém způsobu výroby odlitků existují možnosti k jejímu zvyšování.

Protože řada významných zdrojů odchylek rozměrů souvisí s konstrukcí odlitku a navrženou slitinou, je třeba požadavek přesnosti přizpůsobit i této skutečnosti. Konstruktor či odběratel by měl počítat s tím, že rozměrové a tvarové úchytky jsou větší v případě:

- větších rozměrů nebo složitých tvarů,
  - rozdílných tloušťek stěn (jednotné tloušťky stěn přispívají k zajištění homogenní struktury, rovnoměrnému smršťování a nižší úrovni vnitřních pnutí),
  - odlitků s nízkou tuhostí ve směru sil, které vyvolává nerovnoměrné smršťování a odpor formy a jader proti smršťování,
  - odlitků s nerovinnou dělicí plochou u matečních forem,
  - odlitků s malými úkosy bránícími vyjímání modelu,
  - odlitků s dlouhými nebo složitými dutinami,
  - odlitků, jejichž vnější povrch a dutiny je třeba vytvářet vyšším počtem jader,
  - odlitků vyžadujících vysoký počet nálitků nebo složitou vtokovou soustavu (brzdí smršťování),
  - užití slitin s větší hodnotou lineárního smrštění,
  - užití slitin (nebo požadavku vlastností) vyžadujících tepelné zpracování.
- Obtížně se např. zajišťuje požadovaná přímost nesymetrických profilů a profilů s rozdílnými tloušťkami stěn, rovinnost tenkých desek bez výztužných žeber, kruhovitost otvorů, jejichž okraje chladnou rozdílnými rychlostmi, přesná vzdálenost nedostatečně tuhých výstupků (s ohledem na odpor formy proti smršťování), tvar a poloha protáhlých nebo neprůchozích dutin, pro jejichž vytvoření není možné pevně usadit jádra apod.

Dále je třeba v požadavcích na přesnost respektovat i dělení matečné formy a potřebu používání jader. Vzájemná poloha jednotlivých ploch odlitku je nejpřesnější, jsou-li vytvářeny stejnou částí formy. V opačném případě je nutné počítat s tím, že se budou sčítat nepřesnosti jednotlivých jejich dílů s nepřesnostmi při jejich skládání (Obr. 2.7.1).

Z výše uvedených důvodů je doporučováno předepisovat specifické tolerance pro každý rozměr odlitku a vyhýbat se jednotným (zejména úzkým) tolerancím všech rozměrů.



**Obr. 2.7.1 Vliv dělení formy na dosažitelnou přesnost rozměrů odlitků [2.20]**

Pro odlitky odlévané metodou vytavitelného modelu však platí z uvedeného výčtu pouze zvýrazněné zásady.

## 2.8 PROBLEMATIKA PŘESNOSTI LOPATEK

Turbínové lopatky jsou kritickými součástmi leteckých motorů. Vzhledem k významnému vlivu jejich tvaru a rozměrů na funkci motorů jsou při jejich výrobě požadovány úzké rozměrové a geometrické tolerance. Proto jsou vyráběny metodou vytavitelného modelu, která je užívána pro výrobu odlitků složitého tvaru načisto o vysoké kvalitě. Na počátku tohoto procesu stojí návrh a výroba složité a přesné formy na voskové modely – matečné formy. Určení jejich rozměrů je nejdůležitějším krokem pro získání odlitků s vyhovující přesností. [H4]

Vzhledem k teplotní roztažnosti vosku, keramické formy a slitiny jsou odlitky poněkud menší než dutina v matečné formě. Hlavní zdroje změn rozměrů jsou následující:

- 1) Smrštění voskového modelu při chladnutí
- 2) Objemové změny skořepiny při sušení, vypalování a plnění tekutým kovem
- 3) Smrštění kovu při chladnutí odlitku

Podle zkušeností je zásadní smrštění vosku a smrštění slitiny.

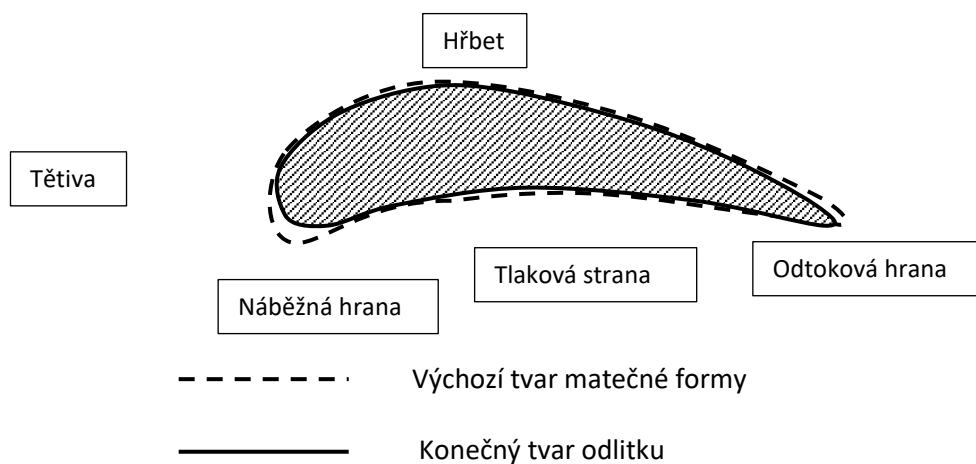
I když zmíněné objemové změny jsou ve své podstatě jednoduché, složitější geometrie odlitků často neumožňuje nalézt dostatečně přesné řešení. Tradiční metody návrhu matečných forem předpokládají konstantní hodnotu poměrného smrštění pro všechny rozměry, označovanou jako „smršťovací faktor“ (SF shrinkage factor) nebo „přídavek na smrštění“, v němž jsou zahrnuty objemové změny vosku, skořepiny a kovu. Metoda založená pouze na teplotní roztažnosti by mohla dát dostatečně přesné výsledky, pokud by smršťování celého odlitku bylo rovnoměrné a ničím nebrzděné. Tuto podmínku však splňují pouze jednoduché odlitky bez jader, výstupků, vpadlých míst a rozdílů v tloušťce stěn.

Turbínové lopatky vyráběné metodou vytavitelného modelu ale mají výrazné rozdíly v tloušťkách a složité tvary, u nichž smršťování není lineární ani rovnoměrné, a u některých rozměrů je navíc brzděno. Síly vyvolané nerovnoměrným chladnutím a odporem formy proti smršťování tak způsobují u určitého tvaru rozdíly v poměrné velikosti smrštění jednotlivých rozměrů. Předpověď smrštění pouze na základě teplotní roztažnosti použitých materiálů proto nedává dostatečně přesné výsledky a přesný vztah mezi geometrií matečné formy a odlitku je nevyzpytatelný.

S cílem zvýšení přesnosti odlitků, pro vytvoření dutiny matečné formy lopatky s rozměry, jejichž smršťování je brzděno, upravují inženýři „přídavek na smrštění“ podle zkušeností, experimentů a omylů. Takový přístup je ovšem nákladný, časově náročný a obvykle nevede k vytvoření zcela optimálního tvaru dutiny matečné formy.

V poslední době se k získání optimálního profilu užívají numerické simulace. Pokud jsou simulace pouze dvourozměrné (zanedbávající změny v podélné ose – ohyb, kroucení) ovlivňuje to negativně přesnost a spolehlivost.

Z praktických zkušeností i z numerických simulací vyplývá, že při chladnutí se ve střední části lopatky vytváří tahové napětí, zatímco v přední a zadní části profilu vzniká napětí tlakové. Tím se lopatka ohýbá a zkrucuje. Zvětšování poloměru zaoblení čela lopatky snižuje tlak, a tím zvyšuje kroutící efekt v její ocasní části. Největší je změna rozměrů profilu ve směru tětivy, tj. šířky lopatky.



**Obr. 2.8.1 Schéma průřezu lopatky a jeho odchylek od profilu matečné formy [2.34]**

K získání co nejpřesnějšího výsledku je užíván princip reverzní deformace vycházející z toho, že se simulací nebo experimentem zjistí očekávaná změna rozměru a o ni se v opačném směru upraví daný rozměr. Ke zvýšení přesnosti u odlitků složitých tvarů se tento postup iteračně několikrát opakuje, což zvyšuje přesnost dosažení cílového tvaru.

Až do nedávna bylo obtížné rychle a správně určit hodnotu brzděného smrštění turbínových lopatek. V poslední době se výzkumníci soustředili na sledování a simulaci smršťování. Detailní simulace ale vyžaduje přesné okrajové podmínky a model tuhnutí. Tato cesta není nutná, pokud se jedná pouze o návrh profilu.

Bylo také dokázáno, že na celkové změně rozměrů od dutiny matečné formy k odlitku se nejvíce podílí smrštění vosku. Pro zpřesnění voskových modelů byly optimalizovány vstřikovací parametry, experimentálně získána potřebná data a vytvořena metodika pro počítačovou předpověď smrštění voskových modelů zahrnující simulaci přenosu tepla.

Přesto zůstává dosažení přesného konečného tvaru a rozměrů problémem. Předpověď smrštění dokáže předem analyzovat deformaci a změny rozměrů, ale je potřebná zpětná analýza, která by určila návrh potřebné formy. Byly použity např. reverse deformation method nebo reverse distortion compensation method ke zlepšení přesnosti a objemového smrštění v rapid prototyping procesu aj. Ale neexistuje žádný odpovídající výzkum zabývající se kompenzací smršťování k dosažení přesně odlitých turbínových lopatek.

Numerická simulace celého procesu snad může poskytnout údaje o rozměrových změnách a získat podklady pro vytvoření profilu matečné formy. Detailní simulace však vyžaduje značné náklady, odbornost a čas. Rozměrově přesné určení profilu formy na modely pro lopatky a lopatková kola je možné za pomoci metody využívající FEM (MKP).

Objemová smrštění různých materiálů užitých v procesu se sdruží do jednoho parametru, který je využit pro získání geometrie profilu.

## 2.9 Cíl habilitační práce

Na základě výše popsaných problémů si práce si klade za hlavní cíl:

- **Dosažení vyšší přesnosti odlitků pro energetiku a popsání metodiky zvýšení přesnosti rozměrů uvedených odlitků.**

V rámci práce budou realizovány dílčí cíle:

- Rozbor problematiky lití na vytavitelný vosk (včetně popisu vlastností voskových směsí, technologičnosti konstrukce odlitku a analýzy možných předdeformací odlitků energetiku zahrnutých do experimentální části práce).
- Modifikovat databázi simulačního software podle experimentálně získaných materiálových a rozměrových dat.
- Realizovat simulace (s využitím předchozích výsledků) a verifikovat proces vstřikování voskového modelu pro technologii lití na vytavitelný model, včetně ověření výsledků ve výrobní praxi.



### 3. Problematika simulací slévárenského procesu a simulací lisování a chování voskových modelů

Každá slévárenská technologie je provázena vznikem nepřijatelných vad. Hlavním ukazatelem sléváren je schopnost čelit zmetkovitosti výroby. Mezi vady odlitků patří odchylka rozměrů, tvaru, objemu, hmotnosti, vzhledu, struktury, celistvosti, chemického složení či fyzikální a chemické vlastnosti výsledného odlitku odlišné od příslušných norem, standardů, výkresů, 3D modelů a technických podmínek. Míru jejich přípustnosti určují zákaznické požadavky na kvalitu a jakost. [H5]. Z předchozích kapitol je patrné, že výrobu zdravého odlitku vzájemně ovlivňuje mnoho faktorů provázaných operací výrobního procesu, jenž má nemalé nároky na optimální nastavení celé výrobní technologie. Změna jednoho parametru má vliv na navazující výrobní operace. Většina sléváren vychází z dlouholeté praxe svých odborníků. To mnohdy vyžaduje velké množství provozních zkoušek a zásahů do výrobního cyklu, které nemusí vést k odstranění daného problému [3.1].

Dnešní trh poskytuje využití několika speciálních simulačních programů, které umožňují zvýšit kvalitu výroby a s tím spojené náklady. Programy jsou sestaveny z modulů, které uživateli poskytují vytvořit náhled simulovaného reálného děje. Numerická simulace je jedním z nástrojů při optimalizaci výrobního procesu s velkým množstvím proměnných a minimálním zatížením výrobní kapacity. Změnou konkrétního parametru lze testovat vliv na výslednou kvalitu voskového modelu, a tím získat cenné informace k odhalení kritického místa výrobního procesu a testováním urychlit návrh nejvhodnějšího řešení. Vizualizací celého lití ve virtuálním prostředí lze sledovat např. problémy spojené s prouděním tekutiny, teplotou a průběhem tuhnutí modelu a jiných průběhů vedoucích k deformaci či vzniku jiných možných defektů [3.2].

Programy však nenavrhují řešení daného problému, ale simulují procesy, které za předpokladu vstupních dat, která musí být co nejvíce shodná se skutečnými podmínkami, zobrazují velice přesné výsledky blízké realitě [3.3].

Numerická simulace má i pro technologa vzdělávací účinek. Získává tak cenné informace chápání souvislostí výrobního procesu a pomáhá v jeho odborném růstu. Konečné řešení je však závislé na intuici každého technologa [3.4].

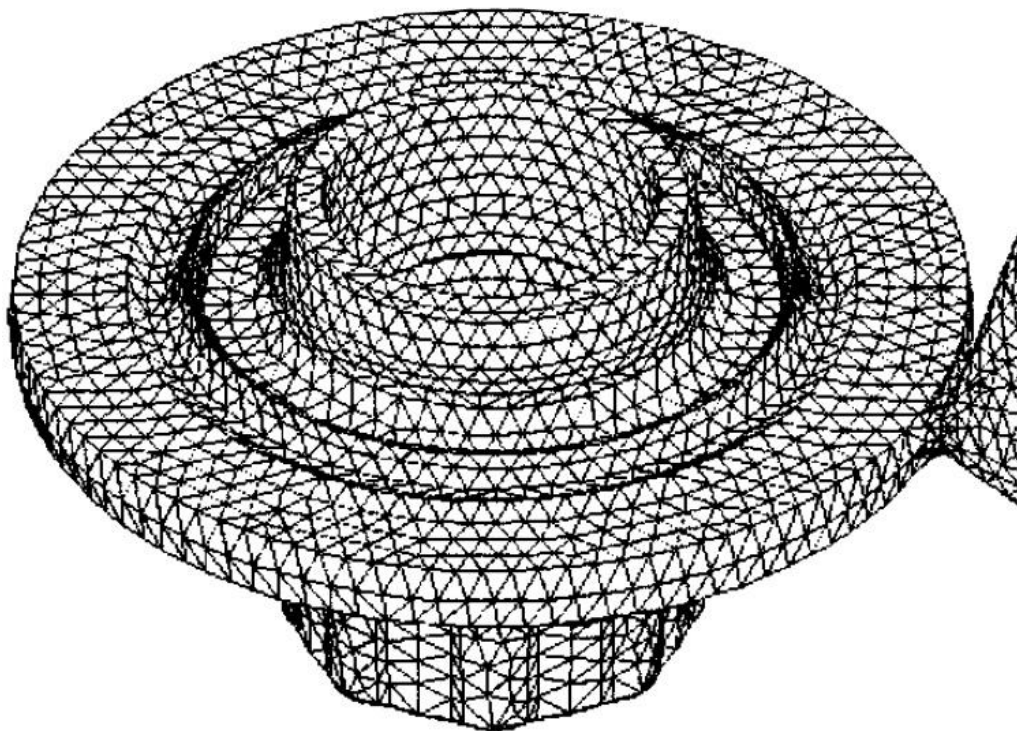
## 3.1 Metody numerické simulace

Virtuální prostředí je tvořeno pomocí matematických rovnic, které popisují klíčový jev reálného procesu. Mezi nejpoužívanější metody se řadí hlavně metoda konečných prvků (MKP) a metoda konečných diferencí (MKD). Podstata numerického řešení se zakládá na diskretizaci proměnných a opakování jednoduchých algebraických operací specifického typu [H6].

Předností těchto metod je, že umožňují získat řešení v konečném počtu diskrétních míst (tzv. „uzlů“) zvolené diferenční sítě nebo sítě konečných prvků, a to buď v celé oblasti, nebo její povrchové části [3.5].

### 3.1.1 Metoda konečných prvků (MKP)

Ve světě je označovaná jako „Finite Element Method – FEM (MKP)“. Tato metoda rozděluje určitou oblast na konečný počet jednoduchých elementů (tzv. konečných prvků) o nichž se přepokládá vzájemné spojení v konečném počtu uzlových bodů na hranicích těchto elementů (viz obr. 3.1). Jejím účelem je převedení analytického řešení soustav diferenciálních rovnic na řešení soustav algebraických lineárních rovnic. Skutečný průběh vyšetřované fyzikální veličiny se při řešení aproximuje zvolenou funkcí. Zároveň je nutné, aby tato funkce byla jednoznačně určena hodnotami veličiny v uzlových bodech [3.2]. Výpočet hodnot proměnných veličin se odehrává v těžišti jednotlivých kontrolních objemů (elementů), který je pak pomocí interpolace vyjádřen po celé jeho ploše. MKP pracuje s nepravidelnou výpočtovou sítí, jejíž výhodou jsou rozsáhlé možnosti definování tvaru a umístění výpočtových elementů [3.1].

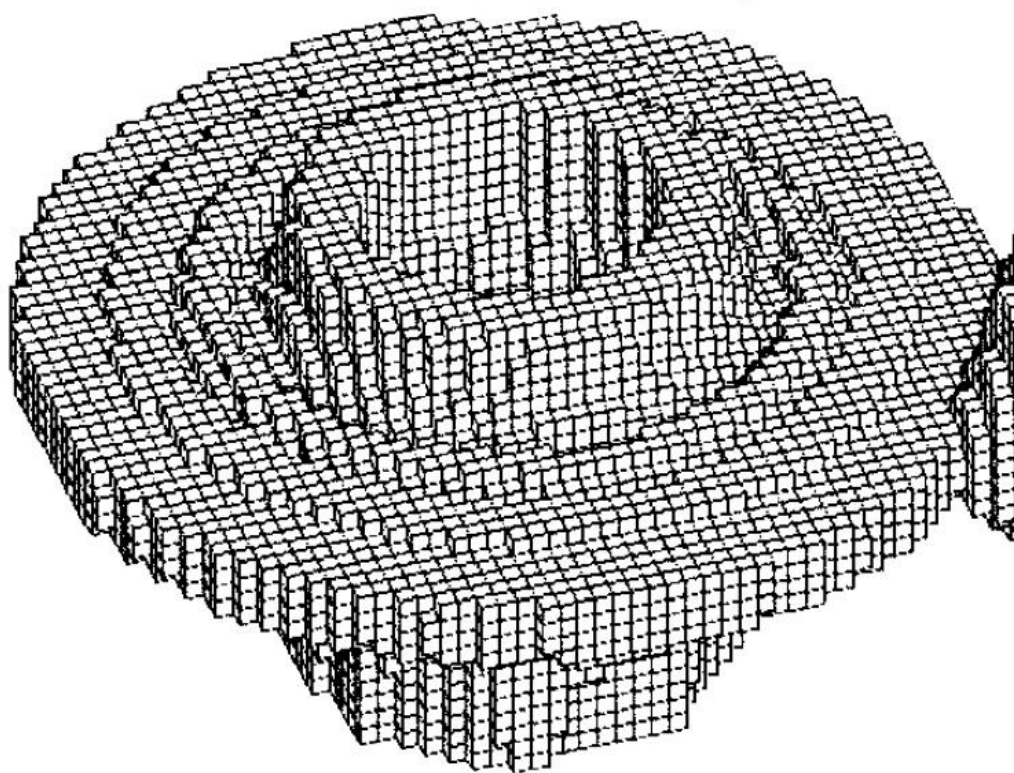


*Obr. 3.1: Zobrazení tělesa metodou konečných prvků [3.1]*

### 3.1.2 Metoda konečných diferencí (MKD)

Je mezinárodně označovaná jako „Finite Differences Method – FDM (MKD)“. Metoda je založena na aproximaci základní diferenciální rovnice s příslušnými okrajovými podmínkami, které odpovídají diferenčním rovnicím mající tvar algebraických rovnic. Aproximace je založena na nahrazování derivací přesnými výrazy. Náhrada se provádí v diskretních místech tvořených z uzlů sítě zahrnující zkoumanou oblast [3.2].

Metoda je nejčastěji používána na výpočtové sítě vykazující vysoký stupeň pravidelnosti. Lze tak použít aproximace vyššího řádu na pravidelné mřížce (viz obr. 3.2), a tím získat vyšší stupeň přesnosti řešení. Každý bod výpočtové sítě může být uvažován jako počátek lokálního souřadného systému s osami shodnými s hranami mřížky, je tedy místně strukturovaná [3.6].

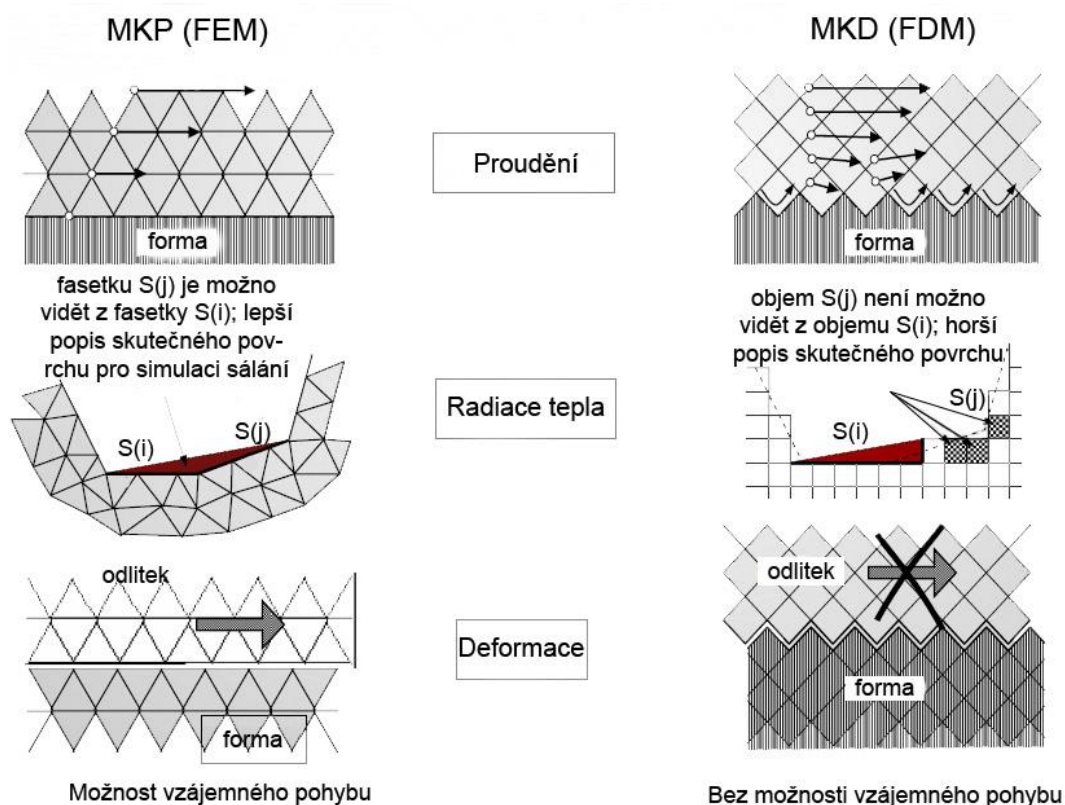


*Obr. 3.2: Zobrazení tělesa metodou konečných diferencí [3.1]*

### 3.1.3 Porovnání metod MKP a MKD

Ze srovnání obou metod vychází určité výhody, které staví metodu MKP do popředí, neboť tato metoda dovoluje lepší geometrický popis a vystižení okrajových podmínek složitých tvarů integrační oblasti. Umožňuje využívat místně zjemněné diskretizace, jež jsou výhodné ve významných částech řešené oblasti, aniž by byla nutná zvláštní úprava výpočtového programu. Zároveň dovoluje jednodušší aplikaci vyšších typů aproximace hledané funkce za účelem zvýšení přesnosti řešení. Předností je také vhodnější popis geometrie, komplexních tvarů a tenkých sekcí modelu. Metoda MKP také poskytuje kvalitnější výsledky proudění tekutiny, radiace tepla, výpočtů deformace (viz obr. 3.3), menší počet

uzlových bodů a tím kratší čas simulace, menší nároky na operační paměť počítače i místa na disku, rychlejší pre-processing a post-processing [H7].



Obr. 3.3: Porovnání obou metod [3.5]: vlevo metoda konečných prvků / vpravo metoda konečných diferencí

## 3.2 Charakteristické rysy výpočtového řešení simulací

Veškeré dostupné softwary pro výpočet numerického řešení simulací využívají následně vypsané komponenty [3.6]:

- **Matematický model** – je startovním krokem všech numerických metod, který obsahuje soubor diferenciálních rovnic a okrajových podmínek. Je nezbytné vybrat správný model stanovený pro konkrétní účely. Čím obecnější je řešení umožňující širší aplikaci modelu, tím nižší je jeho přesnost. Neexistuje tedy univerzální řešení, které lze aplikovat na všechny druhy materiálů v tekutém skupenství.
- **Diskretizační metoda** – je druhým krokem, při němž je zvolena vhodná diskretizační metoda MKP či MKD k převodu diferenciálních rovnic na algebraický systém rovnic.
- **Souřadnicové a vektorové systémy** - jsou ovlivněny požadovaným cílem výpočtu, vhodně zvolenou diskretizační metodou, výpočtovou sítí a dalšími faktory. Systém nabízí např. výběr z kartézských (nejpoužívanější), cylindrických, ortogonálních a jiných souřadnic. Je nezbytné zvolit i systém pro zápis vektorů a tenzorů.

- **Výpočtová síť** – je numerická mřížka určená k výpočtu geometricky vymezeného prostoru, vytvořeného použitou diskretizační metodou. MKP vyžaduje zvolit vhodnou funkci popisující tvar výpočtových elementů. Čím přesnější je vyžadován výsledek, tím je zapotřebí použití většího počtu uzlových bodů. S vyšším počtem uzlových bodů však vznikají vyšší nároky na volnou paměť a čas výpočtu softwarem; [H].
- **Metoda řešení** – ovlivňuje velikosti systému algebraických rovnic.
- **Kritéria konvergence** – ovlivňují přesnost a efektivitu výpočtu, neboť určují, kdy dojde k ukončení výpočtu.

### 3.3 Podmínky pro vytvoření simulace

Pro získání věrohodné simulace je potřeba znát alespoň pět následujících podmínek.

#### 3.3.1 Matematické modely a postupy

Fyzikální proces je zde popsán mnoha soubory rovnic, vytvářející matematické modely. Vstřikovací proces je neizotermický děj, při němž dochází vlivem působení tlaku ke změně objemu voskové směsi. Popis proudění je popsán skupinou matematických modelů vhodných či upravitelných pro různé druhy kapalin. Za pomoci rovnic o zachování hybnosti, energie a hmoty je tak předvídan průběh plnění formy [11].

#### 3.3.2 Materiálová databáze

K získání výsledku simulace o přijatelné vypovídající hodnotě je nezbytná dostatečně obsáhlá materiálová databáze simulačního programu obsahující reologické, tepelné a mechanické vlastnosti. Materiálová databáze však většinou obsahuje pouze hodnoty zjistitelné z materiálových listů. Potřebné znalosti voskových směsí jsou bohužel neúplné. Je tedy nutné tyto charakteristiky změřit a následně do databáze doplnit. Vhodné metodiky měření potřebných vlastností pro slévárenské voskové směsi vždy nejsou známy, a tak se vychází ze zkušeností s měřením plastových materiálů.

#### 3.3.3 Počáteční podmínky

Počáteční podmínky zahrnují nejen vstupní parametry nastavení skutečného výrobního procesu, jako je teplota trysky / zásobníku voskové směsi, vstřikovací / svírací tlak a čas vstřikování, ale i teplota formy, skutečný průběh tlaku / průtoku směsi během vstřikovacího cyklu při nastavení určité hodnoty vstřikování, koeficienty přestupu tepla a mnohé další. Mnohdy nebývají tato data z výrobního stroje dostupná, a tak je nezbytné je vhodným způsobem změřit [3.7].

#### 3.3.4 Okrajové podmínky

Jsou to předpoklady, které vedou ke zjednodušení matematického popisu reálného děje. Například se při výpočtu nepředpokládá deformace matečné formy a bereme ji jako ideálně tuhé těleso. Nebo je předpokladem tuhnutí daného materiálu po vrstvách směrem od stěn formy [3.8].

### 3.3.5 Testovací zařízení pro validaci

Je potřeba provést porovnání několika změněných parametrů se skutečným výrobním procesem, aby byly při optimalizaci výrobního procesu simulované výsledky efektivní a tím prokázat jejich dostatečnou vypovídací hodnotu. Numerická predikce je použitelná pouze při zjištění, do jaké míry se shoduje s reálným dějem. Je tedy podmíněna definicí nejen počátečních a okrajových podmínek, ale i znalostí termofyzikálních dat použitých materiálů. Až po pozitivní validaci simulací lze přikročit k optimalizaci, sledování průběhu a výsledků procesu v závislosti na změně proměnných parametrů [3.4].

## 3.4 Materiálový model tekutiny

Proudění tekutiny je důsledek povrchového nebo objemového působení externích sil, jako je gravitace, změna tlaku, rotace, smyk a další. Ke zkoumání proudění je nezbytné znát charakteristiky vlastností projevů zkoumaných kapalin (hustota, viskozita, povrchové napětí, specifické teplo, Prandtlovo číslo atd.), které jsou závislé na okolní teplotě a tlaku. Tyto vlastnosti je u voskových směsí nutno laboratorně proměřit (viz kapitola 4).

Materiálový model tekutiny pracuje s Newtonskými / Nenevtonskými kapalinami. Newtonská kapalina je v každém časovém okamžiku nezávislá na jejím napěťovém a deformačním stavu. Nenevtonské kapaliny jsou takové kapaliny, které nemají deformační rychlost úměrnou napětí. Vykazují tedy odchylky od Newtonova zákona ideálně viskózní kapaliny. Tyto kapaliny jsou dále rozdělovány podle jejich charakteristických vlastností do podskupin např. [3.6]:

- **Viskoelastické** Nenevtonské kapaliny mají vlastnosti kapalin i poddajných těles. To znamená, že po deformaci se v možnostech elastického přetvoření vrací do původního stavu.
- **Časově závislé** kapaliny vykazují časovou závislost mezi smykovým napětím a rychlostí smyku.
- **Časově nezávislé** kapaliny mají rychlost smyku v každém okamžiku jako funkci smykového napětí.

Plněné voskové směsi spadají do skupiny Nenevtonských obecně viskózních pseudoplastických kapalin. Simulační programy neobsahují materiálové databáze výrobců voskových směsí, proto je nezbytné jejich chování popsat vhodným matematickým modelem. Tokovou křivku pseudoplastických kapalin je možné rozdělit do tří hlavních oblastí. První oblast vykazuje chování nízkého smykového namáhání Newtonské kapaliny. V druhé oblasti dochází k nárůstu smykového namáhání a tím i řidnutí kapaliny. Poslední oblast je pozorovatelná pouze u některých materiálů v případě velmi vysokého smykového namáhání [3.13].

## 3.5 Fyzikální model proudění tekutin ve slévárenských procesech

Proudění roztavených kovů hraje významnou roli ve výrobě kvalitních odlitků. Plnění forem je prvním krokem procesu lití a vždy ovlivňuje kvalitu finálního produktu. Existuje spousta faktorů vztahených k proudění, které ovlivňují kvalitu finálního odlitku, například turbulentní proudění taveniny způsobující vznik oxidických blan, které zhoršují mechanické vlastnosti, vzájemné působení mezi kovem a formou vedoucí k erozi formy, rozstřík kovu, rozdělení toku taveniny, zachycení vzduchu nebo jiných plynů v dutině formy, přerušovaný proud způsobující studené spoje, nevhodný způsob ochlazování, špatně navržený vtokový systém atd. Po naplnění formy přichází na řadu tuhnutí odlitku, kdy značnou roli, mající vliv na finální odlitek, hrají fyzikální jevy jako vztlak kapaliny, gravitace a segregace rozpuštěných složek. V průběhu modelování se musejí brát v úvahu všechny již zmíněné jevy. [H8]

V dnešní době jsou si konstruktéři a technologové ve slévárenském oboru vědomi, jak důležité je pochopit souvislosti mezi všemi vlivy ke správnému navržení tvarů odlitků, jakož i všech systémových prvků vtokových soustav a forem. V mnoha výrobních odvětvích v poslední době roste význam numerických simulačních softwarů integrovaných do výrobního procesu a návrhu designu. Rozmanité součásti a nástroje se tvarově optimalizují na základě výsledků získaných z výsledků numerických simulací a analýzy proudění a tuhnutí. Tímto způsobem je možné odhalit případné nedostatky v návrzích, které eliminují potenciální riziko vzniku vad v odlitku nebo ve formě.

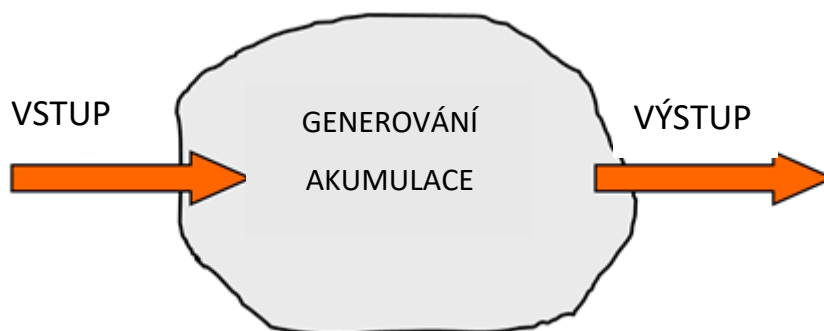
Modelování proudění je velice rozsáhlé a komplexní téma. Tato kapitola se proto zaměřuje pouze na základní jevy spjaté s prouděním tekutin během slévárenského procesu.

### 3.5.1 Rovnice popisující pohyb kapaliny

Mechanika tekutin a přenos tepla jsou vědní disciplíny poskytující teoretické základy matematických popisů chování proudění tekutin a tepla. V makroskopickém měřítku lze tekutiny považovat za kontinuum, i když jsou reálně diskrétní, skládající se z molekul. Ovšem jejich vlastnosti se udávají průměrné přes obrovské množství jednotlivých molekul. Cílem je simulovat plnění formy a tuhnutí v rámci celého odlitku, jehož hmotnost se pohybuje v rozmezí zlomku kilogramu až několika stovek tun. Tekutinu představuje tekutý kov, tedy tavenina. Pro naše účely lze plnění formy a tuhnutí odlitku popsat pomocí kontinuálního modelu.

Při formulaci matematických modelů k popisu plnění forem a tuhnutí odlitků jsou použity obecné zákony zachování hmotnosti, hybnosti a energie. V tomto kontextu se jedná o rovnováhu jevů způsobující změny velikosti veličiny  $\phi$ . Odvození zachovávající se veličiny  $\phi$  plyne z obecného pravidla: Velikost změny zachovávající se veličiny uvnitř sledovaného objemu je rovna součtu příspěvku vnějšího

prostředí plus příspěvku příslušných vnitřních zdrojů uvnitř kontrolovaného objemu. Obr. 3.4 zjednodušeně znázorňuje myšlenku principu zachování výše uvedeného.



**Obr. 3.4.: Princip zachování hmoty [3.6]**

K odvození zákona zachování pro vlastnost  $\phi$  je zapotřebí vymezit sledovaný objem označený šedivou oblastí v obr. 3.4. K transportu veličiny  $\phi$  konvekci, difúzí, radiací nebo jiným mechanismem dochází vnějším povrchem kontrolovaného objemu. Uvnitř může veličina  $\phi$  vzniknout nebo zaniknout. Příspěvek vnějšího prostředí je definován jako velikost vstupu veličiny  $\phi$  do sledovaného objemu mínus velikost výstupu ze sledovaného objemu. Z důvodu transportu veličiny  $\phi$  přes hranice sledovaného objemu a jejího vzniku a zániku v ohraničeném objemu se množství veličiny  $\phi$  mění v průběhu času. Z toho důvodu lze říci, že veličina  $\phi$  se akumuluje ve sledovaném objemu. Zákon zachování může být vyjádřen následujícím způsobem:

*Velikost akumulace veličiny  $\phi$  uvnitř sledovaného objemu = Výsledný příspěvek vnějšího prostředí veličiny  $\phi$  skrze vnější hranici sledovaného objemu + množství kreované veličiny  $\phi$  ve sledovaném objemu*

Pokud se aplikuje zákon zachování hmoty na proudění tekutin, získává se rovnice kontinuity. Zachování hybnosti je vyjádřeno Newtonovým druhým pohybovým zákonem. Aplikováním na problematiku proudění tekutin se získávají rovnice dynamické rovnováhy. Aplikace zachování energie, vyjádřená prvním termodynamickým zákonem, vede k energetické rovnici. K získání detailnějšího náhledu na problematiku se musí provést odvození z uvedených základních rovnic.

### **3.5.2 Zachování hmoty**

Rovnice zachování hmoty se získá z rovnováhy hmoty ve stálém objemu, kterým proudí kapalina. Princip spočívá v tom, že akumulovaná hmota ve sledovaném objemu se rovná hmotě, která do oblasti vstoupí mínus hmota, která objem opouští. To může být vyjádřeno následovně:



*Množství akumulované hmoty = čistému příspěvku hmoty konvekcí [3.5]*

Předešlé tvrzení lze přepsat do následující rovnice:

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = \sum_i \dot{m}_i \quad (3.1)$$

Rovnice (2.1) je považovaná za počátek odvození rovnice zákona zachování hmoty. Nicméně toto odvození nebude dále rozváděno z důvodu rozsahu této práce. Po řadě odvození, substitucí a modifikací nakonec dostaneme finální rovnici kontinuity

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_1)}{\partial x_1} + \frac{\partial(\rho u_2)}{\partial x_2} + \frac{\partial(\rho u_3)}{\partial x_3} = 0 \quad (3.2)$$

Rovnice (2.2) představuje zachování hmoty platné jak pro stlačitelné, tak pro nestlačitelné kapaliny. Pokud budeme uvažovat nestlačitelné kapaliny ( $\rho = \text{konstanta}$ ), lze rovnici zjednodušit

$$\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} = 0 \quad (3.3)$$

Složky rychlosti jsou v ideálním případě vypočteny z rovnice hybnosti.

### 3.5.3 Zachování hybnosti

Newtonův druhý pohybový zákon aplikovaný na kontrolovaný objem dává rovnice dynamické rovnováhy. Princip zachování hybnosti musí být definován pro všechny složky rychlostního vektoru.

*Velikost akumulace i-té složky hybnosti = čistý příspěvek i-té složky hybnosti + suma sil působících na systém*

Tento princip může být vyjádřen následující rovnicí

$$\frac{\partial}{\partial t}(mu_i) = \left[ \sum_{in} (\dot{m}_i) - \sum_{out} (\dot{m}_i) \right] + \left[ \sum_j f_{i,j} + \sum_k b_{i,k} \right] \quad (3.4)$$

První výraz v závorkách na pravé straně rovnice je výraz pro konvekci. Popisuje příspěvek hybnosti ve směru  $x$ . Druhý výraz v závorkách na pravé straně rovnice obsahuje sumu složek sil v  $x_i$ -tém směru působících na kontrolovaný objem. Dva druhy sil působí na sledovaný objem. Prvním jsou povrchové síly (například tlak, viskózní síly, povrchové napětí) a druhým typem jsou objemové síly (gravitace, odstředivá síla, Coriolisovy síly, elektromagnetické síly). K získání výsledné hybnosti (pro směr  $x$ ) je zapotřebí provést několik modifikací a substitucí, které vedou na

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_1) = \left[ \frac{\partial}{\partial x_1}(\rho u_1 u_1) + \frac{\partial}{\partial x_2}(\rho u_2 u_1) + \frac{\partial}{\partial x_3}(\rho u_3 u_1) \right] - \left( \frac{\partial \tau_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \tau_{21}}{\partial x_2} + \frac{\partial \tau_{31}}{\partial x_3} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_1} + \rho g_1 + X_1 \quad (3.5)$$

První výraz v hranatých závorkách na pravé straně reprezentuje první složku konvekce. Druhý výraz popisuje přenos difuzí (opět první složku) vycházející z viskózních napětí. Třetí výraz vyplynul z gradientu statického tlaku. Zbylé dva výrazy popisují vnitřní síly a jiné přidané výrazy označené jako  $X_1$ . Tato rovnice je platná pro jakoukoliv kapalinu, která by splňovala předpoklad kontinua. Před použitím této rovnice k řešení problému se musí vytvořit vhodné výrazy pro vyjádření rychlostního a tlakového pole.

$$\tau_{21} = \mu \left( \frac{\partial u_2}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right) \quad (3.6)$$

$$\tau_{31} = \mu \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right) \quad (3.7)$$

$$\tau_{11} = -p - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \quad (3.8)$$

Pokud jsou tyto výrazy implementovány do diferenciální pohybové rovnice (2.5), získáváme Navier-Stokesovu rovnici ve směru  $x_1$  v trojrozměrném prostoru. Rovnice pro další dva směry se získají podobným způsobem. [3.8]

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_1) = \rho g_1 - \frac{\partial p}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_1} \left[ \mu \left( 2 \frac{\partial u_1}{\partial x_1} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_2} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_3} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right) \right] \quad (3.9)$$

Tyto rovnice mohou být dále zjednodušeny, pokud budeme uvažovat nestlačitelnou kapalinu s konstantní viskozitou, která je aplikovatelná na slévárenské procesy. Za předpokladu těchto podmínek se rovnice ve směru  $x_1$  zredukuje na

$$\rho \left( \frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + u_2 \frac{\partial u_1}{\partial x_2} + u_3 \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right) = \rho g_1 - \frac{\partial p}{\partial x_1} + \mu \left( \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_3^2} \right) \quad (3.10)$$

Navier-Stokesovy rovnice pohybu tekutin spolu s rovnicí zachování hmoty (rovnice kontinuity) poskytují dostatečný popis rychlostního pole a celého chování jak stlačitelných, tak nestlačitelných proudících kapalin (například plnění formy) za různých podmínek. Aby bylo možné plně popsat podstatu jevů během proudění kapalin, a především popsat teplotní pole, využívá se pro úplnost rovnice zachování energie. [3.5]

### 3.5.4 Zachování energie

Energetická rovnice pro stálý objem může být definována jako:

$$\begin{aligned} \text{Množství akumulované vnitřní a kinetické energie} &= \text{čistý příspěvek vnitřní a kinetické energie} \\ \text{konvekci} &+ \text{čistý příspěvek tepla konvekci} + \text{čistý příspěvek tepla radiací} - \text{množství práce vykonané} \\ &\text{systémem do okolí} + \text{síla vnitřních tepelných zdrojů/norů} \end{aligned}$$

Toto tvrzení je prvním termodynamickým zákonem formulovaným pro otevřený, nestálý systém. Pro lehce stlačitelné a nestlačitelné kapaliny (např. tavenina), může být příspěvek kinetické energie k celkové energii zanedbán, a tak se celková energetická rovnice nahradí pouze termální rovnicí. Navíc dva další výrazy mohou být pro slévárenský proces zanedbatelné. Prvním je práce působící proti gravitačním silám a druhým je množství práce vynaložené proti statickému tlaku. Bylo by nezbytné tyto členy zohlednit, pokud bychom uvažovali taveninu za stlačitelnou kapalinu. V našem případě považujeme taveninu za nestlačitelnou, či pouze za lehce stlačitelnou, a proto mohou být tyto členy vynechány. Finální formu rovnice lze tedy zapsat ve tvaru [3.10]

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial}{\partial t}(cT) = & - \left[ (\rho u_1) \frac{\partial}{\partial x_1}(cT) + (\rho u_2) \frac{\partial}{\partial x_2}(cT) + (\rho u_3) \frac{\partial}{\partial x_3}(cT) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial x_1} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_3} \right) \\ & + \mu \Phi_v + \rho \Delta H_L \frac{\partial f_s}{\partial t} + S_T \end{aligned} \quad (3.11)$$

Měrné teplo  $c = c_p = c_v$  a člen  $\Phi_v$  představuje ztrátu viskozity. Pro slévání se tato ztráta viskozity v termální rovnici zanedbává, používá se pouze, pokud je požadavkem simulovat částečné tuhnutí odlitku. Díky této rovnici jsme schopni pochopit a kompletně popsat chování proudící kapaliny a jejího teplotního pole. Všechny ostatní proměnné v rovnici 3.11 jsou již známé z předchozích zákonů zachování hmoty.

## 3.6 Přenos tepla během lití

Všechny slévárenské procesy jsou spjaté s uvolňováním a přenosem tepla během tuhnutí a chlazení odlitku. Množství odvedeného tepla je velice důležité k určení času tuhnutí odlitku a rozložení teplotního pole v materiálu. Tyto jevy ovlivňují přímo i nepřímo strukturu materiálu, vznik poretivity a vměstků, rozmístění a tvar staženin a tím i celkovou kvalitu a vlastnosti odlitku. Přenos tepla a proces tuhnutí jsou často složité na pochopení, proto jsou základní znalosti a jejich aplikace ve slévárenském procesu nanejvýš důležité. Tyto znalosti jsou pak základem pro modelování slévárenských procesů a jejich navrhování pro dané požadavky.

### 3.6.1 Kondukce

Je všeobecně známo, že pokud je v objektu přítomen teplotní gradient, dochází k přesunu energie z teplejších míst do oblastí chladnějších. Tento jev se označuje jako vedení tepla úměrné teplotnímu gradientu, kde konstantu úměrnosti představuje tepelná vodivost. Základní Fourierův zákon vedení tepla lze zapsat jako [3.13]

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.12)$$

Kde  $q$  [W] je difúzní tepelný tok (tepelný tok) průřezem  $A$  [m<sup>2</sup>],  $k$  je tepelná vodivost [W/m.K],  $T$  je teplota [K] nebo [°C] a  $x$  je proměnná vzdálenost kolmo k povrchu [m]. Znaménko mínus v rovnici 3.12 znamená, že teplo se počítá kladně ve směru, ve kterém fakticky proudí. Tato rovnice je definicí tepelné vodivosti  $k$ .

### 3.6.2 Konvekce

Tepelná kondukcce i radiace popisují přenos energie, ale ne hmoty. Konvekce znamená přenos hmoty spolu s jejím tepelným ovlivněním. Příklad konvekce lze pozorovat v případě kontinuálního lití ochlazováním povrchu tuhneícího kovu nebo formy vodou. Ohřáté médium mizí z okolí povrchu proudy taveniny a formy a je nahrazeno studeným vzduchem nebo vodou. Pro vysokotlaké lití do kokily je hlavním zdrojem konvekce pohyb taveniny v oblasti vtoku a dutiny formy.

Existují dva principy tepelné konvekce: nucená a volná konvekce. Nucená konvekce zahrnuje externí zdroje pohybu vzduchu nebo jiného pracovního média. Chlazení formy proudící kapalinou (voda, olej) je názorný příklad nucené konvekce. Naopak volná nebo přirozená konvekce je v tekutině způsobena rozdílem hustoty, která není příčinou okolních vlivů. Proudění v tavenině je především vyvoláno jejím transportem, kdy příspěvek příslušných velikostí rychlostí lze vyčíst z energetické rovnice (3.11). Samotné rychlosti lze vypočítat z rovnice dynamické rovnováhy (3.5) a rovnice kontinuity (3.1). Newtonův zákon ochlazování, který je aplikovaný k vyjádření všeobecného efektu proudění, lze použít také jako okrajovou podmínku nebo k popsání konvekce během tuhnutí nebo chlazení odlitku.

$$q = -hA(T_{\infty} - T_s) \quad (3.13)$$

Kde  $T_{\infty}$  a  $T_s$  jsou teploty povrchu odlitku, respektive chladícího média,  $h$  je označení pro součinitel přenosu tepla prouděním [W/m<sup>2</sup>.K] a rovnice (3.13) je jeho definicí. Součinitel přenosu tepla  $h$  je závislý na rychlosti proudění chladícího média a na tvaru a velikosti povrchu odlitku. [3.5]

### 3.6.3 Sálání

Posledním případem přenosu tepla se nazývá sálání, které vzniká v důsledku elektromagnetických vln vyskytujících se jak pod absolutním vakuem, tak v médiu. Elektromagnetická radiaci zapříčiněná teplotním rozdílem. Pro ideální černé těleso platí Stephan-Bolzmannův zákon

$$q = \sigma AT^4 \quad (3.14)$$

Kde  $\sigma$  je konstanta úměrnosti označená jako Stephan-Bolzmanna konstanta o velikosti  $5,669 \cdot 10^{-8}$  W/(m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>).  $T$  je teplota dosazovaná ve stupních Kelvina [K]. Pokud se jedná o všechny ostatní

povrchy mimo černého tělesa, jejich vyzařování je podstatně nižší, nicméně celkové záření těchto těles stále roste se 4. mocninou teploty ve Stephan-Bolzmannově zákoně. [3.5]

Pro naše účely analýzy slévárenského procesu můžeme uvažovat dva jednoduché případy sálání tepla mezi plochami  $A_1$  a  $A_2$ . V obou případech lze vyjádřit výměnu tepla následovně

$$q = -A_1 \varepsilon_{mean} \sigma (T_2^4 - T_1^4) \quad (3.15)$$

Kde  $\varepsilon_{mean}$  zastupuje střední emisivitu. Střední emisivitu lze získat z již zmíněných dvou případů, které jsou obzvláště důležité při odlévání taveniny. [3.6]

- 1) Příklad:  $A_1 \ll A_2$ , odpovídá například kompletnímu obemknutí povrchu 1 mnohem větším povrchem 2. V tomto případě bude střední emisivita rovna té odpovídající malému povrchu,

$$\varepsilon_{mean} = \varepsilon_1$$

- 2) Příklad: Obě plochy jsou v bezprostřední blízkosti. Pak je střední emisivita dána

$$\varepsilon_{mean} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} + 1} \quad (3.16)$$

Rovnice 3.4 se často přepisuje do formy vhodnější pro výpočty

$$q = -A_1 \varepsilon_{mean} \sigma (T_1^3 + T_1^2 T_2 + T_1 T_2^2 + T_2^3) (T_2 - T_1) \quad (3.17)$$

Pokud do rovnice zavedeme výraz pro výpočet součinitele přenosu tepla sáláním  $h_{rad}$

$$h_{rad} = \varepsilon \sigma (T_1^3 + T_1^2 T_2 + T_1 T_2^2 + T_2^3) \quad (3.18)$$

Lze přepsat rovnici 3.6 do stejného tvaru jako má Newtonův zákon ochlazování

$$q = -h_{rad} A (T_2 - T_1) \quad (3.19)$$

Tyto jevy mohou být velmi složité a výpočty jsou velmi zřídka tak jednoduché, jak je zde uvedeno. Avšak pro představení základů hlavních typů přenosu tepla ve slévárenských procesech jsou tyto znalosti dostatečné.

### 3.6.4 Rovnice vedení tepla

Všechny tepelné modely (bez ohledu na jejich složitost) vycházejí z řešení rovnice vedení tepla (3.20). Tato parciální diferenciální rovnice je základní nástroj pro analýzu vedení tepla. Z výsledků jsme schopni určit rozložení teplotního pole v odlitku nebo ve formě, vycházející z okrajových podmínek, v závislosti na čase. [3.6]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_{vol} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.20)$$

Kde  $\rho$  je hustota materiálu [kg/m<sup>3</sup>],  $c_p$  je měrná tepelná kapacita [J/kg.K],  $T$  je teplota [K] a  $q_{vol}$  výraz pro objemový zdroj tepla [W/m<sup>3</sup>]. Často je možné pracovat se zjednodušenou formou rovnice 3.20.

Například pokud je tepelná vodivost konstantní platí

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_{vol}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.21)$$

Kde  $\alpha$  je tepelná difuzivita materiálu, která je měřítkem rychlosti vedení teploty materiálem, pokud je ztuhlý. Slovy rovnice tepelné vodivosti říká:

*V jakémkoliv bodě v médiu, množství energie přenesené vedením do jednotky objemu plus objemové množství generovaného tepla, musí být rovno změně tepla uloženého v objemu.*

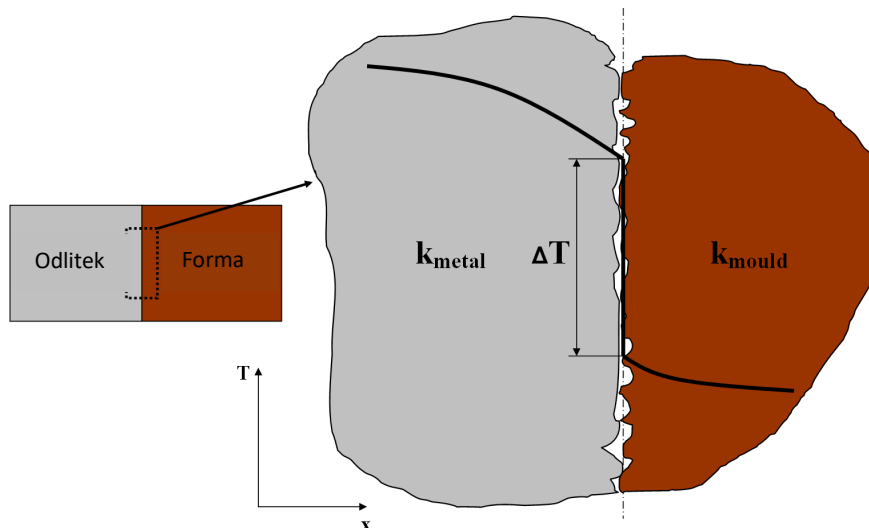
Jakmile je známo rozložení teplotního pole, může být vypočten tepelný tok v jakémkoliv bodě média nebo na jeho povrchu z Fourierova zákona. Zároveň se mohou určit i jiné zajímavé veličiny. Pro ztuhlý odlitek lze díky teplotnímu poli získat informaci o napětích souvisejících s objemovými změnami a v důsledku stav integrity materiálu. Dále je možné provádět optimalizace tloušťky izolací, například v oblasti nálitku, nebo určit kompatibilitu speciálních povlaků aplikovaných na formě.

Ve spojitosti s rovnicí vedení tepla je nutné důkladně specifikovat počáteční a okrajové podmínky k plnému popsání uvažovaných fyzikálních záležitostí. Počáteční podmínky specifikují počáteční rozložení teploty v objemu. Ve spoustě případů, včetně slévárenského procesu, se udává tato teplota konstantní.

S ohledem na okrajové podmínky existuje pět základních podmínek, které jsou použity v matematické teorii popisu vedení tepla. Ty jsou idealizovány vzhledem k reálným fyzikálním procesům. Obecně jsou tyto okrajové podmínky založeny na třech zmíněných principech přenosu tepla.

### **3.6.5 Přenos tepla mezi materiálem a tepelným odporem**

Soustava pro odlévání se skládá z řady materiálů. Mimo litý kov jde především o materiály formy, jader, chladítek nebo chladicího systému. Kontakt mezi jednotlivými prvky není dokonalý, a to může vést ke značným teplotním spádům na rozhraní z důvodu tepelného odporu pro přenos tepla. Tento jev je znám jako tepelný odpor kontaktů způsobený drsností jednotlivých ploch. Kontaktní místa jsou proložena mezerami, většinou vyplněných vzduchem. Mechanismus přenosu tepla na rozhraní materiálů v uzavřených kapsách může být zajištěn kondukcí nebo konvekcí podle toho, jaké médium je uzavřeno v kapse (obvykle vzduch), a sáláním, pokud je teplotní rozdíl mezi oběma spojenými prvky značný. Ke zjednodušení výpočtů v tomto mikroskopickém měřítku je celkový odpor na rozhraní vyjádřen pomocí koeficientu přestupu tepla (heat transfer coefficient – HTC).



Obr. 3.5: Pokles teploty z důvodu tepelného odporu na rozhraní taveniny a formy [3.6]

Příkladem rozhraní dvou materiálů, kde dochází k teplotnímu poklesu, je kontakt taveniny s formou. Celkový odpor proti přenosu tepla mezi místem v tavenině a místem ve formě je [3.16]

$$R_{total} = [R_{conduction}^{metal} + R_{interface} + R_{conduction}^{mould}] = \left[ \frac{d_{metal}}{k_{metal}} + \frac{1}{h_{interface}} + \frac{d_{mould}}{k_{mould}} \right] \quad (3.22)$$

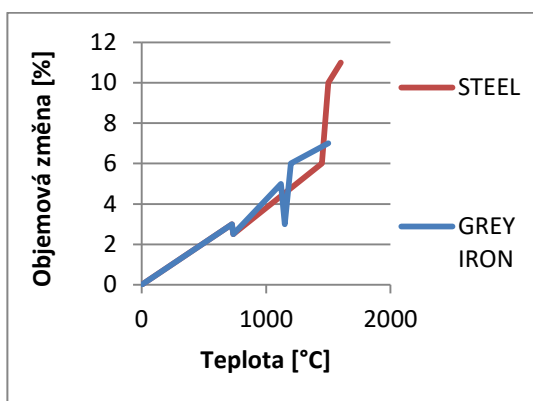
Kde  $h_{interface}$  je součinitel přenosu tepla rozhraní,  $d_{metal}$  a  $d_{mould}$  jsou vzdálenosti v kovu, respektive ve formě, od rozhraní,  $k_{metal}$  a  $k_{mould}$  jsou tepelné vodivosti kovu a formy.

### 3.6.6 Tuhnutí a dosazování kovu do odlitků

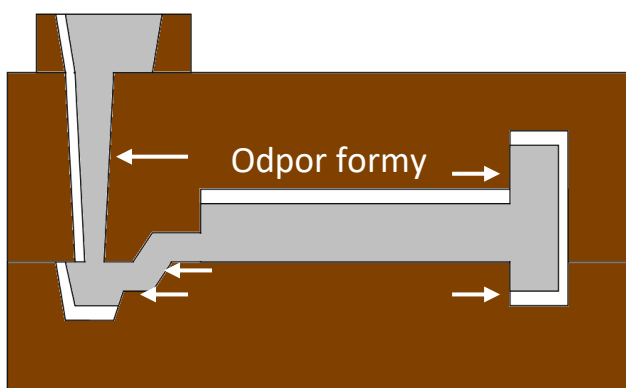
Během tuhnutí a chladnutí ve formě dochází v případě většiny slitin k objemovým změnám, většinou se stahují. Kombinace efektu stahování slitin a chování formy při tuhnutí odlitku určuje výslednou kvalitu odlitku. Nesprávný odvod tepla vede ke vzniku vad, jako jsou studené spoje nebo staženiny. Tyto vady jsou odpovědné za největší část finanční ztráty ve slévárenském průmyslu [3.16].

### 3.6.7 Staženiny

Vhodné je rozdělit objemové změny na čtyři různé typy: smršťování taveniny, tuhnutí, smršťování ztuhlého odlitku a objemové změny spjaté s fázovými přeměnami.



**Obr. 3.6: Proces tuhnutí a chladnutí odlitku [3.15]**



**Obr. 3.7: Napětí v odlitku, šipky ukazují místa, kde se odlitek nemůže smrštit z důvodu nepoddajnosti formy. [3.11]**

### 1) Smršťování taveniny

Kontrakce probíhající mezi teplotou lití a likvidem je jen vzácně problémem. Dokud je ve vtokové soustavě dostatečné množství taveniny, tak se smršťování taveniny ve formě snadno kompenzuje doplňováním tekutého kovu.

### 2) Tuhnutí

Jakmile tekutý kov dosáhne teplotu likvidu, začíná tuhnutí. To znamená, že náhodně rozmístěné atomy taveniny se začnou formovat do struktur nazývaných krystaly. Vznik krystalu je vždy doprovázen změnou molárního objemu, pro čisté kovy obvykle jeho snížením. Tento jev se označuje jako stahování během tuhnutí. Vybrané typické hodnoty pro stažení jsou uvedeny v tabulce 3.1.

**Tab. 3.1: Přehled objemové změny během tuhnutí pro různé slévárenské slitiny [3.5], [3.6]**

Materiál	Stažení [%]	Materiál	Stažení [%]
Uhlíková ocel	2.5 do 3	Cu-30%Zn	4.5
1% uhlíková ocel	4	Cu-10%Al	4
Bílá litina	4 do 5.5	Hliník	6.6
LLG	-2.5 (expanze) do 1.6	Al-4.5%Cu	6.3
LKG	-4.5 (expanze) do 2.7	Al-12%Si	3.8
Měď	4.9	Hořčík	4.2
Zinek	6.5		

Z tabulky 3.1 je patrná přítomnost expanze pro grafitické slitiny železa. Ta je způsobena formováním grafitu během tuhnutí, který má nižší hustotu než tavenina, z níž se vytváří. Stažení bývají kompenzovány dosazováním tekutým kovem z nálišků. Nicméně v nesprávně navržených



nálitcích může dojít ke ztuhnutí kovu v místě krčku nálitku, což má za následek nedostatečné dosazování tekutého kovu do odlitku a vznik lokálních staženin.

### 3) Smršťování ztuhlého odlitku

Ke smršťování odlitku již v ztuhlém stavu dochází vlivem změny teploty. V průběhu chladnutí se rovnovážné polohy atomů v krystalické mřížce dostávají blíže k sobě. Obecně tedy platí, že s klesající teplotou se molární objem zmenšuje (hustota zvyšuje). Velikost objemové změny je vyjádřena pomocí teplotního součinitele objemové roztažnosti

$$\beta = \frac{\Delta V}{V_0} \cdot \frac{1}{\Delta T} \quad (3.23)$$

Pro jeden rozměr platí (teplotní součinitel délkové roztažnosti)

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot \frac{1}{\Delta T} = \varepsilon^{th} \cdot \frac{1}{\Delta T} \quad (3.24)$$

Součinitel  $\alpha$  vyjadřuje relativní prodloužení tělesa, pokud je vystaveno teplotní změně jednoho stupně Celsia. Pokud je odlitku umožněno se volně smršťovat rovnoměrně ve všech třech směrech, pak platí  $\beta = 3\alpha$ . Se smrštěním odlitku v tuhém stavu se počítá při výrobě forem. Je zřejmé, že se deficit hmoty bude v některých částech odlitku projevovat, zejména pak v podobě staženin. Proto je velmi důležité rozumět a umět kontrolovat doplňování tekutého kovu do odlitku.

Smršťování dle rovnice (3.23) bude však platit pouze, pokud bude odlitku umožněna volná deformace. V mnoha případech to ale z důvodu umístění ve formě nebo vzhledem k vlastnímu tvaru odlitku není možné (obr. 3.3). Výsledkem je pak hromadění vnitřních pnutí, vedoucích k plastickým deformacím, prasklinám za studena a zbytkovým pnutím.

### 4) Fázové přeměny

Za určitých teplot mají atomy v krystalické mřížce tendenci se přeuspořádat do energeticky výhodnější formace. Tyto fázové přeměny mají veliký dopad na objemové změny, zbytková pnutí a změny mechanických vlastností. Proto je důležité tyto jevy pochopit a počítat s nimi. Kontrolovanými parametry je hlavně chemické složení slitiny a rychlost ochlazování.

## 3.7 Slévárenský simulační software

Na trhu existuje celé řada produktů, které umožňují provádění simulaci odlévání. Všechny využívají k provedení simulace metodu konečných prvků či metodu konečných diferencí (či variantu metodu konečných objemů). Prakticky k řadě softwarů se dá najít pouze zlomek informací a jejich možností, dohledání ceny či pronájmu software je vždy pouze know-how daných firem z důvodu udržení konkurenceschopnosti je velice obtížné se dostat k sofistikovaným údajům ohledně cen. Ty se totiž odvíjí od specifických požadavků každého zákazníka a priorit firmy dodávající software proniknout na určitý trh.

Následně budou popsány možné simulační software a krátce shrnuty získané informace.

### 3.7.1 AutoCAST-X1

3D Foundry Tech Pvt. Ltd. Mumbai, India

Jedná se o samostatný software vyvíjený indickou firmou. Modely budoucích odlitků jsou importovány z jiných CAD systémů. AutoCAST pak umožňuje navrhnout celou formu včetně vtokové soustavy nálitků, jader a chladítek. Následně je možné simulovat zabíhavost, proces tuhnutí a na základě výsledků modifikovat navržený proces lití. Na oficiálních stránkách dodavatel informuje, že jsou nejlevnější na trhu. Pro potenciální zákazníky nabízejí možnost vytvoření simulace licího procesu dílu, který je jim zaslán. [3.20]

### 3.7.2 EKKcapcast

EKK, Inc., Walled Lake, Michigan, USA

Firma EKK jednak prodává svůj simulační software, jednak nabízí možnost konzultace problémů s jejími odborníky. Jejich software je zaměřen na proces krystalizace, tepelné a materiálové toky, vznik vnitřního napětí a deformací v důsledku chladnutí a porézности odlitku. Kromě základního programu, který běží jak na Windows, tak na Linuxu, je možné dokoupit několik rozšiřujících nástrojů, které do programu doplní speciální nástroje pro simulaci vysoko a nízkotlakého lití, nebo pro simulace přesného lití na vytavitelný vosk. [3.21]

### 3.7.3 CastCAE

Castech Inc. Oy, Espoo, Finland

Poslední informace o tomto software a aktualizace byla v r. 1999, umožňuje simulaci kompletního slévárenského procesu pod platformou Windows. [3.18]

### 3.7.4 Flow-3D Cast

Flow science Inc. USA

Hlavním produktem je software zabývající se obecně prouděním kapalin a přenosem tepla. Kromě toho ale nabízí software specializovaný na odlévání. Ten se prodává ve třech verzích: BASIC, EXTENDED a ADVANCED. Již základní verze nabízí veškeré potřebné nástroje pro běžné uživatele. V rozšířené verzi jsou k dispozici například optimalizační nástroje, které navrhnou řešení v případě nálezů nedostatků při simulaci, nebo speciální funkci pro analýzu vad vznikajících při odlévání na spalitelný model. V pokročilé verzi je pak možné simulovat některé nelineární jevy, tepelné projevy vnitřního tření kapalin nebo třeba vymílání zrn z pískových forem. [3.23]

### 3.7.5 MAGMA

MAGMASoft GmbH, Aachen Germany

Opět se jedná o samostatný, tentokrát ale velmi komplexní software, který je možné rozšiřovat o celou řadu modulů. Zajímavostí je zde, že obsahuje rozhraní, ve kterém je možné přímo tvořit parametrické modely stejně jako přímo v CAD programech. Dále zahrnuje funkci správy projektů, díky čemuž je možné se rychleji orientovat při navrhování například sestav. Dnes umožňuje funkci automatické optimalizace technologie s využitím parametrického modelu. [3.24]

### 3.7.6 NovaFlow&Solid

Novacast AB, Ronneby, Sweden

Firma Novacast stejně jako některé předešlé nenabízí pouze softwarové řešení, ale zároveň konzultační služby. Stejně jako předešlé nástroje software od této firmy nabízí simulaci lití v atmosférických podmínkách za sníženého, nebo zvýšeného tlaku, na vytavitelný model a další. Zajímavostí je podle brožury využití speciálního algoritmu pro síťování modelů, díky němuž se zredukuje čas zhruba o 10% ve srovnání s konkurencí při zachování stejné přesnosti. [3.26]

### 3.7.7 ProCAST, QuikCAST

ESI Group, Paris, France

Jediný software, jehož domovská stránka je alespoň částečně lokalizována do češtiny. To sice není žádný argument pro kvalitu tohoto programu, ale minimálně to vypovídá o místní zákaznické podpoře. Jedná se o dva velmi podobné programy, které vypadají velmi podobně, ale ani po detailnějším pročtení webových stránek a materiálů firmy nebyl nalezen zásadní rozdíl kromě toho, že využívají rozdílný matematický model (QuickCast využívá jednodušší model a omezuje se pouze na výpočet plnění, tuhnutí a jednoduchých vad). [3.27]

S ohledem na to, že software byl využit pro řešení této práce, je podrobněji popsán dále v kapitole 3.11.

### **3.7.8 WinCast**

RWP GmbH, Roetgen, Germany

Software opět nabízí řadu nástrojů pro simulaci odlévání a tuhnutí celé řady materiálů do všech běžných typů forem. Software byl aktivní do ca r. 2008. V poslední době nejsou známy informace o aktualizacích. Jazyková lokalizace je pouze orientována na německý jazyk. [3.28]

### **3.7.9 SOLIDCast**

Finite Solutions, Inc., Illinois, USA

Tento program je zaměřen na proces chladnutí a tuhnutí kovů. Kromě standardních funkcí se program odlišuje od ostatních funkcí OPTICast, která údajně umí automaticky optimalizovat, případně předělat celý návrh lícího procesu. [3.29]

Tab. 3.2 Možnost využití všech nalezených simulačních software

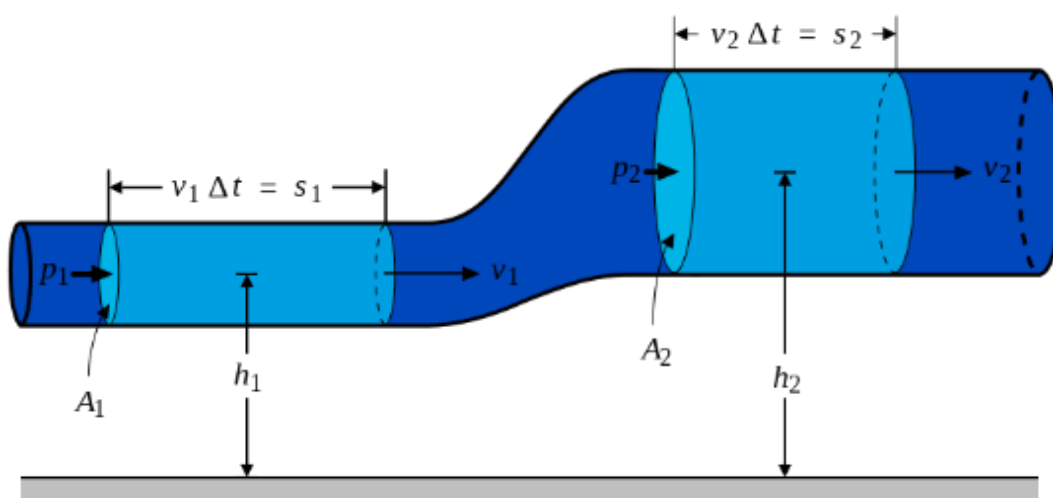
Firma	Produkt	Technologie										
		gravitační lití				tlakové lití			odstředivé lití			Kontilití
		do písku	do kokil	do skořepin	Lost foam	Vysoko-tlaké	nizkotlaké	do kokil	do skořepin	do gurny		
RWP	Win-Cast	X	X	X	X	X	X	X			X	
SAPP S.p.A.	Simulation of dicasting processes		X									
MAGMA Gießereitechno- logie	Simulation of casting processes	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Finite Solutions Inc	Micrest, STAR-Cast, SOLID-Cast, FLOW- Cast 8.5,	X										
FLOW Science	Simulation Software, FLOW 3D Cast v.4.0	X				X						
Any Casting	www.anycastsoft.co m (anycasting v.	X		X		X		X				
ESI Group	QuikCAST; ProCAST	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
NovaCast System AB	Simulation of casting processes	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Schunk Kohlenstofftec- hnik GmbH	Continuous casting										X	
Armstrong Acmite India	Pro Cast		X									
Crescent Foundry Pvt Ltd	Auto Cast and Pro- Engineer	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Novacast	Nova Flow & Solid	X	X	X		X	X	X	X	X	X	
Simtec inc.	SIMTEC	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
ASF	CAP, AMESH	X				X						
	CASTCAE	X	X	X								
JORDAN	BlowView											
Flow Sience	FLOW 3D	X										
AlphaCast	MAVIS&GLENIS	X										
Technanalysis	PASSAGE PowerCast	X										
National CENTRE for Excellence...	RapidCast, Compact	X										
Vulcan	Click2Cast 4.0	X	X			X	X					

### 3.8 Viskoelasticita

Simulace voskových materiálů je však velmi podobná simulaci vstřikování plastových dílů, kde fyzikálně matematický model je založen na viskoelastickém modelu.

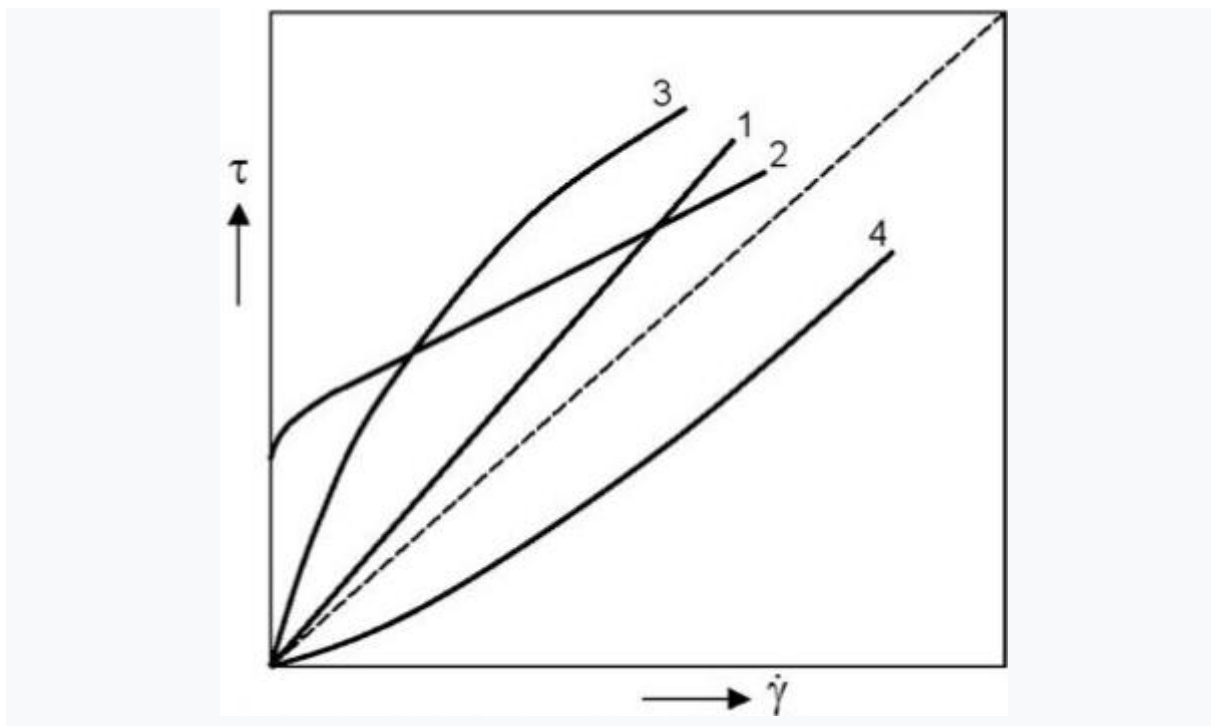
Viscoelasticitu je vlastnost materiálů, která se projevuje společně viskozními a elastickými charakteristikami materiálů při zatížení.

V případě zatížení viskózní materiály, jako je např. med, odolávají smykovému a normálovému napětí lineárně s časem. Elastické materiály se pod napětím přetvářejí a rychle se vrací do svého původního stavu, jakmile se napětí odstraní. Viskoelastické materiály mají prvky obou těchto vlastností, které se projevují jako časově závislé deformace. Pružnost je obvykle výsledkem vazeb související s krystalografickými rovinami v uspořádaných pevných látkách, viskozita je výsledkem difuze atomů nebo molekul uvnitř amorfního materiálu.



Obr. 3. 8 Definice proudění viskoelastického materiálu [3.30]

V 19. století prováděli fyzici jako Maxwell, Boltzmann nebo Kelvin experimenty s tečením plynů, kovů a pryže a jejich schopností se navrátit do původního stavu. Viskoelasticitu byla dále prozkoumána na konci 20. století s nástupem syntetických polymerů, které našly nesčetně uplatnění nejen v průmyslu. Výpočet viskoelasticity silně závisí na viskozitě  $\eta$ . Její převrácená hodnota se nazývá tekutost  $\phi$ . Hodnoty těchto veličin lze vyjádřit jako funkce závislé na teplotě nebo s nimi pracovat jako se zadanými hodnotami.



**Obr. 3.9 Rozdílné typy závislosti  $\tau - \dot{\epsilon}$  [3.32]**

- Pozn.:** 1 – Newtonská kapalina,  
 2 – Binghamská látka,  
 3 – Pseudoplastická kapalina,  
 4 – Dilatantní kapalina

Podle závislosti napětí – rychlost deformace můžeme popsat charakter viskozity jako lineární, nelineární nebo plastický. Pokud je chování materiálu lineární, říkáme mu Newtonovská kapalina. V tomto případě je napětí lineárně úměrné rychlosti deformace. Naopak pokud tato závislost bude nelineární, nazývá se kapalina Nenevtonovská. Existuje taky speciální případ, kdy klesá viskozita za konstantní rychlosti deformace. Materiál chovající se tímto způsobem nazývá tixotropní. Navíc, pokud je napětí nezávislé na rychlosti deformace, materiál se přetváří plasticky. Spousta viskoelastických materiálů vykazuje chování podobné gumě, jehož podstata spočívá v termodynamické teorii elasticity polymerů.

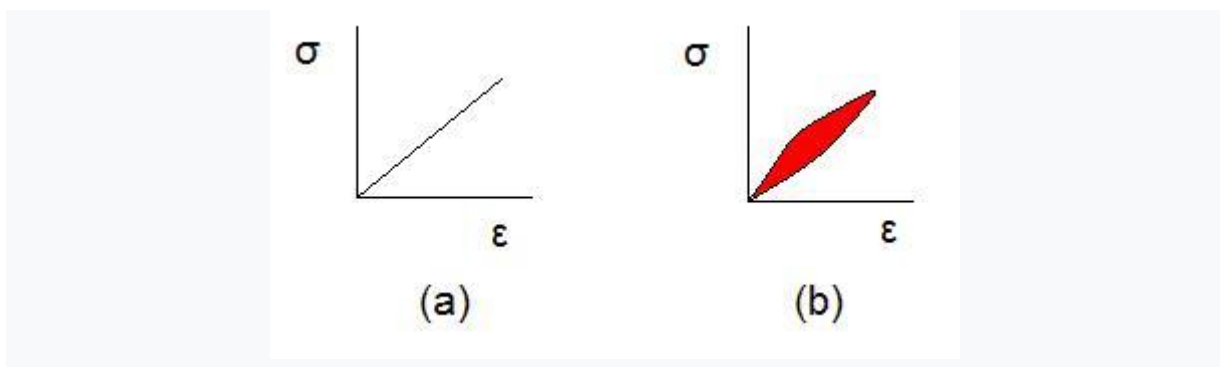
Některé příklady viskoelastických materiálů jsou amorfní polymery, semikrystalické polymery, biopolymery, kovy za vysokých teplot nebo asfalty. K popraskání těchto materiálů dochází v případě rychlého zatížení mimo elastickou oblast. Například také vazy a šlachy se chovají viskoelasticky. K jejich potenciálnímu poničení dochází jak rychlým zatížením, tak jeho velikostí. [3.31]

Viskoelastický materiál vykazuje následující vlastnosti:

- Patrná hystereze ze závislosti napětí – deformace
- Přítomnost relaxace napětí v případě konstantní deformace

- Tečení materiálu – za konstantního napětí roste deformace

### 3.8.1 Porovnání elastického a viskoelastického chování



**Obr. 3.10** Závislost napětí-deformace pro ideálně elastický materiál (a) a viskoelastický materiál (b). Červeně vyznačená oblast v hysterezní smyčce ukazuje množství ztracené energie (v podobě tepelné energie) v průběhu zatěžování a následné relaxace. [3.33]

Viskoelastický materiál vykazuje vlastnosti jak elastické, tak viskózní. Viskózní složka pak způsobuje časově závislou deformaci u viskoelastického materiálu. Čistě elastický materiál nevykazuje žádnou disipaci energie během cyklu zatížení a opětovné relaxace na rozdíl od viskoelastického materiálu. Hysterezi je možné pozorovat v závislosti napětí – deformace pro viskoelastický materiál během zatěžovacího cyklu. Oblast mezi křivkami pro rostoucí a klesající zatížení je rovna uvolněné energii. Ta představuje ztrátu z důvodu plastické deformace, protože viskozita je v podstatě odpor proti teplotně aktivované plastické deformaci.

Viskoelastická probíhá v důsledku molekulární reorganizace. Pokud je aplikováno napětí na materiál, jakým je například polymer, části dlouhého polymerního řetězce mění svoji pozici. Tento molekulární přesun se nazývá tečení. Polymer v průběhu restrukturalizace zůstává v pevném stavu za vzniku určitého vnitřního napětí. Pokud vnitřní napětí dosáhne velikosti aplikovaného zatížení, materiál přestává téct. V případě náhlého odstranění zatížení akumulované vnitřní napětí způsobuje zpětnou deformaci do původního stavu. Materiál tedy teče, což mu dává předponu visko-, a plně se obnovuje, to popisuje přípona – elasticita.

### 3.8.2 Typy modelů viskoelasticity

Lineární viskoelastická popisuje případ, kdy je funkce separabilní - lze oddělit tečení. Všechny lineární viskoelastické modely lze popsat Volterrovou rovnicí pracující s napětím a deformací. [3.34]

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E_{\text{inst, creep}}} + \int_0^t K(t-t')\dot{\sigma}(t')dt' \quad (3.25)$$

Nebo



$$\sigma(t) = E_{\text{inst,relax}} \varepsilon(t) + \int_0^t F(t-t') \dot{\varepsilon}(t') dt' \quad (3.26)$$

kde  $t$  je čas,  $\sigma(t)$  je tenzor napětí,  $\varepsilon(t)$  je deformace,  $E_{\text{inst,creep}}$  a  $E_{\text{inst,relax}}$  jsou okamžité moduly pružnosti pro tečení a relaxaci,  $K(t)$  je funkcí tečení materiálu,  $F(t)$  je funkce relaxace materiálu. Lineární viskoelastická je obvykle použitelná pouze pro malé deformace.

Nelineární viskoelastická popisuje případ, kdy funkce není separabilní. To platí obvykle pro velké deformace, nebo pokud se vlivem deformace mění vlastnosti materiálu.

Anelasticita je speciální případ viskoelastických materiálů, kdy dochází k plnému navrácení materiálu do původního stavu po odstranění zatížení.

### 3.9 Komplexní moduly

Viskoelastická se vyšetřuje pomocí dynamické mechanické analýzy (zkráceně DMA), kdy se malými oscilacemi napětí měří výsledná deformace. [3.43]

- Čistě elastické materiály mají působící oscilující napětí ve fázi s deformačními jevy materiálu, a tedy jejich odezva je tak okamžitá.
- V čistě viskózním materiálu předchází fáze napětí fázi deformace o  $90^\circ$ .
- Viskoelastické materiály mají odezvu někde mezi elastickými a viskózními materiály.

Pro reprezentaci vztahu oscilujícího napětí a deformace se využívá komplexního modulu  $G$ :

$$G = G' + iG'' \quad (3.27)$$

kde  $i$  je imaginární jednotka  $i^2 = -1$ ,  $G'$  je tzv. *storage modulus* a  $G''$  je tzv. *loss modulus*:

$$G' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos \delta \quad (3.28)$$

$$G'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin \delta \quad (3.29)$$

Kde  $\sigma_0$  a  $\varepsilon_0$  jsou amplitudy napětí a deformace, a  $\delta$  je fáze mezi nimi.

### 3.10 Dílčí modely lineární viskoelasticity

Viskoelastické materiály jako amorfny polymery, semikrystalické polymery, biopolymery, nebo dokonce živá tkáň a buňky je možné modelovat za účelem zjištění napětí, deformace nebo síly. Tyto

modely, které zahrnují Maxwellův model, Kelvinův-Voigtův model nebo standardní lineární model pro pevné látky, se využívají pro určování materiálové odezvy pro různé podmínky zatížení. Viskoelastické chování dané elastickými i viskózními komponentami lze modelovat coby lineární kombinaci tlumičů a pružin. Každý model se liší v uspořádání těchto komponent a každý model lze ekvivalentně modelovat jako elektrický obvod. V tomto modelu je napětí reprezentováno elektrickým napětím a změna deformace elektrickým proudem. Elastický modul pružiny je analogií pro kondenzátor (který shromažďuje energii) a viskozita tlumiče je analogií pro odpor (rozptyluje energii). [3.33]

Elastické komponenty, jak bylo již zmíněno, lze modelovat jako pružiny s elastickou konstantou  $E$  dávající formuli:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3.30)$$

kde  $\sigma$  je tenzor napětí,  $E$  je elastický modul materiálu, a  $\varepsilon$  je deformace materiálu způsobená tímto napětím, podobně jako v Hookově zákoně.

Komponenty odpovídající viskozitě lze popsat písem tak, že vztah pro napětí a změnu deformace je:

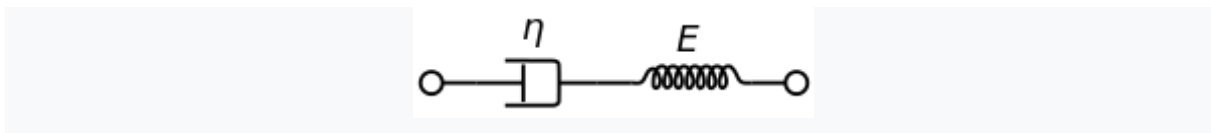
$$\sigma = \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (3.31)$$

kde  $\sigma$  je tenzor napětí,  $\eta$  je viskozita materiálu, a  $d\varepsilon/dt$  je časová derivace deformace.

Vztah mezi napětím a deformací lze pro určité hodnoty napětí zjednodušit. Pro velké napětí/malé časy převažují členy s časovou derivací. Tlumič odolává prodloužení a pro velké napětí ho tak lze aproximovat pevnou tyčkou. Vzhledem k tomu, že pevnou tyčku nelze protáhnout přes svoji původní délku, nepřispívá do systému žádná deformace.

Naopak pro malé hodnoty napětí/velké časy jsou časové derivace zanedbatelné a tlumič tak lze odebrat ze systému – "otevřený" obvod. Nakonec tedy bude k celkové deformaci systému přispívat pouze pružina spojená paralelně s tlumičem.

### 3.10.1 Maxwellův model



Obr. 3.11 Maxwellův model [3.33]

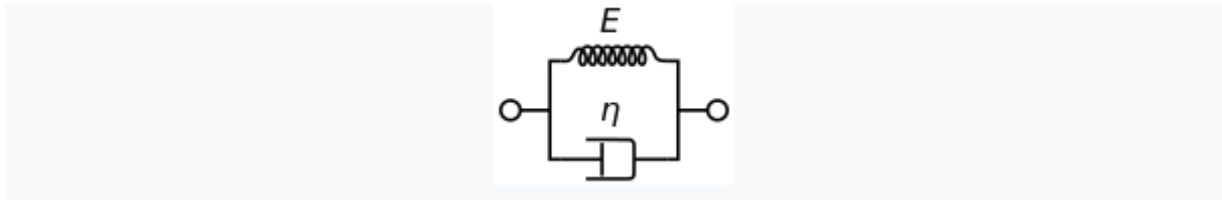
Maxwellův model lze reprezentovat čistě viskózním písem a čistě elastickou pružinou zapojenou do série, jak je znázorněno na obrázku. Model lze zapsat jako rovnicí:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\varepsilon_D}{dt} + \frac{d\varepsilon_S}{dt} = \frac{\sigma}{\eta} + \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} \quad (3.32) \quad [3.33]$$

Pokud je pro tento model materiál vystaven stálé deformaci, dochází k postupné relaxaci napětí. Naopak je-li materiál vystaven konstantnímu napětí, deformace má dva členy. První je elastická komponenta, která se projeví současně a okamžitě relaxuje, dokud nevymizí napětí. Tato komponenta odpovídá pružině. Druhá je viskózní komponenta, která roste s časem, dokud je přítomné napětí. Maxwellův model popisuje exponenciální úbytek napětí v čase, což odpovídá většině polymerů. Jediné omezení tohoto modelu je, že nedokáže přesně popsat tečení materiálu. Maxwellův model pro tečení nebo konstantní napětí predikuje, že deformace vzrůstá lineárně s časem. Naneštěstí u většiny polymerů deformace klesá s časem.

Tento model má využití pro měkké pevné látky: termoplastické polymery v okolí teploty tání, čerstvý beton nebo mnoho kovů při teplotě blízké teplotě tání.

### 3.10.2 Kelvinův–Voigtův model



Obr. 3.12 Kelvin–Voigtův model. [3.34]

Kelvinův–Voigtův model, známý také jako Voigtův model, sestává z Newtonovského pístu a Hookovské elastické pružiny zapojené paralelně, jak je znázorněno na obrázku. Je používán pro popis tečení polymerů.

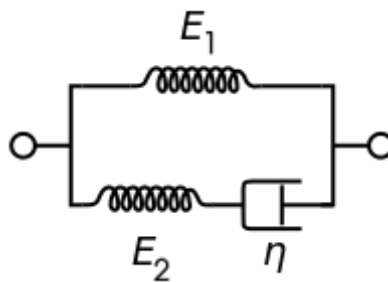
Příslušný vztah je vyjádřen coby lineární diferenciální rovnice prvního řádu:

$$\sigma(t) = E\varepsilon(t) + \eta \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (3.33) \quad [3.34]$$

Tento model popisuje pevnou látku procházející vratným, viskoelastickým napětím. S konstantním napětím ubývá deformace asymptoticky k hodnotě deformace rovnovážného stavu. Když napětí vymizí, materiál postupně relaxuje do svého nedeformovaného stavu. Při konstantním napětí (tečení), je model zhruba realistický, když popisuje deformaci limitně se blížící hodnotě  $\sigma/E$ . Podobně jako u Maxwellova modelu, má i Kelvinův–Voigtův model svá omezení. Model je velmi přesný pro modelování tečení materiálu, nicméně relaxace modelu není příliš přesná.

Aplikace: organické polymery, pryž nebo dřevo při nízkém zatížení

### 3.10.3 Standardní lineární pevný model (Zenerův model)

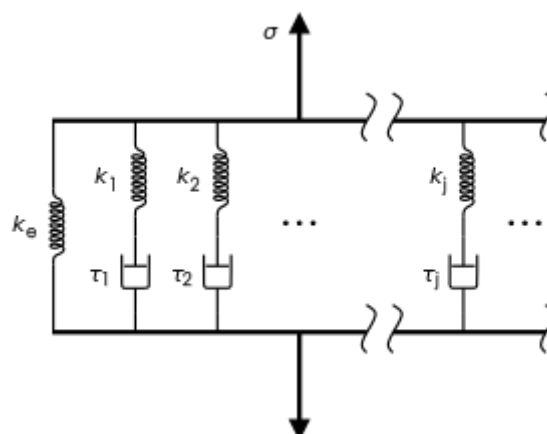


Obr 3.13 Schematické znázornění Zenerova modelu [3.33]

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\frac{E_2}{\eta} \left( \frac{\eta}{E_2} \frac{d\sigma}{dt} + \sigma - E_1 \varepsilon \right)}{E_1 + E_2} \quad (3.34) [3.33]$$

Zenerův model vznikl paralelním spojením Maxwellova modelu a Hookeova tělesa. Většinou se chování reálných těles popisuje Voigtovým modelem. Přesnější měření ale vede k odchýlkám mezi reálným chováním a modelem. Všechny klasické modely považují vliv setrvačných sil za zanedbatelný. Viskózní materiál je představován pružinou a tlumičem v sérii připojených paralelně ještě k pružině. Při konstantním napětí bude modelovaný materiál okamžitě deformován do určité deformace odpovídající elastické složce. Potom se bude deformovat tak, že se bude asymptoticky blížit ustálené deformaci. Druhá fáze odpovídá viskózní složce deformace. Přestože Zenerův model je přesnější v porovnání s Maxwellovým a Kelvinovým-Voigtovým modelem v predikci materiálové odezvy, matematicky vyjádřené výsledky jsou nepřesné pro určení velikosti deformace pro specifické zatížení a tento model je zároveň poměrně složitý na výpočet.

### 3.10.4 Zobecněný Maxwellův model



Obr. 3.14 Schéma Zobecněného Maxwellova modelu [3.34]

Zobecněný Maxwellův model, také známý jako Maxwell-Wiechertův model, je nejobecnějším tvarem lineárního viskoelastického modelu. Myšlenka je taková, že k uvolnění napětí nedochází v

jednom okamžiku, ale je rozloženo v čase. Příčinou je různá délka makromolekul. Tento model má množství dvojic prvků pružina-tlumič, aby dostatečně přesně vystihl časovou závislost poklesu napětí.

### 3.10.5 Pronyho řada

Zobecněný Maxwellův model vhodně vystihuje relaxační chování. Na základě tohoto modelu lze časový průběh relaxačního modulu aproximovat podle vztahů tzv. Pronyho řady (nazýváno také jako relaxační a retardační spektra):

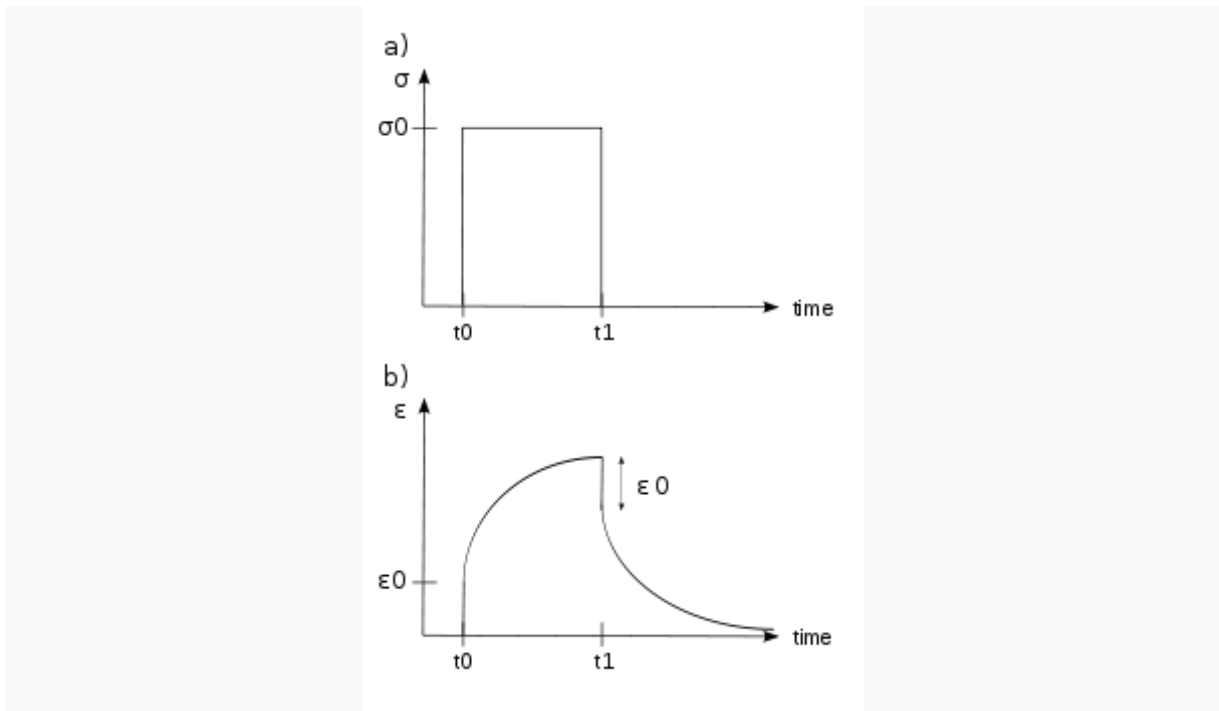
$$E(t) = E_0 - \sum_{i=1}^N (E_{i-1} - E_i) \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (3.35)$$

kde  $E_0$  je okamžitý modul, který odpovídá bezprostředně zatížení (v čase 0 s),  $\tau_i$  je relaxační časový úsek,  $(E_{i-1} - E_i)$  je úbytek relaxačního modulu v příslušném časovém úseku  $\tau_i$ ,  $t$  je uplynulá doba.

### 3.10.6 Vliv teploty na viskoelastické chování

Dvojně vazby polymerů se neustále rozkládají a přeskupují v důsledku tepla. Pod napětím se upřednostňují některé formace na úkor ostatních, takže molekuly polymeru postupně „tečou“ do výhodnějších pozic v průběhu času. Vzhledem k tomu, že tepelný pohyb je jednou z příčin deformace polymerních materiálů, viskoelastické vlastnosti se budou měnit v závislosti na teplotě. Ve většině případů se snižuje modul tečení, definovaný jako poměr použitého napětí vzhledem k časově závislé deformaci, s rostoucí teplotou. V podstatě lze říci, že je zapotřebí méně energie k deformaci viskoelastického materiálu za zvýšené teploty než za snížené teploty.

### 3.10.7 Viskoelastické tečení



**Obr. 3.15 a) Aplikované napětí b) Indukovaná deformace jako funkce času pro viskoelastický materiál [3.33]**

Pokud je materiál vystaven skokové hodnotě napětí, projeví se u viskoelastických materiálů časově závislým nárůstem napětí. Tento jev se nazývá viskoelastické tečení.

V čase  $t_0$  je viskoelastický materiál zatížen konstantním napětím udržovaným po dostatečně dlouho dobu. Pokud se bavíme o viskoelastické kapalině, reaguje materiál deformací, která se zvyšuje až nakonec ztratí integritu. Na druhou stranu viskoelastický tuhý materiál může a nemusí selhat, záleží na velikosti napětí. Pokud je napětí aplikováno na krátký časový úsek, bude se materiál deformovat do času  $t_1$ , po kterém se začne deformace opět nelineárně snižovat do její zbytkové velikosti.

Viskoelastické tečení materiálu může být prezentováno jako časová závislost modulu tečení (konstantní aplikované napětí podělené celkovou deformací v určitém časovém horizontu). Pod kritickou hodnotou je modul viskoelastického tečení nezávislý na napětí.

Viskoelastické tečení materiálu je důležité při zvažování dlouhodobých konstrukčních řešení. Vzhledem k zatížení a teplotním podmínkám mohou konstruktéři volit materiály, které nejlépe vyhovují svojí životností.

### 3.10.8 Měření

Nejběžněji používanými metodami měření viskoelastického chování jsou BVS (broadband viscoelastic spectroscopy) a RUS (resonant ultrasound spectroscopy), protože se dají provádět nad i pod teplotou okolí. Princip obou metod spočívá v použití tlumícího mechanismu při různých frekvencích a časových intervalech [3.33], [3.34].

## 3.11 Simulační software ProCAST

### 3.11.1 Charakteristika softwaru ProCAST

Software ProCAST, jenž poskytuje společnost ESI Group, je modulární systém založený na MPK, který lze využít pro simulaci valné většiny technologií používaných ve slévárenství. Mezi nejčastěji používané predikce programu patří schopnost simulovat přestup tepla, proudění tekutého kovu včetně vzájemného osálení elementů, průběh plnění dutiny formy, tuhnutí a chladnutí odlitků. Součástí softwaru jsou speciální moduly, které umožňují predikovat rozměrové změny, zbytková pnutí, deformaci, mikrostrukturu, poréznost a další výsledné efekty, které jsou součástí sledovaných slévárenských procesů u technologií, jako je gravitační lití, odstředivé lití, tlakové lití, metody lití na spalitelný a vytavitelný model, kontinuální lití a další [H9].

Struktura řešení softwaru ProCAST je propojena tzv. kolem „manažerů“, sjednocující jednotlivé moduly, které lze rozdělit na [H10], [H14]:

- **MeshCAST** – je pre-processor umožňující úpravu a tvorbu povrchové sítě.
- **PreCAST** – je pre-processor propojený s jednotlivými databázemi - vstupními daty.
- **DataCAST / ProCAST** – je main-processor obsahující tzv. „solvery“ - řešitele.
- **VisualCAST** – je post-processor zobrazující výsledek a analýzu simulace s možností exportu dat.

Tuto hlavní skupinu modulů lze dále rozdělit na jednotlivé podmoduly. Výhodou této modulární struktury programu je možnost neustálého rozvoje, který umožňuje doprogramování a implementaci dalších výpočtových podmodulů a funkcí dle zákaznických požadavků.

### 3.11.2 Geometrie a síťování v MashCAST

Modul MashCAST je 3D generátor povrchové sítě, která je tvořena tetraedrickými elementy. Obsahuje analytický nástroj, který usnadňuje importovat geometrii těles vytvořených v softwaru CAD, jako je rozhraní AutoCAD, CATIA, IGES, STEP, ParaSolid, VDA a další, na nichž je vytvořena operační síť. Geometrie součásti je převedena na konečný počet jednoduchých elementů, na jejichž hranicích jsou vzájemně propojeny v konečném počtu uzlových bodů. Program umožňuje měnit velikost výpočtových elementů, jejich automatické vygenerování a opravu výpočtové sítě. Pro technologii lití na vytavitelný model je zde možné automaticky vygenerovat skořepinovou formu i s možností zadání jednotlivých vrstev o různých parametrech [H10I].

### 3.11.3 PreCAST

V tomto kroku jsou nastavena veškerá vstupní data nutná k výpočtu. Součástí tohoto modulu jsou rozsáhlé materiálové databáze, které jsou součástí dodávaného softwaru ProCAST. Lze do nich

zadávat nové materiálové charakteristiky. Součástí je i speciální kalkulátor, umožňující vložení chemického složení materiálu, který automaticky v závislosti na teplotě vygeneruje predikci pro přesné simulování lícího procesu. Výstupem jsou datové soubory dovolující opětovnou úpravu vstupních podmínek [2], [F].

### 3.11.4 DataCAST / ProCAST

V tomto modulu probíhají zvolené propočty:

- **Výpočet plnění (Flow solver)** – Geometrie popsaná MKP je základem vysoké přesnosti k predikci proudění tekutého materiálu uvnitř formy. Pomocí simulace lze zjistit charakter proudění, erozi formy, nezaběhnutí či studené spoje nebo také rozložení plynu ve formě. Výpočet proudění materiálu lze také spojit s teplotní i napětovou analýzou. Zároveň lze zobrazit specifické modely pro analýzu změny proudění tekutého materiálu v průběhu průchodu filtrem a jiné [H5].
- **Teplotní výpočet (Thermal solver)** – Umožňuje simulaci tepelného toku se zohledněním všech tří základních druhů šíření tepla - vedení, proudění a záření. Entalpie materiálu pak popisuje fázovou změnu tepla během tuhnutí a chladnutí materiálu. Simulací tohoto výpočtu lze zkoumat problémy související s teplenými uzly, makrostrukturou a se vznikem staženin a porézности [H6], [H13], [H14].
- **Napětový výpočet (Stress solver)** – Umožňuje stanovit predikci napětí v odlitku a formě, deformace, zbytkového pnutí, únavy materiálu, vzniku trhlin a prasklin. Tento výpočet je propojen se simulací předchozími dvěma výpočty v kombinaci s elastickoplastickými nebo elastickoviskoplastickými vlastnostmi materiálu [H11].

### 3.11.5 VisualCAST

Výsledkem programu je vizuální zobrazení požadovaných výpočtů v podobě grafů, funkcí, vektorových zobrazení, 3D animace, snímků a další. Výstupem může být i automatické vygenerování zpráv ve formátu PDF a PowerPointu. Pomáhá tak při optimalizaci parametrů výrobního procesu, či návrhu tvaru vtokové soustavy apod. [H14].

## 3.12 Základní vstupní data použitých podmodulů

Program dokáže predikovat mnoho slévárenských procesů, proto tedy obsahuje velkou škálu nastavitelných parametrů a vstupních hodnot jednotlivých podmodulů. Kvalita a množství těchto vstupních hodnot výrazně ovlivňuje dosažitelné výsledky.

### 3.12.1 Fluid flow

Je podmodul, který řeší oblast spojenou s predikcí proudění tekutiny během plnění dutiny formy, jako je např. chování volné hladiny při přirozeném / nuceném proudění, tlaku, uzavřeného vzduchu a další. K jeho účinnému výpočtu je zapotřebí nastavení těchto vstupních parametrů:

- Materiál



- Okrajové podmínky (Boundary Condition)
- Procesní podmínky (Process Conditions)
- Výpočtové parametry (Run Parameters)

### 3.12.2 Thermal

Je tepelný podmodul umožňující provádět výpočet tepelného toku za pomoci řešení Fourierovi rovnice vedení tepla včetně uvolňování latentního tepla při tuhnutí. Modul je důležitý pro výpočet rozložení teplotních polí směsi i formy. Umožňuje získat informace o výsledném rozložení tepla, tepelném toku a tepelných přechodech, době tuhnutí, tepelných uzlech a predikci porézности.

K výpočtu je zapotřebí nastavení vstupních parametrů:

- Materiál
- Hraniční plochy (Interfaces)
- Okrajové podmínky (Boundary Condition)
- Procesní podmínky (Process Conditions)
- Počáteční podmínky (Initial Conditions)
- Výpočtové parametry (Run Parameters)

### 3.12.3 Stress

Napěťový podmodul umožňuje provádět termomechanické výpočty. Výsledkem je získání informací o rozložení napětí, elastické a plastické deformaci, elastickém odpružení, vzniku trhlin a prasklin. K výpočtu je zapotřebí nastavení vstupních parametrů:

- Materiál
- Okrajové podmínky (Boundary Condition)
- Výpočtové parametry (Run Parameters)

Tento podmodul navazuje na výpočty, které jsou získány z předchozích dvou zmíněných podmodulů. Každý podmodul lze použít jako samostatný výpočet. Nepoužitím potřebných přecházejících výpočtových podmodulů však dochází ke snižování vypovídající hodnoty výsledné predikce.

## 4. Experimentální zjištění viskoelastických vlastností vosků

Je možné buď ve specializovaném softwaru pro vstřikování plastů, či je možné využít viskoelastický modul v Procastu, kde bylo nutné změřit základní vlastnosti voskových směsí

Dále jsou uvedeny popisy experimentů využité k naměření viskoelastických vlastností voskových modelových směsí – zejména týkající se vosku Remet Hyfill B 417 (s ca 30% plnivý PS kuliček o granulaci 30 – 50  $\mu\text{m}$ , pro něž jsou pak řešeny všechny další experimenty v této práci.

### 4.1 MĚŘENÍ VISKOZITY SMĚSI B417

Viskozita newtonských kapalin je jakožto látkový parametr závislá na teplotě a tlaku. Z tohoto důvodu je měření viskozity jednodušší a dají se využít všechny způsoby měření viskozity, kterými jsou:

- Kapilární viskozimetr
- Kuličkový viskozimetr
- Rotační viskozimetr
- Vibrační viskozimetr

V případě měření viskozity u neneutronských kapalin není viskozita látkový parametr a proto je zapotřebí měřit celou tokovou křivku (reogram), což je velmi obtížné. Pro tato měření se používají přístroje, u kterých je jednoznačně určena hodnota rychlostního gradientu  $j = \frac{du}{dr}$  a je mu přiřazena hodnota tečného napětí:

- Kapilární viskozimetr
- Rotační viskozimetr
- Kuličkový viskozimetr (pouze za omezených podmínek)

Naopak se nehodí přístroje, kde nelze určit laminární proudění nebo kde nelze odečítat hodnoty tečného napětí.

### 4.1.1 Kapilární viskozimetr

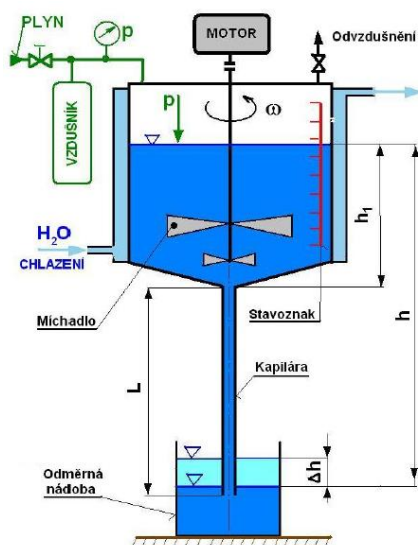
Tento způsob měření vychází z Hagen – Poiseuilleova zákona pro laminární proudění tekutiny v trubici, která má kruhový průřez. Z rovnice pro objemový průtok se vyjádří dynamická viskozita  $\eta$ .

$$\eta = \frac{\pi}{128} \cdot \frac{p_z d^4}{Q \cdot L} = \frac{\pi}{8} \cdot \frac{p_z R^4}{Q \cdot L} = \frac{\pi}{8} \cdot \frac{p_z R^4 \tau}{V \cdot L} \quad (4.1)$$

Nejběžnější provedení těchto viskozimetrů je konstantním tlakovým spádem a měří se objemový průtok kapaliny. Již méně se využívá viskozimetrů s konstantním objemovým průtokem měřené kapaliny, jelikož je obtížné udržet její konstantní dávkování.

Podle výtoku měřené kapaliny z kapiláry dělíme tyto viskozimetry na provedení Ostwaldovo (kapalina vytéká do prostředí vyplněného kapalinou) nebo Ubbelohdovo (kapalina vytéká do volného prostoru, který je otvorem propojen s okolím).

Pro zjišťování viskozity nenewtonských kapalin se používá kapilární přetlakový viskozimetr. Při měření se určuje celá toková křivka (reogram). Kapilára je vedena do kuželového víka s uzávěrem a plášť nádoby je chlazen. Plyn se do nádoby viskozimetru přivádí redukčním ventilem. V oběhu je zaveden vzdušník, který nám vyrovnává tlak. Objemový průtok je měřen pomocí stopek a odměrné nádoby či vážením. [H10]



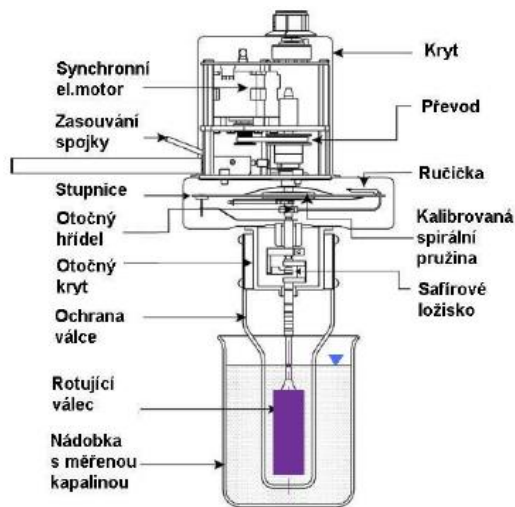
Obr. 4.1 - Přetlakový kapilární viskozimetr [H15]

### 4.1.2 Rotační viskozimetr

Princip metody je založen na otáčení dvou sousedních válců, otáčejících se navzájem okolo společné osy. Rotačními viskozimetry lze přímo odečíst hodnoty úhlové rychlosti  $\omega$ , počet otáček  $n$  v čase ustáleného pohybu jednoho z dvojice válců a odpor kapaliny proti smykovému namáhání, který se projevuje jako krouticí moment. Rotační viskozimetry se používají ve třech provedeních:

- Dva rotující sousední válce

- Rotující kužel a deska
- Dvě rotující desky



Obr. 4.2 – Řez rotačním viskozimetrem [H16]



Obr. 4.3 – Rotační viskozimetr [H16]

Často jsou kladeny požadavky pro přenosnost a mobilitu zařízení, a to zejména z důvodů možnosti měření viskozity přímo na pracovišti – zde je ale problém se zjišťováním závislosti viskozity na teplotě.

### 4.1.3 Vibrační viskozimetr

Způsob funkce těchto měřících přístrojů vychází z tlumených kmitů tělesa ve vazké tekutině. V případě nevynuceného kmitání je používána následující rovnice:

$$\ddot{y} + 2 \cdot b \cdot \dot{y} + \omega_0 \cdot y = 0 \quad (4.2)$$

Pokud počítáme s vynuceným tlumeným kmitáním, rovnice je ve tvaru:

$$\ddot{y} + 2 \cdot b \cdot \dot{y} + \omega_0 \cdot y = \frac{F}{m} \sin \omega \cdot t \quad (4.3)$$

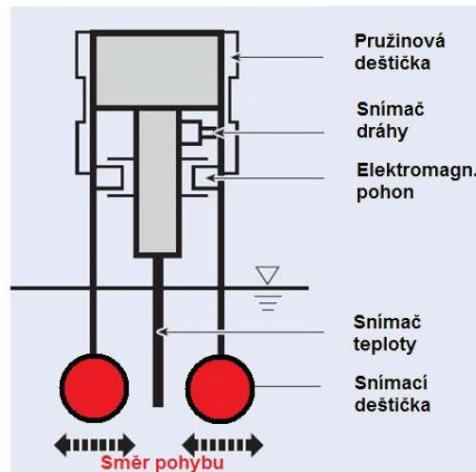
Pro laminární proudění lze určit součinitel tlumení  $b$  dvěma výpočtovými vztahy, přičemž oba vychází z kinematické viskozity

$$b = k \cdot v, \text{ respektive } b = \frac{16 \cdot v}{d^2} \quad (4.4)$$

Principem vibračního viskozimetru je sledování útlumu kmitajícího tělíska v kapalině, které může mít různé geometrické parametry (deska, válec, kruhový terč atd.). Pohyb sledovaného tělíska bývá charakteru torzního, respektive příčného. Sledovanými parametry je příkon pro oscilaci, doba útlumu po přerušení chodu stroje nebo hodnota rezonanční frekvence.

Práce vibračního viskozimetru s měřením útlumu dvou kmitajícími kruhových terčů je znázorněna na obr. 4.4. Viskozita je zde měřena snímáním intenzity budícího elektrického proudu, jenž

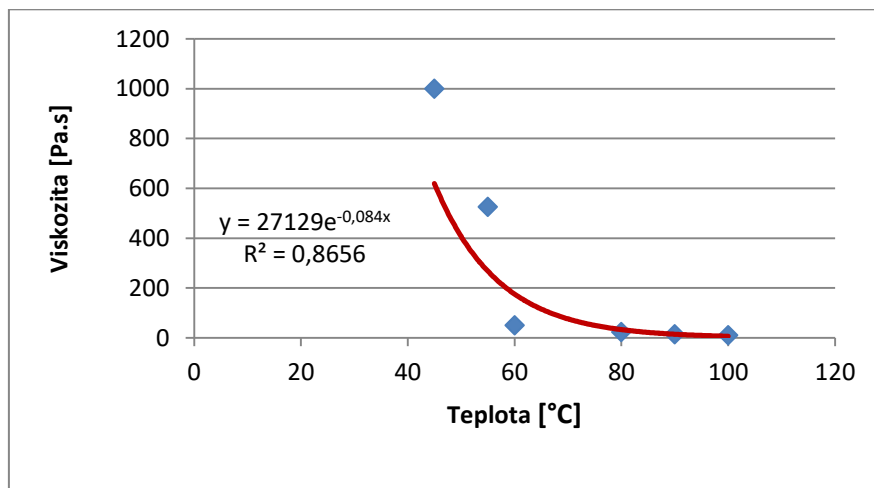
je zapotřebí pro rezonanci obou terčíků a snímáním teploty vzorku kapaliny při konstantní frekvenci 30 Hz a amplitudě o přesnosti 0,1 mm. Před počátkem měření je zapotřebí přístroj kalibrovat kapalinou známé viskozity. Přístroj je vybaven softwarem umožňujícím import dat do výpočetního zařízení, a tím nám dovoluje sledovat změny hodnot v reálném čase.



Obr. 4.4 – Uspořádání vibračního viskozimetru [H16]

#### 4.1.4 Naměřená data viskozity

Pro směs B417 byla využita měření viskozity pomocí přetlakového kapilárního viskozimetru v rozmezí teplot 40 – 100 °C. Závislost naměřené viskozity na teplotě je znázorněna na obr. 3.5.



Obr. 4.5 – Experimentálně zjištěná závislost viskozity pro vosk B417 [H12]

## 4.1.5 DIFERENCIÁLNÍ SKENOVACÍ KALORIMETRIE (DSC) PRO SMĚS B417

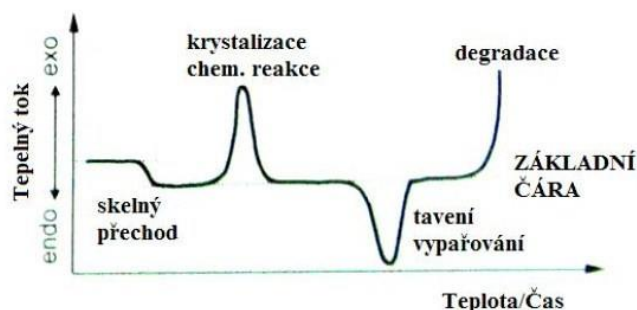
Metoda patří do skupiny termických analýz, pomocí kterých jsme schopni zaznamenávat fyzikální a chemické změny vznikající u sledovaných látek. Metoda DSC je založena na měření přísunu tepelné energie v takovém množství, aby teplota vzorku a teplota referenčního vzorku byla identická.

Zaznamenává tedy energii potřebnou pro udržení nulového teplotního rozdílu mezi vzorkem referenčním a měřeným.

Použitím měření metodou DSC lze určit velké množství hodnot [4.6]:

- Tepelná kapacita
- Absorbovaná a uvolněná energie
- Bod tání  $T_m$
- Teplota skelného přechodu  $T_g$
- Teplota krystalizace  $T_c$
- Měrné teplo

Výstupem diferenciální skenovací kalorimetrie je diagram popisující závislost tepelného toku na čase nebo na teplotě.



Obr. 4.6 – Schematický diagram DSC křivky [H15]

Během procesu dochází k fyzikálním a chemickým změnám, které vedou k rozdílným hodnotám vnitřní energie materiálu. V případě izobarického děje nazýváme změnu vnitřní energie v závislosti na čase jako změnu entalpie  $\Delta H$ .

$$\Delta H = \int c_p \cdot dT \quad (4.5)$$

Protože přímé určení měrné tepelné kapacity za konstantního tlaku  $c_p$  ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ) je náročné, využijeme k tomuto účelu tepelný tok  $\dot{Q}$ , který je tepelné kapacitě přímo úměrný.

$$\dot{Q} = m \cdot c_p \cdot v_h \quad (4.6)$$

Pokud dochází ke zvyšování entalpie v soustavě, probíhající děje se nazývají endotermické a patří mezi ně ohřev, vypařování, skelný přechod. Naopak exotermické reakce vedou ke snížení entalpie soustavy a patří sem krystalizace, vytvrzování a rozklad.

Rozlišujeme dvě základní DSC metody měření tepelných přechodů v měřeném a referenčním vzorku:

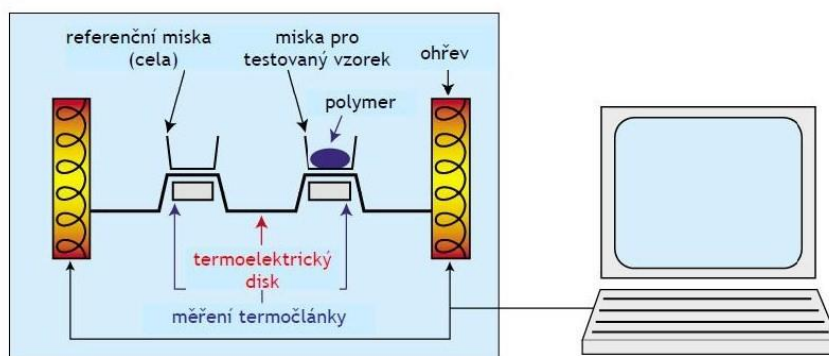
a) Heat – flux DSC

Během této metody s tepelným tokem je měřen rozdíl teploty měřeného a srovnávacího vzorku. Oba vzorky jsou umístěny v jedné komoře na nosičích s teplotními čidly a společným vyhříváním. Teplota je průběžně měřena a přepočítávána na změnu tepelného toku. Oba tepelné toky, vedoucí do vzorků, jsou konstantní, avšak jejich teploty jsou rozdílné.

b) Power compensation DSC

Tato metoda s kompensací příkonu využívá dvou oddělených testovacích komor. Každá z nich má svůj tepelný zdroj a měřící zařízení. V momentě, kdy nastane u měřeného vzorku změna teploty, dojde ke změně velikosti dodávaného příkonu do komory s měřeným vzorkem. Systém se tedy snaží po dobu probíhajícího měření udržet nulový rozdíl teplot mezi oběma vzorky pomocí změn energie. Všechny probíhající změny jsou průběžně zaznamenávány.

Pro měření metodou DSC lze použít vzorky malých hmotností (1 až 100 mg). Každý z nich je vložen do folie a kovových či keramických nádob z důvodu ideálního dotyku s topným tělískem a teplotním čidlem. Rychlost ohřívání je při metodě DSC poměrně vysoká ( $0,5$  až  $80$   $^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ ).



**Obr. 4.7 – Schéma principu metody DSC [H15]**

#### 4.1.6 4.1 Vlastní měření DSC

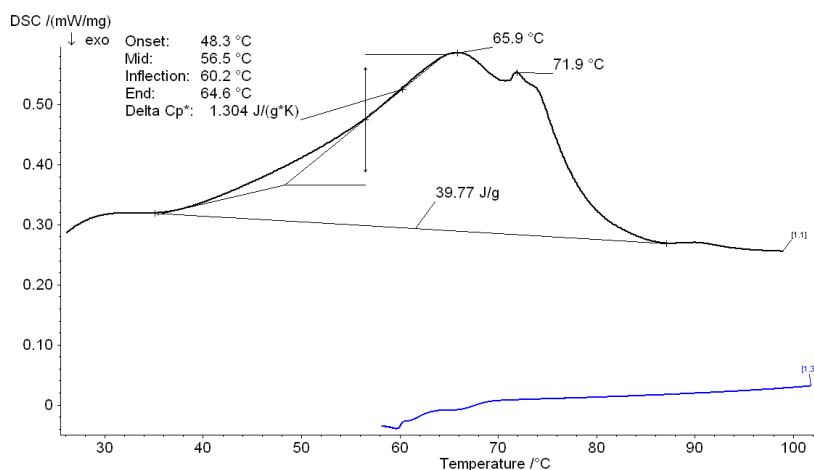
Měření vlastností voskové směsi proběhlo na pracovištích Fakulty strojní ČVUT v Praze (Ústav materiálového inženýrství a Ústav procesní a zpracovatelské techniky)

Z vosku musel být oddělen měřitelný vzorek o velikosti 2 mm z důvodu malého prostoru měřicího kalíšku. Do prostoru pece je vháněna ochranná atmosféra (dusík) rychlostí  $50 \text{ ml. min}^{-1}$ , pod váhy je množství vháněného dusíku nižší  $20 \text{ ml. min}^{-1}$ . Hmotnost voskového vzorku je  $14,1 \text{ mg}$ , oproti hmotnosti porovnávacího vzorku, jenž váží  $24 \text{ mg}$ . Průběh teplot během měření je znázorněn v tabulce 4.1, přičemž startovací teplota je  $16 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Tab. 4.1 Velikost teplot během měření DSC**

Interval teplot	Rychlost ohřevu	Rychlost ochlazování
16 → 100 °C	10 °C. min <sup>-1</sup>	-
100 → 95 °C	-	1 °C. min <sup>-1</sup>
95 → -80 °C	-	5 °C. min <sup>-1</sup>

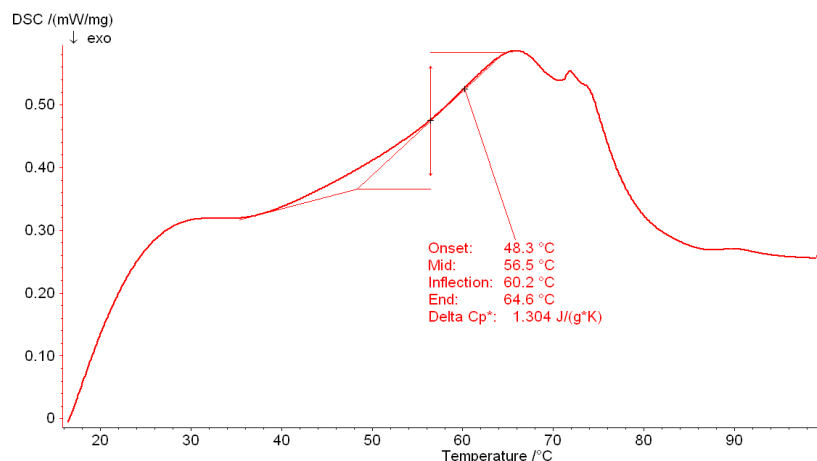
Výsledné hodnoty měření pomocí DSC jsou znázorněny na obr. 4.3. Křivka ohřevu ukazuje první hodnotu extrému při teplotě  $65,9 \text{ }^\circ\text{C}$ , což je teplota tání. Při teplotě  $71,9 \text{ }^\circ\text{C}$  dochází ke ztrátě charakteristického zbarvení a vosk se začne vypařovat. Energie potřebná k této přeměně je  $39,77 \text{ J.g}^{-1}$ . Součinitel tepelné kapacity pro vyznačenou oblast na obr. 4.8. je  $c_p = 1,304 \text{ J.kg}^{-1}.K^{-1}$ .



**Obr. 4.8 – Výsledná DSC křivka**

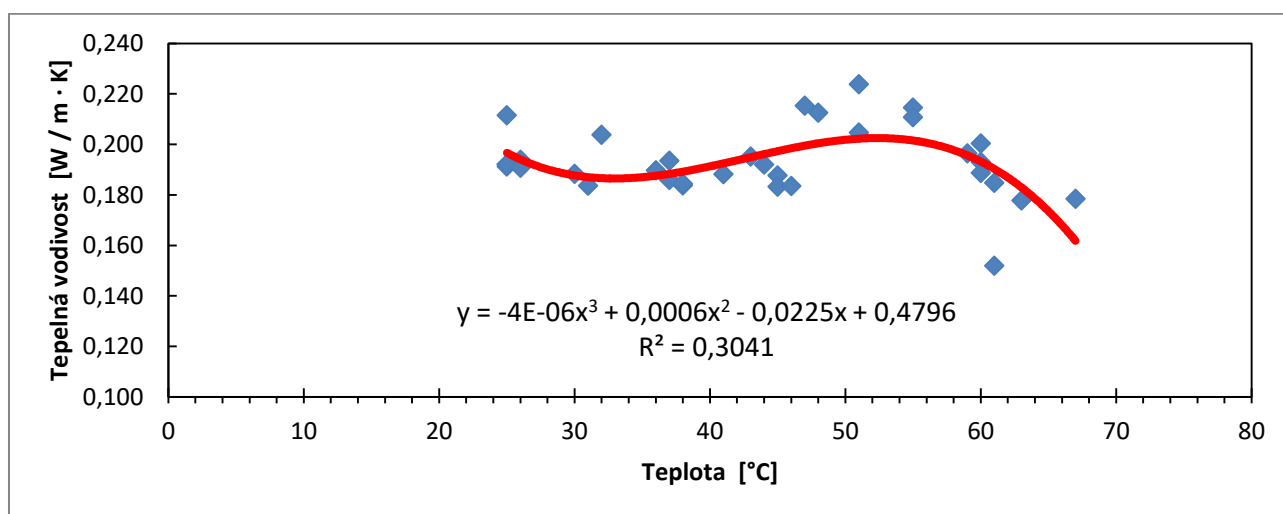
Obr. 4.8 znázorňuje průběh závislosti tepelného toku již od počáteční teploty  $16 \text{ }^\circ\text{C}$ , avšak počáteční část diagramu se doporučuje pro vyhodnocování nepoužívat z důvodu nepřesnosti měření, která je zapříčiněna vyrovnáváním teplot mezi oběma vzorky.





**Obr. 4.9 – Závislost tepelného toku při ohřevu vzorků**

Pro zkoušky byl použit dodaný granulát od dodavatele. Z těchto zkoušek byly dány dohromady závislosti – zde je pro demonstraci uvedena pouze tepelná vodivost. S ohledem na velký rozptyl naměřených hodnot jsme použili pouze body a tyto body proložili polynomickou funkcí, kterou jsme zadali do databáze simulačního softwaru (obr. 4.10). [H10]



**Obr. 4.10 – Závislost tepelné vodivosti na teplotě použitá do databáze ProCASTu**

#### 4.1.7 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ KOEFICIENTU TEPelnÉ ROZTAŽNOSTI

Tento experiment vznikl za účelem budoucího rozšíření materiálové databáze simulačního softwaru ProCAST. Jeho úkolem bylo za pomoci tenzometrických snímačů zjistit potřebné informace a připravit podmínky pro měření grafické závislosti napětí na teplotě. Celý experiment byl uskutečněn na Ústavu strojírenské technologie, Fakulty strojní ČVUT v Praze.

### 4.1.8 Příprava voskových vzorků a jejich měření

Výroba voskových vzorků probíhala roztavením voskového granulátu výrobního označení vosku Hyfill B417 při teplotě 75 °C ve voskovém vstřikovači MINIWAX-S od výrobce DOGENDORF, který je na obr. 5.1. Následovalo jednotlivé odlití řady voskových vzorků (viz obr. 5.3) o rozměrech 51 x 20 x 11 mm do malé formy z materiálu PLA, viz obr. 5.2.



Obr. 4.11  
MINIWAX-S

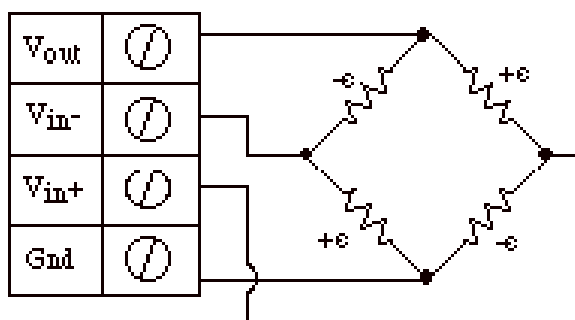


Obr. 4.12 Malá forma z PLA



Obr. 4.13: Voskový vzorek

Po ustálení teploty a rozměrů, po dobu více jak 24 hodin byly všechny vzorky seškrábáním vosku za pomoci nože zarovnány a upraveny na rozměry 50 x 20 x 10 mm. Dále byly na vzorky přilepeny dva tenzometry, které se s dalšími dvěma volnými tenzometry zapojily do můstku podle schématu na obr. 4.14 do měřicího přístroje s označením i430 od výrobce OMEGA, který je na obr. 4.15 [H17].



Obr. 4.14 Zapojení Wheatstoneův můstek

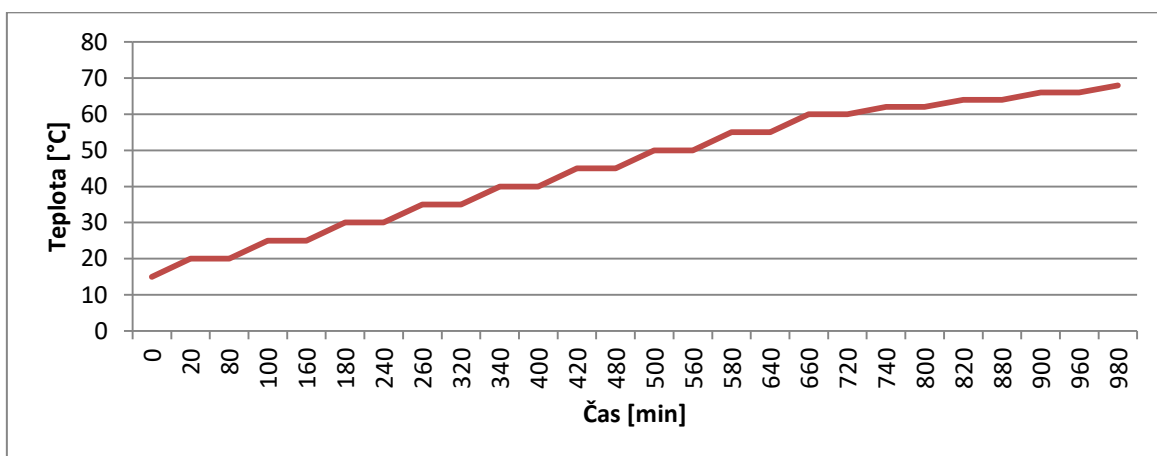


Obr. 4.15 Měřicí hardware i430

Při zapojování byly použity čtyři stejné tenzometry s výrobním označením KFG-10-120-C1-11L1M2R. Voskový vzorek byl na výšku přilepen na skleněnou desku, viz obr. 4.16. Celá tato sestava byla na krátkou dobu umístěna z teploty vzduchu v místnosti 15 °C do komorové pece LAC, kde se pozvolně zahřívala dle závislosti na obr. 4.17 tak aby nedošlo k odpojení tenzometru od vosku.



**Obr. 4.61** Sestava voskového vzorku s tenzometry



**Obr. 4.17** Závislost postupného ohřevu na čase pro snímání tenzometry

#### 4.1.9 Měření

Při měření lze nastavit jednotky snímaného napětí ve V, mV nebo  $\mu\text{V}$ . Dále je možné zvolit časový krok záznamu. Lze také nastavit, jak dlouho budou snímány hodnoty, nebo přímo navolit číselné omezení počtu odměřených hodnot. V tab. 4.2 je zobrazena část výstupních hodnot provedeného experimentu.

**Tab. 4.2: Ukázka naměřených hodnot**

p.č.	Nam. hodn [μV]	p.č.	Nam. hodn [μV]	p.č.	Nam. hodn [μV]
1	-354,3221	11	-311,2610	21	-271,3074
2	-349,8827	12	-307,2656	22	-267,7560
3	-345,4434	13	-302,9743	23	-263,7607
4	-341,1522	14	-298,9790	24	-260,2092
5	-336,8609	15	-294,9836	25	-256,5098
6	-332,4216	16	-290,8403	26	-252,8104
7	-328,1302	17	-287,1409	27	-248,9631
8	-323,8389	18	-282,9975	28	-245,2637
9	-319,6956	19	-279,0022	29	-241,5643
10	-315,5523	20	-275,3028	30	-237,8649

#### 4.1.10 Zhodnocení

Naměřené hodnoty zobrazují pozvolný nárůst napětí. Nárůstem teploty vzorku v komorové peci došlo k přechodu ze záporných hodnot na kladné hodnoty. Jinak řečeno vlivem tepelné roztažnosti vzorku bylo odstraněno tlakové napětí s následným přechodem do tahového napětí.

Oproti tuhosti použitých tenzometrů se voskové materiály při zvyšování teploty stávají příliš měkké. Pro získání dostatečné vypovídající charakteristiky chování voskové směsi bylo nezbytné několikanásobně opakovat měření se společným porovnáním se známým referenčním materiálem. Tím se dá vyloučit chyba vzniklá při měření voskové směsi, neboť tenzometry jsou vhodné pro měření materiálů s vyšší teplotou tavení, jako jsou kovy. Naměřené hodnoty vykazují ještě větší rozptyl než u termomechanických vlastností ( $R^2=0,25$ ).

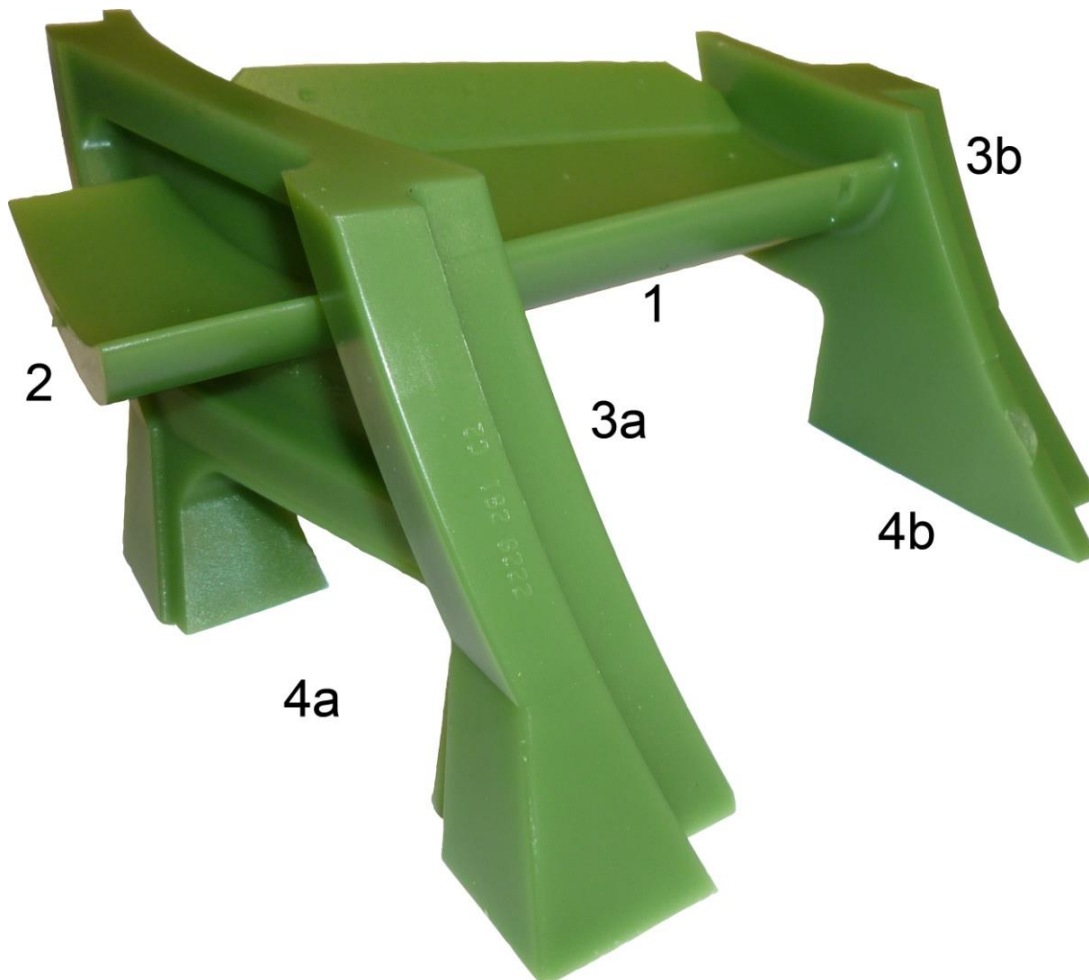
## 5. Experimentální řešení modelu segmentu lopatky

### 5.1 Popis voskového modelu

Tato práce se zaměřuje na optimalizaci zhotovení voskového modelu pro výrobu budoucího odlitku segmentu lopatky oběžného kola turbíny s označením 11-M-5, jenž je produkován ve slévárně Prague Casting Services a.s. Model je jednopatrový segment, který je vytvořen z vosku a keramického jádra. Po odlití jsou segmenty poskládány tak, aby vytvořily oběžné kolo. Jeden voskový segment i s nálitky váží 151,6 g s největšími rozměry 183 x 81 x 74 mm. [H14]

Základní části segmentu voskového modelu (viz obr. 5.1) jsou:

1. Lopatka - náběžná hrana, plynová cesta (konkávní / konvexní část) a odfuková hrana
2. Keramické jádro (v tomto případě zalité voskem)
3. Boční stěny – (a) vnější / (b) vnitřní boční stěna
4. Nálitky – (a) dva na vnější boční stěně, (b) jeden na vnitřní boční stěně



*Obr. 5.1: Voskový model segmentu lopatky*

## 5.2 Popis pracoviště pro výrobu voskových modelů

Pracovištěm pro výrobu voskového modelu je vstřikolis typu LEYDEN se zásobníkem voskové směsi. Stroj umožňuje řídit nastavení hlavních parametrů jako je teplota zásobníku a trysky, vstřikovací a svírací tlak a čas doby vstřikování. Každý druh vyráběných voskových modelů má vlastní návodku zahrnující parametry pro lisování, které jsou zobrazeny v tab. 5.1 a doporučený postup manipulace pro otevírání a zavírání formy.

**Tab. 5.1: Parametry pro lisování**

Číslo formy	MAN VANE	Teplota zásobníku	70 ± 2 °C
Keramické jádro	Ano	Teplota trysky	78 ± 2 °C
Typ vosku	B417	Vstřikovací tlak	180 p.s.i.
Typ lisu	LEYDEN	Svírací tlak	800 p.s.i.
Chlazení desek	Ne	Rychlost plnění	Max
Typ chladítka	-	Přípravek pro chlazení modelu	Ne
Čas vstřikování	90 s	Čas chlazení	N/a
Čas tuhnutí	-	Počet kusů na platě	12

Pozn.: 1 p.s.i. = 0,006894757 MPa

Matečná forma (viz. obr. 5.2) je vyrobena ze slitiny hliníku s ocelovými prvky. Mezi jednotlivými vstřikovacími cykly je nutné po 10 cyklech provést ošetření separačním prostředkem (silikonový olej Silikal 93), který zabraňuje ulpívání voskového modelu na stěnách formy. Časté používání separačního prostředku má za následek vytvoření filmu, který je příčinou nežádoucích map na povrchu odlitku.



**Obr. 5.2: Matečná forma pro výrobu voskového modelu**

## **5.3 Návrhy technologických podmínek a jejich ověření**

### **5.4 Zhotovení voskových modelů**

Ve firmě Prague Casting Services a.s. bylo vyrobeno celkem dvacet osm voskových modelů segmentu lopatky. Aby měl experiment vypovídající hodnotu, zahrnoval vždy změnu jednoho parametru pro tři zhotovené modely. Výrobní parametry voskových modelů viz tab. 5.2.

Vzhledem k vysoké ceně jednoho keramického jádra (přibližně 400 Kč/kus) byly pro účely tohoto experimentu zhotoveny modely bez jader. Vosk tedy zaplnil i prostor, kde je vždy umístěno keramické jádro. Kladnou stránkou tohoto kroku může být to, že nepřítomnost jádra nebude klást žádný odpor, a tím může dojít k projevu deformací v mnohem větší míře.

Tab. 5.2: Experimentální změna parametrů při výrobě voskových modelů

M. č.	Čas měření [hh:mm]	Teplota trysky [°C]	Teplota zásobníku [°C]	Vstřikovací tlak [p.s.i.]	Svírací tlak [p.s.i.]	Čas cyklu [s]	Chladicí médium [°C], [min]
Úprava parametru		73 / 78	68	180 / 250	800	70 / 90 / 120	Voda / Vzduch
1	9:24:10	73	68	180	800	90	Vzduch 21°C
2	9:27:32						
3	9:31:58						
4	9:36:44	74 *	68	180	800	120	Vzduch 21°C
5	9:40:44	74 *					
6	9:45:34	75 *					
7	9:50:22	74 *	68	180	800	90	Vzduch 21°C
8	9:55:16	76 *					
9	9:59:38	77 *					
10	10:03:58	78	68	180	800	90	voda 10°C, 3 min
11	10:08:28						
12	10:14:24						
13	10:17:48	78	68	180	800	90	voda 10°C, 5 min
14	10:24:08						
15	10:30:58						
16	10:40:16	78	68	180	800	90	Vzduch 21°C
17	10:43:40						
18	10:47:10						
19	10:51:06	78	68	180	800	120	Vzduch 21°C
20	10:55:34						
21	10:59:52						
22	11:03:54	78	68	180	800	70	Vzduch 21°C
23	11:07:30						
24	11:10:22						
25	11:13:26	78	68	180 → 250 **	800	70	Vzduch 21°C
26	11:18:24	78	68	250	800	90	Vzduch 21°C
27	11:24:08						
28	11:27:54						

Pozn.:

\* Postupná změna teploty trysky

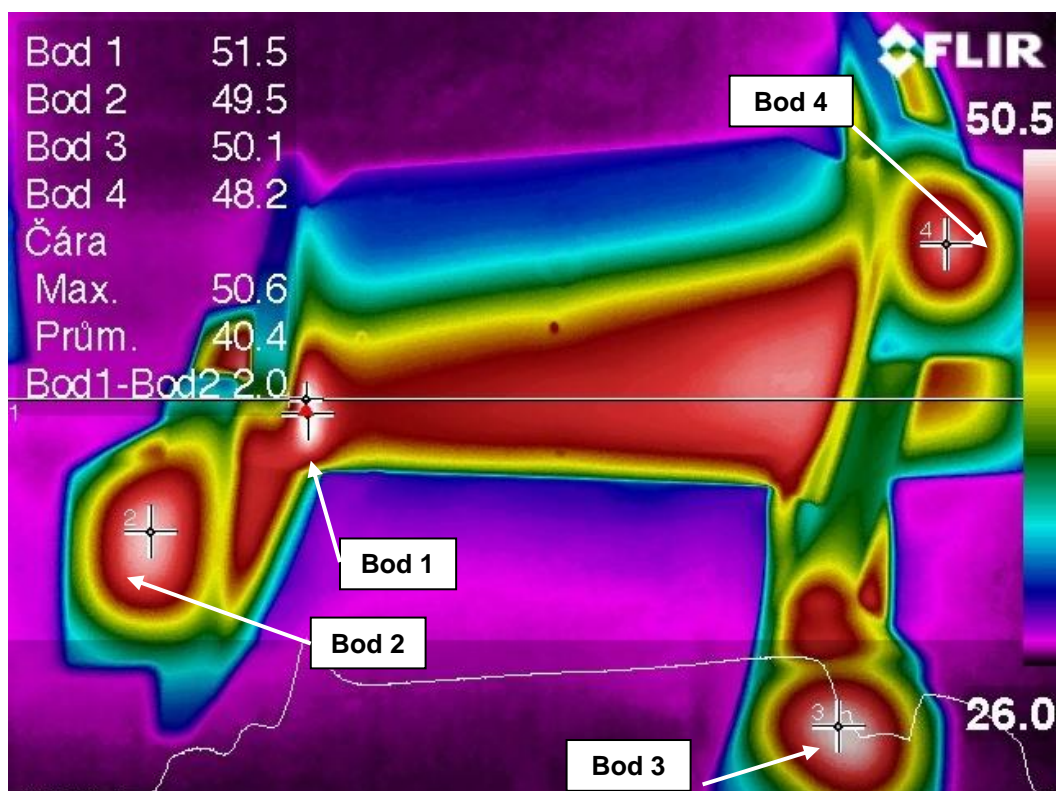


\*\* Změna vstřikovacího tlaku v průběhu cyklu

- Standardní nastavení
- Změna parametru
- Nutný přechodový stav (změna teploty, tlaku)

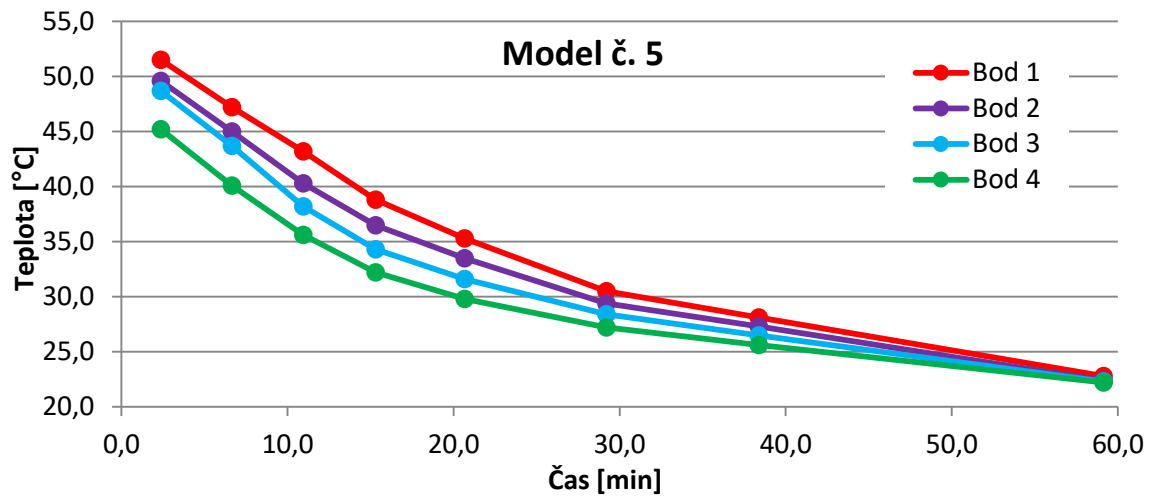
## 5.5 Hodnocení teplotního pole chladnacího modelu

Po zhotovení voskových modelů, byly za pomoci termokamery výrobce FLIR průběžně snímány termogramy, které zobrazují teplotní pole chladnacího voskového modelu. Pořízené fotografie byly jednotlivě vyhodnoceny v softwaru FLIR Tools. Na obr. 5.3 je vidět teplotní pole voskového modelu chladnacího volně na vzduchu při teplotě 21 °C sejmутého přibližně 30 s po vyjmutí z matečné formy. Tento program poskytuje vyhodnocení základních informací pořízeného snímku. V pravé části obrázku je zobrazena stupnice teplotního pole. Dále je možné libovolně umístit svislou nebo vodorovnou přímku, která v dolní části obrázku zobrazuje průběh teplotního pole v řezu vynesené přímky. Dalším nástrojem je vkládání jednotlivých bodů, které zobrazují teplotu umístěného bodu. Pro vyhodnocení tepelné závislosti byly zvoleny čtyři body. První bod byl umístěn do nejteplejšího místa modelu, jenž je styk dvou stěn. Zbylé tři body byly umístěny do náliček, neboť jsou dalším nejteplejším zdrojem tepelných uzlů. Výpis naměřených hodnot teplot chladnacích voskových modelů číslo 5, 12 a 13.



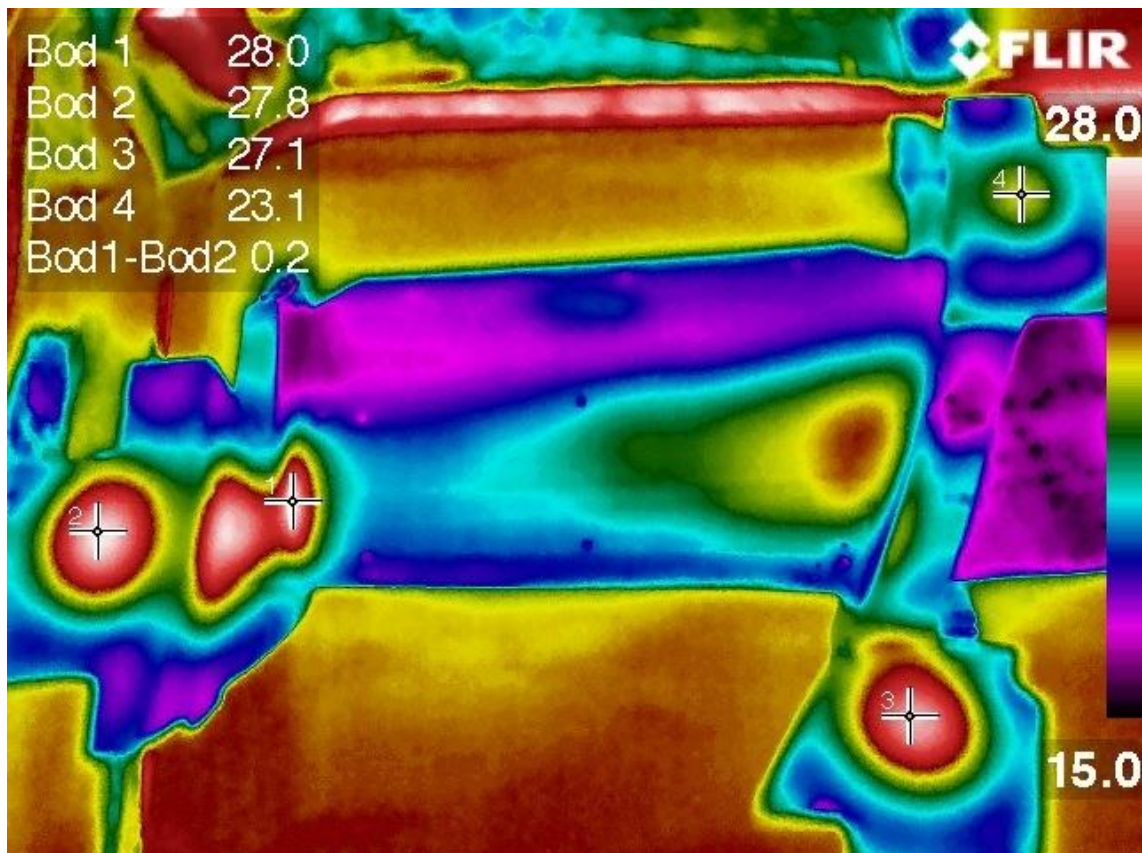
Obr. 5.3: Teplotní pole voskového modelu chladnacího volně na vzduchu

Graf na obr. 5.4 zobrazuje tepelnou závislost voskového modelu, který byl vyjmut z matečné formy a volně ochlazován na vzduchu při teplotě 21 °C.



**Obr. 5.4:** Tepelná závislost voskového modelu chladnoucího volně na vzduchu při teplotě 21 °C

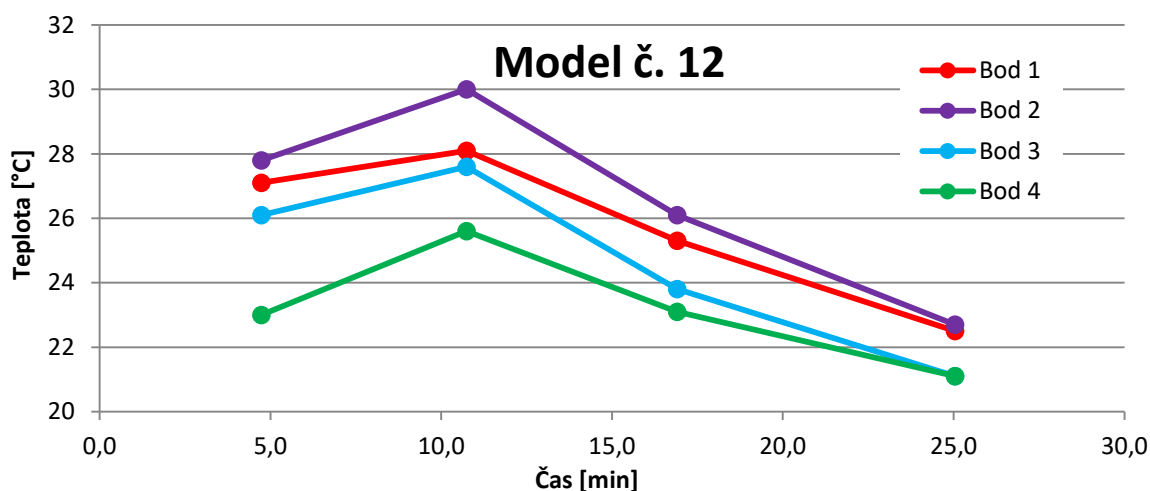
Obr. 5.5 zobrazuje teplotní pole voskového modelu, který byl po vyjmutí z matečné formy umístěn na 3 min do vodní lázně o teplotě 10 °C. Následně probíhalo volné chlazení na vzduchu při teplotě 21 °C.



**Obr. 5.5:** Teplotní pole voskového modelu po 3min chlazení ve vodní lázni o teplotě 10 °C

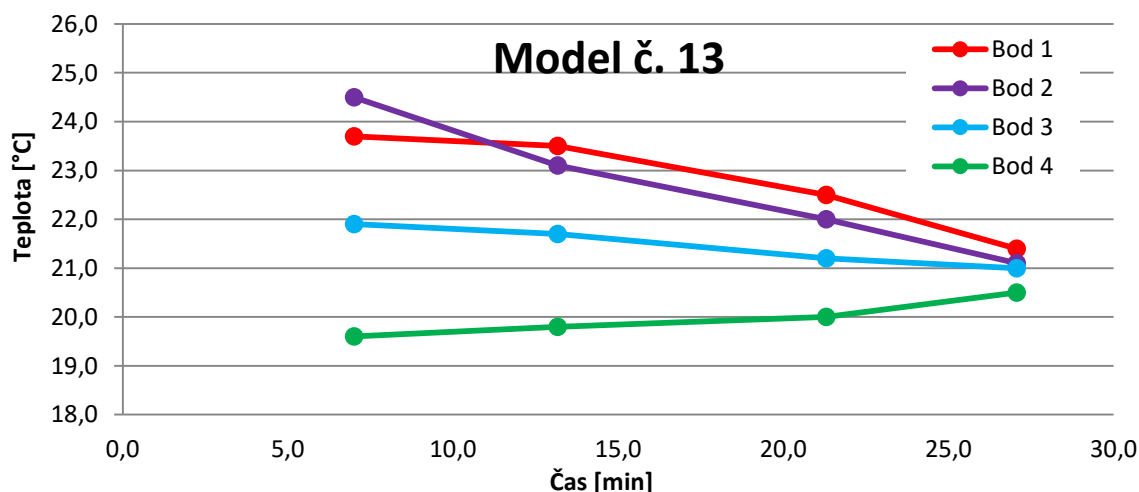
Tímto krokem byly tenké části modelu ochlazeny pod teplotu vzduchu v místnosti. Po vyjmutí modelu z vodní lázně začaly neochlazené tepelné uzly ohřívat zpátky své okolí. To se projevilo zvýšením teploty na pořízených snímcích. Tato tepelná závislost je zobrazena na obr. 5.6. Časový počátek křivek je posunut o čas potřebný k manipulaci s voskovým modelem a dobu chlazení, neboť v tento moment nebylo možno pořídit termosnímky.

Chlazením ve vodní lázni byl dosud nejteplejší bod 1 překonán teplotou v bodě 2, který je umístěn v nejobemnějším nálitku.



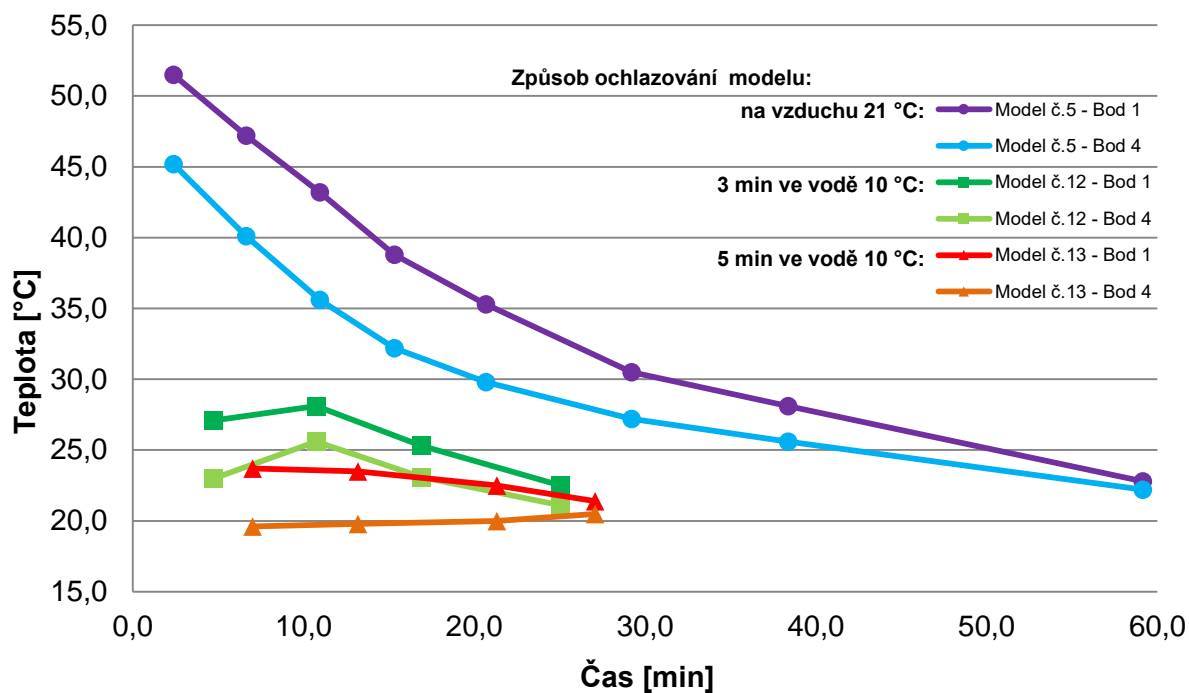
**Obr. 5.6** Tepelná závislost voskového modelu po 3min chlazení ve vodní lázni o teplotě 10 °C

Stejným postupem byl zkoušen vliv 5min chlazení ve vodní lázni, jehož tepelnou závislost zobrazuje obr. 5.7. V tomto případě byly tepelné uzly více ochlazený. Nedocházelo proto k zpětnému ohřívání jejich okolí. Naopak tepelný uzel v bodě 4 se dostal pod teplotu vzduchu v místnosti.



**Obr. 5.7:** Tepelná závislost voskového modelu po 5min chlazení ve vodní lázni o teplotě 10 °C

Následující obr. 5.8 porovnává chování tepelných závislostí bodu 1, který je nejteplejším místem na modelu a bodu 4, který je chladnější tepelný uzel. Je vidět, že chlazení ve vodě zkracuje dobu ochlazování na teplotu blízkou 21 °C o víc než polovinu.



Obr. 5.8: Porovnání tepelných závislostí použitých metod ochlazování

## 5.6 Měření voskového modelu

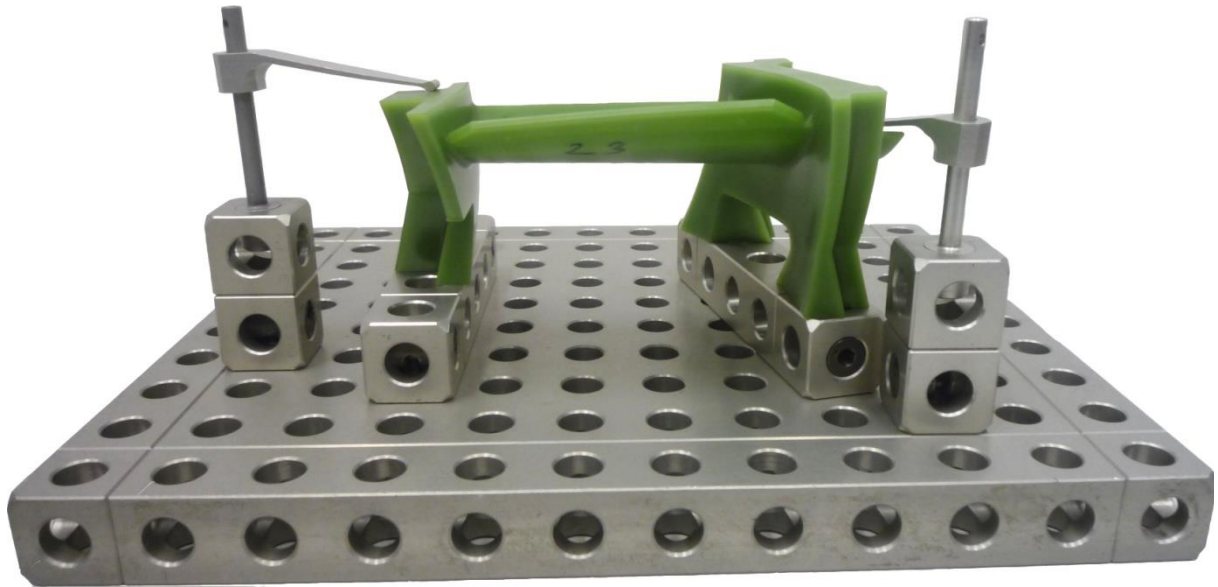
### 5.6.1 Popis měření

V laboratořích fakulty ČVUT v Praze bylo proměřeno všech dvacet osm voskových modelů na souřadnicovém měřicím stroji typu MC 850 od výrobce Carl Zeiss. Stroj je vybaven aktivním skenovacím systémem Vast XT s rozsahem měřicí plochy ( $x, y, z$ ) 850 x 1 200 x 650 mm a pevnou měřicí hlavou. Předem je nutné sestavit vhodnou měřicí hlavu, která dokáže snímat velikosti odchylek v požadovaných směrech, viz obr. 5.9.



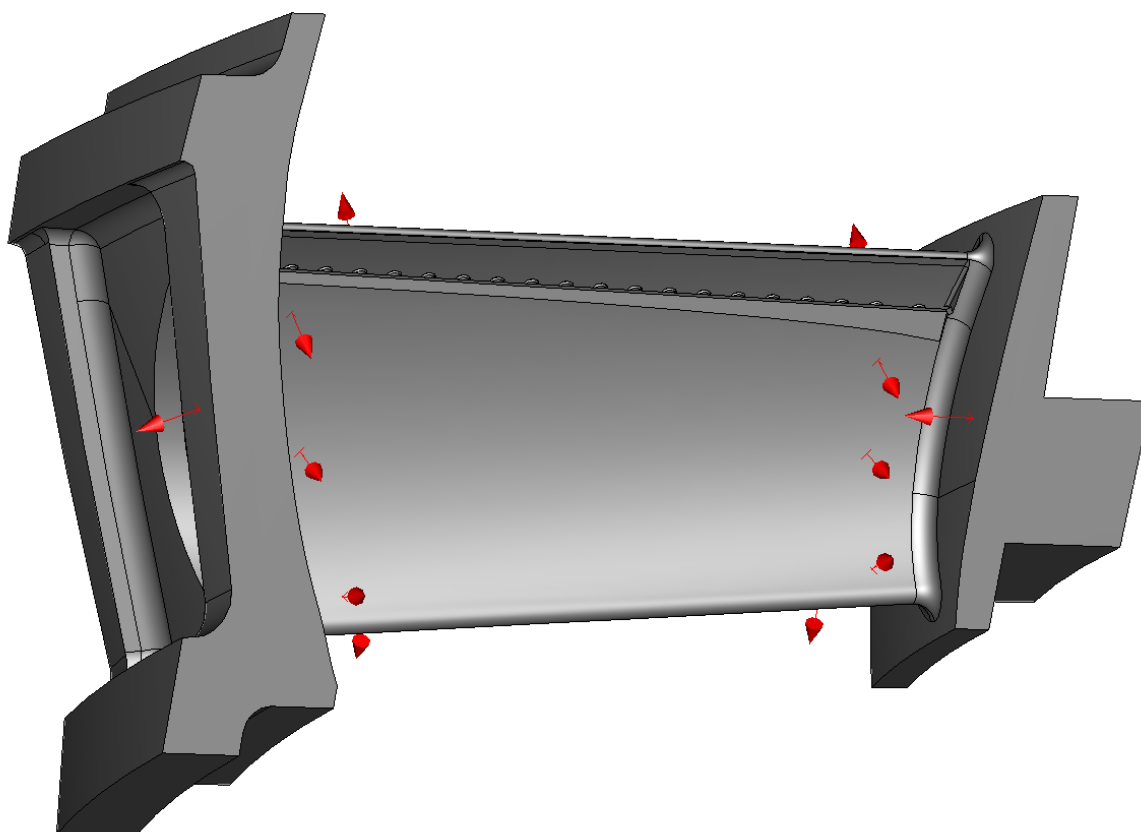
Obr. 5.9: Použitá hlava se sestavenými snímači v požadovaných směrech

Pomocí modulárního upínacího systému Aluxif od firmy Watte byl sestaven přípravek pro jednoduché, avšak pevné upnutí měřeného voskového modelu, viz obr. 5.10.



**Obr. 5.10: Upnutí voskového model v modulárním upínacím systému Aluxif**

Pro zarovnání skutečného voskového modelu na 3D model byla použita metoda tzv. „3D pasování“. Za pomoci dvanácti bodů, které jsou na obr. 5.11, byl 3D model napasován na voskový model. Šest bodů bylo umístěno na konvexní stranu listu lopatky, čtyři body na konkávní stranu listu lopatky a zbylé dva body byly umístěny na boční stěny segmentu.



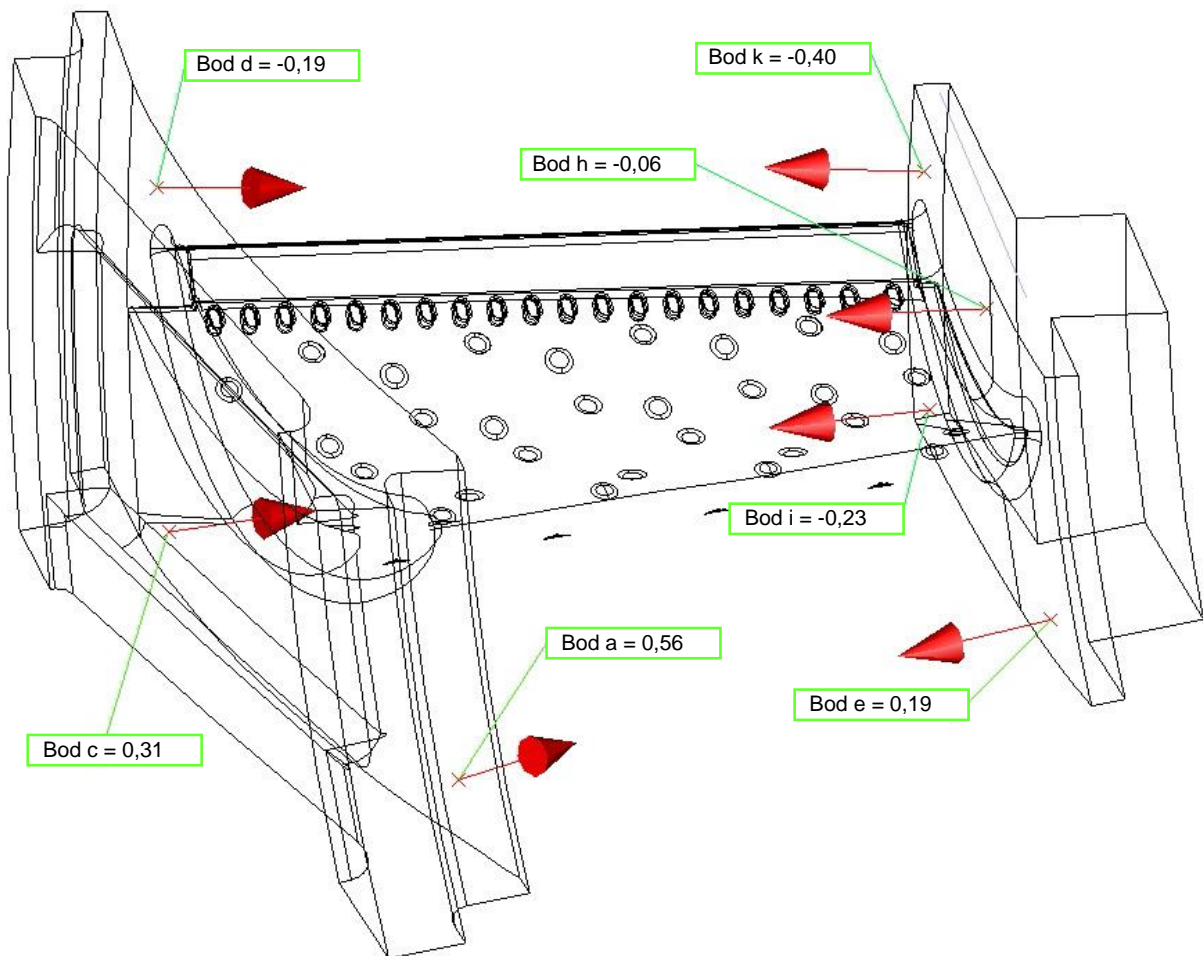
**Obr. 5.11: Zvolené body pro metodu 3D pasování**

Na každém modelu voskového segmentu bylo vždy třikrát nasnímáno oněch zvolených dvanáct bodů. Při každém snímání je zpřesněná poloha napasování skutečného voskového modelu na 3D model.

### **5.6.2 Snímané kontrolní body a deformační křivky**

Pro měření deformací bylo zaneseno osm kontrolních bodů, které jsou ve firmě používány k měření odchylek na vnitřní straně bočních stěn. Tyto body jsou označeny malými písmeny abecedy. Body *a, b, c, d* na vnitřní straně vnější boční stěny a body *e, h, i, k* na vnitřní straně vnitřní boční stěny. Vzhledem k tvarové složitosti segmentu lopatky nebylo možné snímat bod *b*. Pro jeho snímání by musela vždy proběhnout výměna měřicí hlavice. Tento krok však vedl k nepříznivému prodloužení času měření. Tento bod nebyl zobrazován v protokolu z měření, viz obr. 5.12.

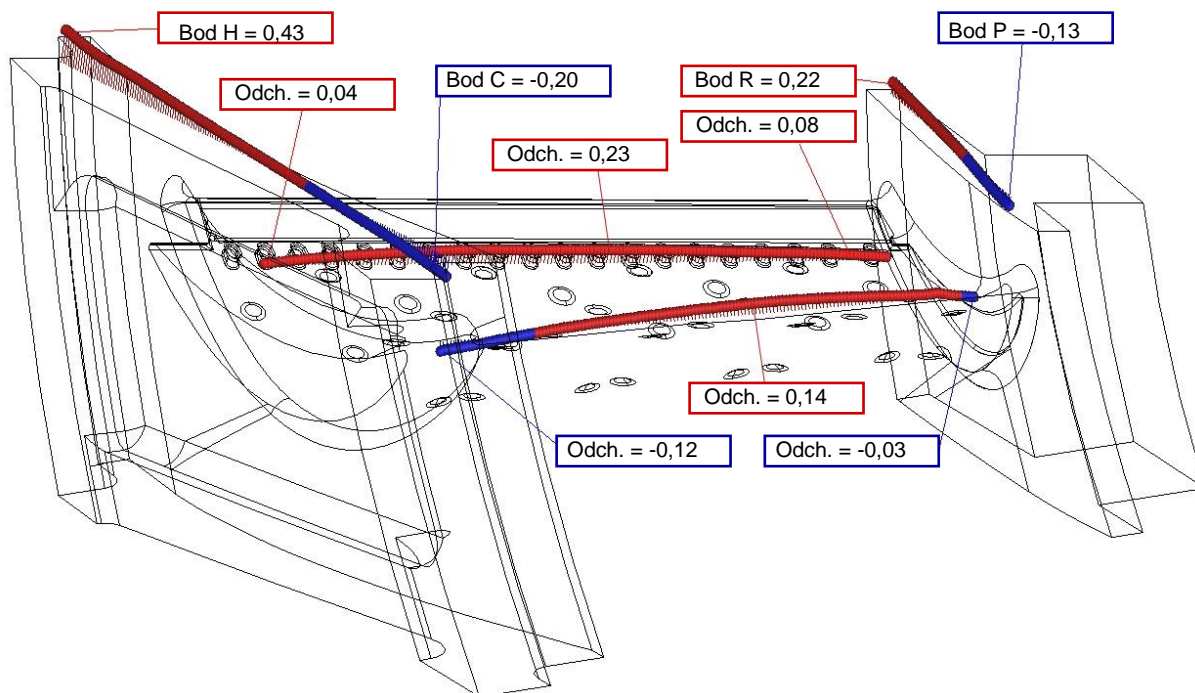
Červená šipka ukazuje normálu v místě snímání kontrolního bodu. Kladná hodnota odchylky znamená směr deformace od měřené plochy porovnávaného modelu, záporná hodnota odchylky je deformace směrem do materiálu porovnávaného modelu.



**Obr. 5.12: Pozorované kontrolní body voskového modelu č. 23 [mm]**

Vzhledem k tomu, že kontrolní body mají nízkou vypovídací hodnotu celkového výsledku zobrazení odchylek, byly mimo tyto body navrženy snímané křivky, které by zachytily vzniklé deformace měřených voskových modelů.

První dvě křivky (viz obr. 5.13) snímají průhyb listu lopatky, který je zapříčiněn absencí keramického jádra. Velikost a charakter průhybu se na všech měřených modelech projevil ve stejné nebo téměř identické míře  $\pm 0,02$  mm. Proto tyto hodnoty nebyly zařazeny při vyhodnocování ostatních deformací. Lze pouze říci, že tento průhyb listu lopatky ovlivňuje velikost úhlu naklonění deformací. Největší zjištěná hodnota odchylky, která byla naměřena, je 0,23 mm.

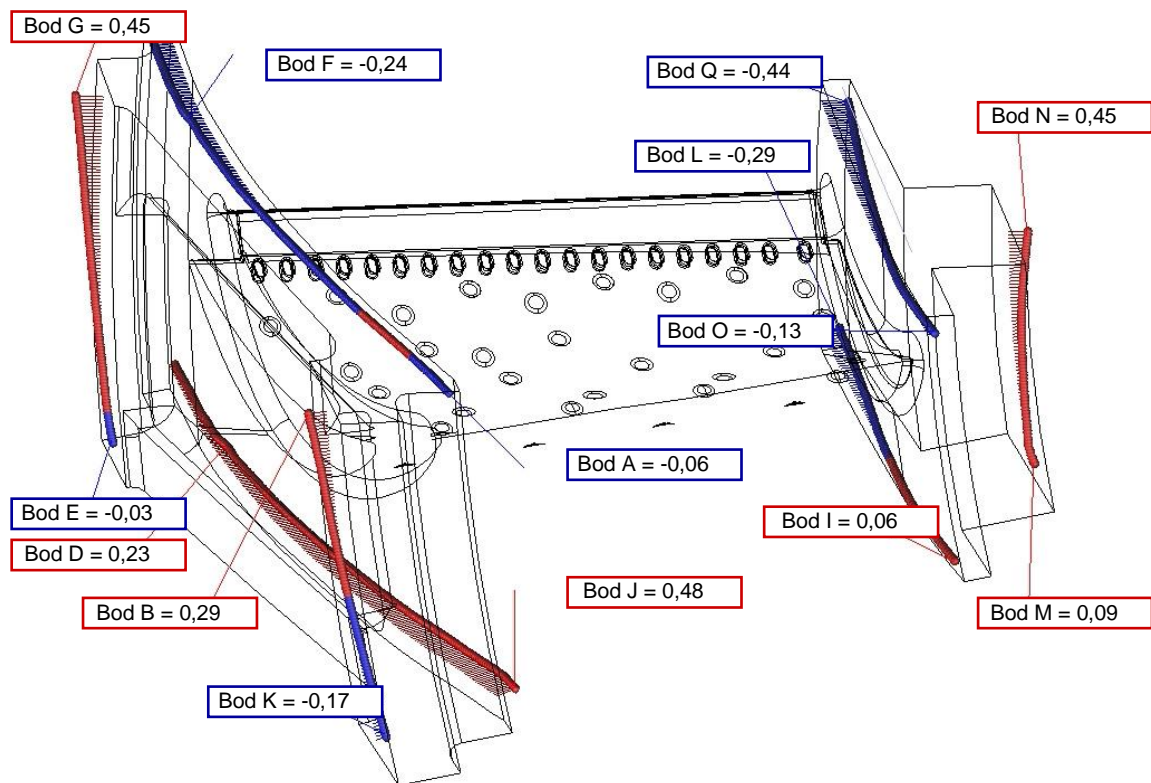


**Obr. 5.13: Vyhodnocovací křivky deformací voskového modelu č. 18 [mm]**

Další křivky, které jsou vyobrazeny na obr. 5.13 a především křivky na obr. 5.14, zobrazují charakter deformací. Zobrazené hodnoty deformací byly následně porovnávány. Pro lepší orientaci byly tyto hodnoty označeny velkými písmeny abecedy (body *A* až *H*, *J*, *K* na vnější boční stěně, body *I*, *L* až *R* na vnitřní boční stěně) tak, aby shluk bodů byl co nejbližší u sebe. Např. body *F* až *H* znázorňují směr deformace v této části modelu.



Samotný obr. 5.14 ukazuje hlavní charakter kroucení celého voskového modelu segmentu lopatky. Tento charakter se projevil na všech dvaceti osmi hodnocených modelech velice podobně. Mění se pouze míra velikosti odchylky.



**Obr. 5.14 Hlavní vyhodnocovací křivky deformací voskového modelu č. 18 [mm]**

## 5.7 Hodnocení naměřených odchylek

### 5.7.1 Hodnocení kontrolních bodů

Vyhodnocování naměřených odchylek probíhalo v tabulkovém editoru Microsoft Excel. Nejdříve byly vypsány a přiřazeny k příslušnému číslu voskového modelu všechny odchylky kontrolních bodů. Poté byly pro každý měněný parametr navrženy přehledné tabulky., Do tabulek nebyly vypsány odchylky naměřené na modelech s čísly 7, 8, 9, a 25, protože tyto modely byly zhotoveny za účelem nutného přechodového stavu změny teploty trysky a vstřikovacího tlaku. Ukázka tabulky s odchylkami pro změnu parametru chlazení ve vodní lázni po dobu 3 min ukazuje tab. 5.3. Z výpočtu aritmetického průměru byla odstraněna růžově označená políčka, která zobrazují chybně odměřenou hodnotu odchylky.

**Tab. 5.3: Hodnoty kontrolních bodů modelů standardních výrobních parametrů**

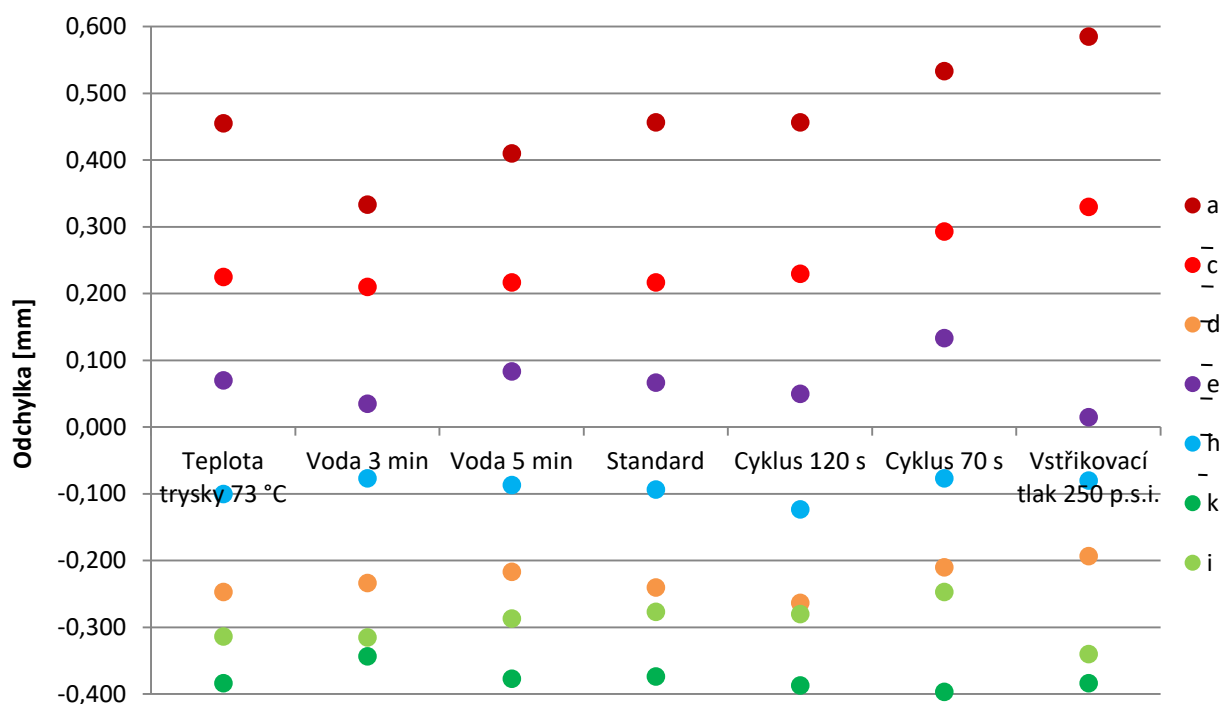
Parametr	M.č.	a [mm]	c [mm]	d [mm]	e [mm]	h [mm]	k [mm]	i [mm]
Voda 3 min	10	0,210	0,000	-0,230	0,030	-0,040	-0,340	-0,320
	11	0,340	0,200	-0,220	-0,030	-0,070	-0,300	-0,360
	12	0,450	0,220	-0,250	0,040	-0,120	-0,390	-0,310
<b>Aritmetický průměr</b>		<b>0,333</b>	<b>0,210</b>	<b>-0,233</b>	<b>0,035</b>	<b>-0,077</b>	<b>-0,343</b>	<b>-0,315</b>

Pro každý parametr byly vypočteny aritmetické průměry měřených bodů. Následně byla vytvořena tab. 5.4, která zobrazuje aritmetické průměry měřených kontrolních bodů jednotlivých změn parametrů. Sloupec „parametr“ zobrazuje změnu parametru od standardního nastavení, které bylo uvedeno v tab. 5.2. V tabulce jsou uvedeny odchylky, které se týkají změny pouze jednoho parametru. Nejsou zde tedy zobrazeny odchylky změny dvou parametrů teploty trysky 73 °C s délkou cyklu 120 s, protože parametr změny teploty trysky neměl téměř žádný vliv na velikost odchylky.

**Tab. 5.3: Aritmetické průměry kontrolních bodů**

Parametr	$\bar{a}$ [mm]	$\bar{c}$ [mm]	$\bar{d}$ [mm]	$\bar{e}$ [mm]	$\bar{h}$ [mm]	$\bar{k}$ [mm]	$\bar{i}$ [mm]
Teplota trysky 73 °C	0,455	0,225	-0,247	0,070	-0,100	-0,383	-0,313
Voda 3 min	0,333	0,210	-0,233	0,035	-0,077	-0,343	-0,315
Voda 5 min	0,410	0,217	-0,217	0,083	-0,087	-0,377	-0,287
Standard	0,457	0,217	-0,240	0,067	-0,093	-0,373	-0,277
Cyklus 120 s	0,457	0,230	-0,263	0,050	-0,123	-0,387	-0,280
Cyklus 70 s	0,533	0,293	-0,210	0,133	-0,077	-0,397	-0,247
Vstřikovací tlak 250 p.s.i.	0,585	0,330	-0,193	0,015	-0,080	-0,383	-0,340

Grafické zobrazení tab. 5.4 ukazuje obr. 5.13. Při porovnávání měřených parametrů se standardním nastavením, které jsou zobrazeny vertikálními body uprostřed grafu, je vidět, že teplota trysky (vertikální body úplně nalevo) nemá téměř žádný vliv na výsledek velikosti odchylky v místě měření kontrolních bodů. Zároveň je vidět, že zvýšení vstřikovacího tlaku na 250 p.s.i., který je zobrazen vertikálními body úplně napravo, naopak spíše zhoršuje velikost odchylek. Dále je zřejmé, že ochlazování voskového modelu ve vodě po dobu 3 min (vertikální body druhé zleva) poměrně snižuje velikost měřených odchylek.



Obr. 5.15: Velikosti aritmetických průměrů kontrolních bodů v závislosti na změně parametru

Pro další porovnávání změny parametru nelze přesněji říci, zda došlo ke zhoršení či zlepšení hodnoty odchylky, neboť v některých kontrolních bodech je odchylka lepší, v jiných naopak dochází k jejímu zhoršení. Porovnávat lze zároveň vždy jednu změnu parametru, např. změna doby cyklu nebo použití chladicího media. Proto je k dalšímu určení významnosti vlivu parametru vhodné použít způsob vícekritériálního rozhodování metodou pořadí. Metoda byla pro potřeby zobrazení upravena a zjednodušena. V tab. 5.5 je jako „kriterium“ použita rozdílná doba cyklu a „expert“ tvoří kontrolní body.

Tab. 5.5: Vstupní hodnoty pro porovnání vlivu doby cyklu metodou pořadí

Parametr [s]	$\bar{a}$ [mm]	$\bar{c}$ [mm]	$\bar{d}$ [mm]	$\bar{e}$ [mm]	$\bar{h}$ [mm]	$\bar{k}$ [mm]	$\bar{i}$ [mm]
Cyklus 70	0,533	0,293	-0,210	0,133	-0,077	-0,397	-0,247
Standard 90	0,457	0,217	-0,240	0,067	-0,093	-0,373	-0,277
Cyklus 120	0,457	0,230	-0,263	0,050	-0,123	-0,387	-0,280

Pro vyhodnocení byly hodnoty aritmetických průměrů barevně odlišeny. Zelená políčka tvoří „1. místo“ nejnižší hodnoty odchylky aritmetického průměru v daném kontrolním bodě „expertovi“ a naopak červená políčka tvoří „3. místo“ nejvyšší hodnoty odchylky aritmetického průměru v daném bodě „expertovi“. V tab. 5.6 jsou sečtena všechna zelená, bílá a červená políčka. Váha kritéria se vypočítá:

$$\text{Váha kritéria} = 3 \cdot \sum 1. \text{místo} + 2 \cdot \sum 2. \text{místo} + \sum 3. \text{místo} \quad (5.1)$$

Čím vyšší je hodnota váhy kritéria, tím je expert vhodnější. Poslední sloupec potom zobrazuje pořadí váhy důležitosti kritéria.

**Tab. 5.6: Vyhodnocení vlivu doby cyklu metodou pořadí**

Parametr [s]	1. místo	2. místo	3. místo	Váha kritéria	Pořadí
Cyklus 70	3x	0x	4x	13	2
Standard 90	2x	5x	0x	16	1
Cyklus 120	2x	2x	3x	13	2

Jak je vidět, výsledek této metody nemá dostatečně vypovídající charakter. Proto byly dodatečně jednotlivé hodnoty aritmetických odchylek porovnány s nejlepší hodnotou daného kontrolního bodu. Pro vyhodnocení (viz tab. 5.7) byla použita stejná tabulka, jako je tab. 5.5 s tím rozdílem, že zelená políčka, v nichž byla nejnižší hodnota aritmetického průměru odchylky v kontrolním bodě, zobrazují nulovou hodnotu. Ostatní políčka potom zobrazují velikost rozdílu od této hodnoty v převedeném tvaru kladného reálného čísla.

**Tab. 5.7: Porovnání velikostí aritmetických odchylek od nejlepší hodnoty**

Parametr [s]	$\bar{a}$ [mm]	$\bar{c}$ [mm]	$\bar{d}$ [mm]	$\bar{e}$ [mm]	$\bar{h}$ [mm]	$\bar{k}$ [mm]	$\bar{i}$ [mm]
Cyklus 70	0,077	0,077	0,000	0,083	0,000	0,023	0,000
Standard 90	0,000	0,000	0,030	0,017	0,017	0,000	0,030
Cyklus 120	0,000	0,013	0,053	0,000	0,047	0,013	0,033

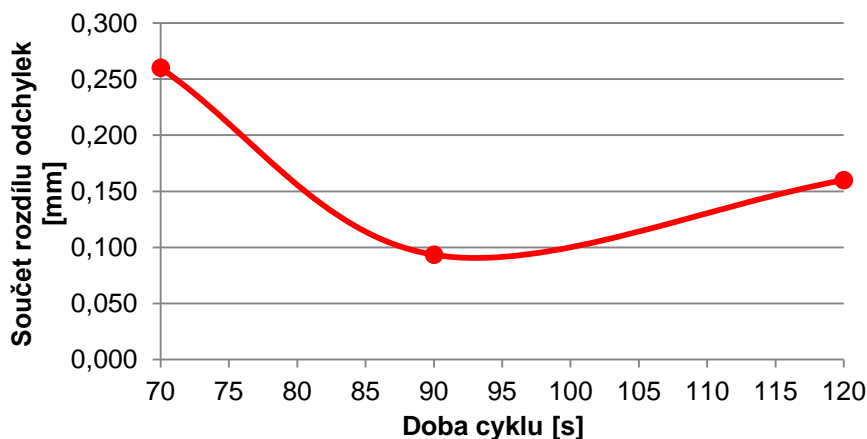
Pro vyhodnocení byly všechny hodnoty kontrolních bodů každého parametru sečteny viz tab. 5.7. Pořadí pak bylo určeno nejnižší hodnotou součtu těchto odchylek.

**Tab. 5.8: Vyhodnocení součtu velikosti rozdílu odchylek**

Parametr [s]	Součet odchylek	Pořadí
Cyklus 70	0,260	3
Standard 90	0,093	1
Cyklus 120	0,160	2

Porovnáním těchto dvou použitých metod lze říci, že první metoda umožňuje srovnání váhy kritéria vzhledem k celkovému počtu přijatelnějších naměřených hodnot aritmetického průměru odchylek. Druhá metoda vypovídá o vhodnosti volby varianty z hlediska součtu rozdílu zjištěných aritmetických průměrů odchylek v měřených kontrolních bodech. V metodách není brán ohled na to, zda je hodnota odchylky kladná nebo záporná, neboť nedochází ke změně znaménka konkrétního kontrolního bodu, tudíž je porovnávána pouze velikost naměřené odchylky.

Obě porovnávací metody jednoznačně určily, že co se týče délky doby vstřikovacího cyklu, je nevhodnější volbou tohoto parametru standardní nastavení. Jelikož se na druhém místě druhé porovnávací metody umístilo nastavení doby cyklu 120 s, je možné usuzovat, že vhodná doba nastavení cyklu bude v rozmezí 90 až 100 s, viz obr. 5.16.



Obr. 5.16: Grafické zobrazení součtu rozdílů odchylek změny parametru doby cyklu

Tyto dvě metody rozhodování byly dále aplikovány na porovnávání změny parametru použitého chladicího média. Byly sestaveny stejné tabulky, jejichž výsledek je shrnut v tab. 5.9.

Tab. 5.9: Vyhodnocení vlivu použitého chladicího média

Metoda	Vícekritériální rozhodování metodou pořadí					Hodnocení velikosti odchylek	
	1. místo	2. místo	3. místo	Váha kr.	Pořadí	Souč. rozd. odch.	Pořadí
Bez chl. média	1x	3x	3x	12	2	0,232	3
Voda 3 min	5x	2x	0x	19	1	0,055	1
Voda 5 min	1x	2x	4x	11	3	0,185	2

Výsledek této tabulky poukazuje na kladný vliv použití chladicího média pouze v délce chlazení 3 min. Vzhledem k odlišnostem obou metod (počet přijatelnějších hodnot / součet rozdílů odchylek) je pořadí zbylých dvou parametrů poměrně odlišné. Lze pouze usoudit, že porovnávání metodou hodnocení velikostí součtu rozdílů odchylek podává přesvědčivější výsledky. Je však potřeba brát ohled na to, že kontrolní body neřeší charakter deformací voskového modelu jako celku, ale pouze rozteč mezi vnitřními plochami bočnic, které jsou důležité z hlediska proudění spalin.

### 5.7.2 Hodnocení deformačních křivek

Při vyhodnocování deformačních křivek, které jsou zobrazeny na obr. 5.11 a 5.12, byly vyzdvížené hodnoty odchylek hodnoceny stejným způsobem jako při hodnocení kontrolních bodů. Hodnoty aritmetických průměrů těchto bodů jsou vypsány v tab. 5.10. Barevné rozlišení znázorňuje blízké okolí několika bodů. Růžově zvýrazněné hodnoty aritmetických odchylek zdůrazňují naměřené

hodnoty, kde proběhla deformace v jiném směru. Tyto hodnoty mají jednak příznivější velikost aritmetického průměru odchylky a jednak je kladná hodnota vhodnější, než deformace v záporném směru, neboť je zde vlivem deformace absence materiálu.

**Tab. 5.10: Aritmetický průměr vyzdvižených bodů deformačních křivek**

Parametr	$\bar{A}$ [mm]	$\bar{B}$ [mm]	$\bar{C}$ [mm]	$\bar{D}$ [mm]	$\bar{E}$ [mm]	$\bar{F}$ [mm]	$\bar{G}$ [mm]	$\bar{H}$ [mm]	$\bar{I}$ [mm]
T trysky 73 °C	0,057	0,280	-0,207	0,080	0,020	-0,355	0,477	0,490	0,037
Voda 3 min	0,067	0,275	-0,195	0,085	0,015	-0,310	0,435	0,480	0,020
Voda 5 min	0,063	0,270	-0,207	0,087	0,023	-0,270	0,420	0,457	0,100
Standard	0,033	0,287	-0,230	0,145	-0,045	-0,313	0,450	0,430	0,060
Cyklus 120 s	0,017	0,307	-0,247	0,143	-0,055	-0,353	0,483	0,490	0,067
Cyklus 70 s	0,067	0,273	-0,263	0,233	-0,185	-0,265	0,395	0,503	0,163
Vstř. tlak 250 p.s.i.	0,080	0,237	-0,213	0,245	-0,065	-0,240	0,410	0,460	0,025
Parametr	$\bar{J}$ [mm]	$\bar{K}$ [mm]	$\bar{L}$ [mm]	$\bar{M}$ [mm]	$\bar{N}$ [mm]	$\bar{O}$ [mm]	$\bar{P}$ [mm]	$\bar{Q}$ [mm]	$\bar{R}$ [mm]
T trysky 73 °C	0,540	-0,080	-0,100	0,130	0,340	-0,057	-0,107	-0,495	0,173
Voda 3 min	0,475	0,027	-0,140	0,105	0,287	-0,043	-0,107	-0,445	0,203
Voda 5 min	0,490	-0,047	-0,125	0,087	0,300	-0,057	-0,123	-0,460	0,187
Standard	0,550	-0,085	-0,113	0,080	0,310	-0,053	-0,123	-0,453	0,160
Cyklus 120 s	0,507	-0,060	-0,127	0,160	0,337	-0,087	-0,117	-0,467	0,183
Cyklus 70 s	0,640	-0,117	-0,067	0,050	0,300	-0,033	-0,110	-0,497	0,083
Vstř. tlak 250 p.s.i.	0,645	-0,205	-0,145	0,150	0,290	-0,047	-0,120	-0,470	0,133

V případě takového počtu bodů ztrácí grafické znázornění přehlednost, neboť by byla většina bodů v rozsahu od -0,200 do 0,200 mm. Stejně jako u porovnávání kontrolních bodů byly vytvořeny tabulky, jejichž výsledky jsou vždy pro změnu jednoho parametru shrnuty do jedné tabulky.

Tab. 5.11 zobrazuje hodnocení vlivu doby výrobního cyklu. Stejně jako při hodnocení kontrolních bodů vyšlo nejlépe 90 s standardního nastavení. Na druhé pozici se metodou pořadí umístilo 70 s, avšak součet rozdílů velikostí aritmetických průměrů dosahoval největších hodnot. Z toho vyplývá, že příliš krátká doba výrobního cyklu dosahuje u horších odchylek větších hodnot, neboť má voskový model při vyjímání z formy o něco vyšší teplotu. Při době výrobního cyklu 120 s může docházet k působení vnějšího pnutí, které při ochlazování modelu ve výsledku vyvolává tyto deformace. Při vyndávání z formy mají však modely vlivem takto krátkých dob výrobního cyklu velice podobné teploty, neboť vosk má velice špatnou tepelnou vodivost. Proto mohou být vzniklé odchylky také způsobeny vlivem vnitřního tepelného pnutí, které se nejvíce projevují ihned po vyjmutí modelu.

Shrnutím těchto výsledků vychází konvexní křivka podobná té na obr. 5.16 s nejnižším bodem v okolí 90 s doby výrobního cyklu.

**Tab. 5.11: Vyhodnocení vlivu doby výrobního cyklu**

<b>Metoda</b>	<b>Vícekritériální rozhodování metodou pořadí</b>					<b>Hodnocení velikosti odchylek</b>	
<b>Parametr [s]</b>	<b>1. místo</b>	<b>2. místo</b>	<b>3. místo</b>	<b>Váha kr.</b>	<b>Pořadí</b>	<b>Souč. rozd. odch.</b>	<b>Pořadí</b>
<b>Cyklus 70</b>	9x	0x	9x	36	2	0,723	3
<b>Standard 90</b>	5x	12x	1x	40	1	0,400	1
<b>Cyklus 120</b>	4x	6x	8x	32	3	0,683	2

Tab. 5.12 ukazuje výsledky vyhodnocování vlivu chladicího média. Zde bylo za pomoci obou metod rozhodování jednoznačně stanoveno pořadí pozorované změny parametru. Z tohoto experimentu vyplývá, že největší deformace probíhají právě ve chvíli, kdy je voskový model vyjmut z matečné formy, neboť chlazením ve vodní lázni se nedocílilo výrazného snížení velikosti měřených deformací.

Manipulace s voskovým modelem za účelem jeho chlazení trvala vždy přibližně 30 s. Po uplynutí této doby stále dochází k projevům deformací, avšak jejich míra je ovlivněna použitým chladicím médiem. Bylo zjištěno, že standardní postup ochlazování voskového modelu bez použití chladicího média, vykazuje celkově větší projevy tvarových deformací, než při ochlazování voskového modelu ve vodní lázni o teplotě 10 °C. Dále bylo prokázáno dosažení lepších hodnot u doby ochlazování 3 min, než u ochlazování po dobu 5 min. To je v tomto případě nejspíše zapříčiněno příznivým působením vnitřních tepelných pnutí, neboť při dřívějším vyjmutí voskového modelu dochází k jeho zpětnému ohřívání vlivem nesnížení teploty v tepelných uzlech.

**Tab. 5.12: Vyhodnocení vlivu použitého chladicího média**

<b>Metoda</b>	<b>Vícekritériální rozhodování metodou pořadí</b>					<b>Hodnocení velikosti odchylek</b>	
<b>Parametr</b>	<b>1. místo</b>	<b>2. místo</b>	<b>3. místo</b>	<b>Váha kr.</b>	<b>Pořadí</b>	<b>Souč. rozd. odch.</b>	<b>Pořadí</b>
<b>Bez chl. media</b>	5x	3x	10x	31	3	0,530	3
<b>Voda 3 min</b>	10x	3x	5x	41	1	0,238	1
<b>Voda 5 min</b>	3x	12x	3x	36	2	0,350	2

V tab. 5.13 je prokázán vliv zvýšeného vstřikovacího tlaku. První porovnávací metoda sice neprokazuje příliš odlišné výsledky, tvoří pouze základní údaje pro druhou vyhodnocovací metodu. V té bylo prokázáno, že zvýšení vstřikovacího tlaku nepříznivě podporuje chování deformací voskového modelu.

**Tab. 5.13: Vyhodnocení vlivu použitého vstřikovacího tlaku**

Metoda	Vícekrit. rozhodování metodou pořadí				Hodnocení velikosti odchylek	
	1. místo	2. místo	Váha kr.	Pořadí	Souč. rozd. odch.	Pořadí
Standard 180	10x	8x	28	1	0,242	1
Vstř. tlak 250	8x	10x	26	2	0,527	2

Porovnávací tab. 5.14 ukazuje vliv teploty vstřikovací trysky. V první metodě vyšla stejná hodnota váhy kritéria hodnotící pořadí pozorovaných parametrů. Druhá metoda sice ukazuje odlišné hodnoty velikosti součtu rozdílů odchylek, ale nebyl tím prokázán výrazný vliv na změnu velikosti výsledku hodnocených deformací.

**Tab. 5.14: Vyhodnocení vlivu použité teploty vstřikovací trysky**

Metoda	Vícekrit. rozhodování metodou pořadí				Hodnocení velikosti odchylek	
	1. místo	2. místo	Váha kr.	Pořadí	Souč. rozd. odch.	Pořadí
Trysky 73	9x	9x	27	1	0,290	2
Standard 78	9x	9x	27	1	0,228	1

Shrnutím těchto porovnávacích kroků lze říci, že pouhá změna výrobních parametrů nemá příliš výrazný vliv na velikost odchylek, které jsou způsobeny vlivem deformace voskového modelu. Tomu by se dalo zamezit jedinečně výrobou vhodného fixačního přípravku. Pouze doba výrobního cyklu, přibližně 90 s standardního nastavení a zchlazení voskového modelu ve vodní lázni na dobu 3 min, vykazují o trochu lepší hodnoty výsledných odchylek. K lepším výsledkům by mohlo dojít rychlejším přemístěním modelu mezi matečnou formou a vodní lázní, neboť ihned po vyjmutí modelu z formy dochází k největším projevům deformací.

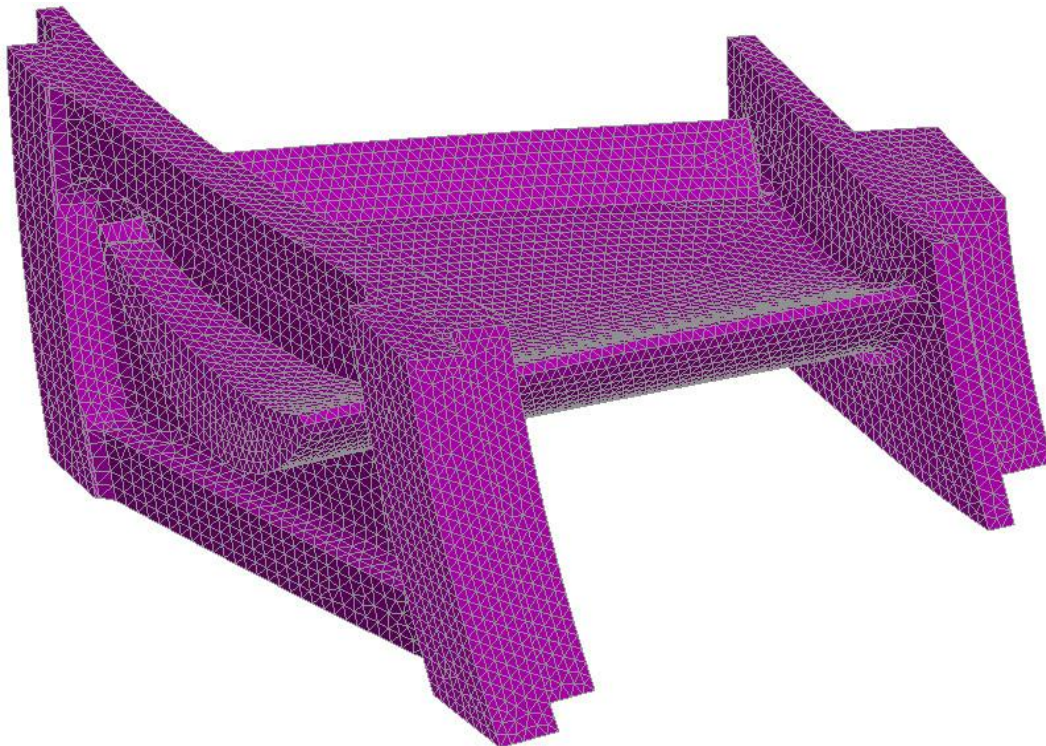


## 6. Simulace segmentu lopatky

Tato kapitola se snaží využít možností numerické simulace viskoelastického modelu v softwaru ProCAST. Program poskytuje vytvoření vizualizace průběhu plnění matečné formy s následným zobrazením teplotního pole a deformačního chování v průběhu ochlazování voskového modelu.

Pro potřeby simulace byl poskytnut CAD model segmentu lopatky bez nálitků v rozhraní STEP. Získaný model byl tvořen pouze plochami. Ke sjednocení modelu segmentu lopatky s jádrem by však bylo zapotřebí, aby 3D model byl tvořen objemy. Proto pro potřeby simulace plnění dutiny matečné formy bylo jádro nastaveno jako hotový voskový model o teplotě 50 °C, který se po naplnění formy ochlazoval společně se segmentem lopatky.

Na CAD model, který byl načten v MeshCASTu byla vygenerována povrchová síť FEM, viz obr. 6.1. Poté byl v PreCASTu z termodynamické databáze přiřazen materiál, nastaveny počáteční podmínky a nakonfigurovány potřebné výpočty numerické simulace. [H15]



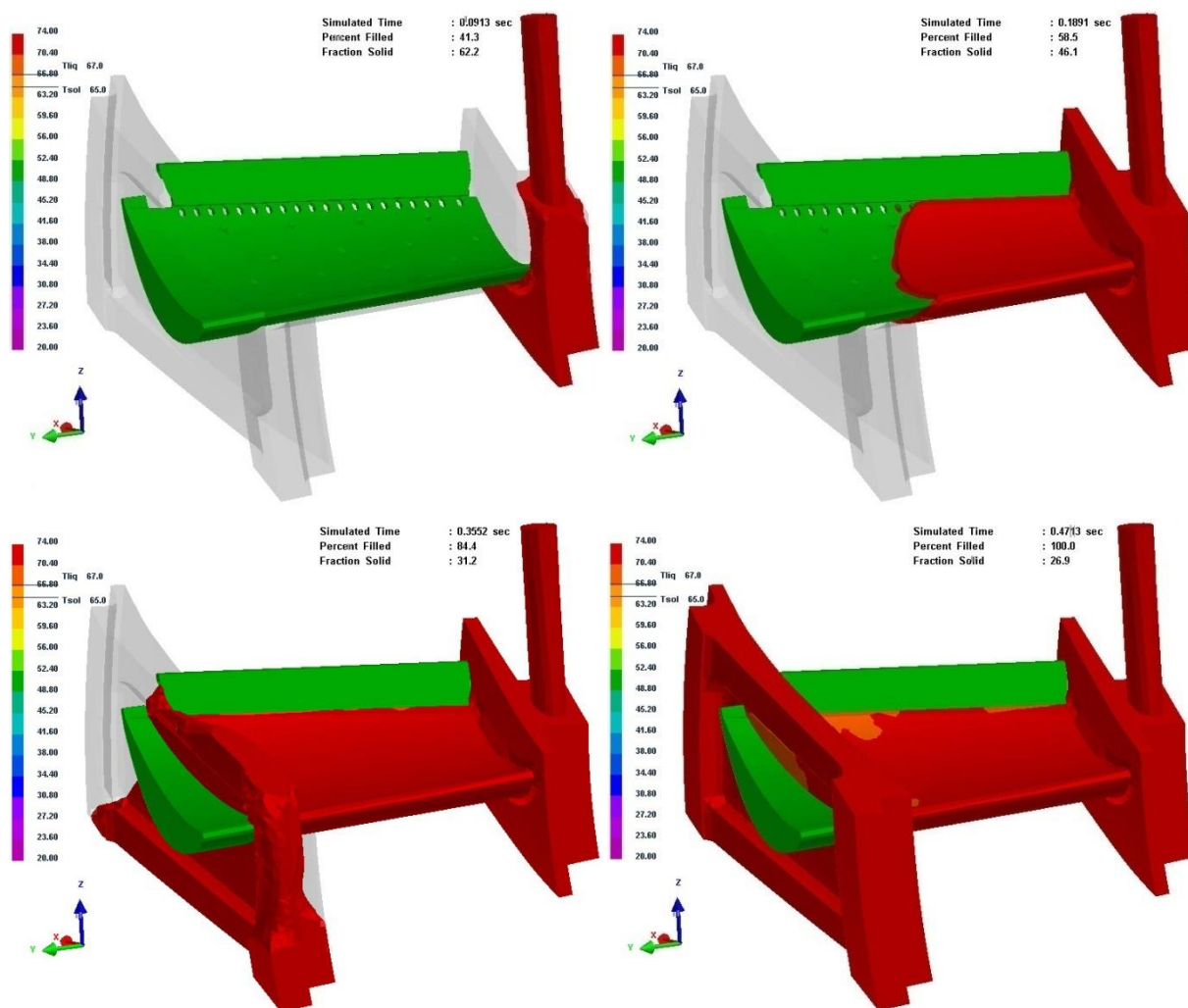
**Obr. 6.1: FEM síť segmentu lopatky**

Při experimentu byly použity výpočtové modely „Flow analysis“, „Thermal analysis“ a „Stress analysis“, které byly rozděleny do dvou fází. První fáze probíhá v matečné formě. Druhá fáze zahrnuje výpočty po vyjmutí modelu z formy. Dále byla využita data experimentálně získaná a popsána v kapitole 4.

## 6.1 Simulace procesů probíhajících v matečné formě

### 6.1.1 Plnění dutiny formy

Pro simulaci byla nastavena teplota vosku 73 °C, protože při nižších teplotách nedocházelo k úplnému zaplnění dutiny formy. Příčinou je, že materiálová databáze není doposud uspokojivě doplněna všemi potřebnými charakteristikami a konstantami materiálu voskové směsi. Zároveň byla nastavena 30 °C teplota matečné formy, neboť je předpokládán její ohřev v průběhu několika výrobních cyklů. Výsledek predikce průběhu zaplňování dutiny formy je znázorněn na obr. 6.2.

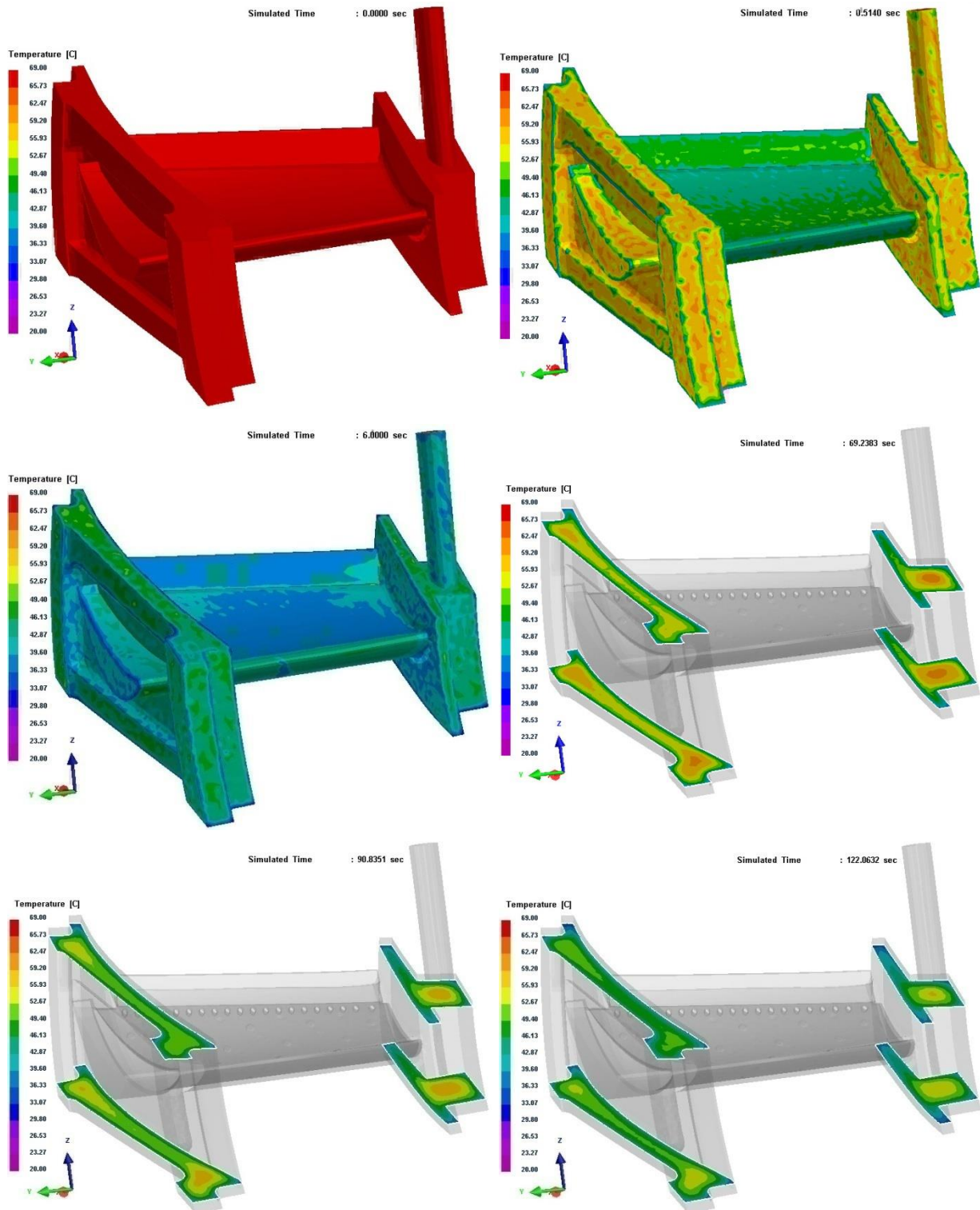


Obr. 6.2: Simulace plnění dutiny formy [°C]

### 6.1.2 Teplotní pole

Simulace teplotního pole byla nastavena od konstantní teploty 68 °C. Výsledek této predikce je zobrazen na obr. 6.3. První tři obrázky zobrazují poměrně rychlý průběh ochlazení povrchu voskového modelu pod teplotu 52 °C, které proběhlo během prvních 6 s. Následně už nedochází k výrazným změnám teploty na povrchu modelu, neboť odvod tepla do formy je již menší, ale pouze ke změně teploty v jeho objemu do doby, dokud není model vyjmut z formy. Další tři obrázky na

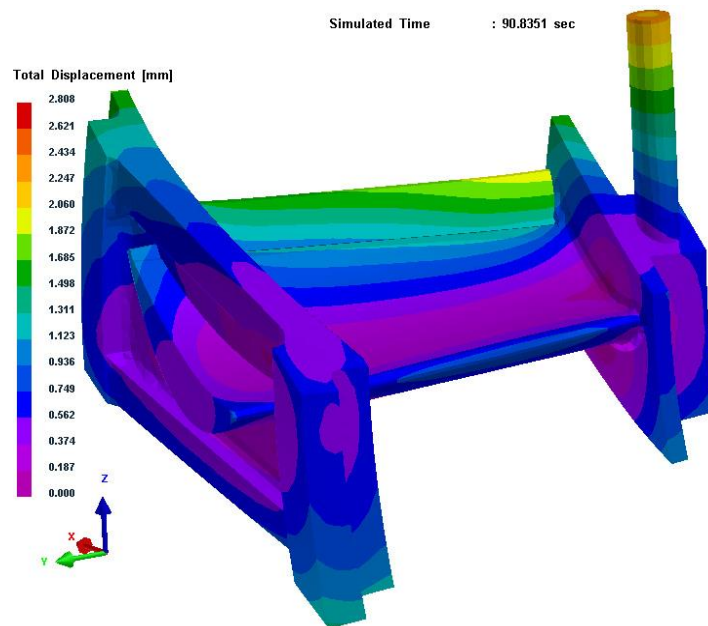
obr. 6.3. potom zobrazují predikci teplotního pole ve dvou řezech modelu v časech blízkých pozorovaných parametrů délky cyklu lisování po dobu 70, 90 a 120 s. Tyto řezy zároveň zobrazují, že proběhlo úplné zatuhnutí tepelných uzlů na teplotu, při které je již možné s voskovým modelem manipulovat.



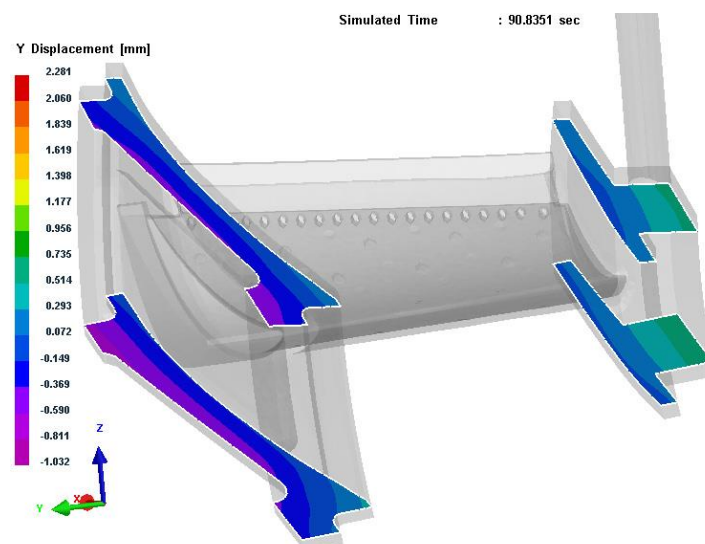
Obr. 6.3: Simulace teplotního pole voskového modelu [°C]

### 6.1.3 Napětí

Výsledkem této predikce je posunutí rozměrů modelu, které vzniká v okamžiku jeho vyjmutí z matečné formy přibližně v čase 90 s. Predikce celkového posunutí je zobrazena na obr. 6.4. Obr. 6.5. zobrazuje dva řezy výsledného posunutí pouze ve směru osy Y. Predikované rozměry posunutí jsou v této fázi mnohonásobně větší a pouze v některých místech mají podobný charakter, který byl zjištěn na ustáleném reálném voskovém modelu.



**Obr. 6.4: Celkové posunutí [mm]**



**Obr. 6.5: Posunutí ve směru osy Y [mm]**

## 6.2 Simulace procesů probíhajících mimo formu

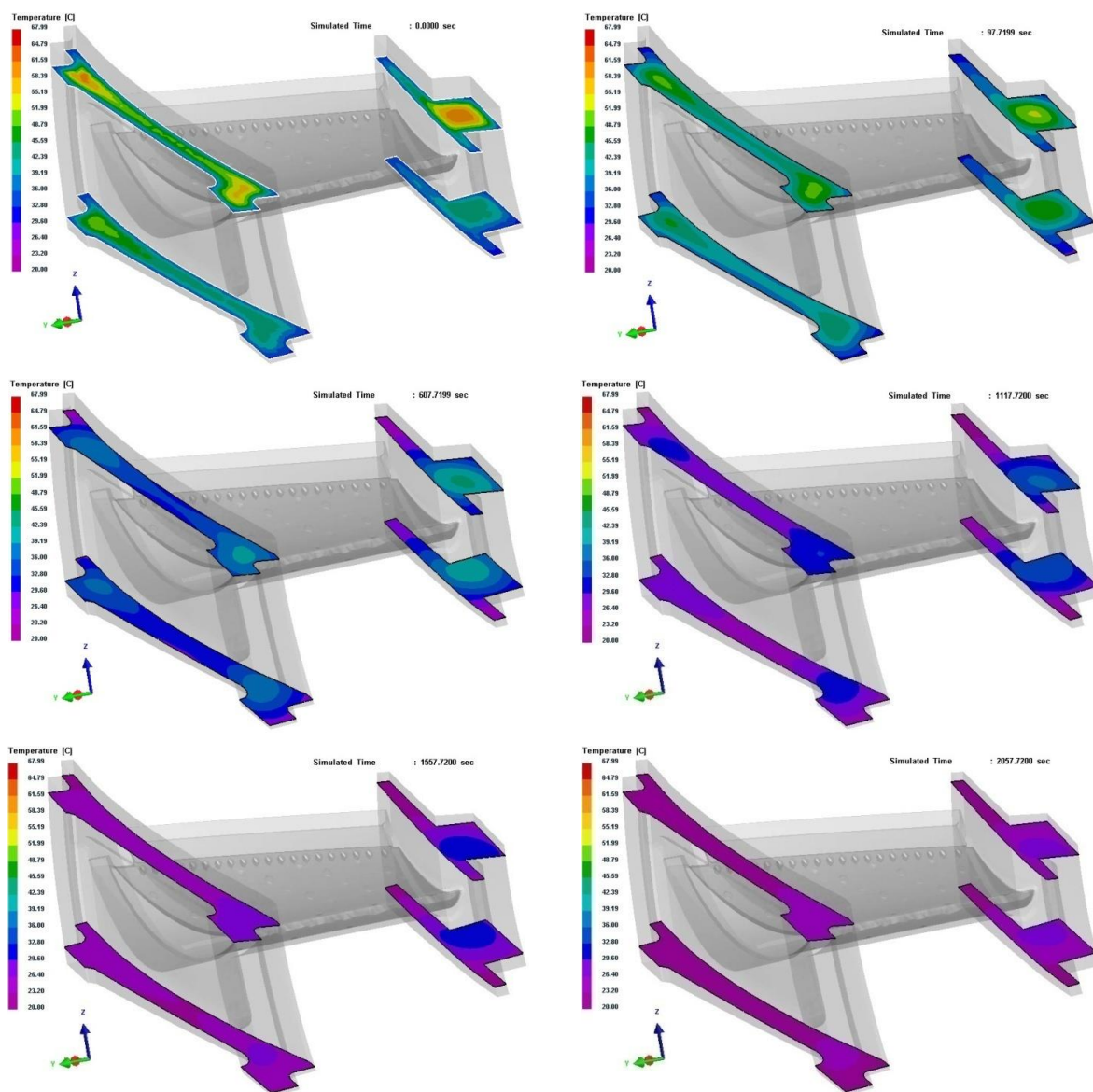
Druhá fáze simulace navazuje na predikci první fáze 90 s doby cyklu. Výstupem bylo získání vizuálního zobrazení predikce teplotního pole a napětí voskového modelu při jeho vyjmutí z matečné

formy ve dvou variantách. První varianta (A) simuluje volné ochlazování modelu na vzduchu o teplotě 21 °C po dobu 60 min. Druhá varianta (B) simuluje ochlazování modelu ve studené vodě o teplotě 10 °C po dobu 3 min s následným volným ochlazováním na vzduchu o teplotě 21 °C po dobu 20 min. Pro vyhodnocení byly použity vždy dva řezy, které nejlépe zobrazují teplotní pole modelu.

## 6.2.1 Teplotní pole

### • Varianta A

Obr. 6.6 zobrazuje sérii obrázků teplotního pole modelu. Poslední obrázek znázorňuje, že model je téměř ochlazen na teplotu vzduchu v místnosti v přibližném čase 2 060 s (34,3 min). Porovnáním tohoto času s měřením, kterým se zabývá kapitola 5.2, je vidět, že simulace predikuje téměř poloviční čas ochlazení modelu oproti reálnému výsledku. [H16]

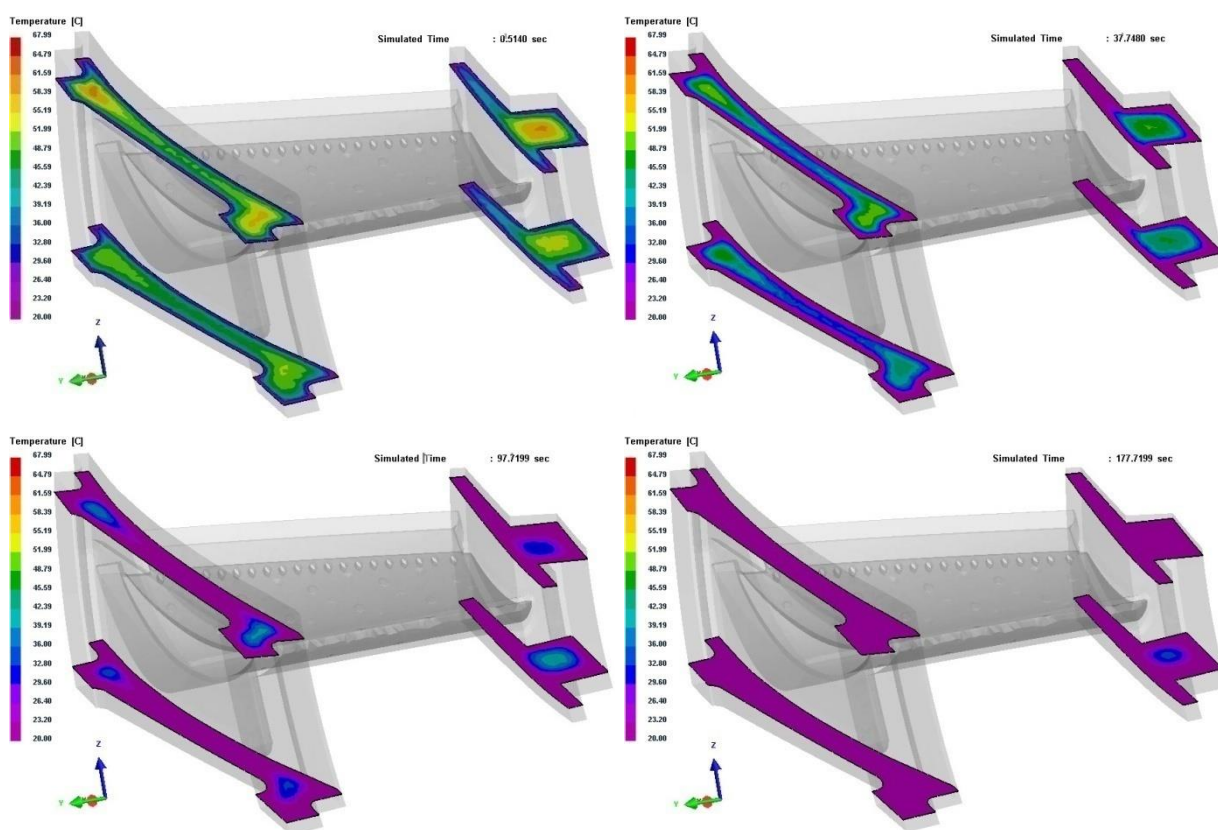


**Obr. 6.6: Teplotní pole modelu ochlazovaného 60 min volně na vzduchu [°C]**

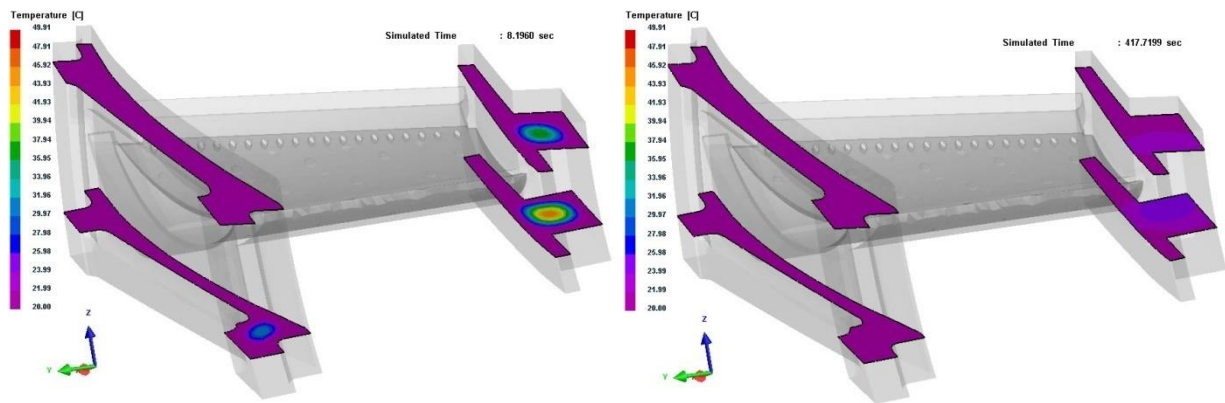
- **Varianta B**

Obr. 6.7 zobrazuje predikci teplotního pole ochlazování voskového modelu, zachlazeného v 10 °C vodě. Obrázky znázorňují poměrně rychlé ochlazení modelu v relativně krátkém čase. Zároveň je vidět výrazný posun pevně umístěných řezných rovin, který je důsledkem predikce deformace modelu. Simulace také ve srovnání s reálným chováním předpovídá mnohem účinnější celkové ochlazení v čase 3 min.

Obr. 6.8 dále zobrazuje následné ochlazení modelu na vzduchu. Řezné roviny jsou umístěny do poloh, které zobrazují doposud neochlazené tepelné uzly. Úplné ochlazení modelu na teplotu vzduchu v místnosti probíhá přibližně během 420 s (7 min), což je méně než polovina reálného procesu. Simulace také po změně prostředí nepředpokládá zpětné ohřívání modelu z tepelných uzlů.



**Obr. 6.7: Teplotní pole modelu ochlazovaného 3 min ve vodě [°C]**



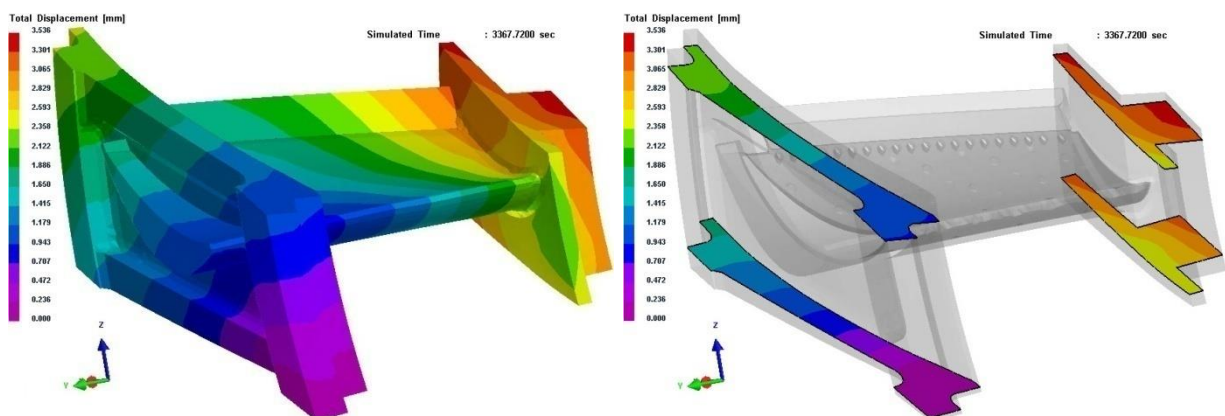
**Obr. 6.8: Teplotní pole následného ochlazování na vzduchu [°C]**

## 6.2.2 Napětí

Výpočet predikce napětí probíhal společně s výpočtem predikce teplotního pole. Jelikož je model volně ochlazován bez upnutí ve fixačním přípravku, bylo nutné pro simulaci predikce napětí zvolit tři pevné body souřadného systému, které představují fixní body, od kterých jsou počítány výsledné predikce napětí. Tyto fixní body byly umístěny do míst modelu, jejichž polohu znázorňuje fialové pole nulového napětí. Níže uvedené obrázky zobrazují ve stejném čase vždy vlevo celkový výsledek predikce napětí modelu a vpravo dvě řezné roviny.

- **Varianta A**

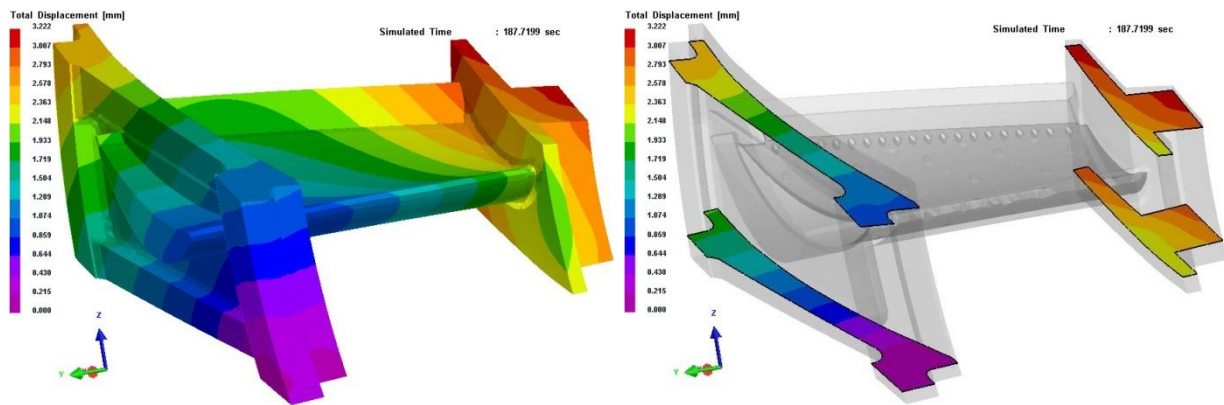
Obr. 6.9 ukazuje predikci napětí varianty A volně ochlazovaného modelu na vzduchu.



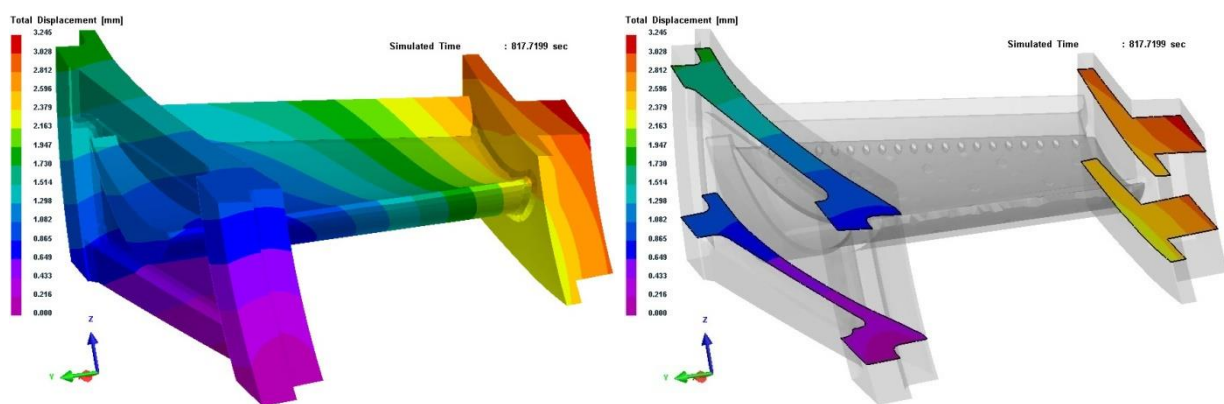
**Obr. 6.9: Napěťové pole modelu ochlazovaného 60 min volně na vzduchu [mm]**

- **Varianta B**

Výsledek predikce varianty B je zobrazen na obr. 6.10 po 3 min chlazení ve vodní lázni a obr 6.11 zobrazuje následné konečné ochlazování na vzduchu.



**Obr. 6.10: Napětové pole modelu ochlazovaného 3 min ve vodě [mm]**



**Obr. 6.11: Napětové pole následného ochlazování na vzduchu [mm]**

Obrázky 6.10 a 6.11 zobrazují samostatný výsledek napětí. Jejich součet by zobrazil výsledné napětí, které je paradoxně dvojnásobné oproti klasickému výsledku predikce volného ochlazování na obr. 6.9. Porovnáním reálného procesu s predikcí napětí, která vyšlá z výpočtů simulačního softwaru, jsou hodnoty predikce přibližně 1,5 krát vyšší. To je zapříčiněné stále nedostatečnou materiálovou databází používané voskové směsi. [H17]



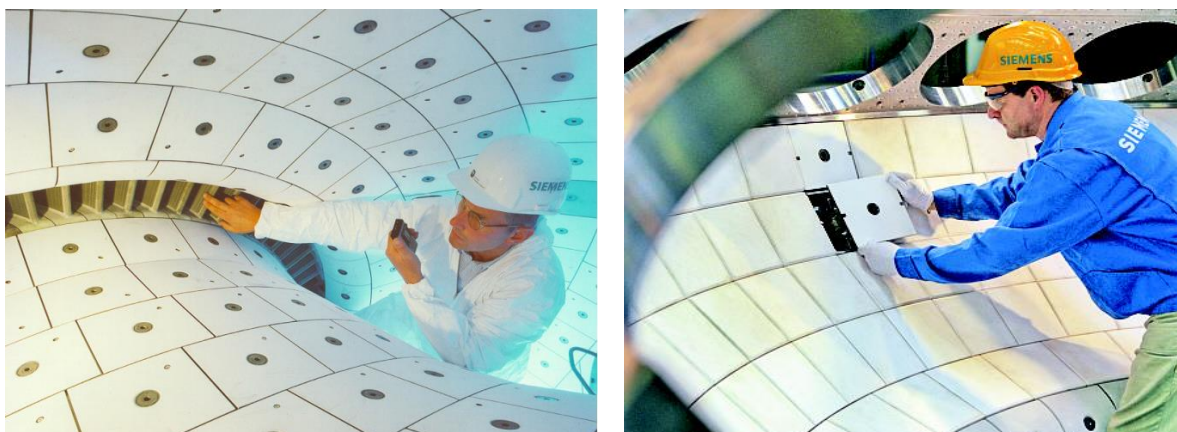
## 7. Řešení modelů tepelných štítů plynových turbín

Tepelné štíty, pro jejichž výrobu jsou sledované voskové modely používány, slouží pro ochranu součástí plynové turbíny, které jsou vystaveny během provozního údobí velmi vysokým teplotám. Tepelný štít je navržen tak, aby chránil dané součásti absorbováním tepla vznikajícího vnějšími vlivy. Toto teplo je pohlcováno nebo odráženo.



**Obr. 7.1 – Umístění tepelných štítů na plynové turbíně**

Obr. 7.1 znázorňuje rozmístění tepelných štítů v prostoru pod centrem rozváděcích lopatek kompresoru a jejich způsoby montáže (obr. 7.2).



**Obr. 7.2 – Aplikace tepelných štítů**

Tab. 7.1 – Výrobní hodnoty nominální voskového modelu

Popis	Vstřikovací tlak (Barr)	Teplota trysky (°C)	Teplota zásobníku (°C)	Doba vstřikování (s)	Doba tuhnutí (s)	Doba chlazení (min)	Teplota vody (°C)
Nominální model	3	72	70	90	120	5	9,6

Tab. 7.2 - Parametry pro výrobu voskových modelů

Popis změny	Vstřikovací tlak (Barr)	Teplota trysky (°C)	Teplota zásobníku (°C)	Doba vstřikování (s)	Doba tuhnutí (s)	Doba chlazení (min)	Teplota vody (°C)
Chlazení	3	72	70	90	120	<b>3</b>	9,6
Chlazení	3	72	70	90	120	<b>1</b>	9,6
Vstřik.čas	3	72	70	<b>60</b>	120	5	9,6
Vstřik.čas	3	72	70	<b>30</b>	120	5	9,6
Vstřik.čas	3	72	70	<b>120</b>	120	5	9,6
Tuhnutí	3	72	70	90	<b>60</b>	5	9,6
Tuhnutí	3	72	70	90	<b>30</b>	5	9,6
Tlak	<b>4</b>	72	70	90	120	5	9,6
Tlak	<b>2</b>	72	70	90	120	5	9,6
Chlazení	3	72	70	90	90	<b>Vzduch</b>	9,6

## 7.1 Výrobní postup voskového modelu

Před uvedením lisovacího stroje do provozu je zapotřebí zkontrolovat třídičnou formu, zejména dutinu formy, zda v ní nejsou zbytkové nečistoty, které by měly na kvalitu výsledného modelu negativní vliv.

Dutinu je také potřeba průběžně promazávat silikonovým olejem. Jeho nadměrné dávkování je však také nežádoucí, proto je doporučována aplikace jedním stříknutím spreje po každém lisování. Po skončení lisovacího cyklu se forma automaticky otevře. Na formě je nejprve nutné odstranit zbytky vtokové sestavy ve tvaru hvězdice. Následně je zahájeno postupné povolování šroubů, jimiž je docíleno upevnění tvarových kamenů kopírujících obvod modelu.

Po následném ručním přemístění horní desky na molitan je za pomoci úderů pogumovaným kladivem na hlavy šroubů docíleno uvolnění tvarových pohyblivých částí formy (tzv. kamenů), čímž

dojde k uvolnění a následnému vysunutí voskového modelu a samotných kamenů na předem připravenou molitanovou podložku.

Právě časově náročné povolování šroubů či ruční rozebírání a opětovné sestavování tvarových kamenů do předem definované formy činí tuto výrobu modelů ve srovnání s lisováním jiných voskových modelů (např. model pro lopatku plynové turbíny) časově velmi obtížnou.

Dalším krokem je upevnění modelu do připraveného fixačního přípravku. Toho je docíleno vložením voskového modelu dle připraveného vybrání pro obvodový tvar. Tato poloha je zafixována koncovými upínkami ve všech rozích modelu tepelného štítu (obr. 7.3). Na středovou část je vložen kruhový kámen, kterému je vymezena poloha šroubovacím ramenem (obr. 7.4).

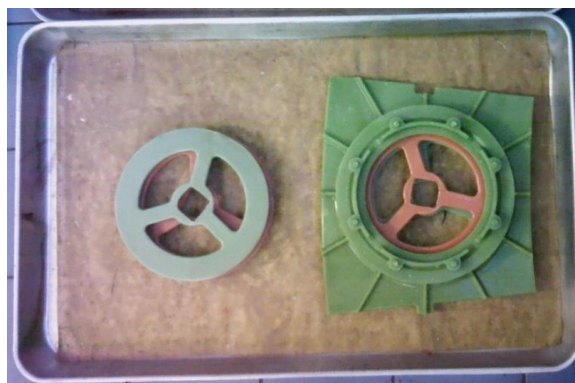


**Obr. 7.3 – Poloha umístění modelu v přípravku**



**Obr. 7.4 – Konečné upevnění voskového modelu**

Poté, co je šroub dotažen imbusovým klíčem, je vložen celý přípravek do nádoby s chladícím médiem. Chladícím médiem je v našem případě voda o teplotě 9 °C a doba ponoru je 5 minut. Po vyjmutí přípravku z vody je uvolněn středový fixační kámen a krajní upínky vymezující polohu. Model je poté umístěn na podnos se dvěma voskovými kolektory, kde probíhá jeho chladnutí volně na vzduchu při teplotě okolo 20 °C (obr. 7.5).



**Obr. 7.5 – Umístění voskových modelů na kruhové kolektory**

Následnou operací je předpříprava modelu pro integraci do lící soustavy (stromečku), touto operací je hrotování.

## 7.2 Měření voskových modelů na SMS

Souřadnicové měřicí stroje (dále SMS) slouží k měření součástí, přičemž poloha jednotlivých měřených bodů je reprezentována pomocí tří souřadnic  $[x, y, z]$ . Zjišťování polohy těchto bodů, prezentujících krajní pozice součástí, probíhá v kartézském souřadnicovém systému.

### Princip měření

Prvotním požadavkem pro předpoklad správného naměření souřadnic sledovaných bodů je ideální upevnění měřené součásti do přípravku. Samotný přípravek je sestavován individuálně, podle tvarového charakteru měřené součásti a podle dostupnosti míst, které je potřeba změřit. Hlavním požadavkem pro upínací přípravek je dostatečná tuhost, která by měla zamezit chybovosti a zbytečným odchylkám při výsledcích měření.

V případě výměny snímací sondy je nutné před zahájením samotného měření provést různé druhy korekcí:

- Korekce chyb konstrukce stroje
- Korekce polohy středu doteku a poloměru kuličky
- Kompenzace odchylky teploty na stroji

Tyto korekce probíhají na samotném měřicím zařízení, většinou pomocí softwaru. Po korekci měřicí sondy může nastat samotné měření.

Konstrukce stroje má za úkol zajistit dostatečnou tuhost, ale také teplotní rozměrovou stabilitu. Mezi hlavní skupiny SMS patří:

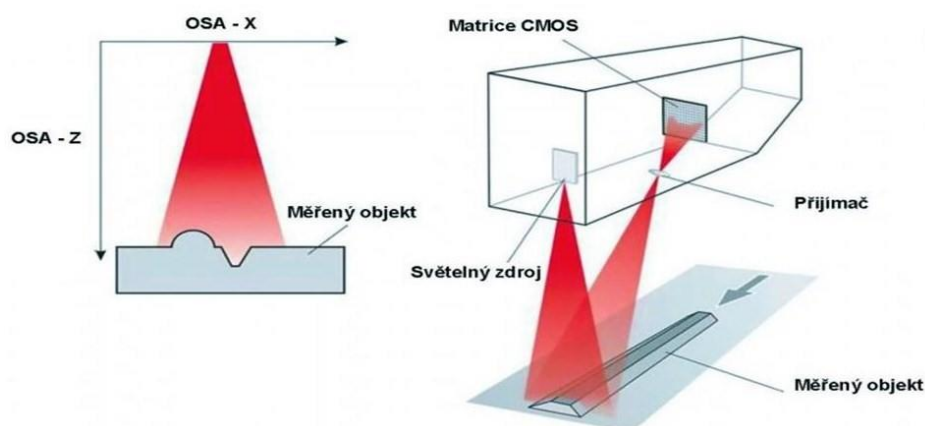
- Výložníkový SMS s pevným stolem
- SMS s pohyblivým portálem
- Výložníkový SMS s pohyblivým stolem
- Mostový SMS
- SMS s mostem ve tvaru L
- SMS s pevným portálem
- Stojanový SMS
- SMS s pohyblivým sloupem a pohyblivým vodorovným ramenem
- SMS s pevným stolem a vodorovným ramenem
- SMS s pohyblivým stolem a vodorovným ramenem

### 7.3 Měření voskových modelů laserovým skenerem

Laserový skener je měřicí zařízení patřící mezi nedotykové snímací systémy, jejichž hlavní devizou je nepoužívání kontaktu s měřenou součástí. Snímací prvek zde tvoří laserová skenovací hlava nebo optická skenovací hlava (v tomto případě pouze laserová).

Skenovací hlava obsahující generátor laserového záření je umístěna nad měřenou součástí. Laser, který je z hlavy vyzařován, dopadá na měřenou součást. Odrážené světelné záření je zachycováno objektivem citlivé kamery, čímž se vyhodnocuje poloha nasnímaných bodů.

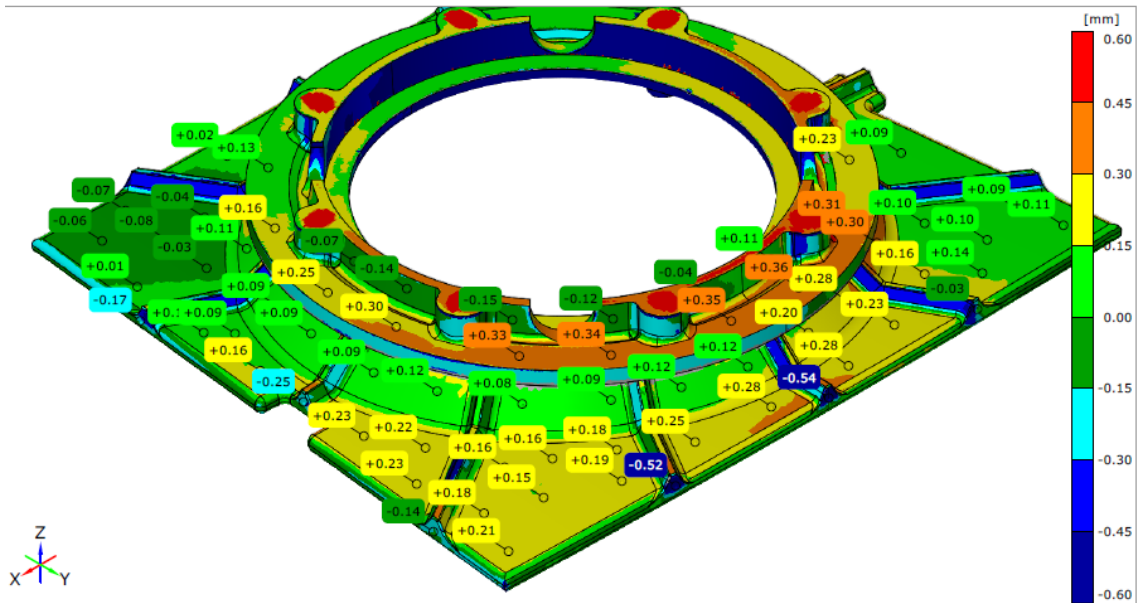
U laserového skeneru se využívá principu triangulace, který pracuje s aplikací trigonometrických výpočtů. Zde se využívá výpočtu chybějícího bodu na základě polohy dvou již známých bodů.



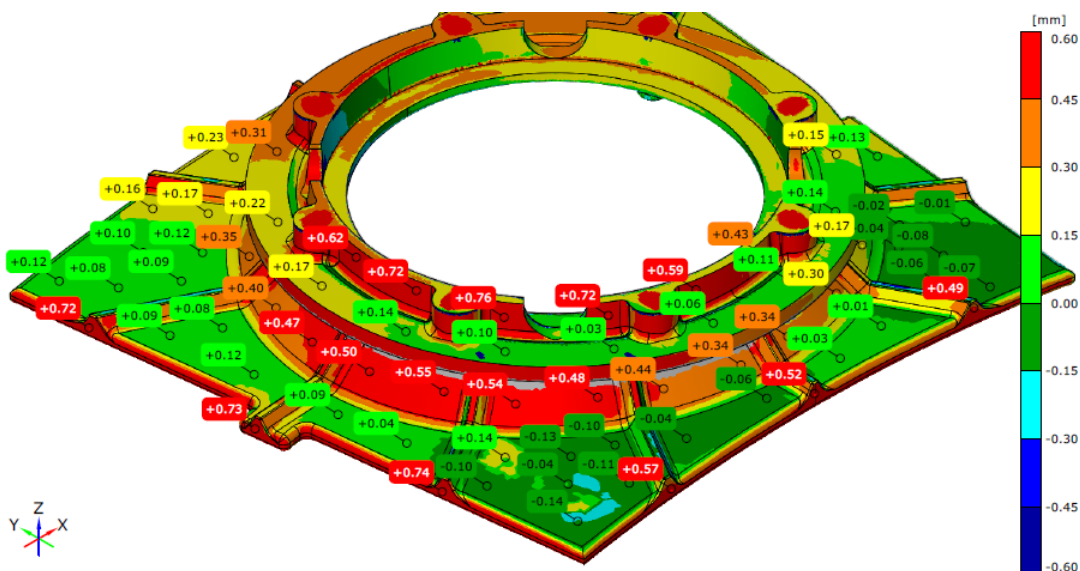
Obr. 7.6 – Princip měření skenovacím zařízením [H17]

### Vlastní měření voskového modelu

Měření voskových modelů na laserovém skeneru probíhalo způsobem, kdy se snímaly odchylky modelu vždy ze dvou stran. Nejprve se umístil model na podložku tak, aby byl snímán izometricky, poté se model otočil o 180° a proběhlo snímání bodů i z této strany. Z těchto získaných bodů lze dostat ucelený tvar a polohu bodů snímaného tělesa.



**Obr. 7.7 – Výsledky měření voskové modelu z jedné strany**



**Obr. 7.8 – Snímání bodů měřeného modelu natočeného o 180 °**

Ze snímků jsou patrné skokové odchylky snímaného profilu, což svědčí o nepřesnosti naměřených výsledků, zejména v prostoru rozšiřujícího se vnějšího prstence, kde jsou odchylky oproti rovinným částem téměř o 0,5 mm větší.

Pro přesnější získané hodnoty se doporučuje snímání voskového modelu z více jak těchto dvou stran (ideální varianta pro tento případ počítá se čtyřmi snímanými polohami). Tím se docílí vyšší přesnosti při získání 3D deformovaného modelu.

Další otázkou je zvolená strana měření snímaného modelu a její vliv na výsledky měření. Pokud měříme takto členitý povrch, je nutné zvolit takové umístění snímací hlavy, aby byly hrany, za které se nedostane paprsek, snímány z jiné polohy.

Pro lepší získané výsledky měření deformací takto členité součásti a zjištění uceleného pohledu na deformaci je lepší snímat tu stranu povrchu, která nemá nefunkční části (žebra, zbytky vtokové sestavy), proto je pro měření modelů na SMS zvolena hladká strana tepelného štítu, která neobsahuje právě tyto nerovnosti.

## 7.4 Porovnání měření lasercan vs. SMS stroj

Rychlost snímání bodů je u laserových skenerů vysoká (až 75 000 bodů za sekundu), proto se tato metoda využívá zejména při měření rozměrných kusů. Pokud využijeme měření pomocí SMS, bude výsledná časová náročnost v porovnání s nedotykovým snímacím systémem mnohem vyšší (složitější upnutí, kalibrace atd.).

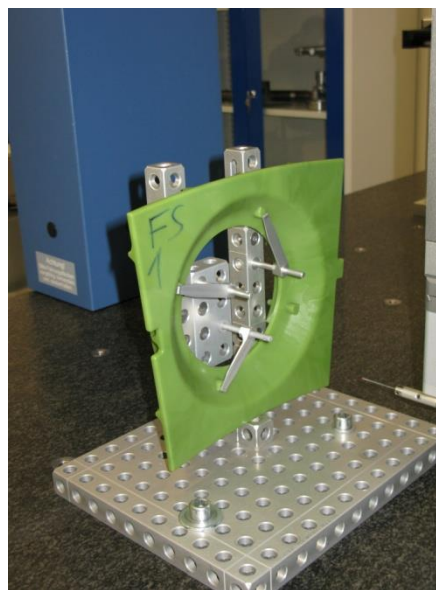
Výhodou laserových skenerů je možnost snímání a měření všech obecných i tvarových ploch, naopak u SMS nelze měřit všechny plochy. Důvodem je nutnost zajištění stabilní polohy v přípravku. Kromě rozměrných dílů se skenery používají pro měření součástí křehkých, u kterých není vhodné upevnění do přípravku, a to z důvodu možného porušení povrchu součásti.

Naopak laserové skenery se nehodí použít při měření součástí, které disponují lesklým povrchem. V tomto případě dochází ke zkreslení výsledků.

## 7.5 Vyhodnocování výsledků měření pomocí SMS

Voskové modely tepelných štítů byly pro měření na souřadnicovém měřicím přístroji upevněny v přípravku, který byl sestaven tak, aby vyhovoval následujícím požadavkům:

- Dostupnost všech ploch důležitých pro vyhodnocení měřeného modelu, tak aby nenastala kolize trajektorie dráhy dotykové sondy s přípravkem, či jinými upínkami.
- Takové upevnění měřeného modelu, které zamezí vychýlení součásti z předem zafixované polohy během probíhajícího měření.



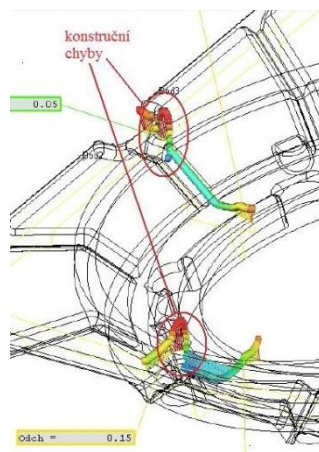
**Obr. 7.9– Upevnění voskového modelu do přípravku pro měření**

Pro zhodnocení účinku a vlivu změny vstřikovacích parametrů na následné deformace lisovaného modelu po vyjmutí a následném chladnutí byla zajištěna výroba modelů, kdy pro každou změnu parametru byly zajištěny dva modely. První z nich byl vylisován za podmínek odpovídajících nominálnímu produktu společnosti. Před lisováním dalších modelů byl změněn vždy jeden vstřikovací parametr, přičemž ostatní veličiny se nastavily vždy do nominálních hodnot.

Na měřeném voskovém modelu byly stanoveny body, které nám zajišťují kontrolu velikosti měřeného modelu a porovnávají jej s modelem, který byl dodán v elektronické podobě jako porovnávací. Tyto body znázorňují odchylku bodu od normály. Hodnota tolerance zde byla stanovena 0,3 mm.

Při porovnávání reálného měřeného modelu s modelem elektronickým bylo nalezeno kritické místo, kde je po každém měření znázorněna skoková změna odchylky (obr. 7.10). Tyto změny jsou zapříčiněny špatným napojením křivek při konstrukci modelu. Jelikož jsou tyto nepřesnosti jen v určitých místech a nenarušují objektivní posouzení odchylek, budou při vyhodnocení zanedbány.





**Obr. 7.10 – Konstrukční chyby modelu**

### 7.5.1 Nominální voskový model

Tento voskový model je vylisován za podmínek a nastavených parametrů, které odpovídají běžným výrobním podmínkám.

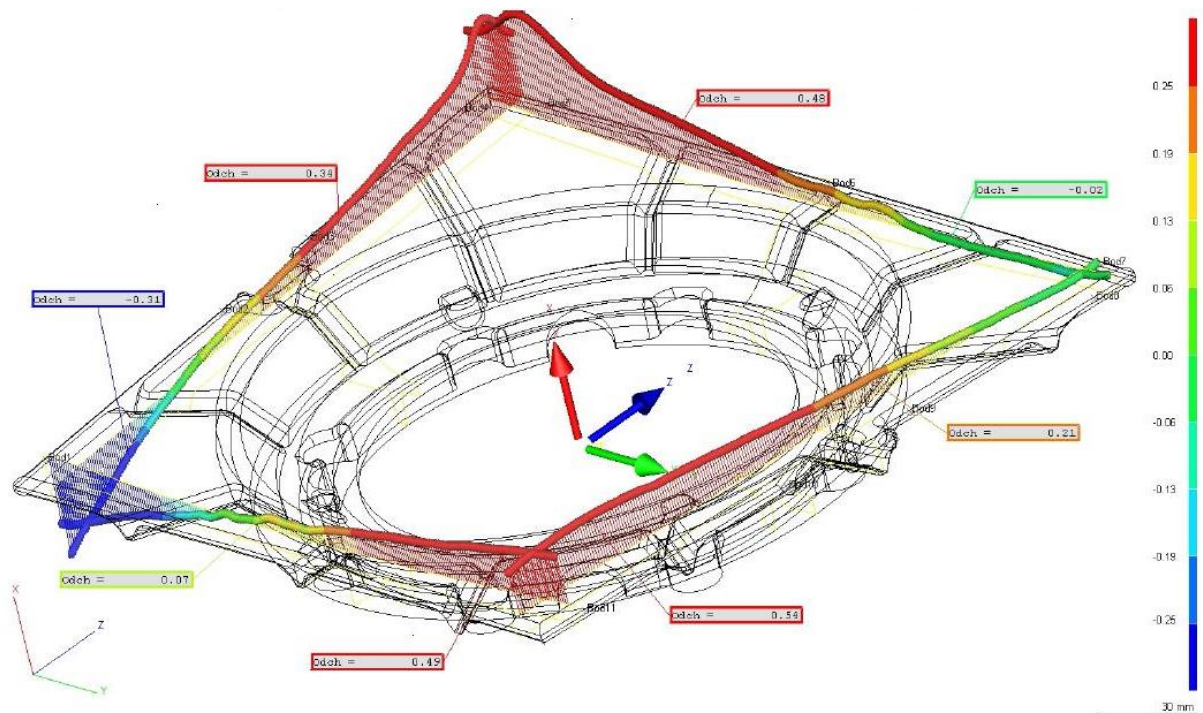
**Tab. 7.3 – Hodnoty nominálního voskového modelu**

<b>Typ vosku</b>	B417	<b>Svírací tlak</b>	Maximální
<b>Vstřikovací tlak</b>	3 barr	<b>Čas vstřikování</b>	90 sekund
<b>Teplota trysky</b>	72 °C	<b>Čas tuhnutí</b>	120 sekund
<b>Teplota zásobníku</b>	70 °C	<b>Teplota vody</b>	9,6 °C

Na odchylkovém diagramu je patrná extrémní odchylka volných stran modelu (obr. 7.11). Pro vyhovující interval deformace je stanoveno rozmezí 0,3 mm na celé straně. Pravý roh je téměř bez jakékoliv deformace, avšak porovnáním s protějšími rohy, mající deformaci vysoce přes 0,5 mm, jsou deformace značné. Naopak levý roh štítu má značně zápornou odchylku. Podíváme-li se na štít jako celek, jsou zřetelné značné deformace ve volných rozích, přičemž středy těchto stran mají odchýlení od rozměru minimální.

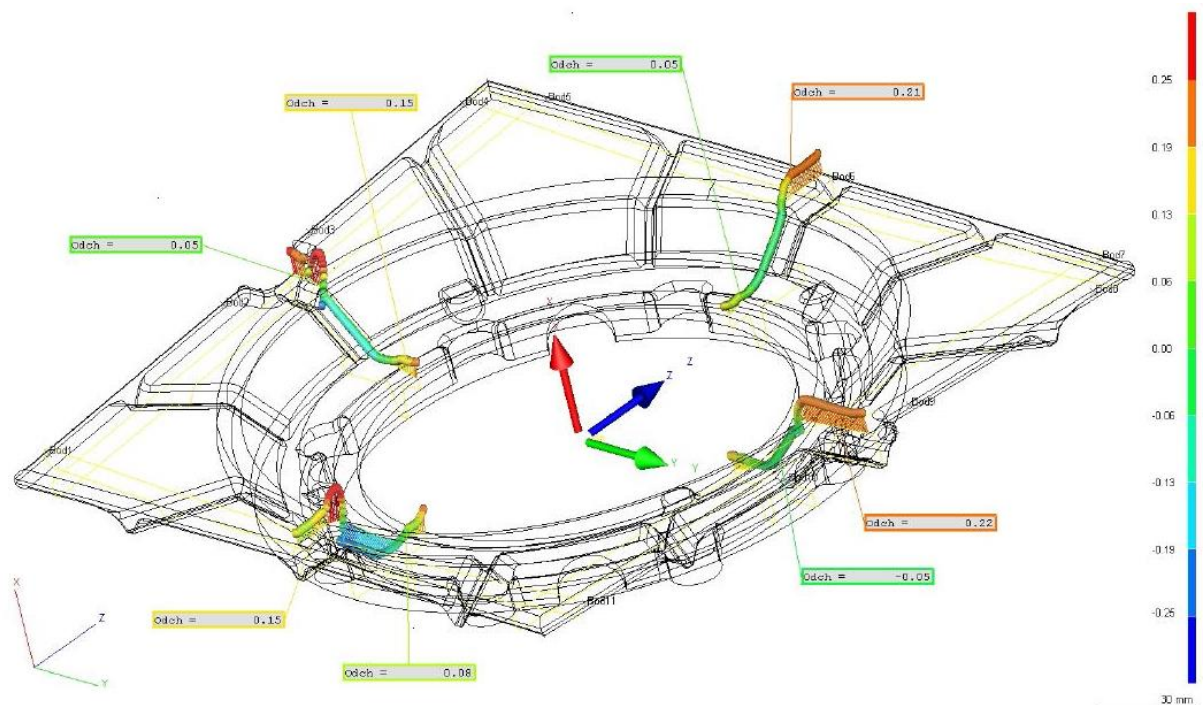
Jelikož i tento model chladl ve fixačním přípravku, kde jsou právě tyto zdeformované okraje upevněny, je jedním z možných zdrojů deformací chyba upevnění měřeného modelu na souřadnicovém přístroji. Proto bylo upnutí i následné měření opakováno, avšak výsledky byly téměř totožné.

Další možnou příčinou je příliš dlouhá prodleva mezi vyjmutím modelu z matečné formy a jeho uložením do přípravku. Pokud tento model chladl delší dobu volně na vzduchu, mohlo dojít ke vzniku vnitřních pnutí, která se projevují právě zkroucením nejtenčích volných částí součásti.



**Obr. 7.11 – Deformace volných krajů štitu**

Odchýlení výsledného tvaru vnitřního prstence znázorňuje téměř nulovou odchylku v rozšiřující se části kruhového otvoru. Naopak okraje vnějších ploch mají deformace totožné s měřenými křivkami, které se právě v tomto místě protínají (obr. 7.12).



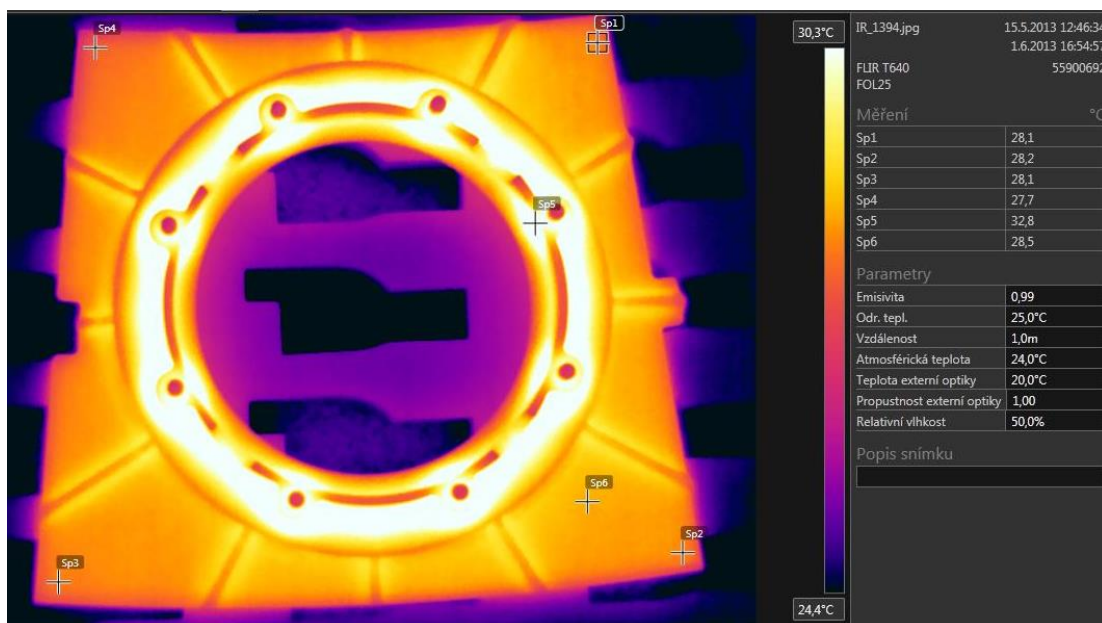
**Obr. 7.12 – Deformace vnitřního prstence**

Průběh chladnutí při nastavení běžných podmínek vstřikování a chladnutí, se bude vyhodnocovat ze snímků pořízeného termokamerou.

K měření bylo využito následující kalibrované zařízení:

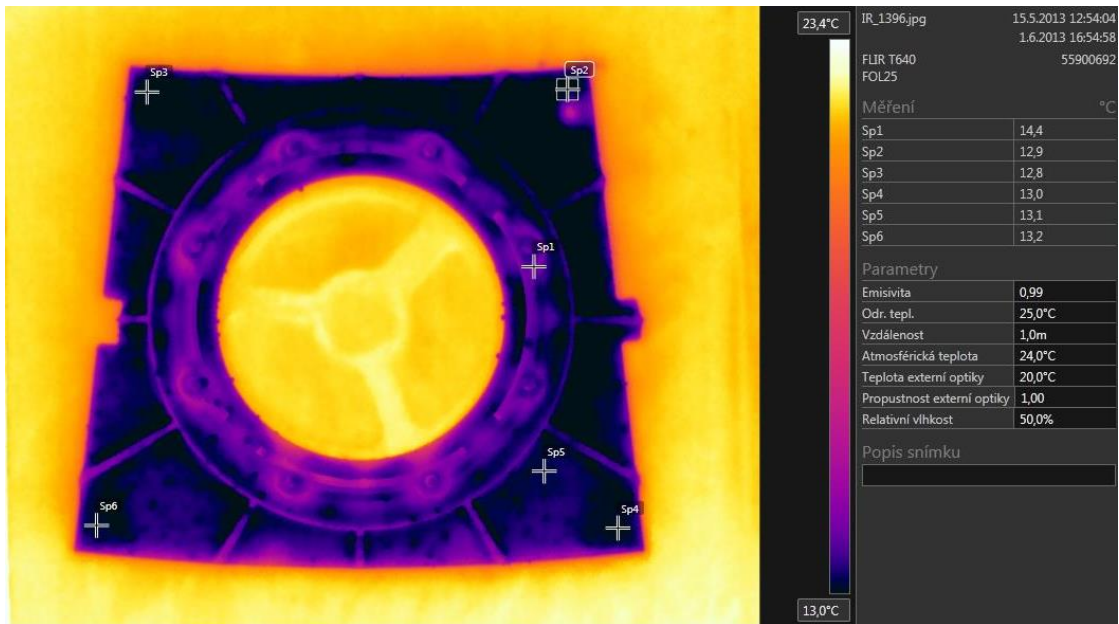
- Termokamera FLIR T640 a vyhodnocovací software TOOLS+
- Kontaktní teploměr Ahlborn Therm 2420 s termočlánkem FT 106
- Stopky, svinovací metr
- Nastavení ostatních parametrů viz snímky

Obr. 7.13 znázorňuje teplotu celého modelu, ale také vybraných Sp bodů z následujících termogramů okamžitě po vyjmutí z matečné formy. Je patrná teplota všech sledovaných bodů okolo 28 °C, přičemž bod měřený v místě vtoku vosku má 32,8 °C.



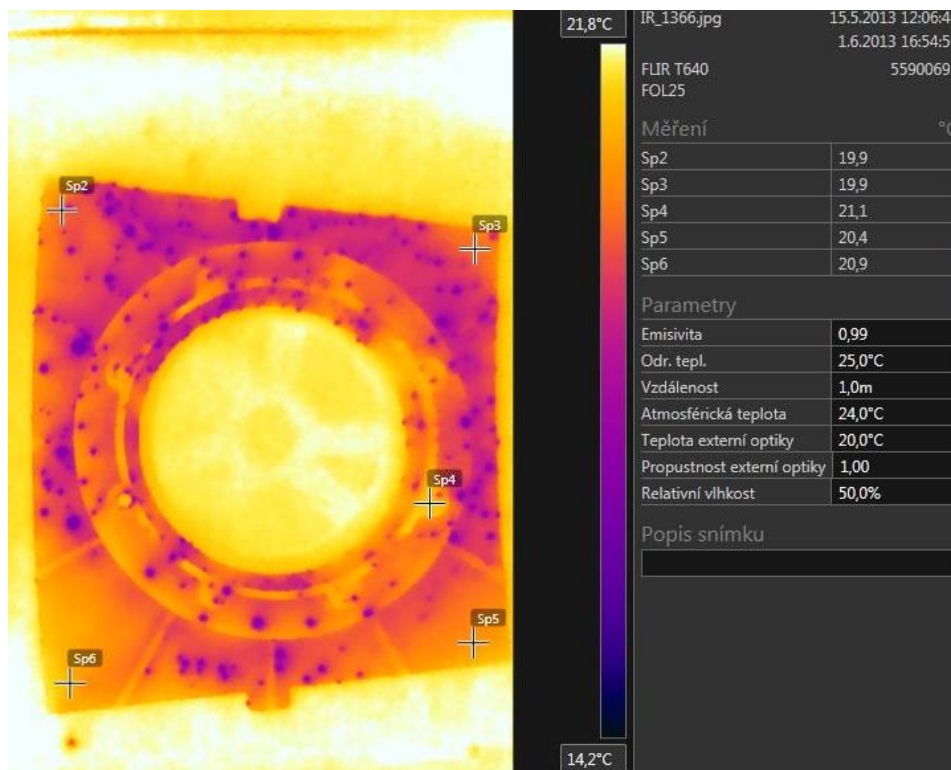
**Obr. 7.13 – Tepelné pole modelu po vyjmutí z formy**

Po vyjmutí modelu štítu z vody a jeho uvolnění z přípravku byl pořízen snímek, který zaznamenal tytéž Sp body. Všechny měřené body mají hodnotu okolo 13 °C, pouze v místě vtoku je teplota 14,4 °C. Tyto výsledky značí snížení teploty celého modelu o více jak 15 °C.



**Obr. 7.14 – Teplotní pole modelu po chlazení ve vodě**

Obrázek 7.15 je důkazem ohřívání povrchu modelu, snímek je pořízen po 4 minutách a značí ohřátí všech sledovaných bodů průměrně o 5 °C. Ohřívání je důsledkem vyrovnávání teplot mezi jádrem modelu, kde je teplota nejvyšší, a ochlazeným povrchem modelu.



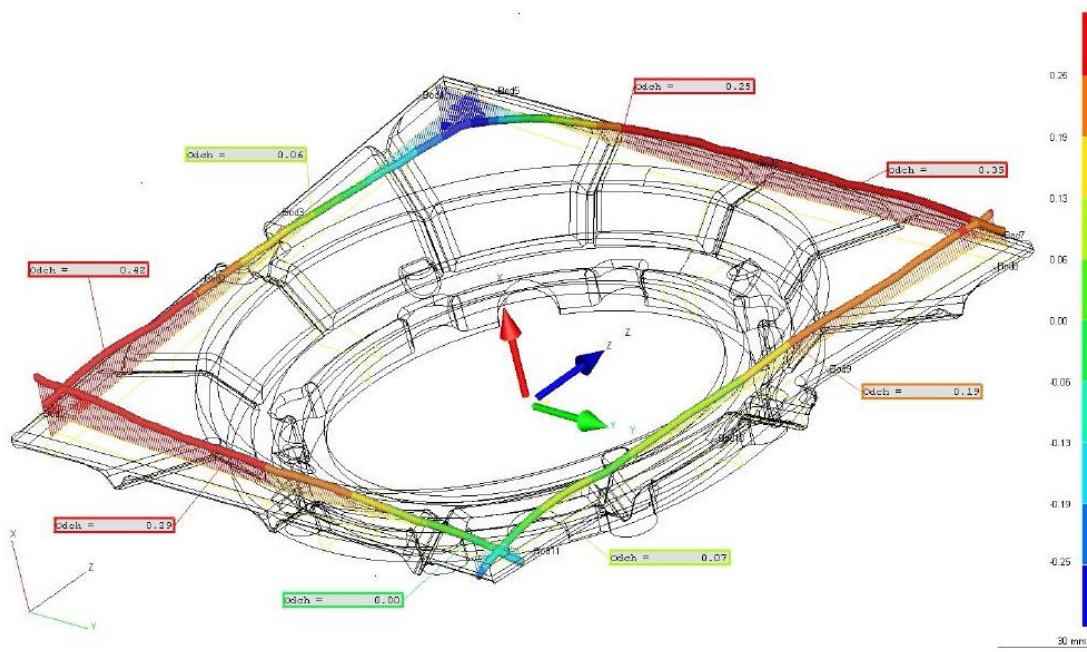
**Obr. 7.15 – Vyrovnávání teplot modelu s okolím**

## 7.5.2 Vliv doby pobytu ve vodě na deformace

Poté, co jsou voskové modely upevněny do fixačního přípravku, probíhá jejich chladnutí ve vodě o teplotě 9,6 stupňů po dobu pěti minut.

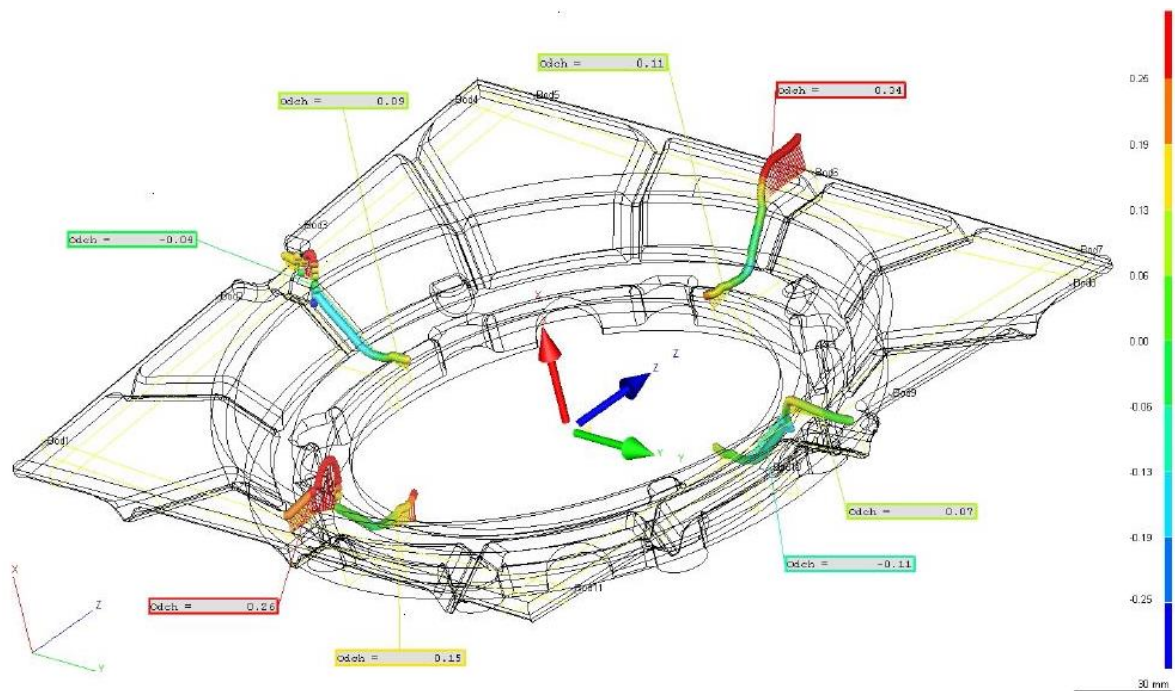
Pro zjištění reakce voskového modelu na odlišné podmínky chladnutí, než které jsou předepsány v operační návodce, byla změněna doba ponoru ve vodě. První měřený model chladl 3 minuty, druhý pouze 1 minutu.

Model, který chladl ve vodě po dobu 3 minut má také značné deformace jednotlivých částí (obr. 7.16). Ačkoliv jsou měřené úseky téměř v povolené toleranci odchylky, horní i dolní roh štítu je značně zdeformovaný do záporných hodnot. Maximální odchylka v horním rohu je - 0,45 mm, přičemž odchylka pravého rohu téměř 0,5 mm. Celkové převýšení je 1 mm, což je již nežádoucí rozměr.



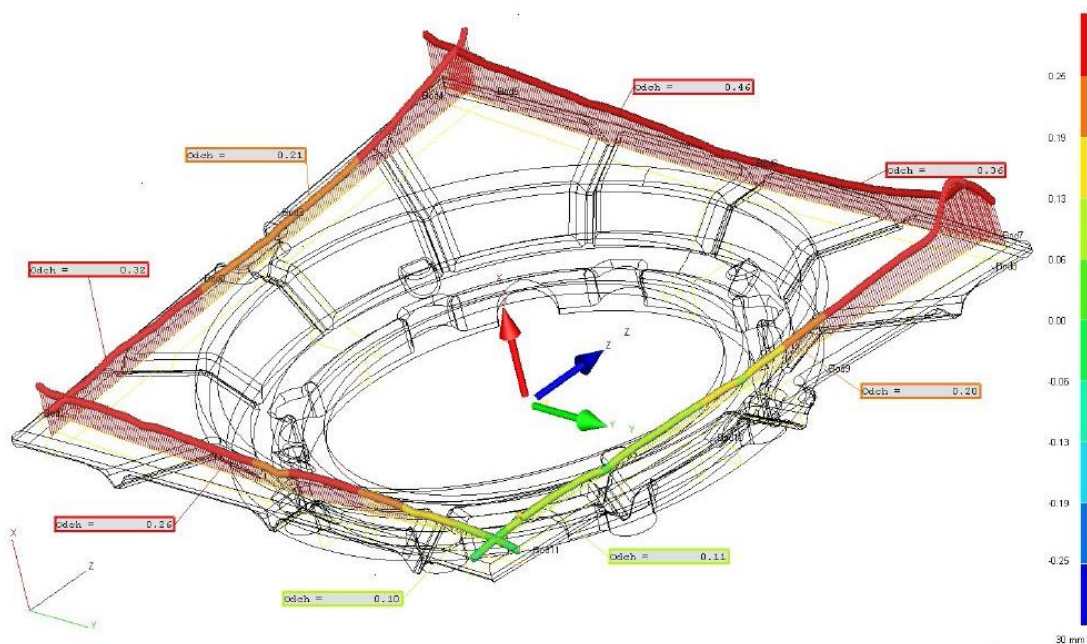
**Obr. 7.16 – Deformace volných krajů (doba ponoru 3 minuty)**

Vnitřní prstenec má okraje centrálního otvoru v maximální hodnotě 0,2 mm, což kooperuje s deformací vrchní plochy modelu. Tyto plochy jsou oproti nominální součásti vyvýšené. Naopak v rozšiřující se části jsou naměřeny mírně záporné hodnoty (až - 0,2 mm), což svědčí o mírně propadlém profilu.



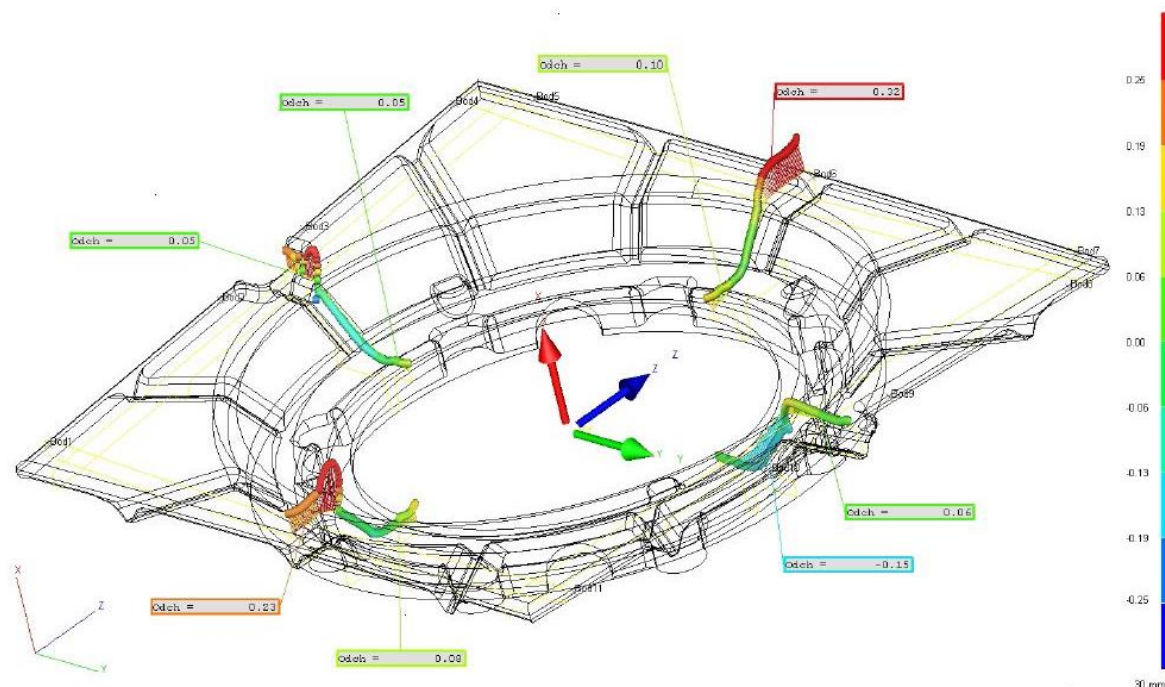
**Obr. 7.17 – Deformace vnitřního prstence (doba ponoru 3 minuty)**

Pokud je doba ponoření v chladícím mediu pouze 1 minuta, lze vypočítat zřetelné kroucení okrajů do vysokých hodnot, ke kterému dojde zejména kvůli předčasnému vyndání z vody a následnému chladnutí volně na vzduchu (obr. 7.18). Spodní roh je v ideálním stavu ( $< 0,1$  mm), avšak ostatní volné kraje nabývají vysokých odchylek (0,5 mm), přičemž pravý okraj dosahuje téměř dvojnásobné odchylky. Z výsledných hodnot je zřetelná snaha tenkých stěn deformovat se ve směru osy x, čemuž však brání robustní středová část modelu.



**Obr. 7.18 – Deformace volných krajů (doba ponoru 1 minuta)**

Na naměřených hodnotách (obr. 7.19) se potvrzuje teze, kdy se tenké okrajové části deformují ve směru osy X (zabalují se do sebe), přičemž místo s rozšiřujícím se vnitřním prstencem nabývá hodnot záporných (0,2 mm). Záporné hodnoty a s tím spojený vyduťtý tvar, jsou důsledkem deformace tenkých částí modelu.

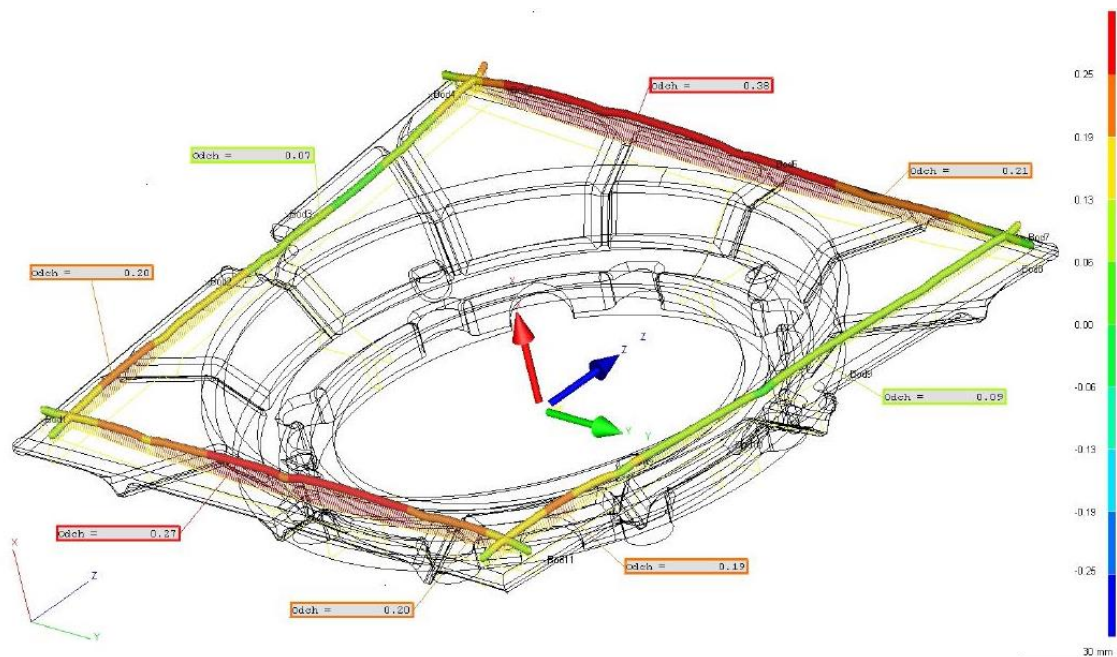


**Obr. 7.19 – Deformace vnitřního prstence (doba ponoru 1 minutu)**

### 7.5.3 Doba vstřikování a její vliv na deformace

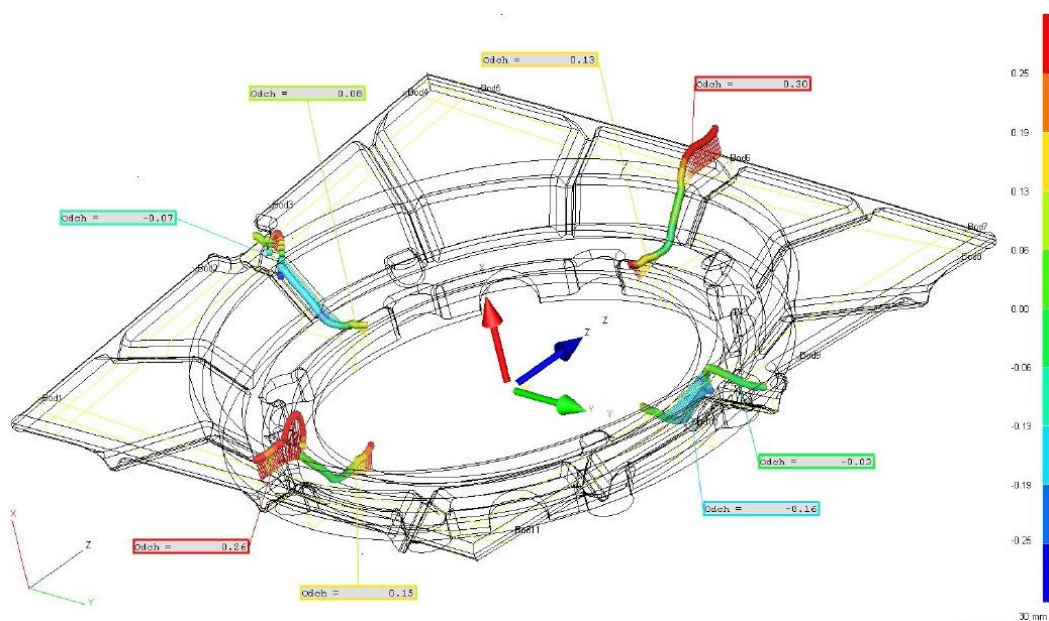
Standardní doba vstřikování voskové směsi do matečné formy je 90 sekund. V tomto časovém údobí probíhá mimo dopravení daného objemu vosku tzv. dotlak, který je charakteristický působením tlakové síly na již vlisovaný objem.

Při snížení vstřikovacího času na 60 sekund, není patrné zvýšení deformace (obr. 7.20). Naopak místa volných rohů mají odchylky od nominálního stavu minimální, a to nanejvýše + 0,1 mm. Strany tepelného štítu souběžné s osou Z jsou po celé své délce v ideálním rozmezí 0,01 až 0,2 mm, což je žádoucí stav deformace. Zbývající strany jsou deformovány oproti krajním polohám o 0,38 mm, což je nevyhovující stav.



**Obr. 7.20 – Deformace volných okrajů (vstřikování 60 sekund)**

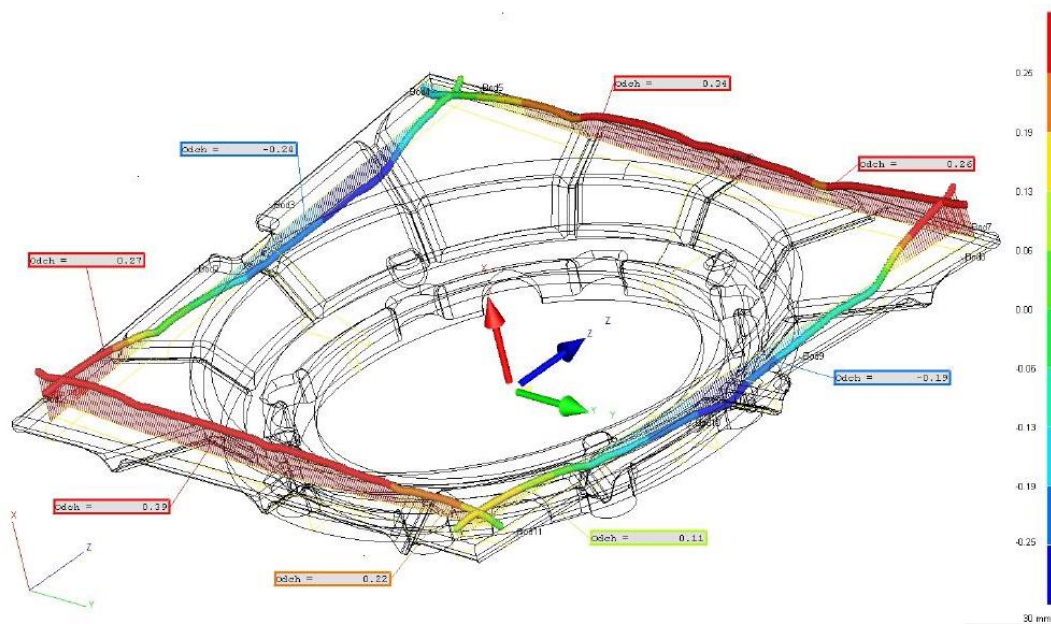
Jelikož jsou horní okraje děr ovlivněny deformacemi volných okrajů stran štítu, jsou i zde deformace v ose Z téměř 0,3 mm, ve směru osy Y je tato odchylka v ideální mezi (max. 0,05mm (obr. 7.21). Rozšiřující se prstenec ve směru Z nemá téměř žádné znatelné odchylky tvaru, naopak zbylé dva řezy jsou propadlé, a to téměř 0,2 mm.



**Obr. 7.21– Deformace vnitřního prstence (vstřikování 60 sekund)**

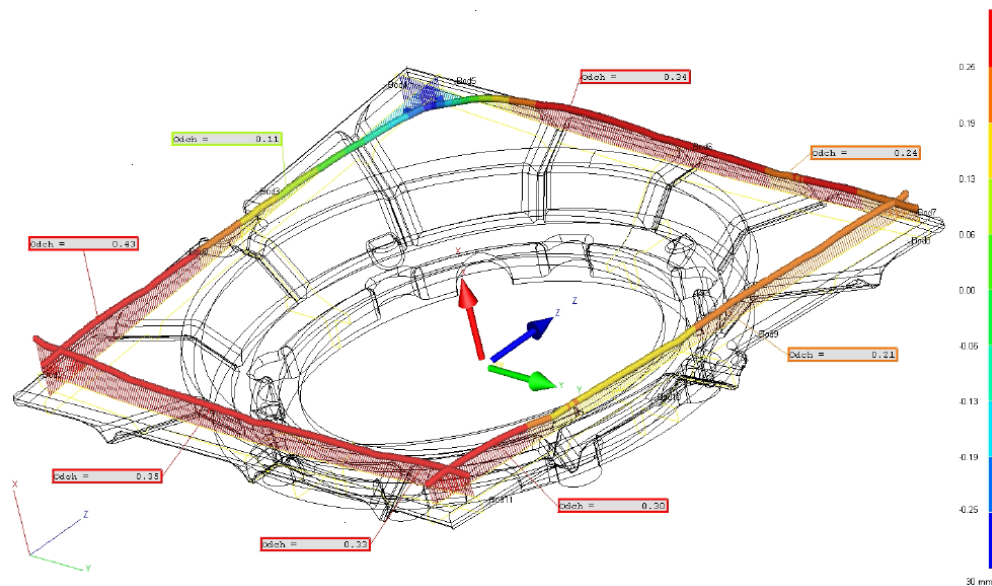
Na obr. 7.22 jsou v některých místech patrné extrémní odchylky, které dosahují - 0,4 mm, respektive 0,39 mm. Je patrné, že okraje štítu jsou zkrouceny nezávisle na umístění modelu v přípravku. Tvarové změny jsou způsobeny nedostačujícím působením tlaku tekutého vosku na stěny formy a tím pádem nedokonalého vzniku struktury voskového modelu.





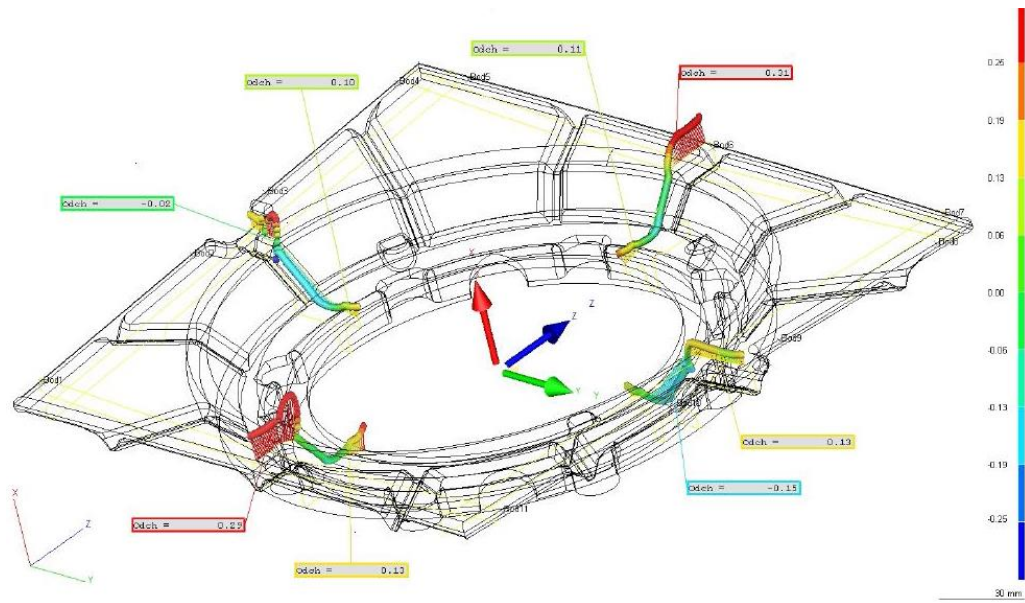
**Obr. 7.22 – Deformace volných okrajů (vstřikování 30 sekund)**

Pokud je doba vstřikování prodloužena na 120 sekund (obr. 7.23), výsledná deformace bude sice značná, v některých místech 0,43 mm, avšak pokud budeme brát v potaz povolenou odchylku rozměru 0,3 mm, lze uvažovat chybu rozměru voskového modelu oproti porovnávacímu počítačovému modelu. Rozmezí deformace se pohybuje v povolených hodnotách a bylo stanoveno na 0,3 mm. Jediné místo se značným odchýlením je horní roh modelu, kde nastala záporná deformace (-0,3 mm).



**Obr. 7.23 – Deformace volných okrajů (vstřikování 120 sekund)**

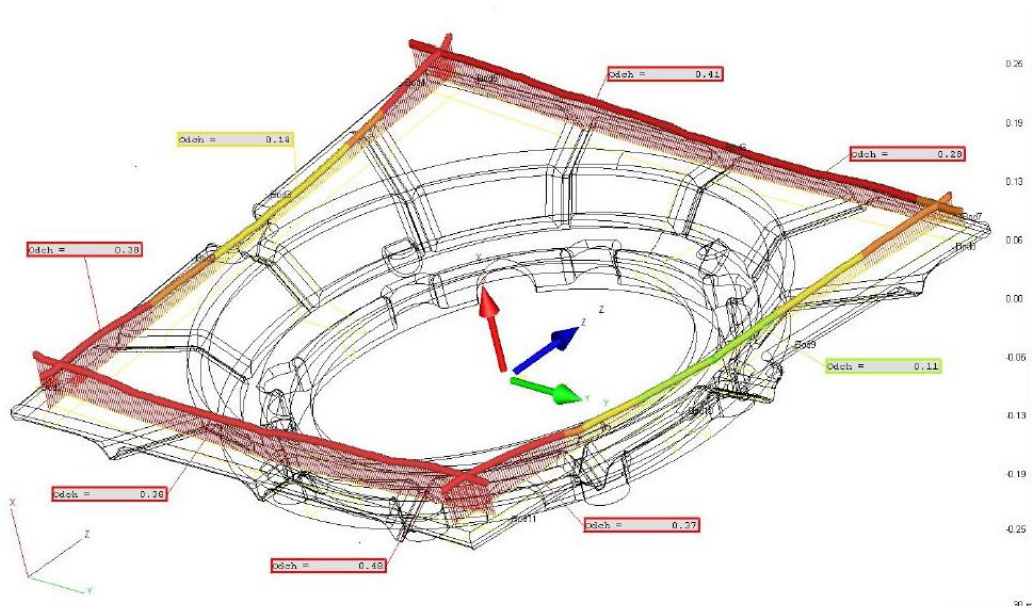
Deformace ve směru rozšiřování vnitřního otvoru se nachází ve značně záporných hodnotách (až -0,2 mm). I pokud budeme brát v úvahu možnost odchylky velikosti voskového modelu s porovnávacím, odchylka v horní části modelu je natolik značná (+ 0,31 mm), že se odchylka celého splínu do povolené tolerance nepřiblíží.



**Obr. 7.23 – Deformace vnitřního prstence (vstříkování 120 sekund)**

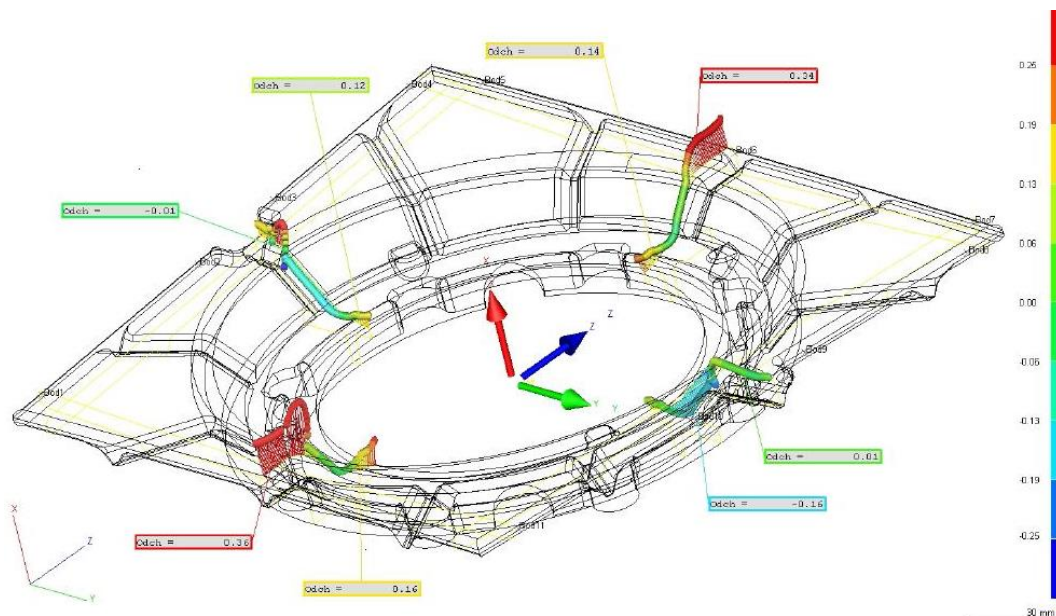
### 7.5.4 Vliv výdrže modelu ve formě na deformace

Pokud je doba výdrže, která následuje po vstříkování voskové směsi do matečné formy, snížena na 60 sekund, nejsou patrné značné odchylky tvaru (obr. 7.24). Křivky rovnoběžné se směrem Y mají sice odchylky od 0,2 do 0,48 mm, avšak právě tyto hodnoty jsou v intervalu povolených hodnot. Křivky ve směru Z mají odchylky v intervalu od 0,11 do 0,39 mm, což je také vhodná tolerance.



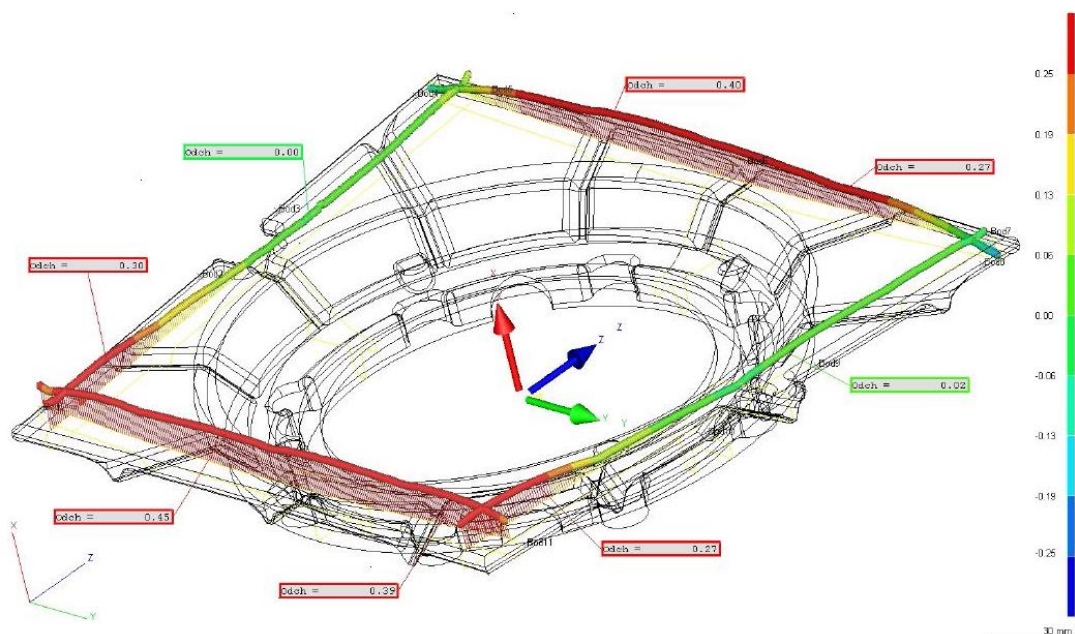
**Obr. 7.24 – Deformace volných okrajů (doba výdrže 60 sekund)**

Pohled na tvarové odchylky vnitřního prstence odhalil značný propad profilu ve směru osy Y (téměř - 0,2 mm), což může být důsledkem vyvýšení profilu volných okrajů stran ve stejném směru (obr. 7.25). Naopak deformace ve směru osy Z nejsou v místě rozšíření příliš znatelné, což je způsobeno relativně ustáleným tvarem volných okrajů v tomto směru.



**Obr. 7.25 – Deformace prstence (doba výdrže 60 sekund)**

Obr. 7.26 zachycuje působení deformací na voskový model při době výdrže snižené na 30 sekund. Ačkoliv je převážná část křivek působících ve směru osy Z absolutně nedeformována, nastává na jejich koncích rapidní nárůst deformace, a to téměř na 0,4 mm, a tudíž lze model označit za nevhodný. Z těchto důvodů dále neuvažujeme deformaci prstence.

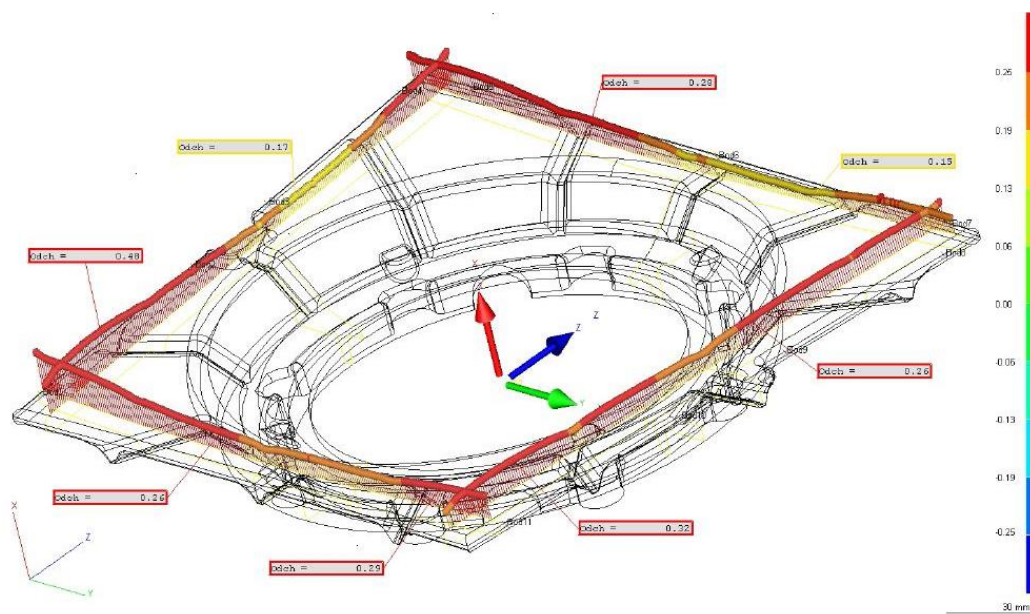


**Obr. 7.26 – Deformace volných okrajů (doba výdrže 30 sekund)**

### 7.5.5 Vstřikovací tlak a jeho vliv na deformace modelu

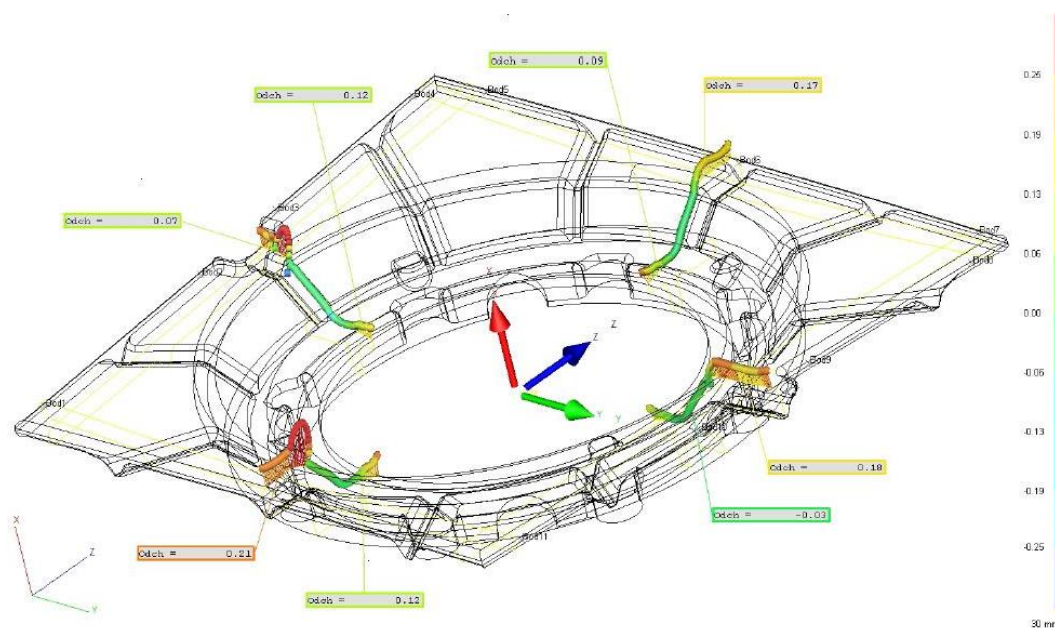
Vstřikovací tlak byl oproti nominální hodnotě nejprve zvýšen a poté byl nastaven nižší. Při nastavení tlaku 4 barry jsou výsledné odchylky od definovaného tvaru značné (obr. 7.27). Avšak při

detailnějším rozboru je patrné, že všechny hodnoty činí interval v rozsahu 0,17 až 0,47 mm, což je přesný rozsah tolerančního pole.



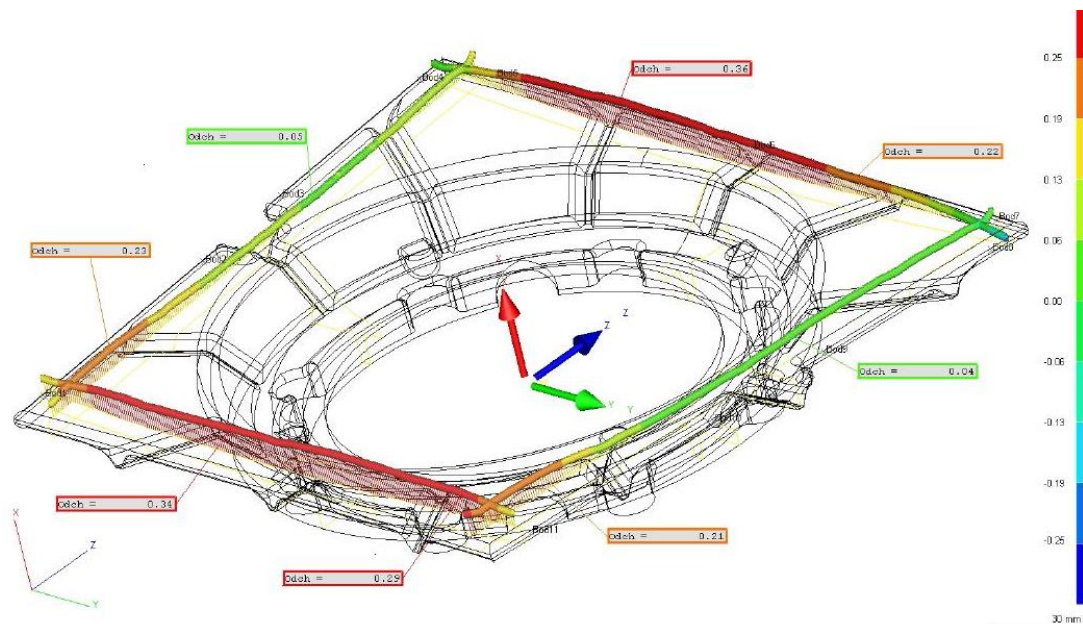
**Obr. 7.27 – Deformace volných okrajů (tlak 4 barry)**

Obr. 7.28 znázorňuje jednoznačně nejlepší hodnoty odchylek v místech rozšiřujícího se průměru. V těchto místech jsou odchylky v setinových hodnotách. Vnější konce těchto křivek přebírají hodnoty z předchozího obrázku (max. 0,21 mm). I přes tyto hodnoty odchylek se nacházíme v tolerančním poli, což je žádoucí.



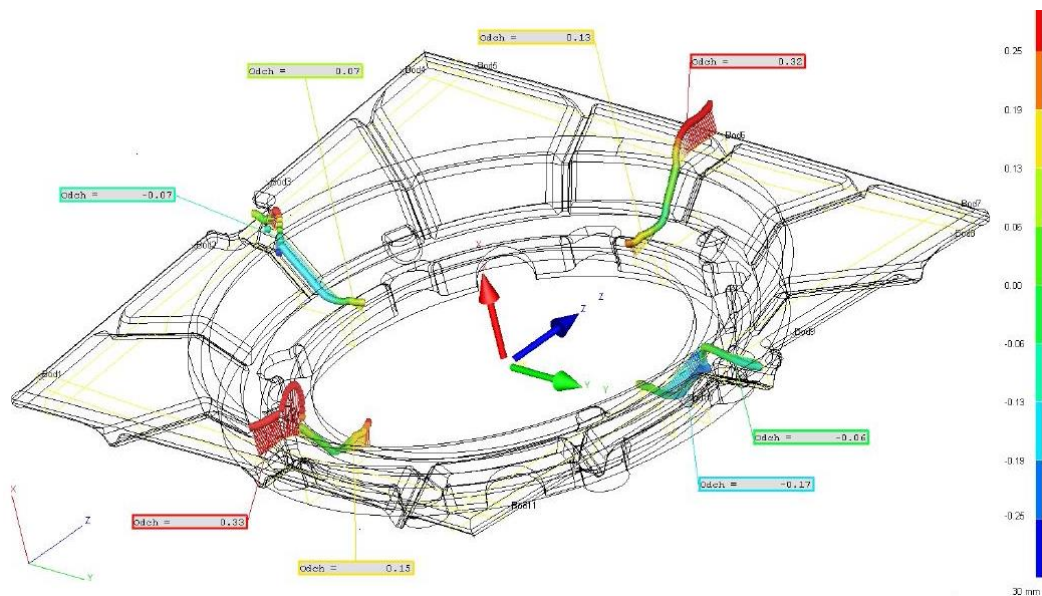
**Obr. 7.28 – Deformace prstence (tlak 4 barry)**

Při použití nižšího pracovního tlaku (2 bary) nejsou při pohledu na deformace volných okrajů (obr. 7.29) odchylky tvaru natolik výrazné jako u předešlých změn parametrů. Ačkoliv deformace stran ve směru osy Z jsou v hodnotách od 0,00 do 0,23 mm a tedy i v povolené toleranci, strany na tento směr kolmé nabývají v extrému hodnotu téměř 0,36 mm, což je pro použití modelu nevyhovující.



**Obr. 7.29 – Deformace volných okrajů (tlak 2 bary)**

Z obrázku 7.30 je zřetelný propad profilu v místě rozšíření otvoru do záporných hodnot (- 0,2 mm). Tyto hodnoty připisujeme deformaci horních volných okrajů ve směru osy Y. Naopak prstenec ve směru osy Z má odchylky minimální, a to z důvodu malých deformací volných okrajů ve stejném směru. Vnější okraje této křivky jsou však ovlivněny deformací volného okraje v kolmém směru (0,33 mm, respektive 0,38 mm).



**Obr. 7.30 – Deformace prstence (tlak 2 barry)**

Pro vyhodnocení působení vstřikovacího tlaku byl vyroben také model o hodnotě vstřikovacího tlaku 1 bar, avšak z důvodu viditelných vad, jakými je například nezaběhnutí materiálu do celého profilu modelu (viz obr. 7.31) nebo nerovnoměrnost povrchu, nebylo provedeno měření odchylek na měřícím zařízení.



**Obr. 7.31– Nezaběhnutí vosku**

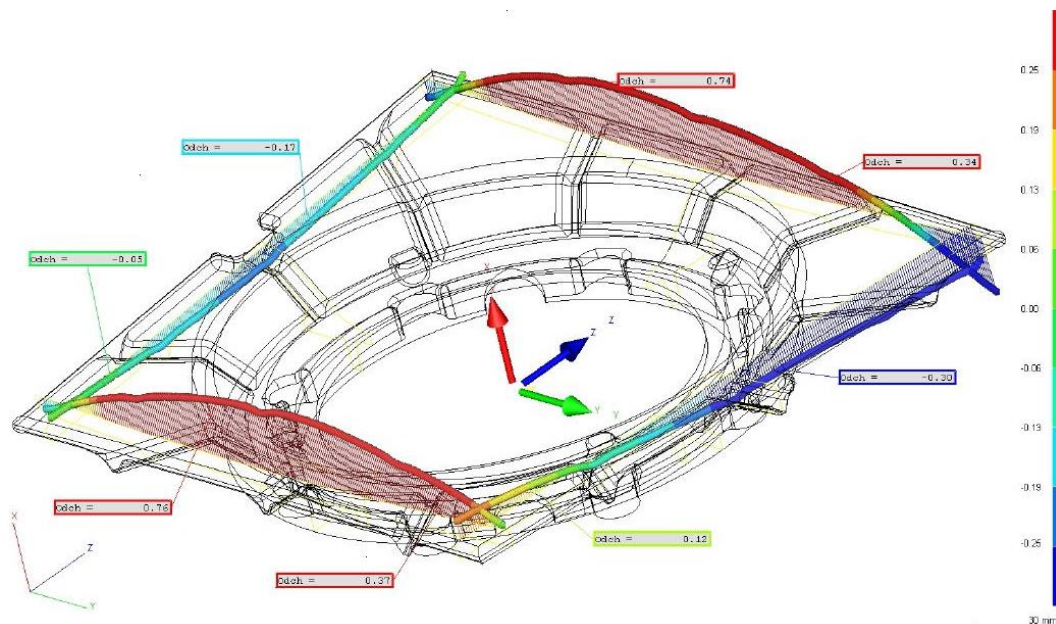
### 7.5.6 Chlazení modelu na vzduchu

Pro zjištění působení všech měnitelných parametrů a vlivů na velikost deformace voskových modelů proběhlo chlazení voskového modelu také na vzduchu.

Po vyjmutí z lisovací formy byl model upevněn do fixačního přípravku standardním způsobem, avšak nebyl ponořen do chladícího média, nýbrž chladl v přípravku působením okolního prostředí. Po uplynutí 5 minut byl model vyjmut z přípravku a chladl volně uležený na kruhových kolektorech.

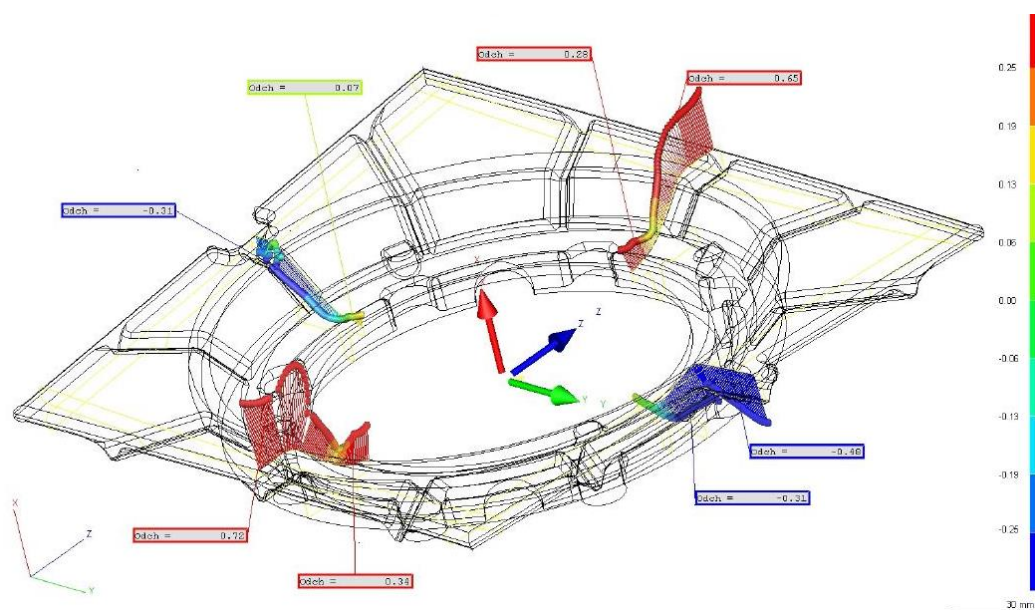
Na obr. 7.32 jsou patrné značné odchylky tvaru ve směru kolmém na osu Z, maximální hodnoty jsou právě ve středu těchto křivek, a to téměř +0,8 mm. Naopak levá strana po směru osy Z má interval

deformace v rozmezí - 0,05 až - 0,2 mm, což je vyhovující stav. Pravý okraj má extrémní posun do záporných hodnot (- 0,4 mm), což způsobuje převýšení horní kontrolní křivky téměř 1,2 mm. Tento stav je absolutně nepřijatelný.



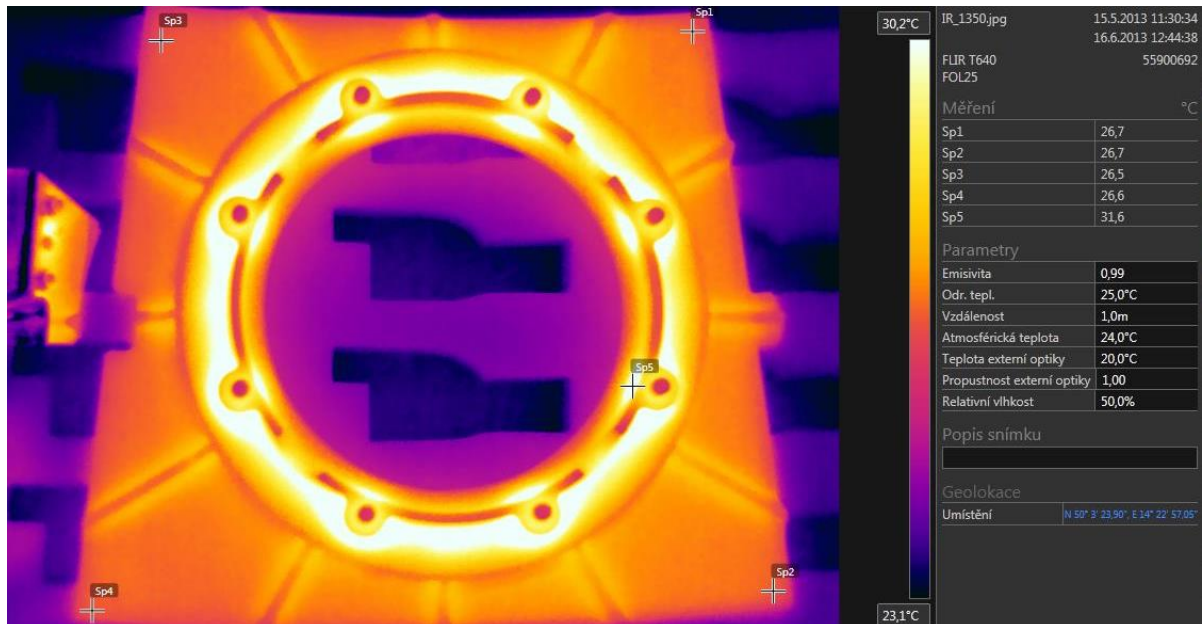
**Obr. 7.32 – Deformace volných okrajů (chlazení na vzduchu)**

Obr. 7.33 znázorňuje viditelný propad profilu ve směru osy Y do záporných hodnot (až - 0,45 mm), který je ovlivňován velkou odchylkou volného okraje právě v tomto směru. Celkový tvarový profil modelu je značně zdeformovaný a pokroucený, proto využití chlazení za pomoci vzduchu nedoporučujeme.



**Obr. 7.33 – Deformace prstence (chlazení na vzduchu)**

Hlavní nevýhodou a zdrojem deformací při chladnutí v přípravku umístěného na vzduchu je nerovnoměrné a nedostatečné chladnutí voskového modelu. Po jeho vyjmutí z matečné formy je rozložení teplot rovnoměrné, v krajních polohách je teplota 26,7 °C, v místě zaústění vtokové soustavy téměř 32 °C (obr. 7.34).

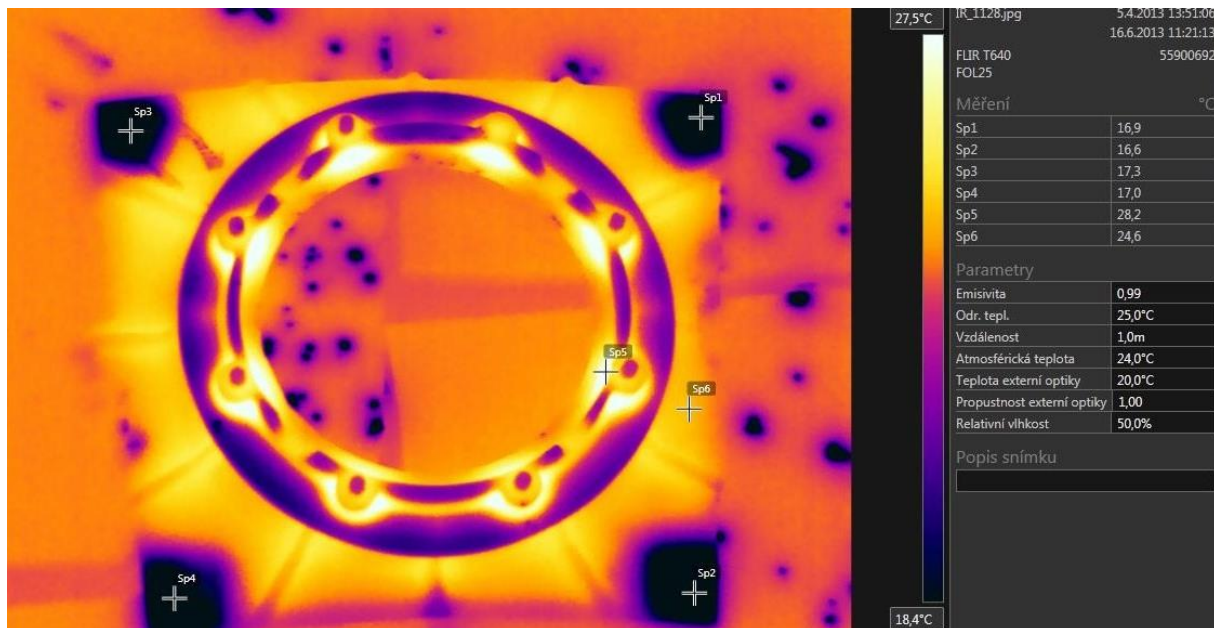


**Obr. 7.34 – Teplotní pole voskového modelu před upnutím**

Obrázek 7.35 znázorňuje rozložení teplot okamžitě po vyjmutí z fixačního přípravku. Je patrné, že v místě upnutí do upínek je teplota okolo 17 °C. V nejteplejším místě, které je v místě zaústění vtokové soustavy, bylo naměřeno 28,2 °C.

Rozdíl teplot v rámci tohoto snímku je značný, avšak v porovnání chladnutí volných míst je pokles teploty necelé 3°C, kdežto v místě upnutí okrajů je pokles teplot téměř 10 °C. Jednou z variant snížení vlivu na deformaci je prodloužení doby upnutí v přípravku, které by bylo v řádech desítek minut, což je z hlediska produktivity nevhodné.

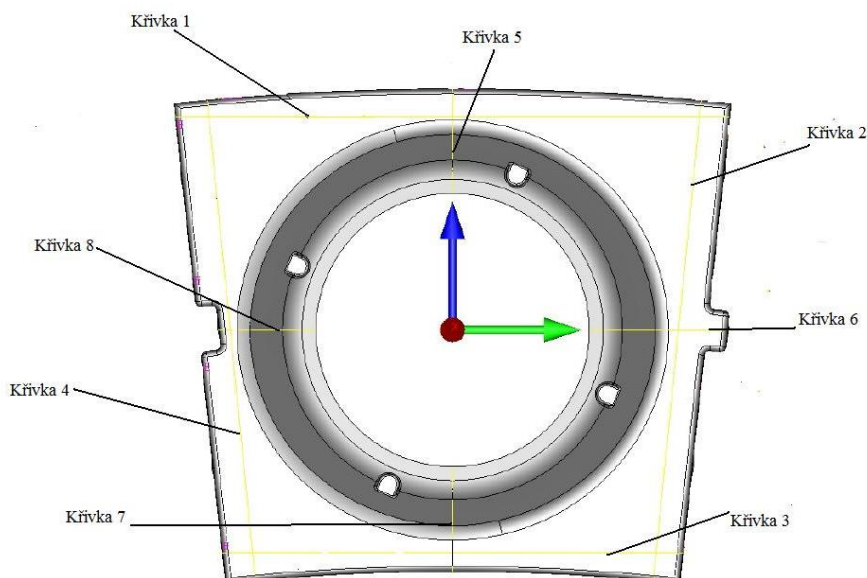




**Obr. 7.35 – Teplotní pole voskového modelu po vyjmutí**

## 7.6 Určení povolených deformací modelů

Pro zřetelnější a přehlednější vyhodnocení odchylek tvarů deformací voskových modelů a určení jejich vhodnosti pro použití byl zvolen interval vhodné deformace o maximální hodnotě 0,3 mm. Pokud jsou tedy všechny body křivky v mezích rozsahu od 0,00 mm do 0,30 mm, je tato křivka a její hodnoty tolerancí žádoucí.



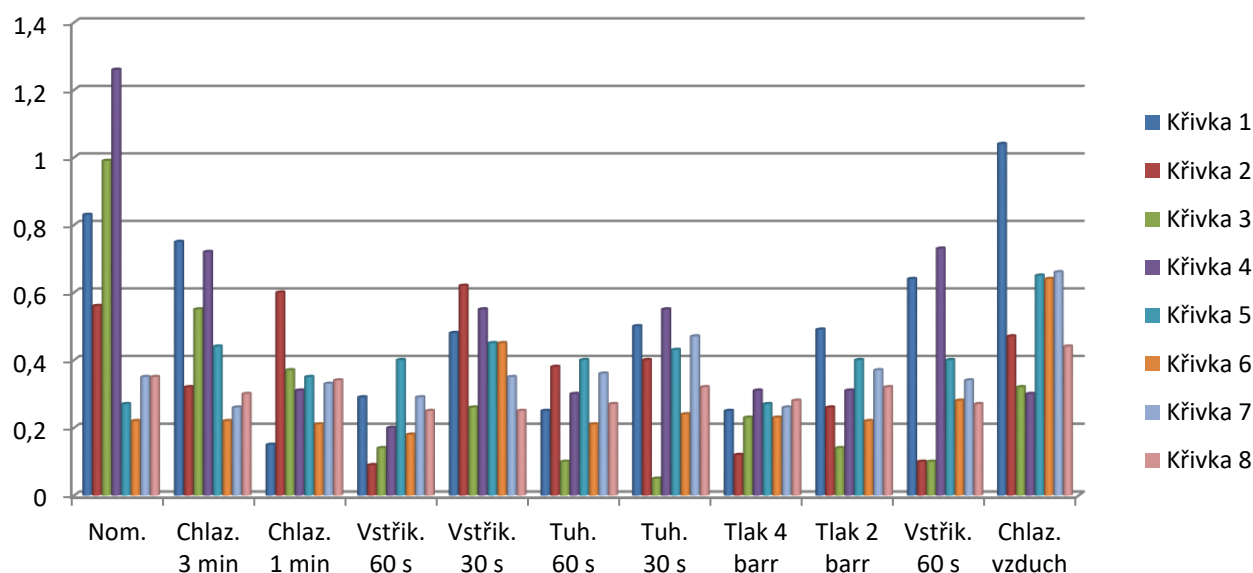
**Obr. 7.36 – Umístění kontrolních křivek**

Bylo zvoleno 8 křivek, přičemž pro každou byla odečtena maximální a minimální hodnota odchylky z výsledků měření deformací voskového modelu. Pokud je rozdíl těchto extrémů menší nežli 0,3 mm, je deformace křivky a s ní spojená část modelu v normálu.

Tab. 7.4 – Odchylyky nominálního modelu

Nominální model	Max (mm)	Min (mm)	Rozsah (mm)	Povolená tolerance (mm)	Vyhodnocení
Křivka 1	+0,81	-0,02	0,83	0,30	nevyhovuje
Křivka 2	+0,54	-0,02	0,56	0,30	nevyhovuje
Křivka 3	+0,54	-0,45	0,99	0,30	nevyhovuje
Křivka 4	+0,81	-0,45	1,26	0,30	nevyhovuje
Křivka 5	+0,22	-0,05	0,27	0,30	vyhovuje
Křivka 6	+0,22	-0,05	0,22	0,30	vyhovuje
Křivka 7	+0,15	-0,20	0,35	0,30	nevyhovuje
Křivka 8	+0,25	-0,10	0,35	0,30	nevyhovuje

V tabulce 7.4 – jsou červeně znázorněny hodnoty neodpovídající povolené deformaci, naopak zeleně jsou znázorněny vyhovující hodnoty pro interval odchylek měřených křivek. Z výsledků jednotlivých měření v různých křivkách je sestaven graf (obr. 7.37), kde je patrná nejmenší deformace modelu pro nastavení vstřikovacího tlaku 4 bary, další vhodný model je vyroben za snížené doby vstřikování na 60 sekund. Intenzita deformace jednotlivých částí voskového modelu pro různé výrobní parametry je znázorněna v grafu níže, ze kterého jsou patrné minimální deformace již zmíněných modelů.

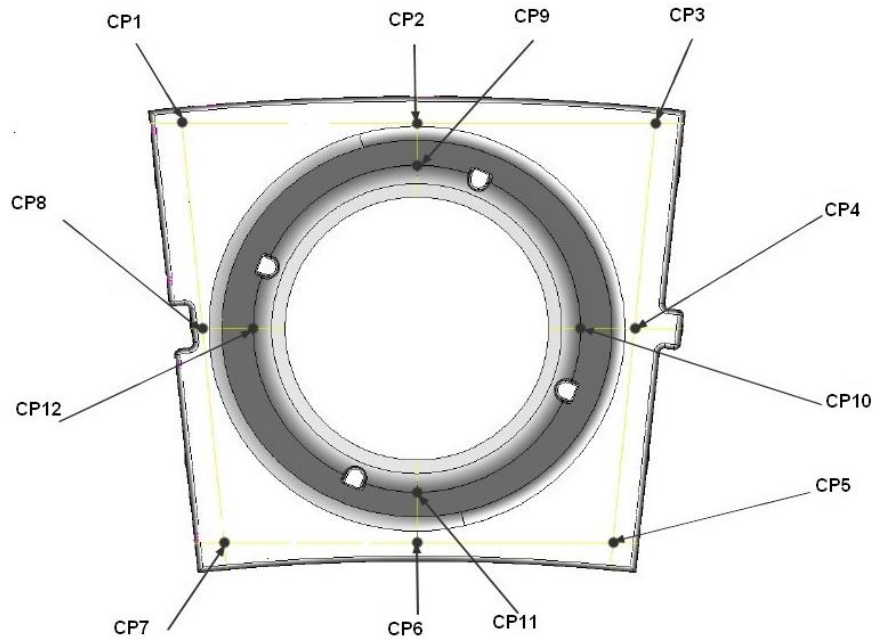


Obr. 7.37 – Grafické znázornění tolerancí křivek pro jednotlivé modely

## 7.7 Měření CP bodů

Pro další způsob kontroly odchylek voskových modelů a stupeň jejich deformace bylo určeno 12 kontrolních bodů. V těchto bodech byla určena přesná odchylka od požadovaných hodnot. Pro lepší

přehlednost jsou data převedena do diagramu, který nám ukazuje trend vývoje deformací ve sledovaných bodech. V tabulkách 7.5 – 7.7 a na obr. 7.39 – 7.41 jsou shrnuty výsledky CP kontrolních bodů modelů vyrobených pro jednotlivé parametry (vždy uvedeno pod obrázkem).

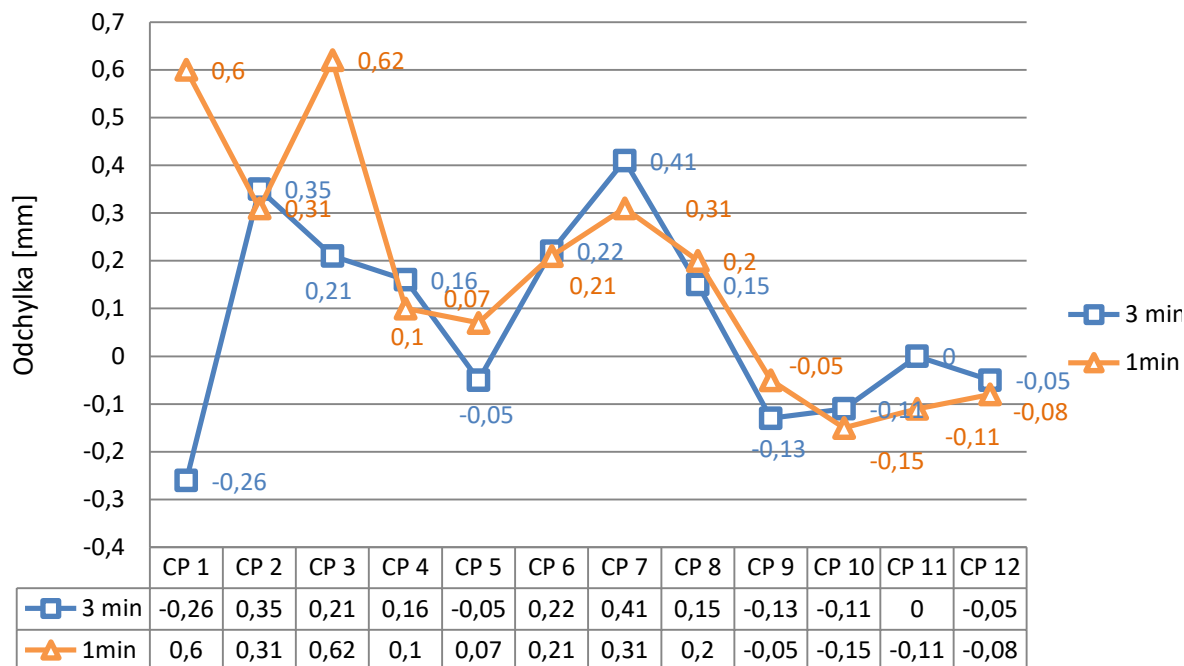


**Obr. 7.38 – Umístění kontrolních CP bodů**

Vyhodnocení změny doby chlazení

**Tab. 7.5 – Kontrolní body pro změnu doby chlazení ve vodě**

	5 min	3 min	1min
<b>CP 1</b>	0,7	-0,26	0,6
<b>CP 2</b>	0,2	0,35	0,31
<b>CP 3</b>	0,02	0,21	0,62
<b>CP 4</b>	0,23	0,16	0,1
<b>CP 5</b>	0,54	-0,05	0,07
<b>CP 6</b>	0,15	0,22	0,21
<b>CP 7</b>	-0,25	0,41	0,31
<b>CP 8</b>	0,2	0,15	0,2
<b>CP 9</b>	-0,05	-0,13	-0,05
<b>CP 10</b>	-0,05	-0,11	-0,15
<b>CP 11</b>	-0,05	0,00	-0,11
<b>CP 12</b>	-0,1	-0,05	-0,08

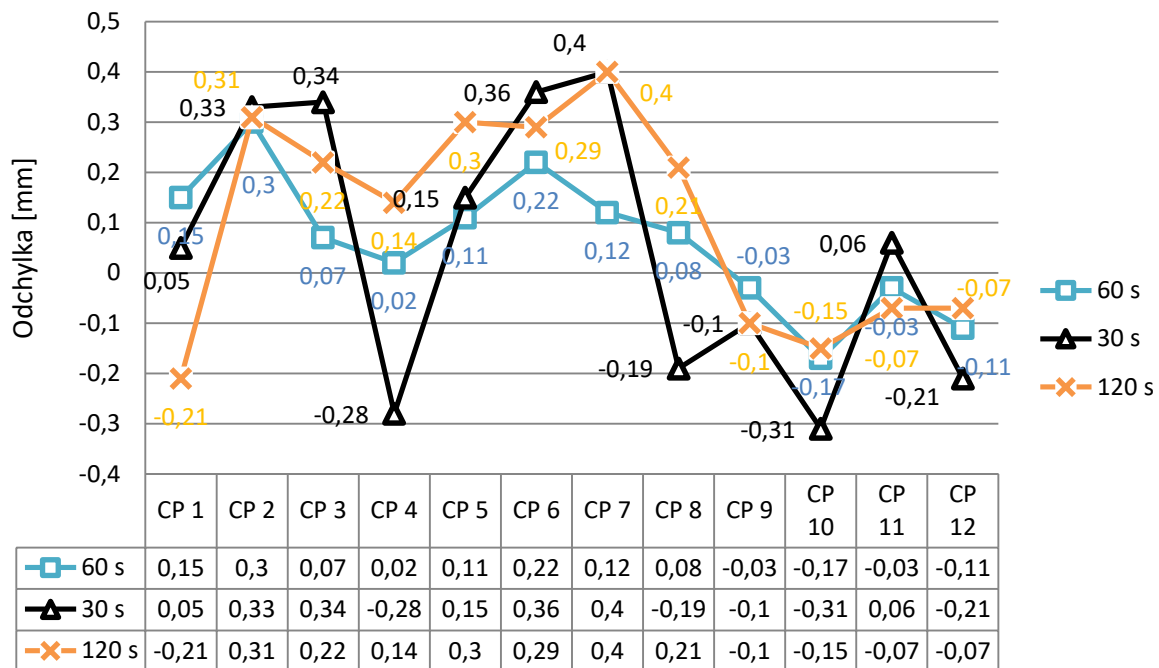


Obr. 7.39 – Vývoj odchylek CP bodů vlivem změny doby chlazení

Vyhodnocení změny doby vstřikování vosku

Tab. 7.6 – Kontrolní body pro změnu doby vstřikování

	90 s	60 s	30 s	120 s
CP 1	0,7	0,15	0,05	-0,21
CP 2	0,2	0,3	0,33	0,31
CP 3	0,02	0,07	0,34	0,22
CP 4	0,23	0,02	-0,28	0,14
CP 5	0,54	0,11	0,15	0,3
CP 6	0,15	0,22	0,36	0,29
CP 7	-0,25	0,12	0,4	0,4
CP 8	0,2	0,08	-0,19	0,21
CP 9	-0,05	-0,03	-0,1	-0,1
CP 10	-0,05	-0,17	-0,31	-0,15
CP 11	-0,05	-0,03	0,06	-0,07
CP 12	-0,1	-0,11	-0,21	-0,07

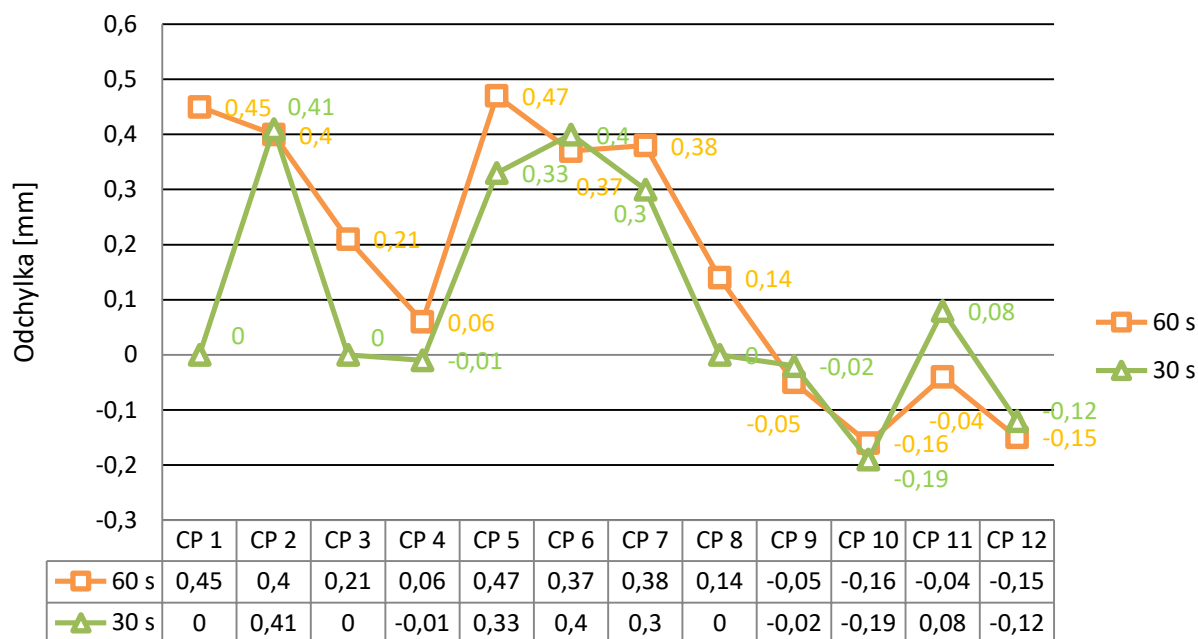


Obr. 7.40 – Vývoj odchylek CP bodů vlivem změny doby vstříkování

#### Vyhodnocení změny doby tuhnutí modelu

Tab. 7.7 – Kontrolní body pro změnu doby tuhnutí modelu

	120 s	60 s	30 s
CP 1	0,7	0,45	+0,01
CP 2	0,2	0,4	0,41
CP 3	0,02	0,21	0,00
CP 4	0,23	0,06	-0,01
CP 5	0,54	0,47	0,33
CP 6	0,15	0,37	0,4
CP 7	-0,25	0,38	0,3
CP 8	0,2	0,14	0,00
CP 9	-0,05	-0,05	-0,02
CP 10	-0,05	-0,16	-0,19
CP 11	-0,05	-0,04	0,08
CP 12	-0,1	-0,15	-0,12

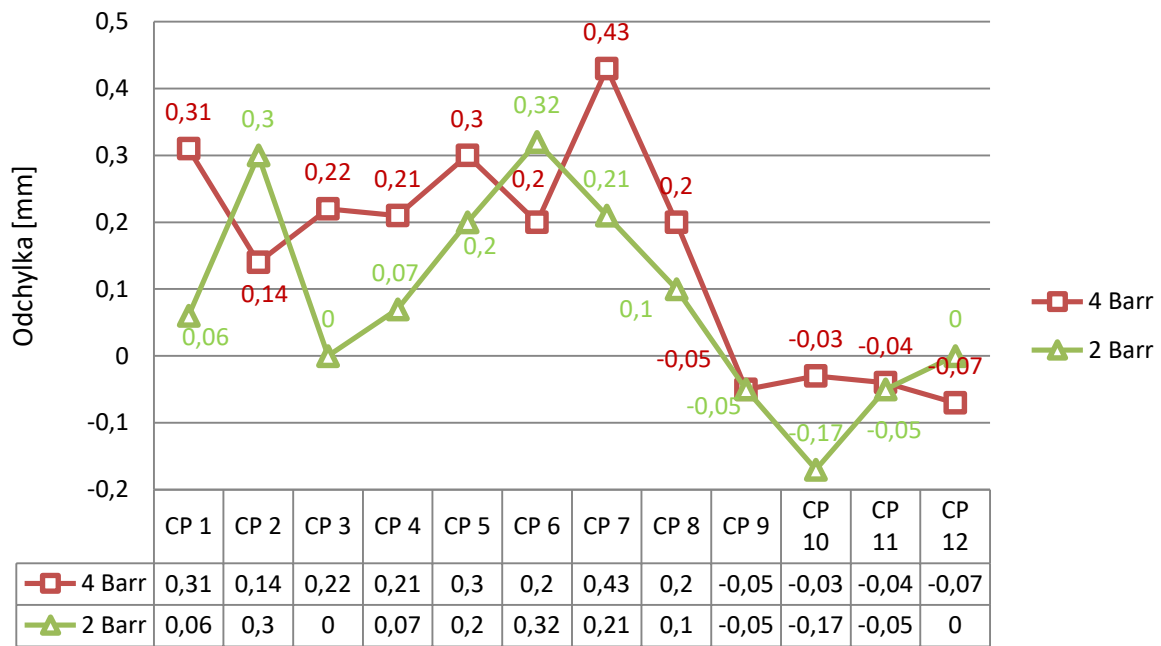


Obr. 7.41 – Vývoj odchylek CP bodů vlivem změny doby vstřikování

#### Vyhodnocení změny vstřikovacího tlaku

Tab. 7.7 – Kontrolní body pro změnu vstřikovacího tlaku

	3 Barr	4 Barr	2 Barr
CP 1	0,7	0,31	0,06
CP 2	0,2	0,14	0,3
CP 3	0,02	0,22	0,00
CP 4	0,23	0,21	0,07
CP 5	0,54	0,3	0,2
CP 6	0,15	0,2	0,32
CP 7	-0,25	0,43	0,21
CP 8	0,2	0,2	0,1
CP 9	-0,05	-0,05	-0,05
CP 10	-0,05	-0,03	-0,17
CP 11	-0,05	-0,04	-0,05
CP 12	-0,1	-0,07	-0,08



Obr. 7.42 – Vývoj odchyľek CP bodů vlivem změny vstřikovacího tlaku

## 8. Návrhy řešení výroby modelů štítu

Na velikost konečných deformací voskového modelu má vliv široké spektrum vlivů, mezi které patří vhodné nastavení vstřikovacích parametrů, zvolený způsob chladnutí již vyrobeného modelu, jeho skladování nebo opatrnost při manipulaci. V této kapitole se budu zabývat nejdůležitějšími z nich.

### 8.1 Doba mezi vylisováním a upnutím

Uvolnění modelu tepelného štítu z třídílné formy je časově velmi náročné. Obtížnost je dána použitím velkého množství šroubů, kterými jsou upevněny jednotlivé kameny do předepsané polohy. Pro vyjmutí horní části formy je potřeba všechny tyto šrouby uvolnit aku-šroubovákem, poté je díl položen na pracovní stůl, kde je za pomoci kladiva uvolněn model s vyskládanými kameny, tyto kameny je poté potřeba ručně odstranit. Poté je model přenesen a upnut do rovnacího přípravku. Během tohoto procesu je třeba brát zřetel na křehkost voskového modelu a manipulovat s ním opatrně. Tato operace zabírá (dle zručnosti obslužného pracovníka) od 2 do 5 minut. Přičemž opětovné sestavení formy je obdobně náročné.

Během této doby dochází k volnému chladnutí modelu, kdy není jeho tělo upevněno ve fixačním přípravku ani v matečné formě, za tuto proměnou dobu může dojít k nekontrolovaným změnám tvaru.

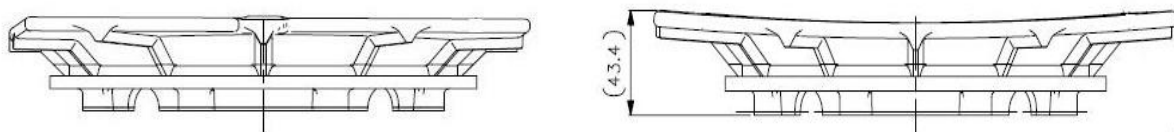
Pro eliminaci těchto vlivů doporučujeme udělat následující opatření:

- Snížení počtu kamenů z 12 kusů na 4 kusy
- Snížení počtu šroubů v důsledku nižšího počtu kamenů
- Umístění fixačního přípravku do těsné blízkosti pracovního stolu

### 8.2 Konstrukční úprava fixačního přípravku

Detailním sledováním chování voskového modelu během chladnutí je patrná náchylnost jeho určitých částí k deformacím daným směrem. Vynecháme-li vliv nastavení různých lisovacích parametrů a intenzitu vznikajících odchylek od definovaného tvaru, je evidentní snaha jednotlivých částí se deformovat, a to vždy do stejných směrů.

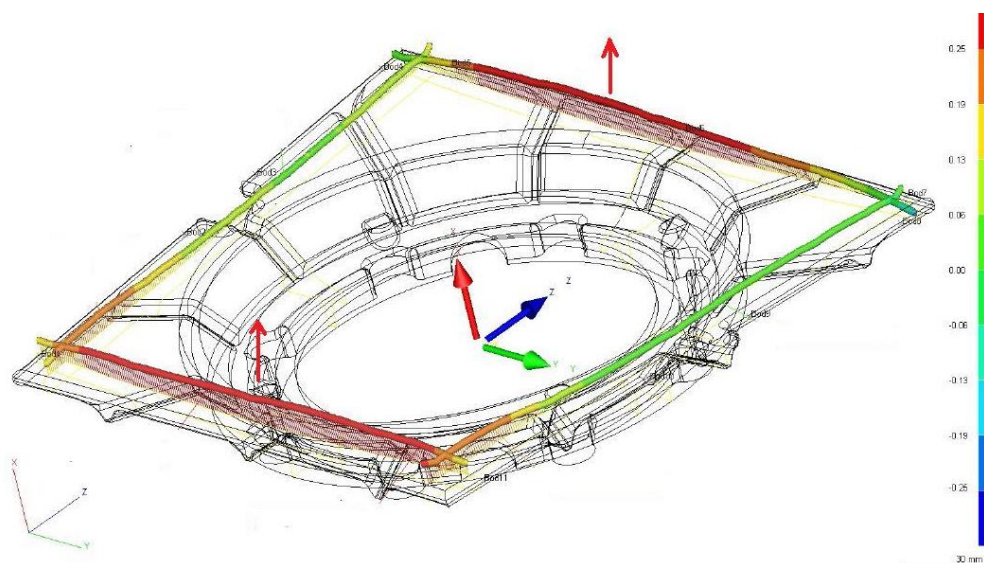
Z půdorysu součásti je patrný propadlý tvar profilu (obr. 8.1). Naopak z bočního pohledu na model je evidentní rovinné zarovnání.



Obr. 8.1 – Pohledy voskového modelu – nárys a bokorys

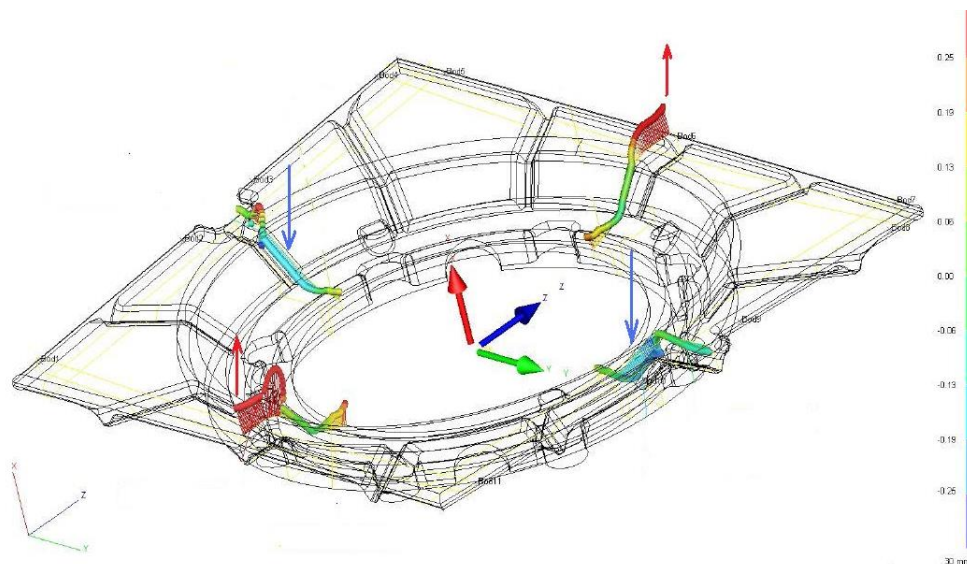


Pro vysvětlení vzniku míst s nejčastějšími deformacemi je vybrán představitel voskového modelu, kde jsou tyto procesy nejčitelnější (obr. 8.2). Volné okraje rovnoběžné s osou Y představují právě hrany s propadlým profilem, kdežto okraje ve směru osy Z jsou rovinné. Po upnutí do upínek nastane fixace pouze rohů voskového modelu, které jsou v tomto případě v normálovém stavu. Právě propadlý profil se snaží během chladnutí vyrovnávat do přímého tvaru, tím dochází k vyvyšování profilu a zvětšování odchylek (směr červených šipek).



**Obr. 8.2 – Znázornění vzniku deformací volných okrajů**

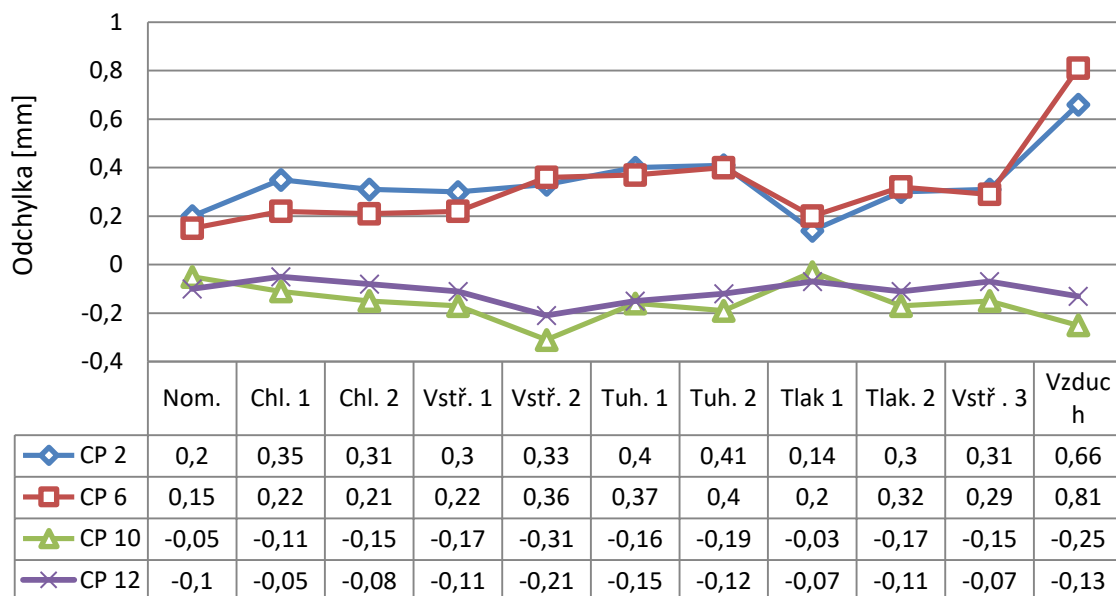
Vznik deformací na volných okrajích je ovlivňován propadem v místě rozšiřování vnitřního otvoru (prstenec). Z obrázku 8.3 je patrné, že čím je vyšší kladná odchylka volných stran ve směru osy Y (červené šipky), tím se mění tvar plochy do záporných hodnot právě ve směru kolmém k těmto stranám (modré šipky). Platnost této teorie se potvrdila detailnějším sledováním všech ostatních měřených modelů.



**Obr. 8.3 – Znázornění vzniku deformací vnitřního prstence**

Tyto výsledky jsou podnětem pro vývoj fixačního přípravku s upínkami, které by právě tyto volné okraje fixoval po celou dobu chladnutí v poloze, která se podobá požadovanému tvaru profilu.

Pro znázornění trendu ovlivnění deformace vnitřního prstence vlivem deformace volných okrajů byla vypracována charakteristika, pro kterou byly použity pouze kontrolní body, ležící na sledovaných křivkách. Se zvyšující se deformací volných okrajů (CP 2, CP 6) se zvětšuje také odchylka středového prstence (CP 10, CP 12), avšak do záporných hodnot. Naopak se zmenšující se deformací volných okrajů je méně vychýlený tvar prstence od rovnovážné polohy (obr. 8.4).



**Obr. 8.4 – Ovlivnění deformace prstence volnými okraji**

## 8.3 Vliv lisovacích parametrů na deformace modelů

Po naměření osmi kontrolních křivek byly hodnoty odchylek od nominálního tvaru převedeny do jednoho intervalu, kde byla odečtena nejnižší hodnota od nejvyšší, a to vždy pro jednu sledovanou křivku. Pokud je výsledná hodnota v rozmezí max. 0,3 mm, dá se předpokládat vhodnost této deformace.

Nastavená kombinace vstřikovacích parametrů je vhodná tehdy, pokud je počet křivek pohybujících se ve vhodném intervalu vyšší jak polovina z celkového počtu křivek. Další omezující podmínkou je současná nejvyšší naměřená deformace pro celou křivku v hodnotě pod 0,5 mm.

Tab. 8.1 – Porovnání výsledných deformací všech modelů

Číslo dílu	Nom.	Chlaz. 3 min	Chlaz. 1 min	Vstřik. 60 s	Vstřik. 30 s	Tuh. 60 s	Tuh. 30 s	Tlak 4 barr	Tlak 2 barr	Vstřik. 60 s	Chlaz. vzduch
Křivka 1	0,83	0,75	0,15	0,29	0,48	0,25	0,5	0,25	0,49	0,64	1,04
Křivka 2	0,56	0,32	0,6	0,09	0,62	0,38	0,4	0,12	0,26	0,1	0,47
Křivka 3	0,99	0,55	0,37	0,14	0,26	0,1	0,05	0,23	0,14	0,1	0,32
Křivka 4	1,26	0,72	0,31	0,2	0,55	0,3	0,55	0,31	0,31	0,73	0,3
Křivka 5	0,27	0,44	0,35	0,4	0,45	0,4	0,43	0,27	0,4	0,4	0,65
Křivka 6	0,22	0,22	0,21	0,18	0,45	0,21	0,24	0,23	0,22	0,28	0,64
Křivka 7	0,35	0,26	0,33	0,29	0,35	0,36	0,47	0,26	0,37	0,34	0,66
Křivka 8	0,35	0,3	0,34	0,25	0,25	0,27	0,32	0,28	0,32	0,27	0,44
Počet	2	3	2	7	2	5	2	7	3	4	1

Nejvíce křivek v povoleném intervalu a tedy parametry, při jejichž nastavení jsou deformace výsledného voskového modelu nejmenší, mají modely s pořadovým číslem 4, 6 a 8. Jsou to běžné parametry s kratší dobou vstřikování (60 s) a nejlepších hodnot je dosaženo za působení vyššího vstřikovacího tlaku (viz. tabulka 8.2).

Tab. 8.2 – Nejvhodnější parametry pro lisování modelů

Změna	Vstřikovací tlak (Barr)	Teplota trysky (°C)	Teplota zásobníku (°C)	Doba vstřikování (s)	Doba tuhnutí (s)	Doba chlazení (min)	Teplota vody (°C)
Vstřikování	3	72	70	60	120	5	9,6
Tlak	4	72	70	90	120	5	9,6

## 9. Simulace výroby modelů štítů

Pro simulaci cyklu plnění voskové směsi do matečné formy a následné sledování chování voskového modelu během chladnutí byl využit simulační software ProCAST stejně jako v kapitole 8

<b>Název (označení)</b>	<b>Upřesnění funkce</b>
<i>Visual Mesh</i>	<i>Úprava a tvorba povrchových sítí</i>
<i>Visual CAST</i>	<i>Pre - procesor (jednotlivé databáze)</i>
<i>Pro CAST</i>	<i>Solvery</i>
<i>Visual CAST</i>	<i>Post - procesor (zobrazení výsledků)</i>

Velký vliv na úspěšnost simulace mají jednotlivé moduly a jejich nastavení v rámci solverů:

- Thermal modelu – tepelný modlu
- Radiation module – modul radiace
- Fluid Flow module – modul proudění
- Stress module – modul napětí
- Microstructure – modul mikrostruktury

### 9.1 Postup tvorby simulace

Prvním krokem před správným nastavením simulace je tvorba a úprava geometrie tělesa (voskového modelu) za pomoci konstrukčních programů (Solidworks), poté je těleso převedeno do formátu, který je schopen software ProCAST otevřít (.iges, .stl, .step).

Následuje úprava geometrie a tvorba povrchové a objemové sítě (mesh), poté je možné zadat jednotlivé parametry, kterými jsou materiálové charakteristiky, parametry technologie, okrajové podmínky atd. [H18]

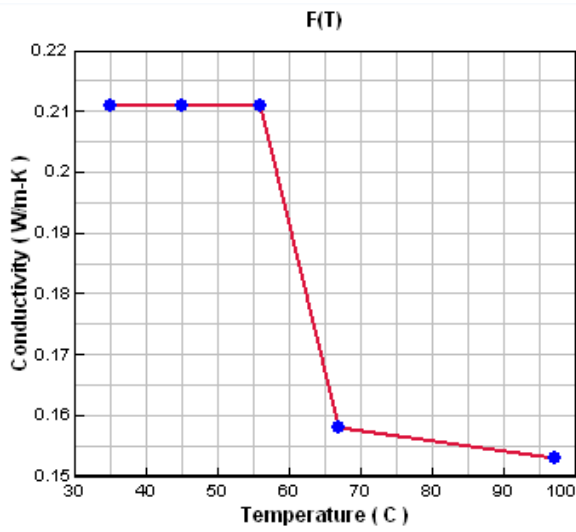
Vlastní simulační výpočet probíhá v modulu zvaném DataCAST/ProCAST. Výsledky simulace, export dat nebo analýza dané simulace se provádí v posledním modulu zvaném VisualCAST.

### 9.2 Vlastnosti voskové směsi

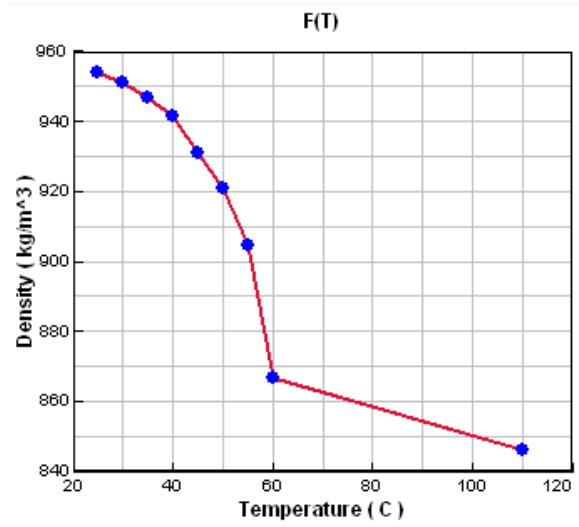
Pro předpoklad úspěšnosti simulace je potřeba disponovat detailním popisem vlastností voskových směsí. Jejich měření je náročné a je potřeba mít k dispozici vždy charakteristiku dané vlastnosti určenou několika hodnotami pro různé teploty nebo v určitém čase. Metodika získávání dat pro viskoelastický model byla popsána ve 4. kapitole.

Parametry pro modul Thermal jsou znázorněny na obr. 9.1 až 9.4. Parametry pro modul Stress jsou na obr. 9.5 až 9.8 [H19.]

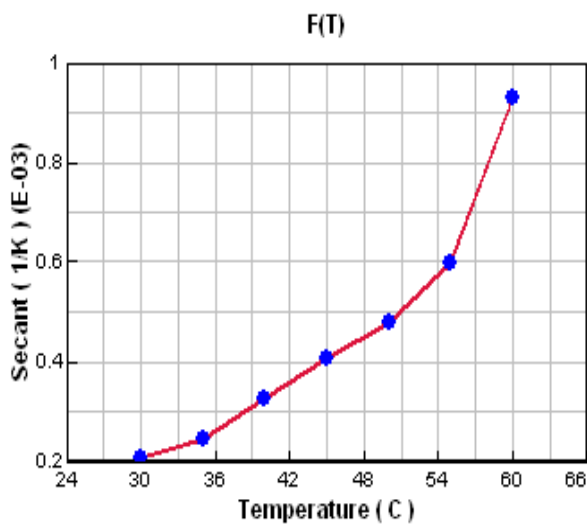
Parametry pro modul Thermal



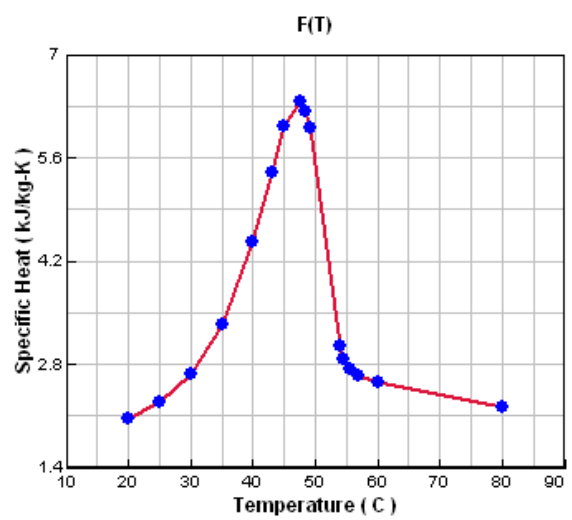
Obr. 9.1 – Tepelná vodivost



Obr. 9.2 - Hustota

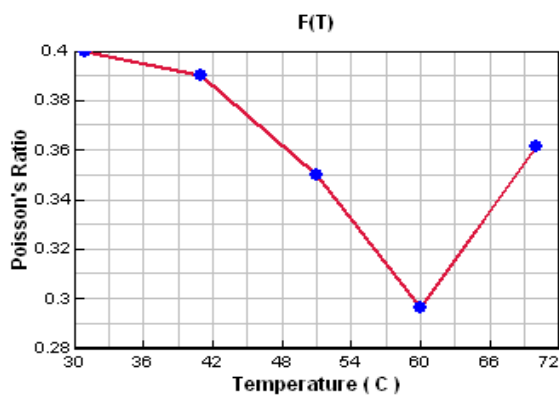


Obr. 9.3 – Termická expanze

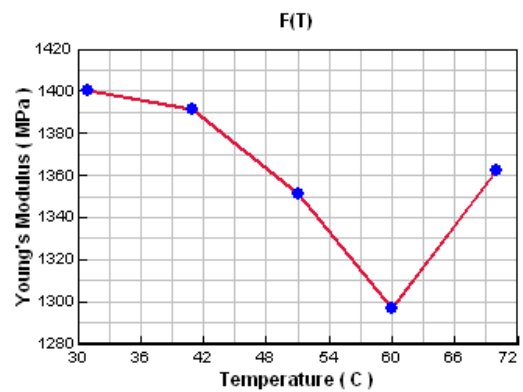


Obr. 9.4 – Specifické teplo

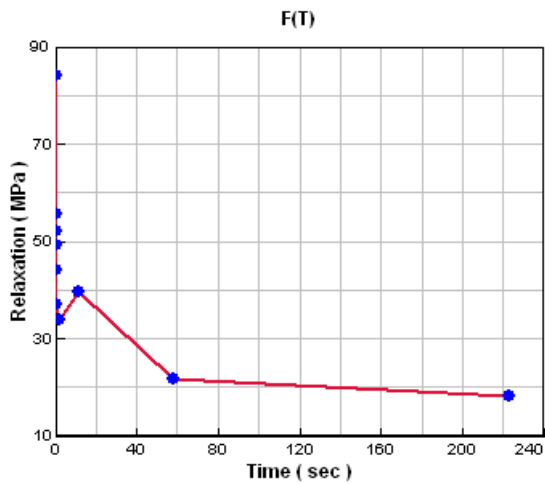
Parametry pro modul Stress



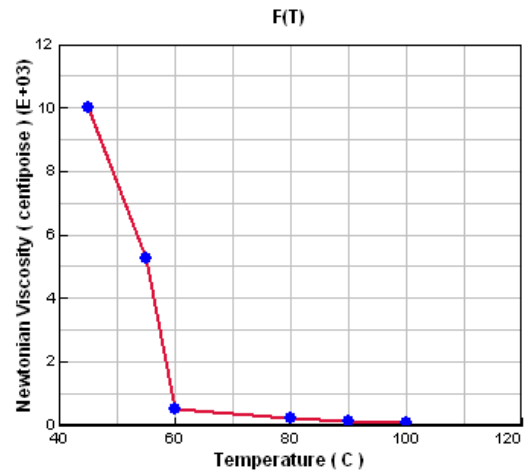
Obr 9.5 – Poissonovo číslo



Obr. 9.6 – Youngův modul



*Obr. 9.7 – Relaxace*



*Obr. 9.8 – Newtonská viskozita*

## 9.3 Simulace průběhu plnění a tuhnutí za běžných podmínek

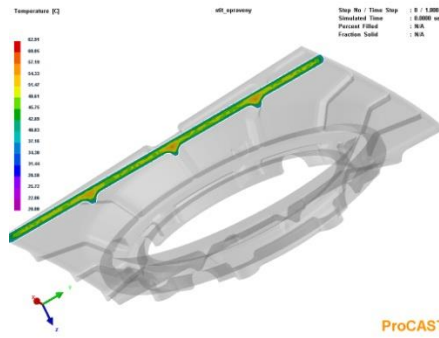
Tato simulace proběhla při zadaných podmínkách, odpovídajících provoznímu stavu při výrobě nominálního modelu voskového modelu. Po vyjmutí modelu z matečné formy je simulováno prodloužení 2 minut, během této doby je voskový model upnut do fixačního přípravku a následně ponořen do vody o teplotě 9,6 °C, kde chladne po dobu 300 sekund. [H20]

### 9.3.1 Chladnutí modelu během jeho umístění ve vodě

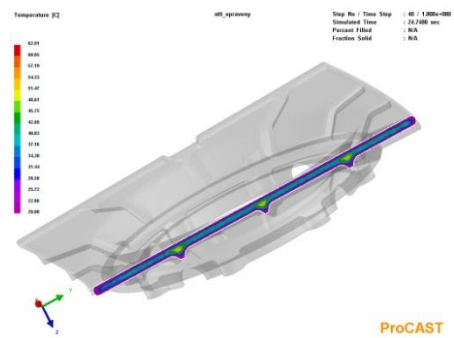
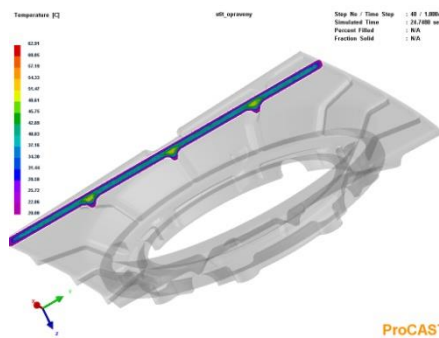
Čas ve Volný okraj A  
vodě

Volný okraj B

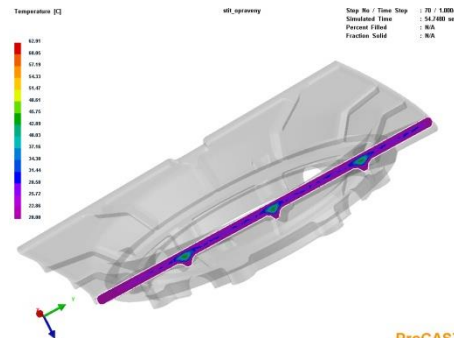
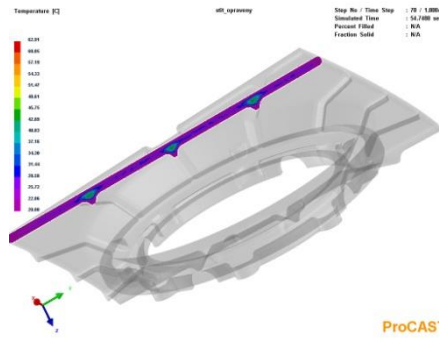
0 s



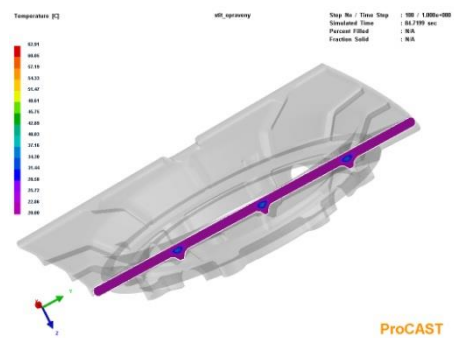
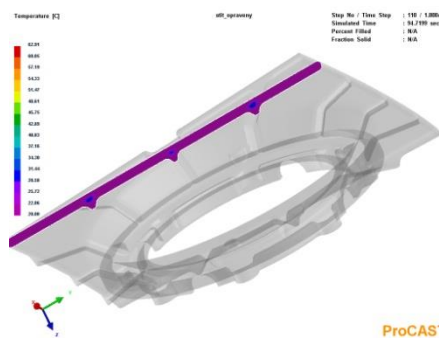
24,7 s



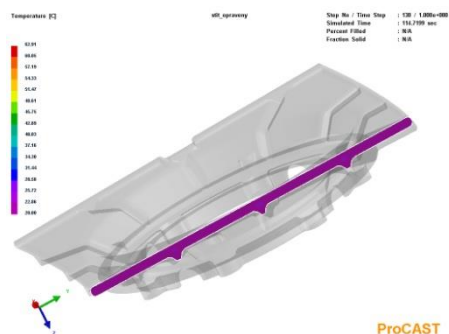
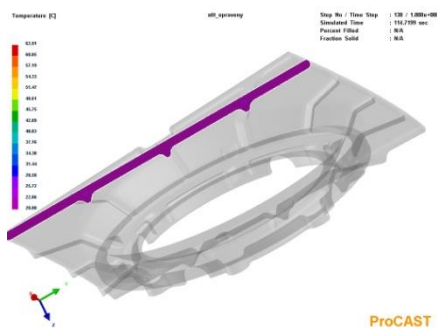
54,7 s



94,7 s



114,7 s

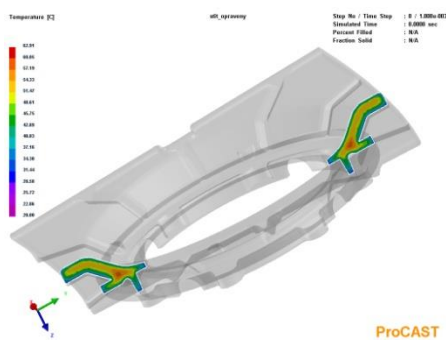


**Obr. 9.9 – Chladnutí tenkých stěn okrajů modelu**

Z průběhu chladnutí tenkých volných okrajů voskového modelu (obr. 9.9) je patrné, že v době ponoru přípravku do vody je teplota v místech nejvyšší koncentrace materiálu téměř 57 °C, přičemž krajní vrstvy mají okolo 45 °C. V průběhu chladnutí se povrch ochlazuje na 20 až 22°C, přičemž nejvyšší teplota zůstává stále v místech s velkou koncentrací vosku. Po 117,7 sekundách jsou zachlazeny i tepelné uzly a celý průřez má konstantní teplotu 20 °C.

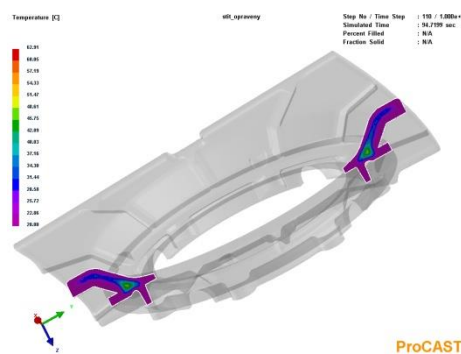
čas (s) Chladnutí průřezu

0

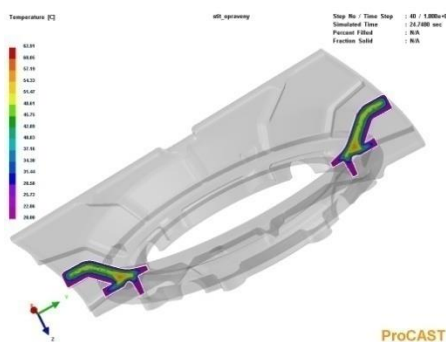


čas (s) Chladnutí průřezu

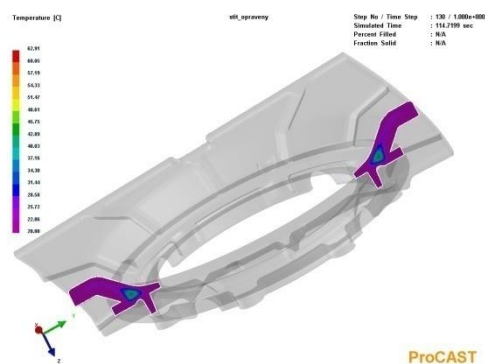
94,7



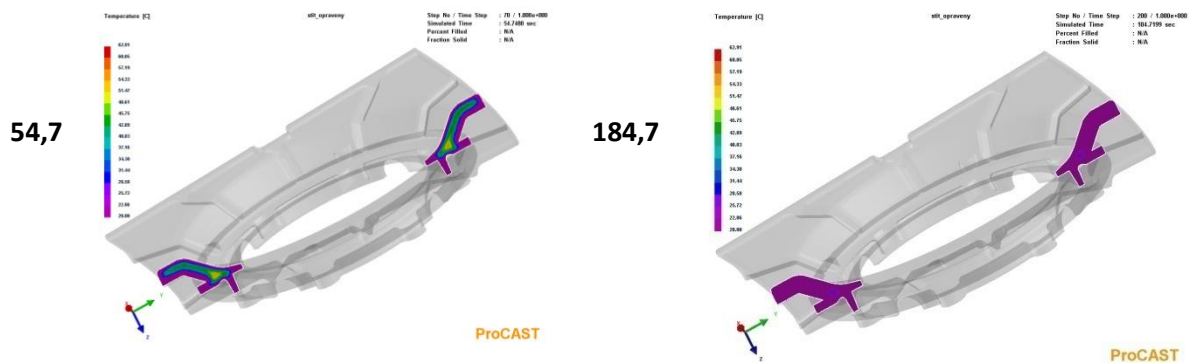
24,7



114,7







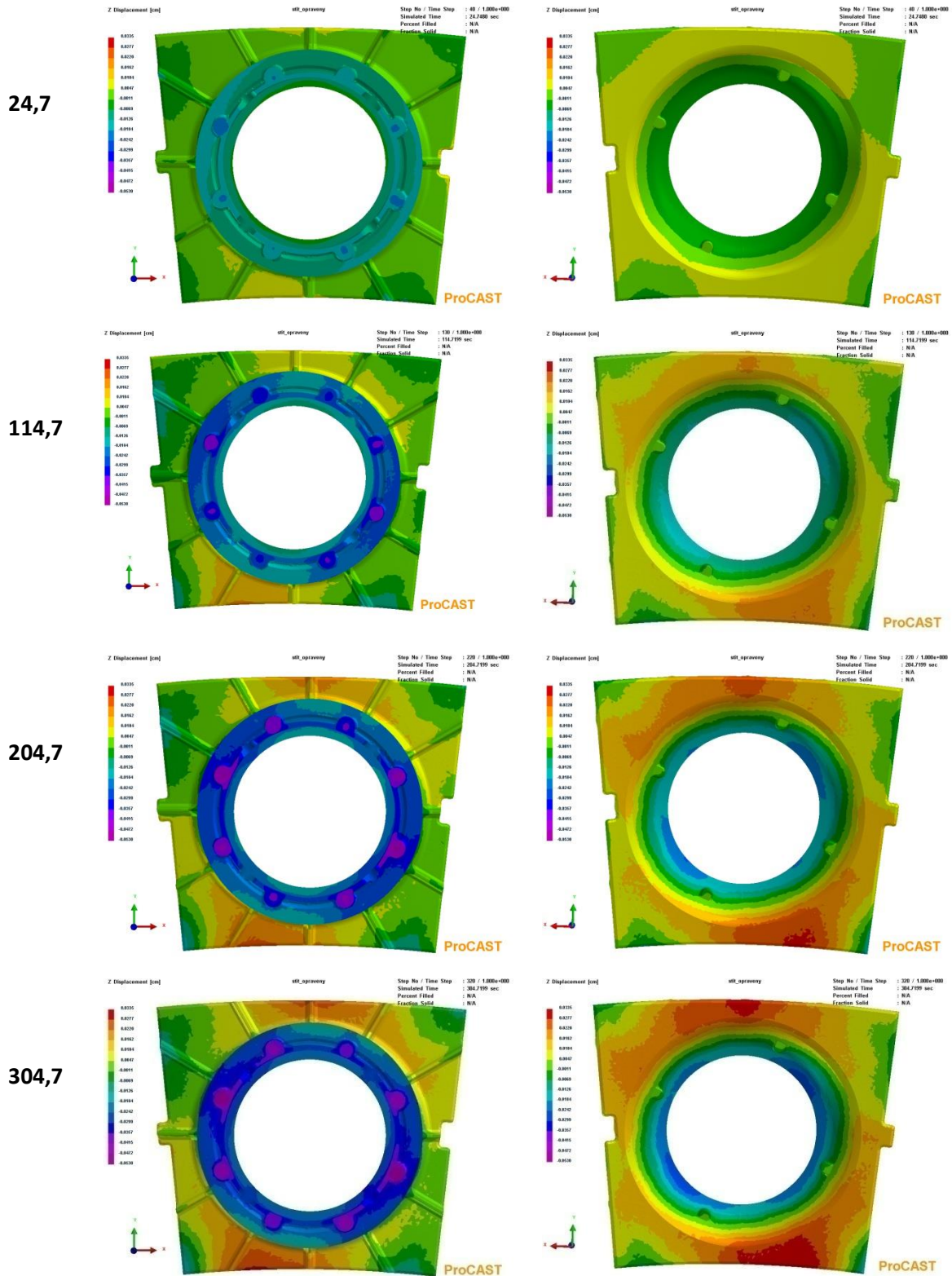
**Obr. 9.10 – Chladnutí průřezu s nejvyšší koncentrací materiálu**

Při sledování chladnutí průřezu středem voskového modelu (obr. 9.10) je při vnoření do vody patrná teplota povrchové vrstvy okolo 35 °C, přičemž v místě nejvyšší koncentrace materiálu je teplota až 60 °C. Po 54,7 sekundách je téměř polovina průřezu ochlazena na teplotu 20 °C, přičemž chladnutí postupuje směrem od povrchu modelu, který je v přímém kontaktu s vodou. V čase 114,7 sekund jsou oproti snímkům s volnými tenkými okraji místa, která udržují teplotu téměř 42 °C. K úplnému vychladnutí celého průřezu na teplotu 20 °C dojde v 184,7 sekundách, kdy chladne jako poslední místo s nejvyšší koncentrací materiálu. [H22]

### 9.3.2 Vznik deformací během chladnutí ve vodě

Čas (s) Pohled A

Pohled B



Obr.9.11 – Vznik deformací během chladnutí ve vodě

Obrázek 9.11 poukazuje na vývoj deformací během procesu chladnutí. Při 114,7 sekundách jsou patrné zvětšující se deformace v místech středu zaoblených okrajů. Již v této době dosahuje deformace 0,2 mm. Prstenec s místy zaústění vtokové soustavy se posouvá do záporných deformací (-0,2 mm).

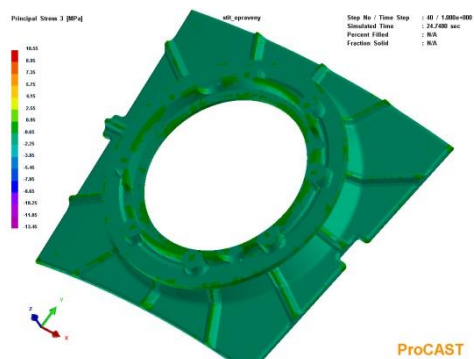
Poté co dojde k ochlazení vosku na 20 °C v celém průřezu modelu (184 sekund), je patrný rapidní nárůst deformací, přičemž největší extrémy nastávají v místě středů zaoblených okrajů (-0,3 mm) a v místech kruhového prstence (-0,35 mm). [W]

### **9.3.3 Zbytkové napětí v modelu**

Během procesu tuhnutí voskové směsi vzniká zbytkové napětí, které má negativní vliv na vznik deformací těchto voskových modelů. Obr. 9.12 poukazuje na průběh vzniku zbytkového napětí. Po 24,7 sekundách je patrný minimální výskyt tohoto napětí, poté nastává jeho navýšení úměrně právě se zvyšujícím se poměrem tuhé fáze. Rapidní nárůst hodnot nastává v čase 114,7 sekund., kdy dosáhne téměř celý průřez modelu konstantní teploty.

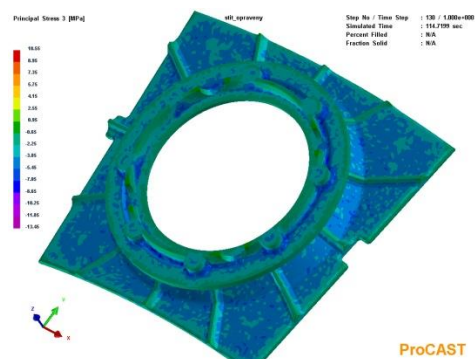
Čas  
(s) Pohled na model

24,7

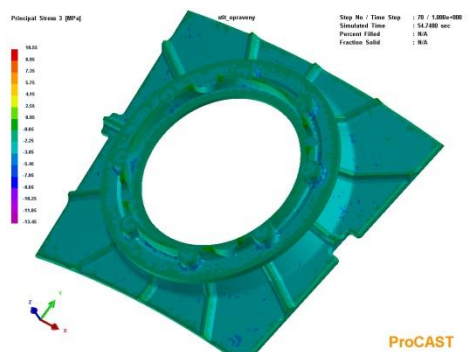


Čas  
(s) Pohled na model

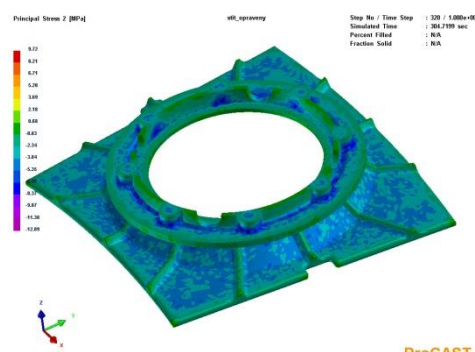
114,7



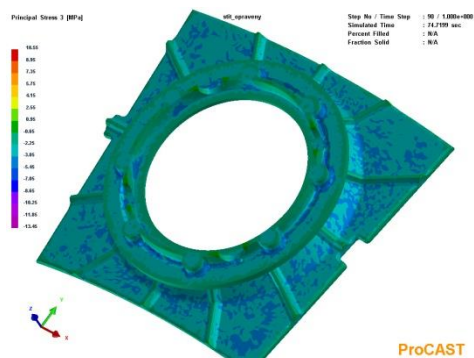
54,7



304,7

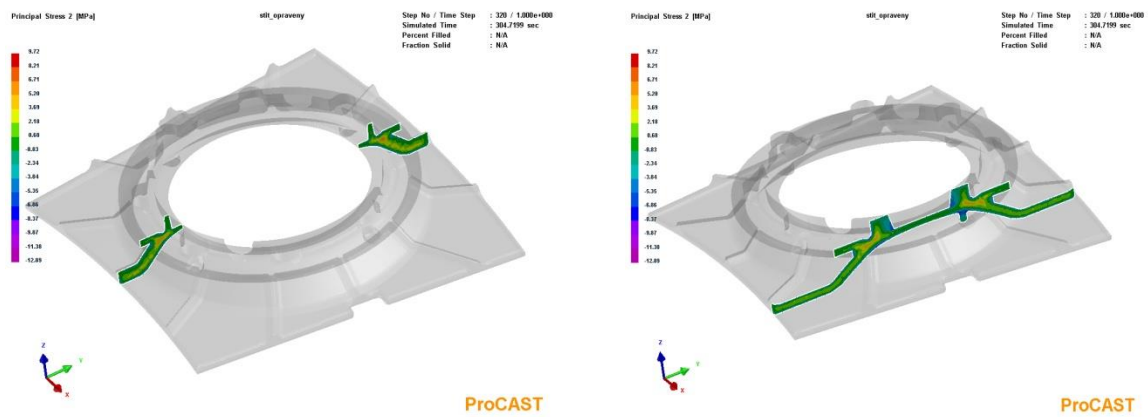


84,7



Obr. 9.12 – Vznik vnitřního pnutí

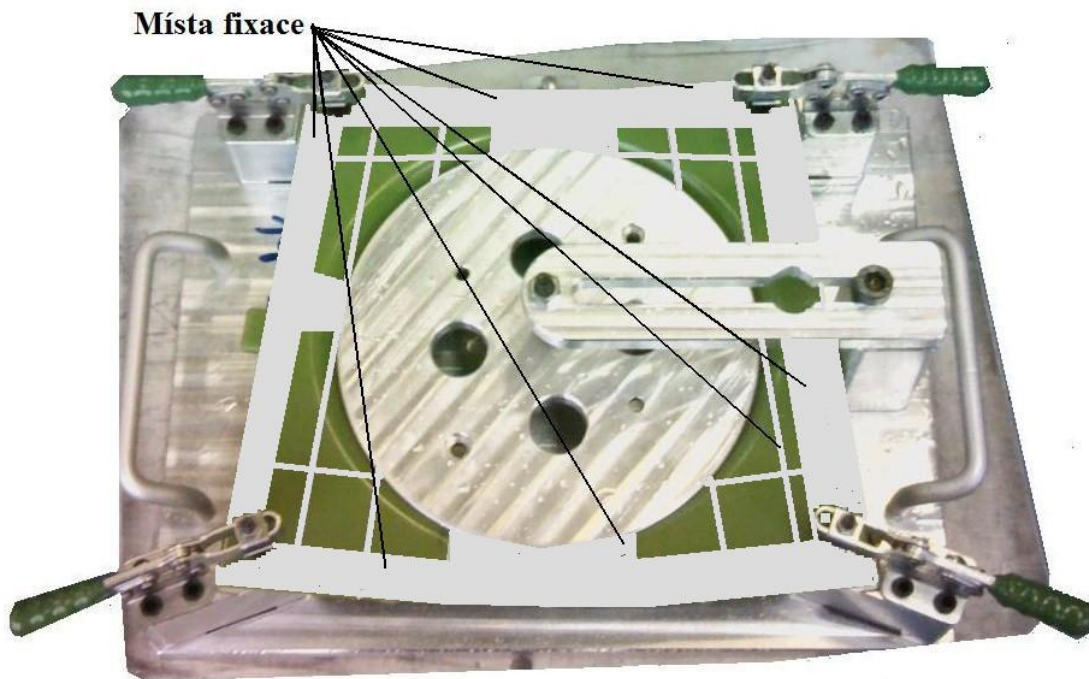
Z průřezů vedených modelem, které jsou zaznamenány v době vyjmutí modelu z chladicí vody (304 sekund), je zřetelný výskyt vnitřního napětí v místě zvýšené koncentrace materiálu. Právě tato kritická místa jsou důvodem deformací celého voskového modelu. Obr. 9.13 poukazuje na napětí o hodnotě 6 MPa právě v těchto uzlech.



**Obr. 9.13 – Vnitřní napětí v průřezu modelem**

## 9.4 Simulace průběhu tuhnutí (nový přípravek)

Tato simulace proběhla za běžných podmínek lisování voskového modelu, avšak byla provedena změna uchycení jednotlivých částí modelu ve fixačním přípravku. Oproti předchozímu upnutí, kdy byly upnuty pouze rohy modelu pomocí upínek a středová část prstence, je nyní fixace provedena i ve středu těchto okrajů stran – viz obr. 9.13.

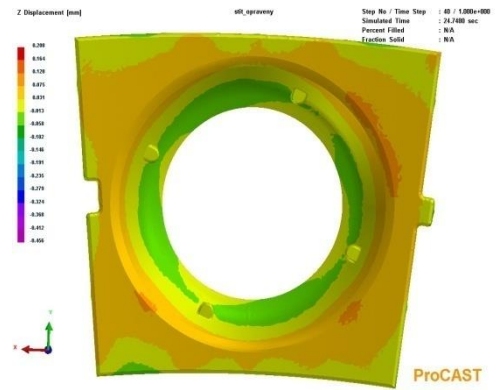
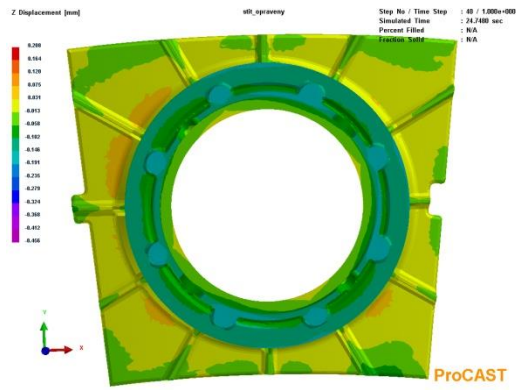


**Obr. 9.13 – Nejvhodnější místa pro fixaci voskového modelu**

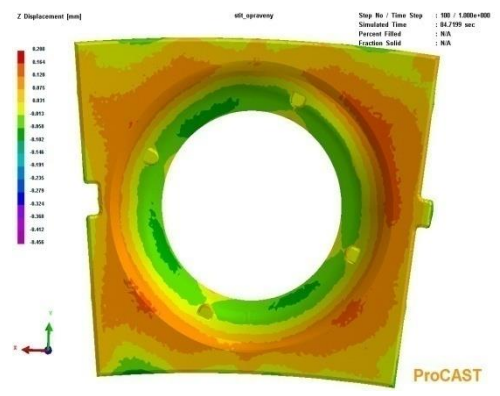
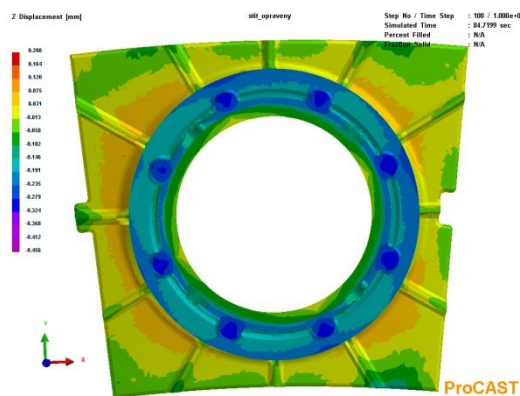
Čas (s) Pohled A

Pohled B

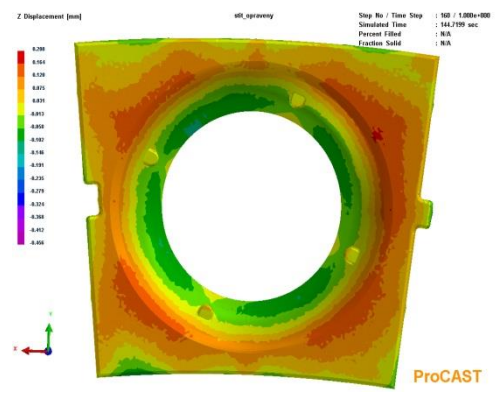
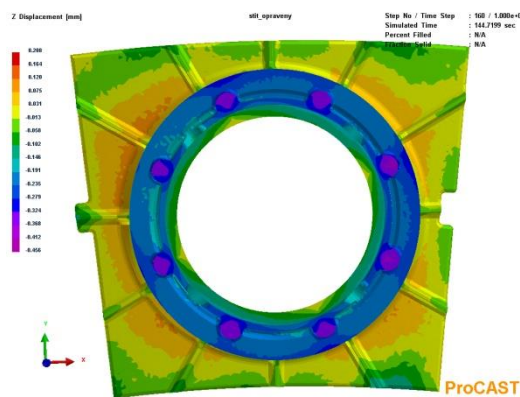
24,7



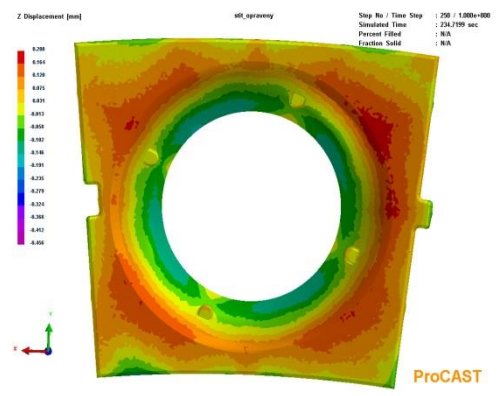
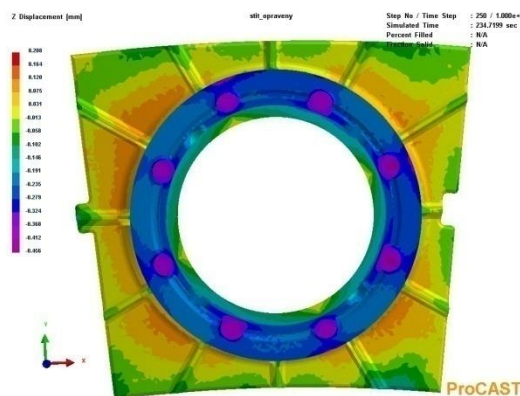
84,7

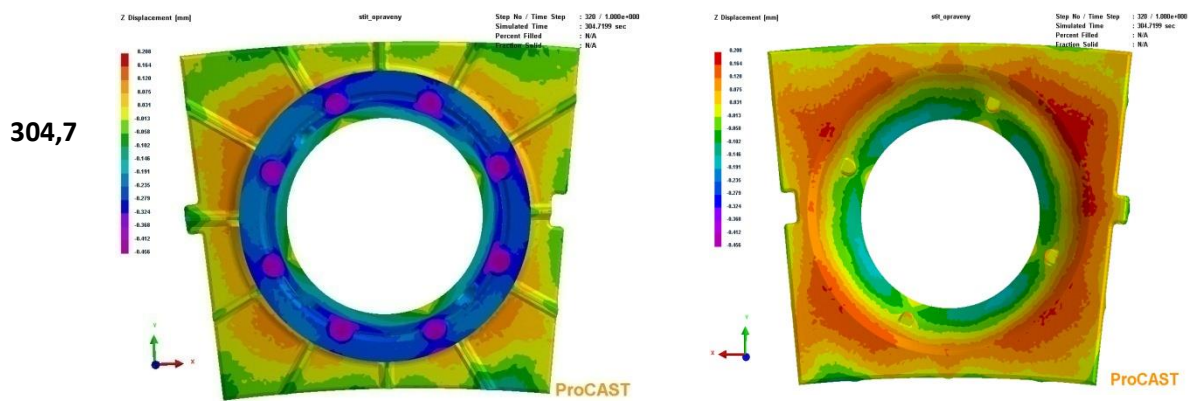


144,7



234,7





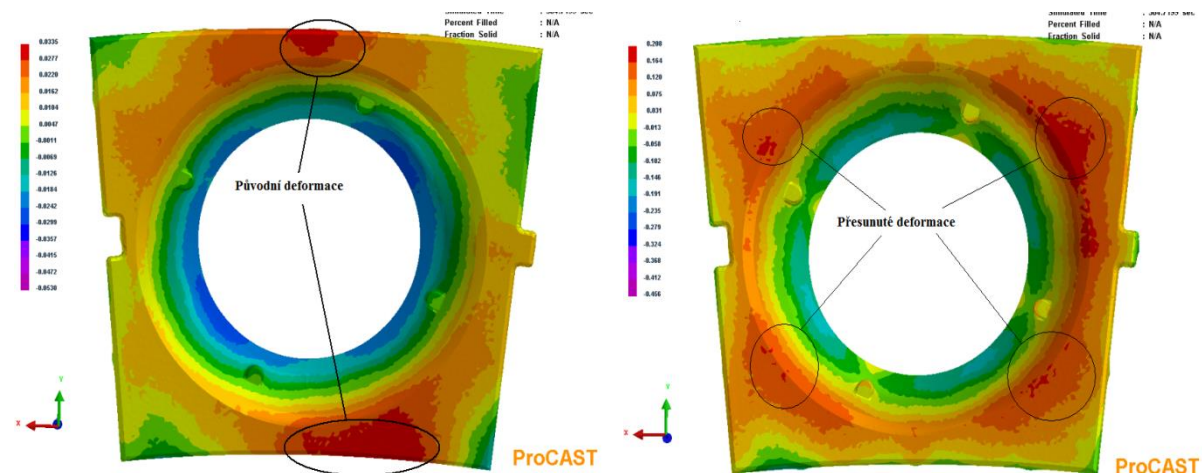
**Obr.9.14 – Vznik deformací během tuhnutí ve vodě (nový přípravek)**

Na obr. 9.14 lze vidět deformaci kruhového prstence do záporných hodnot (pohled A). I přesto, že jsou volné okraje tohoto modelu fixovány na více místech, dochází také k deformacím, které se však nyní vyskytují v místech blíže středovému otvoru tepelného štítu. V tomto případě má nejvyšší odchylka hodnotu téměř + 0,2 mm. I přesto, že jsou na více místech fixované okraje v hodnotách odchylek maximálně + 0,03 mm, není fixace dostačující, jelikož zdrojem deformací volných okrajů je právě rozměrově předdimenzovaný prstenec s tepelným uzlem.

## 9.5 Vyhodnocení simulace a technologická opatření

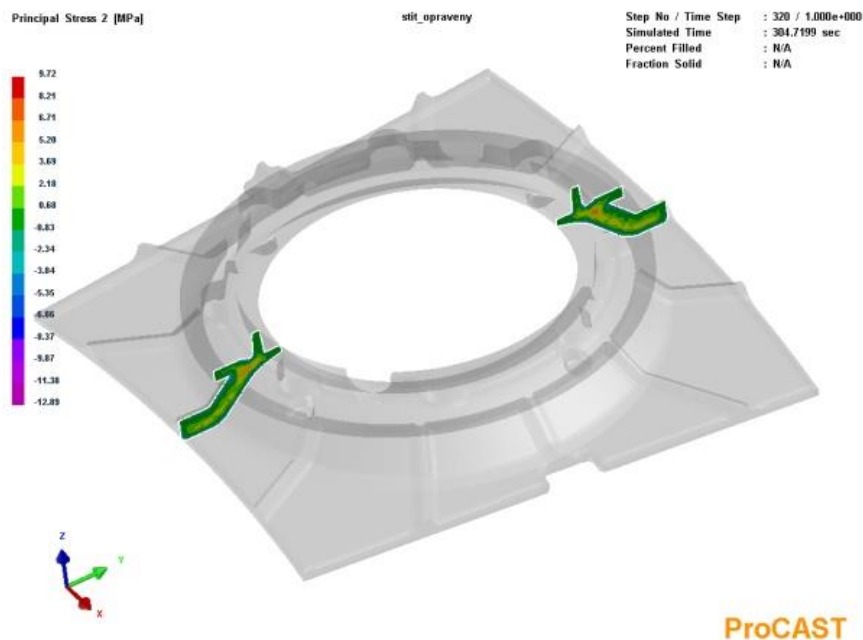
Z obou proběhů simulací je zřetelný původ zbytkových deformací. Tyto výsledky korespondují s předpokladem, který vyplývá z výsledků měření na souřadnicovém měřícím zařízení. Tento předpoklad vyjadřuje závislost mezi deformací vnitřního prstence a deformací volných okrajů (viz popis v kapitola 8).

Pokud bude snaha zamezit vznikajícím deformacím zafixováním voskového modelu větším počtem upínek, dojde sice k zamezení deformací v těchto místech, avšak deformace vnitřního prstence ovlivňuje jiné části a tyto deformace se pouze tvoří v jiném místě voskového modelu. [H24] Konečné deformace modelu bez způsobu úpravy jsou znázorněny na obr. 9.15.



**Obr. 9.15 – Konečné deformace modelů dle způsobu upnutí**

Toto se děje z důvodů vysokého lokálního napětí v místech napojení několika stěn. Nejkritičtější místo je znázorněno na obr. 9.16, kde dosahuje zbytkové napětí téměř 6 MPa.



**Obr. 9.16 – Zbytkové napětí v místě napojení stěn**

Právě toto místo se deformuje s takovou intenzitou, že ovlivňuje ostatní části voskového modelu, i pokud jsou jiná místa štítu dostatečně zafixována.

Pro zamezení vzniku deformací prstence a tím minimalizaci tvorby odchylek v jiných místech modelu doporučujeme:

- Geometrickou úpravu napojení těchto stěn tak, aby byl vnitřní uzel co nejmenší, čímž se zmenší i výsledné zbytkové napětí v tomto uzlu.
- Výroba fixačního přípravku, který by kopíroval celý profil voskového modelu, tím se dosáhne minimálního posunutí během chladnutí a nastane ideální fixace.
- Voskový model tepelného štítu vyrábět bez tohoto problémového prstence. Ten by byl nalisován, či přivařen k již odlitému tepelnému štítu. Tato metoda však představuje výrobu nové matečné formy a časovou náročnost při montáži již vyhotovených dílů.

## 9.6 Shrnutí poznatků z výroby modelu štítu

Jednotlivé parametry a podmínky mající vliv na konečnou kvalitu modelu lze rozdělit dle časového úseku, kdy působí na vznikající voskový model:

- Vlivy ovlivňující vlastnosti a charakter voskového modelu během procesu vstřikování
- Vlivy ovlivňující voskový model během chladnutí a tuhnutí

Pro vlastní měření deformací voskových modelů, které probíhalo na souřadnicovém měřicím přístroji, bylo vyrobeno 24 voskových modelů. První model byl vyroben za podmínek, které jsou dány



pro nominální stav. Před vyrobením následujícího modelu proběhla změna vždy pouze jednoho parametru. Při změně jiného parametru bylo zapotřebí předchozí parametr navrátit do nominálních hodnot.

Nejprve byly změněny vstřikovací parametry, kterými jsou vstřikovací tlak, doba vstřikování a doba tuhnutí ve formě. Teplota trysky či teplota zásobníku nebyla měněna z důvodu velmi dlouhé reakční doby na změnu hodnot. Další zkoumanou podmínkou byl vliv doby pobytu v chladícím mediu, kterým byla voda o teplotě 9,6 °C.

Pro určení míry deformace voskového modelu byl vytvořen měřicí program na souřadnicovém měřicím přístroji, který snímal 8 křivek na těch místech modelu, která disponují dostatečně vypovídající hodnotou o vzniku a charakteru deformace. [H25]

Z výsledků měření jsou patrné značné odchylky od ideálního tvaru, a to téměř u všech voskových modelů. Tyto deformace jsou největší v místech středů krajních stran, které nejsou při tuhnutí zafixovány upínkami a v místech rozšiřujícího se kruhového prstence. Je evidentní spojitost mezi těmito sledovanými deformacemi: vznik záporné deformace prstence má za následek zvětšující se odchylku polohy volného okraje (profil se zabaluje).

Vlivy působení různých parametrů na deformace modelů jsou individuální, přičemž nejméně zdeformované voskové modely vznikly za podmínek zvýšení parametru vstřikovacího tlaku na 4 bary, respektive snížením doby vstřikování na 60 sekund (tab. 9.1).

**Tab. 9.1 – Parametry vedoucí k nejmenším deformacím**

Změna	Vstřikovací tlak (Barr)	Teplota trysky (°C)	Teplota zásobníku (°C)	Doba vstřikování (s)	Doba tuhnutí (s)	Doba chlazení (min)	Teplota vody (°C)
Vstřikování	3	72	70	60	120	5	9,6
Tlak	4	72	70	90	120	5	9,6

Problematika vzniku deformací voskového modelu je spojena také s dlouhou časovou prodlevou mezi vyjmutím vosku z matečné formy a jeho upnutím do chladícího přípravku. Jelikož je forma vícedílná a jednotlivé komponenty (upevňovací kameny), udržující model ve formě, je potřeba uvolňovat složitými způsoby, dochází ke značnému prodloužení doby nekontrolovaného chladnutí na vzduchu.

Pro zlepšení výsledné kvality a přesnosti voskových modelů tepelného štítu a pro dosažení minimálních deformací bylo navrženo 6 technologických opatření, která mají na zlepšení výsledného voskového modelu tepelného štítu největší vliv.

První opatření je výroba fixačního přípravku. Tento přípravek bude kopírovat celý profil voskového modelu, čímž se dosáhne minimálního posunutí během chladnutí a nastane ideální fixace. Technologicky a ekonomicky nejvýhodnější je rozšíření konstrukce kruhového středu přípravku o mřížový profil s fixací celého obvodu modelu (viz obr. 9.13), tento přípravek bude fixovat model ve více částech, tím se zamezí přesouvání deformací. Využití materiálu pro jeho konstrukci bude minimalizováno právě volbou mřížové konstrukce.

Dalším doporučeným opatřením je změna vstřikovacích parametrů. Podle hodnotících kritérií, jakými jsou deformace sledovaných křivek či sledování CP bodů, je vhodné použít data z tabulky 9.1, přičemž nedoporučuji kombinaci těchto parametrů, nýbrž zvolení pouze jedné změny parametru. Při změně dvou parametrů současně by mohlo dojít k dosud neznámým a neověřeným změnám v průběhu plnění či tuhnutí voskového modelu.

Jedním z navrhovaných řešení je také snížení počtu dílů a pomocných komponent pro upevnění voskového modelu v matečné formě či snížení doby, během které dochází k nekontrolovanému chladnutí ve formě či reakci modelu s částmi formy (okamžité upínání modelu do přípravku, blízkost pracovišť).

Vhodným opatřením je geometrická úprava napojení stěn modelu tak, aby byl přechodový uzel mezi stěnami co nejmenší. Tímto se docílí zmenšení tepelného uzlu i výsledného zbytkové napětí, jehož vznik je spojen právě s výskytem těchto míst.

Voskový model tepelného štítu je nutné vyrábět bez problémového prstence. Ten by byl nalisován, či přivařen k již vyrobenému tepelnému štítu. Řešení je však velmi náročné a představuje pro slévárnu změnu vstřikovací formy, fixačního přípravku nebo zvýšení počtu doplňkových činností, což je ekonomicky náročné.

## 10. Závěr

V dnešní době je kladen důraz na dodávky přesných odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu, u kterých nebude nutné provádět již další operace obrábění. Za poslední roky se požadavky na relativní přesnost odlitků zvedly několikanásobně. **Dosažení vyšší přesnosti a popsání metodiky zvýšení přesnosti rozměrů složitých odlitků pro energetiku bylo i hlavním cílem habilitační práce.**

V uvedené oblasti se jedná zejména o speciální odlitky pro plynové turbíny – tj. lopatky, segmenty a tepelné štíty. Tyto odlitky se vyrábí obvykle ze žáropevných superslitin na bázi Ni a Co.

Z tohoto pohledu je nutné se podívat na porovnání geometrické přesnosti odlitků v minulosti a dnes. V rámci porovnání lze použít příklad odlitku lopatky – kdy např. na lopatce dlouhé 100 mm byly v roce 2009 povolené rozměrové tolerance  $\pm 0,3$  mm. Nyní se setkáváme s požadavky konstruktérů spalovacích turbín na podstatně větší přesné odlitky (až do délky 600 mm), kde se povolené rozměrové tolerance pohybují v řádu  $\pm 0,1$  mm. V těchto tolerancích lze dané odlitky dodat pouze za předpokladu, že bude zvýšena přesnost rozměrů na již odlisovaném voskovém modelu a zajištěná kvalita a stabilita výroby. [H20]

**V rámci práce bylo provedeno:**

- **Rozbor problematiky lití na vytavitelný vosk (včetně popisu vlastností voskových směsí, technologičnosti konstrukce odlitku a analýzy možných předdeformací odlitků energetiku zahrnutých do experimentální části práce).**
- **Experimentální zjištění dat voskových směsí a podle nich modifikace databáze simulačního software ProCAST.**
- **Realizace simulací s modifikovanou databází používaných voskových materiálů a verifikace procesu vstřikování voskového modelu pro technologii lití na vytavitelný model, včetně ověření výsledků simulací ve výrobní praxi.**

**Na základě provedení teoretických a experimentálních prací v oblasti lisování voskových modelů bylo dosaženo následujících závěrů:**

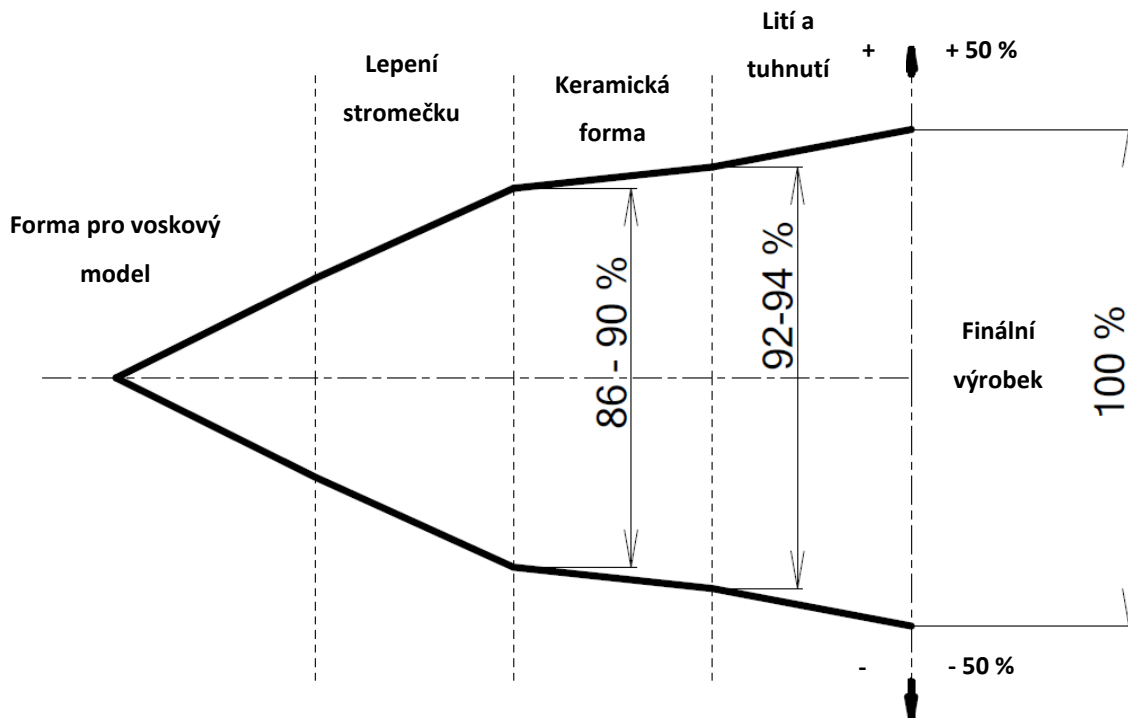
- ✓ Teplota trysky – bylo zjištěno, že změnou teploty vstřikovací trysky nedochází téměř k žádným rozdílným změnám na velikosti tvarové deformace [H29].
- ✓ Vstřikovací tlak – zvýšením vstřikovacího tlaku bylo zjištěno nepříznivé zvětšení velikosti odchylek tvarové deformace [H27].
- ✓ Doba vstřikovacího cyklu – pro zhodnocení vlivu parametru byla oproti standardnímu nastavení zkoumána kratší i delší doba vstřikovacího cyklu. Výsledkem vznikla konvexní křivka

s nejnižším součtem aritmetických odchylek v okolí 90 s standardního nastavení. Porovnávaná doba výrobního cyklu, po kterou je model ve formě, je však stále příliš krátká, neboť vyjmuté modely mají vlivem špatné tepelné vodivosti vosku velice podobnou teplotu. K tvarovým změnám proto dochází důsledkem probíhajících vnějších pnutí a vnitřních tepelných pnutí, jejichž vliv se nejvíce projevuje ihned po vyjmutí modelu z matečné formy. Snížením těchto změn může dojít k mnohem většímu prodloužení doby, po kterou je model ještě ve formě. Aby bylo snížení teploty modelu efektivní, musela by mít matečná forma chladicí kanálky. Příliš dlouhá doba by však výrazně prodlužovala výrobní cyklus. Druhým řešením je navržení vhodného fixačního přípravku. Přemístění modelu by muselo být velmi rychlé, aby se co nejvíce zamezilo projevu tvarové deformace. Zároveň k dostatečnému snížení teploty a fixace by bylo nezbytné zajištění, pokud možno, co nejdelší doby pro ustálení modelu. Tím vzniká potřeba většího počtu těchto fixačních přípravků. [H28, H30]

- ✓ Použití chladicího média - bylo zjištěno, že standardní postup ochlazování voskového modelu bez použití chladicího média vykazuje celkově větší projevy tvarových deformací než při ochlazování voskového modelu ve vodní lázni studené vody. Dále bylo prokázáno dosažení lepších hodnot u doby ochlazování 3 min, než u ochlazování po dobu 5 min. Příčinou tohoto rozdílu může být příznivý vliv působením vnitřních tepelných pnutí, neboť při dřívějším vyjmutí voskového modelu dochází k jeho zpětnému ohřívání vlivem úplného snížení teploty v tepelných uzlech. Pro dosažení lepších výsledků platí již zmíněné zrychlení manipulace s voskovým modelem, v tomto případě mezi matečnou formou a chladicí vanou. Jelikož vosk plave, je voskový model umístěn do přípravku, který ho drží pod vodou. Tento krok jednak prodlužuje dobu manipulace i dobu výrobního cyklu, neboť by model musel být co nejrychleji přemístěn. Zároveň by bylo možné vstříkovat nový model až po uplynutí přibližně 2 min ochlazování. To platí pro chlazení po dobu 3 min, neboť model, který by byl právě chlazen, musí být uvolněn dříve, než bude vyjmut další model z formy. To by mělo za následek další prodloužení výrobního cyklu. Pokud nedojde nadále k navržení fixačního přípravku, lze do chladicí vany umístit klec, která by pod hladinou zároveň zadržovala více voskových modelů. [H24]

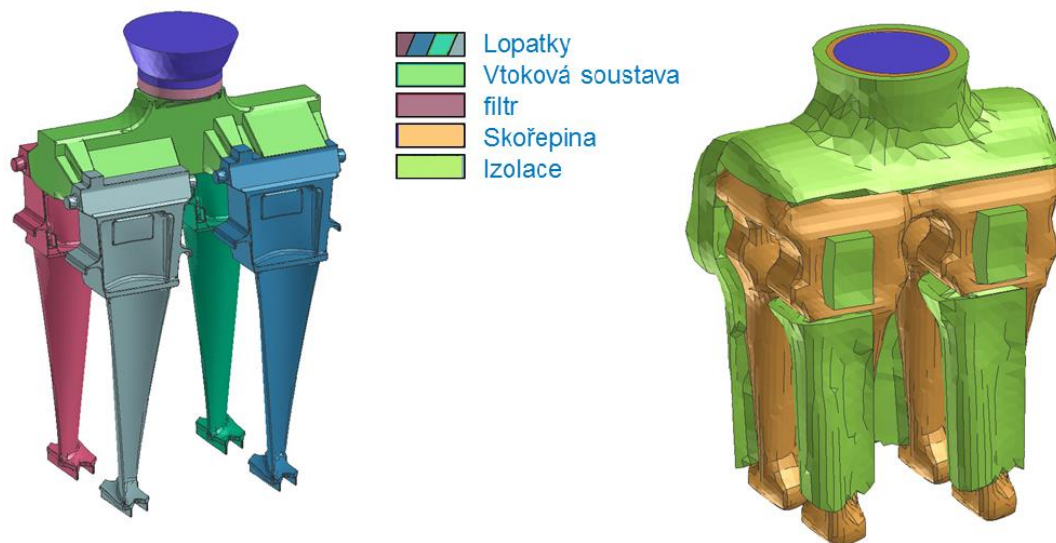
Z provedeného teoretického rozboru a velkého množství experimentálních prací bylo rozšířeno know-how o znalostní bázi chování různých voskových směsí, keramických hmot i jednotlivých závislostí mezi chováním používaných materiálů k zajištění vyšší rozměrové přesnosti finálních odlitků.

Rozsah záběru práce byl podstatně širší, než je zde popsáno. Byl vyhodnocen celý proces technologie a nalezeno kritické místo, kde vznikají největší deformace. Výsledek zmapování procesu je patrný z obr. 10.1. [H21] V průběhu práce byl brán v potaz celý výrobní proces, tedy od výroby voskového modelu až po finální odlitek, včetně použité technologie (např. izolace) – příklad jiného řešeného odlitku ukazuje obr 10.2.



*Obr. 10.1. Vznik celkové deformace přesného odlitku v průběhu výrobního procesu*

Na základě výsledků analýzy výrobního procesu (viz obr. 10.1) se jako nejdůležitější pro dodržení tolerancí ukázala fáze výroby voskových modelů a „stromečků“. Proto je celá experimentální část věnována přesnosti a deformacím voskových modelů a opatřením ke zlepšení jejich rozměrové přesnosti [H26].



**Obr. 10.2 Ukázka definování modelu stromečku lopatek a finální technologie (vlevo voskový stromeček vpravo hotová skořepina s izolací) [H28]**

Výsledky práce byly aplikovány a realizovány průmyslovými partnery Prague Casting Services a.s. a PBS Velká Bíteš a.s.

Výzkum v této oblasti však není u konce – vývoj technologie je stále nákladnou záležitostí a je snaha i v rámci iniciativy Průmysl 4.0 provádět vývoj technologie pouze na počítačích bez nutnosti experimentálně ověřovat technologii. To však vyžaduje zapojení jiných simulačních programů na vstřikování plastů a využití reverzního inženýrství v pohledu vývoje deformace. Obdobně se vyvíjí nové typy kompozitních vosků s PS plnivem, u kterých se předpokládá menší sklon k deformacím.

Požadavky na dodávky odlitků pro energetiku stále stoupají a bude tak třeba dále zpřesňovat i materiálová data v simulačních softwarech, aby výsledek zcela odpovídal realitě. Na tom je nyní založen probíhající výzkum s využitím simulací, které jsou přímo vhodné pro simulaci vstřikování polymerů (a mají v sobě implementován plný viskoelastický model).

# 11. Použitá literatura

## 11.1 Literatura ke kapitole 2

- [2.1] BEELEY, PR. a RF. SMART. *Investment Casting*. 1st ed. Cambridge: The University Press 1995. 486 s. ISBN 0-901716-66-9
- [2.2] SABAU, Adrian S; VISWANATHAN, Srinath. Material properties for predicting wax pattern dimensions in investment casting. *Materials Science and Engineering A*. 2003, 362, s. 125-134. Dostupný také z WWW:<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509303005690>
- [2.3] SABAU, A. S; VISWANATHAN, S. *Temperature Measurements in Wax Patterns and Wax-die Interfacial Heat Transfer Coefficients in Investment Casting*. [online]. 2003,. Dostupný z WWW:<[http://www.ms.ornl.gov/mpg/adrian/web\\_smu\\_bio/afs03-026\\_paper1.pdf](http://www.ms.ornl.gov/mpg/adrian/web_smu_bio/afs03-026_paper1.pdf)>.
- [2.4] HERMAN, Aleš. *Lití na vytavitelný model* [online]. Praha: ČVUT, 2007, 30 s. [cit. 2013-01-07]. Dostupné z: <http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/MPL/presne%20liti%20na%20vytavitelny%20model.pdf>
- [2.5] JOLLY, Mark, et al. *Modelling the investment Casting Process*. American Foundry Society [online]. 2001, Dostupný z WWW: <[http://www.flow3d.com/pdfs/tp/cast\\_tp/FloSci-Bib3-02.pdf](http://www.flow3d.com/pdfs/tp/cast_tp/FloSci-Bib3-02.pdf)>.
- [2.6] NILES, Jeffry C.; ANIBARRO, Marcelo; FIELDER, Harvey. Wax characterization for the investment casting process. *Incast*. March 2003, vol. XVI, no.3, s. 16-19.
- [2.7] GÄUMANN, Matthias a Adi SHOLAPURWALLA. *Investment Casting Simulation* [online]. Lausanne: UES Software Inc., 2004, 8 s. [cit. 2013-02-08]. Dostupné z: [http://www.esi-group.com/products/casting/publications/Articles\\_PDF/T\\_InvestmentCasting.pdf](http://www.esi-group.com/products/casting/publications/Articles_PDF/T_InvestmentCasting.pdf)
- [2.8] GW INSTRUMENT. *Load Cell Measurement* [Online]. 2013 [cit. 2013-05-07]. Dostupné z: [http://www.gwinst.com/data\\_acquisition/force/load\\_cell.html](http://www.gwinst.com/data_acquisition/force/load_cell.html)
- [2.9] Journal of materials processing technology: Developments in investment casting process -A review. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 2012, roč. 212, č. 11. ISSN 0924-0136. [cit.2013-04-15]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013612001823>
- [2.10] Zollern – foundry technology: Invesment casting. Onlind [cit.2015-12-7]. Dostupné z: [http://www.zollern.de/fileadmin/Upload\\_Konzernseite/Downloads/Brochueren/Casting\\_and\\_Forging/Feinguss\\_us.pdf](http://www.zollern.de/fileadmin/Upload_Konzernseite/Downloads/Brochueren/Casting_and_Forging/Feinguss_us.pdf)
- [2.11] HORÁČEK M., 2009: Výrobapřesnýchodlitkůtechnologíivytavitelnémomodelu (přednáška). Databáze online [cit. 2011-10-11]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/opory>
- [2.12] HANZL, Stanislav a Alfred RŮŽIČKA. *Metalurgie a technologie slévárenských slitin*. díl II. Praha: ČVUT, 1991. ISBN 80-01-00724-3.
- [2.13] HORÁČEK, Milan. *Rozměrová přesnost odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu* [online]. Brno: VÚT, 2009, 92 s. [cit. 2013-01-07]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/download/technologie-vytavitelneho-modelu.pdf>



- [2.14] KOSOUR, Vojtěch. *Využití numerické simulace k optimalizaci výroby voskových modelů* [online]. Brno, 2012 [cit. 2013-06-07]. 139 s. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=61458](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=61458). Doktorská práce. VUT Brno.
- [2.15] WAX INJECTET MANUFACTURER. *Dogendorf GmbH: Wax Injectors* [Online]. 2013 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://www.hellotrade.com/dogendorf-gmbh-cokg-schmucktechnik/wax-injectors.html>
- [2.16] KOSOUR, V - HORÁČEK, M.-HORENSKY, J.: Kvalitní voskový model – základní předpoklad kvalitního odlitku zhotoveného metodou vytavitelného modelu. *Sborník přednášek ke 49. slévárenským dnům*, Brno, 6.- 7.11.2012, s.63-68, ISBN 978-80-02-02405-7
- [2.17] HANCOCK, Phil . **Technical report : Wax Evaluation**. Cambridge, UK : [s.n.], 2011. 24 *Quality control manual (summary)*. [s.l.] : BLAYSON OLEFINES LTD, 200?. 28 s.
- [2.18] BOND, David; NISHIKAWA, Koji. Investigation of Wax Expansion. **Blayson Technical Lectures**. 2002, s. 1-44. Volume 834-836, 2013, Pages 1575-1579, 2013 3rd International Conference on Materials and Products Manufacturing Technology, ICMPT 2013; Guangzhou; China; 25 September 2013 through 26 September 2013; Code 100757
- [2.19] Píšek, F.: Konstrukce odlitků. SNTL, Praha, 1956
- [2.20] Hrbek, A.: Navrhování litých součástí. SNTL, Praha 1965
- [2.21] Příbyl, J.: Pnutí v odlitcích. SNTL, Praha, 1973
- [2.22] Vetiška, A.: Hospodárné konstruování odlitků, slévárenské konstrukční slitiny, SNTL Praha, VUT Brno 1973
- [2.23] Svenson, I. – Vilner, L.: Dimensional accuracy of castings. 41e Congrès international de fonderie, Liège, Belgique, 1974
- [2.24] Richter, R.: Form- und Gießgerechtes Konstruieren. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1976
- [2.25] Doškář J. Gabriel, J. - Houšť, M. - Pavelka, M.: Výroba přesných odlitků, SNTL Praha, 1976
- [2.26] Skarbinski, M. – Skarbinski J.: Technologickosť konstrukcie strojov. ALFA, Bratislava 1982
- [2.27] Beeley, P.: Foundry technology. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2001
- [2.28] Heck, K. et al: Herstellen von Endmaßnah-Gußkurbelwellen – Innovative gießtechnologische Entwicklung. Konstruieren + Giessen 23 (1998) č. 2, str. 4-12
- [2.29] Siefert, W.: Einfluß des Abnehmers auf die Qualität von Gußteilen. Konstruieren + Giessen 16 (1991) č. 3, str. 34-40, Zentrale für gußverwendung, Düsseldorf
- [2.30] Steinbauer, G.: Richtig Guß bestellen – bei der Konstruktion fängt es an. Konstruieren + Giessen 12 (1987) č. 4, str. 35-42, Zentrale für gußverwendung, Düsseldorf
- [2.31] Sprunk, J. et al.: Feinguß für alle Industriebereiche. Konstruieren + Giessen 8 (1983) č. 3+4, str. 1-74, Zentrale für gußverwebdung, Düsseldorf
- [2.32] Campbell J.: Castings. Second edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2003
- [2.33] Murari P. Singh, George M. Lucas: Blade Design and Analysis for Steam Turbines. McGraw-Hill Companies, Inc. 2011 ISBN: 9780071635745
- [2.34] Turbine Blade Construction, Materials, and Manufacture. McGraw-Hill Global Education Holdings. [https://accessengineeringlibrary.com/browse/blade-design-and-analy ...](https://accessengineeringlibrary.com/browse/blade-design-and-analy...)
- [2.35] Turbine blade. [https://en.wikipedia.org/wiki/Turbine blade](https://en.wikipedia.org/wiki/Turbine_blade)

- [2.36] ASM International: Casting Design and Performance. ASM International, The materials Information Society, Materials Park, Ohio, 2009, ISBN 1615031324, 9781615031320
- [2.37] ČSN EN ISO 8062-3 (014460) Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Rozměrové a geometrické tolerance pro formované díly - Část 3: Obecné rozměrové a geometrické tolerance a přídatky na obrábění
- [2.38] ČSN 42 9671 Odlitky tlakové - Zásady pro navrhování
- [2.39] ČSN 01 4909:1955 (014909). Poloměry vnitřních zaoblení odlitků ze šedé litiny.
- [2.40] Ding Hua Zhang & Rui Song Jiang & Jian Ling Li & Wen Hu Wang & Kun Bu: Cavity optimization for investment casting die of turbine blade based on reverse engineering. Published online: 20 November 2009, Springer-Verlag, London Limited 2009, Technol (2010) 48:839–846 DOI 10.1007/s00170-009-2343-x
- [2.41] DONG Yi-wei, BU Kun, DOU Yang-qing, ZHANG Ding-hua: Determination of wax pattern die profile for investment casting of turbine blades. Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology, Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China, 2010, Transactions of Nonferrous Metals Society of China 21 (2011) 378-387
- [2.42] Modukuru, S.C.-Ramakrishnan, N.-Sriramamurthy, A.M.: Determination of the die profile for the investment casting of aerofoil-shaped turbine blades using the finite-element method. Journal of Materials Processing Technology 58 (1996) 223-226
- [2.43] Horáček, M. - Helán, J.: Dimensional Accuracy and Stability of Investment Casting, 46th Annual Technical Meeting, ICI, 1998, Orlando
- [2.44] STEFANESCU, Doru Michael. Science and engineering of casting solidification. 2nd ed. New York: Springer, 2009. ISBN 978-0-387-74612-8.
- [2.45] HERRMANN, Robert. How to Design and Buy Investment Castings. Literary Licensing, 2012. ISBN 978-1258462727.
- [2.46] ABDULLAH, M. R. Development of Wax Injection Mold for Investment Casting. Universiti Teknologi Malaysia, 2007.
- [2.47] CANNELL, Nick a Adrian S. SABAU. Predicting Pattern Tooling and Casting Dimensions for Investment Casting, Phase III. Oak Ridge National Laboratory. Oak Ridge National Laboratory., 2008, , 57.
- [2.48] CHAUDHRY, Neil. Advanced Pattern Material for Investment Casting Applications. United States. Department of Energy. Office of Energy Research, 2006.
- [2.49] HEW, S. W. Effect of Investment Casting Process Variables on Mechanical Properties of Cast Aluminium Alloy. Universiti Teknologi Malaysia, 2005.

## 11.2 Literatura ke kapitole 3

- [3.1] GREMAUD, M. a M. RAPPAZ. ESI GROUP. Modeling of Foundry Processes: Differences Between Various Solutions [Online]. 2001, 12 s. [cit. 2013-03-27]. Dostupné z: [http://www.esi-group.com/products/casting/publications/Articles\\_PDF/T\\_FEM-FDM.pdf](http://www.esi-group.com/products/casting/publications/Articles_PDF/T_FEM-FDM.pdf)
- [3.2] GAUMANN, M; SHOLAPURWALLA, A. Investment Casting Simulation. In Calcom [online]. Lausanne : UES Software Inc., 2004]. Dostupné z WWW: <[http://www.esigroup.com/products/casting/publications/Articles\\_PDF/T\\_InvestmentCasting.pdf](http://www.esigroup.com/products/casting/publications/Articles_PDF/T_InvestmentCasting.pdf)>.
- [3.3] GEBELIN, J.C., et al. Simulation of Die Filling for the Wax Injection Process: Part I. Models for Material Behavior . In Metallurgical and Materials Transactions B [online]. Boston: Springer Boston, 2004 Dostupné z WWW:<<http://www.springerlink.com/content/e2546k6572x20g69/>>. p. 755-759. ISSN 1073-5615.
- [3.4] WANG, Hong. Numerical Modelling of the Tilt Casting Processes of Titanium Aluminides. University of Greenwich, 2008.
- [3.5] HATTEL, Jesper. Fundamentals of numerical modelling of casting processes. Lyngby: Polyteknisk Forlag, 2005. ISBN 9788750209690.
- [3.6] BONOLLO, Franco a Stefano ODORIZZI. Numerical simulation of foundry processes. Padova: Servizi grafici editoriali, 2001. ISBN 9788886281638.
- [3.7] QIGUI WANG, Qigui. Simulation of aluminum shape casting processing: from alloy design to mechanical properties : proceedings of symposium. Warrendale, Pa: TMS, 2006. ISBN 9780873396240.
- [3.8] KOTAS, P., C. TUTUM, J. HATTEL, O. ŠNAJDROVÁ a J. THORBORG. A Casting Yield Optimization Case Study: Forging Ram. International Journal of Metalcasting [online]. 2010, 4(4), 61-76 [cit. 2017-06-22]. DOI: 10.1007/BF03355503. ISSN 1939-5981. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/BF03355503>
- [3.9] Integrated modeling of process, structures and performance in cast parts. Technical University of Denmark. ISBN 9788790416546.
- [3.10] KOTAS, P a J H HATTEL. Modelling and simulation of A segregates in steel castings using thermal criterion function Part I – Background and validation. Materials Science and Technology [online]. 2013, 28(7), 872-878 [cit. 2017-06-22]. DOI: 10.1179/1743284712Y.0000000025. ISSN 0267-0836. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/1743284712Y.0000000025>
- [3.11] BONOLLO, F., G. CHIARMETTA, N. GRAMEGNA a P. PARONA. NUMERICAL SIMULATION OF SEMI-SOLID CASTING OF AN AUTOMOTIVE COMPONENT. , 6.
- [3.12] GROSSELLE, F. DEVELOPMENT OF INNOVATIVE APPLICATIONS IN NON-FERROUS METALS. 2010. Università degli Studi di Padova.
- [3.13] IGNASZAK, Zenon. Study on Data Base of Modeling Concerning Casting Phenomena in Cast-Iron-Mould Simulation Systems. Key Engineering Materials [online]. 2010, 457, 305-311 [cit. 2017-06-22]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.457.305. ISSN 1662-9795. Dostupné z: <http://www.scientific.net/KEM.457.305>
- [3.14] VIJAYARAM, T.R., S. SULAIMAN, A.M.S. HAMOUDA a M.H.M. AHMAD. Numerical simulation of casting solidification in permanent metallic molds. Journal of Materials Processing Technology [online]. 2006, 178(1-3), 29-33 [cit. 2017-06-22]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.09.025. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S092401360500885X>
- [3.15] RAVI, Dr. B. a Durgesh JOSHI. Feedability Analysis and Optimisation Driven by Casting Simulation. Indian Foundry Journal. 2007.
- [3.16] MALINOWSKI, P., J.S. SUCHY a J. JAKUBSKI. DTechnological Knowledge Management System for Foundry Industry. Archives of Metallurgy and Materials [online]. 2013-01-1, 58(3),

- [cit. 2017-06-22]. DOI: 10.2478/amm-2013-0111. ISSN 1733-3490. Dostupné z: <http://www.degruyter.com/view/j/amm.2013.58.issue-3/amm-2013-0111/amm-2013-0111.xml>
- [3.17] GEBELIN, J.C., et al. Simulation of Die Filling for the Wax Injection Process: Part II. Numerical Simulation. In Metallurgical and Materials Transactions B [online]. Boston : Springer Boston, 2004 Dostupné z WWW: <<http://www.springerlink.com/content/n7n536410747r643/>>. p. 761-768. ISSN 1073-5615.
- [3.18] Casting simulation [online]. Slideshare [vid. 4.12.2015]. Dostupné z: <http://www.slideshare.net/Numero1/casting-simulation-33842045>
- [3.19] SW pro inženýrské aplikace [online]. Lenfeld [vid. 4.12.2015]. Dostupné z: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/aktivity/sw.pdf>
- [3.20] Stránka producenta programu [online]. AutoCAST [vid. 4.12.2015]. Dostupné z: <http://autocast.co.in/index.html>
- [3.21] Stránka producenta programu [online]. EKK [vid. 4.12.2015]. Dostupné z: <http://www.ekkinc.com/>
- [3.22] Stránka producenta programu [online]. Castech [vid. 4.12.2015]. Dostupné z: <http://www.castech.fi/>
- [3.23] Stránka producenta programu [online]. Flow Science [vid. 4.12.2015]. Dostupné z: <http://www.flow3d.com/>
- [3.24] Stránka producenta programu [online]. Magmasoft [vid. 4.12.2015]. Dostupné z: <http://www.magmasoft.com/>
- [3.25] Stránka producenta programu [online]. Alphacast [vid. 4.12.2015]. Dostupné z: <http://www.alphacast-software.co.uk/>
- [3.26] Stránka producenta programu [online]. Novacast [vid. 4.12.2015]. Dostupné z: <http://www.novacast.se/>
- [3.27] Stránka producenta programu [online]. ES-group [vid. 4.12.2015]. Dostupné z: <https://www.esi-group.com/cz/software-sluzby/virtualni-vyroba/slevarenstvi>
- [3.28] Stránka producenta programu [online]. RWP [vid. 4.12.2015]. Dostupné z: [http://www.rwpsimtec.de/de\\_hpdcexpert.html](http://www.rwpsimtec.de/de_hpdcexpert.html)
- [3.29] Stránka producenta programu [online]. Finite Solutions [vid. 4.12.2015]. Dostupné z: <https://finite.solutions/>
- [3.30] N. G. McCrum, C. P. Buckley, and C. B. Bucknall: Principles of Polymer Engineering Second Edition , ISBN: 9780198565260, 1997
- [3.31] Tanner, Roger I. : Engineering Rheology. Oxford University Press. p. 27. ISBN 0-19-856197-0. 1988
- [3.32] Christensen, R. M.: Theory of viscoelasticity, second edition, New York, Academic press, 2013, ISBN 0-486-42880
- [3.33] Pipkin, A.C. "Lectures on Viscoelasticity Theory, Springer – Verlag, ISBN 978-0-387-90030-8, 1972
- [3.34] Gutierrez-Lemini D. Engineering Viscoelasticity, Springer, ISBN 978-1-4614-8138-6, 2014
- [3.35] Brinson, H.F. - Brinson L.C.: Polymer Engineering Science and Viscoelasticity, Second Edition, Springer, ISBN 978-1-4899-7484-6, 2015

## 12. Publikace autora citované v habilitační práci

- [H1.] Herman, A. Technologie odlévání na vytavitelný model, učební texty pro předmět Metody přesného lití, vytvořeno v rámci projektu FRVŠ, u12133.fsid.cvut.cz 2004
- [H2.] HERMAN, A., et al. *TECHNOLOGIČNOST PŘESNÝCH ODLITKŮ*. Velká Bíteš: PBS Velká Bíteš. 2016, U12133/2016/015.
- [H3.] BEDNÁŘ, B., Herman, A., et al. *TYPIZACE TURBÍNOVÝCH LOPATEK*. Velká Bíteš: PBS Velká Bíteš. 2016, U12133/2016/017
- [H4.] KUBELKOVÁ, I. a HERMAN, A. Test Methods for Investment Casting Filled Wax. In: KUDLÁČEK, J., ČERVENÝ, J., a PAKOSTA, M., eds. *Book of Proceeding from Conference Technological Forum 2017*. Technological forum 2017. Špindlerův Mlýn, 27.06.2017 - 29.06.2017. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček. 2017, s. 204-210. ISBN 978-80-87583-22-7.
- [H5.] HERMAN, A. The Computer simulation for Investment Casting from Super-Alloys Ni. In: *METAL 2001*. METAL 2001. Ostrava, 15.05.2001 - 17.05.2001. Ostrava: Tanager. 2001, s. 0
- [H6.] HERMAN, A. The Computer Simulation for Investment Casting from Super-Alloys Ni. In: *Transcom 2001*. Transcom 2001 - 4th European conference of Young Research and Science Workers in Transport and Telecommunications. Žilina, 25.06.2001 - 27.06.2001. Žilina: Žilinská univerzita. 2001, s. 209-212. ISBN 80-7100-850-8.
- [H7.] HERMAN, A. a STUNOVÁ, B. The Influence of Mesh for Accuration Simulation for High Pressure Casting Technology. In: *Advanced Engineering Design 2004*. Advanced Engineering Desing - 4th International Conference. Glasgow, 05.09.2004 - 08.09.2004. Praha: Orgit. 2004, ISBN 80-86059-41-3.
- [H8.] HERMAN, A. Počítačové simulace pro odlitky z Co slitin vyráběných metodou vyavitelných modelů. In: *METAL 2002*. Metal 2002-11th International Metallurgical Materials Conference. Hradec nad Moravicí, 14.05.2002 - 16.05.2002. Ostrava: Česká společnost pro nové materiály a technologie. 2002, ISBN 80-85988-73-9.
- [H9.] HERMAN, A., ČESAL, M., a PÍŠA, V. Měření vlastností voskových směsí jako vstupních dat do databáze simulačního software. *Strojírenská technologie*. 2014, **XIX**(1), s. 8-12. ISSN 1211-4162.
- [H10.] HERMAN, A., et al. Měření vlastností voskových směsí jako vstupních dat do databáze simulačního software. In: *Sborník příspěvků z 50. slévárenských dnů*. 50. slévárenské dny. Brno, 12.11.2013 - 13.11.2013. Brno: Česká slévárenská společnost. 2013, ISBN 978-80-02-02498-9.
- [H11.] HERMAN, A., VRÁTNÝ, O., a BEDNÁŘ, B. MEASURING OF WAX PROPERTIES FOR SIMULATION INJECTION OF WAX PATTERNS AND THEIR DEFORMATION PREDICTION. In: *Proceedings book 16th international foundrymen conference*. 16th International Foundrymen Conference - Global Foundry Industry - Perspectives for the Future. Opatija, 15.05.2017 - 17.05.2017. Sisak: University of Zagreb, Faculty of Metallurgy. 2017, ISBN 978-953-7082-26-0.
- [H12.] HERMAN, A., VRÁTNÝ, O., a BEDNÁŘ, B. The viscoelastic properties of wax materials HYFILL-478 and RF1-478. In: KUDLÁČEK, J., ČERVENÝ, J., a PAKOSTA, M., eds. *Book of Proceeding from Conference Technological Forum 2017*. Technological forum 2017. Špindlerův Mlýn, 27.06.2017 - 29.06.2017. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček. 2017, s. 185-191. ISBN 978-80-87583-22-7.
- [H13.] HERMAN, A., et al. Verifikace počítačové simulace deformací voskových modelů pomocí software ProCAST. In: *Sborník příspěvků z 50. slévárenských dnů*. 50. slévárenské dny. Brno, 12.11.2013 - 13.11.2013. Brno: Česká slévárenská společnost. 2013, ISBN 978-80-02-02498-9.
- [H14.] HERMAN, A. a ČESAL, M. The Solving of a Wax Pattern Deformation for the Large Castings of Blades for Gas Turbines. *Technolog*. 2013, **0**(2), s. 27-34. ISSN 1337-8996.

- [H15.] HERMAN, A., ČESAL, M., a MIKEŠ, P. The Deformation of Large Difficulty Shape Wax Patterns and Castings in Investment Casting Technology. In: SZALAY, T., CAR, Z., a KUDLÁČEK, J., eds. *Proceedings of International Conference on Innovative Technologies IN-TECH 2013*. International Conference on Innovative Technologies 2013. Budapest, 10.09.2013 - 13.09.2013. Rijeka: Faculty of Engineering University of Rijeka. 2013, s. 25-28. ISBN 978-953-6326-88-4.
- [H16.] HERMAN, A. a ČESAL, M. The Deformation and Simulation of a Large Wax Patterns. In: *4th International Technical Conference Technological Forum 2013 Book of proceedings*. 4th International Technical Conference Technological Forum 2013. Kouty, 25.06.2013 - 27.06.2013. Jaroměř: Tisk AS, s.r.o.. 2013, s. 223-228. ISBN 978-80-87583-06-7.
- [H17.] MIKEŠ, P. a HERMAN, A. Analysis of the Geometric Specifications of the Stator Segment of the Gas Turbine. In: *4th International Technical Conference Technological Forum 2013 Book of proceedings*. 4th International Technical Conference Technological Forum 2013. Kouty, 25.06.2013 - 27.06.2013. Jaroměř: Tisk AS, s.r.o.. 2013, s. 102-106. ISBN 978-80-87583-06-7.
- [H18.] HERMAN, A., et al. Verifikace počítačové simulace deformací voskových modelů pomocí software ProCAST. *Slévárství*. 2013, **LXI**(9-10), s. 322-325. ISSN 0037-6825.
- [H19.] Herman A, Píša, V.: Roční zpráva projektu TA01011425 Výzkum zvyšování rozměrové přesnosti voskových modelů pro technologii odlévání metodou vytavitelného modelu za rok 2013.
- [H20.] HERMAN, A., ČESAL, M., a MIKEŠ, P. Deformace modelů a odlitků v technologii lití na vytavitelný model. *Strojírenská technologie*. 2012, **17**(5 a 6), s. 296-303. ISSN 1211-4162.
- [H21.] HERMAN, A. a ČESAL, M. Problematika simulací lisování voskových modelů k technologii přesného lití na vytavitelný vosk. In: *TechMat'12 - Perspektivní technologie a materiály pro technické aplikace*. TechMat 2012. Svitavy, hotel Schindlerův háj, 15.11.2012. Pardubice: Univerzita Pardubice. 2012, ISBN 978-80-7395-537-3.
- [H22.] HERMAN, A. a ČESAL, M. Temperature Stability of the Process of Production of Wax Patterns for Investment Casting Technology. *Manufacturing Technology*. 2012, **12**(12), s. 108-112. ISSN 1213-2489. Dostupné z: <http://journal.strojirenskatechnologie.cz/>
- [H23.] HERMAN, A., ČESAL, M., a MIKEŠ, P. The Deformation of Representative Wax Patterns and Castings in Investment Casting Technology. *Archives of Foundry Engineering*. 2012, **12**(1), s. 37-42. ISSN 1897-3310.
- [H24.] HERMAN, A., ČESAL, M., a PÍŠA, V. Problematika simulací chování voskových modelů. *Slévárství*. 2012, **60**(9-10), s. 342-345. ISSN 0037-6825. Dostupné z: <http://www.slevarenstvi.svazslevaren.cz/>
- [H25.] HERMAN, A., ČESAL, M., a MIKEŠ, P. Problematic of Model And Castings Deformations In Investment Casting Technology. In: BENEŠ, L. a ULEWICZ, Robert, eds. *New Trends in the Field of Materials and Technologies Engineering*. Czestochowa: Oficyna Wydawnicza STOWARZYSZENIA MENEDZERÓW JAKOŚCI I PRODUKCJI. 2012, s. 160-177. ISBN 978-83-934225-2-4.
- [H26.] Herman A, Píša, V.: Závěrečná zpráva projektu TA01011425 Výzkum zvyšování rozměrové přesnosti voskových modelů pro technologii odlévání metodou vytavitelného modelu za roky 2011 - 2013.
- [H27.] Herman A, Píša, V.: Závěrečná zpráva projektu TA01011425 Výzkum zvyšování rozměrové přesnosti voskových modelů pro technologii odlévání metodou vytavitelného modelu za roky 2011 - 2013.
- [H28.] Herman A, Píša, V.: Roční zpráva projektu TA01011425 Výzkum zvyšování rozměrové přesnosti voskových modelů pro technologii odlévání metodou vytavitelného modelu za rok 2013.

- [H29.] Herman A, Píša, V.: Roční zpráva projektu TA01011425 Výzkum zvyšování rozměrové přesnosti voskových modelů pro technologii odlévání metodou vytavitelného modelu za rok 2012.
- [H30.] Herman A, Píša, V.: Roční zpráva projektu TA01011425 Výzkum zvyšování rozměrové přesnosti voskových modelů pro technologii odlévání metodou vytavitelného modelu za rok 2011.

## 13. Publikace autora vztahující se k habilitační práci (počítačové simulace slévání + technologie přesného lití)

- [I.] HERMAN, A., VRÁTNÝ, O., a BEDNÁŘ, B. MEASURING OF WAX PROPERTIES FOR SIMULATION INJECTION OF WAX PATTERNS AND THEIR DEFORMATION PREDICTION. In: *Proceedings book 16th international foundrymen conference*. 16th International Foundrymen Conference - Global Foundry Industry - Perspectives for the Future. Opatija, 15.05.2017 - 17.05.2017. Sisak: University of Zagreb, Faculty of Metallurgy. 2017, ISBN 978-953-7082-26-0.
- [II.] HERMAN, A. a JIRUTKA, J. The rationalization of machine bed casting from grey iron. In: KUDLÁČEK, J., ČERVENÝ, J., a PAKOSTA, M., eds. *Book of Proceeding from Conference Technological Forum 2017*. Technological forum 2017. Špindlerův Mlýn, 27.06.2017 - 29.06.2017. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček. 2017, s. 55-59. ISBN 978-80-87583-22-7.
- [III.] HERMAN, A. a RAŠOVEC, V. The die coating influence of heat conduction on Al-Si alloy casting quality. In: PAKOSTA, M., ČERVENÝ, J., a KUDLÁČEK, J., eds. *Book of Proceeding from Conference Technological Forum 2017*. Technological forum 2017. Špindlerův Mlýn, 27.06.2017 - 29.06.2017. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček. 2017, s. 111-117. ISBN 978-80-87583-22-7.
- [IV.] HERMAN, A. a BÜRGEROVÁ, K. Analysis of defects of 3D printed metal product. In: KUDLÁČEK, J., PAKOSTA, M., a ČERVENÝ, J., eds. *Book of Proceeding from Conference Technological Forum 2017*. Technological forum 2017. Špindlerův Mlýn, 27.06.2017 - 29.06.2017. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček. 2017, s. 17-22. ISBN 978-80-87583-22-7.
- [V.] HERMAN, A., VRÁTNÝ, O., a BEDNÁŘ, B. The viscoelastic properties of wax materials HYFILL-478 and RF1-478. In: KUDLÁČEK, J., ČERVENÝ, J., a PAKOSTA, M., eds. *Book of Proceeding from Conference Technological Forum 2017*. Technological forum 2017. Špindlerův Mlýn, 27.06.2017 - 29.06.2017. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček. 2017, s. 185-191. ISBN 978-80-87583-22-7.
- [VI.] KUBELKOVÁ, I. a HERMAN, A. Test Methods for Investment Casting Filled Wax. In: KUDLÁČEK, J., ČERVENÝ, J., a PAKOSTA, M., eds. *Book of Proceeding from Conference Technological Forum 2017*. Technological forum 2017. Špindlerův Mlýn, 27.06.2017 - 29.06.2017. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček. 2017, s. 204-210. ISBN 978-80-87583-22-7.
- [VII.] BEDNÁŘ, B., Herman, A., et al. *TYPIZACE TURBÍNOVÝCH LOPATEK*. Velká Bíteš: PBS Velká Bíteš. 2016, U12133/2016/017.
- [VIII.] HERMAN, A., et al. *TECHNOLOGIČNOST PŘESNÝCH ODLITKŮ*. Velká Bíteš: PBS Velká Bíteš. 2016, U12133/2016/015.
- [IX.] HERMAN, A., VRÁTNÝ, O., a KUBELKOVÁ, I. *Vyhodnocení kritických míst na voskových modelech lopatek*. Velká Bíteš: PBS Velká Bíteš, Divize přesného lití. 2016, U12133/2016/006.



- [X.] HERMAN, A. a VRÁTNÝ, O. The Defects Casting Analysis by Investment Casting Technology. In: KUDLÁČEK, J., ed. *Technological forum 2016*. Technological forum 2016. Červenohorské sedlo, 28.06.2016 - 30.06.2016. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček. 2016, s. 172-178. ISBN 978-80-87583-17-3.
- [XI.] HERMAN, A. a KŘEČEK, M. Rationalization of manufacturing casting compressors house manufactured by low pressure die casting technology.. In: KUDLÁČEK, J., ed. *Technological forum 2016*. Technological forum 2016. Červenohorské sedlo, 28.06.2016 - 30.06.2016. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček. 2016, s. 76-83. ISBN 978-80-87583-17-3.
- [XII.] MORES, A., et al. *Počítačová simulace procesu lití Y bloků*. Chomutov: Slévárna Chomutov, a.s.. 2014, U12133/2014/005.
- [XIII.] HERMAN, A., ČESAL, M., a PÍŠA, V. Měření vlastností voskových směsí jako vstupních dat do databáze simulačního software. *Strojírenská technologie*. 2014, **XIX**(1), s. 8-12. ISSN 1211-4162.
- [XIV.] HERMAN, A. a ČESAL, M. *Simulace a analýza příčiny vzniku prasklin u odlitku SW-1233*. Brničko u Uničova: UNEX a.s.. 2013, 12133\_2013\_9.
- [XV.] HERMAN, A., HAŠKOVÁ, I., a KRAMÁR, T. *Analýza příčiny vzniku prasklin u odlitku SW-1233*. Brničko u Uničova: UNEX a.s.. 2013, 12133\_2013\_8.
- [XVI.] HERMAN, A., et al. Verifikace počítačové simulace deformací voskových modelů pomocí software ProCAST. In: *Sborník příspěvků z 50. slévárenských dnů*. 50. slévárenské dny. Brno, 12.11.2013 - 13.11.2013. Brno: Česká slévárenská společnost. 2013, ISBN 978-80-02-02498-9.
- [XVII.] HERMAN, A., et al. Měření vlastností voskových směsí jako vstupních dat do databáze simulačního software. In: *Sborník příspěvků z 50. slévárenských dnů*. 50. slévárenské dny. Brno, 12.11.2013 - 13.11.2013. Brno: Česká slévárenská společnost. 2013, ISBN 978-80-02-02498-9.
- [XVIII.] HERMAN, A. a ČESAL, M. The Solving of a Wax Pattern Deformation for the Large Castings of Blades for Gas Turbines. *Technolog*. 2013, **0**(2), s. 27-34. ISSN 1337-8996.
- [XIX.] HERMAN, A., ČESAL, M., a MIKEŠ, P. The Deformation of Large Difficulty Shape Wax Patterns and Castings in Investment Casting Technology. In: SZALAY, T., CAR, Z., a KUDLÁČEK, J., eds. *Proceedings of International Conference on Innovative Technologies IN-TECH 2013*. International Conference on Innovative Technologies 2013. Budapest, 10.09.2013 - 13.09.2013. Rijeka: Faculty of Engineering University of Rijeka. 2013, s. 25-28. ISBN 978-953-6326-88-4.
- [XX.] HERMAN, A. a ČESAL, M. The Deformation and Simulation of a Large Wax Patterns. In: *4th International Technical Conference Technological Forum 2013 Book of proceedings*. 4th International Technical Conference Technological Forum 2013. Kouty, 25.06.2013 - 27.06.2013. Jaroměř: Tisk AS, s.r.o.. 2013, s. 223-228. ISBN 978-80-87583-06-7.
- [XXI.] MIKEŠ, P. a HERMAN, A. Analysis of the Geometric Specifications of the Stator Segment of the Gas Turbine. In: *4th International Technical Conference Technological Forum 2013 Book of*

- proceedings*. 4th International Technical Conference Technological Forum 2013. Kouty, 25.06.2013 - 27.06.2013. Jaroměř: Tisk AS, s.r.o.. 2013, s. 102-106. ISBN 978-80-87583-06-7.
- [XXII.] HERMAN, A., et al. Verifikace počítačové simulace deformací voskových modelů pomocí software ProCAST. *Slévárství*. 2013, **LXI**(9-10), s. 322-325. ISSN 0037-6825.
- [XXIII.] Herman A, Píša, V.: Závěrečná zpráva projektu TA01011425 Výzkum zvyšování rozměrové přesnosti voskových modelů pro technologii odlévání metodou vytavitelného modelu za roky 2011 - 2013.
- [XXIV.] Herman A, Píša, V.: Roční zpráva projektu TA01011425 Výzkum zvyšování rozměrové přesnosti voskových modelů pro technologii odlévání metodou vytavitelného modelu za rok 2013.
- [XXV.] Herman A, Píša, V.: Roční zpráva projektu TA01011425 Výzkum zvyšování rozměrové přesnosti voskových modelů pro technologii odlévání metodou vytavitelného modelu za rok 2012.
- [XXVI.] Herman A, Píša, V.: Roční zpráva projektu TA01011425 Výzkum zvyšování rozměrové přesnosti voskových modelů pro technologii odlévání metodou vytavitelného modelu za rok 2011.
- [XXVII.] HERMAN, A. a PÍŠA, V. Ověřená technologie výroby štítů. 2013 Výsledek projektu TA01011425 Výzkum zvyšování rozměrové přesnosti voskových modelů pro technologii odlévání metodou vytavitelného modelu.
- [XXVIII.] HERMAN, A. a PÍŠA, V. Prototyp univerzálního fixačního přípravku. [Prototyp]. 2013, Výsledek projektu TA01011425 Výzkum zvyšování rozměrové přesnosti voskových modelů pro technologii odlévání metodou vytavitelného modelu.
- [XXIX.] HERMAN, A. a PÍŠA, V. Ověřená technologie výroby segmentů. 2013, Výsledek projektu TA01011425 Výzkum zvyšování rozměrové přesnosti voskových modelů pro technologii odlévání metodou vytavitelného modelu.
- [XXX.] HERMAN, A., ROUČKA, J., a ČESAL, M. The Technology of Production the Welding Mirror Castings. In: KUDLÁČEK, J., et al., eds. *Technological Forum 2013*. Technologické fórum 2013. Kouty, 25.06.2013 - 27.06.2013. Jaroměř: Kudláček Jan, Ing.. 2013, s. 205-211. ISBN 978-80-87583-06-7.
- [XXXI.] HERMAN, A., ČESAL, M., a MIKEŠ, P. Deformace modelů a odlitků v technologii lití na vytavitelný model. *Strojírenská technologie*. 2012, **17**(5 a 6), s. 296-303. ISSN 1211-4162.
- [XXXII.] HERMAN, A. a ČESAL, M. Problematika simulací lisování voskových modelů k technologii přesného lití na vytavitelný vosk. In: *TechMat'12 - Perspektivní technologie a materiály pro technické aplikace*. TechMat 2012. Svitavy, hotel Schindlerův háj, 15.11.2012. Pardubice: Univerzita Pardubice. 2012, ISBN 978-80-7395-537-3.
- [XXXIII.] HERMAN, A. FOND-EX a MSV 2012 - novinky v oblasti numerické simulace slévárenských procesů. *Slévárství*. 2012, **60**(11-12), s. 422-423. ISSN 0037-6825.

- [XXXIV.] HERMAN, A. a ČESAL, M. Temperature Stability of the Process of Production of Wax Patterns for Investment Casting Technology. *Manufacturing Technology*. 2012, **12**(12), s. 108-112. ISSN 1213-2489. Dostupné z: <http://journal.strojirenskatechnologie.cz/>
- [XXXV.] HERMAN, A. a PÍŠA, V. Technologie výroby odlitku lopatky se zálitkem a fixací pomocí lití na vytavitelný model. 2012 Výsledek projektu TA01011425 Výzkum zvyšování rozměrové přesnosti voskových modelů pro technologii odlévání metodou vytavitelného modelu.
- [XXXVI.] HERMAN, A., ČESAL, M., a MIKEŠ, P. The Deformation of Representative Wax Patterns and Castings in Investment Casting Technology. *Archives of Foundry Engineering*. 2012, **12**(1), s. 37-42. ISSN 1897-3310.
- [XXXVII.] HERMAN, A., ČESAL, M., a PÍŠA, V. Problematika simulací chování voskových modelů. *Slévárství*. 2012, **60**(9-10), s. 342-345. ISSN 0037-6825. Dostupné z: <http://www.slevarenstvi.svazslevaren.cz/>
- [XXXVIII.] HERMAN, A., ČESAL, M., a MIKEŠ, P. Problematic of Model And Castings Deformations In Investment Casting Technology. In: BENEŠ, L. a ULEWICZ, Robert, eds. *New Trends in the Field of Materials and Technologies Engineering*. Czestochowa: Oficyna Wydawnicza STOWARZYSZENIA MENEDZERÓW JAKOŚCI I PRODUKCJI. 2012, s. 160-177. ISBN 978-83-934225-2-4.
- [XXXIX.] HERMAN, A., et al. Výroba ocelových odlitků střížných nástrojů pro automobilový průmysl. *Slévárství*. 2011, **LIX**(3-4), s. 72-76. ISSN 0037-6825.
- [XL.] HERMAN, A. a MORES, A. Výroba ocelových odlitků střížných nástrojů pro automobilový průmysl. In: *48. Slévárenské dny - sborník*. 48. Slévárenské dny. Brno, 11.10.2011 - 12.10.2011. Brno: Česká slévárenská společnost. 2011, s. 1-13. ISBN 978-80-02-02337-1.
- [XLI.] HERMAN, A., ČESAL, M., a MIKEŠ, P. Problematika deformací modelů a odlitků v technologii odlévání na vytavitelný model. In: *TechMat 11*. TECHMAT 2011. Svitavy, 10.11.2011. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera. 2011, s. 30. ISBN 978-80-7395-431-4.
- [XLII.] HERMAN, A., BRYKŠÍ, B., a ZIKMUND, P. Těhlice pro studentskou formuli. [Funkční vzorek]. 2010
- [XLIII.] HERMAN, A. a ZIKMUND, P. Vývoj prototypových odlitků z Mg slitin na studentskou formuli ČVUT v Praze. In: *TECHMAT 2010*. TECHMAT '10. Svitavy, 11.11.2010. Pardubice: Univerzita Pardubice. 2010, ISBN 978-80-7395-324-9.
- [XLIV.] HERMAN, A., ZIKMUND, P., a ČERVENÝ, P. Racionalizace licího cyklu odlitku zrcátka. In: *Quo vadis foundry III.. Quo vadis zlievarenstvo?*. Tatranská Lomnica, 05.10.2010 - 07.10.2010. Košice: Technická univerzita v Košiciach. 2010, s. 89-95. ISBN 978-80-553-0506-6.
- [XLV.] HERMAN, A., ZIKMUND, P., a HALDA, J. Vývoj a výroba závěsů kol na studentskou formuli z Mg slitin. In: *Quo vadis foundry III.. Quo vadis zlievarenstvo?*. Tatranská Lomnica, 05.10.2010 - 07.10.2010. Košice: Technická univerzita v Košiciach. 2010, s. 96-101. ISBN 978-80-553-0506-

6.

- [XLVI.] HERMAN, A. Design And Material Of Large Complicated Castings Of Stamping Dies For Automotive Industry. *MM Science Journal*. 2010, **0(4)**, s. 206-208. ISSN 1803-1269. Dostupné z: [http://www.mmscience.eu/archives/MM\\_Science\\_201015.pdf](http://www.mmscience.eu/archives/MM_Science_201015.pdf)
- [XLVII.] ČESAL, M. a HERMAN, A. Vulcan - systém simulace odlévání. In: *47. slévárenské dny a 7. mezinárodní PhD konference*. 47. Slévárenské dny a 7. mezinárodní Ph.D. konference. Brno, 23.06.2010 - 24.06.2010. Brno: TA-SERVICE s.r.o.. 2010, ISBN 978-80-904020-6-5.
- [XLVIII.] HALDA, J. a HERMAN, A. Výroba těhlic z hořčíkové slitiny pro CarTech team CTU. In: MORAVEC, J., ed. *Studentská tvůrčí činnost 2010*. Studentská tvůrčí činnost 2010. Praha, 30.03.2010. Praha: ČVUT v Praze - Fakulta strojní. 2010, ISBN 978-80-01-04533-6.
- [XLIX.] HERMAN, A. Design of Large Complicated Castings of Stamping Dies for Automotive Industry. In: *MITECH 08 Proceedings international scientific conference "Material science and Manufacturing Technology"*. MITECH 08 International scientific conference "Material science and Manufacturing Technology". Praha, 26.06.2008 - 27.06.2008. Praha: Česká zemědělská univerzita, Technická fakulta. 2008, s. 63-68. ISBN 978-80-213-1792-5.
- [L.] HERMAN, A. The Problem of Manufacturing Large Casting of Casting Stamping Die by Full Mould Technology. In: *International Science Conference of Materials science and Manufacturing Technology*. International Science Conference of Materials Science and Manufacturing Technology. Praha, 26.06.2007 - 27.06.2007. Praha: Česká zemědělská univerzita (ČZU). 2007, s. 179-184. ISBN 978-80-213-1650-8.
- [LI.] HERMAN, A. Problematika technologičnosti konstrukce a výroby velkých odliteků raznic. *Slévárenství*. 2007, **LV(4)**, s. 156-160. ISSN 0037-6825.
- [LII.] Herman, A. Technologie odlévání na vytavitelný model, učební texty pro předmět Metody přesného lití, vytvořeno v rámci projektu FRVŠ, u12133.fsid.cvut.cz 2004
- [LIII.] HERMAN, A. a MAROUŠEK, L. Verification Casting Simulation for High Pressure Casting Technology. In: *Advanced Engineering Design 2004*. Advanced Engineering Design - 4th International Conference. Glasgow, 05.09.2004 - 08.09.2004. Praha: Orgit. 2004, ISBN 80-86059-41-3.
- [LIV.] HERMAN, A. a STUNOVÁ, B. The Influence of Mesh for Accuration Simulation for High Pressure Casting Technology. In: *Advanced Engineering Design 2004*. Advanced Engineering Design - 4th International Conference. Glasgow, 05.09.2004 - 08.09.2004. Praha: Orgit. 2004, ISBN 80-86059-41-3.
- [LV.] ČERMÁK, J., VRABEC, M., a HERMAN, A. Simulace technologických procesů v technologické přípravě výroby. In: FÜRbacher, M., ed. *Rozvoj metod a prostředků integrovaného strojního inženýrství*. Seminář k řešení výzkumného záměru MSM 212200008. Praha, 26.11.2003. Praha: ČVUT v Praze. 2003, s. 43-48. ISBN 80-01-02866-6.

- [LVI.] HERMAN, A., et al. Využití programu PAM-CAST pro technologii tlakového lití. *Slévárství*. 2003, **51**(4-5), s. 166-168. ISSN 0037-6825.
- [LVII.] HERMAN, A. The Verification of Two Foundry Simulation Software for Technology High Pressure Casting. In: *TRANSCOM 2003*. Transcom 2003. Žilina, 23.05.2003 - 25.06.2003. Žilina: Žilinská univerzita. 2003, s. 179-182. ISBN 80-8070-084-2.
- [LVIII.] HERMAN, A. Optimalizace TPV pro technologii nízkotlakého lití. *MM. Průmyslové spektrum*. 2003, **7**(3), s. 48-49. ISSN 1212-2572.
- [LIX.] HERMAN, A. The Returnability of Investment to the Simulation Software and Monitoring of Costs for Foundry Al Alloys. In: NOVOSAD, J., ed. *AED 2003*. AED 2003. Praha, 01.06.2003 - 04.06.2003. Praha: Procesní inženýrství Ing. J. Novosad. 2003, ISBN 80-86059-35-9.
- [LX.] HERMAN, A. Using of the Simulation Software for High Pressure Casting Technology. In: NOVOSAD, J., ed. *AED 2003*. AED 2003. Praha, 01.06.2003 - 04.06.2003. Praha: Procesní inženýrství Ing. J. Novosad. 2003, ISBN 80-86059-35-9.
- [LXI.] HERMAN, A. Verifikace počítačových simulací pro technologii tlakového lití. In: *Technológia 2003*. Technológia 2003. Bratislava, 09.09.2003 - 10.09.2003. Bratislava: STU v Bratislave, SJF. 2003, ISBN 80-227-1935-8.
- [LXII.] HERMAN, A. Návržnost investice do simulacního software a sledování nákladovosti slévárenské výroby pro slévárny Al slitin. In: *Ekonomické problémy při výrobě odlitků*. 2. mezinárodní konference. Dolní Věstonice, 22.10.2002 - 24.10.2002. Brno: Česká slévárenská společnost. 2002, s. 131-138.
- [LXIII.] HERMAN, A. The Comparison of Two Foundry Simulation Software for Different Technology. In: *Proceedings of Conference ATDC 2002*. Conference ATDC 2002. Slavonski Brod, 12.09.2002 - 14.09.2002. Slavonski Brod: Faculty of Mechanical Engineering. 2002, s. 385-390. ISBN 953-7611-64-X.
- [LXIV.] HERMAN, A. Počítačové simulace pro odlitky z Co slitin vyráběných metodou vyavitelných modelů. In: *METAL 2002*. Metal 2002-11th International Metallurgical Materials Conference. Hradec nad Moravicí, 14.05.2002 - 16.05.2002. Ostrava: Česká společnost pro nové materiály a technologie. 2002, ISBN 80-85988-73-9.
- [LXV.] HERMAN, A. Optimalizace technologie odlitku pomocí simulačního software. *Slévárství*. 2002, **50**(8-9), s. 318-321. ISSN 0037-6825.
- [LXVI.] HERMAN, A. a LUŇÁČEK, K. Nejrychlejší (NOVACAST) a nejpřesnější (PAM-CAST) počítačová simulace na světě. *Slévárství*. 2002, **50**(5-6), s. 209-212. ISSN 0037-6825.
- [LXVII.] HERMAN, A. CIM systémy ve slévárnách. *MM. Průmyslové spektrum*. 2002, **6**(1,2,3), s. 38-41. ISSN 1212-2572.

- [LXVIII.] HERMAN, A. Comparison of Foundry Simulation Software. In: *Proceedings of Workshop 2002*. Workshop 2002. Praha, 11.02.2002 - 13.02.2002. Praha: České vysoké učení technické v Praze. 2002, s. 750-751. ISBN 80-01-02511-X.
- [LXIX.] HERMAN, A. Srovnání návratnosti investic pro klasickou technologii a technologii s využitím simulačního software. In: *Nové směry vo výrobnom inžinierstve 2002*. Nové směry vo výrobnom inžinierstve 2002. Prešov, 13.06.2002 - 14.06.2002. Prešov: Technická univerzita, fakulta výrobních technológií. 2002, s. 302-305. ISBN 80-7099-828-8.
- [LXX.] HERMAN, A. Srovnání dvou slévárenských software pro technologii gravitačního a tlakového lití. In: *Nové směry vo výrobnom inžinierstve 2002*. Nové směry vo výrobnom inžinierstve 2002. Prešov, 13.06.2002 - 14.06.2002. Prešov: Technická univerzita, fakulta výrobních technológií. 2002, s. 298-301. ISBN 80-7099-828-8.
- [LXXI.] HERMAN, A., et al. The Problem of Consideration Design in Casting - Creation of Technological Handbook. In: *Proceedings of Workshop 2001*. Workshop 2001. Praha, 05.02.2001 - 07.02.2001. Praha: České vysoké učení technické v Praze. 2001, s. 628-629. ISBN 80-01-02335-4.
- [LXXII.] HERMAN, A., VACEK, M., a WEIS, M. Srovnání slévárenských simulačních softwarů PAM-CAST/Simulor a NovaFlow&Solid. In: *Strojné inžinierstvo 2001*. Strojné inžinierstvo 2001. Bratislava, 22.11.2001. Bratislava: STU v Bratislave. 2001, s. 301-306.
- [LXXIII.] HERMAN, A. The Computer Simulation for Investment Casting from Super-Alloys Ni. In: *Transcom 2001*. Transcom 2001 - 4th European conference of Young Research and Science Workers in Transport and Telecommunications. Žilina, 25.06.2001 - 27.06.2001. Žilina: Žilinská univerzita. 2001, s. 209-212. ISBN 80-7100-850-8.
- [LXXIV.] HERMAN, A. a SMETANA, K. The Returnability of Investment to the Casting Simulation Software. In: *Transcom 2001*. Transcom 2001 - 4th European conference of Young Research and Science Workers in Transport and Telecommunications. Žilina, 25.06.2001 - 27.06.2001. Žilina: Žilinská univerzita. 2001, s. 225-228. ISBN 80-7100-850-8.
- [LXXV.] HERMAN, A. The Computer simulation for Investment Casting from Super-Alloys Ni. In: *METAL 2001*. METAL 2001. Ostrava, 15.05.2001 - 17.05.2001. Ostrava: Tanger. 2001, s. 0.
- [LXXVI.] HERMAN, A. a LUŇÁČEK, K. Využití počítačové simulace při výchově mladých slévárenských odborníků. *Slévárenství*. 2001, **49**(5,6), s. 343-346. ISSN 0037-6825.
- [LXXVII.] HERMAN, A. a VRABEC, M. Využití CAD/CAM systémů ve výuce - zaměření slévání a obrábění. *Strojárstvo v hospodárstve a priemysle*. 2000, **4**(11), s. 18-19. ISSN 1335-2938.
- [LXXVIII.] HERMAN, A., SVÁROVSKÝ, M., a VRABEC, M. The Optimations of Relations between Conversion from Founding and Machining CAD/CAM Systems. In: STREJČ, A., ed. *Proceedings of Workshop 2000*. Workshop 2000. Praha, 14.02.2000 - 16.02.2000. Praha: České vysoké učení technické v Praze. 2000, s. 454. ISBN 80-01-02229-3.