

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

KATEDRA SKLÁŘSKÝCH A KERAMICKÝCH STROJŮ

# DIPLOMOVÁ PRÁCE

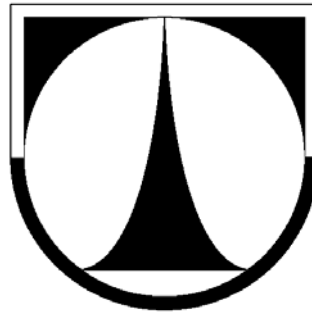
2006

Lukáš PIREK

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: M2301 – Strojní inženýrství



Studijní obor: 2302T010 Konstrukce strojů a zařízení

Zaměření: Sklářské a keramické stroje

## **Modelová stanice pro kapalinové chlazení forem**

(A model station for liquid cooling of moulds)

KSK – 19087

**Lukáš PIREK**

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. František Novotný, CSc.

Konzultant diplomové práce: Ing. Ivo Matoušek, Ph.D.

Ing. Václav Drahoňovský – konstruktér Sklostroj Turnov CZ, s.r.o.

### **Rozsah diplomové práce:**

Počet stran:	71
Počet tabulek:	0
Počet obrázků:	47
Počet výkresů:	10
Počet příloh:	0
Počet CD ROM:	1

Datum odevzdání: 26.5.2006

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

**TÉMA :**

Modelová stanice pro kapalinové chlazení forem

**ANOTACE :**

Diplomová práce se zabývá problematikou kapalinového chlazení sklářských forem sekčních strojů pro výrobu obalového skla. Teoretická část práce je zaměřena na přehled principů sdílení tepla, matematické a fyzikální modelování. Dále je proveden rozbor patentové dokumentace k problematice chlazení forem, návrh nového způsobu kapalinového chlazení a flexibilního přívodu kapaliny do sklářské formy. V konstrukční části diplomové práce je předložen návrh koncepce modelové stanice, na kterou navazuje její konstrukční řešení. Podle přiložené technické dokumentace byla vyrobena modelová stanice. V závěru práce je provedeno zhodnocení technických parametrů, postup experimentální činnosti a analyzována využitelnost naměřených výsledků na modelové stanici.

**KLÍČOVÁ SLOVA :**

Sklářská forma, chladicí kapalina, chlazení, sdílení tepla, modelová stanice.

**SUBJECT:**

A model station for liquid cooling of moulds

**ANNOTATION:**

The thesis deals with the issue of liquid cooling of glass moulds in section machines used for producing packing glass. The theoretical part of the thesis contains a summary of thermal transmittance principles and a mathematical and physical simulation. It also includes an analysis of the patent documentation on the issue of mould cooling and a draft of the new method of liquid cooling and flexible liquid supply to a glass mould. The design part of the thesis contains a concept of a model station and its actual design. The model station has been produced according to the enclosed technical documentation. The final part contains an evaluation of the technical parameters, a description of the experimental procedures and an analysis of the use of the results measured on the model station.

**KEYWORDS:**

Glass mould, cooling liquid, cooling, thermal transmittance, model station.

## **MÍSTOPŘÍSEŽNÉ PROHLÁŠENÍ**

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci 26.5.2006

.....  
Lukáš Pírek

## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Doc.ing. Františku Novotnému, CSc. za poskytnutý čas, neocenitelné rady, náměty a odborné vedení.

Dále bych chtěl poděkovat ing. Václavu Drahoňovskému, konstruktérovi firmy Sklostroj Turnov CZ, za poskytnutí informací, podkladů potřebných k řešení a neocenitelných rad.

Mé poděkování patří také ing. Ivo Matouškovi, Ph.D. za poskytnuté podklady z oboru studia teplotních polí ve sklářské formě.

# Obsah

<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....</b>	<b>-9-</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>-10-</b>
<b>1. TEORETICKÝ ROZBOR .....</b>	<b>- 11 -</b>
1.1 PRINCIP SDÍLENÍ TEPLA PROUDĚNÍM .....	- 11 -
1.2 TEORIE PODOBNOSTI.....	- 13 -
1.3 DRUHY PROUDĚNÍ.....	- 15 -
1.4 MODIFIKACE PROCESŮ SDÍLENÍ TEPLA .....	- 16 -
1.4.1 <i>Matematické modely</i> .....	- 17 -
1.4.2 <i>Fyzikální modelování</i> .....	- 24 -
<b>2. ROZBOR SOUČASNÉHO STAVU CHLAZENÍ FOREM.....</b>	<b>- 27 -</b>
2.1 RADIÁLNÍ CHLAZENÍ.....	- 27 -
2.2 AXIÁLNÍ CHLAZENÍ.....	- 28 -
2.3 OSTATNÍ ZPŮSOBY CHLAZENÍ.....	- 29 -
2.4 KAPALINOVÉ CHLAZENÍ.....	- 30 -
<b>3. ALTERNATIVNÍ STUDIE NOVÝCH PRINCIPŮ CHLAZENÍ .....</b>	<b>- 32 -</b>
3.1 ROZBOR PATENTOVĚ CHRÁNĚNÝCH PRINCIPŮ KAPALINOVÉHO CHLAZENÍ.....	- 32 -
3.2 NOVÝ ZPŮSOB CHLAZENÍ.....	- 38 -
3.3 NÁVRH FLEXIBILNÍHO PŘÍVODU KAPALINY DO FORMY .....	- 39 -
3.3.1 <i>Volba typu hadice</i> .....	- 40 -
3.3.2 <i>Volba typu připojení hadice k formě</i> .....	- 40 -
<b>4. KONCEPCE MODELOVÉ STANICE.....</b>	<b>- 43 -</b>
4.1 SCHÉMA CHLADÍČÍHO OKRUHU .....	- 43 -
4.2 ZÁKLADNÍ ROZMĚRY MODELOVÉ STANICE.....	- 44 -
4.3 ZPŮSOB OHŘEVU DUTINY FORMY .....	- 45 -
4.3.1 <i>Ohřev plamenem</i> .....	- 46 -
4.3.2 <i>Ohřev kanthalovou topnou tyčí</i> .....	- 47 -
4.3.3 <i>Ohřev indukčním principem</i> .....	- 48 -
4.3.4 <i>Volba typu ohřevu</i> .....	- 49 -
4.4 VÝPOČET TOPNÉHO VÝKONU.....	- 50 -
4.5 TECHNICKÉ PARAMETRY GLOBAR SGR Ø 44 mm .....	- 51 -
4.6 ZKROUCENÍ TOPNÉ TYČE .....	- 52 -

<b>5. KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ.....</b>	<b>- 54 -</b>
5.1 KONSTRUKCE MODELOVÉ STANICE .....	- 54 -
5.2 STŘEDĚNÍ TOPNÉ TYČE .....	- 59 -
5.2.1 <i>Systémy pro středění topné tyče – kompenzátory polohy</i> .....	- 60 -
5.2.2 <i>Metody středění a odměřování topné tyče</i> .....	- 61 -
5.3 NÁVRH TVARU FORMY .....	- 63 -
5.4 TECHNICKÁ DOKUMENTACE MODELOVÉ STANICE .....	- 65 -
5.5 UKÁZKA MODELOVÉ STANICE .....	- 66 -
<b>6. ZHODNOCENÍ PŘEDPOKLÁDANÉHO PŘÍNOSU ŘEŠENÍ.....</b>	<b>- 68 -</b>
6.1 ZHODNOCENÍ TECHNICKÝCH PARAMETRŮ MODELOVÉ STANICE.....	- 68 -
6.2 PŘEDPOKLÁDANÝ ROZSAHU EXPERIMENTÁLNÍHO VYUŽITÍ MODELOVÉ STANICE .....	- 68 -
6.3 PŘEDPOKLÁDANÉ VYUŽITÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTŮ .....	- 69 -
<b>ZÁVĚR</b>	<b>- 70 -</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b>	<b>- 71 -</b>



## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Značka	Jednotka	Název
$a$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	teplotní vodivost
$c$	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	měrné teplo
$g$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	gravitační zrychlení
$k$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	součinitel prostupu tepla
$\dot{m}$	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	hmotnostní průtok
$P$	$\text{W}$	výkon
$Q$	$\text{J}, \text{Ws}$	teplo
$q$	$\text{J}, \text{Ws}$	teplo na jednotku plochy
$\dot{Q}$	$\text{W}$	tepelný tok
$\dot{q}$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	tepelný tok na jednotku plochy
$S$	$\text{m}^2$	plocha
$T$	$\text{K}$	absolutní teplota
$t$	$^{\circ}\text{C}$	teplota
$t_k$	$^{\circ}\text{C}$	teplota tekutiny
$t_s$	$^{\circ}\text{C}$	teplota stěny
$w$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	rychlost
$Ar, Eu, Gr, Nu,$ $Pe, Pr, Re$	-	kritéria podobnosti
$\alpha$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	součinitel přestupu tepla
$\beta$	$\text{K}^{-1}$	součinitel objemové roztažnosti
$\delta$	$\text{m}$	mezní vrstva
$\eta$	$\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$	dynamická viskozita
$\lambda$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	tepelná vodivost
$\nu$	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	kinematická viskozita
$\rho$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	hustota
$\rho_o$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	počáteční hustota
$\tau$	$\text{s}$	doba
$\Delta t$	$^{\circ}\text{C}$	rozdíl teplot
$\nabla$	-	Hamiltonův diferenciální operátor

## Úvod

Chlazení sklářských forem při výrobě obalů dvoustupňovou technologií na řadových strojích se v současné době provádí až na výjimky chladícím vzduchem. Proudění chladícího vzduchu je radiální nebo axiální. U radiálního proudění chladícího vzduchu se používá způsob ofuku vnější strany formy. U axiálního proudění je vzduch zaveden do formy kde většinou protéká soustavou vertikálních kruhových kanálů (verti flow).

V oboru chlazení forem dnes nastává zlom a přední výrobci sklářských strojů se snaží nahradit nyní používané vzduchem chlazené formy, formami chlazenými kapalinou. Důvodem změny chlazení je malá efektivnost vzduchového chlazení, velká hlučnost a vysoká teplota okolo výrobního stroje. Kapalinové chlazení forem se již uplatňuje v jiných odvětví průmyslu (zpracování plastů). Ve sklářství je myšlenka chladit formy kapalinou již dávno známá, ale zatím žádný z výrobců IS strojů ji neuplatnil v sériové výrobě. Důvodem je složitost daného problému. Nejdále v řešení se nachází společnost Owens-Illinois, která již provozuje zkušební stanici.

Na katedře sklářských a keramických strojů jsou s řešením problematiky chlazení sklářských forem pro výrobu obalového skla mnohaleté zkušenosti, které byly publikovány v řadě výzkumných zpráv, několika diplomových a disertačních prací [1,2,3]. Obsahem předložené diplomové práce je návrh modelové stanice určené pro experimentální výzkum kapalinového chlazení forem. Na modelové stanici, která odpovídá rozměry a strukturou mechanismu reálnému stroji, je možné měnit parametry chladící kapaliny, simulovat skutečný pracovní cyklus a měřit teplotní pole modelové formy.

Velká část textu je věnována modifikaci procesu sdílení tepla v idealizovaném kanálu a konkrétně ve sklářské formě. Návrh nového principu modifikace sdílení tepla vychází z analýzy patentové dokumentace v daném oboru.

# 1. Teoretický rozbor

Při tvarovacím procesu požadujeme rychlé a přesné vytvoření požadovaného tvaru. Sklovina se musí ochladit tak, aby se výrobek při následné manipulaci nedeformoval, byl dodržen jeho přesný tvar a dosažena vysoká jakost povrchu. Je-li odvedeno málo tepla, výrobek se deformuje, bortí. Stejně tak při velkém množství odvedeného tepla vzniká zmetek, výrobek s povrchovými vadami, navíc se zvyšuje spotřeba energie a současně klesá výkon stroje.

Množství tepla, které vyhovuje všem požadavkům, závisí na mnoha faktorech, nejen fyzikálních. Pro střední měrný odebíraný tepelný výkon při tvarování lahví na řadových strojích v rozsahu hmotnosti lahve od 100 do 700 g uvádí SMRČEK, A. [4] experimentální hodnotu  $430 \pm 42 \text{ kJ.kg}^{-1}$ . Na katedře sklářských a keramických strojů byla v poslední době provedena kalorimetrická měření pивní lahve NRW 0,5 l přímo na výrobním stroji, jednotlivé výsledky a metodika měření jsou popsány v kapitole 4. 3. 5.

Vytvořený tvar je fixován podstatným zvýšením viskozity při ochlazení výrobku. Vlastní změna tvaru probíhá obvykle dostatečně rychle, výkon tvarovacího stroje je limitován rychlostí ochlazení dávky skloviny, tj. především rychlostí odvodu tepla. Změna tvaru dávky skloviny a fixace vytvořeného tvaru jsou funkcí viskozity skloviny. Rozhodující vlastností je tedy viskozita skloviny a především její závislost na teplotě.

Celý proces sdílení tepla při tvarování lze rozdělit do několika dílčích fází : sdílení tepla ve sklovině, přestup tepla ze skloviny do formy, vedení tepla ve formě, přestup tepla do chladicího média a přestup tepla z vnějšího povrchu formy do okolí. Na sdílení tepla při tvarování mají vliv tepelné vlastnosti skloviny – její tepelná vodivost, měrné teplo, ale i radiační vodivost, tepelné vlastnosti formového materiálu, geometrické uspořádání a především poměry na fázovém rozhraní mezi sklovinou a formou a též mezi formou a chladícím médiem.

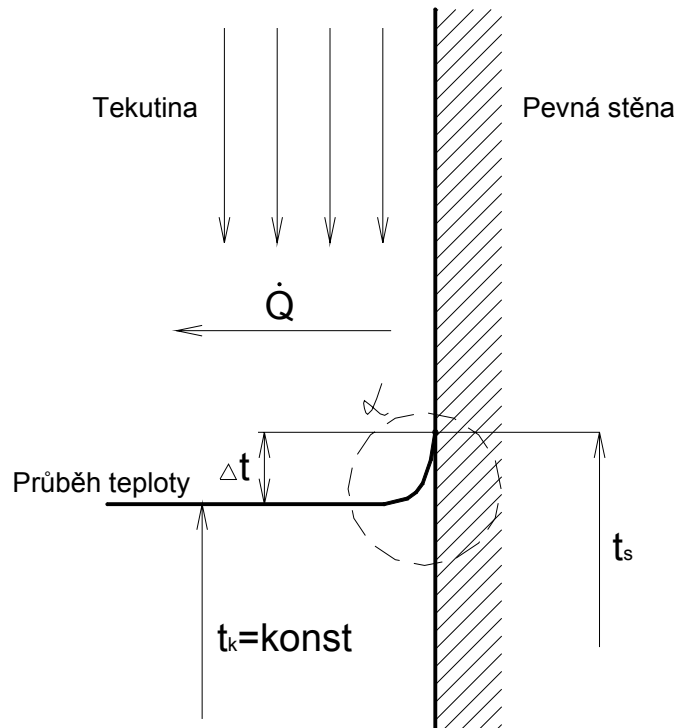
## 1.1 Princip sdílení tepla prouděním

Sdílení tepla mezi pevnou stěnou a kapalným nebo plynným prostředím proudícím podél této stěny je v podstatě velmi složitý pochod, poněvadž je přitom sdílení tepla ovlivněno hydrodynamickými jevy. Teplo se sdílí současně vedením a prouděním, což označujeme konvencí. Na povrchu stěny všeobecně ulpívají pevné částičky a kapalina, které mají stejnou teplotu, přičemž se oproti stěně nepohybují. Stýká-li se s povrchem větší množství kapaliny, pak se obecně omezuje změna teploty kapaliny na nepříliš rozsáhlou oblast, mnohdy na relativně tenkou vrstvu v bezprostřední blízkosti povrchu stěny, tzv. mezní vrstvu.

Při přestupu tepla z pevného tělesa do tekutiny nebo obráceně, je účelné předpokládat rovnoměrné rozložení teploty v tekutině, takže na rozhraní mezi pevnou stěnou a tekutinou se vytváří teplotní spád  $\Delta t = t_k - t_s$ , kterému je sdílené množství tepla úměrné. Pro tepelný tok pak platí

$$\dot{Q} = \alpha \cdot S \cdot (t_k - t_s) \quad , \quad (1.1)$$

kde  $S$  – plocha,  $t_k$  – značí střední teplotu tekutiny,  $t_s$  – teplotu stěny



**Obr.1. 1** Přestup tepla z pevné stěny do tekutiny [5]

Součinitel  $\alpha$  v tomto vzorci se nazývá **součinitel přestupu tepla**. Velikost tohoto součinitele se určuje z podmínky sdílení tepla z tekutiny na povrch tuhého tělesa nebo naopak. Ze vztahu (1.1) plyne rozměr součinitele  $\alpha$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ). Součinitel přestupu tepla udává tudíž množství tepla, přestupujícího za jednotku času jednotkou plochy při spádu  $1^\circ\text{C}$  mezi teplotou tekutiny a povrchem tělesa.

Součiniteli přestupu tepla  $\alpha$  popisuje termokinetické chování soustavy při přestupu tepla mezi teplosměnnou plochou a tekutinou, přičemž zahrnuje vlastnosti tekutiny, tvar systému, rychlost proudění, rozdíl teplot nebo rozdělení teplot po povrchu a další. Součinitel  $\alpha$  je definován jen pro dohodnuté  $S$  a  $\Delta t$ . Výzkum ukázal, že součinitel přestupu tepla je složitou funkcí většího počtu proměnných. Součinitel přestupu tepla lze popsat

$$\alpha = f ( w, t_s, t_k, \lambda, \rho, \eta, \Phi, l_1, l_2, l_3 ) \quad , \quad (1.2)$$

kde  $\Phi$  – veličina charakterizující tvar tělesa [-],

$l_1, l_2, l_3$  – rozměry tělesa [m],  
 $w$  – rychlost kapaliny [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ],  
 $c_p$  – specifické teplo [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ],  
 $\eta$  – dynamická viskozita [ $\text{N}\cdot\text{s}^{-2}$ ],  
 $\rho$  – hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],  
 $\lambda$  – teplotní vodivost tekutiny [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ].

Zjišťování tvaru vztahu  $\alpha = f(w, t_s, t_k, \lambda \dots)$  se provádí v praxi nejčastěji experimentálně. Přitom vzhledem k velikému počtu proměnných veličin je výhodné použít k řešení tohoto problému **teorie podobnosti**.

## 1.2 Teorie podobnosti

Fyzikální děje, které jsou matematicky popsány rovnicemi stejného tvaru a obsahu a mají stejná kritéria podobnosti, označujeme jako děje podobné. Kritéria podobnosti jsou bezrozměrné výrazy, charakterizující podobnost geometrickou, hydrodynamickou a termokinetickou.

Geometrická podobnost je tvořena poměrem charakteristických rozměrů pro teplosměnné plochy.

Hydrodynamická podobnost vyjadřuje podobnost volného a nuceného proudění tekutiny a vychází z rozboru pohybové rovnice proudění (1.3) a rovnice kontinuity (1.4) [6]

$$\rho \frac{D\vec{w}}{Dt} = -\nabla p - \left[ \nabla \cdot \vec{\tau} \right] - \rho \cdot \vec{g} \quad , \quad (1.3)$$

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \cdot (\nabla \cdot \vec{w}) \quad . \quad (1.4)$$

Úpravou z těchto rovnic dostáváme základní hydrodynamická kritéria, zde jsou uvedena ve výběru nejčastěji užívaná :

**Reynoldsovo** – vyjadřující poměr setrvačných sil a sil molekulárního tření

$$\text{Re} = \frac{w \cdot l}{\nu} \quad . \quad (1.5)$$

**Grashofovo** – vyjadřující poměr sil vztlakových, setrvačných a třecích a je určujícím kritériem pro volné proudění

$$\text{Gr} = \beta g \cdot \frac{l^3}{\nu^2} \quad , \quad (1.6)$$

kde  $\beta g = \frac{\rho_o - \rho}{\rho_o}$  ,  $\beta$  je objemová roztažnost tekutiny,  $g$  je rozdíl teplot,  $\rho_o$ ,  $\rho$  jsou hustoty tekutiny ve dvou různých místech.

**Archimedovo** – jako poměr sil vztlakových, setrvačných a třecích při kondenzaci páry

$$Ar = \frac{(\rho_o - \rho).g.l^3}{\rho_o.v^2} . \quad (1.7)$$

**Eulerovo** – jako poměr tlakových a setrvačných sil při proudění tekutiny

$$Eu = \frac{\Delta\rho}{g.w^2} . \quad (1.8)$$

Termokinetická podobnost vyjadřuje podobnost přenosu tepla mezi stěnou a proudící tekutinou. Termokinetická podobnost vychází z rozboru energetické rovnice (1.9) a z rovnice (1.10) vyjadřující rovnost tepelných toků konvencí a kondukcí v tekutině :

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -(\nabla \cdot \vec{\rho}) - p \cdot (\nabla \cdot \vec{w}) - (\vec{\tau} : \nabla \vec{w}) \quad (1.9)$$

$$\alpha \cdot \Delta T = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \quad (1.10)$$

Základní termokinetická kritéria jsou tato:

**Nusseltovo** – pro poměr přenosu tepla konvencí a kondukcí v termokinetické mezní vrstvě tekutiny

$$Nu = \frac{\alpha.l}{\lambda} . \quad (1.11)$$

**Pécletovo** – vyjadřující poměr sdílení tepla vedením a prouděním tekutiny

$$Pe = \frac{w.l}{a} . \quad (1.12)$$

**Prandtlovo** – vyjadřuje fyzikální podobnost tekutin při sdílení tepla

$$Pr = \frac{v}{a} . \quad (1.13)$$

kde  $a$  – teplotní vodivost [ $m^2.s^{-1}$ ]

S využitím uvedených kritériálních čísel jsou výsledky měření prováděné na laboratorních modelech převáděny do tzv. kritériálních rovnic. Tyto rovnice se pak užívají při řešení přenosu tepla konvencí. Nedílnou součástí každé kritériální rovnice jsou intervaly platnosti rovnice a určující teplota pro výpočet termofyzikálních veličin dosazovaných do kritériálních čísel.

### Základní věty o podobnosti :

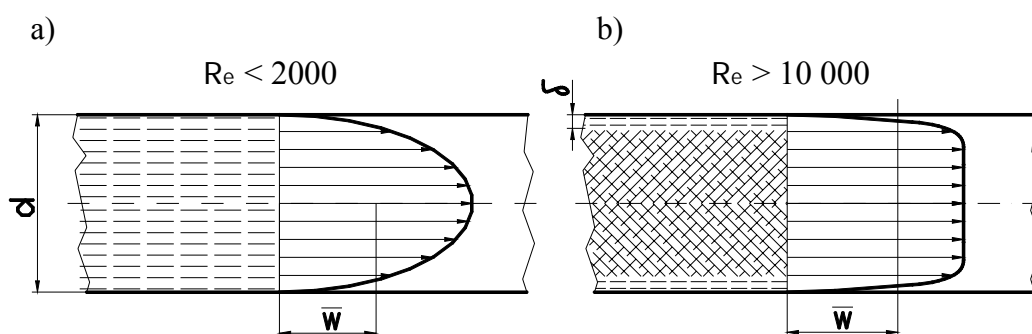
- 1) Fyzikálně podobné jsou děje téže fyzikální povahy, probíhající v systémech geometricky si podobných, jestliže veličiny rozhodující o průběhu děje jsou si na všech odpovídajících si místech obou systémů úměrné.
- 2) Funkční závislost daných  $n$  proměnných lze vyjádřit v bezrozměrném tvaru, jako závislost  $p$  bezrozměrných parametrů. Počet bezrozměrných parametrů se zpravidla rovná počtu  $n$  proměnných, zmenšenému o počet  $r$  rozměrů vystupujících v bezrozměrných veličinách.
- 3) Nutnou a postačující podmínkou podobnosti dvou jevů je číselná rovnost všech bezrozměrných parametrů, jevy popisujících, včetně parametrů odvozených z počátečních a okrajových podmínek.

### 1.3 Druhy proudění

Nucené proudění tekutiny podle pevných stěn může být laminární nebo turbulentní. Přestup mezi těmito způsoby proudění nenastává skokem, ale vytváří se tzv. přechodové proudění. Druh proudění výrazně ovlivňuje velikost přestupu tepla.

Při laminárním proudění se částice kapaliny pohybují rovnoběžně se stěnami kanálu, při turbulentním proudění je pohyb neuspořádaný, avšak podél stěny se vždy vytvoří tenká vrstva tekutiny s pohybem laminárním, tzv. laminární podvrstva. Její tloušťka se zmenšuje se zvětšující se Reynoldsovým číslem  $Re$ . Typy proudění lze charakterizovat hodnotou Reynoldsova čísla.

Při  $Re$  menších než kritické  $Re_{kr}$  má proud charakter laminární, při větších  $Re$  turbulentní (obr.1. 2).



**Obr.1. 2** Rychlostní profily v trubce. a - laminární proudění, b - vpravo turbulentní. [5]

Druh proudění má značný vliv na přestup tepla. Při laminárním proudění se teplo sdílí ve směru kolmém na směr proudění v podstatě jen vedením a je určeno především tepelnou

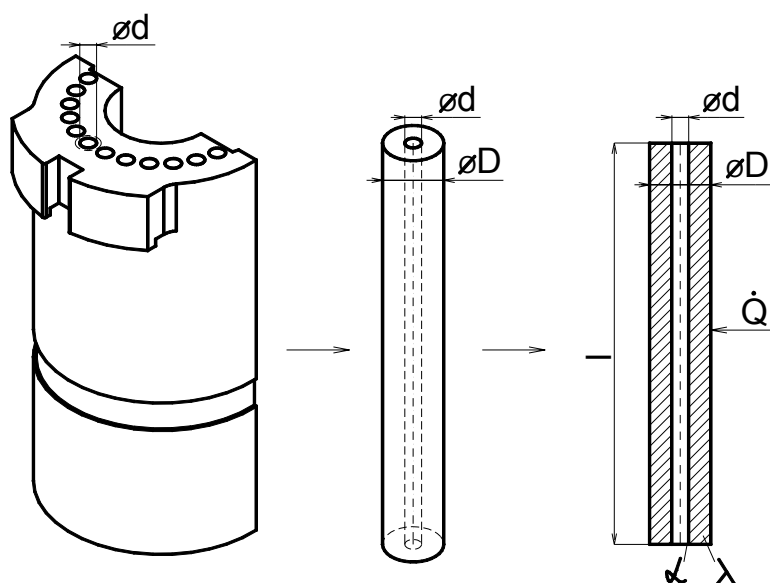
vodivosti tekutiny  $\lambda$ . Při turbulentním proudění se omezuje sdílení tepla jen na laminární podvrstvě, zatímco uvnitř turbulentního jádra se děje sdílení tepla intenzivním promícháváním částic tekutiny. Za takových okolností závisí sdílení tepla v podstatě na tepelném odporu laminární podvrstvy, který proti odporu turbulentního jádra je rozhodující. Tato skutečnost se projeví tím, že v laminární podvrstvě tloušťky  $\delta$  u stěny je pokles teploty největší.

Proudění v kruhových kanálech je laminární při  $Re < 2300$  a turbulentní při  $Re > 2300$ . Průběh rychlosti v průřezu tzv. rychlostní profil je při laminárním proudění dán parabolou druhého stupně a při turbulentním proudění zkomolenou parabolou. Tyto rychlostní profily se vytvoří jen při tzv. hydrodynamicky stabilizovaném proudění. Stabilizace proudu nastává až v jisté vzdálenosti  $x$  od vstupu proudu do kanálu.

## 1.4 Modifikace procesů sdílení tepla

Tepelné pole formy je velice složitý matematický model, proto se budu zabývat jen zjednodušeným případem (obr.1. 3). V následujícím textu budou popsány principy sdílení tepla v okolí chladicího kruhového kanálu. Toto zjednodušení nám dá základní představu o modifikaci sdílení tepla ve formě.

Sdílení tepla v zjednodušeném modelu je reprezentováno prostupem tepla formou a přestupem tepla z formy do chladicí kapaliny. V zjednodušeném modelu není řešena problematika přestupu tepla ze skloviny do formy. Na tomto rozhraní se vytváří tenká izolační vrstva, mající původ zejména v produktech spálených mazadel sklářské formy. Přítomnost izolační vrstvy významně komplikuje výpočet přestupu tepla. Principy přestupu tepla na rozhraní sklovina – forma se již dříve zabývali a podrobně popsaly MC GRAW, D. A.; COSTA, P.; MENČÍK, J. Diplomová práce je zaměřena jen na sdílení tepla v samotné sklářské formě, a proto není řešena problematika rozhraní sklovina – forma.



Obr.1. 3 Matematický model

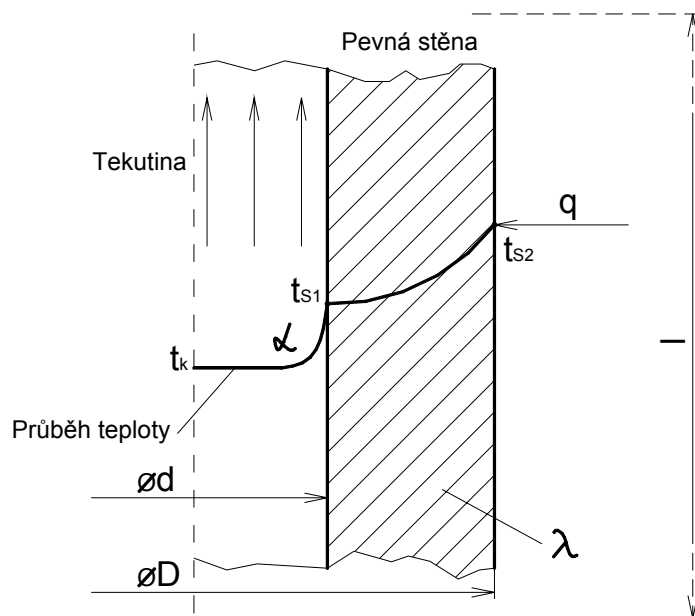


V kanálu o průměru  $d$  a délky  $l$  bude proudit kapalina vstupující ze spodní strany. Chladicí kapalina bude mít rychlost  $w$ , teplotu na vstupu  $t$ . Tvar vnitřního kanálu budu měnit osazením na menší průměr. Materiál v blízkosti styku kapaliny a formy budu také měnit. V dalších popsanych modelech je patrné jakými principy sdílení tepla probíhá a jak ho lze ovlivňovat.

### 1.4.1 Matematické modely

#### a) Základní matematický model

Základní matematický model se skládá z průchozího kruhového kanálu. Sdílení tepla se v tomto a ostatních modelech skládá z prostupu tepla části formy a přestupem tepla z formy do proudící kapaliny (obr.1.4). Chladicí tekutina přichází zespoda a vertikálním kruhovým kanálem proudí nahoru. Předpokládáme ustálené turbulentní proudění.



Obr.1. 4 Základní model sdílení tepla [7]

Tepelný tok  $\dot{Q}$  [W]

Tepelný tok na jednotku plochy  $\dot{q}$  [W . m<sup>-2</sup>]

Prostup tepla válcovou stěnou popisují následující vztahy

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{l} = \alpha \cdot \pi \cdot d (t_{s1} - t_k) \quad , \quad (1.14)$$

$$\dot{q} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot (t_{s2} - t_{s1})}{\ln \frac{D}{d}} \quad (1.15)$$

Po úpravě a sečtení rozdílů teplot dostaneme

$$t_{s2} - t_k = \frac{\dot{q}}{\pi} \left( \frac{1}{\alpha \cdot d} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{D}{d} \right) \quad (1.16)$$

$$\dot{q} = k \cdot \pi \cdot (t_{s2} - t_k) \quad (1.17)$$

$$\dot{Q} = \dot{q} \cdot l \quad (1.17)$$

kde  $k$  je součinitel prostupu tepla stěny,  $l/k$  je tepelný odpor stěny.

Po další úpravě a dosazení vztahu 1.16 do 1.17 dostaneme vztah pro výpočet součinitele prostupu tepla stěnou

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha \cdot d} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{D}{d}} \quad [\text{Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (1.18)$$

Pro určení  $\alpha$  se vychází z Nuseltova čísla pro předpokládané turbulentní proudění ( $Re > 10^4$ ). Daná rovnice vychází z experimentálních výsledků.

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \quad \rightarrow \quad \alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} \quad (1.19)$$

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot (Pr / Pr_s)^{0,25} \quad \text{pro turbulentní proudění} \quad (1.20)$$

$$Nu = 0,15 Re^{1/3} \cdot Pr^{0,43} \cdot Gr^{0,1} \cdot (Pr/Pr_s)^{0,25} \quad \text{pro laminární proudění} \quad (1.21)$$

Index  $s$  Prandtlova čísla značí teplotu stěny, bez indexu je  $Pr$  určeno pro střední teplotu kapaliny.

Další potřebné vztahy jsou

$$\text{Prandtlovo číslo } Pr = \frac{\nu}{a} \quad , \quad \text{kde } a - \text{teplotní vodivost } [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1.22)$$

$$\text{Reynoldsovo číslo } Re = \frac{w \cdot d}{\nu} \quad (1.23)$$

## Rozbor rovnic

Zásadním výsledkem výpočtu je rovnice 1.18, ta popisuje celý princip sdílení tepla. Nejdůležitější členy rovnice jsou  $\alpha$ ,  $\lambda$ , protože nejvíce ovlivňují přestup tepla. Při turbulentním proudění je přestup tepla výrazně vyšší než při laminárním. Srovnáním rovnic 1.19 a 1.20 je zřejmé, že Nuseltovo číslo je pro turbulentní proudění větší než při laminárním a tím se zvětší i  $\alpha$  a  $k$ .

Důležité je si uvědomit jaké parametry můžeme cíleně ovlivňovat a tím efektivně měnit sdílení tepla ve formě. Problém lze rozdělit do dvou oblastí, chladicí kapalina a těleso formy.

Na modelové stanici lze měnit velikost průtočného množství chladicí kapaliny tím, zásadně ovlivňovat výkon chlazení (odvedené teplo), ale velmi obtížně lze měnit lokálně teplotní pole kolem chladicího kanálu. Průtočné množství je v daném případě funkcí rychlosti proudění chladicí kapaliny  $w$ . Regulací průtočného množství lze ovlivňovat jen množství odvedeného tepla. Lokální ovlivnění teplotního pole musí proběhnout v tělese formy.

Součinitel přestupu tepla  $\alpha$  lze ovlivňovat rychlostí kapaliny, popřípadě tvarem chladicího kanálu. Kanálu může mít sérii zúžení a tím vytvářet v kapalině víry a místně urychlovat proud kapaliny. Zvětšením rychlosti chladicí kapaliny se zvětší i množství odvedeného tepla, což je model podrobněji popsán v dalším textu.

Dalším parametrem je tepelná vodivost kapaliny  $\lambda_k$ , kterou lze také výrazně ovlivňovat chladicí výkon soustavy, ale teplotní pole formy tímto parametrem nemůžeme cíleně ovlivnit.

Tepelná vodivost materiálu formy  $\lambda$  není stejná jako kapaliny. Teplosměnná plocha chladicího kanálu může mít různý tvar a materiál po své délce. Touto konstrukcí jsme schopni ovlivnit jednotlivá místa ve formě a klást tepelnému toku přesně definovaný odpor. Tím se teplosměnná plocha změní v rastr elementů, kterým je možné pevně přiřadit určité parametry.

## b) Model se složenou stěnou ze dvou materiálů

Do základního matematického modelu vstupuje další materiál pevné fáze (obr.1.5). Materiál má výrazně odlišnou teplotní vodivost než okolí chladicího kanálů. Tento materiál vložky má dokonalý styk s základním materiálem chladicího kanálu.

Sdílení tepla je popsáno těmito rovnicemi :

$$\dot{q} = \alpha \cdot \pi \cdot d (t_{s1} - t_k)$$

$$\dot{q} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda_1 (t_{s2} - t_{s1})}{\ln \frac{d_1}{d}}$$

$$\dot{q} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda_2 \cdot (t_{s3} - t_{s2})}{\ln \frac{D}{d_1}}$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha \cdot d} + \frac{1}{2 \lambda_1} \cdot \ln \frac{d_1}{d} + \frac{1}{2 \lambda_2} \cdot \ln \frac{D}{d_1}}$$

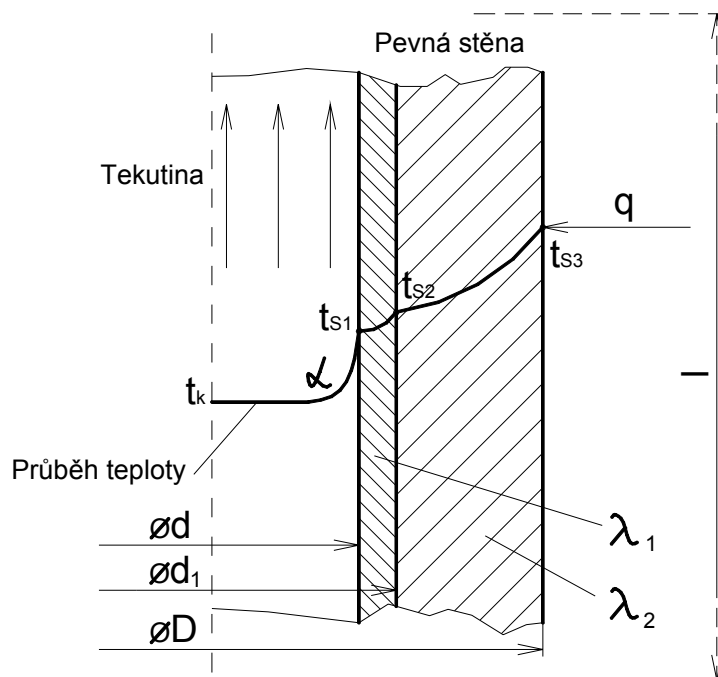
$$\dot{q} = k \cdot \pi (t_{s3} - t_k)$$

$$\dot{Q} = \dot{q} \cdot l$$

Další rovnice jsou stejné jako v předchozím modelu.

Zásadní změnou je tedy materiál s jinou teplotní vodivostí  $\lambda_1$  než základní materiál kanálu  $\lambda_2$ .

Tepelná vodivost  $\lambda$  je fyzikálním parametrem látky a charakterizuje její vedení tepla. Tepelnou vodivost definujeme jako množství tepla proteklé za jednotku času jednotkou plochy při teplotním spádu  $1^\circ\text{C}$  na jednotku délky. Z tabulek pro různé látky je patrné, že tepelná vodivost  $\lambda$  není určena neproměnnými hodnotami, ale že pro stejný materiál je odvislá od velkého počtu činitelů, jako jsou teplota, vlhkost, specifická váha, struktura aj.



**Obr.1. 5** Model se složenou stěnou [7]

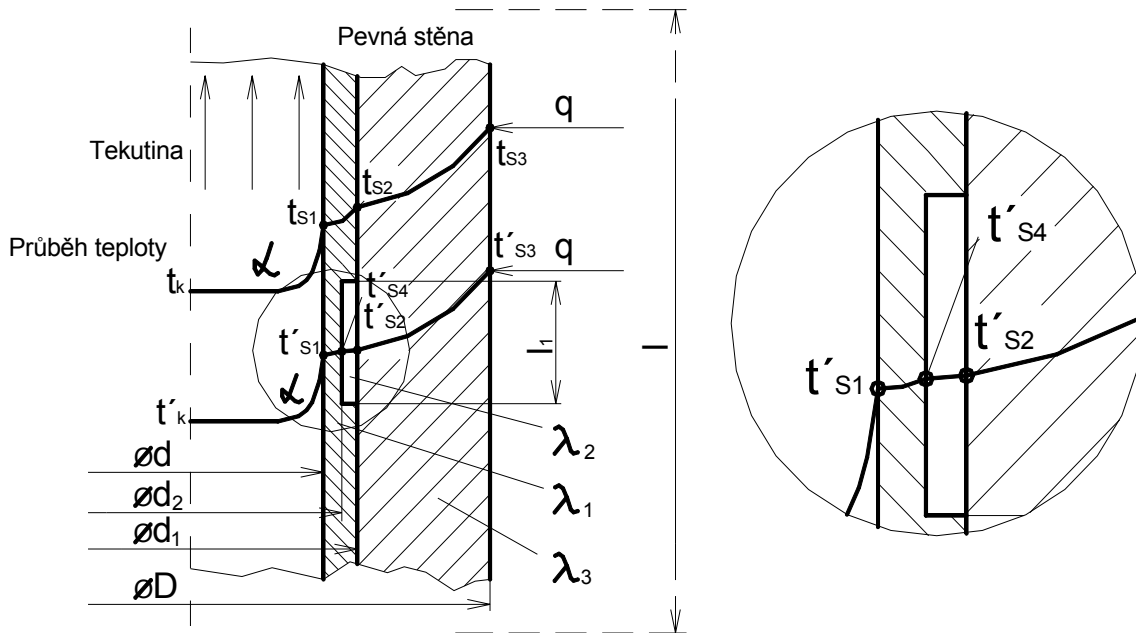
Důležité je vybrat takový materiál, který má odlišnou tepelnou vodivost a tím měnit tepelné toky. Pro příklad jsou ukázány tepelné vodivosti použitelných materiálů :

ocel	$\lambda = 73 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ,
stříbro	$\lambda = 418 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ,
měď	$\lambda = 395 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ,
mosaz	$\lambda = 106 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .

Pro výrobu forem se u nás v posledních letech používá litina se základní feritickou hmotou, odlévaná na kokilu, má označení BT 1, BT 3, BT 4 a BT 5. Na modelové stanici bude použit typ BT 3 s tepelnou vodivostí při  $400^\circ\text{C}$  od 36 do  $44 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .

### c) Model se vzduchovou mezerou

Do předchozího modelu vstupuje ještě další látka a tou je vzduch. Tepelná vodivost plynů je výrazně menší než u kovů. Vzduch má tepelnou vodivost  $\lambda = 0,02 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$ . Tento rozdíl je velmi podstatný. Vzduch je velmi dobrý izolant. Na obrázku 1.6 jsou naznačeny dvě křivky sdílení tepla. Horní křivka vede jen přes plný materiál, spodní vede přes vzduchovou kapsu. Vpravo je vyobrazen detail přestupu přes vzduchovou kapsu.



Obr. 1.6 Model se vzduchovou mezerou

Jednotlivé jednotkové tepelné toky jsou popsány rovnicemi (horní křivka)

$$\dot{q} = \alpha \cdot \pi \cdot d (t_{s1} - t_k) ,$$

$$\dot{q} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda_1 (t_{s2} - t_{s1})}{\ln \frac{d_1}{d}} ,$$

$$\dot{q} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda_3 \cdot (t_{s3} - t_{s2})}{\ln \frac{D}{d_1}} ,$$

$$k_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha \cdot d} + \frac{1}{2 \lambda_1} \cdot \ln \frac{d_1}{d} + \frac{1}{2 \lambda_3} \cdot \ln \frac{D}{d_1}} ,$$

$$\dot{q} = k_1 \cdot \pi (t_{s3} - t_k) .$$

Jednotlivé jednotkové tepelné toky jsou popsány rovnicemi (spodní křivka-vzduchová kapsa)

$$\begin{aligned} \dot{q}' &= \alpha \cdot \pi \cdot d (t'_{s1} - t'_k) , \\ \dot{q}' &= \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda_1 (t'_{s4} - t'_{s1})}{\ln \frac{d_2}{d}} , \\ \dot{q}' &= \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda_2 (t'_{s2} - t'_{s4})}{\ln \frac{d_1}{d_2}} , \\ \dot{q}' &= \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda_3 (t'_{s3} - t'_{s2})}{\ln \frac{D}{d_1}} , \\ k' &= \frac{1}{\frac{1}{\alpha \cdot d} + \frac{1}{2 \lambda_1} \cdot \ln \frac{d_2}{d} + \frac{1}{2 \lambda_2} \cdot \ln \frac{d_1}{d_2} + \frac{1}{2 \lambda_3} \cdot \ln \frac{D}{d_1}} , \\ \dot{q}' &= k' \cdot \pi (t'_{s3} - t'_k) . \end{aligned}$$

Tepelný tok je dán součtem jednotlivých jednotkových tepelných toků, které jsou v poměru daných délek  $l$  a  $l_1$ , tomu odpovídá tepelný tok

$$\dot{Q} = \dot{q} \cdot (l - l_1) + \dot{q}' \cdot l_1 .$$

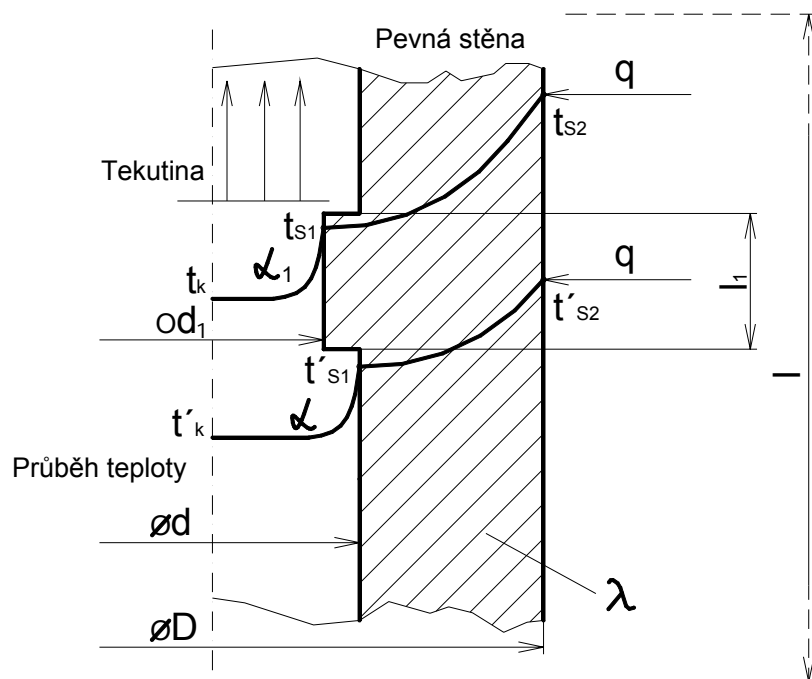
Při srovnání obou součinitelů přestupu tepla  $k$  a  $k'$  je patrné že tepelná vodivost  $\lambda_2$  bude výrazně ovlivňovat sdílení tepla. Rozdíl teplot  $t'_{s2}$  a  $t'_{s4}$  bude velký díky velké hodnotě  $\lambda_2$ . Tento model umožňuje poměrně jednoduše měnit tepelné toky při sdílení tepla v jednotlivých místech kanálu.

#### d) Model s proměnlivým průměrem kanálu

U posledního modelu je kanál v délce  $l_1$  náhle zúžen z průměru  $d$  na průměr  $d_1$  (obr.1.7). Toto zúžení vyvolá intenzivnější promíchání kapaliny (tvorba vírů) a v místě  $d_1$  je větší rychlost chladicí kapaliny.

Jednotlivé jednotkové tepelné toky jsou popsány rovnicemi (horní křivka)

$$\begin{aligned} \dot{q} &= \alpha_1 \cdot \pi \cdot d_1 (t_{s1} - t_k) , \\ \dot{q} &= \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda (t_{s2} - t_{s1})}{\ln \frac{D}{d_1}} , \\ k &= \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{D}{d_1}} . \end{aligned}$$



**Obr.1. 7** Model s proměnlivým průměrem kanálu

Jednotlivé jednotkové tepelné toky jsou popsány rovnicemi (dolní křivka)

$$\dot{q}' = \alpha \cdot \pi \cdot d (t'_{s1} - t'_k) ,$$

$$\dot{q}' = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot (t'_{s2} - t'_{s1})}{\ln \frac{D}{d}} ,$$

$$k' = \frac{1}{\frac{1}{\alpha \cdot d} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{D}{d}} .$$

Tepelný tok je součtem jednotlivých jednotkových tepelných toků, které jsou v poměru daných délek  $l$  a  $l_1$ . Tepelný tok je tedy dán vztahem

$$\dot{Q} = \dot{q} \cdot l_1 + \dot{q}' \cdot (l - l_1) .$$

Při srovnání obou součinitelů přestupu tepla  $k$  a  $k'$  je patrné, že jediná změna je v poměru průměrů v kanálu. Součinitel  $\alpha$  se musí pro každou křivku spočítat zvlášť, jelikož se mění rychlost (změna  $Re \rightarrow Nu$ ). Největší problém bude činit stanovení  $\alpha$  v zúženém místě kanálu, protože tam bude docházet k tvorbě vírů. To samé bude následovat za zúžením. V místě zúžení sice vzroste rychlost, ale současně se zmenší teplosměnná plocha. O dalším uplatnění výše popsaných matematických modelů je pojednáno v kapitole 2.

## 1.4.2 Fyzikální modelování

Fyzikální modelování je representováno laboratorním měřením na modelové stanici pro kapalinové chlazení sklářských forem. Fyzikální modelování bude opěrným bodem pro numerickou simulaci založenou na principu metody konečných prvků (MKP). Z experimentálně zjištěných dat lze stanovit okrajové podmínky, které se zpracují pomocí MKP a výsledkem bude obraz teplotního pole ve sklářské formě.

Na modelové stanici se budou měřit základní parametry chladicího obvodu a formy. Mezi ně patří objemový průtok chladicí kapaliny, její teplota na vstupu a výstupu z formy. Tyto hodnoty představují základní parametry pro určení odvedeného tepla. Teplota se měří pomocí termočlánků a objemový průtok pomocí průtokoměru. Rozložení teplotního pole bude mapováno systémem několika termočlánků instalovaných do tělesa formy. Teplota je měřena, těsně pod povrchem pracovní dutiny formy, uprostřed formy, na vnějším plášti formy. Během laboratorních pokusů se zcela jistě bude rozmístění a počet článků měnit v závislosti na výsledcích měření a pozici axiálních chladících otvorů. Pozice kanálů se bude měnit podle získaných výsledků předchozích měření.

Při jednotlivých experimentálních etapách se bude měnit rozmístění chladících kanálů, kanálů pro ovlivnění sdílení tepla. Další změny budou v objemovém průtoku, teplotě chladicí kapaliny, obsahu kanálu pro ovlivňování sdílení tepla. Výkon zdroje bude na začátku nastaven tak, aby splňoval zadané parametry a v dalších experimentálních etapách se již nebude měnit.

### Očekávané výsledky měření

Povrchová teplota pracovní části formy by měla být  $t_p = 560 \text{ }^\circ\text{C}$ . Tato teplota se na styčném povrchu skla a formy ustaví prakticky ihned po styku. Po otevření formy, povrchová teplota klesá na teplotu  $t_f$  a celý cyklus se opakuje. V praxi se ukázalo, že existuje závislost mezi  $t_p$  a  $t_f$ . Je důležité, aby rozdíl těchto teplot ( $\Delta t = t_p - t_f$ ) nebyl větší než  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ .

U válcových lahvářských forem byl zjištěn střední gradient teploty  $4,5 - 5,5 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{mm}^{-1}$ . Vnější povrch formy neovlivňuje přímo tvarování skla a proto se pohybuje ve značných mezích  $150 - 430 \text{ }^\circ\text{C}$ .

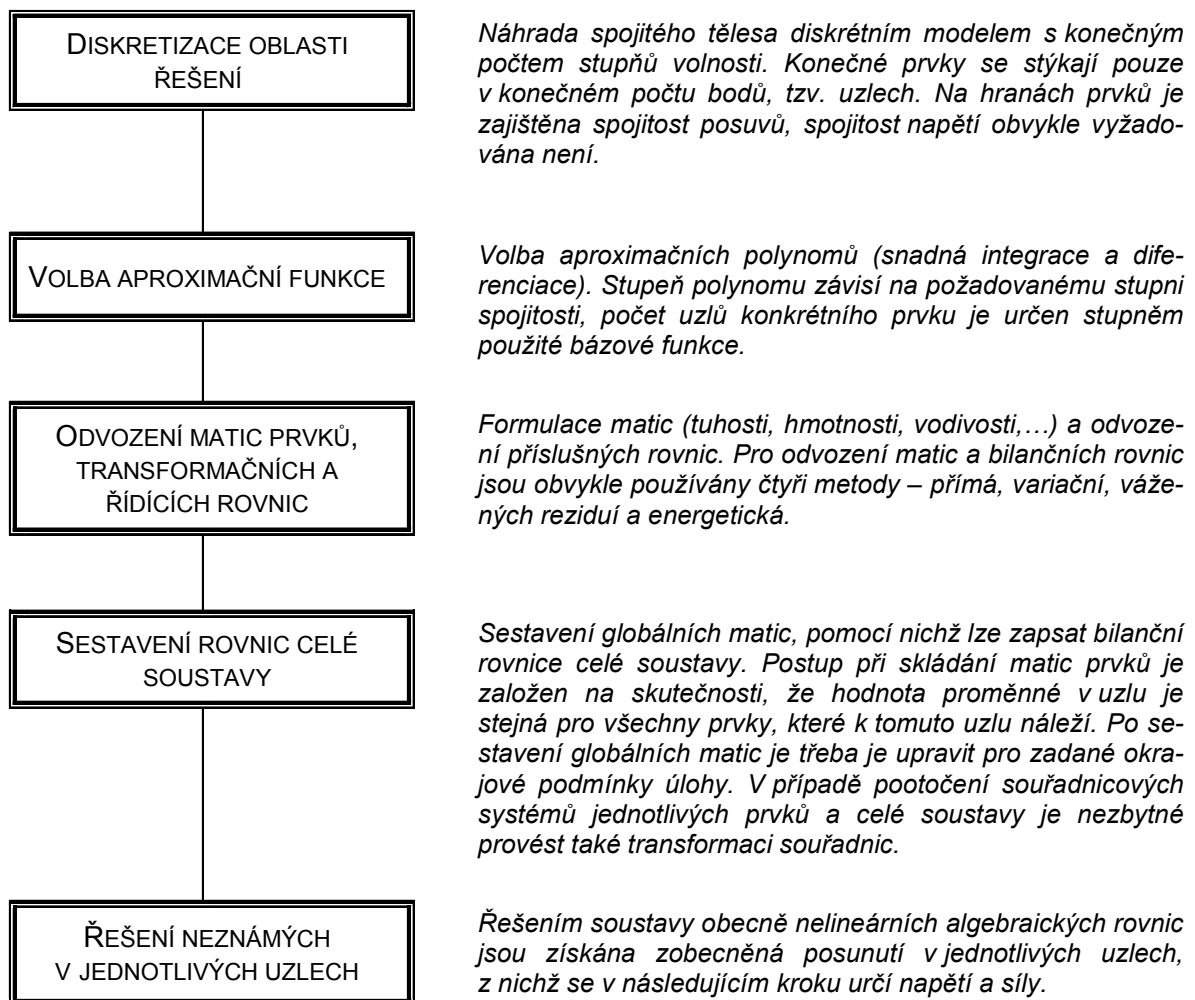
Odvedené teplo v konečné formě pro láhev 0,5 l by se mělo pohybovat kolem hodnoty  $q = 80 \text{ kJ}$ .



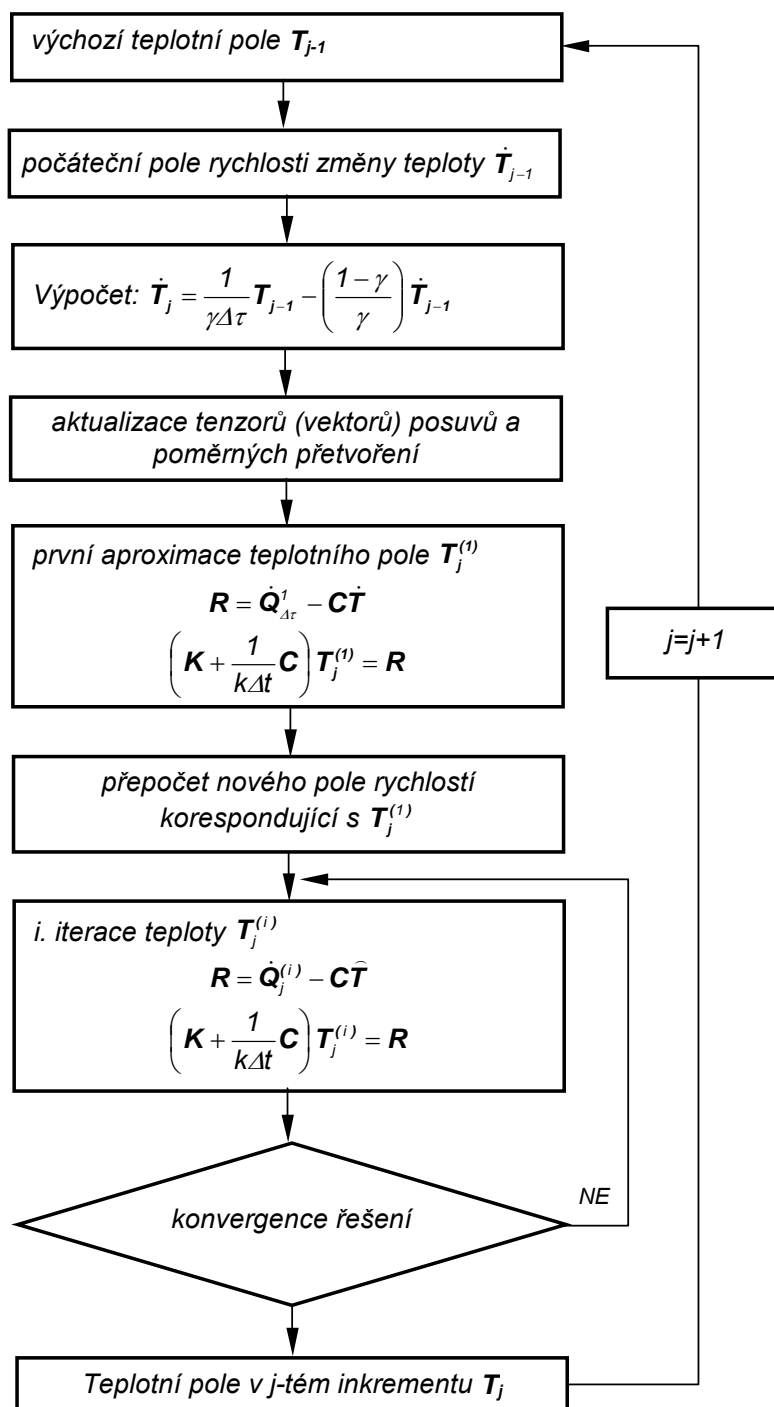
## Modelování pomocí MKP

Výpočetní postup MKP je založen na pevně dané posloupnosti jednotlivých kroků (obr.1. 8, obr.1. 9). Pro řešení úloh mechaniky kontinua je obvykle využívána deformační alternativa MKP, u které jsou primárně řešeny posuvy (resp. zobecněné posuvy) v uzlových bodech až v následující fázi tenzory (resp. vektory) přetvoření a napětí.

Efektivita metody a kvalita řešení v konkrétním případě závisí také na velikosti výpočetní sítě a typu použitých prvků. Důležitou otázkou je problém konvergence a přesnosti řešení. Ke zvýšení přesnosti řešení, resp. snížení chyby aproximace vedou dva postupy, a to podle použité technologie buď zjemnění výpočetní sítě při zachování stupně tvarové funkce (h-metoda využívající tvarových funkcí nižších řádů), nebo zvýšení stupně tvarové funkce při zachování topologických a geometrických charakteristik výpočetní sítě (p-metoda).



Obr.1. 8 Výpočetní postup MKP [8]



**Obr.1. 9** Výpočetní postup MKP [8]

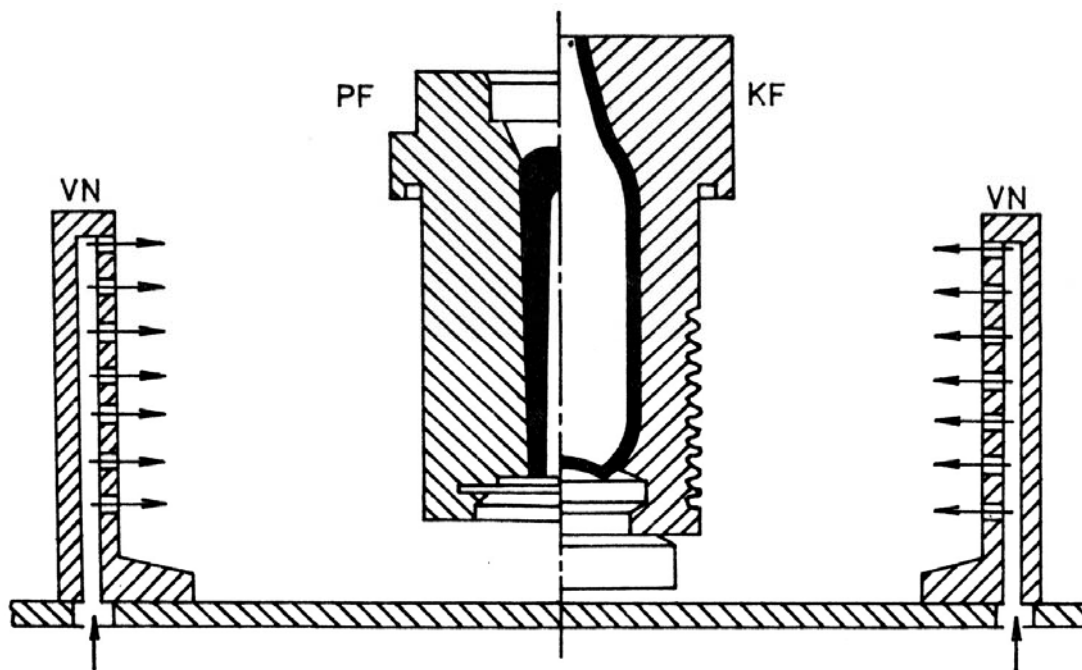
Okrajové podmínky vyplývají přímo ze zadání konkrétního problému (časové závislosti posuvu razníku, uložení jednotlivých komponentů tvarovacích nástrojů, kontaktní vazby,...). Definice okrajových podmínek pro konkretizaci rovnic, tj. časových průběhů přestupu tepla ze skloviny do tvarovacích nástrojů, z tvarovacích nástrojů či tvarované skloviny do chladicího média nebo přestup tepla ze sklářské formy do rámu stroje je vzhledem k omezené znalosti parametrů značně obtížná.

## 2. Rozbor současného stavu chlazení forem

V dnešní době se převážně používá k chlazení forem vzduch, jen v ojedinělých případech voda. Nejpoužívanější metoda je axiální chlazení forem vzduchem (verti-flow). Na starších strojích se ještě používá systém radiálního chlazení vzduchem. Vodní oběhové chlazení je běžné u razníků automatických lisů a u licích válců na výrobu plochého skla. Níže budou jednotlivé typy chlazení popsány podrobněji.

### 2.1 Radiální chlazení

Radiální způsob chlazení představuje ofukování formy pomocí vzduchových nástavců, tzv. komínů (obr.2. 1). Forma se pohybuje v nepřetržitém proudu chladícího vzduchu. Předností je jednoduchost, snadné seřízení chladícího procesu, operativnost a spolehlivost. Systém je však značně nevhodný důsledkem vysoké spotřeby elektrické energie na zajištění pohonu ventilátoru. Nezanedbatelná je i vysoká hlučnost, která je způsobena prouděním chladícího vzduchu.



**Obr.2. 1** Schéma radiálního chlazení. (VN – vzduchové nástavce na šěrbinový rozvod chladícího vzduchu z rámu IS stroje) [9]

Snahy k odstranění energetické náročnosti a hlučnosti vedli k různým konstrukčním úpravám formy tak i přívodu. Optimální cestou ke zvýšení účinnosti chlazení vzduchem bylo využití proudu chladícího vzduchu vhodným vzduchotechnickým rozvodem. Vzduch proudí na formu v tangenciálním směru, a tím je dosažena větší efektivnost. Proudění se uskutečňuje

pomocí usměrňovacích plechů (deflektorů), které obalují vnější plášť formy. Ještě účinnějšího odvodu tepla z formy se dosahovalo pomocí chladících žeber umístěných na vnějším plášti formy. Chladící povrch se touto konstrukční úpravou mnohonásobně zvětšil. Nevýhodou těchto konstrukčních úprav bylo zvýšení náročnosti výroby forem díky žebrování, zvětšil se i obestavěný prostor díky plášti a novému způsobu přívodu vzduchu. Neodstranila se hlučnost a tepelné zatížení okolí stroje.

## 2.2 Axiální chlazení

Axiální chlazení bývá označováno také vertikální chlazení v angličtině se používá označení *verti – flow*. V současné době je u nás nejvíce rozšířené. Systém axiálního chlazení propracovali firmy Emhart a Heye.

Chlazení je uskutečněno pomocí chladících kanálů, které jsou axiálně vrtány v těle formy a to buď v jedné nebo více řadách (Obr.2. 2). Kanály mohou mít po celé délce proměnlivý průřez, který v úsecích, kde není nutný tak velký chladící účinek můžeme osadit čímž je možné v tepelně exponovaných místech účinek měnit.

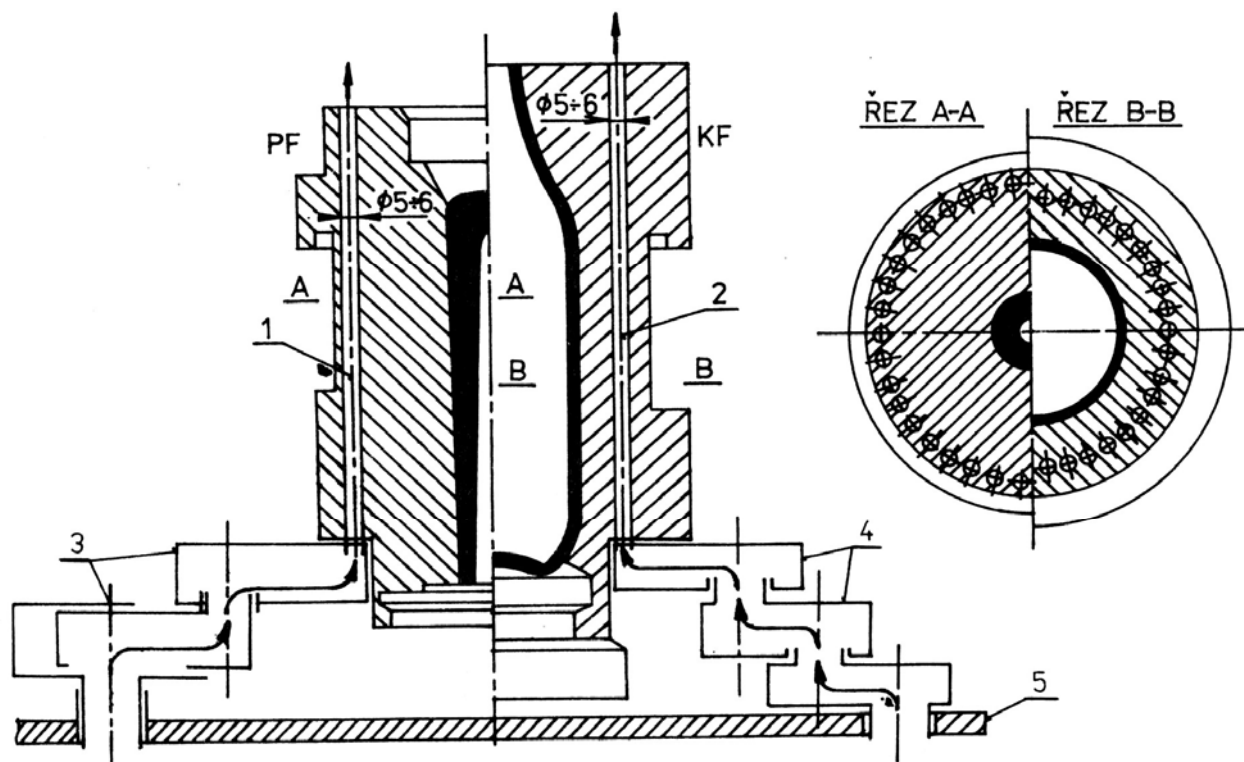
V přední formě je nízkotlaký vzduch veden od tlakového zdroje šachtami k uzavíracímu ventilu, který uzavírá průchod v závislosti na tom jaké množství právě je potřeba k chlazení. Vzduch dále prochází suvnými trubkami k vzduchové komoře a odtud dále do axiálního vývrtu ve formě. Chladící vzduch, který prochází v axiálně vrtaném chladícím otvoru odebírá teplo z těla formy. Vzduch proudí nepřetržitě po celou dobu pracovního cyklu.

V konečné formě je chlazení v provozu pouze v době pobytu láhve ve formě. V době kdy láhev je mimo konečnou formu k chlazení nedochází. V dnešní době se již používá takový přívod který umožňuje chlazení i při otevření konečné formy.

V uvedeném provedení soustavy forem přechází vzduch na vstup jednotlivých chladících průchodů s přibližně stejným tlakem, který je pro konečnou formu zajištěn přetlakovou komorou a pro přední formu regulované ventilem. Přímá dráha proudění chladícího vzduchu snižuje na minimum nerovnoměrnost proud v chladících vývrtech. Díky tomu lze předpovídat chladící účinek jednotlivých kanálů a rozložení teplotních polí kolem kanálů, může být použito při výpočtu.

Při výrobě klasické pивní lahve je v každém tvarovacím cyklu odvedeno v konečné formě přibližně 80 kJ. Z toho 70-80% je odvedeno chladícími kanály. U forem vyráběných firmou Sklostroj je v jedné řadě 32 otvorů Ø 10 mm a druhé řadě bližší k pracovnímu povrchu 24 otvorů Ø 8 mm, dále je tam umístěna ještě série šesti otvorů Ø 8 mm, které jsou nejbližší pracovnímu povrchu.

System axiálního chlazení umožňuje přibližně 15% zvýšení produktivity práce, snížení spotřeby energie na výrobu chladicího vzduchu o 50% a snížení hlučnosti oproti radiálnímu chlazení.



**Obr.2. 2** Schéma axiálního chlazení sklářské formy. (1,2 – soustava chladicích otvorů (vývrtů), 3,4 – pohyblivý přívod chladicího vzduchu, 5 – rám sekce stroje IS) [9]

### 2.3 Ostatní způsoby chlazení

Další uvedené způsoby chlazení jsou používány jen v malém rozsahu. Ani jeden ze způsobů zatím nedokázal předčít výhody axiálního chlazení.

Vodní oběhové chlazení je běžné u razníků automatických lisů a u licích válců na výrobu plochého skla. Vodní chlazení je tiché, energeticky nenáročné a podstatně intenzivnější než chlazení vzduchem. Forma však musí být přesně konstruována, aby ve všech místech chladicí dutiny měla stejnou teplotu, a to nižší než 100 °C.

Velmi ekonomické je vypařovací chlazení prováděné kapáním přesně odměřeného množství vody na vnější povrch formy. K chlazení se využívá výparného tepla vody, takže její spotřeba je nepatrná. Chlazení je nerovnoměrné, vyžaduje dobře konstruovanou formu. Výsledky praktických zkoušek nebyly přesvědčivé. Rovnoměrnost vypařovacího chlazení lze zvýšit tím, že se voda nechá nasáknout do porézního materiálu na vnějším povrchu formy, nebo tím, že se forma chladí vodní mlhou.

Chlazení vodní mlhou lze provádět na vnějším povrchu formy i na pracovním povrchu. Spotřeba činí kolem 1l vody za hodinu na formu. Rozprášené kapky mají stejnou velikost – asi 18  $\mu\text{m}$ . Tato metoda se osvědčila při chlazení razníků. Přívod vzduchu s vodní mlhou je regulován automatickým ventilem podle teploty razníku.

## 2.4 Kapalinové chlazení

Princip kapalinového chlazení dnes ještě žádný z výrobců neuplatnil v sériové výrobě. U kapalinového chlazení je chladicí vzduch zaměněn za chladicí kapalinu. K této náhradě vzduchového chlazení kapalinovým vede mnoho důvodů :

- 1) Pracoviště obsluhy sekčního stroje (dále jen IS stroje) s ohledem na konstrukci stroje, sklářských forem a řešení systému chlazení sklářských forem ventilátorovým vzduchem, jsou evidována jako pracoviště III.kategorie – riziková. S tím souvisí řada obtíží , organizační opatření, náklady na snížení dopadu pracovních podmínek na zdraví pracovníků. S tím souvisí další skutečnost, že neustále se zvyšující nároky na výkon a znalost obsluhy IS stroje a technologie výroby obalového skla, vyžaduje zaměstnávat pracovníky s vyšším vzděláním, kteří až na výjimky neakceptují být dlouhodobě a každodenně exponováni agresivními podmínkami (teplo, hluk). V letním období přesahují teploty v okolí strojů 60°C. Obsluha navíc při provádění změn nastavení a údržby, je vystavena sálavému teplu od horkých výrobků.
- 2) Druhou problematikou je hlučnost pracujícího stroje, kde hlavním zdrojem je vzduchové chlazení forem. Hlučnost dosahuje ve vzdálenosti 1 m od stroje až 103 dB.

Tyto výše popsané problémy by mělo kapalinové chlazení efektivně odstranit.

Řešení je směřováno do uzavřeného chladicího okruhu přední formy (PF) a konečné formy (KF) stroje. Chlazení odstávky a dopravníku stroje zůstává vzduchové. S ohledem na účinnost kapalinového chlazení lze uvažovat o eliminaci odstávky a přímý přenos odnímačem vychlazeného výrobku pod bod měknutí ( $T_{\log\eta=7}$  -730 až 760°C podle typu skla). Přívod do forem, stejně jako odvod by byl realizován prostřednictvím na stroji vhodně umístěných distribučních kanálů. Vlastní přívod a odvod chladicí kapaliny do forem se předpokládá realizovat novou konstrukcí držáků forem, systémem těsněných průchoďů. Provedení držáků a těsnění, s ohledem na pracovní teploty, se jeví jako klíčové pro úspěšné sériové nasazení.

Regulace průtoků chladicí kapaliny je definována výkonem oběhového čerpadla s možností individuální regulace do jednotlivé formy/stanice. Termočlánek je měřena vstupní a výstupní teplota každé formy, měření a hodnoty jsou ukládány do historie nastavení výrobku. Z výstupního distribučního kanálu je chladicí kapalina odvedena mimo stroj do

chladícího agregátu, kde je přes deskový výměník ochlazována. Chladicí výkon je definován proměnlivými otáčkami ventilátoru.

### **3. Alternativní studie nových principů chlazení**

Na začátku kapitoly je nejprve předložen rozbořem dosud známých patentů týkajících se kapalinového chlazení sklářských forem. Patentová dokumentace byla zapůjčena firmou Sklostroj, dokumentace je v anglickém, francouzském jazyce a část v českém jazyce. Dále jsou v kapitole 3.2 popsány jednotlivá omezení vyplývající z patentového rozboru předchozí kapitoly (3.1). V závěru kapitoly je popsáno řešení flexibilního přívodu chladicí kapaliny do tělesa sklářské formy. Jsou zde zpracována jednotlivá konstrukční řešení a popsány jejich vlastnosti.

#### **3.1 Rozbor patentově chráněných principů kapalinového chlazení**

V následující kapitole jsou rozebrány základní důležité aspekty patentově chráněných řešení kapalinového chlazení forem na doložených obrázcích konstrukčního řešení aplikací.

##### **Owens 2000-3410 z 18.9.2000**

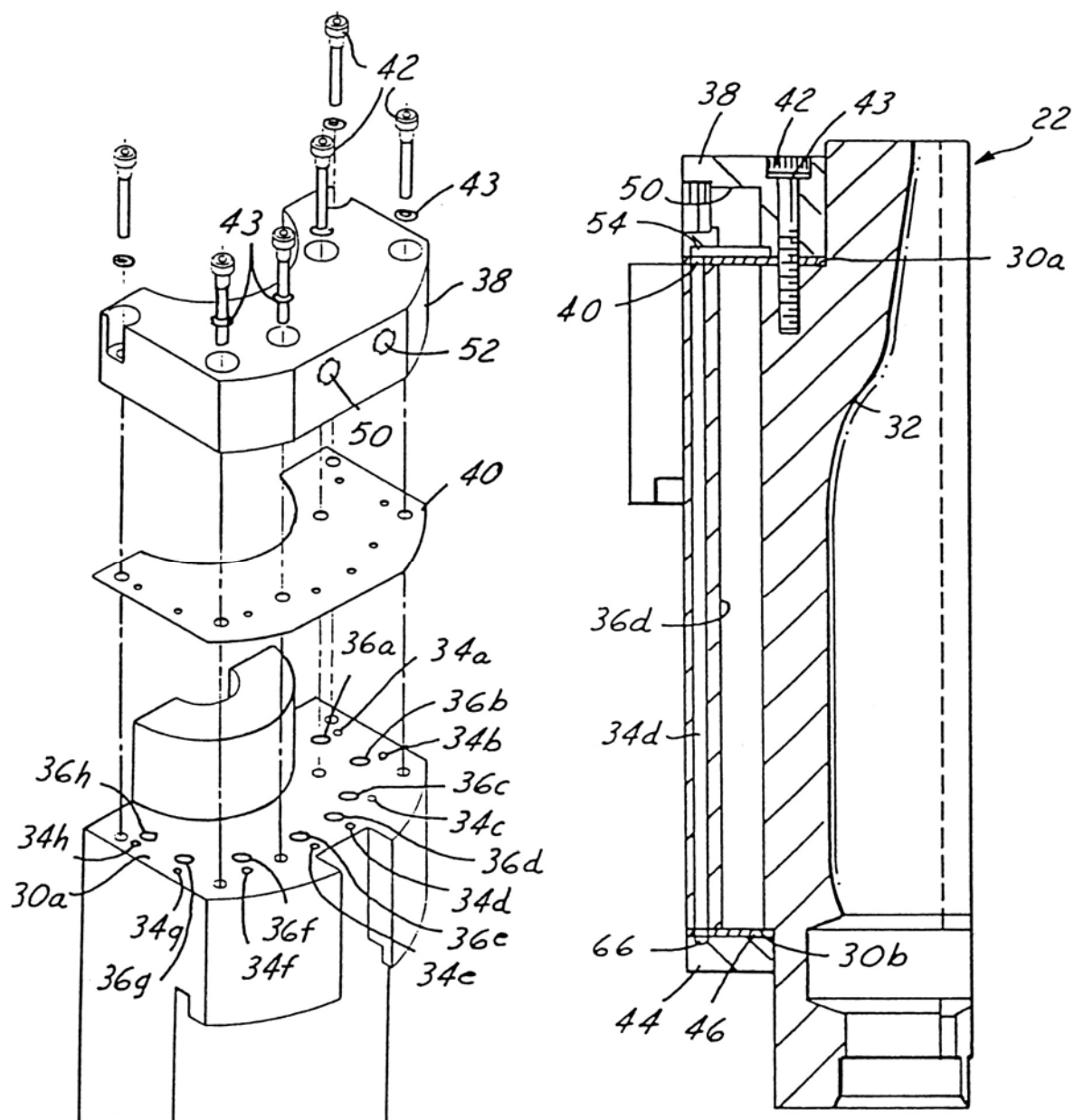
Obsahem vynálezu je řešení konstrukce sklářské formy, u které je dosaženo zlepšené stability regulace teploty na tvarovací ploše formy. Dále je zde popsáno řešení chlazení formy, kterým je možno nastavit teplotu tvarovací plochy a dynamicky ji regulovat v průběhu celého procesu výroby skleněného zboží. Regulace teploty pracovního povrchu se provádí po obvodu formy a také v axiálním směru. V závěru patentu jsou uvedeny nové materiály, které zvyšují životnost celého systému.

Patent popisuje těleso formy (poz.30a) ve kterém jsou vyvrtány dvě série otvorů (obr.3. 1). Jedna série otvorů plní funkci vedení chladicí kapaliny (poz.34a – 34h) a druhá série otvorů je určena na modifikaci přestupu tepla (poz.36a – 36h).

Axiální otvory pro modifikaci přestupu tepla jsou průchozí přes celou délku formy, některé jsou slepé o určité délce, některé průchozí, ale z obou stran zazátkované, některé vyplněné vodivou látkou, některé obsahují závitovou zátku v určité poloze.

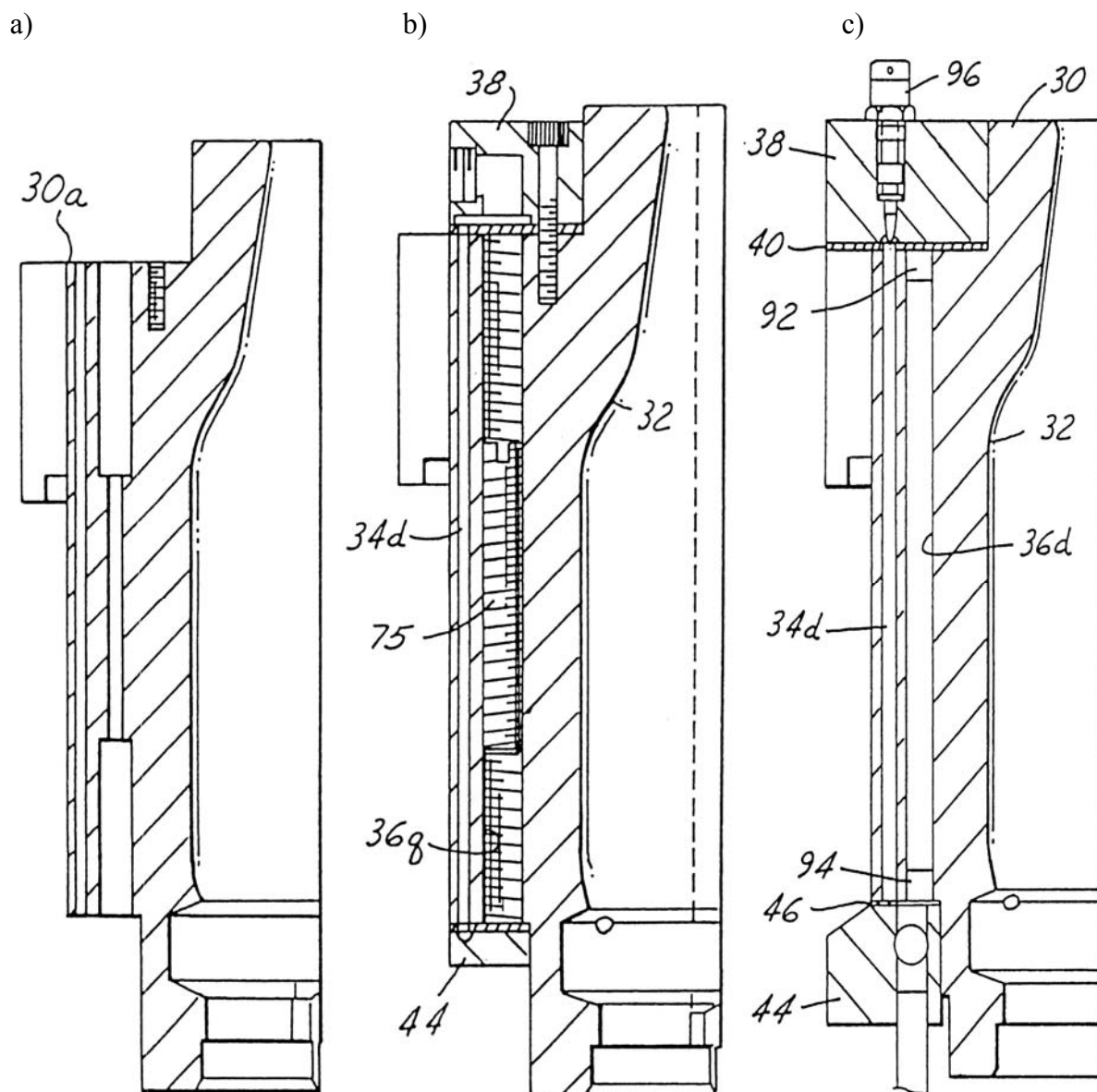
Axiální otvory pro chladicí kapalinu jsou umístěné od osy formy za otvory popsanými v předchozím odstavci. Těleso formy nese koncové desky pro regulování průtoku chladiva ve skupině průtokových kanálů pro chladicí látku v tělese formy. Jedna z koncových desek obsahuje vstup chladicí kapaliny a výstup chladicí kapaliny a kanálky pro usměrňování kapaliny do jednotlivých průtokových kanálů chladiva. Druhá z koncových desek obsahuje





**Obr.3. 1** Pohled na celkovou sestavu formy. ( 30a - těleso formy, 32 - pracovní část formy, 34a-34h - kanály pro chladicí vodu, 36a – 34h – kanály pro ovlivnění přestupu tepla, 38 – horní koncová deska, 40 – ploché těsnění, 50 – vstupní otvor pro chladicí kapalinu, 52 – výstupní otvor pro chladicí kapalinu ) [10]

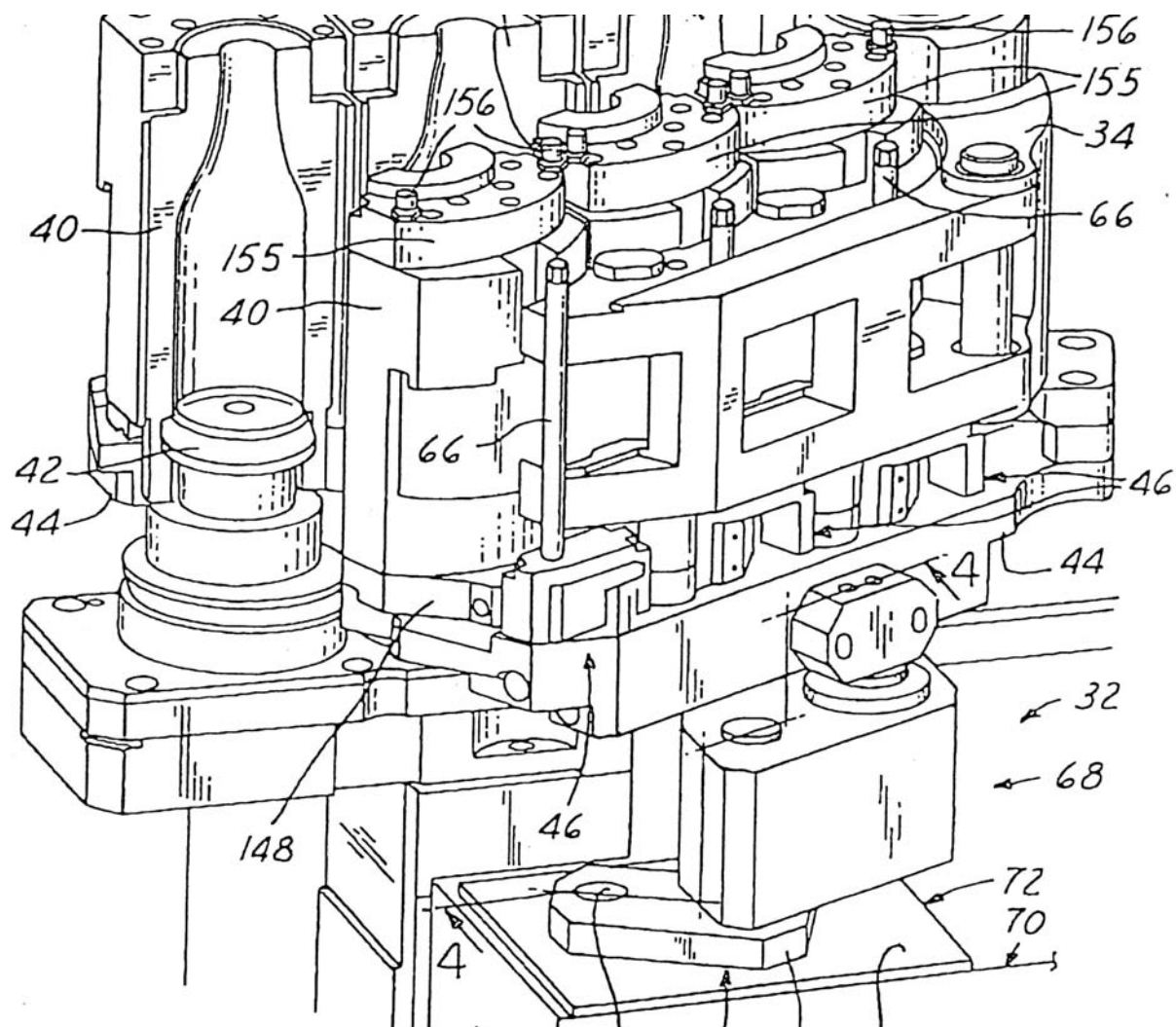
kanálky pro převádění kapaliny z konce jednoho průtokového kanálu do konce sousedního průtokového kanálu. Počet průchodů chladicí kapaliny je možno měnit tvarem koncové desky. Množství odvedeného tepla z formy se reguluje rychlostí proudění chladicí kapaliny, její teplotou a případně i koncentrací přísady. Přísady se pomocí vhodného přístroje přidávají do chladicí kapaliny (vody). Jejich množství je řízeno regulátorem. Přísady jsou označeny jako kapaliny sloužící pro přenos tepla. V patentu jsou uvedeny tyto příklady kapalin: propylenglykol, kapaliny na bázi křemíku, syntetické organické kapaliny a inhibované kapaliny na bázi glykolu.



**Obr.3. 2 Přehled konstrukčních řešení kanálů** ( a – modifikace přestupu tepla pomocí zúžení průřezu kanálu, b - zašroubování kovových vložek, c - popisuje škrťací ventil (poz.96), kterým je regulován chladicí výkon soustavy v jednotlivých kanálech ) [10]

Podle dalšího výhodného provedení vynálezu, je těleso formy vytvořené z austenitické tažné litiny se zvýšeným obsahem niklu. Tento typ tažné litiny je zejména tvořen typem D niklové tažné litiny podle normy ASTM-A439-94, který je však modifikován, aby měl zvýšený obsah křemíku a molybdenu. Zvýšený obsah křemíku snižuje tepelnou vodivost materiálu formy. Zvýšený obsah molybdenu zlepšuje odolnost materiálu proti vzniku trhlin po větším počtu teplotních cyklů. Zvýšený obsah niklu v materiálech s niklovou odolností zlepšuje vlastnosti materiálu, určující uvolňování tvarovacího povrchu formy od

vytvarovaného skla. Zvýšený obsah niklu také podporuje odolnost proti otěru, usnadňuje obrábění a renovaci forem, zajišťuje stabilnější mikrostrukturu než šedá litina.



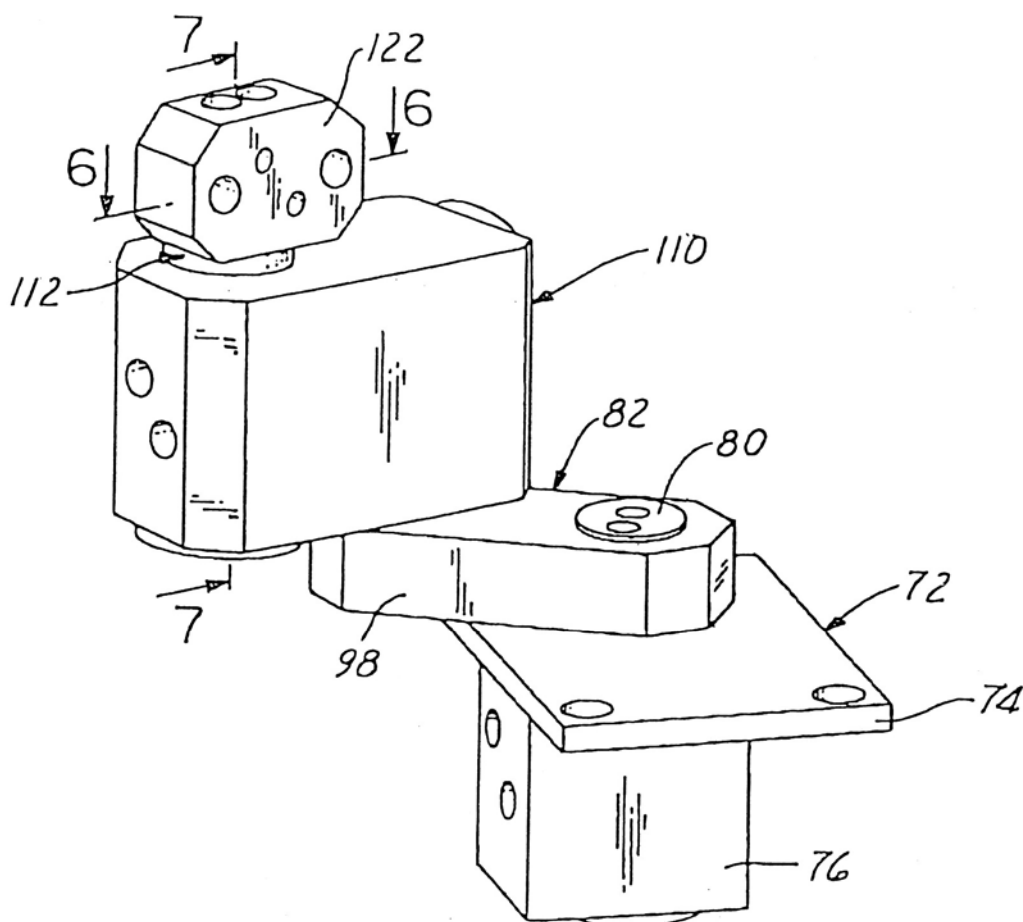
**Obr.3. 3** Pohled na konstrukci otočného mechanismu přívodu chladicí kapaliny (40 – formovací díl (polovina formy), 44 – chladicí potrubí, 68 – otočná hřídelová jednotka ) [10]

### Owens 2001-672 z 21.2.2001

Popisuje konstrukci napojení formy na chladicí okruhy. Chladicí kapalina se usměřuje do poloviny formy tvarovacího stroje uzavřenou natáčecí spojovací konstrukcí, která neobsahuje pružné hadice a podobné prvky (obr.3. 3).

Potrubí pro vedení chladiva je neseno každým natáčecím ramenem a je propojeno se vstupními a výstupními otvory pro chladicí látku na spodním konci formovacích dílů. Potrubí je spojeno plovoucím hřídelovým těsněním, otočnou spojovací jednotkou (obr.3. 4) a

klikovým ramenem se zdrojem chladiva a odpadem do nádrže příslušné sekce stroje. Každé otočné spojení, to znamená spojení mezi nádrží a klikovým ramenem, mezi klikovým ramenem a otočnou spojovací jednotkou a mezi jednotkou a plovoucím hřídelovým těsněním, obsahuje dvousměrnou otočnou jednotku pro přívod kapalného chladiva do potrubí a formovacích dílů a vrácení kapalného chladiva z potrubí a formovacích dílů.

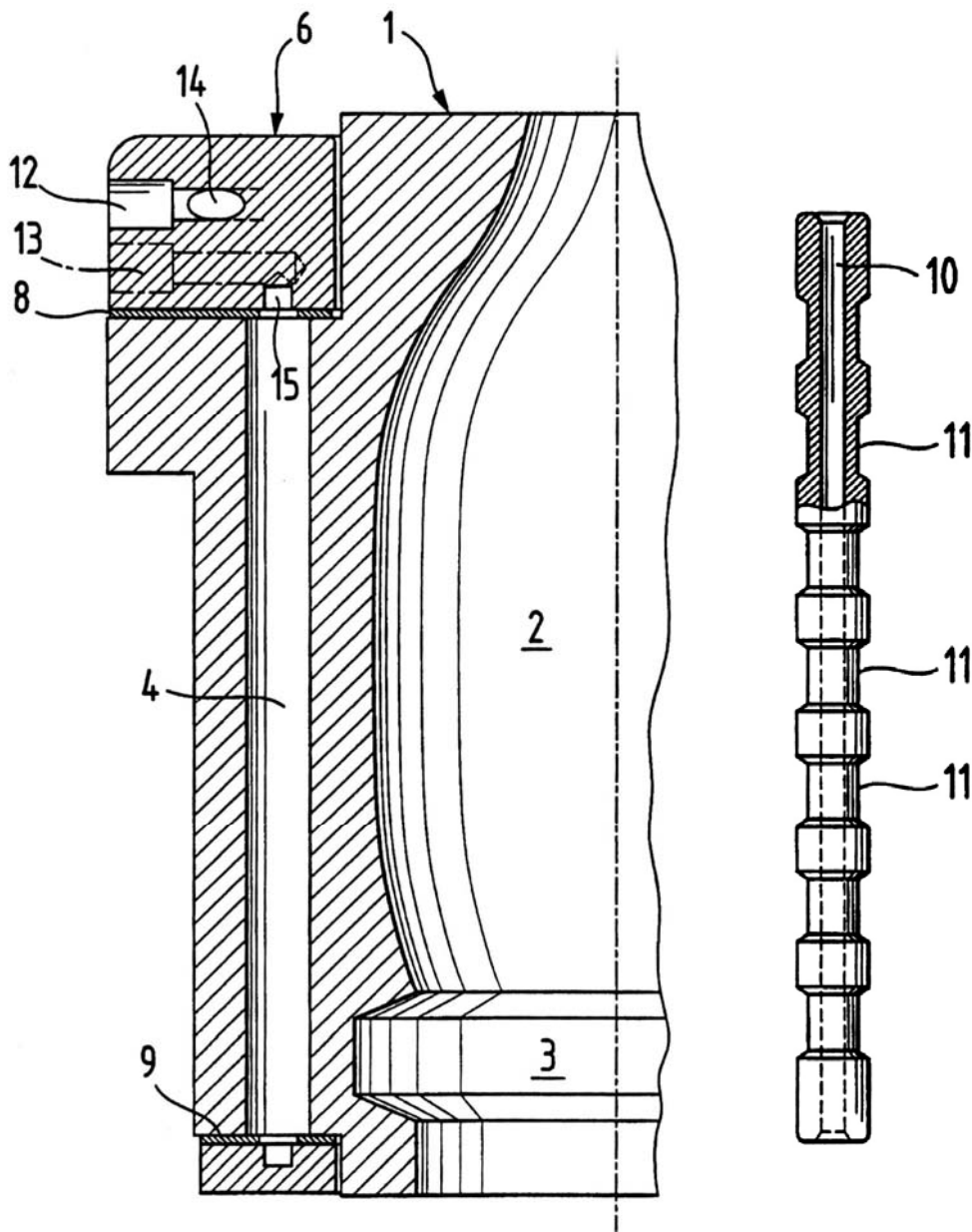


**Obr. 3. 4** Pohled na otočnou jednotku (68 – otočná spojovací jednotka, 72 – skříň, 74 – horní panel, 76 – blok, 80 – spodní klikový hřídel, 98 – kliková spojovací tyč, 110 – hřídelový spojovací blok, 112 – spojovací hřídel, 122 – hlava) [10]

Dynamická plovoucí těsnění, tvořena o-kroužky a umístěna mezi chladicí potrubí a formovací díly, vyrovnávají relativní pohyb mezi těmito částmi při otevírání a uzavírání formovacích dílů.

### Saint-Gobain C03B 9/38 z 9.7.1998

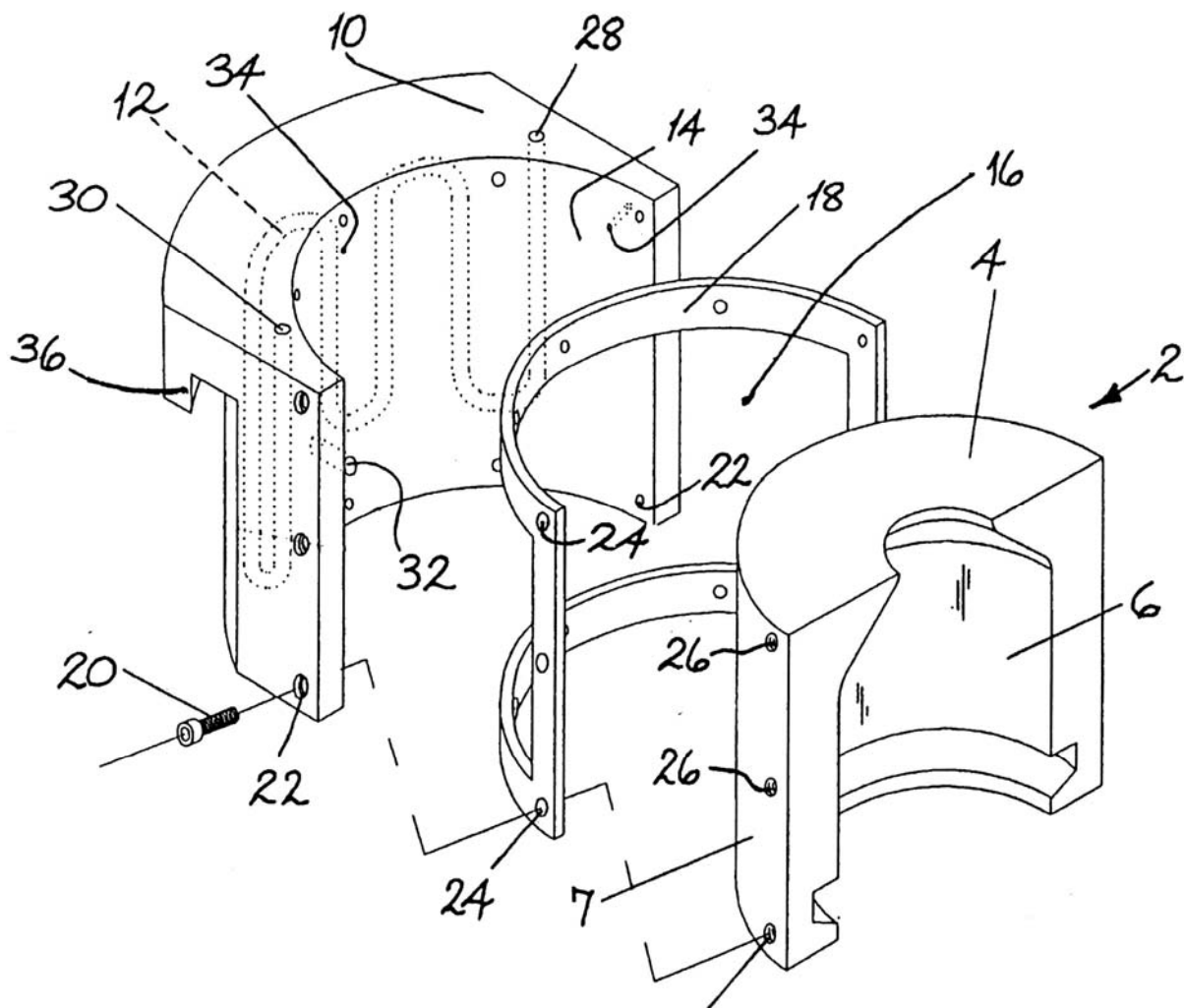
Zde je modifikace přestupu tepla z formy do vody řešeno chladícími tyčemi instalovanými v chladících axiálních otvorech formy (obr.3. 5). Tyče mají v ose otvor pro chladící kapalinu a na vnějším povrchu mají řadu osazení na menší průměr – chladící tyč se díky tomu stýká s formou v axiálním chladícím otvoru jen částmi svého povrchu.



**Obr.3. 5** Pohled na konstrukci axiální chladicí kanál. ( Vpravo je vyobrazena chladicí tyč.  
 1 – těleso formy, 4 – chladicí axiální otvor do kterého je zasunuta chladicí tyč (poz.5), 12-13 – vstupní a výstupní otvor pro chladicí kapalinu ) [10]

**Emhart 9616218.5 z 1.8.1996**

Modifikace přestupu tepla je řešena vzduchovou mezerou přes většinu plochy formy (obr.3. 6). Forma se skládá ze 3 dílců – vnitřní část s tvarovací dutinou, distanční klec pro zajištění vzduchové mezery a vnější chladicí část s chladicími kanály pro kapalinu – vše sešroubované v jeden celek pak vytvoří polovinu formy. Vzduchovou mezeru je možno podle patentu využít k řízení chladicího výkonu kapalinového chlazení (řídí se poměrem směsi vzduchu a např. helia vháněné do vzduchové mezery).



**Obr.3. 6** Pohled na konstrukci formy ( 4,10 – těleso formy, 6 – pracovní dutina formy, 18 – distanční klec, 30 – chladicí kanál ) [10]

### 3.2 Nový způsob chlazení

Na začátku je potřeba stanovit konstrukční omezení důsledkem patentů. Po výše uvedeném patentovém rozboru je zřejmé, že jsou téměř všechny principy ovlivnění tepla už patentově chráněny. Největší omezení pramení z patentu **Owens 2000-3410**, zde jsou popsány veškeré případy vkládání elementů různých tvarů, materiálů a způsobu montáže (obr.3. 2). V patentu je také uveden sytký materiál ve formě písku. Další tvary vkládaného elementu jsou chráněny patentem **Saint-Gobain C03B 9/38** (obr.3. 5). Z těchto omezení plyne, použití vkládaných vložek (inzertů) je vyloučené.

Možnost ovlivnit tepelnou vodivost chladicí kapaliny je popsáno v patentu Owens 2000-3410. V patentu jsou popsány jednotlivé kapaliny snižující teplotní vodivost chladicí kapaliny. V tomto případě by se dalo místo kapaliny snižující tepelnou vodivost použít plyn, např. vzduch, helium. Obsah plynu v chladiči by byl řízen regulátorem. Nejideálnější

řešením by bylo řídit velikost a polohu bublin procházejících chladícím kanálem společně s chladivem. Tento systém by se od ostatních patentů odlišoval svojí dynamickou změnou parametrů tepelné vodivosti v jakémkoli místě chladícího kanálu. Ostatní způsoby jsou statického charakteru. Po přeměření tepelného pole je forma upravena pomocí vkládaných vložek a podobně. Řízení plynných bublin v chladivu je velice obtížné a technicky náročné.

Nadějnou možností pro realizaci je systém s chladícími otvory a otvory pro ovlivnění teplotního pole, které jsou na sobě konstrukčně nezávislé. Chladící kanál je potřeba ponechat bez změny, tedy válcový, kanál pro modifikaci přestupu tepla bude také válcový. Při ovlivnění přestupu tepla je třeba využít dvojici látek, které mají výrazně odlišné součinitele teplotní vodivosti (kov – vzduch). U těchto dvou látek je nutné zajistit ovládání jejich obsahu v kanálu a to i v určitých místech kanálu. V podstatě se jedná o lokální řízení pórovitosti.

### **3.3 Návrh flexibilního přívodu kapaliny do formy**

Do sklářské formy modelové stanice je potřeba přivést chladící kapalinu od tlakového zdroje. V provozu bude vedení chladící vody vystaveno nejen teplotnímu zatížení, ale i abrazivnímu prostředí a cyklickému namáhání. Vzájemné působení těchto nežádoucích vlivů klade vysoké nároky na životnost spojovacího vedení. Kapalná chladící látka proudí při zvýšené teplotě a je proto nutné snížit možnost poškození nebo unikání v celé její dráze probíhající v nepříznivém pracovním prostředí soustavy řadového stroje pro výrobu skleněného zboží. Roztavená sklovina, abrazivní částice skla a přebytečné mazivo mohou být příčinou poškození hadic, trubek a spojovacích tvarovek. Hadice, potrubí a spojky se tak mohou uvolňovat nebo u nich může docházet k únavě materiálu působením těžkých provozních podmínek. Z těchto důvodů je použití hadic, potrubí a spojovacích tvarovek obtížné. V provozu je důležité, aby byly všechny průtokové kanálky pro chladivo uzavřeny v konstrukci stroje, a tím chráněny proti oděru a únavě materiálu v nešetrných provozních podmínkách.

Na připravované modelové stanici nebudou provozní podmínky věrně odpovídat podmínkám v praxi. Množství abrazivních částic bude výrazně menší. Cyklické namáhání bude odpovídat jen několika málo hodinám v průběhu experimentů. Před a po měření zde také bude možnost kontroly připojovacích prvků a jejich případná výměna. Z těchto důvodů je pro začátek experimentálního měření nejvhodnější systém hadic, potrubí a šroubení. Toto řešení má pro nás velké výhody v tom, že není tak drahé, je jednoduché a je využitelné pro další projekty realizované na katedře.

### 3.3.1 Volba typu hadice

Hadice bude zejména tepelně zatížena. Teplota média může v kritických podmínkách dosáhnout 100 °C. Vnější povrch hadice se bude pohybovat kolem ohřáté formy a tudíž nesmí dojít k jejímu porušení. Pro vnější obal je nejvhodnější kovový opleť. Vnitřní jádro bude zřejmě na bázi polytetrafluortylen (PTFE). Tento materiál je odolný i vůči agresivním médiím. Tepelná odolnost je kolem 200 °C. Světlost hadice se bude pohybovat okolo 10 mm. Provozním tlakem nejsme limitováni, protože se budeme pohybovat v oblasti nízkých tlaků. Hadice budou mít nalisované koncovky s převlečnými maticemi pro připojení na další prvky chladicího systému.

Z široké nabídky dodavatelů na českém trhu jsem vybral hadici od firmy Hansa-flex.

hadice TF 200 obr.3. 7.

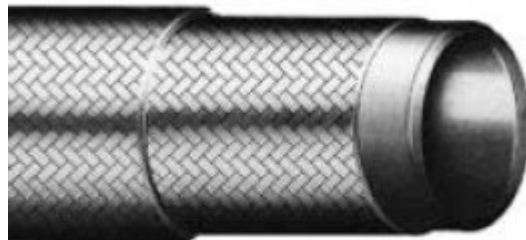
Konstrukce :

Vnitřní vrstva : polytetrafluoretylen (PTFE).

Tlakový nosník : Dvě pletiva z nerezavějícího ocelového drátu.

Oblast použití : středotlaká zařízení s hydraulickými tekutinami při vysoké teplotě, jakož i s agresivními médii pro chemický průmysl.

Teplotní rozsah použití : -60°C až + 260 °C pro trvalé teploty.

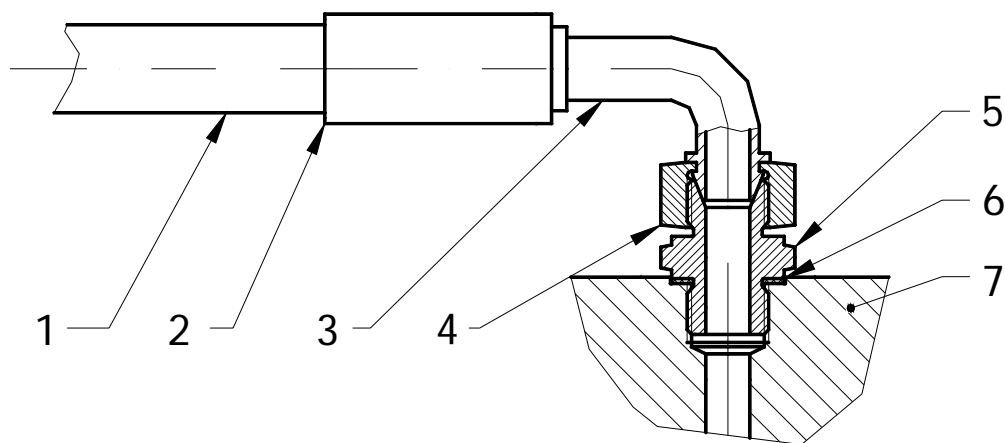


**Obr.3. 7** Konstrukce hadice Hansa-flex TF 200 [11]

### 3.3.2 Volba typu připojení hadice k formě

Po volbě typu hadice je potřeba zvolit typ připojovacího šroubení. Konstrukce šroubení je několik typů, které umožňují dosažení požadovaných vlastností. Podle světlosti hadice se zvolí koncovka hadice a k tomu příslušná objímka pro zajištění hadice. Jako poslední volba je připojení převlečné matice koncovky na těleso formy, to se uskuteční pomocí adaptéru, který je opatřen vhodným závitem a těsnícím kuželem (obr.3. 8.). V nabídce výrobců je možnost zvolit materiál šroubení a těsnění. Mezi materiály šroubení jsou i ušlechtilé ocele s tepelnou odolností -60 °C až + 400 °C. Materiál těsnění volím fluor-karbonový kaučuk FPM (Viton) [11].

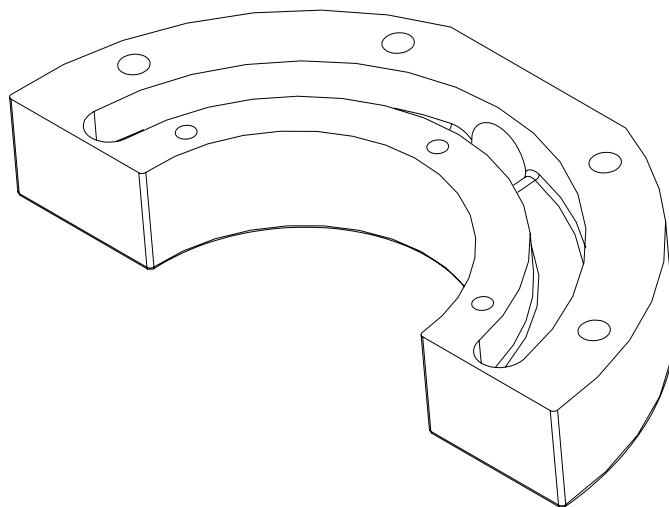




**Obr.3. 8** Připojení hadice na těleso formy (1 – hadice TF200, 2 – objímka, 3 – koncovka hadice 90, 4 – převlečná matice, 5 – adaptér, 6 – těsnění, 7 – těleso formy)

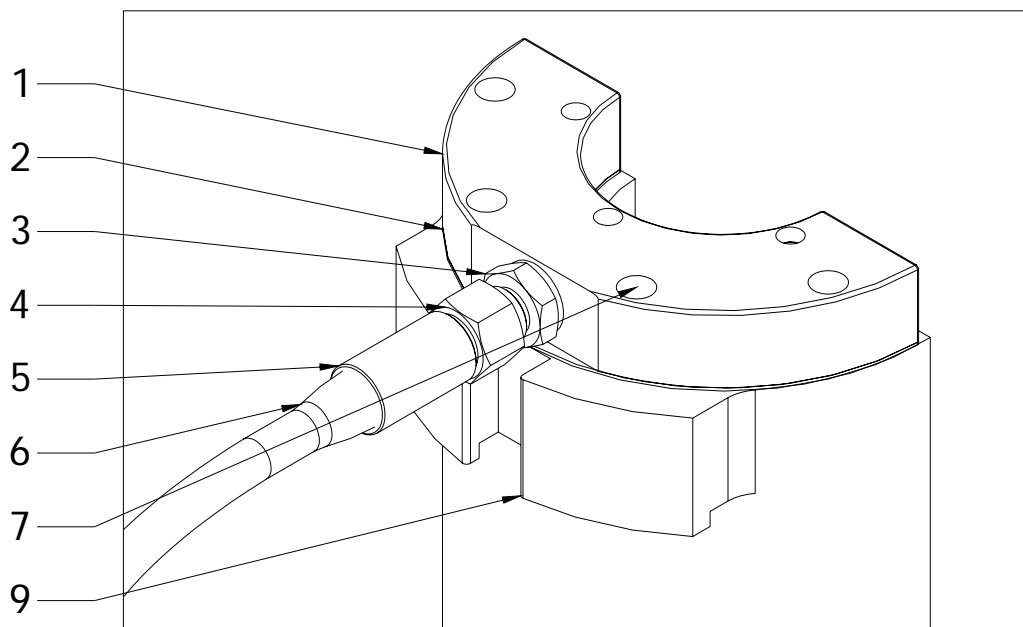
Připojení hadice přes šroubení přímo na těleso formy je možné jen při malém počtu chladících kanálů. Na čelní ploše formy jsme omezeni prostorem, proto je počet hadic omezen, šroubení by se překrývala.

V dalším experimentální etapě je forma už více provrtána axiálními otvory a jejich chlazení je potřeba zajistit. V tomto případě se problém řeší pomocí příruby, ve které je vyfrézován rozváděcí kanál (obr.3. 9). Tato příruba je přišroubována na těleso formy a těsnost zaručí ploché těsnění (obr.3. 10). Šroubení lze také umístit na čelní plochu příruby. Vnitřní frézovaný kanál v přírubě musí být dostatečně velkého průřezu aby zajistil požadovaný průtok chladící kapaliny do všech axiálních kanálů.



**Obr.3. 9** pohled na frézovaný rozváděcí kanál v tělese příruby

Největší nároky jsou kladeny na těsnění. Těsnění je vystaveno díky kontaktu s formou velkému tepelnému zatížení. Podobný případ je u spalovacích motorů při těsnění hlavy motoru. Zde se používá ploché bezazbestové těsnění.



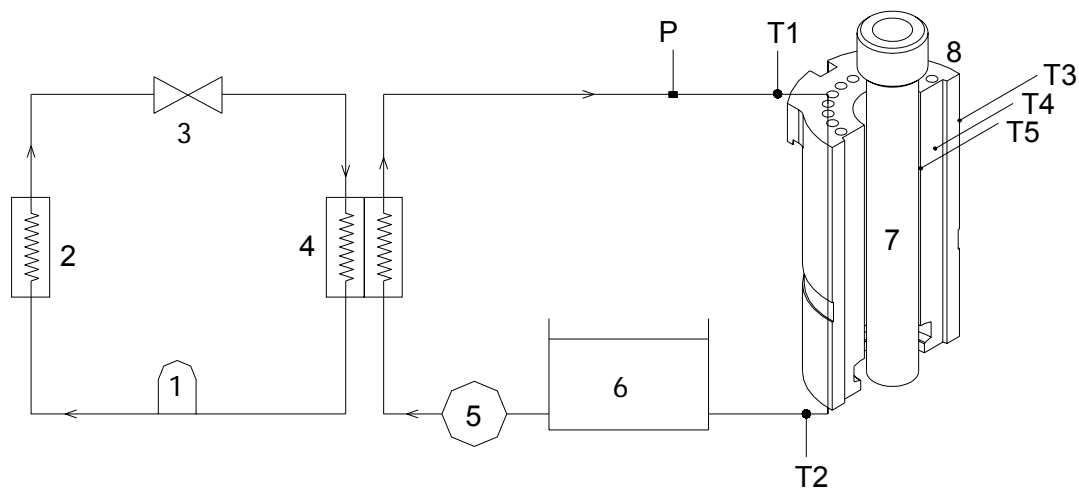
**Obr.3. 10.** Pohled na konstrukci příruby (1 – příruba chlazení, 2 – ploché těsnění, 3 – adaptér, 4 – převlečná matice, 5 – objímka hadice, 6 – hadice, 7 – šroub, 8 – těleso formy )

## 4. Koncepce modelové stanice

Na začátku textu je uvedeno začlenění modelové stanice do chladicího systému, které dává ucelenou představu o umístění modelové stanice v systému. Kapitola je nejvíce zaměřena na určení zdroje tepla, protože ten bude určovat charakter celé konstrukce modelové stanice. Jsou zde zpracovány tři základní principy ohřevu a nakonec je uveden zvolený typ ohřevu. V kapitole je také popsán výpočet nutného odvedeného tepla ze skleněného výrobku a předpokládané množství chladicí kapaliny. Výpočet je opřen o výsledky kalorimetrického měření provedeného nedávno katedrou [12]. Výsledek výpočtu potom určí požadovaný výkon tepelného zdroje. Na konci kapitoly se věnují technickým parametrům zvoleného typu zdroje tepla.

### 4.1 Schéma chladicího okruhu

Modelová stanice je ucelený systém její umístění v chladicím okruhu je podstatné. Schéma navrženého chladicího okruhu je na obr.4. 1. Základní obvod je reprezentován uzavřeným okruhem skládajícím se ze dvou částí. První část je primární, plní úlohu odvodu tepla ze sekundárního obvodu. Primární část se skládá z 1 až 4. Druhá část se nazývá sekundární. Tato část přímo chladí formu. Skládá se z částí 4 až 6.



**Obr.4. 1** Schéma chladicího obvodu. (1 – kompresor, 2 – kondenzátor, 3 – expanzní ventil, 4 – výparník, 5 – čerpadlo, 6 – zásobník chladicí kapaliny, 7 – topná tyč, 8 – forma s kanály, 9 – zdroj napětí, P – průtokoměr, T1 – měření teploty chladicí kapaliny na vstupu, T2 - měření teploty chladicí kapaliny na výstupu, T3 – měření teploty na povrchu formy, T4 – měření teploty uvnitř formy, T5 – měření teploty na povrchu dutiny formy, U – měření napětí voltmetr, A – měření proudu ampérmetr)

Na tento okruh jsou dále napojeny měřicí přístroje pro měření teploty a průtoku. Ve formě jsou umístěny termočlánky, které umožňují měřit teplotu na povrchu formy, uvnitř

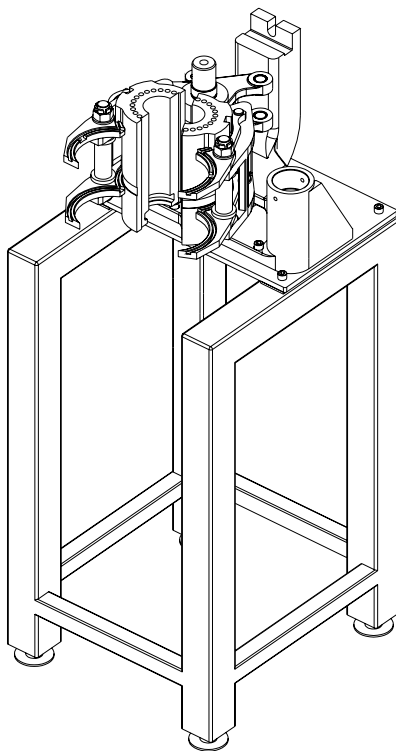
formy a na povrchu dutiny formy. Měřicí místa jsou ve dvou rovinách kolmých na osu formy. Další část obvodu je tvořena topným systémem, který umožňuje regulaci topného výkonu a jeho další analýzu přes elektrické měřicí přístroje U a A.

## 4.2 Základní rozměry modelové stanice

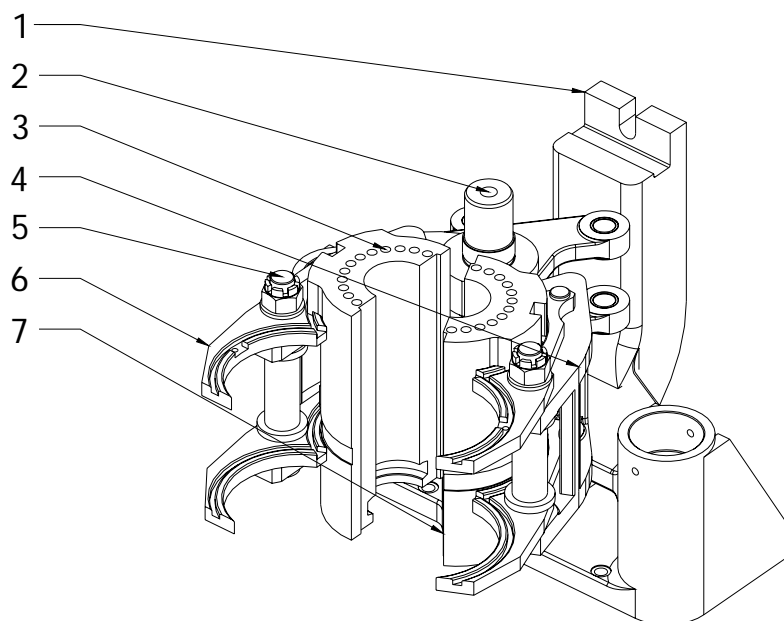
Modelová stanice je tvořena stolem na kterém je upevněn odlitek stojanu, který vytváří osu rotace celého mechanismu formy. S firmou Sklostroj byla dohodnuta výroba stojanu a mechanismu formy [13]. Základní koncepce je uvedena na obr.4. 2 a 4. 3. Stůl má stejnou šířku jako individuální sekce výrobního stroje, což umožní udělat si určitou představu o využitelném operačním prostoru.

Modelová stanice musí umožnit veškerá základní měření, musí tedy splňovat tyto funkce :

- 1) ohřev dutiny formy na teploty podobné v praxi ;
- 2) simulaci pracovního pohybu a cyklu formy ( rozevírání a zavírání formy v časové smyčce ) ;
- 3) přívod a regulaci chladicí kapaliny do formy ;
- 4) zdroj tlakové kapaliny ;
- 5) měření teplotního pole ve formě ;
- 6) modifikaci přestupu tepla v tělese formy .



**Obr.4. 2** Pohled na základní koncepci stanice, stůl a mechanismus formy.



**Obr.4. 3** Na obrázku je pohled na mechanismus formy. (1 – odlitek tělesa stojanu přední formy, 2 – čep, osa rotace mechanismu, 3 – polovina formy – samice, 4 – držák čelistí forem, 5 – čep – uchycení čelistí, 6 – čelist formy, 7 - polovina formy – samec )

Tvorbu základní koncepce ovlivňuje dominantním způsobem použitý zdroj tepelného výkonu, a proto bylo nutné nejdříve spočítat požadovaný výkon zdroje a zvolit typ zdroje. Zdroj bude určovat hlavní rysy modelové stanice.

### 4.3 Způsob ohřevu dutiny formy

Kapka skloviny, která ve výrobě ohřívá dutinu formy má průměrnou teplotu 1100 °C, zhruba takové teploty by měl dosahovat i laboratorní zdroj tepla. Tepelný výkon musí být také dostatečný. Velikost potřebného tepelného výkonu je podrobněji rozebrána v kapitole 3.2.6. Dále jsou při laboratorním měření kladeny požadavky na parametry a regulaci topného výkonu. Dutina formy musí být ohřívána rovnoměrně po celém svém povrchu. Tento parametr je jeden z nejdůležitějších. Díky vytvořené symetrii ohřevu nám umožní srovnat experimentálně naměřené výsledky s výsledky získané z modelu vytvořeným metodou konečných prvků. Tvar zdroje musí také vyhovovat konstrukčním parametrům dutiny formy a celé konstrukci stanice. Způsob ohřevu musí být šetrný k pracovnímu povrchu formy, přičemž nesmí docházet k okujení povrchu.

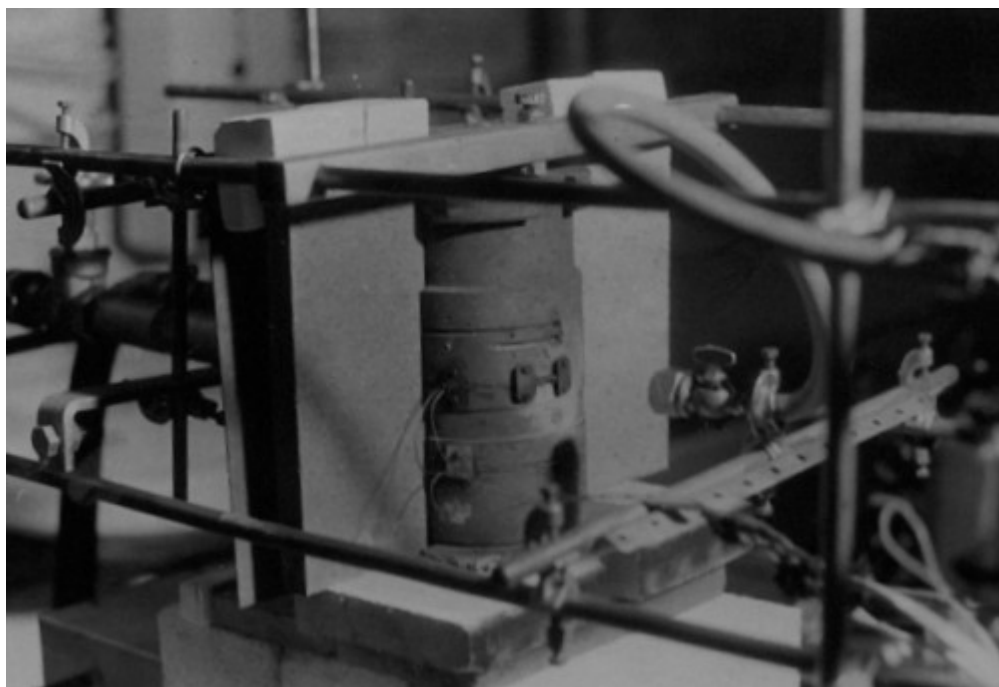
V textu je dále uveden přehled jednotlivých způsobů ohřevu a jejich výhody, nevýhody. V závěru této kapitoly byl vybrán způsob ohřevu.

#### 4.3.1 Ohřev plamenem

Ohřev dutiny formy plamenem je energeticky málo náročný. Výhodou tohoto způsobu je cena a také standardní použití ve výrobě při svařování plamenem. Přestup tepla z plamene do tělesa formy je velmi intenzivní.

Největší nevýhoda spočívá ve velkém nároku na konstrukci hořáku, aby povrch dutiny byl rovnoměrně otápěn. Regulace topného výkonu je jednoduchá, problém spočívá v zjištění velikosti topného výkonu. Při ohřevu by zřejmě docházelo k jemnému okujení povrchu a tím i k poškozování formy.

Ohřev dutiny formy plamenem byl již na katedře použit v diplomové práci Chlazení sklářských forem [14]. Obr.4. 4 ukazuje provedení modelové stanice pro chlazení forem vodním sprejem. Na fotce je vidět polovina formy, která je upnuta v rámu. Vnější povrch formy je poprašován vodním sprejem a na základě přeměny skupenství kapek vody na povrchu teplé formy dochází k odvádění tepla z formy. Dutina formy je otápěna plamenem z hořáku, není sice vidět, ale hořák je znatelný v levé části snímku, ze kterého je rovněž patrné umístění termočlánků na povrchu formy.



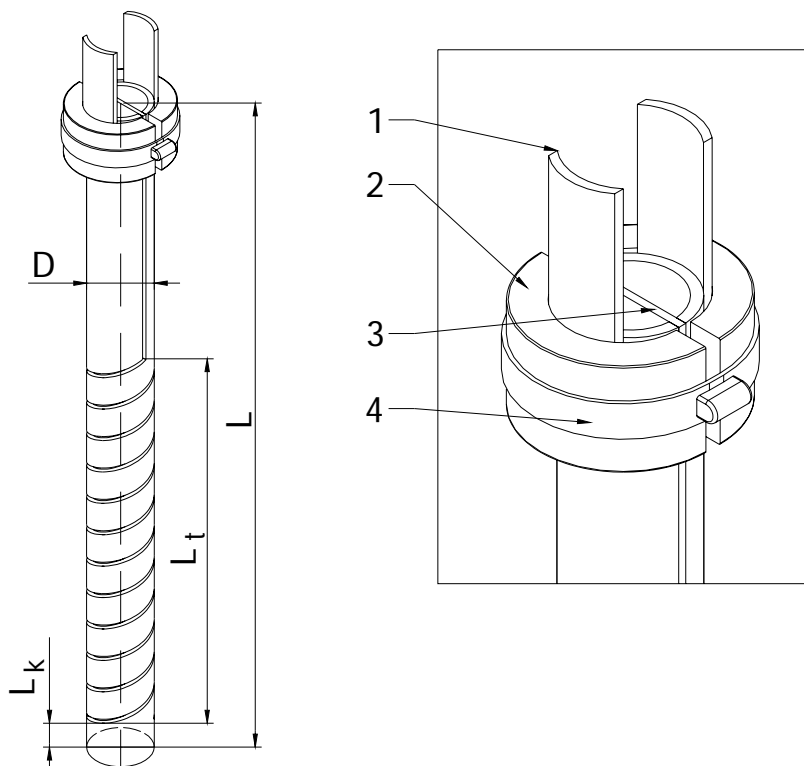
**Obr.4. 4** Fotografie laboratorní stanice pro chlazení vodním sprejem [14]

### 4.3.2 Ohřev kanthalovou topnou tyčí

Kanthalová tyč je elektricky napájena a materiál tyče má funkci elektrického odporu ve kterém se přeměňuje elektrická energie na tepelnou energii. Konstrukčnímu řešení nejlépe vyhovuje typ GLOBAR SGR (obr.4. 5). Topná tyč má tvar trubky, která je rozříznutá dvěma šroubovicemi. Tento řez vytváří z trubky plochý svinutý vodič. Tvar tyče přitom odpovídá i tvaru dutiny formy. Materiál tyče je krusilit. Maximální teplota topné tyče je 1650°C, průměr tyče 12,7 – 54 mm, délka topné části až 650 mm [15].

U kanthalové tyče lze jednoduchým způsobem řídit topný výkon a tento výkon lze přesně spočítat, navíc tvar tyče je podobný tvaru dutiny formy, což přispívá k rovnoměrnému otápní dutiny. Provoz elektrického systému je navíc čistý, bez splodin hoření a oxidačních efektů.

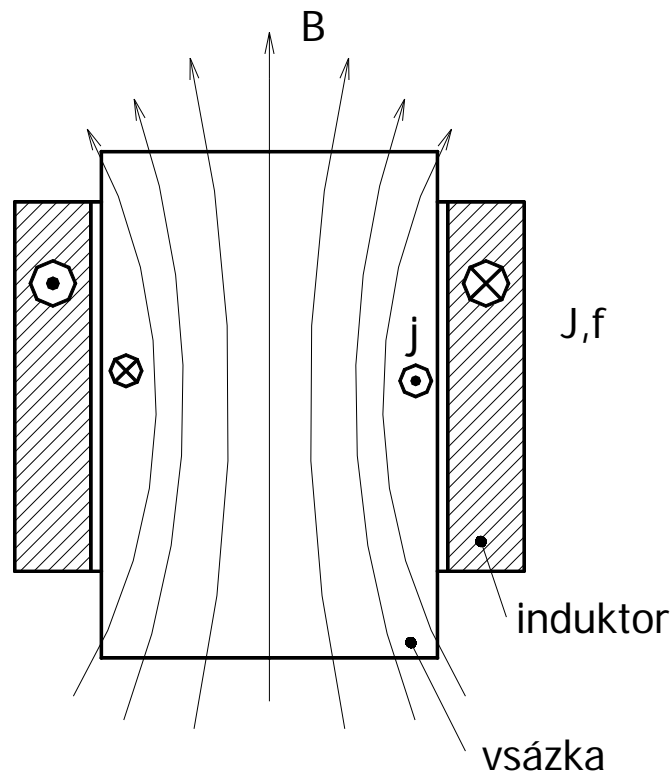
Podle katalogu výrobce nebude mít tyč dostatečný tepelný výkon, k tomu aby bylo dosaženo požadované tepelného výkonu, je nutné zvětšit čas na otápní dutiny formy. Tato korekce je nepříjemná, ale podstatně by neměla ovlivnit principy přestupu tepla. Dalším nevýhodným faktorem je zkroucení krusilitové tyče během zahřívání. Výrobce neuvádí žádné informace o tomto jevu, ale v praxi je tento jev ověřený. Během experimentu musí dojít k pozorování a měření zkroucení tyče a její korekci, jinak by došlo ke zkreslení naměřených výsledků. Další technické parametry topné tyče jsou uvedeny v kapitole 3.2.7.



**Obr.4. 5** Topná tyč Globar SGR (L – celková délka, Lt – horká zóna, Lk – koncová část, D – průměr tyče, 1 – připojení elektrické energie, 2 – izolační keramické elementy, 3 – izolační vložka, 4 – kovový stahovací pásek)

### 4.3.3 Ohřev indukčním principem

Indukční ohřev kovových materiálů patří v současné době mezi velmi dobře propracované a zvládnuté technologie a je široce využíván v mnoha průmyslových odvětvích. Jako příklady lze uvést indukční kalení, popouštění, vysoušení povrchu znečištěných součástí, tavení kovů, lisování za tepla atd. Princip indukčního ohřevu je jednoduchý a schematicky je znázorněn na obr.4. 6.

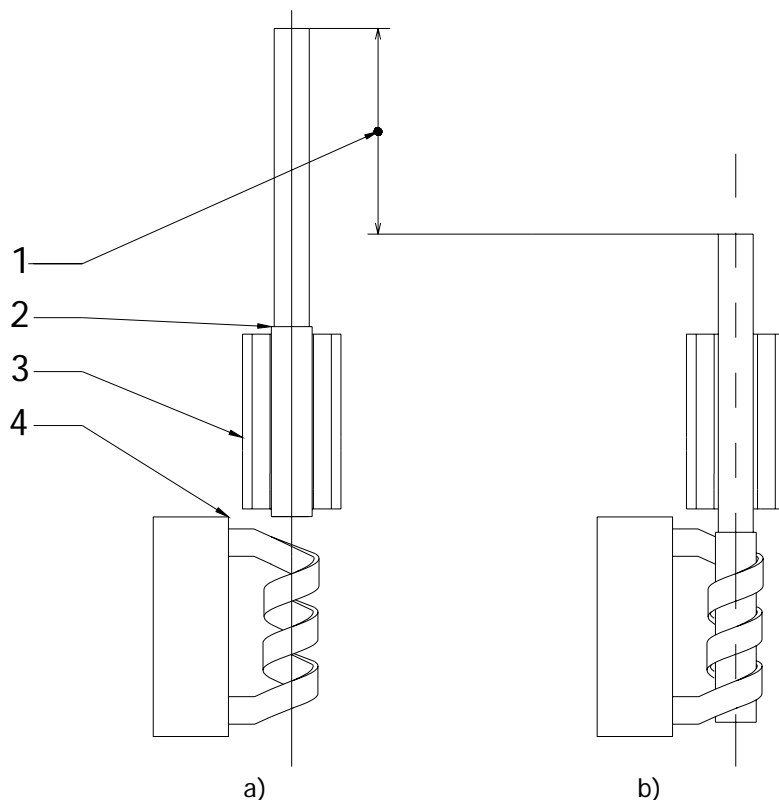


**Obr.4. 6** Indukční princip [16]

Vsázka, která musí být dostatečně elektricky vodivá, se vloží do induktoru (zpravidla masivnější cívka) protékaného střídavým proudem o hustotě  $J$  a kmitočtu  $f$ . Ten vyvolá magnetické pole  $B$  procházející vsázkou, v níž se následně indukují vířivé proudy o hustotě  $j$ . Ty se uvnitř vsázky uzavírají a generují zde ztráty, jež se projevují zvýšením její teploty (přechodem budicího proudu se ovšem ohřívá i induktor). Hloubku prohřátí vsázky lze dobře regulovat kmitočtem; s rostoucím kmitočtem budicího proudu se ztráty, a tedy teplo, generují v tenčích a tenčích povrchových vrstvách.

Indukční ohřev by se musel realizovat pomocí ohřevu tyče, která by se vkládala do dutiny formy (obr.4. 7).





**Obr.4. 7** Schéma indukčního ohřevu pro modelovou stanici. ( Tyč z horní polohy (obr.a) se posune do dutiny cívky induktoru a začne se ohřívát (obr.b). Po zahřátí tyče na provozní teplotu se tyč opět vrátí do své výchozí polohy. Ohřátá část tyče je v dutině formy a vytápí ji. Tento cyklus se opakuje při každém otevření formy. 1 – dráha ohřivané tyče, 2 – ohřivaná tyč, 3 – polovina formy, 4 – induktor )

Indukční ohřev by měl mít dostatečný tepelný výkon. Tepelný výkon lze jednoduše řídit. Velikost topného výkonu se stanovuje už obtížněji. Záleží na materiálových parametrech ohřivané tyče. Největší problém spočívá v ekonomické náročnosti tohoto zařízení.

#### 4.3.4 Volba typu ohřevu

Výsledek volby je jednoznačný, protože jsme limitováni cenou (do 150 000 Kč ) a parametry ohřevu ( rovnoměrný ohřev po celé pracovní ploše). Tyto limity vylučují ohřev pomocí plamene i indukční ohřev. Plamen ohřívá bodově, nerovnoměrně a velice špatně se u něho zjišťuje daný výkon. Indukční ohřev je pro danou aplikaci velice nákladný. Volím tedy ohřev pomocí kanthalové tyče.

## 4.4 Výpočet topného výkonu

Výpočet topného výkonu vychází přímo z minimálního odvedeného tepla při tvarování. Na katedře byla v poslední době provedena kalorimetrická měření na směšovacím kalorimetru. Vlastní provozní měření bylo rozděleno do tří fází ve kterých byly postupně analyzovány teploty dávky skloviny, předního tvaru a následně tvaru konečného. Měření bylo provedeno na sekčním stroji vyrábějícího pivní lahve NRW 0,5 l. Výsledkem jsou hodnoty množství odvedeného tepla v přední a konečné formě.

$$Q_{\text{přední forma}} = 68,5 \text{ kJ}, \quad \text{tj.} \quad 46,9 \% \text{ odvedeného tepla} \quad [12]$$

$$Q_{\text{konečná forma}} = 77,6 \text{ kJ}, \quad \text{tj.} \quad 53,1 \% \text{ odvedeného tepla} \quad [12]$$

Pro výpočet topného výkonu budeme vycházet z hodnoty stanovené pro konečnou formu. Modelová stanice bude projektována na formu která odpovídá velikosti pivní eurolahve NRW 0,5 l. Hmotnost této lahve je  $m = 380 \text{ g}$ .

Přestup tepelného výkonu je velice ovlivněn přítomností vzduchu. Sdílení tepla se mezi topnou tyčí a dutinou formy se děje pomocí radiace. Vzduchová mezera mezi topnou tyčí a formou musí být co nejmenší, protože vzduch má velmi malý součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  a tím velmi snižuje dynamiku sdílení tepla. Doba styku skloviny s formou u sekčního stroje (IS) je přibližně  $\tau = 4\text{-}5 \text{ s}$ .

Výkon topného článků při ideálním přestupu tepla je

$$P = \frac{Q_{\text{konečn. forma}}}{\tau} = \frac{77,6}{5} = 15,52 \text{ kW}.$$

Kanthalové tyče se nevyrábí v tomto tepelném výkonu. Jediným možným způsobem jak docílit správnou teplotu formy zvětšením času ohřevu dutiny formy.

Nejdeálnější rozměr pro kanthalovou tyč vychází z rozměru formy kdy jsme limitováni vnějším průměrem lahve  $d = 67 \text{ mm}$ . Kanthalová tyč se při ohřevu rozpíná, musíme tedy zaručit její dostatečnou volnost. Největší průměr, který se podařilo ze skladových zásob firmy Kanthal v Británii zajistit je  $d = 44 \text{ mm}$ . Její maximální výkon je  $P = 14 \text{ W.cm}^{-2}$ . Celkový výkon se spočítá přes celkovou teplosměnou plochu topné tyče. Obsah teplosměné plochy je

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L = \frac{\pi \cdot 4,4^2}{4} \cdot 27 = 410,5 \text{ cm}^2,$$

kde  $D$  je průměr tyče,  $L$  délky topné části tyče, která je zasunutá v dutině formy. Pro celkový výkon tedy platí

$$P_c = P \cdot S = 14 \cdot 410,5 = 5747 \text{ W} \doteq 5,7 \text{ kW},$$

kde  $P$  je plošný výkon topné tyče.

Množství chladicí kapaliny (vody) k odvedení topného výkonu kanthalové tyče se vypočítá podle vztahu

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta t \Rightarrow \dot{m} = \frac{\dot{Q}}{c \cdot \Delta t} = \frac{5,7}{4,2 \cdot 60} = 0,0023 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} ,$$

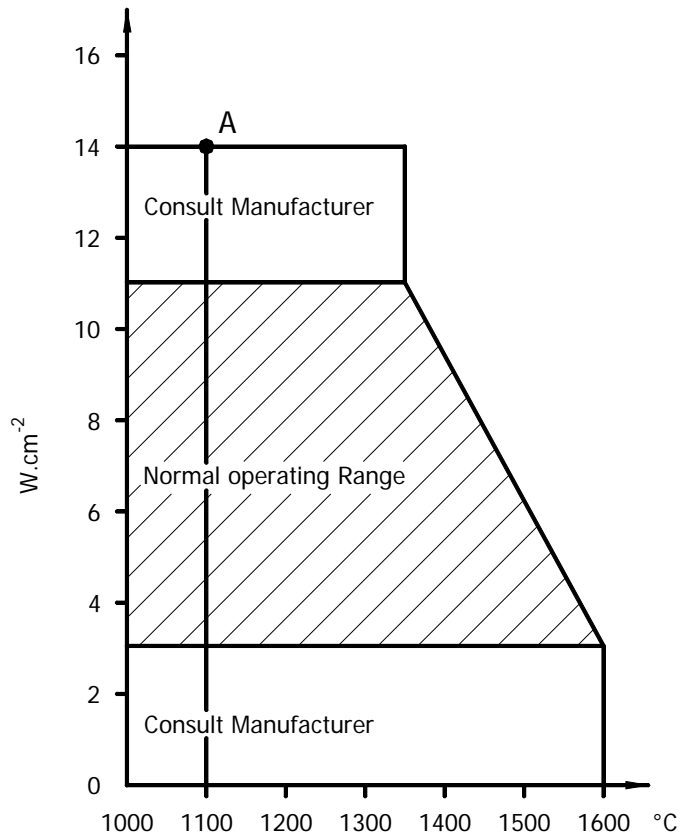
kde  $\dot{Q}$  je tepelný tok kanthalové tyče ( $\text{kJ} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $\dot{m}$  je hmotnostní průtok ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $c$  je měrná tepelná kapacita vody ( $c = 4,2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ). Tomuto hmotnostnímu průtoku odpovídá objemový průtok **1,36 dm<sup>3</sup> · min<sup>-1</sup>**.

#### 4.5 Technické parametry GLOBAR SGR Ø 44 mm

Dodavatel topného elementu od skotského výrobce Kanthal je firma Elsklo, která se zabývá pecní technikou. Materiál tyče je Silikon-karbid, obchodní název je kanthal-crussilite. Tento materiál má oproti běžným výrobkům této řady větší hustotu. Vysoká hustota přispívá k vyšším výkonům. Většina pórů je na povrchu uzavřena, to významně přispívá k odolnosti proti agresivní atmosféře.

Další parametry jsou průměr tyče  $d = 44 \text{ mm}$ , délka válcové části  $l = 475 \text{ mm}$ , délka topné části  $l_t = 300 \text{ mm}$ , maximální teplota topného elementu na vzduchu  $T_{\text{max}} = 1650 \text{ °C}$ , hustota  $\rho = 2,85 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , standardní elementy mají hustotu  $\rho = 2,30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , pórovitost 8,5 %, standardní elementy mají pórovitost 25,0 %.

Obrázek 4. 8 ukazuje pásma použití a tomu odpovídající výkon v jednotkách  $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ . Šrafovaná plocha ukazuje optimální oblast použití s největší životností. Tomu odpovídá maximální výkon  $P = 11 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ . Při měření v laboratoři se, ale budeme pohybovat v horní nešrafované oblasti. Pracovní teplota bude přibližně  $1100 \text{ °C}$  a tomu odpovídající maximální výkon  $P = 14 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ . Přetěžování topné tyče bude krátkodobé. Podle měření provedených výrobcem se během jedné hodiny vytvoří v trubce teplota  $1400 \text{ °C}$  [15].



**Obr.4. 8** Oblasti použití plošné výkony Global SGR [15].

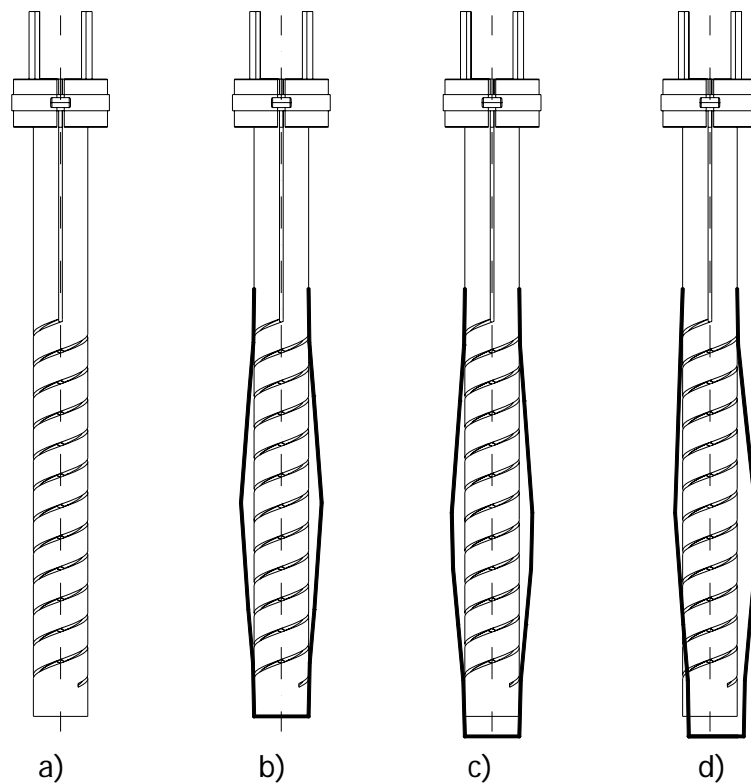
## 4.6 Zkroucení topné tyče

V důsledku určité tepelné roztažnosti materiálu kanthal-crussilite je zřejmé, že dojde k deformaci topné části tyče. Největší problém spočívá v nerovnoměrné vzdálenosti tyče od dutiny formy. To způsobí nerovnoměrný ohřev povrchu formy a tím se poruší symetrie daného systému.

Předpokládané deformace jsou :

- a) zvětšení průměru ve střední části topné oblasti
- b) zvětšení délky topné části
- c) možné vyosení od laboratorní polohy.

Jednotlivé deformace jsou zobrazeny na obr.4 9. Deformace jsou zobrazeny v několikanásobném zvětšení a mají jen ilustrovat chování topného elementu vystaveného tepelné expozici. Deformace by se měly pohybovat v desetinách milimetru. S uvedenými deformacemi se musí počítat a je potřeba je změřit a zahrnout do matematického modelu.



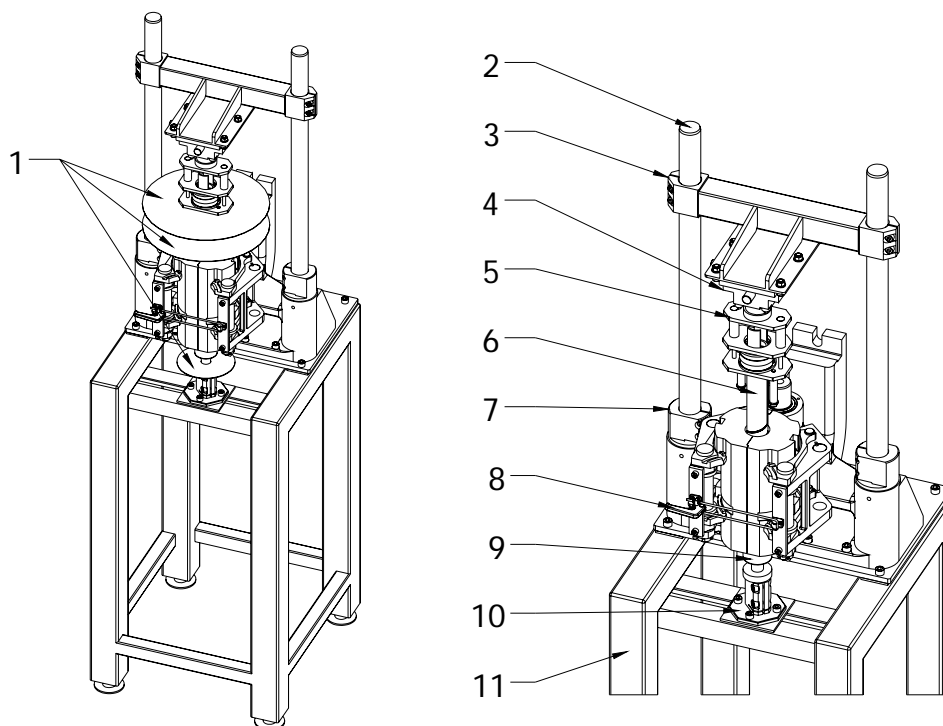
**Obr.4. 9** Deformace topné tyče. ( a – bez deformací, b – zvětšení průměru topné části, c – součet deformací zvětšení průměru + prodloužení, d – celková deformace zvětšení průměru + prodloužení + vyosení).

## 5. Konstrukční řešení

Konstrukční řešení realizuje navrženou koncepci modelové stanice. Nejprve je předložen popis konstrukčního řešení modelové stanice. Jsou zde popsány jednotlivé klíčové prvky stanice. V textu jsou také dílčí problémy konstrukčního řešení. Největší problém vznikl jak vystředit topnou tyč na dutinu formy aniž by došlo k jejímu poškození, proto je této problematice věnována větší část textu. Na konci kapitoly je popsán návrh tvaru formy a rozmístění axiálních otvorů.

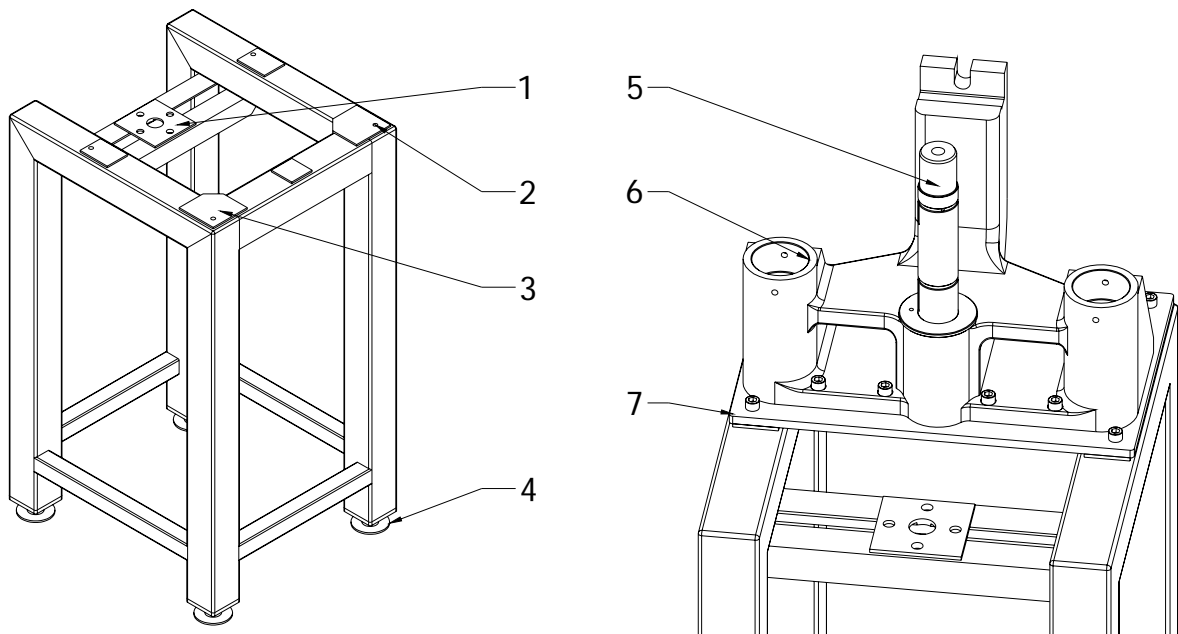
### 5.1 Konstrukce modelové stanice

Konstrukční úkol byl rozčleněn na návrh laboratorního stolu, na kterém je umístěn odlitek stojanu s držákem čelistí, čelistmi a formou obr.5. 1. Stůl musí umožnit upnutí topné tyče a její středění na dutinu formy. Stůl byl vyroben ve firmě Sklostroj a musí splňovat požadavky na dopravu a transport do Liberce (stavebnicový charakter). Stůl bude vystaven určitému tepelnému zatížení a proto musí být také vybaven tepelnou izolací nebo tepelným stíněním. Sestava modelové stanice je vyobrazena na obr.5. 2.



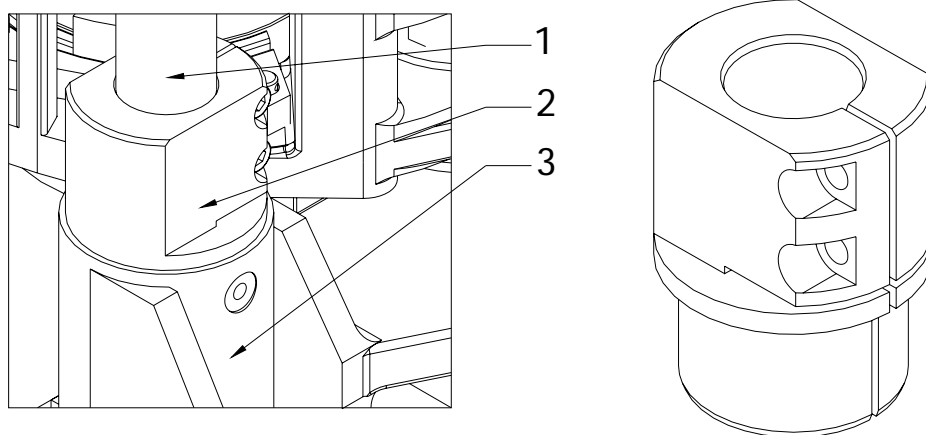
**Obr.5. 1** Pohled na sestavu modelové stanice (1 – stínící plechy, 2 – vodící tyč, 3 – příčník, 4 – kompenzátor polohy, 5 – držák topné tyče, 6 – topná tyč, 7 – pouzdro, 8 – dno formy, 9 – držák dna, 10 – zámek formy, 11 – stůl )

Základ stolu je navržen jako svařenec dutých, čtvercových, uzavřených profilů rozměru 80 mm (obr.5. 2). Nohy stolu jsou na spodní straně opatřeny stavitelnými patkami. Vrchní strana stolu je opatřena návary, které se po celkovém svaření nechají zabrousit do roviny tak, aby na ně mohla být upnuta základová deska. Na desku je pomocí 8 šroubů M12 upevněn odlitek stojanu, který zajišťuje polohování a pohyb soustavy formy. Soustava formy se skládá z držáků čelistí, čelistí, připojovacích elementů a samotné formy.



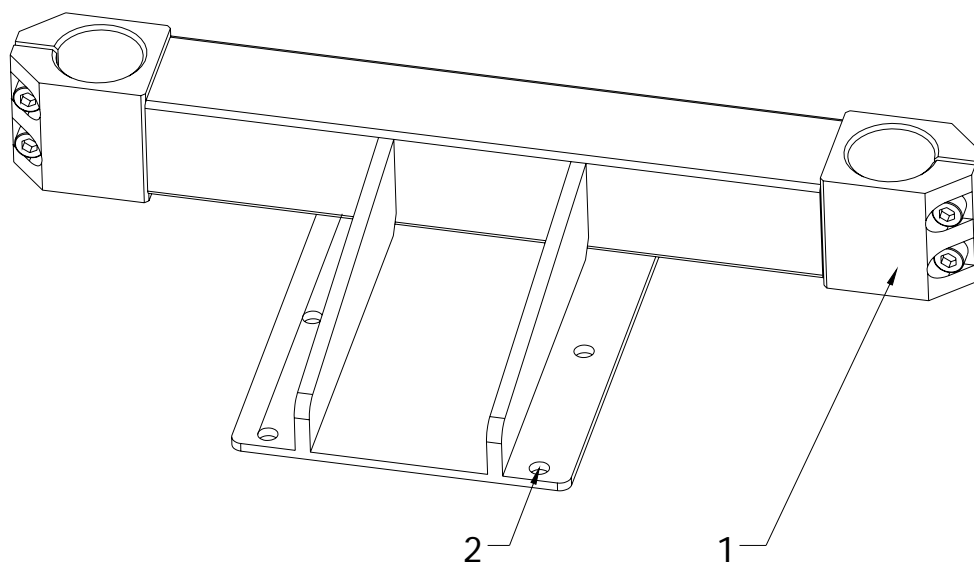
**Obr.5. 2** Pohled na konstrukci stolu ( 1 – základna pro držák dna, 2 – závit M12 pro připojení základové desky, 3 – návary, 4 – stavitelná patka, 5 – čep mechanismu, 6 – stojan, 7 – základová deska )

Odlitek stojanu dále umožňuje připojení vodících tyčí. Na polotovar vodící tyče byla použita kruhová tyč sloužící v mechanismu koncové hlavy. Připojení je provedeno pomocí svěrného pouzdra nalisovaného do odlitku stojanu (obr.5. 4). Pomocí dvou šroubů svěrného spoje je přesně a pevně ukotvena vodící tyč. Konec vodící tyče je přesně uložen v otvoru základové desky.



**Obr.5. 4** Pohled na nalisované svěrné pouzdro. (vpravo pohled na pouzdro  
1 – vodící tyč, 2 – svěrné pouzdro, 3 – odlitek stojanu )

Na vodících tyčích je přes svěrné spojení připojen příčník (obr.5. 5). K příčníku je přes šrouby připojen kompenzátor, držák topné tyče a topná tyč. Příčník je opět řešen jako svařenec. Na čtvercový uzavřený profil rozměru 60mm jsou přivařeny dvě objímky, které svěrným spojením, zajišťují zafixování polohy příčníku. Příčník se může pomocí tyčí vertikálně pohybovat. To nám umožní libovolně pohybovat tyčí ve směru osy dutiny.

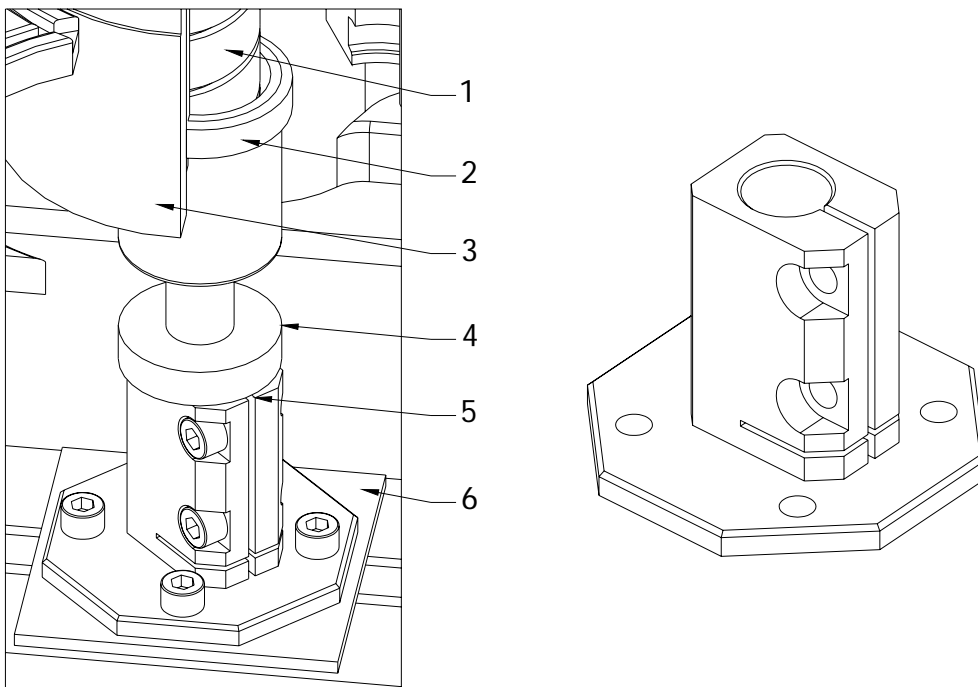


**Obr.5. 5** Pohled na konstrukci příčníku. ( 1 – objímky se svěrným spojením,  
2 – díry pro šrouby kompenzátoru )

Středovou polohu formy zajišťuje dno, které je přes svěrné spojení připojeno ke stolu (obr.5. 6). Svěrné spojení umožňuje větší vertikální posuv v ose  $z$  (100 mm) a menší posuv ve zbývajících osách  $x$  a  $y$  ( $\pm 2,5$  mm). Celý systém je tepelně namáhán od topné tyče, může dojít k změně nastavení středové polohy dna a tím k porušení symetrie soustavy. Z tohoto důvodu je na ose dna navlečen kruhový stínící plech s izolační podložkou, jehož poloha je



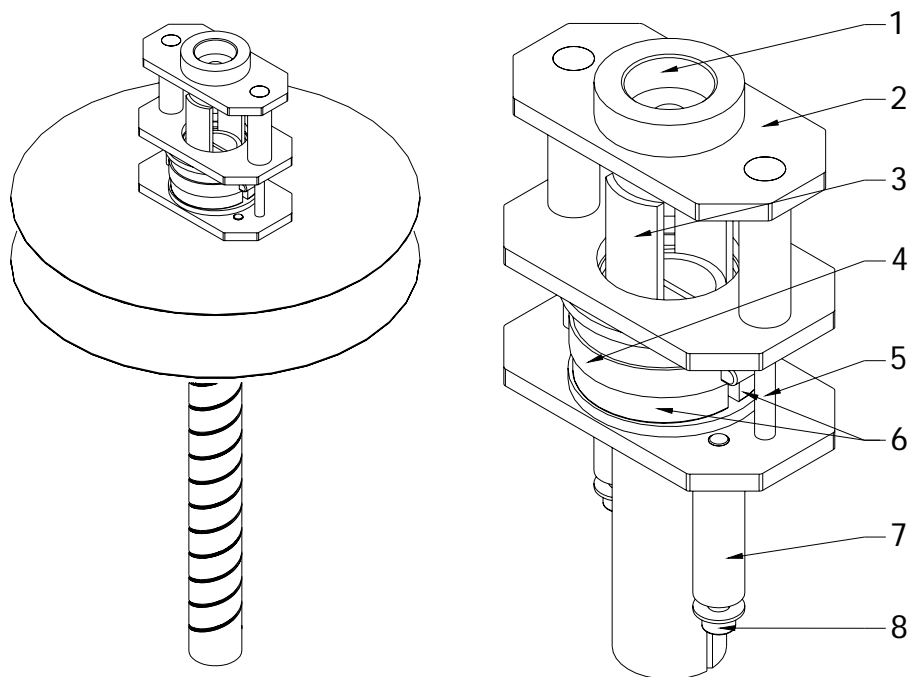
fixována horním okrajem svěrného spoje. Stínící plech není na obr.5. 6 vyobrazen, jeho tvar je zřetelný na obr.5. 1.



**Obr.5. 6** Pohled na konstrukci držáku dna. ( v pravo pohled na svařenec držáku dna, 1 – topná tyč, 2 - dno formy, 3 – forma, 4 – distanční podložka)

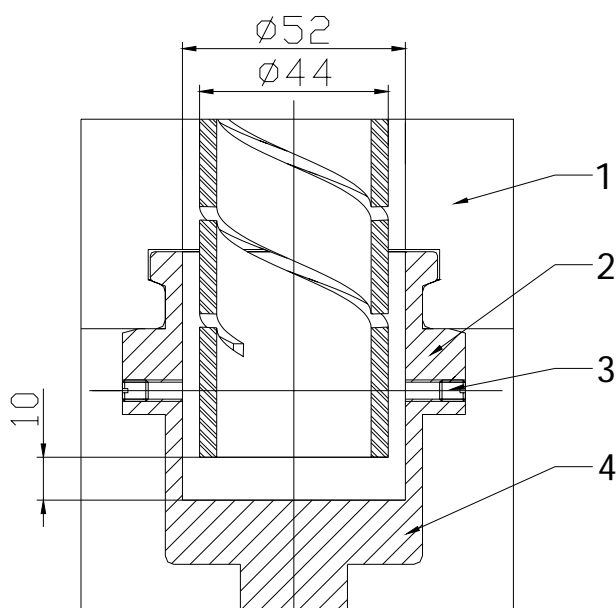
Připojení topné tyče je realizováno pomocí držáku topné tyče (obr.5. 7), který je připevněn na kompenzátor přes válcovou plochu  $\text{Ø } 35\text{H7/f7}$  a fixačního šroubu M12 s podložkou. Globar je na konci opatřen dvěma kusy keramických elementů. Celý komplet je dohromady spojen ocelovým páskem se šroubem. Globar je tedy upnut za keramické elementy, přes stahovací podložku. Na obou kontaktních plochách keramiky je vložena poddajná podložka, aby nedošlo k prasknutí.

Celý systém držáku topné tyče a kompenzátor je vystaven tepelné expozici rozžhaveného globaru. Systém proto musí být opatřen termoizolací nebo stínícími plechy. Dvojice stínících plechů je připojena k držáku topné tyče pomocí šroubů a tvoří mezikruhovou mezeru (na obr.5. 7 je stínící plechy zobrazeny jen v levé části celkového pohledu).



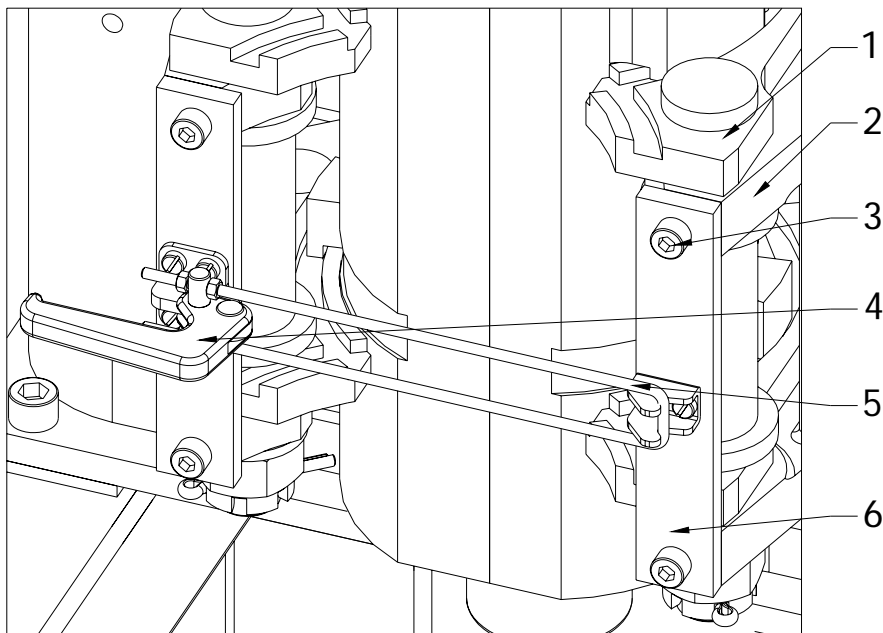
**Obr.5. 7** Pohled na konstrukci držáku topné tyče. ( 1 – válcová plocha pro připojení kompenzátoru, 2 – připojovací příruba, 3 – konce pro připojení elektrické energie, 4 – kovový pásek, 5 – šroub vytvářející svěrné spojení, 6 – dva keramické elementy, 7 – distanční válec, 8 – šroub držící stínící plechy )

Důležitým místem je prostor kolem konce topné tyče. Na obrázku 5. 8 je patrné dno a v něm zasunutá topná tyč. Topná tyč je asi 10 mm nad povrchem dna s obvodovou mezerou 4mm.



**Obr.5. 8** Řez dolní částí formy ( 1 – poloviny formy, 2 – dno, 3 – středící otvory, zakryté šrouby, 4 – topná tyč )

Zajištění formy v pracovní poloze je provedeno pomocí mechanického zámku, který je ovládán ručně (obr.5. 9). Zámek je pomocí šroubů upevněn na desku zámku a ta je připojena na držák čelistí. Zámek je vyroben firmou Kipp [17].



**Obr.5. 9** Pohled na konstrukci zámku formy ( 1 – čelist, 2 – držák čelistí, 3 – šroub připojující desku zámku k držáku čelistí, 4 – držadlo zámku, 5 – spona zámku, 6 – deska zámku)

## 5.2 Středění topné tyče

Problém středění je rozdělen na dvě části. První část problému je zajistit požadované stupně volnosti v prostoru. Druhá část problému je přesné odměření požadované polohy vůči dutině formy. Přesnost vystředění topné tyče bude výrazně ovlivňovat symetrii soustavy, tím i naměřené výsledky. Tyč se v žádném případě nesmí dotýkat dutiny formy.

Maximální počet stupňů volnosti v prostoru je 6. Jsou to 3 posuvy a 3 naklopení. V našem případě jsou z cela určité potřeba všechny 3 posuvy a minimálně dva stupně volnost pro natočení. Zbývající stupeň volnosti natočení v ose topné tyče bude realizováno v držáku topné tyče, nebo nebude potřeba z hlediska rotační souměrnosti topné tyče. Odměrování polohy by mělo být v přesnosti 0,1 mm.

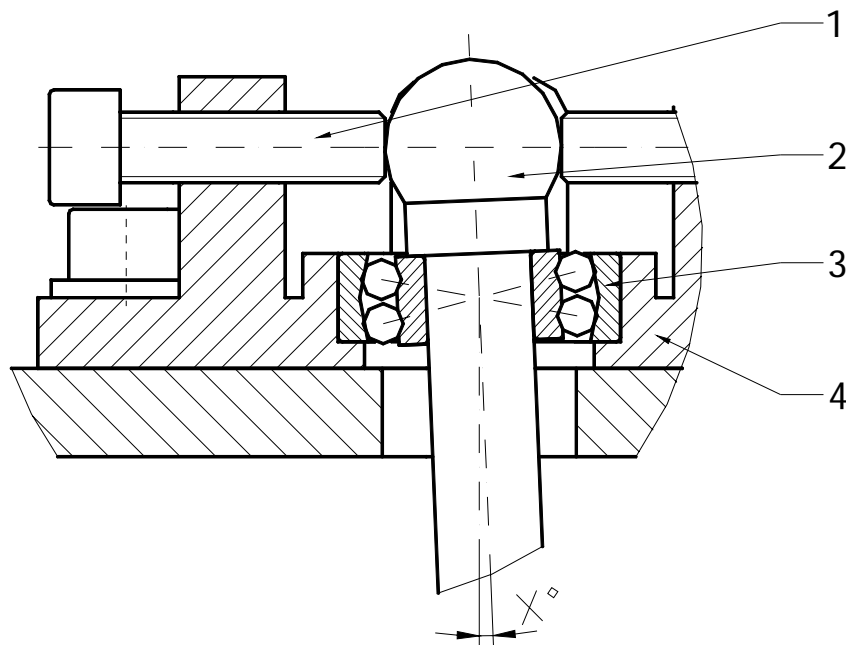
## 5.2.1 Systémy pro středění topné tyče – kompenzátory polohy

Na začátku byly uvažovány různé typy kompenzátorů polohy. Jednoduché kompenzátory, např. kompenzátor s naklápěcím ložiskem (obr.5. 10) popř. kompenzátory souososti modulárních pohonů (firma SMC, FESTO a další) neumožňují oddělit jednotkové pohyby kompenzátoru a tím komplikují proces středění a znehodnocují jeho přesnost. Byl proto převzat a upraven systém využívaný na středění bižuterních forem [19].

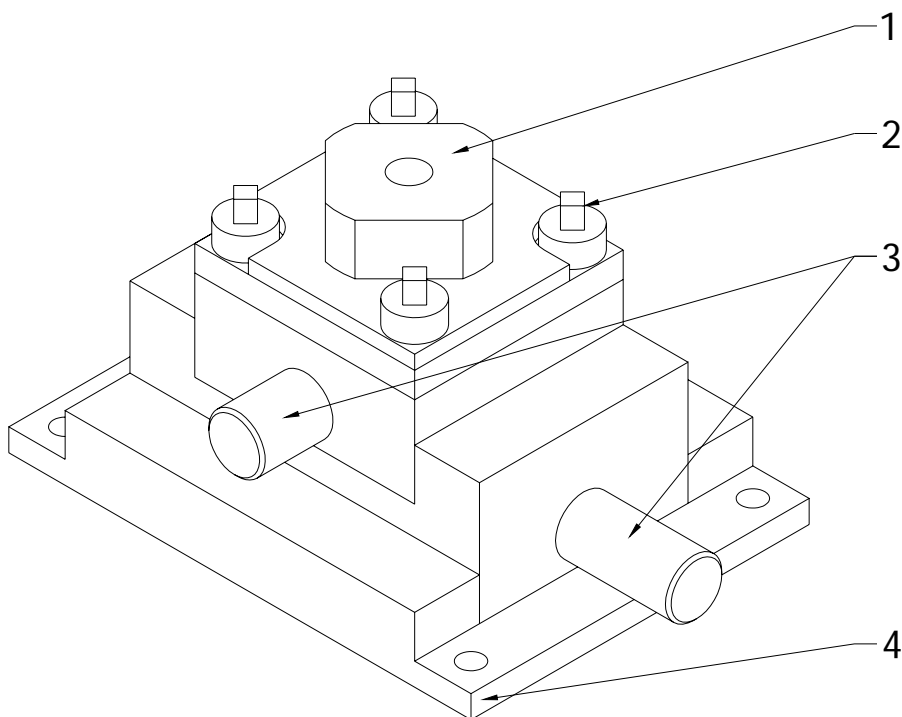
Při lisování skleněné bižuterie se pomocí dvou forem lisuje sklo. Formy musí být „srovnány“ přesně v rovině a v ose lisovací síly. Tuto polohu zde zajišťuje kompenzátor polohy (obr.5. 11). Na katedře se podobný kompenzátor používá . Kompenzátor byl vyroben firmou Desko a umožňuje nezávisle nastavovat dva posuvy a dvě natočení. Posuv v ose topné tyče je realizován posouváním dna formy.

Realizace posuvů na kompenzátoru je řešena pomocí dvojice stavěcích šroubů se standardním metrickým závitem M10. Rozsah posuvů je  $\pm 3$  mm. Natočení desek je uskutečněno pomocí naklápěcích desek, osu rotace představuje váleček o průměru 6 mm. Zvolenou polohu vahadla zafixuje dvojice šroubů M6. Rozsah pohybů je maximálně  $\pm 3^\circ$ .

Délka topné tyče je přibližně 600 mm na tuto vzdálenost je regulace pomocí standardních metrických závitů velmi citlivá, proto byly voleny šrouby s jemným stoupáním.



**Obr.5. 10** Řez kompenzátořem s naklápěcím ložiskem (1 – stavěcí šroub, 2 - kulová hlava čepu, 3 – dvouřadé kuličkové naklápěcí ložisko, 4 – těleso ložiska )



**Obr.5. 11** Kompenzátor Desko ( 1 – přípojovací příruba, 2 – stavěcí šrouby pro naklopení, 3 – stavěcí šrouby pro posuv, 4 – základová deska)

### 5.2.2 Metody středění a odměřování topné tyče

Hlavní problémy středění vytyčuje topná tyč. Kanthal-crussilite je velice křehký materiál, jakákoliv manipulace s ním musí být dostatečně šetrná tak, aby nedošlo k poškození. Touto vlastností topné tyče je nutné respektovat v konstrukci a postupu středění. Topná tyč i dutina formy jsou válcového tvaru, které musejí být souosé.

Základní modely a postupy středění :

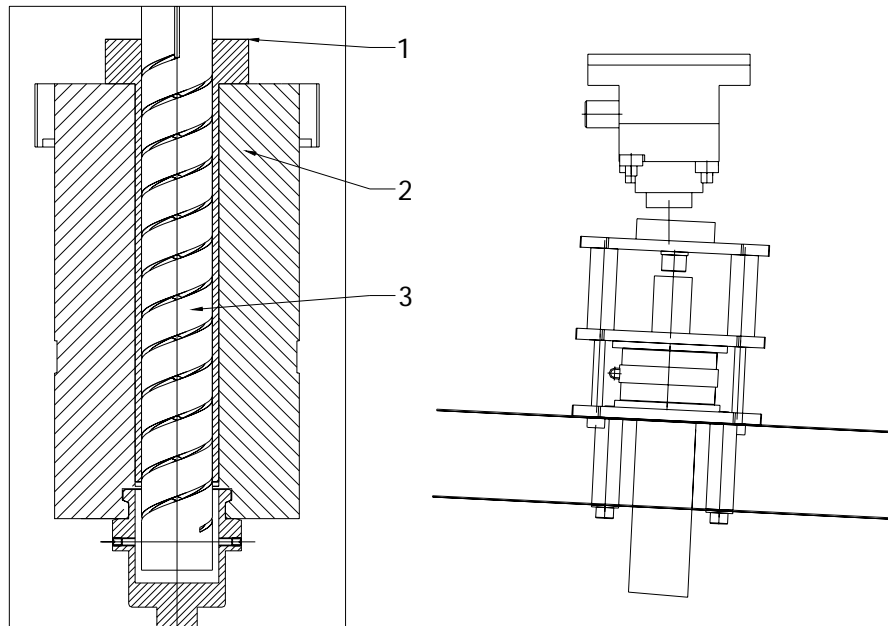
#### 1) Středění formy

Středění formy na osu topné tyče by se muselo provést polohováním celého mechanismu formy včetně odlitku. Tato soustava má velkou hmotnost a manipulační síly by vyšly příliš veliké. Konstrukčně je toto řešení nevýhodné a nepraktické.

#### 2) Středění topné tyče pomocí pouzdra

Středění by se provedlo pomocí plastového pouzdra, které je šetrné k povrchu topné tyče. Nepřipojená topná tyč by se vložila do plastového pouzdra, které by vytvářelo mezeru mezi tyčí a dutinou formy. Tento komplet by se sevřel v dutině formy. Z vrchu by se opatrně připojil fixační člen (kompenzátor) pomocí šroubů. Nakonec by se forma uvolnila a z topné tyče by se sundalo středící pouzdro.

Hlavní nevýhodou se jeví vzniklé napětí mezi topnou tyčí a fixačním členem v době připojování. Vzniklé napětí by mohlo vyvolat prasknutí, nebo by po sejmutí pouzdra nezachovala vystředěná poloha, vlivem vzniklého napětí po připojení.



a) b)  
**Obr.5. 12** Středění pomocí pouzdra (1 – středící pouzdro, 2 – forma, 3 – topná tyč)  
 a – umístění pouzdra, b – vzájemná poloha nevystředěné tyče

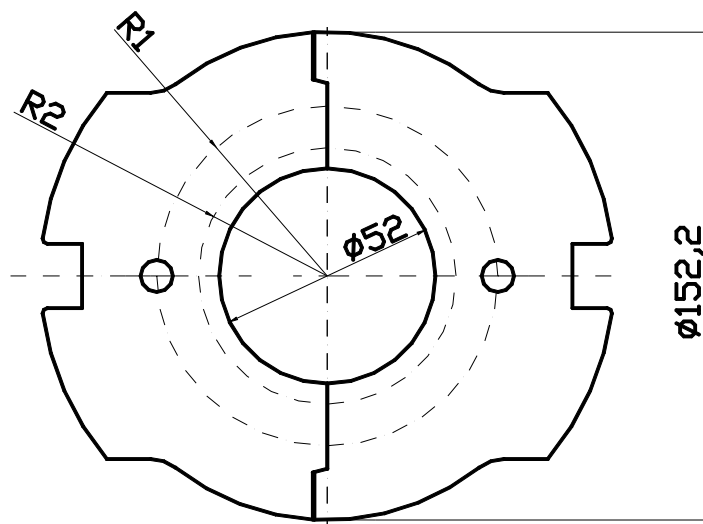
### 3) Středění topné tyče pomocí kompenzátoru

Topná tyč je upnuta do držáku a vystředěna vůči připojovací geometrie. Vystředění je provedeno pomocí hrotu vsunutého do dutiny topné tyče. Oproti tomuto hrotu je umístěn už vystředěný hrot. Poté je držák globaru připojen na kompenzátor. Pomocí indikovaného měřidla se ověří poloha a případně se zkoriguje. Kontrolní měření se provede ve dvou rovinách, ve dně a těsně nad formou. Měření souososti se převede na měření soustřednosti ve dvou rovinách. Nevýhoda tohoto postupu spočívá v komplikovaném odměřování středové polohy. Výhodou je středění topné tyče ve volném prostoru, tyč není uložena.

Z výše uvedených postupů středění je použita metoda 3, která zaručuje šetrnou manipulaci s topnou tyčí.

### 5.3 Návrh tvaru formy

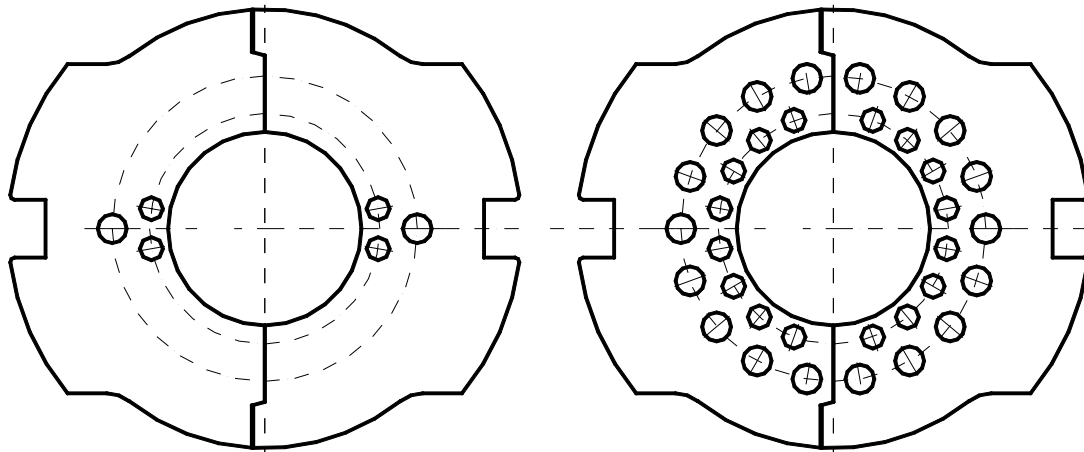
Návrh tvaru formy lze rozdělit na vnější a vnitřní. Vnější tvar formy (obal) je stejných rozměrů jako standardní forma na půllitrovou pivní eurolahev. Vnější tvar je charakterizován válcovou částí rozměru  $D = 152,2$  mm (obr. 5. 13). Vnitřní tvar je tvořen pracovním povrchem, který je přizpůsoben rozměru topné tyče. Dutina laboratorní formy je válcová. Jednoduchý tvar formy je i snadnější pro vytvoření modelu pro analýzu metodou konečných prvků.



**Obr.5. 13** Pohled na čelo formy a rozmístění chladících otvorů v první fázi experimentu. (R1 – poloměr chladících otvorů, R2 – poloměr otvorů pro modifikaci prostupu tepla)

Postup měření na laboratorní stanici bude probíhat v několika fázích. V úvodní fázi experimentu bude v každé půlce formy vyvrtán jeden chladící axiální otvor (obr. 5. 13). Jedna strana formy bude připojena na chlazení vzduchem a druhá část formy bude chlazena vodou. Při měření se potom systém nastaví tak, aby byl tepelně symetrický. To nám umožní porovnat jednotlivé účinky chlazení a udělat si představu o velikosti chladícího výkonu vody. Forma bude ještě pro měření teploty navrtána otvory malého průměru (do 1 mm) ve, kterých budou umístěny termočlánky mapující teplotní pole. Navrtání formy malými otvory pro sondy v radiálním směru je náročné na technologii výroby, zejména v experimentální fázi, kdy je forma hustě provrtána axiálními otvory.

V další fázi přibudou k axiálnímu chladicímu kanálu ještě otvory menšího průměru, které slouží k ovlivňování prostupu tepla (obr.5. 14 a). Obě části forem budou už chlazeny vodou. Po proměření nastaveného modelu se opět forma rozšíří o další chladící otvory a otvory k modifikování prostupu tepla. Rozšiřování probíhá postupně v několika fázích (obr.5. 14 b).



a)

b)

**Obr. 5. 14** Pohled na rozmístění axiálních otvorů v dalších fázích experimentu

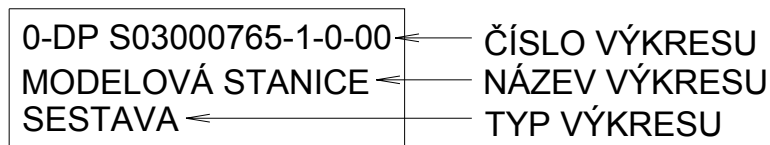
Pro měření na modelové stanici jsou připraveny 4 sady polotovarů forem na, kterých se během laboratorních experimentů bude měnit systém navrtání a rozmístění chladících otvorů.

Středění formy je provedeno přes dno. Dno je opatřeno tvarovým zámkem který přesně zapadá do formy a těsně uzavírá formu. Forma je ještě axiálně uzamčena přes axiální zámkové, které se používají na standardních formách. Pomocí zámků je forma dokonale vystředěná a těsná.

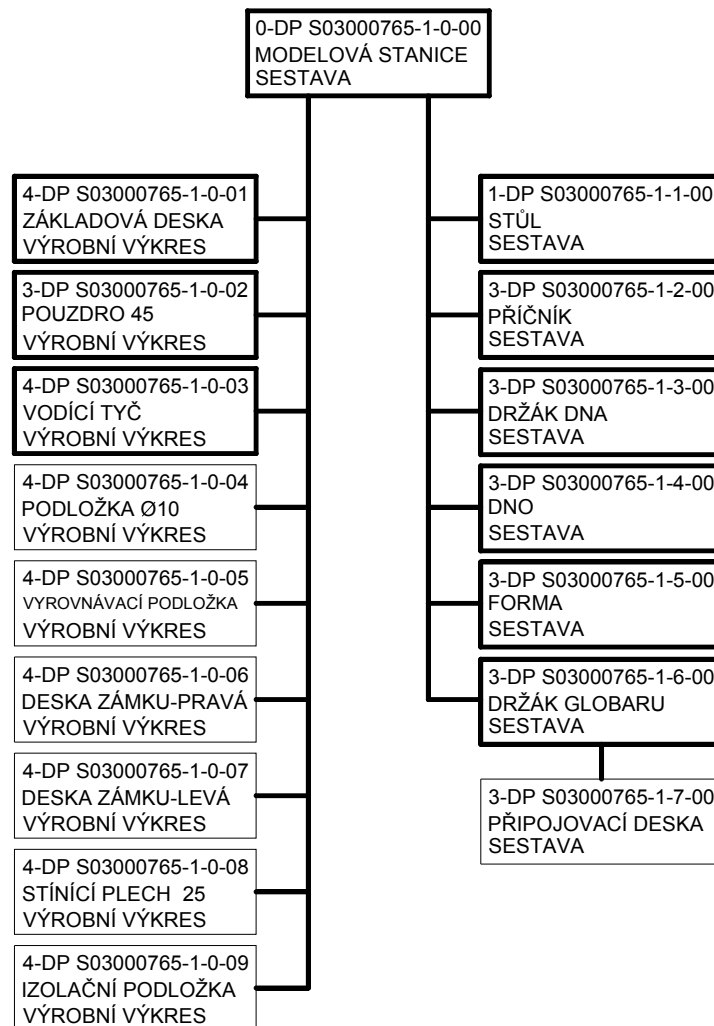


## 5.4 Technická dokumentace modelové stanice

V souladu se zadáním této diplomové práce bylo nutné vypracovat kompletní výkresovou dokumentaci navrženého konstrukčního řešení. Na obr.5. 17. Je znázorněno schéma členění sestavných a výrobních výkresů. Vysvětlení jednotlivých položek členění je na obr.5. 16. Výkresy uvedené na obr.5. 17 v tučných rámečcích jsou přiložené na konci diplomové práce. Kompletní výkresová dokumentace je v datovém souboru v příloženém CD. U výkresů je také přiložen kompletní seznam výkresů.



Obr.5. 16 Vysvětlení položek členění



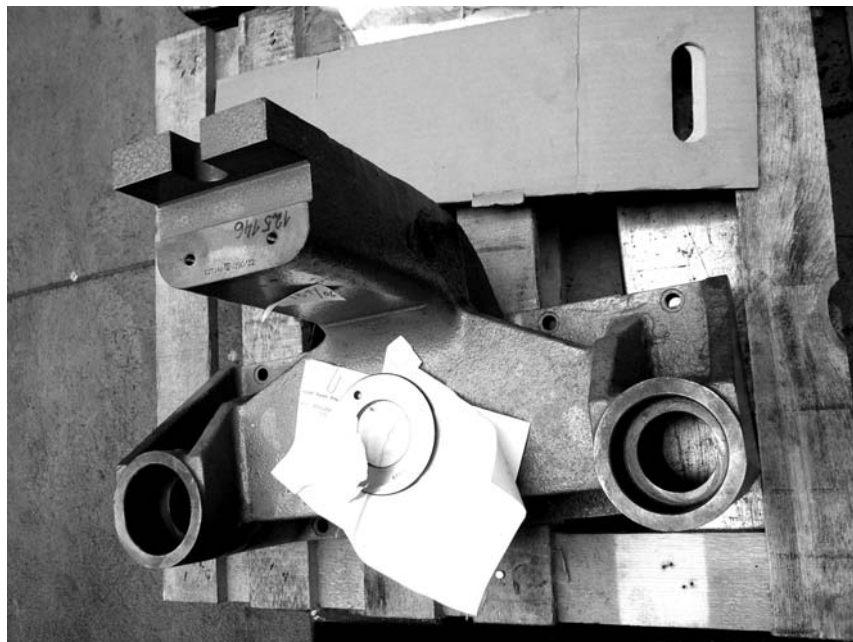
Obr.5.17 Schéma členění výkresové dokumentace

## 5.5 Ukázka modelové stanice

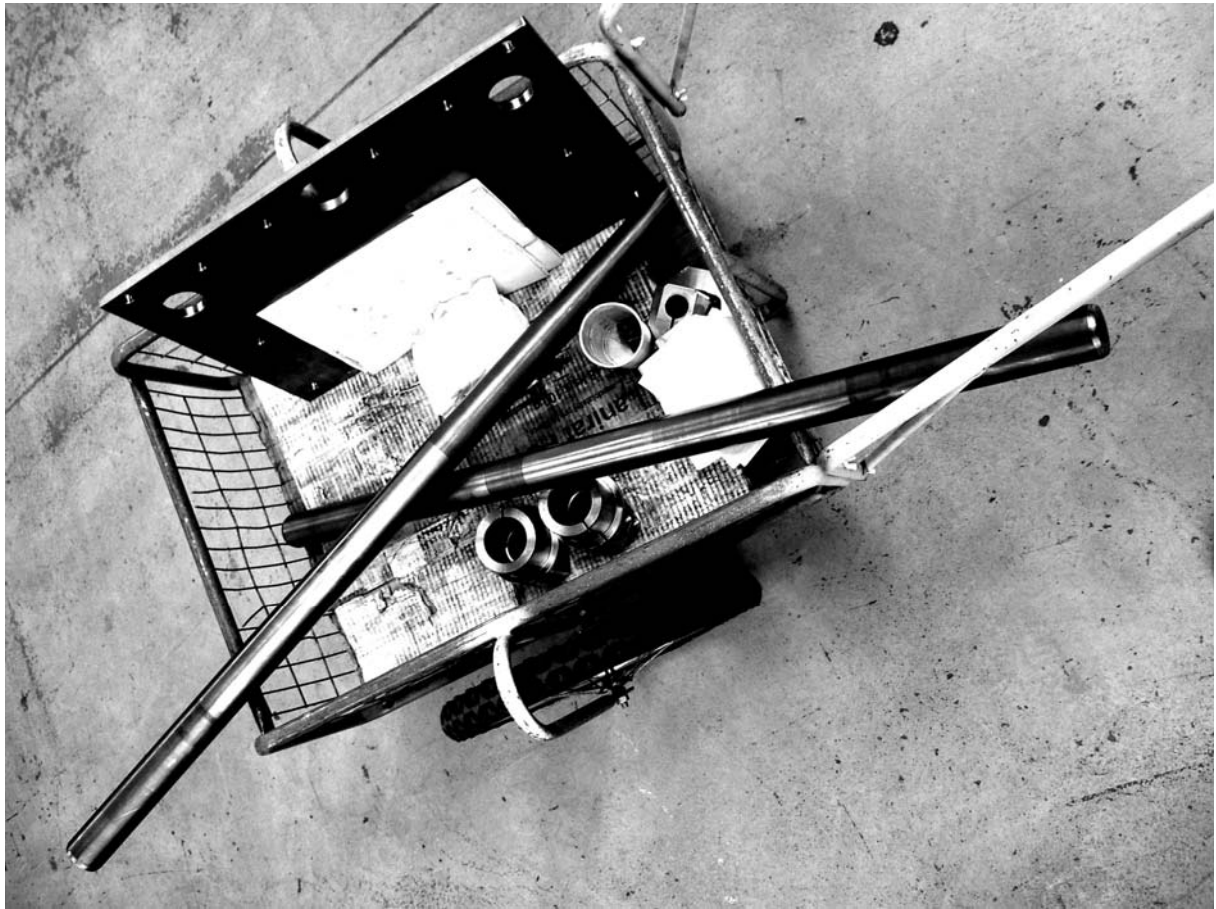
Výroba modelové stanice podle zpracované dokumentace byla zajištěna ve firmě Sklostroj Turnov CZ. Vzhledem ke zpoždění dílčích subdodávek se nepodařilo stanici zcela zkompletovat, proto jsou zde uvedeny fotografie z montáže základního skeletu stanice.



**Obr.5.18** Pohled na konstrukci stolu a příčnicku



**Obr.5. 19** Pohled na odlitek stojanu a podložku



**Obr.5. 20** Na snímku jsou patrné vodící tyče, držák dna a základová deska

## **6. Zhodnocení předpokládaného přínosu řešení**

V poslední kapitole diplomové práce je uvedeno zhodnocení předpokládaného přínosu řešení, které je rozděleno do třech podkapitol. Na začátku je uvedeno zhodnocení dosažených technických parametrů na modelové stanici, dále je popsán návrh postupu experimentální činnosti provedené katedrou sklářských a keramických strojů a je uveden odhad předpokládaného využití výsledků experimentů.

### **6.1 Zhodnocení technických parametrů modelové stanice**

Na modelovou stanici bylo kladeno několik technických požadavků, nejdůležitějším technickým parametrem byl rovnoměrný ohřev dutiny formy. Rovnoměrný ohřev dutiny je zajištěn pomocí kanthalové tyče o velkém tepelném výkonu, vystředěné do otvoru formy. Po laboratorním testování se jeví výkon topné tyče jako dostatečný pro ohřev dutiny. Regulace polohy kompenzátozem je pomocí mikrometrických šroubů dostatečně přesná, a tak nevznikl problém s vystředěním topné tyče, topná tyč a kompenzátor poskytnou očekávané technické parametry.

Dalším technickým parametrem bylo zajistit simulaci výrobního cyklu (zavření a otevření formy v čase). Pohyb dílů formy je uskutečněna pomocí mechanismu formy, skladbu daného mechanismu dodala firma Sklostroj. Mechanismus formy je přesný a zachovává vystředěnou polohu formy i při tepelném zatížení. Pracovní cyklus bude v počáteční fázi laboratorního měření nastává ručně. V dalších etapách měření se nahradí ruční zavírání a uzamykání formy pneumatickým pohonem.

Modelová stanice má modulární konstrukční řešení. Tento parametr se díky konstrukčnímu řešení podařilo také podařilo splnit. Jednoduchým způsobem lze pomocí systému svěrných spojení demontovat základní elementy, eventuálně změnit a doplnit provedení. Pomocí vodících tyčí a držáku dna lze bez větších potíží měnit osovou vzdálenost a horizontální polohu formy. Konstrukce také umožňuje záměnu stávajícího mechanismu formy za jiný, který se standardně používá ve firmě Sklostroj. Rám stolu, který je svařen z dutých profilů je dostatečně tuhý a odolný teplotnímu zatížení.

### **6.2 Předpokládaný rozsahu experimentálního využití modelové stanice**

Experimentální využití modelové stanice je rozvrženo do tří základních etap. Postup experimentálního výzkumu a jeho členění je provedeno tak, aby bylo dosaženo komplexní představy o způsobu regulaci a parametrech kapalinového chlazení ve sklářských formách.

### **1. etapa laboratorního měření:**

V této etapě se provede základní srovnání technických parametrů vzduchového a kapalinového chlazení. Dutina formy bude otápěna pomocí kanthalové tyče. Jedna polovina formy bude chlazena proudícím vzduchem ve vyvrtaném kanálu formy a druhá polovina bude chlazena kapalinou protékajícím symetricky stejně umístěným kanálem. Forma na začátku měření bude vykazovat nerovnoměrně rozložené tepelné pole, díky regulaci průtoku chladící kapaliny, nebo vzduchu dosáhneme vyrovnání teplot v obou polovinách formy. Pomocí tohoto měření si uděláme představu o účinnosti kapalinového chlazení oproti vzduchovému. Naměřené hodnoty budou použity v následujících etapách a budou vytvářet okrajové podmínky pro chlazení kapalinou.

### **2. etapa laboratorního měření:**

V druhé etapě bude testována závislost průtokového množství chladící kapaliny na velikosti odvedeného tepla z dutiny formy. Srovnání se vzduchovým chlazením zde již nebude prováděno. Další možností laboratorního měření je zabudování termostatů do tělesa formy, které budou připojeny do chladicího okruhu, kde budou automaticky regulovat průtokové množství chladící kapaliny.

### **3. etapa laboratorního měření:**

Třetí etapa se bude věnovat modifikaci sdílení tepla v tělese formy. Modifikace budou mít charakter insertů vkládaných do kanálů určených pro ovlivňování prostupu tepla. Vzájemné kombinace a umístění inzerťů v závislosti na rozložení teplotního pole bude hlavním předmětem měření.

## **6.3 Předpokládané využití výsledků experimentů**

Získané výsledky z jednotlivých etap měření nám umožní si udělat představu o využitelnosti kapalinového chlazení ve výrobě obalového skla na sekčních strojích. Z výsledků budou také zřejmé limitní hodnoty pro použití kapalinového chlazení. Na základě výsledků měření budou vytýčeny další jednotlivé úkoly, které již budou situovány přímo na standardní sekční stroj. Na konci celého výzkumu by měl být konstrukčně popsán sekční stroj, který využívá regulovaného kapalinového chlazení k odvodu tepla z pracovního části formy. Tento stroj by měl umožňovat standardní sériovou výrobu obalového skla. Konstrukční řešení nesmí být zatíženo patentovým omezením.

## Závěr

Cílem diplomové práce bylo vytvořit podmínky pro laboratorní výzkum kapalinového chlazení sklářských forem na sekčních strojích.

Diplomová práce je rozčleněna do pěti kapitol. První kapitola je věnována teoretickému rozboru, ve kterém je uveden princip sdílení tepla prouděním, teorie podobnosti, druhy proudění a v závěru kapitoly je popsáno matematické a fyzikální modelování. V kapitole druhé je uveden rozbor současného stavu chlazení forem, který se postupně zabývá radiálním, axiálním a ostatními způsoby chlazení sklářských forem, kde nakonec je uvedeno kapalinové chlazení. Třetí kapitola je věnována studiu nových alternativních principů chlazení, na začátku je uveden přehled patentově chráněných principů kapalinového chlazení a v další kapitole je naznačen návrh nového způsobu kapalinového chlazení a je uveden návrh flexibilního přívodu kapaliny do formy. Čtvrtá kapitola předkládá koncepční řešení modelové stanice, které zahrnuje schéma chladicího okruhu, základní rozměry modelové stanice a způsob ohřevu dutiny formy. Kapitola 5. uvádí vlastní konstrukční řešení, které popisuje rám stolu, metody středění topné tyče a návrh tvaru formy.

V kapitole 6. je předloženo zhodnocení předpokládaného přínosu řešení, které zahrnuje, zhodnocení technických parametrů modelové stanice a postup experimentální činnosti, na konci kapitoly je popsáno předpokládané využití výsledků experimentů.

Modelová stanice bude sloužit vědeckým pracovníkům a studentům katedry sklářských a keramických strojů na Technické univerzitě při řešení výzkumu kapalinového chlazení sekčních strojů.

## Seznam použité literatury

- [1] CIBULKA, J.: Chlazení forem strojů na výrobu obalového skla, kandidátská disertační práce, VŠST, Liberec, 1984, 107s.
- [2] KRSEK, L.: Netradiční způsob chlazení sklářských forem, diplomová práce, VŠST, Liberec, 1981, 62 s.
- [3] KUDRNÁČ, M.: Chlazení forem strojů na obalové sklo, diplomová práce, VŠST, Liberec, 1983, 69 s.
- [4] SMRČEK, A.: Strojní tvarování skla, SNTL, Praha, 1981.
- [5] SÝKORA, K.: Základy sdílení tepla, SNTL, Praha, 1962.
- [6] VÍT, T.: Základy přenosu tepla a hmoty I., TUL, Liberec, 1998.
- [7] BELDA, J.: Sklářské a keramické stroje II., TUL, Liberec, 1986.
- [8] MATOUŠEK, I.: Modelování v automatizované výrobě lisovaného skla, disertační práce, TUL, Liberec, 2005, 27 s.
- [9] BELDA, J. : Sklářské a keramické stroje I.,TUL, Liberec, 1994.
- [10] Patentová dokumentace od firmy Sklostroj.
- [11] Katalog výrobků firmy HANSA-FLEX, <http://www.hansaflex.cz>.
- [12] NOVOTNÝ, F.: Výsledky kalorimetrického měření v a.s. VETROPACK MORAVIA GLASS Kyjov, TUL, Liberec, 2005, 9 s.
- [13] Technická dokumentace od firmy SKLOSTROJ TURNOV CZ.
- [14] KOPALOVÁ, H.: Chlazení sklářských forem, diplomová práce, VŠST, Liberec, 1982, 70 s.
- [15] Katalog výrobků firmy KANTHAL, <http://www.kanthal.com>.
- [16] Katalog výrobků firmy IEW, <http://www.iew.de>.
- [17] Katalog výrobků firmy KIPP, <http://www.kipp.com>.
- [18] Technická dokumentace od firmy DESKO.
- [19] DRASTÍK, F. : Strojnické tabulky pro konstrukci i dílnu, Montanex, Ostrava, 1999.