

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Konstrukce strojů a zařízení
Zaměření: Sklářské a keramické stroje

Dávkování stonkolisu

Karel Fiala

18 461

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jan CIBULKA, CSc.
Konzultant: Ing. Karel Vedral, Preciosa a.s. Jablonec nad Nisou

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 62
Počet tabulek: 07
Počet obrázků: 27
Počet výkresů: 05
Počet příloh: 01



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

Katedra sklářských a keramických strojů

Studijní rok: 2000/2001

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení **Karel F i a l a**

obor **23 - 17 - 8 Konstrukce strojů a zařízení**

zaměření **Sklářské a keramické stroje**

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

Dávkování stonkolisu

Zásady pro vypracování:

(uved'te hlavní cíle diplomové práce a doporučené metody pro vypracování)

Stonkolis je dávkován ručním náběrem, což nevyhovuje požadavkům na kvalitu z hlediska šlirovitosti a bublin. Předběžný rozbor vad, kapacitní výpočet a prognóza odbytu ukázaly nutnost aplikace spodního výtoku pro automatické dávkování 2 až 3 stonkolisů.

Ve vaší DP proved'te:

1. Rozbor současného stavu výroby na stonkolisech v Preciose a. s. z hlediska sortimentu, kapacitních údajů, používaných lisů a požadavků na dávkování.
2. Koncepční návrh nového řešení dávkování v alternativách a výběr nejlepší varianty.
3. Konstrukční zpracování vybrané alternativy formou sestavných výkresů a podsestav vybraných uzlů.
4. Technickoekonomické zhodnocení

Forma zpracování diplomové práce:

- průvodní zpráva 40 - 50 stran textu
- grafické práce výkresová dokumentace podle potřeby

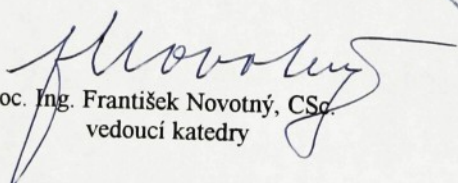
Seznam literatury (uved'te doporučenou odbornou literaturu):

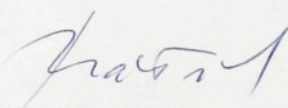
Technické podklady Preciosy a. s. ke stonkolisu.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jan Cibulka, CSc.

Konzultant diplomové práce: Ing. Karel Vedral - Preciosa, a. s.




Doc. Ing. František Novotný, CSc.
vedoucí katedry


Doc. Ing. Ludvík Prášil, CSc.
děkan

V Liberci dne 26. 2. 2001

Platnost zadání diplomové práce je 15 měsíců od výše uvedeného data. Termíny odevzdání diplomové práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

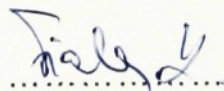
Prohlášení k využití výsledků diplomové práce:

Jsem si vědom toho, že diplomová práce je majetkem školy a že s ní nemohu sám disponovat a že diplomová práce může být zapůjčena za účelem využití jejího obsahu.

Beru na vědomí, že po pěti letech si mohu diplomovou práci vyžádat v Univerzitní knihovně Technické univerzity v Liberci, kde je uložena.

Místopřísežné prohlášení

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



Karel Fiala
Dolní Poustevna 415
407 82

TÉMA:

DÁVKOVÁNÍ SKELNÉ DÁVKY DO STONKOLISU

ANOTACE:

Cílem této diplomové práce je navrhnout zařízení pro automatické dávkování skelné dávky o hmotnosti 200 až 500g do 2 až 3 stonkolisů ze spodního výtoku v časovém horizontu 60 až 120 sekund pro hutní provoz sklárny PRECIOSA a. s. v Jablonci nad Nisou.

THEME:

FEEDING THE GLASS GOB TO THE SEMI-AUTOMATIC PRESS

ANNOTATION:

The aim of this dissertation is to design the machinery for automatical feeding the glass gob with the weight of 200 to 500 grammes to 2 to 3 semi-automatic press from the lower flow-out in space of time from 60 to 120 seconds. It has been projected for the metallurgy department or the glass works PRECIOSA a.s. in Jablonec nad Nisou.

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Cibulkovi, CSc. z Katedry sklářských a keramických strojů, Technické univerzity v Liberci za odborné vedení a konzultantovi Ing. Karlu Vedralovi z Preciosa a.s. za poskytnutý čas a cenné připomínky v průběhu řešení diplomové práce.



Obsah

Obsah	6
Seznam symbolů a zkratek	8
1. Úvod	11
2. Rozbor současného stavu	12
2.1. Úkol	12
2.2. Podmínky pro zachování kvality	12
2.3. Přenášený materiál	12
2.4. Rozměry	14
2.5. Časové údaje	14
3. Uspořádání pracoviště	15
3.1. Varianta A – uspořádání stonkolisů do přímky	15
3.2. Varianta B – uspořádání stonkolisů symetricky do kruhu	16
3.3. Varianta C – uspořádání stonkolisů nesymetricky do kruhu	17
3.4. Výběr varianty uspořádání pracoviště	18
4. Konstrukce komory	20
4.1. Varianta A se společným dnem	20
4.2. Varianta B s odděleným dnem	21
4.3. Výběr varianty konstrukčního řešení komory	22
5. Tepelné výpočty	23
5.1. Vliv skloviny	23
5.1.1. Tepelné vlastnosti skloviny	23
5.1.2. Teplota lepení skla a kovu (keramiky)	25
5.2. Zákonitosti sdílení tepla ze skloviny do komory	25
5.2.1. Definice problému	25
5.2.2. Sledování přestupu tepla ze skloviny do formy	26
5.2.3. Prostup tepla stěnou komory	29
5.2.4. Zákonitosti chlazení komory	30
5.3. Výpočet přenosu tepla ze skloviny do komory Ø65 z šedé litiny – 42 2420	32
5.4. Výpočet přenosu tepla ze skloviny do komory Ø75 z šedé litiny – 42 2420	35
5.5. Výpočet přenosu tepla ze skloviny do trnu Ø65 z šedé litiny – 42 2420	36
5.6. Výpočet přenosu tepla ze skloviny do trnu Ø75 z šedé litiny – 42 2420	38



5.7. Výpočet přenosu tepla ze skloviny do dna pro $\varnothing 65$ z šedé litiny – 42 2420	40
5.8. Výpočet přenosu tepla ze skloviny do dna pro $\varnothing 75$ z šedé litiny – 42 2420	42
5.9. Rozložení teploty ve sklovině v komoře $\varnothing 65$	43
6. Návrh pohonů	45
6.1. Návrh pohonu pro přenos komory	47
6.2. Návrh pohonu pro vertikální pohyb trnu	49
6.3. Návrh pohonu pro odsun mechanismu vertikálního pohybu trnu	52
6.4. Návrh pohonu pro otevírání dna	54
6.5. Výpočet deformace ramene a namáhání jeho uložení	55
7. Časový harmonogram	58
7.1. Popis časového harmonogramu	59
8. Technicko ekonomické zhodnocení	60
9. Závěr	61
Seznam použité literatury	62

Seznam symbolů a zkratek

a	tepelná difuzivita [m^2s^{-1}]
B	konstanta závislá na materiálových vlastnostech skla a desky [$\text{Jm}^{-1}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$]
c_f	měrná tepelná kapacita desky [$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$]
c_{pv}	měrná tepelná kapacita vzduchu [$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$]
c_s	měrná tepelná kapacita skla [$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$]
d	průměr drátu pružiny [m]
D	průměr pružiny [m]
E_f	tepelná akumulční schopnost desky [$\text{Jm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$]
E_s	tepelná akumulční schopnost skla [$\text{Jm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$]
g	gravitační zrychlení [ms^{-2}]
Gr	Grashofovo kritérium
G	modul pružnosti ve smyku [MPa]
h	hloubka žeber [m]
h	maximální výška vysunutí [m]
i	označení variant
j	počet kritérií
l	charakteristický rozměr [m]
l_1	výška trnu [m]
l_3	hloubka větracího otvoru [m]
L	kinetický potenciál; Lagrangeova funkce
m	hmotnost dávky [g]
M_φ	zatěžující moment [Nm]
n	počet činných závitů
Nu	Nusseltovo kritérium
Pr	Prandtlovo kritérium
r_1	vnitřní poloměr komory [m]
r_2	vnější poloměr komory [m]
r_3	poloměr větracího otvoru [m]
q_i	zobecněná souřadnice
Q	teplo předané sklovinou [J]



Q_i	obecná vnější síla
S_1	plocha vnitřního povrchu desky [m^2]
S_2	plocha vnějšího povrchu desky [m^2]
s	šířka desky [m]
s	stoupání šroubu [m]
T_e	teplota vnějšího povrchu desky [$^{\circ}C$]
T_f	teplota ochlazeného povrchu desky [$^{\circ}C$]
$\bar{T}_i$	střední teplota povrchu desky [$^{\circ}C$]
T_k	teplota kontaktní [$^{\circ}C$]
T_s	teplota skloviny [$^{\circ}C$]
$T_{urč}$	střední určovací teplota [$^{\circ}C$]
T_v	teplota chladicího vzduchu [$^{\circ}C$]
U_i	užitnost i-té varianty v absolutním vyjádření
w	rychlost chladicího vzduchu [ms^{-1}]
w_j	váha j-tého kritéria
W_K	kinetická energie
W_P	potenciální energie
x_{ji}	hodnota j-tého kritéria i-té varianty
z	počet žeber
z	dráha [m]
$\dot{z}$	rychlost [ms^{-2}]
α_e	součinitel přestupu tepla z desky do okolí [$Wm^{-2}K^{-1}$]
β	součinitel tepelné roztažnosti [K^{-1}]
η	dynamická viskozita [Pas]
λ_f	součinitel tepelné vodivosti desky [$Wm^{-1}K^{-1}$]
λ_s	součinitel tepelné vodivosti skla [$Wm^{-1}K^{-1}$]
λ_v	součinitel tepelné vodivosti vzduchu [$Wm^{-1}K^{-1}$]
ν	kinematická viskozita [m^2s^{-1}]
ν_v	kinematická viskozita vzduchu [m^2s^{-1}]
ρ_f	měrná hmotnost desky [kgm^{-3}]
ρ_s	měrná hmotnost skla [kgm^{-3}]



ρ_v	měrná hmotnost vzduchu [kgm^{-3}]
σ_D	dovolené napětí v tahu [MPa]
σ_{Dsv}	dovolené napětí svarového spoje v tahu nebo tlaku [MPa]
τ_{Dsv}	dovolené napětí svarového spoje ve smyku [MPa]
$\tau_{//}$	napětí svarového spoje ve smyku rovnoběžné se svarem [MPa]
$\tau_{\perp}$	napětí svarového spoje ve smyku kolmo na svar [MPa]
τ_k	doba styku skloviny s deskou [s]
τ_o	doba cyklu [s]
φ	úhel [rad]
$\dot{\varphi}$	úhlová rychlost [rads^{-1}]
$\ddot{\varphi}$	úhlové zrychlení [rads^{-2}]

1. Úvod

Sklářské závody Preciosa a.s. mají v českých zemích i ve světě dlouholetou tradici. Hlavní výrobní program Preciosy se skládá z broušených skleněných dílců pro bižuterii, tj. strojně broušených a leštěných bižuterních kamenů, jako jsou šatony (imitace diamantů), které tvoří většinu produkce a exportu Preciosy.

Pokud jde o hotové výrobky, Preciosa vyrábí exkluzivní skleněnou bižuterii, růžence, klasické i moderní lustry a další typy svítidel nejrůznějších stylů a velikostí (od nejmenších nástěnných svícňů až po velké lustry, které firemní specialisté montují přímo na místě), dále broušené křišťálové figurky a předměty a broušené dárkové hranoly vyrobené z optického skla v různých barvách a povrchových úpravách.

Tato diplomová práce vychází z požadavků Závodu 14 Preciosa a.s. a zabývá se dávkováním skloviny do stonkolisů pro budoucí pracoviště v Závodě 9 preciosa a.s. Předběžný rozbor vad, kapacitní výpočet a prognóza odbytu ukázaly nutnost aplikace spodního výtoku pro automatické dávkování 2 až 3 stonkolisů.

Diplomová práce se zabývá vhodnou alternativou uspořádání pracoviště, aby stroj byl co možná nejjednodušší a byl přitom zachován nutný prostor pro obsluhu stonkolisů. V dalších kapitolách jsou uvedeny kroky řešení členěné v souladu s obsahem diplomové práce.



2. Rozbor současného stavu

Stonkolis je dávkován ručním náběrem, což již nevyhovuje současným požadavkům na vnitřní kvalitu a to hlavně z hlediska šířovitosti a bublin. Požadovaná je šířovitost stupně 1 maximálně 2. Bubliny nad 0,2 mm se nesmějí vyskytovat vůbec.

2.1. Úkol

Kvalitní dávku skla automaticky dopravit z pod výtoku do 2 nebo 3 stonkolisů.

2.2. Podmínky pro zachování kvality

- Dávka musí zachovat svoji vertikální orientaci (teplejší sklo nahoře), bez překlápění.
- Minimální ochlazení dávky během přenosu $\Rightarrow$ konstrukce a materiál komory, max. rychlost přenosu dávky.
- Dávka musí z přenášečí komory do vstřikovací komory „spadnout“, nesmí být deformována $\Rightarrow$ konstrukce otevíracího mechanismu přenášečí komory.
- Konstrukční řešení musí umožnit výměnu přenášečí komory $\varnothing 65\text{mm}$ a $\varnothing 75\text{mm}$.
- Komora musí být plněna rovnoměrně, tak aby nebyl narušován povrch skloviny.

2.3. Přenášený materiál

Olovnatý křišťál 30%Pb

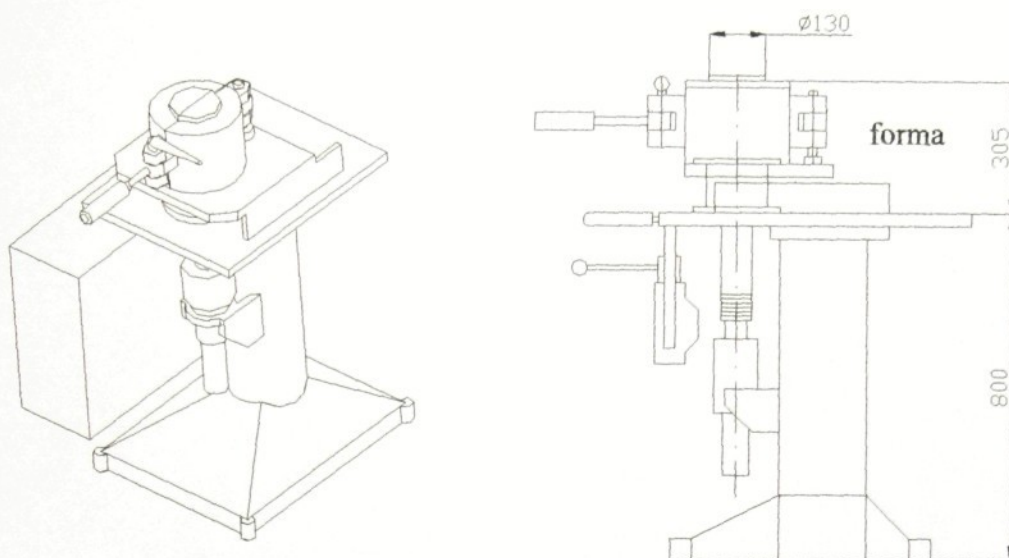
Hmotnost dávky.....200 – 500 g

Teplota dávky950 – 990 °C

Průměr dávky.....65; 75 mm

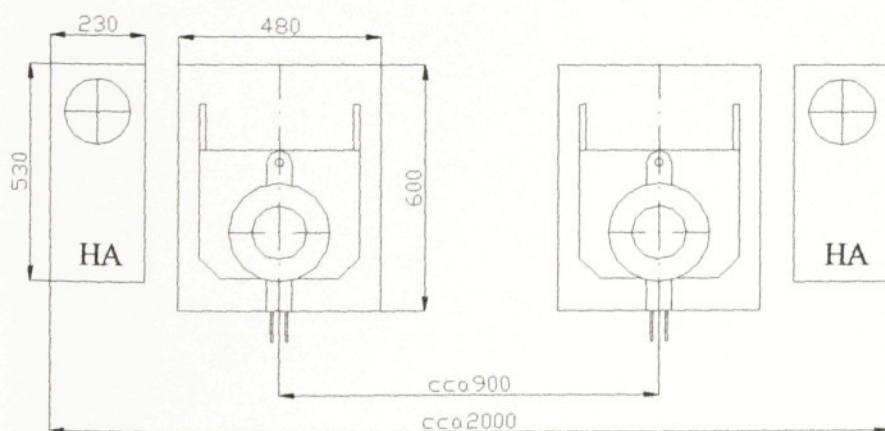
John o f ... [mm]

Vstřikovací lis



obr. 1. vstřikovací lis SP05-2

Příklad uspořádání pracoviště



obr. 2. příklad uspořádání pracoviště



2.4. Rozměry

Výtok z vany je 1500mm nad podlahou, 15mm pod výtokem je prostor pro nůžky. Komora může najed pod výtok na vzdálenost 20mm. Souosost s výtokovým otvorem musí být ± 1 mm. Komora bude válcovitého tvaru o vnitřním průměru 65 respektive 75mm. Dno komory musí být posuvné ve vertikálním směru tak, že na počátku plnění bude v horní úvrati a při procesu plnění se bude pohybovat směrem dolů tak, aby komora byla rovnoměrně vyplněna.

Vtok do formy je 1105mm nad podlahou. Komora může najed 5mm nad vtok. Souosost s vtokem musí být ± 1 mm. Dno komory se odsune a sklovina spadne do formy. Minimální vzdálenost mezi jednotlivými stonkolisy je 900mm.

2.5. Časové údaje

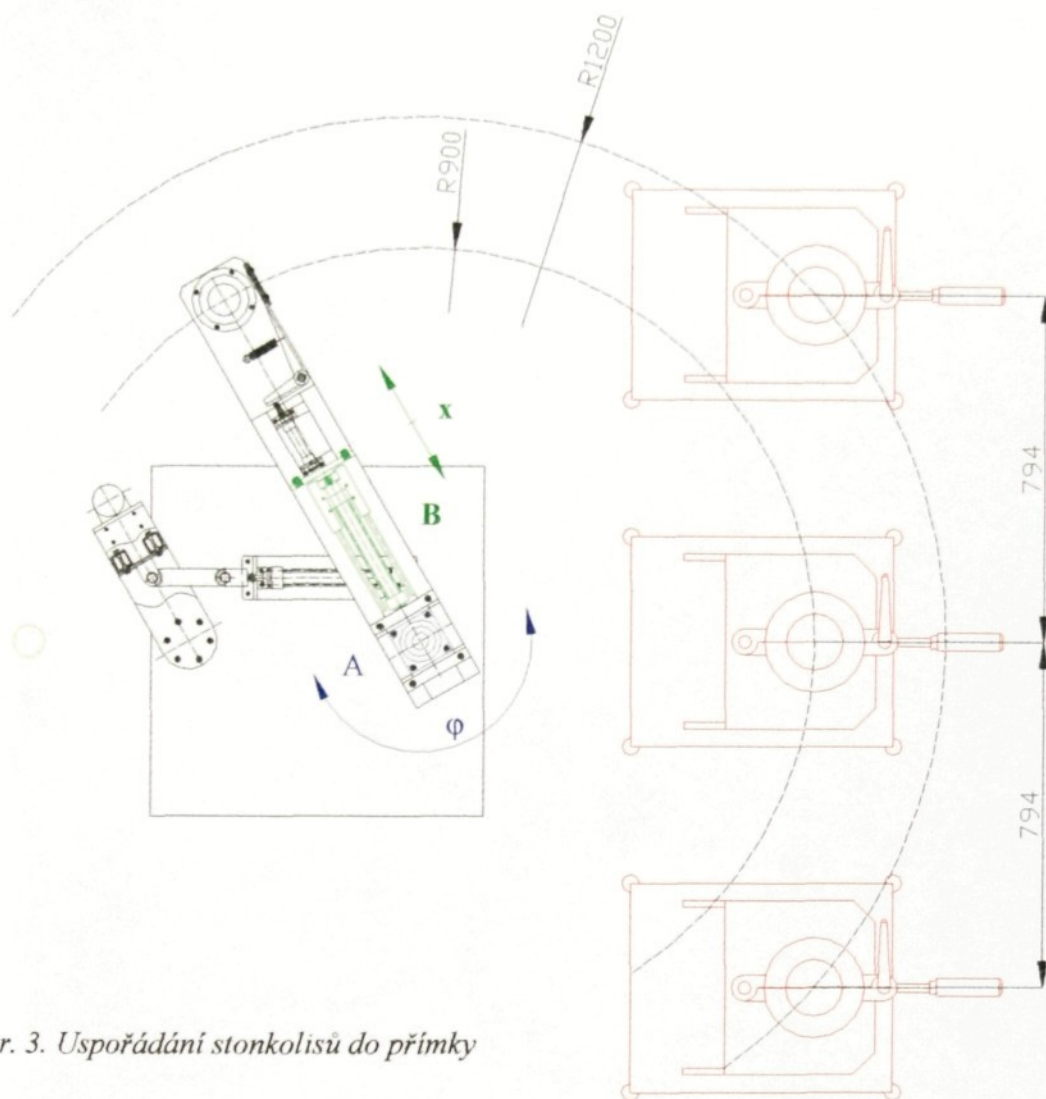
Výkon stonkolisu je 1ks / 60 – 120s

Doba natečení dávky je 10s

Maximální doba pro zadržení dávky ve výtoku, aniž by došlo ke zhoršení kvality skloviny je 10s. Pokud by nebyla tato doba dodržena, musí se provést mezistřih pro odstranění nekvalitní skloviny.

3. Uspořádání pracoviště

3.1. Varianta A – uspořádání stonkolisů do přímky



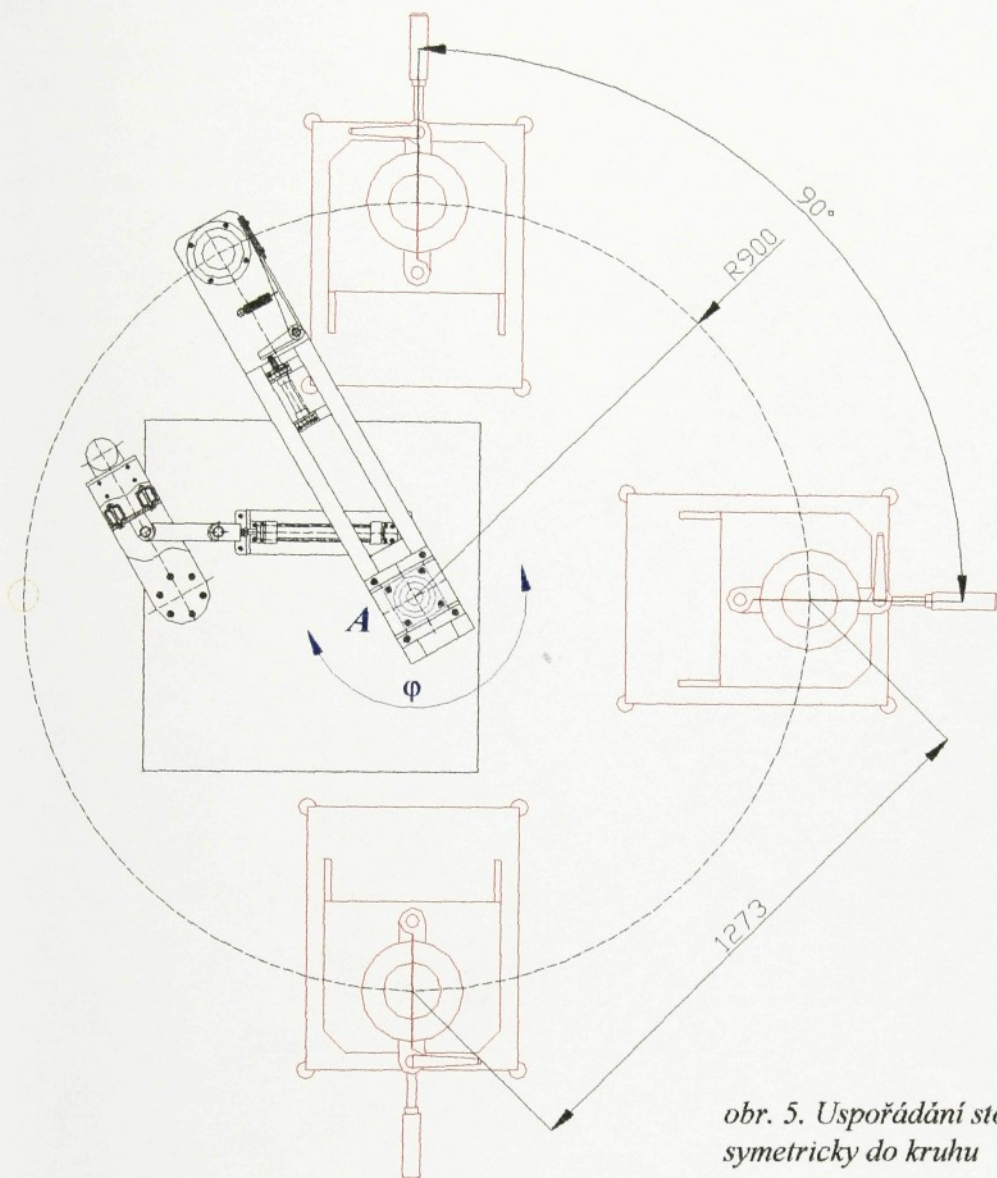
obr. 3. Uspořádání stonkolisů do přímky

Stonkolisy jsou uspořádány tak, že krajní stonkolisy leží na kružnici o poloměru 1200 mm a prostřední leží na kružnici o poloměru 900 mm, spolu s ním je na této kružnici výtok skloviny z agregátu. Vzdálenost mezi jednotlivými stonkolisy je 794 mm.

Manipulátor tak bude konat dva pohyby.

1. Rotační pohyb bude zajištěn motorem A, jehož osa rotace bude ve středu kružnic na nichž leží stonkolisy.
2. Přímočarý pohyb v rovině xy bude zajištěn motorem B, jenž bude připevněn na otáčejícím se rameni.

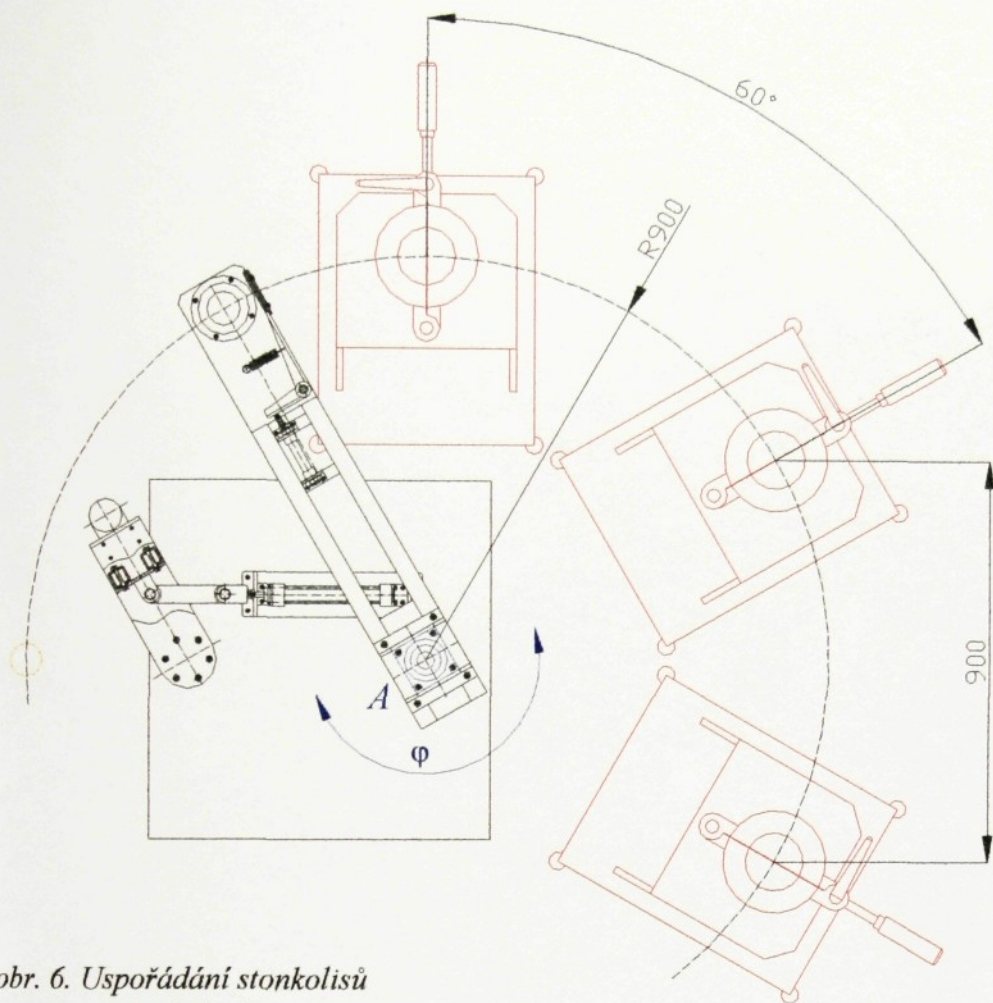
3.2. Varianta B – uspořádání stonkolisů symetricky do kruhu

obr. 5. Uspořádání stonkolisů
symetricky do kruhu

Všechny stonkolisy a i výtok skloviny z agregátu leží na jedné kružnici o poloměru 900 mm. Úhel mezi výtokem skloviny a prvním stonkolisem je 90° . Úhel mezi jednotlivými stonkolisy je též 90° , čemuž odpovídá vzdálenost 1273 mm.

Manipulátor bude konat jeden pohyb, ten bude zajištěn rotačním motorem A, jehož osa rotace bude ve středu kružnice na níž leží stonkolisy.

3.3. Varianta C – uspořádání stonkolisů nesymetricky do kruhu



obr. 6. Uspořádání stonkolisů
nesymetricky do kruhu

Všechny stonkolisy a i výtok skloviny z agregátu leží na jedné kružnici o poloměru 900 mm. Úhel mezi výtokem skloviny a prvním stonkolisem je 90° . Úhel mezi jednotlivými stonkolisy je 60° , čemuž odpovídá vzdálenost 900mm.

Manipulátor bude konat jeden pohyb, ten bude zajištěn rotačním motorem A, jehož osa rotace bude ve středu kružnice na níž leží stnkolisy.



3.4. Výběr varianty uspořádání pracoviště

Rozhodovací analýza

K výběru konečné varianty pro uspořádání pracoviště bude použita rozhodovací analýza. Tato metoda patří do kategorie heuristických. Účelně spojuje přednosti empirického a exaktního rozhodování.

Princip rozhodovací analýzy spočívá v několika postupných krocích, kdy je nejprve sestaven soubor hodnotících kritérií užitelnosti (popř. rizik). Jednotlivým variantám je přiřazeno hodnocení daného kritéria ze stobodové stupnice. Pro posouzení závažnosti kritérií je sestaveno pořadí pomocí metody párového srovnání a následně je jim přiřazena váha. Poté je počítán vážený průměr ze vztahu

$$U_i = \frac{\sum w_j \cdot x_{ij}}{n}$$

kde

j počet kritérií

U_i Užitelnost i -té varianty v absolutním vyjádření

w_j váha j -tého kritéria

x_{ji} Hodnota j -tého kritéria i -té varianty

i označení variant

Pro lepší porovnání variant se používá užitelnost v relativním vyjádření ve vztahu k absolutně ideální variantě splňující všechna kritéria na 100 bodů.

Pro rozhodovací analýzu uspořádání pracoviště byla zvolena tato kritéria

1. konstrukční jednoduchost
2. přístupnost obsluhy
3. rychlost přenosu
4. přesnost polohování
5. zastavěný prostor

a zvolené varianty

- A. uspořádání stonkolisů do přímky
- B. uspořádání stonkolisů symetricky do kruhu
- C. uspořádání stonkolisů nesymetricky do kruhu

Tab. 1. Rozhodovací analýza

						A		B		C	
						Hodnota		Hodnota		Hodnota	
						Pros- ta	Váže- ná	Pros- ta	Váže- ná	Pros- ta	Váže- ná
1 2 3 4 2 4 3 4	Poř. čís	Název kritéria	Počet voleb	Pořadí význam- nosti	váha						
	1	konstrukční jednoduchost	1	4	2	60	120	70	140	70	140
	2	přístupnost obsluhy	3	2	4	90	360	60	240	90	360
	3	rychlost přenosu	2	3	3	80	240	70	210	90	270
	4	přesnost polohování	4	1	5	60	300	70	350	70	350
	5	zastavěný prostor	0	5	1	80	80	80	80	90	90
Celkem							1100		1020		1210
Užitnost v relativním vyjádření [%]							73%		68%		81%
Pořadí alternativ podle užitnosti							2.		3.		1.

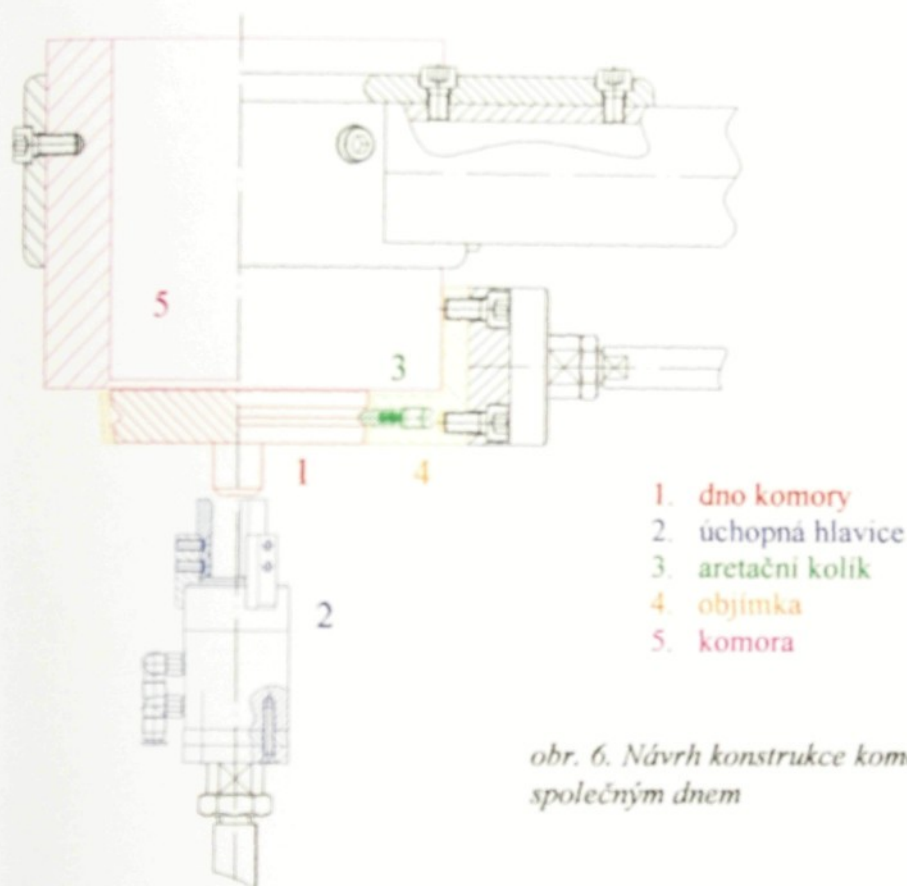
Z výsledků rozhodovací analýzy je patrné, že nejvýhodnější je varianta C, uspořádání stonkolisů nesymetricky do kruhu.

4. Konstrukce komory

Při konstrukci komory je nutné zajistit dva pohyby,

1. vertikální pohyb dna uvnitř komory při plnění
2. horizontální pohyb dna mimo komoru při vyprazdňování

4.1. Varianta A se společným dnem



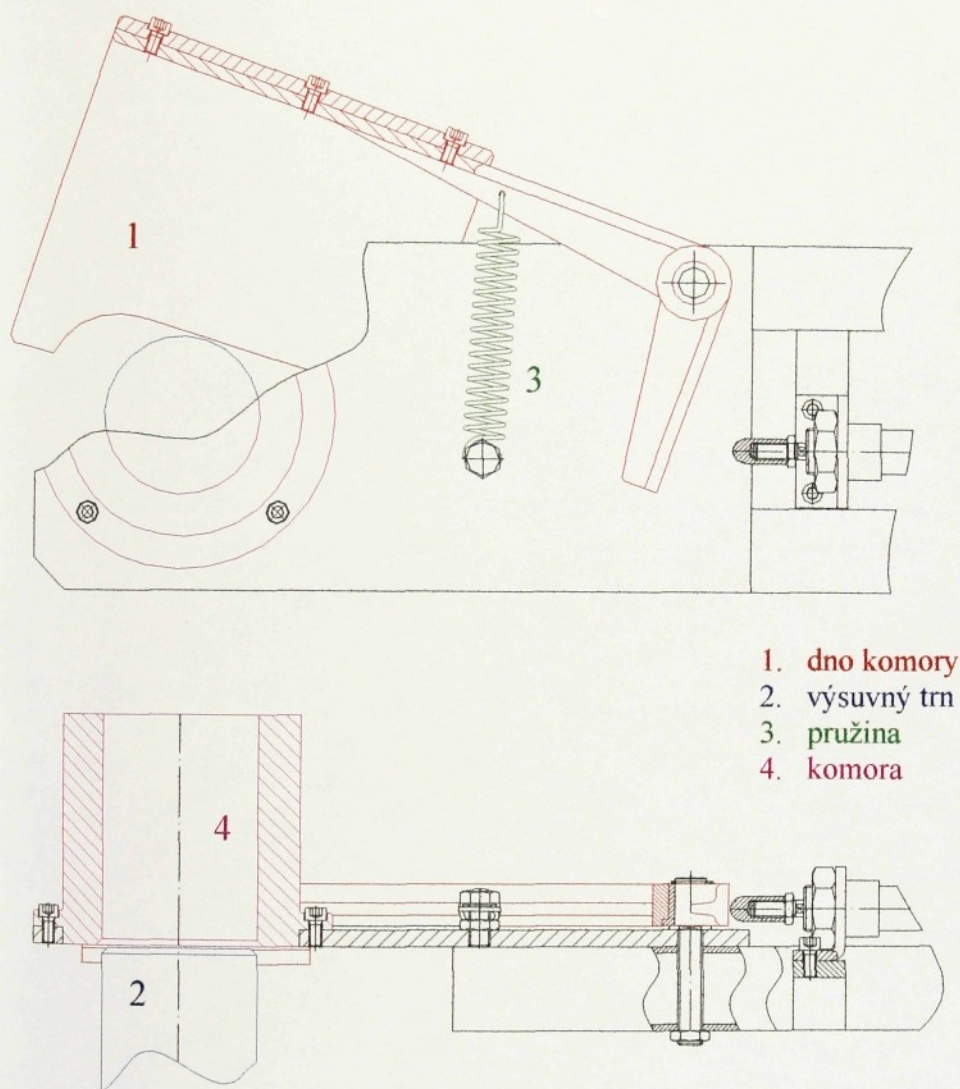
obr. 6. Návrh konstrukce komory se společným dnem

Dno komory (1) je uchyceno v objímce (4) pomocí aretačních kolíků (3). Tyto kolíky jsou po obvodě objímky, působí na dno silou, jenž je dána pružinou a zapadají do drážky ve dně. To způsobuje aretaci dna v objímce.

Vertikální pohyb zajišťuje lineární motor. Na pístnici tohoto motoru je uchycena uchopná hlavice (2). Při vertikálním pohybu najede hlavice na stopku dna a sevře čelisti, čímž uchopí dno. Při pokračujícím vertikálním pohybu bude překonána síla pružin aretačních kolíků a ty se zasunou do objímky. Dno pak může vyjet až do horní úvratě komory. Při zpětném pohybu napomáhá překonání sil pružin a zasunutí kolíků do drážky, kuželovitý tvar dna.

Horizontální pohyb zajišťuje též lineární motor. Na pístnici tohoto motoru je připevněna objímka. Při horizontálním pohybu je dno pevně zaaretováno pomocí kolíků v objímce.

4.2. Varianta B s odděleným dnem



obr. 7. Návrh konstrukce komory
s odděleným dnem

Dno komory (1) je připevněno na páce a pružina (3) jej drží v zavřené poloze.

Při příjezdu komory pod výtok narazí dno komory hranou na výsuvný trn (2), komora pokračuje až nad trn a dno se odklopí do strany. Při odjezdu komory z pod výtoku síla pružiny opět uzavře dno a skleněná dávka nevypadne.



Při příjezdu komory nad stonkolis se jednočinný válec vysune a odklopí dno, což způsobí vypadnutí dávky, poté se válec zasune a pružina opět vrátí dno na původní místo.

4.3. Výběr varianty konstrukčního řešení komory

K výběru konečné varianty pro konstrukční řešení komory bude použita rozhodovací analýza.

Pro rozhodovací analýzu konstrukčního řešení komory byla zvolena tato kritéria konstrukční jednoduchost

- 1. náročnost na přesnost polohování
- 2. náročnost na chlazení
- 3. nároky na přeseřízení

a zvolené varianty

- A. se společným dnem
- B. s odděleným dnem

Tab. 2. Rozhodovací analýza

						A		B	
						Hodnota		Hodnota	
						Pros- ta	Váže- ná	Pros- ta	Váže- ná
1 2 3 2 3	1	konstrukční jednoduchost	1	3	2	50	100	90	180
	2	náročnost na přesnost polohování	3	1	4	60	240	80	320
	3	náročnost na chlazení	2	2	3	70	210	90	270
	4	nároky na přeseřízení	0	4	1	80	80	90	90
Celkem							630		860
Užitnost v relativním vyjádření [%]							63%		86%
Pořadí alternativ podle užitnosti							2.		1.

Z výsledků rozhodovací analýzy je patrné, že nejvýhodnější je varianta B, s odděleným dnem.

5. Tepelné výpočty

5.1. Vliv skloviny

5.1.1. Tepelné vlastnosti skloviny

Významná je především tepelná vodivost, viskozita, měrné teplo, dále tepelná akumulační schopnost a teplotní vodivost. Všechny tyto vlastnosti závisí na složení a teplotě skloviny.

Tepelná vodivost za zvýšených teplot je nejdůležitější z této skupiny vlastností. Pro přestup tepla má význam tepelná vodivost při teplotách 400 až 1100 °C. Záření se uplatňuje jen v malé míře, a proto je třeba znát pravou tepelnou vodivost skloviny. Pro rozložení teploty ve skle a při chladnutí povrchu skla má význam efektivní tepelná vodivost. Pravá (kondukční) tepelná vodivost stoupá s teplotou jen nepatrně. Podstatně však stoupá sálavá vodivost, která se začíná uplatňovat asi nad 350 až 400 °C. V tab. 3. jsou uvedeny tepelné vodivosti olovnaté skloviny.

Tab. 3. Přibližné hodnoty tepelné vodivosti olovnaté skloviny

Sklovina	Tepelná vodivost (W m ⁻¹ K ⁻¹)							
	400	500	600	700	800	900	1000	1100
Olovnatá s 30% PbO	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5

Měrné teplo se dobře řídí aditivními zákony. S teplotou pravidelně stoupá, k určitým anomáliím dochází jen v transformačním intervalu. Rozdíl mezi skly stejného typu není velký. V tab. 4. jsou uvedeny hodnoty měrných tepel pro olovnatou sklovinu.

Tab.4. Střední měrné teplo olovnaté skloviny

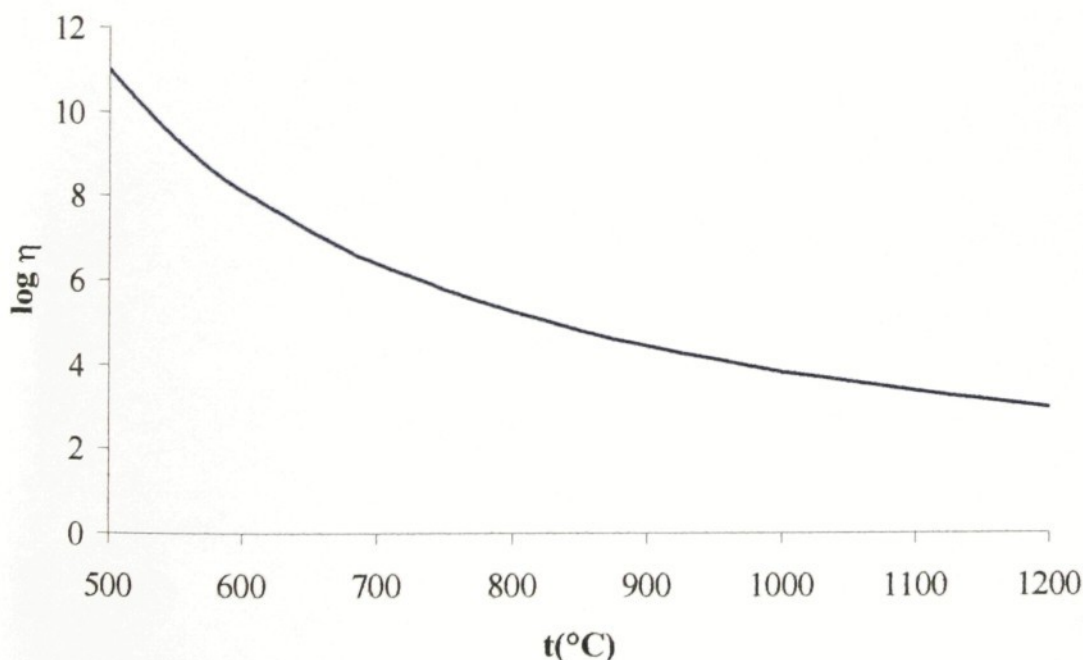
Sklovina	Střední měrné teplo 20 - t (J kg ⁻¹ K ⁻¹)						
	20-500	20-600	20-700	20-800	20-900	20-1000	20-1100
Olovnatá s 30% PbO	830	880	930	980	1030	1080	1130

Tepelná akumulční schopnost má největší význam pro transport tepla ze skloviny do komory. Zpravidla se počítá podle definičního vzorce $E = \sqrt{c\lambda\rho}$, do něhož se dosazují hodnoty pravého měrného tepla, hustoty a tepelné vodivosti při dané teplotě. Protože tepelná vodivost je známa s malou přesností, lze dosazovat střední měrné teplo místo pravého a hustotu při pokojové teplotě. Takto vypočítané hodnoty jsou uvedeny v tab. 5.

Tab. 5. Tepelná akumulční schopnost olovnaté skloviny

Sklovina	Tepelná akumulční schopnost (J K ⁻¹ m ⁻² s ^{-1/2})						
	500	600	700	800	900	1000	1100
Olovnatá s 30% PbO	1510	1640	1770	1890	2020	2150	2270

Viskozita je jednou ze základních vlastností skloviny. Teplotní závislost viskozity je možno popsat buď viskozitní křivkou obr. 8., která zachycuje plynulou změnu viskozity pro různé teploty anebo jen teplotami určitých bodů, předem přesně definovaných, které nazýváme vztažnými body viskozity.



obr. 8. Viskozitní křivka olovnaté skloviny

5.1.2. Teplota lepení skla a kovu (keramiky)

Když se ve sklářství přešlo v širší míře od dřevěných forem k formám kovovým, objevila se vedle četných výhod i závažná nevýhoda – lepení skla na povrch kovové formy. Jakmile se forma zahřála nad určitou teplotu, sklovina se přilepila a výrobek nebylo možno z formy vyjmout.

Teplota lepení závisí na době styku skla a kovu, na tlaku mezi nimi, na druhu (viskozitě) skloviny a na druhu mezivrstvy mezi sklem a kovem.

Vliv kovu je zanedbatelný. Teplota lepení, při vzájemném tlaku 1,3 kPa a intervalem 2 min, průměrně činí $575,8 \pm 13,5$ °C. Nepodařilo se najít závislost mezi chemickým složením, strukturou, tepelnou vodivostí, teplotou tání, žárovzdorností nebo jinými vlastnostmi kovů a teplotou lepení.

Teplota lepení nekovových materiálů byla proměřována za stejných podmínek jako u kovů: bílá sklovina standard, tlak 1,92 kPa, interval 2 min. výsledky ukazují, že materiály hutné a slinuté se chovají stejně jako kovy a lepí při průměrné teplotě 571 ± 6 °C. Materiály, které jsou značně porézní a uvolňují při měření plyny, nebo ty materiály, které nejsou zcela slinuté a mají „prášivý“ povrch, mají teplotu lepení zvýšenou.

V souhrnu lze konstatovat, že složení pevné podložky nemá na teplotu lepení vliv.

Teplota lepení je značně ovlivněna druhem použité skloviny. Teplota lepení (měřeno při tlaku 1,45 kPa, intervalu 2 min) se mění mezi 433 až 720 °C, odpovídající viskozita lepení průměrně činí $9,65 \pm 0,15$ (log dPas). Ukazuje se, že samotné chemické složení skla nemá na viskozitu lepení vliv. Teplota lepení klesá se stoupající dobou styku skla a kovu i se stoupajícím tlakem. Pro výpočet viskozity lepení platí rovnice

$$\log \eta = 0,81 \log p + 1,26 \log \tau + 4,47$$

kde η je viskozita lepení v dPas, p je tlak v Pa, τ doba styku skla a kovu v s.

5.2. Zákonitosti sdílení tepla ze skloviny do komory

5.2.1. Definice problému

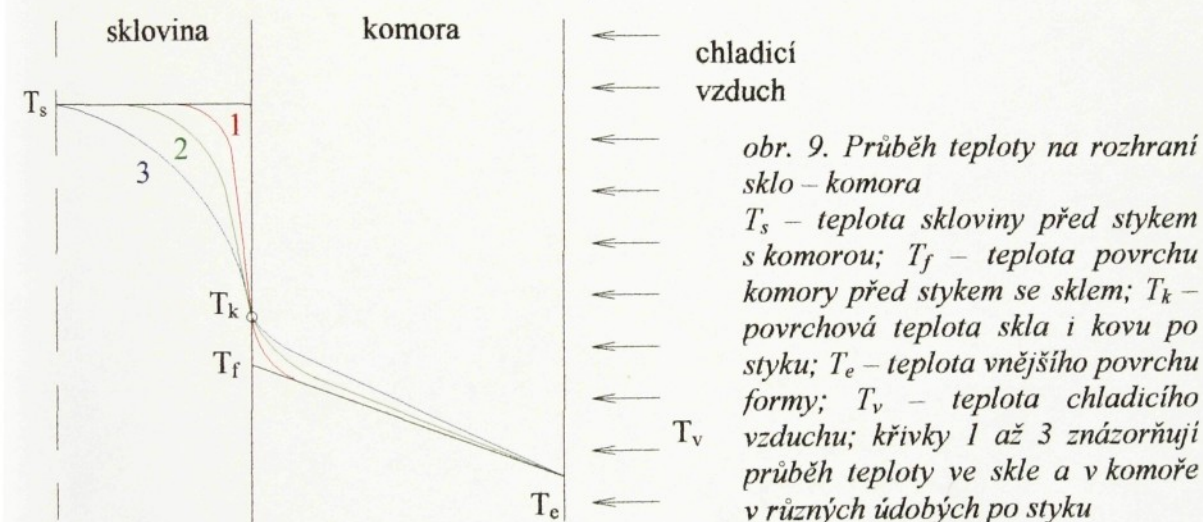
Při přenosu se stýká dávka skloviny o zhruba rovnoměrné teplotě t_s s komorou, jejíž povrch má teplotu t_f . Ihned po styku dojde k poklesu povrchové teploty skloviny a k vzestupu povrchové teploty formy: Teplo ze skloviny je odváděno do komory a komorou do chladicího

média. Postupně klesá teplota uvnitř dávky skloviny a naopak vzestup teploty komory postupuje jako teplotní vlna do hloubky, jak je znázorněno na obr. 9.

Množství předaného tepla závisí všeobecně na čase, teplotě skloviny i komory, na materiálových konstantách skla i komory, na intenzitě vnějšího chlazení a na průchodu tepla mezivrstvou sklo – kov (keramika).

Veškeré teplo odebrané ze skloviny prochází až do chladicího média, komora je jen prostředníkem. Sdílení tepla lze rozdělit do několika dějů: ve sklovině, na rozhraní skloviny a kovu (keramiky), v kovu (keramice) a na rozhraní kovu (keramiky) a chladicího média.

Teplotní pole ve sklovině i v komoře se mění s časem, proto má i přestup tepla nestacionární povahu. Při přenosu se teplotní pole ve sklovině i v komoře přesně opakuje v každém cyklu, takže dochází ke quasistacionární rovnováze. Tato rovnováha je specifikována tím, že teploty v komoře oscilují kolem neměnných středních hodnot a množství tepla, předané při každém tvarovacím cyklu, je stejné.



5.2.2. Sledování přestupu tepla ze skloviny do formy

Teplota povrchu komory ihned po dopadu skloviny prudce vystoupí a takřka okamžitě se ustálí na konstantní hodnotě, která se nemění během celé doby styku skla a komory.

Teplota povrchu komory ve styku se sklovinou je definovanou a dostatečně konstantní veličinou, která závisí na teplotě skloviny před stykem, na teplotě komory před stykem, na tepelných vlastnostech skloviny a komorového materiálu i na kvalitě styku. Trier (6), Coenen (2) vyhodnotily svá rozsáhlá provozní měření teplot pomocí poměru

$$\frac{T_s - T_k}{T_k - T_f} = \frac{E_f}{E_s} = d$$

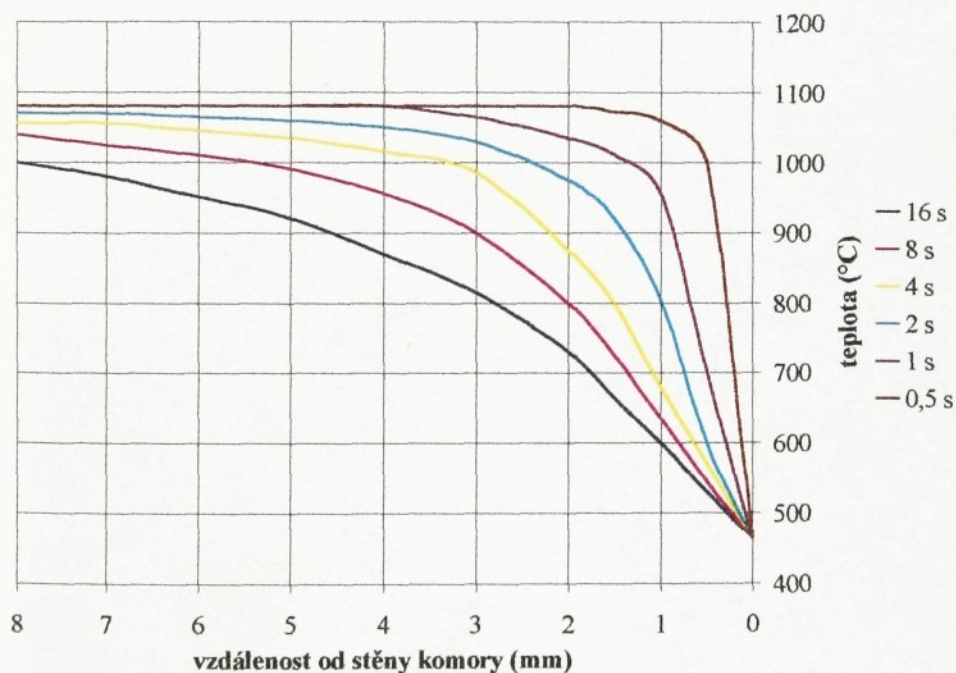
Veličina E se nazývá tepelná akumulční schopnost, nebo součinitel tepelné akumulace. Je to materiálová konstanta definovaná jako

$$E = \sqrt{\lambda c \rho}$$

Její rozměr je $J m^{-1} K^{-1} s^{-1/2}$

Teplota ve sklovině je nejméně prostudována; prakticky lze vycházet především z měření Trierových (4), která jsou v interpretaci Coeneově uvedena na obr. 10. Povrchová teplota skloviny po styku s formou prudce poklesne na určitou hodnotu, která je po celou dobu přenášecího cyklu zhruba konstantní. Prochlazení skloviny se šíří do hloubky, střed si však zachovává dosti dlouho původní teplotu. Pro jednosměrné vedení tepla platí Fourier-Kirchhoffova dif. rovnice

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$$



obr. 10. Teplotní profily ve válci ze skloviny ve styku s komorou podle měření Tiera a výpočtů Coanana

ta lze řešit pomocí Gaussova integrálu chyby (Krampovy funkce). Toto řešení vede k výrazu pro teplotu v hloubce x a v čase τ

$$\frac{t_{x,\tau} - t_p}{t_0 - t_p} = \operatorname{erf}\left[\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right]$$

Kde

$$\operatorname{erf}\left[\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right] = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}} e^{-\varepsilon^2} d\varepsilon; \quad a = \frac{\lambda}{c\rho} \quad [\text{m}^2\text{s}^{-1}]$$

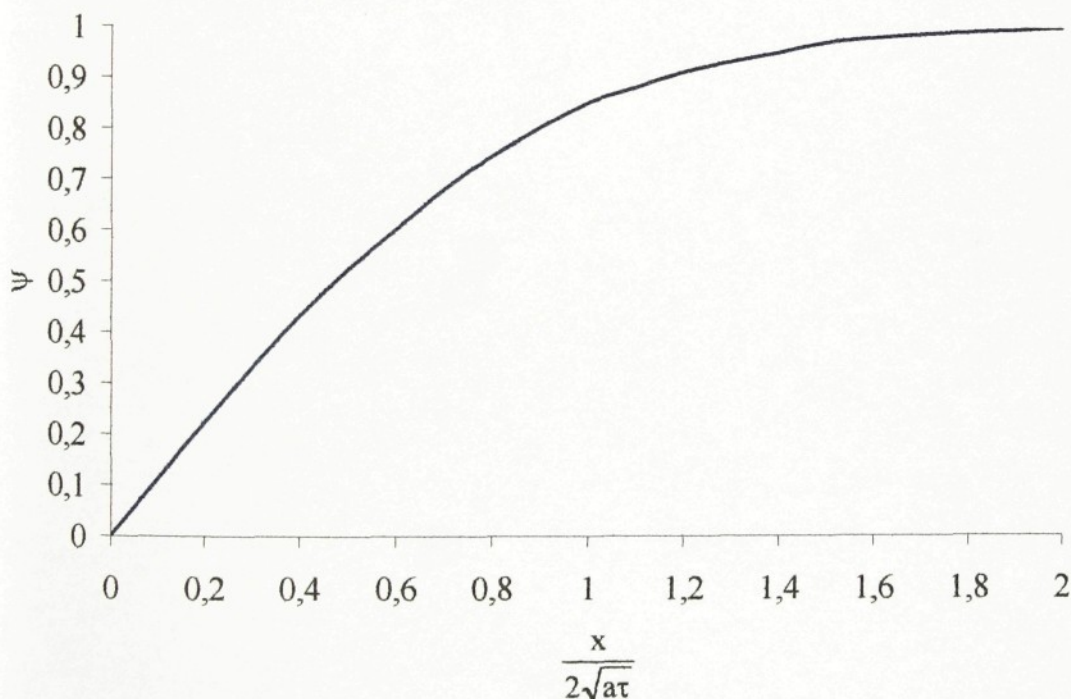
Hustota tepelného toku v hloubce x pod povrchem a v čase τ činí

$$q = \lambda(t_0 - t_p) \frac{e^{-\frac{x^2}{4a\tau}}}{\sqrt{a\tau\pi}}$$

Množství tepla prošlé za čas τ povrchem S činí

$$Q = \frac{2\lambda(t_0 - t_p)}{\sqrt{a\pi}} S\sqrt{\tau} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} E \cdot (t_0 - t_p) \cdot S\sqrt{\tau}$$

V rovnicích značí erf či ψ Gaussův integrál chyb uvedený na obr. 11.



Obr. 11. Krampova funkce pro výpočet teplotního pole v ohřívaném nebo ochlazovaném poloprostoru

Teplný tok ze skloviny do komory je těsně po styku značný, s časem dosti prudce klesá, jde přibližně o pětinasobný pokles.

$$Q = (t_s - t_f)SB\tau^n$$

Exponent n kolísá od 0,44 do 0,66; průměrně činí $n = 0,52 \pm 0,06$, tedy prakticky $n = 0,50$.
Konstanta B je ovlivněna pouze vlastnostmi skla a kovu (keramiky) a je definována jako

$$B = \frac{\frac{2}{\sqrt{\pi}}}{\frac{1}{E_s} + \frac{1}{E_f}}$$

jde vlastně o složenou akumulační schopnost skla a kovu (keramiky), a proto její rozměr je stejný $J\ m^{-1}\ K^{-1}\ s^{-1/2}$.

5.2.3. Prostup tepla stěnou komory

Spojením rovnic pro přestup tepla ze skla do komory, pro vedení tepla stěnou komory a pro přestup tepla do chladicího vzduchu lze sestavit rovnice pro prostup tepla ze skloviny stěnou komory do chladicího vzduchu. Vychází se z rovnic

$$Q = (t_s - t_f)B\sqrt{\tau_k}S_1$$

$$Q = (\bar{t}_i - t_e)\tau_0 \frac{\lambda}{s} S_1$$

$$Q = (t_e - t_v)\alpha_e \tau_0 S_2$$

V těchto rovnicích je Q množství tepla odevzdané ze skloviny během jednoho tvarovacího cyklu doby τ_0 , při němž sklovina je s komorou v kontaktu po dobu τ_k . Komora má tloušťku s , teplota chladicího vzduchu je t_v . Pro průměrnou teplotu pracovního povrchu platí

$$\bar{t}_i = \frac{t_p + t_f}{2}$$

a dále platí

$$\frac{t_s - t_p}{t_p - t_f} = d = \frac{E_f}{E_s}; \quad A = \frac{1 + 2d}{2 + 2d}$$

Sloučením těchto rovnic vzniká vztah pro množství tepla předaného ze skla do rovinné formy během jednoho cyklu doby τ_k

$$Q = (t_s - t_v) \frac{1}{\frac{A\tau_0}{B \cdot S_1 \sqrt{\tau_p}} + \frac{s}{\lambda \cdot S_1} + \frac{1}{\alpha_e \cdot S_2}} \tau_0$$

5.2.4. Zákonitosti chlazení komory

Teplu se z vnějšího povrchu odvádí do chladicího vzduchu, v některých případech i do chladicí vody. Teplota vnějšího povrchu je zpravidla konstantní, proto je odvod tepla ustálený.

Přestup tepla mezi stěnou a tekutinou pohybující se kolem jejího povrchu je velmi složitý proces sdílení tepla, poněvadž je značně ovlivňován hydrodynamickými jevy. Podle způsobu vyvolání pohybu tekutiny se rozlišuje:

Nucená konvekce – když je pohyb tekutiny vyvolán vnější silou

Přirozená konvekce – když je samovolný pohyb tekutiny zapříčiněn rozdílem hustoty tekutiny (vlivem rozdílu teploty) v bezprostřední blízkosti stěny a v okolí.

Problém řešení přestupu tepla spočívá ve stanovení α (součinitele přestupu tepla), který se v technické praxi řeší experimentálně s využitím teorie podobnosti. Experimentálně zjištěné hodnoty se vyjadřují v bezrozměrném tvaru pomocí kritérií podobnosti

Součinitel přestupu tepla prouděním při všech druzích přirozeného proudění je možno vypočítat pomocí Nusseltova čísla v zákonitosti na Gr a Pr číslu

$$Nu = c(Gr \cdot Pr)^n \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{0,25}$$

Konstanta c a mocnitel n byly pro podobné případy stanoveny na základě mnoha experimentálních zkoušek. Kritéria a fyz. veličiny bez indexu jsou pro střední určovací teplotu $t_{urč} = (t_s + t)/2$ a s indexem s pro teplotu stěny.

Tab. 6. Přehled kritérií podobnosti

Znak	Kritérium	Tvar
Nu	Nusseltovo	$\frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$
Pr	Prandtlovo	$\frac{\nu}{a}$
Gr	Grashofovo	$\beta \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} \vartheta$

Kde l je charakteristický rozměr [m]; ν je kinematická viskozita [m^2s^{-1}]; a je tepelná difuzivita $a = \frac{\lambda}{c_p \rho}$ [m^2s^{-1}]; β je součinitel tepelné roztažnosti [K^{-1}]; g je gravitační zrychlení [ms^{-2}]; θ je teplotní spád [K]

Pro svislé stěny a trubky

v rozmezí $10^3 < \text{Gr} \cdot \text{Pr} < 10^9$, což odpovídá laminárnímu proudění tekutiny, je střední Nusseltovo číslo:

$$\overline{\text{Nu}} = 0,76(\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{0,25} \cdot \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_s} \right)^{0,25}$$

v rozmezí $10^9 < \text{Gr} \cdot \text{Pr}$, což odpovídá turbulentnímu proudění tekutiny, je:

$$\overline{\text{Nu}} = 0,15(\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{1/3} \cdot \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_s} \right)^{0,25}$$

Pro vodorovné stěny

v rozmezí $10^3 < \text{Gr} \cdot \text{Pr} < 10^9$, což odpovídá laminárnímu proudění tekutiny, je střední Nusseltovo číslo:

$$\overline{\text{Nu}} = 0,54(\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{0,25} \cdot \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_s} \right)^{0,25}$$

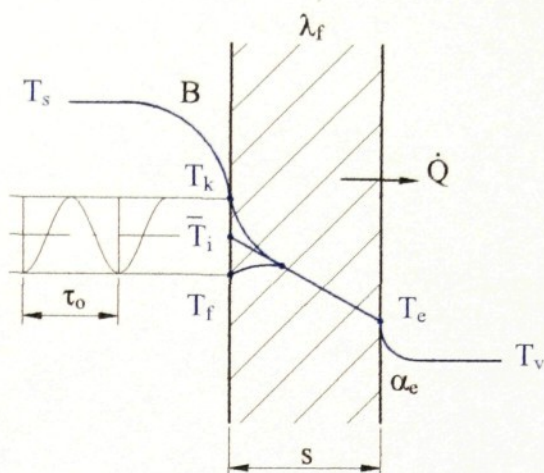
v rozmezí $10^9 < \text{Gr} \cdot \text{Pr}$, což odpovídá turbulentnímu proudění tekutiny, je:

$$\overline{\text{Nu}} = 0,14(\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{1/3} \cdot \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_s} \right)^{0,25}$$

Pro plyny je člen $\left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_s} \right)^{0,25} \cong 1$ zanedbatelný.

5.3. Výpočet přenosu tepla ze skloviny do komory Ø65 z šedé litiny – 42 2420

$$\begin{aligned} T_s &= 990 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_v &= 20 \text{ }^\circ\text{C} \\ \tau_k &= 13 \text{ s} \\ \tau_o &= 20 \text{ s} \\ \lambda_s &= 1,4 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1} \\ c_s &= 1080 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1} \\ \rho_s &= 3050 \text{ kgm}^{-3} \\ \lambda_f &= 46 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1} \\ c_f &= 610 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1} \\ \rho_f &= 7000 \text{ kgm}^{-3} \\ m &= 200 \text{ g} \\ r_1 &= 0,0325 \text{ m} \\ r_2 &= 0,0575 \text{ m} \\ z &= 20 \\ h &= 0,013 \text{ m} \\ s &= 0,012 \text{ m} \end{aligned}$$



obr. 12. přestup tepla komorou Ø65

Viskozita lepení:

$$\log \eta = 0,81 \log p + 1,26 \log \tau_k + 4,47$$

kde p je tlak který určíme jako

$$p = \frac{m \cdot g}{S} = \frac{0,2 \cdot 9,81}{0,003318} = 591,3 \text{ Pa}$$

potom

$$\log \eta = 0,81 \log 591,3 + 1,26 \log 15 + 4,47 = 8,197$$

což odpovídá pro olovnatou sklovinu podle obr. 3. teplotě $630 \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$

Přestup tepla do chladicího vzduchu:

předpokládaná teplota vnější stěny komory je $T_{ep} = 500^\circ\text{C}$

$$T_{urc} = \frac{T_{ep} + T_v}{2} = \frac{500 + 20}{2} = 260^\circ\text{C}$$

charakteristický rozměr je výška komory $l = 0,12 \text{ m}$

pak podle Beldy (7) $\rho_v = 0,6807 \text{ kgm}^{-3}$; $c_{pv} = 1037 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$; $\lambda_v = 0,0421 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$;

$$v_v = 41,25 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}; \beta = 1,93 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

Prandtlovo kritérium

$$Pr = \frac{v}{a} = \frac{v_v \cdot c_{pv} \cdot \rho_v}{\lambda_v} = \frac{41,25 \cdot 10^{-6} \cdot 1037 \cdot 0,6807}{0,0421} = 0,692$$



Grashofovo kritérium

$$Gr = \beta \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} \vartheta = 1,93 \cdot 10^{-3} \frac{9,81 \cdot 0,12^3}{(41,25 \cdot 10^{-6})^2} 480 = 9,229 \cdot 10^6$$

$$Gr \cdot Pr = 9,229 \cdot 10^6 \cdot 0,692 = 6,387 \cdot 10^6$$

jelikož je $Gr \cdot Pr$ je v intervalu $(10^3; 10^9)$ bude Nusseltovo kritérium

$$\overline{Nu} = 0,76(Gr \cdot Pr)^{0,25} = 0,76 \cdot (6,387 \cdot 10^6)^{0,25} = 38,21$$

součinitel přestupu tepla

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_v}{l} = \frac{38,21 \cdot 0,0421}{0,12} = 13,41 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

tepelná akumulční schopnost

$$\text{pro sklo } E_s = \sqrt{1,4 \cdot 1080 \cdot 3050} = 2150 \text{ Jm}^{-2} \text{ K}^{-1} \text{ s}^{-1/2}$$

$$\text{pro desku } E_f = \sqrt{46 \cdot 610 \cdot 7000} = 14015 \text{ Jm}^{-2} \text{ K}^{-1} \text{ s}^{-1/2}$$

$$\text{pak } d = \frac{14015}{2150} = 6,52$$

$$A = \frac{1 + 2 \cdot 6,52}{2 + 2 \cdot 6,52} = 0,934, \quad B = \frac{\frac{2}{\sqrt{\pi}}}{\frac{1}{2150} + \frac{1}{14015}} = 2103,3 \text{ Jm}^{-1} \text{ K}^{-1} \text{ s}^{-1/2}$$

kontaktní plocha komory se sklovinou

$$V = \frac{m}{\rho_s} = \frac{0,2}{3050} = 65,57 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$V = \pi \cdot r_1^2 \cdot l_s \Rightarrow l_s = \frac{V}{\pi \cdot r_1^2} = \frac{65,57 \cdot 10^{-6}}{\pi \cdot 0,0325^2} = 0,01976 \text{ m}$$

$$S_1 = 2\pi \cdot r_1 \cdot l_s = 2\pi \cdot 0,0325 \cdot 0,01976 = 4,035 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

chladič plocha komory

$$S_2 = 2\pi \cdot r_2 \cdot l + 2 \cdot h \cdot l \cdot z = 2\pi \cdot 0,0575 \cdot 0,12 + 2 \cdot 0,013 \cdot 0,12 \cdot 20 = 105,75 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

množství tepla předaného ze skla do komory

$$Q = \frac{(t_s - t_v) \cdot \tau_0}{\frac{A\tau_0}{B \cdot S_1 \sqrt{\tau_p}} + \frac{s}{\lambda \cdot S_1} + \frac{1}{\alpha_e \cdot S_2}} =$$

$$= \frac{(990 - 20) \cdot 20}{\frac{0,934 \cdot 20}{2103,3 \cdot 4,035 \cdot 10^{-3} \sqrt{13}} + \frac{0,012}{46 \cdot 4,035 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{13,41 \cdot 105,75 \cdot 10^{-3}}} = 14055,1 \text{ J}$$

teplota ochlazeného vnitřního povrchu komory

$$T_f = \frac{T_s \cdot B \cdot \sqrt{\tau_k} \cdot S_1 - Q}{B \cdot \sqrt{\tau_k} \cdot S_1} = \frac{990 \cdot 2103,3 \cdot \sqrt{13} \cdot 4,035 \cdot 10^{-3} - 14055,1}{2103,3 \cdot \sqrt{13} \cdot 4,035 \cdot 10^{-3}} = 530,68^\circ\text{C}$$

teplota vnějšího povrchu komory

$$T_e = \frac{Q + T_v \cdot \alpha_e \cdot \tau_o \cdot S_2}{\alpha_e \cdot \tau_o \cdot S_2} = \frac{14055,1 + 20 \cdot 13,41 \cdot 20 \cdot 105,75 \cdot 10^{-3}}{13,41 \cdot 20 \cdot 105,75 \cdot 10^{-3}} = 515,56^\circ\text{C}$$

střední teplota vnitřního povrchu komory

$$\bar{T}_i = \frac{Q + T_e \cdot \tau_o \cdot \frac{\lambda_f}{s} \cdot S_1}{\tau_o \cdot \frac{\lambda_f}{s} \cdot S_1} = \frac{14055,1 + 515,56 \cdot 20 \cdot \frac{46}{0,012} \cdot 4,035 \cdot 10^{-3}}{20 \cdot \frac{46}{0,012} \cdot 4,035 \cdot 10^{-3}} = 560,99^\circ\text{C}$$

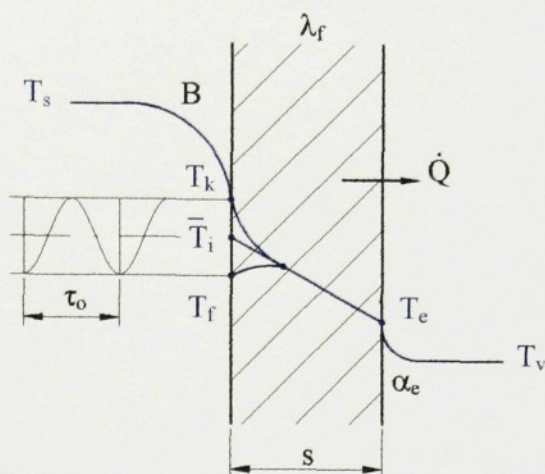
kontaktní teplota

$$T_k = 2 \cdot \bar{T}_i - T_f = 2 \cdot 560,99 - 530,68 = 591,3^\circ\text{C}$$

Kontaktní teplota je nižší jak teplota lepení, což znamená, že se sklovina nebude lepit na stěny komory a tudíž chlazení bude **vyhovovat!**

5.4. Výpočet přenosu tepla ze skloviny do komory Ø75 z šedé litiny – 42 2420

$$\begin{aligned} T_s &= 990 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_v &= 20 \text{ }^\circ\text{C} \\ \tau_k &= 13 \text{ s} \\ \tau_o &= 40 \text{ s} \\ \lambda_s &= 1,4 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1} \\ c_s &= 1080 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1} \\ \rho_s &= 3050 \text{ kgm}^{-3} \\ \lambda_f &= 46 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1} \\ c_f &= 610 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1} \\ \rho_f &= 7000 \text{ kgm}^{-3} \\ m &= 500\text{g} \\ r_1 &= 0,0375 \text{ m} \\ r_2 &= 0,0625 \text{ m} \\ z &= 20 \\ h &= 0,013 \text{ m} \\ s &= 0,012 \text{ m} \end{aligned}$$



obr. 13. přestup tepla komorou Ø75

Teplota lepení, součinitel přestupu tepla, tepelná akumulční schopnost, konstanty A a

B budou stejné jako u komory Ø65

kontaktní plocha komory se sklovinou

$$V = \frac{m}{\rho_s} = \frac{0,5}{3050} = 163,93 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$V = \pi \cdot r_1^2 \cdot l_s \Rightarrow l_s = \frac{V}{\pi \cdot r_1^2} = \frac{163,93 \cdot 10^{-6}}{\pi \cdot 0,0375^2} = 0,03711 \text{ m}$$

$$S_1 = 2\pi \cdot r_1 \cdot l_s = 2\pi \cdot 0,0375 \cdot 0,03711 = 8,744 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

chladičí plocha komory

$$S_2 = 2\pi \cdot r_2 \cdot l + 2 \cdot h \cdot l \cdot z = 2\pi \cdot 0,0625 \cdot 0,12 + 2 \cdot 0,013 \cdot 0,12 \cdot 20 = 109,52 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

množství tepla předaného ze skla do komory

$$\begin{aligned} Q &= \frac{(t_s - t_v) \cdot \tau_o}{\frac{A\tau_o}{B \cdot S_1 \sqrt{\tau_p}} + \frac{s}{\lambda \cdot S_1} + \frac{1}{\alpha_e \cdot S_2}} = \\ &= \frac{(990 - 20) \cdot 40}{\frac{0,934 \cdot 40}{2103,3 \cdot 8,744 \cdot 10^{-3} \sqrt{13}} + \frac{0,012}{46 \cdot 8,744 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{13,41 \cdot 109,52 \cdot 10^{-3}}} = 30452,1\text{J} \end{aligned}$$

teplota ochlazeného vnitřního povrchu komory

$$T_f = \frac{T_s \cdot B \cdot \sqrt{\tau_k} \cdot S_1 - Q}{B \cdot \sqrt{\tau_k} \cdot S_1} = \frac{990 \cdot 2103,3 \cdot \sqrt{13} \cdot 8,744 \cdot 10^{-3} - 30452,1}{2103,3 \cdot \sqrt{13} \cdot 8,744 \cdot 10^{-3}} = 530,77^\circ\text{C}$$

teplota vnějšího povrchu komory

$$T_e = \frac{Q + T_v \cdot \alpha_e \cdot \tau_o \cdot S_2}{\alpha_e \cdot \tau_o \cdot S_2} = \frac{30452,1 + 20 \cdot 13,41 \cdot 40 \cdot 109,52 \cdot 10^{-3}}{13,41 \cdot 40 \cdot 109,52 \cdot 10^{-3}} = 538,36^\circ\text{C}$$

střední teplota vnitřního povrchu komory

$$\bar{T}_i = \frac{Q + T_e \cdot \tau_o \cdot \frac{\lambda_f}{s} \cdot S_1}{\tau_o \cdot \frac{\lambda_f}{s} \cdot S_1} = \frac{30452,1 + 538,36 \cdot 40 \cdot \frac{46}{0,012} \cdot 8,744 \cdot 10^{-3}}{40 \cdot \frac{46}{0,012} \cdot 8,744 \cdot 10^{-3}} = 561,07^\circ\text{C}$$

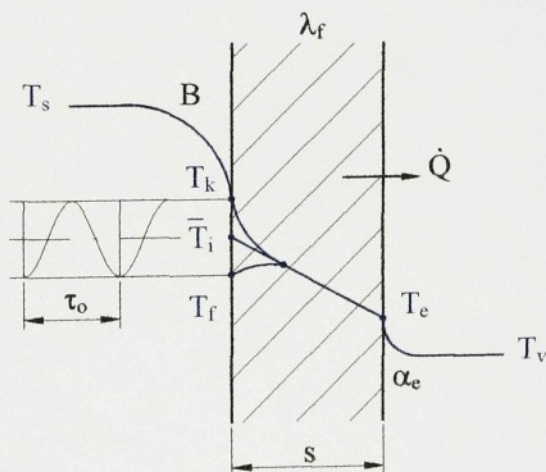
kontaktní teplota

$$T_k = 2 \cdot \bar{T}_i - T_f = 2 \cdot 561,07 - 530,77 = 591,37^\circ\text{C}$$

Kontaktní teplota je nižší jak teplota lepení, což znamená, že se sklovina nebude lepit na stěny komory a tudíž chlazení bude **vyhovovat!**

5.5. Výpočet přenosu tepla ze skloviny do trnu Ø65 z šedé litiny – 42 2420

$T_s = 990^\circ\text{C}$
 $T_v = 20^\circ\text{C}$
 $\tau_k = 10\text{ s}$
 $\tau_o = 20\text{ s}$
 $\lambda_s = 1,4\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
 $c_s = 1080\text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$
 $\rho_s = 3050\text{ kgm}^{-3}$
 $\lambda_f = 46\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
 $c_f = 610\text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$
 $\rho_f = 7000\text{ kgm}^{-3}$
 $m = 200\text{ g}$
 $r_1 = 0,0325\text{ m}$
 $r_3 = 0,02\text{ m}$
 $s = 0,01\text{ m}$
 $l_1 = 0,4\text{ m}$
 $l_3 = 0,05812\text{ m}$



obr. 14. přestup tepla trnem Ø65

Teplota lepení, tepelná akumulční schopnost, konstanty A a B budou stejné jako u přestupu tepla do komory.

estup tepla do chladicího vzduchu:

edpokládaná teplota vnější stěny trnu je $T_{ep} = 500^\circ\text{C}$

$$T_{urc} = \frac{T_{ep} + T_v}{2} = \frac{500 + 20}{2} = 260^\circ\text{C}$$

arakteristický rozměr je výška válce $l_1 = 0,4 \text{ m}$

ak podle Beldy (7) $\rho_v = 0,6807 \text{ kgm}^{-3}$; $c_{pv} = 1037 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$; $\lambda_v = 0,0421 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$;

$\nu_v = 41,25 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$; $\beta = 1,93 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$

randtlovo kritérium

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\nu_v \cdot c_{pv} \cdot \rho_v}{\lambda_v} = \frac{41,25 \cdot 10^{-6} \cdot 1037 \cdot 0,6807}{0,0421} = 0,692$$

rashofovo kritérium

$$Gr = \beta \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} \theta = 1,93 \cdot 10^{-3} \frac{9,81 \cdot 0,4^3}{(41,25 \cdot 10^{-6})^2} 480 = 341,821 \cdot 10^6$$

$$Gr \cdot Pr = 341,821 \cdot 10^6 \cdot 0,692 = 236,541 \cdot 10^6$$

elikož je $Gr \cdot Pr$ je v intervalu $(10^3; 10^9)$ bude Nusseltovo kritérium

$$\overline{Nu} = 0,76(Gr \cdot Pr)^{0,25} = 0,76 \cdot (236,541 \cdot 10^6)^{0,25} = 94,25$$

oučinitel přestupu tepla

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_v}{l} = \frac{94,25 \cdot 0,0421}{0,4} = 9,92 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

ontaktní plocha trnu se sklovinou

$$S_1 = \pi \cdot r_1^2 \cdot \pi = \pi \cdot 0,0325^2 = 3,318 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

hladicí plocha trnu

$$S_2 = 2\pi \cdot r_1 \cdot l_1 + 4\pi \cdot r_3 \cdot l_3 = 2\pi \cdot 0,0325 \cdot 0,4 + 4\pi \cdot 0,02 \cdot 0,05812 = 96,289 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

nnožství tepla předaného ze skla do trnu

$$Q = \frac{(t_s - t_v) \cdot \tau_0}{\frac{A\tau_0}{B \cdot S_1 \sqrt{\tau_p}} + \frac{s}{\lambda \cdot S_1} + \frac{1}{\alpha_e \cdot S_2}} = \frac{(990 - 20) \cdot 20}{\frac{0,934 \cdot 20}{2103,3 \cdot 3,318 \cdot 10^{-3} \sqrt{10}} + \frac{0,01}{46 \cdot 3,318 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{9,92 \cdot 96,289 \cdot 10^{-3}}} = 9903,62 \text{ J}$$

teplota ochlazeného povrchu trnu

$$T_f = \frac{T_s \cdot B \cdot \sqrt{\tau_k} \cdot S_1 - Q}{B \cdot \sqrt{\tau_k} \cdot S_1} = \frac{990 \cdot 2103,3 \cdot \sqrt{10} \cdot 3,318 \cdot 10^{-3} - 9903,62}{2103,3 \cdot \sqrt{10} \cdot 3,318 \cdot 10^{-3}} = 541,24^\circ\text{C}$$

teplota vnějšího povrchu trnu

$$T_e = \frac{Q + T_v \cdot \alpha_e \cdot \tau_o \cdot S_2}{\alpha_e \cdot \tau_o \cdot S_2} = \frac{9903,62 + 20 \cdot 9,92 \cdot 20 \cdot 96,289 \cdot 10^{-3}}{9,92 \cdot 20 \cdot 96,289 \cdot 10^{-3}} = 538,41^\circ\text{C}$$

střední teplota povrchu trnu

$$\bar{T}_i = \frac{Q + T_e \cdot \tau_o \cdot \frac{\lambda_f}{s} \cdot S_1}{\tau_o \cdot \frac{\lambda_f}{s} \cdot S_1} = \frac{9903,62 + 538,41 \cdot 20 \cdot \frac{46}{0,01} \cdot 3,318 \cdot 10^{-3}}{20 \cdot \frac{46}{0,01} \cdot 3,318 \cdot 10^{-3}} = 570,85^\circ\text{C}$$

kontaktní teplota

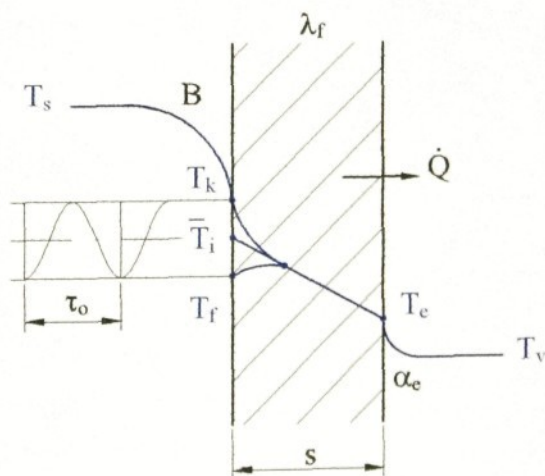
$$T_k = 2 \cdot \bar{T}_i - T_f = 2 \cdot 570,85 - 541,24 = 600,46^\circ\text{C}$$

Kontaktní teplota je nižší jak teplota lepení, což znamená, že se sklovina nebude lepit

trn a tudíž chlazení bude **vyhovovat!**

6. Výpočet přenosu tepla ze skloviny do trnu Ø75 z šedé litiny – 42 2420

$T_s = 990^\circ\text{C}$
 $T_v = 20^\circ\text{C}$
 $\tau_k = 10\text{ s}$
 $\tau_o = 20\text{ s}$
 $\lambda_s = 1,4\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
 $c_s = 1080\text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$
 $\rho_s = 3050\text{ kgm}^{-3}$
 $\lambda_f = 46\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
 $c_f = 610\text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$
 $\rho_f = 7000\text{ kgm}^{-3}$
 $m = 500\text{ g}$
 $r_1 = 0,0375\text{ m}$
 $r_3 = 0,02\text{ m}$
 $s = 0,01\text{ m}$
 $l_1 = 0,4\text{ m}$
 $l_3 = 0,05812\text{ m}$



obr. 15. přestup tepla trnem Ø75



Teplota lepení, součinitel přestupu tepla, tepelná akumulční schopnost, konstanty A a B budou stejné jako u trnu Ø65

kontaktní plocha trnu se sklovinou

$$S_1 = \pi \cdot r_1^2 = \pi \cdot 0,0375^2 = 4,418 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

chladičí plocha trnu

$$S_2 = 2\pi \cdot r_1 \cdot l_1 + 4\pi \cdot r_3 \cdot l_3 = 2\pi \cdot 0,0375 \cdot 0,4 + 4\pi \cdot 0,02 \cdot 0,05812 = 108,85 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

množství tepla předaného ze skla do trnu

$$Q = \frac{(t_s - t_v) \cdot \tau_0}{\frac{A\tau_0}{B \cdot S_1 \sqrt{\tau_p}} + \frac{s}{\lambda \cdot S_1} + \frac{l}{\alpha_e \cdot S_2}} =$$

$$= \frac{(990 - 20) \cdot 40}{\frac{0,934 \cdot 40}{2103,3 \cdot 4,418 \cdot 10^{-3} \sqrt{10}} + \frac{0,01}{46 \cdot 4,418 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{9,92 \cdot 108,85 \cdot 10^{-3}}} = 17269,75 \text{ J}$$

teplota ochlazeného povrchu trnu

$$T_f = \frac{T_s \cdot B \cdot \sqrt{\tau_k} \cdot S_1 - Q}{B \cdot \sqrt{\tau_k} \cdot S_1} = \frac{990 \cdot 2103,3 \cdot \sqrt{10} \cdot 4,418 \cdot 10^{-3} - 17269,75}{2103,3 \cdot \sqrt{10} \cdot 4,418 \cdot 10^{-3}} = 402,30^\circ\text{C}$$

teplota vnějšího povrchu trnu

$$T_e = \frac{Q + T_v \cdot \alpha_e \cdot \tau_o \cdot S_2}{\alpha_e \cdot \tau_o \cdot S_2} = \frac{17269,75 + 20 \cdot 9,92 \cdot 40 \cdot 108,85 \cdot 10^{-3}}{9,92 \cdot 40 \cdot 108,85 \cdot 10^{-3}} = 419,84^\circ\text{C}$$

střední teplota povrchu trnu

$$\bar{T}_i = \frac{Q + T_e \cdot \tau_o \cdot \frac{\lambda_f}{s} \cdot S_1}{\tau_o \cdot \frac{\lambda_f}{s} \cdot S_1} = \frac{17269,75 + 419,84 \cdot 40 \cdot \frac{46}{0,01} \cdot 4,418 \cdot 10^{-3}}{40 \cdot \frac{46}{0,01} \cdot 4,418 \cdot 10^{-3}} = 441,08^\circ\text{C}$$

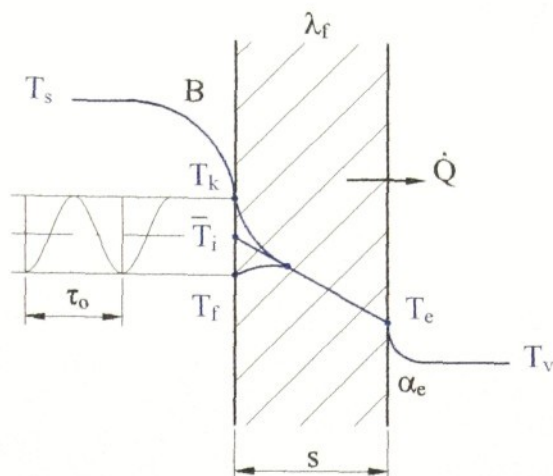
kontaktní teplota

$$T_k = 2 \cdot \bar{T}_i - T_f = 2 \cdot 441,08 - 402,30 = 479,86^\circ\text{C}$$

Kontaktní teplota je nižší jak teplota lepení, což znamená, že se sklovina nebude lepit a trn a tudíž chlazení bude **vyhovovat!**

Výpočet přenosu tepla ze skloviny do dna pro Ø65 z šedé litiny – 42 2420

$T_s = 990\text{ °C}$
 $T_v = 20\text{ °C}$
 $\tau_k = 3\text{ s}$
 $\tau_o = 20\text{ s}$
 $\lambda_s = 1,4\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
 $\gamma_s = 1080\text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$
 $\rho_s = 3050\text{ kgm}^{-3}$
 $\lambda_f = 46\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
 $\gamma_f = 610\text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$
 $\rho_f = 7000\text{ kgm}^{-3}$
 $m = 200\text{ g}$
 $r_i = 0,0325\text{ m}$
 $s = 0,007\text{ m}$
 $a = 0,2\text{ m}$
 $b = 0,15\text{ m}$



obr. 16. přestup tepla dnem Ø65

ota lepení, tepelná akumulční schopnost, konstanty A a B budou stejné jako u přestupu
i do komory.

tup tepla do chladicího vzduchu:

pokládaná teplota vnější stěny dna je $T_{ep} = 500\text{ °C}$

$$T_{urt} = \frac{T_{ep} + T_v}{2} = \frac{500 + 20}{2} = 260\text{ °C}$$

akteristický rozměr je kratší strana dna $b = 0,15\text{ m}$

podle Beldy (7) $\rho_v = 0,6807\text{ kgm}^{-3}$; $c_{pv} = 1037\text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$; $\lambda_v = 0,0421\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$;

$41,25 \cdot 10^{-6}\text{ m}^2\text{s}^{-1}$; $\beta = 1,93 \cdot 10^{-3}\text{ K}^{-1}$

adtlovo kritérium

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\nu_v \cdot c_{pv} \cdot \rho_v}{\lambda_v} = \frac{41,25 \cdot 10^{-6} \cdot 1037 \cdot 0,6807}{0,0421} = 0,692$$

shofovo kritérium

$$Gr = \beta \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} = 1,93 \cdot 10^{-3} \frac{9,81 \cdot 0,15^3}{(41,25 \cdot 10^{-6})^2} 480 = 18,026 \cdot 10^6$$

$$Gr \cdot Pr = 18,026 \cdot 10^6 \cdot 0,692 = 12,474 \cdot 10^6$$

kož je $Gr \cdot Pr$ je v intervalu $(10^3; 10^9)$ bude Nusseltovo kritérium

$$\overline{Nu} = 0,54(Gr \cdot Pr)^{0,25} = 0,54 \cdot (12,474 \cdot 10^6)^{0,25} = 32,09$$

koeficient přestupu tepla

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_v}{l} = \frac{32,09 \cdot 0,0421}{0,15} = 9,01 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

kontaktní plocha dna se sklovinou

$$S_1 = \pi \cdot r_1^2 = \pi \cdot 0,0325^2 = 3,318 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

vnější plocha dna

$$S_2 = 2 \cdot a \cdot b - \pi \cdot r_1^2 = 2 \cdot 0,2 \cdot 0,15 - \pi \cdot 0,0325^2 = 56,682 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

teplo předaného ze skla do dna

$$Q = \frac{(t_s - t_v) \cdot \tau_0}{\frac{A \tau_0}{B \cdot S_1 \sqrt{\tau_p}} + \frac{s}{\lambda \cdot S_1} + \frac{1}{\alpha_e \cdot S_2}} =$$
$$= \frac{(990 - 20) \cdot 20}{\frac{0,934 \cdot 20}{2103,3 \cdot 3,318 \cdot 10^{-3} \sqrt{3}} + \frac{0,007}{46 \cdot 3,318 \cdot 10^{-3}} + \frac{1}{9,01 \cdot 56,682 \cdot 10^{-3}}} = 5465,82 \text{ J}$$

teplota ochlazeného povrchu dna

$$T_f = \frac{T_s \cdot B \cdot \sqrt{\tau_k} \cdot S_1 - Q}{B \cdot \sqrt{\tau_k} \cdot S_1} = \frac{990 \cdot 2103,3 \cdot \sqrt{3} \cdot 3,318 \cdot 10^{-3} - 5465,82}{2103,3 \cdot \sqrt{3} \cdot 3,318 \cdot 10^{-3}} = 537,82^\circ \text{C}$$

teplota vnějšího povrchu dna

$$T_e = \frac{Q + T_v \cdot \alpha_e \cdot \tau_o \cdot S_2}{\alpha_e \cdot \tau_o \cdot S_2} = \frac{5465,82 + 20 \cdot 9,01 \cdot 20 \cdot 56,682 \cdot 10^{-3}}{9,01 \cdot 20 \cdot 56,682 \cdot 10^{-3}} = 555,13^\circ \text{C}$$

vnější teplota povrchu dna

$$\bar{T}_i = \frac{Q + T_e \cdot \tau_o \cdot \frac{\lambda_f}{s} \cdot S_1}{\tau_o \cdot \frac{\lambda_f}{s} \cdot S_1} = \frac{5465,82 + 555,13 \cdot 20 \cdot \frac{46}{0,007} \cdot 3,318 \cdot 10^{-3}}{20 \cdot \frac{46}{0,007} \cdot 3,318 \cdot 10^{-3}} = 567,66^\circ \text{C}$$

kontaktní teplota

$$T_k = 2 \cdot \bar{T}_i - T_f = 2 \cdot 567,66 - 537,82 = 597,5^\circ \text{C}$$

Kontaktní teplota je nižší jak teplota lepení, což znamená, že se sklovina nebude lepit

a tudíž chlazení bude **vyhovovat!**

vnějšího povrchu dna

$$T_e = \frac{Q + T_v \cdot \alpha_e \cdot \tau_o \cdot S_2}{\alpha_e \cdot \tau_o \cdot S_2} = \frac{8914,4 + 20 \cdot 9,01 \cdot 40 \cdot 55,582 \cdot 10^{-3}}{9,01 \cdot 40 \cdot 55,582 \cdot 10^{-3}} = 465,01^\circ\text{C}$$

teplota povrchu dna

$$\bar{T}_i = \frac{Q + T_e \cdot \tau_o \cdot \frac{\lambda_f}{s} \cdot S_1}{\tau_o \cdot \frac{\lambda_f}{s} \cdot S_1} = \frac{8914,4 + 465,01 \cdot 40 \cdot \frac{46}{0,007} \cdot 4,418 \cdot 10^{-3}}{40 \cdot \frac{46}{0,007} \cdot 4,418 \cdot 10^{-3}} = 472,69^\circ\text{C}$$

ní teplota

$$T_k = 2 \cdot \bar{T}_i - T_f = 2 \cdot 472,69 - 436,13 = 509,25^\circ\text{C}$$

Kontaktní teplota je nižší jak teplota lepení, což znamená, že se sklovina nebude lepit a tudíž chlazení bude **vyhovovat!**

rozložení teploty ve sklovině v komoře Ø65

Příklad výpočtu teploty ve vzdálenosti $x = 1\text{ mm}$ od stěny komory

$$a = \frac{\lambda_s}{c_s \rho_s} = \frac{1,4}{1080 \cdot 3050} = 425 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

$$\frac{x}{2\sqrt{a\tau_k}} = \frac{0,001}{2\sqrt{425 \cdot 10^{-9} \cdot 13}} = 0,21$$

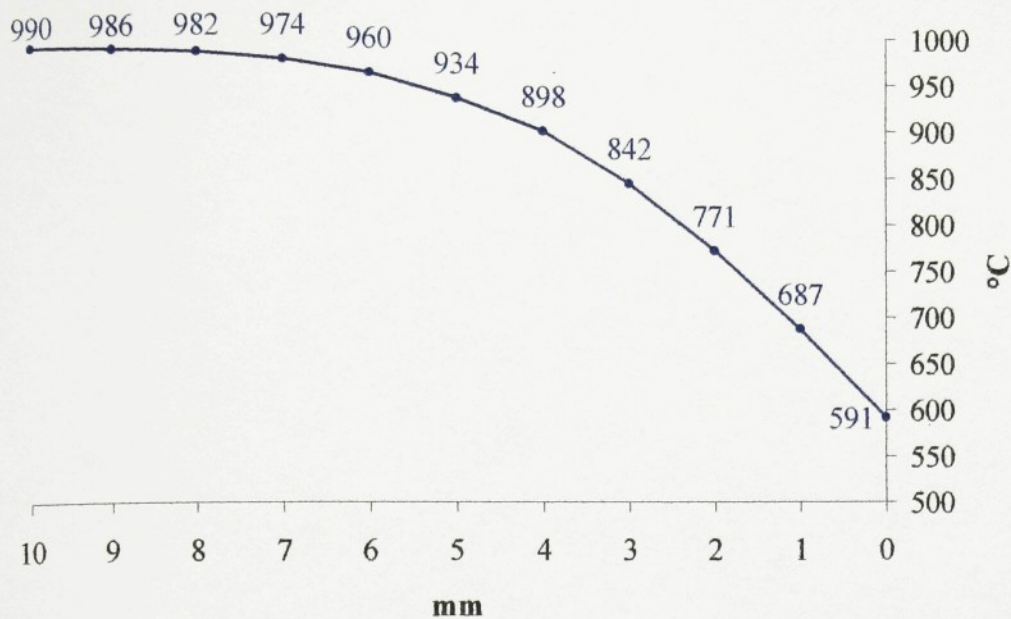
rampovy funkce z obr. 6. má Gaussův integrál chyb hodnotu

$$\text{erf}\left[\frac{x}{2\sqrt{a\tau_k}}\right] = 0,24$$

skloviny 15 s po kontaktu a 1 mm od stěny komory

$$T_{0,001;15} = T_k + \text{erf}\left[\frac{x}{2\sqrt{a\tau_k}}\right] \cdot (T_s - T_k) = 591,3 + 0,24 \cdot (990 - 591,3) = 687^\circ\text{C}$$

teplotní pole



obr. 18. Teplotní pole ve sklovině pol3 s v komoře Ø65

h pohonů

átor koná 4. pohyby

řenos komory z pod výtoku nad stonkolisy a nazpět

ertikální pohyb trnu při plnění formy

dsun mechanismu vertikálního pohybu trnu pro volný pád kapky skloviny při

nezistříhu do odpadní komory

tevirání dna při vyprazdňování komory

h pohonů lze použít Lagrangeových rovnic II. druhu

Lagrangeovy rovnice II. druhu jsou efektivním a nenáročným prostředkem pro
ání vlastních pohybových rovnic. Zejména pro aplikaci na jednodušší kinematické
maji řadu výhod, zejména:

- 1) při odvozování vlastních pohybových rovnic není nutné zavádět setrvačné účinky
- 2) výpočty jsou prováděny ve skalární formě s velmi snadno vyjádřitelnou
kinetickou, resp. potenciální energií.

Základní tvar vlastních pohybových rovnic lze pomocí Lagrangeových rovnic II.
apsat takto

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i$$

q_i je zobecněná souřadnice (délková nebo úhlová vnitřní souřadnice)

Q_i obecná vnější síla, tj. síla nebo moment

L kinetický potenciál = Lagrangeova funkce

$i = 1, 2, \dots, n$.

ský potenciál lze vyjádřit vztahem

$$L = W_K - W_P$$

$W_K = \sum W_{K_i}$ je kinetická energie celé soustavy

$W_P = \sum W_{P_i}$ je potenciální energie soustavy

lze vyjádřit součtem kinetické, resp. potenciální energie jednotlivých členů

Základní tvar vlastních pohybových rovnic představuje soustavu n rovnic, kde n je počet stupňů volnosti sledované soustavy.

Je zřejmé, že $\frac{\partial W_P}{\partial \dot{q}_i} = 0$, proto bude

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} = \frac{\partial W_K}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial W_P}{\partial \dot{q}_i} = \frac{\partial W_K}{\partial \dot{q}_i}$$

$$\frac{\partial L}{\partial q_i} = \frac{\partial W_K}{\partial q_i} - \frac{\partial W_P}{\partial q_i}$$

Nasazení těchto dvou rovnic do základního tvaru vlastních pohybových rovnic dostaneme

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial W_K}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial W_K}{\partial q_i} + \frac{\partial W_P}{\partial q_i} = Q_i$$

$i = 1, 2, \dots, n$.

Vyšetřením soustavy rovnic dostaneme soustavu n vlastních pohybových rovnic kinematického řetězce.

Uvedená soustava simultánních diferenciálních rovnic by teoreticky dovozovala pro průběhy hnacích sil a momentů stanovit průběhy rychlostí a zrychlení. Ve skutečnosti moment závislý jednak na uspořádání pohonu, jednak na nastavení jeho parametrů. Proto soustavu řešit pouze společně s rovnicemi regulátoru. Pro řešení je pak třeba provést takto uzavřeného regulačního obvodu na počítači.

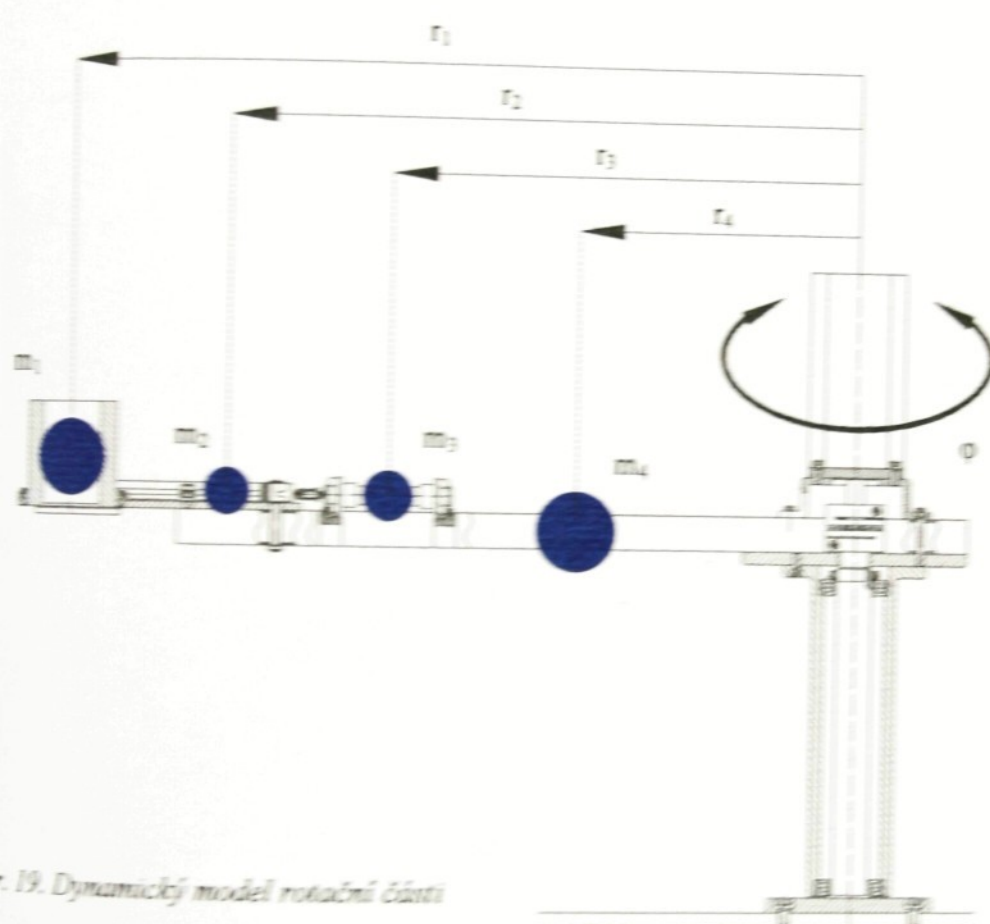
Pokud však jde pouze o vyhodnocení vlastností mechanické části konstrukce ve vazbě s daným pohonem, lze postup výrazně zjednodušit.

1. Zvolíme rozběh a doběh idealizovaným způsobem s konstantním zrychlením (zpožděním) ve fázi rozběhu a brždění. Pak lze najít příslušné časové průběhy silových účinků jednotlivých pohonů a posoudit dosažitelnost těchto parametrů v praktickém nasazení a pracovních režimech chodu pro zvolené pohony.
2. Nebo naopak pro daný průběh momentových charakteristik zvolených motorů a zvolené transformační bloky lze najít časový průběh kinematických veličin v době rozběhu, doběhu pohybové jednotky posuzovat dosažitelnost předpokládaných parametrů v různých pracovních režimech.

1. Návrh pohonu pro přenos komory

Komoru je nutné zastavit na pěti místech (pod výtokem, nad stonkolisy a v čekací poloze). Úhel mezi výtokem a prvním stonkolisem je 90° , mezi jednotlivými stonkolisy 60° , znamená, že maximální úhel otočení je 210° . Přesnost polohování pod výtokem a nad stonkolisy $\pm 1 \text{ mm}$.

Doba přenosu je 3s; doba rozběhu (brždění) je 0,5s; $m_1 = 8,1 \text{ kg}$; $m_2 = 3,8 \text{ kg}$; $m_3 = 9 \text{ kg}$; $m_4 = 11,6 \text{ kg}$; $r_1 = 0,9 \text{ m}$; $r_2 = 0,71 \text{ m}$; $r_3 = 0,53 \text{ m}$; $r_4 = 0,32 \text{ m}$;



19. Dynamický model rotační části

kinetická energie soustavy

$$W_k = \frac{1}{2} \dot{\varphi}^2 (m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + m_3 r_3^2 + m_4 r_4^2)$$

definice konstant hmotných bodů pro přehlednost

$$A_1 = \sum_{i=1}^4 m_i \quad A_2 = \sum_{i=1}^4 m_i r_i^2$$

pak kinetická energie

$$W_K = \frac{1}{2} \dot{\varphi}^2 A_2$$

potenciální energie

$$W_p = A_1 \cdot g \cdot H = \text{konst.}$$

jednotlivé zobecnělé souřadnice a hnací síly v souladu s označením v soustavě
Lagrangeových rovnic

$$q_1 = \varphi \quad Q_1 = M_\varphi$$

dílčí derivace

$$\frac{\partial W_K}{\partial \dot{\varphi}} = \dot{\varphi} \cdot A_2$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial W_K}{\partial \dot{\varphi}} \right) = \ddot{\varphi} \cdot A_2$$

$$\frac{\partial W_K}{\partial \varphi} = \frac{\partial W_p}{\partial \varphi} = 0$$

lastní pohybová rovnice

$$\ddot{\varphi} \cdot A_2 = M_\varphi$$

o dosazení

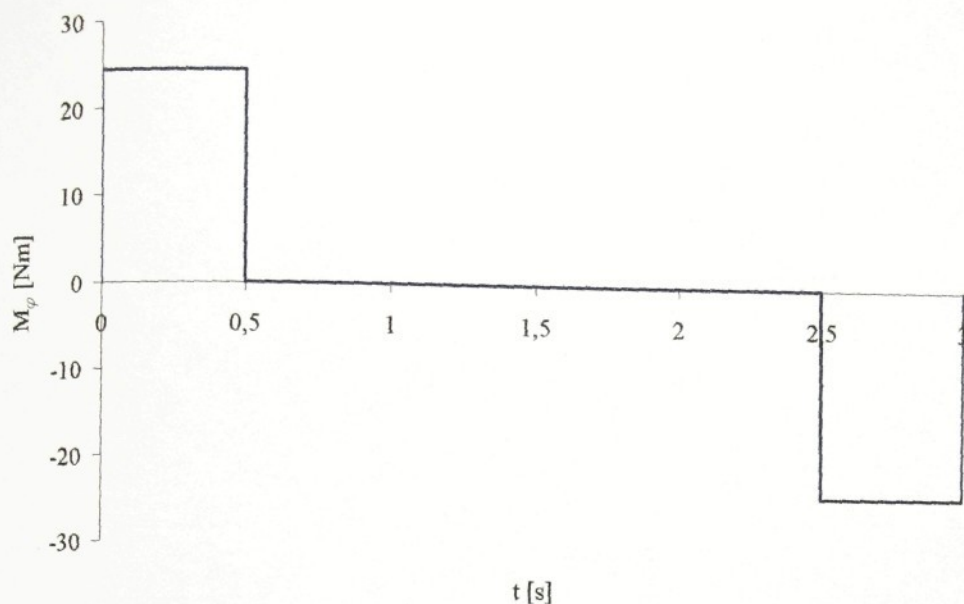
$$A_2 = \sum_{i=1}^4 m_i r_i^2 = 8,1 \cdot 0,9^2 + 3,8 \cdot 0,71^2 + 0,9 \cdot 0,53^2 + 11,6 \cdot 0,32^2 = 9,92$$

maximální rychlost $\dot{\varphi}_{\max} = 7\pi/18 \text{ rad/s}$; doba rozběhu (brždění) $t_R = 0,5\text{s}$

$$\ddot{\varphi} = \frac{\dot{\varphi}_{\max}}{t_R} = \frac{7\pi}{18 \cdot 0,5} = \frac{7\pi}{9} = 2,44\text{s}^{-2}$$

otom

$$M_\varphi = \ddot{\varphi} \cdot A_2 = 2,44 \cdot 9,92 = 24,2\text{Nm}$$



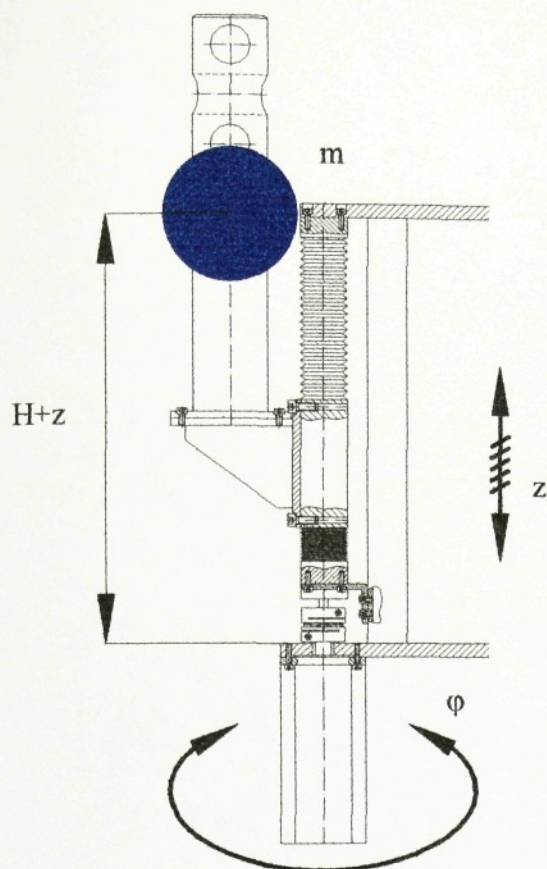
obr. 20. Znáznornění dynamických účinků

Tomuto zatížení vyhovuje krokový motor SM43-4940 firmy MICROCON. Statický moment je 40 Nm. Nejvyšší provozní moment je 29 Nm. Délka kroku je $1,8^\circ$. Tolerance kroku je $0,06^\circ$, to při rameni 900mm je 0,94mm.

6.2. Návrh pohonu pro vertikální pohyb trnu

Trn bude konat dvojí pohyb.

1. Pomalý posuv při plnění komory sklovinou
2. Rychlý posuv při vyjetí trnu do horní úvratě a při sjetí po ukončení plnění.



obr. 21. Dynamický model trnu

Pro 200g dávku a $\varnothing 65\text{mm}$ komoru bude mít pomalý posuv rychlost 2mm/1s a zdvih 20mm, pro 500g dávku a $\varnothing 75\text{mm}$ komoru bude mít pomalý posuv rychlost 2,5mm/1s a zdvih 37mm. Z těchto důvodů je třeba zajistit snadnou přídělnost zdvihu při změně vyráběného sortimentu. Což se dá splnit pomocí krokového motoru s transformací rotačního pohybu na lineární pomocí kuličkového šroubu.

Stoupání šroubu $s = 10\text{mm}$; doba vysunutí $t = 0,6\text{s}$; maximální výška vysunutí $h = 130\text{mm}$; $H = 450\text{mm}$; $m = 10,6\text{kg}$

$$\frac{\varphi}{2\pi} = \frac{z}{s} \quad \frac{\dot{\varphi}}{2\pi} = \frac{\dot{z}}{s}$$

Kinetická energie soustavy

$$W_k = \frac{1}{2} \dot{z}^2 m = \frac{1}{8\pi^2} m \cdot s^2 \cdot \dot{\varphi}^2$$

potenciální energie

$$W_p = m \cdot g \cdot (H + z) = m \cdot g \cdot \left(H + \frac{\varphi \cdot s}{2\pi} \right)$$



jednotlivé zobecnělé souřadnice a hnací síly v souladu s označením v soustavě Lagrangeových rovnic

$$q_1 = \varphi \quad Q_1 = M_\varphi$$

dílčí derivace

$$\frac{\partial W_K}{\partial \dot{\varphi}} = \frac{1}{4\pi^2} m \cdot s^2 \cdot \dot{\varphi}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial W_K}{\partial \dot{\varphi}} \right) = \frac{1}{4\pi^2} m \cdot s^2 \cdot \ddot{\varphi}$$

$$\frac{\partial W_K}{\partial \varphi} = 0$$

$$\frac{\partial W_P}{\partial \varphi} = m \cdot g \cdot \frac{s}{2\pi}$$

vlastní pohybová rovnice

$$\frac{1}{4\pi^2} m \cdot s^2 \cdot \ddot{\varphi} + m \cdot g \cdot \frac{s}{2\pi} = M_\varphi$$

po dosazení

$$\text{maximální rychlost } \dot{\varphi}_{\max} = \frac{h \cdot 2\pi}{s \cdot t} = \frac{0,13 \cdot 2\pi}{0,01 \cdot 0,6} = 136,14 \text{ s}^{-1}$$

doba rozběhu (brždění) $t_R = 0,1 \text{ s}$

$$\ddot{\varphi} = \frac{\dot{\varphi}_{\max}}{t_R} = \frac{136,14}{0,1} = 1361,4 \text{ s}^{-2}$$

potom

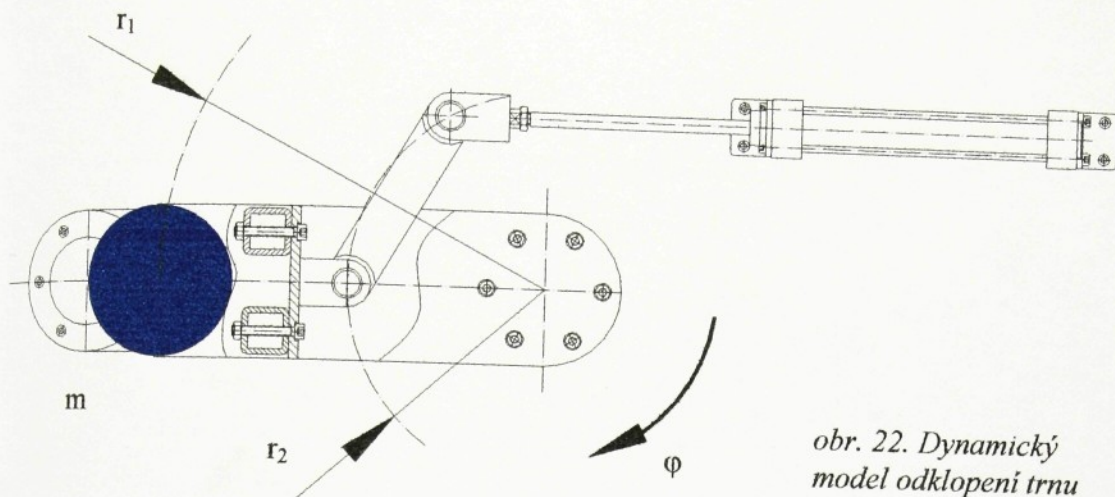
$$M_\varphi = \frac{1}{4\pi^2} m \cdot s^2 \cdot \ddot{\varphi} + m \cdot g \cdot \frac{s}{2\pi} = \frac{1}{4\pi^2} \cdot 10,6 \cdot 0,01^2 \cdot 1361,4 + 10,6 \cdot 9,81 \cdot \frac{0,01}{2\pi} = 0,20 \text{ Nm}$$

Tomuto zatížení vyhovuje krokový motor SM33-4513 firmy MICROCON. Statický moment je 13 Nm. Nejvyšší provozní moment je 9,5 Nm. Při otáčkách $n = 22 \text{ ot/s}$ je maximální moment 1,2 Nm. Délka kroku je $1,8^\circ$. Tolerance kroku je $0,06^\circ$.

Firma MICROCON dodává kompletní lineární pohon, který obsahuje jednotku s řídicí částí, krokový motor, spojovací člen včetně svěrné pružné spojky, lineární vedení s vodicími tyčemi se zabudovaným kuličkovým šroubem.

6.3. Návrh pohonu pro odsun mechanismu vertikálního pohybu trnu

Vertikální mechanismus trnu je uložen na otočné páce jenž se otáčí kolem osy z. Jako silový prvek je použit lineární pneumatický válec, který zajišťuje odklopení páky.



obr. 22. Dynamický model odklopení trnu

$m = 32,4 \text{ kg}$; $r_1 = 320 \text{ mm}$; $r_2 = 170 \text{ mm}$; doba odklopení trnu $t = 1 \text{ s}$; úhel odklopení $\varphi = 60^\circ$;

Kinetická energie soustavy

$$W_K = \frac{1}{2} \dot{\varphi}^2 (m \cdot r_1^2)$$

potenciální energie

$$W_p = A_1 \cdot g \cdot H = \text{konst.}$$

jednotlivé zobecněné souřadnice a hnací síly v souladu s označením v soustavě

Lagrangeových rovnic

$$q_1 = \varphi \quad Q_1 = M_\varphi$$

dílčí derivace

$$\frac{\partial W_K}{\partial \dot{\varphi}} = \dot{\varphi} \cdot (m \cdot r_1^2)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial W_K}{\partial \dot{\varphi}} \right) = \ddot{\varphi} \cdot (m \cdot r_1^2)$$

$$\frac{\partial W_K}{\partial \varphi} = \frac{\partial W_p}{\partial \varphi} = 0$$

vlastní pohybová rovnice

$$\ddot{\phi} \cdot (m \cdot r_1^2) = M_\phi$$

po dosazení

maximální rychlost $\dot{\phi}_{\max} = \pi/3 \text{ rad/s}$; doba rozběhu (brždění) $t_R = 0,2\text{s}$

$$\ddot{\phi} = \frac{\dot{\phi}_{\max}}{t_R} = \frac{\pi}{3 \cdot 0,2} = 5,24\text{s}^{-2}$$

potom

$$M_\phi = \ddot{\phi} \cdot (m \cdot r_1^2) = 5,24 \cdot 32,4 \cdot 0,32 = 54,33\text{Nm}$$

pak

$$F = \frac{M_\phi}{r_2} = \frac{54,33}{0,17} = 319,59\text{N}$$

pro $p = 600 \text{ kPa}$

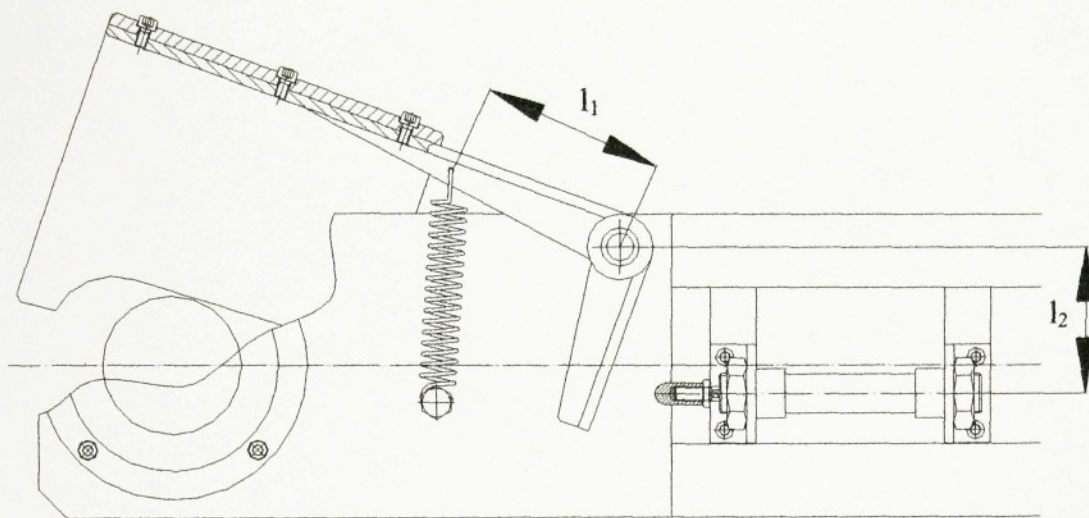
$$S = \frac{F}{p} = \frac{319,59}{0,6} = 532,65\text{mm}^2$$

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \Rightarrow d = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 532,65}{\pi}} = 26,04\text{mm}$$

Na odsun mechanismu vertikálního pohybu mechanismu je použit dvojčinný pneumatický válec $\varnothing 32\text{mm}$ typu DNGU-32-PPV-A firmy FESTO o zdvihu 170mm.

6.4. Návrh pohonu pro otevírání dna

Dno komory je připevněno na páce a je za zavírání silou pružiny. Pro otevření dna je zapotřebí překonat sílu této pružiny.



obr. 23. Otevírání dna

Rozměry pružiny $d = 2\text{mm}$; $D = 20\text{mm}$; prodloužení $s = 25\text{mm}$; počet činných závitů $n = 16$ modul pružnosti ve smyku $G = 7,85 \cdot 10^4 \text{ MPa}$.

síla pružiny

$$F_1 = \frac{s \cdot G \cdot d^4}{8 \cdot D^3 \cdot n} = \frac{0,025 \cdot 7,85 \cdot 10^{10} \cdot 0,002^4}{8 \cdot 0,02^3 \cdot 16} = 30,66\text{N}$$

$$F_2 = \frac{F_1 \cdot l_1}{l_2} = \frac{30,66 \cdot 100}{80} = 38,33\text{N}$$

pro $p = 600 \text{ kPa}$

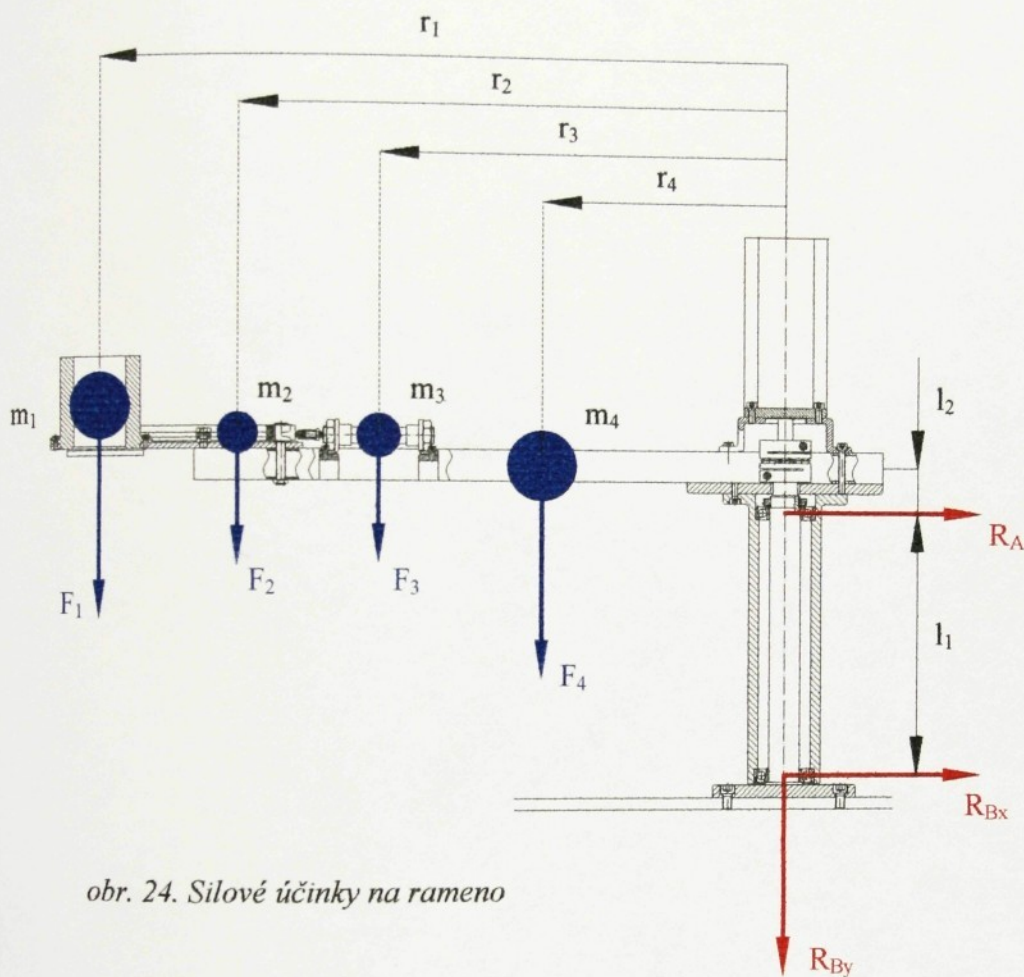
$$S = \frac{F_2}{p} = \frac{38,33}{0,6} = 63,88\text{mm}^2$$

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \Rightarrow d = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 63,88}{\pi}} = 9,02\text{mm}$$

Na odsun dna je použit jednočinný pneumatický válec $\varnothing 20\text{mm}$ typu ESNU-20-P-A firmy FESTO o zdvihu 30mm .

6.5. Výpočet deformace ramene a namáhání jeho uložení

$m_1 = 8,1 \text{ kg}$; $m_2 = 3,8 \text{ kg}$; $m_3 = 0,9 \text{ kg}$; $m_4 = 11,6 \text{ kg}$; $r_1 = 0,9 \text{ m}$; $r_2 = 0,71 \text{ m}$; $r_3 = 0,53 \text{ m}$;
 $r_4 = 0,32 \text{ m}$; $l_1 = 0,35 \text{ m}$; $l_2 = 0,06 \text{ m}$; $E_{ra} = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$; $J_{ra} = 0,145 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$; $E_{sl} = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$;
 $J_{sl} = 0,125 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$ $\varnothing d = 0,04 \text{ m}$; $\tau_{Dsv} = 0,65$; $\sigma_D = 0,65 \cdot 110 = 93,5 \text{ MPa}$



obr. 24. Silové účinky na rameno

Výpočet reakcí

$$\downarrow F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + R_{By} = 0$$

$$\rightarrow R_A + R_{Bx} = 0$$

$$\cup F_1 \cdot r_1 + F_2 \cdot r_2 + F_3 \cdot r_3 + F_4 \cdot r_4 + R_{Bx} \cdot l_1 = 0$$

$$R_{Bx} = -\frac{F_1 \cdot r_1 + F_2 \cdot r_2 + F_3 \cdot r_3 + F_4 \cdot r_4}{l_1} =$$

$$= \frac{79,46 \cdot 0,9 + 37,28 \cdot 0,71 + 8,83 \cdot 0,53 + 11380 \cdot 0,32}{0,35} = -397,37 \text{ N}$$

$$R_A = -R_{Bx} = 397,37\text{N}$$

$$R_{By} = -F_1 - F_2 - F_3 - F_4 = -79,46 - 37,28 - 8,83 - 113,80 = -239,37\text{N}$$

Průhyb nosného ramena v místě komory

Přibližný výpočet:

$$\begin{aligned} M_0 &= F_1 \cdot r_1 + F_2 \cdot r_2 + F_3 \cdot r_3 + F_4 \cdot r_4 = \\ &= 79,46 \cdot 0,9 + 37,28 \cdot 0,71 + 8,83 \cdot 0,53 + 113,80 \cdot 0,32 = 139,08\text{Nm} \end{aligned}$$

Vzhledem k tomu, že nosné pruty budou 2, bude pak

$$M_{01} = \frac{M_0}{2} = \frac{139,08}{2} = 69,54\text{Nm}$$

Průhyb pak

$$\Delta z_{\max} = \frac{M_0 \cdot r_1^2}{2 \cdot E_{ra} \cdot J_{ra}} = \frac{69,54 \cdot 0,9^2}{2 \cdot 2,1 \cdot 10^{11} \cdot 0,145 \cdot 10^{-6}} = 0,00092\text{m} \approx 0,92\text{mm}$$

Výpočet sloupku

Průhyb sloupku

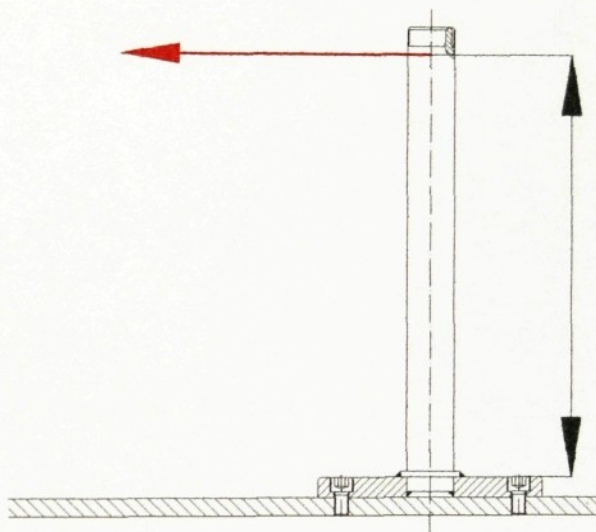
$$\begin{aligned} \Delta x_{\max} &= \frac{R_A \cdot l_1^3}{3 \cdot E_{sl} \cdot J_{sl}} = \\ &= \frac{239,37 \cdot 0,35^3}{3 \cdot 2,1 \cdot 10^{11} \cdot 0,125 \cdot 10^{-6}} = \\ &= 0,00013\text{m} \approx 0,13\text{mm} \end{aligned}$$

Výpočet sváru

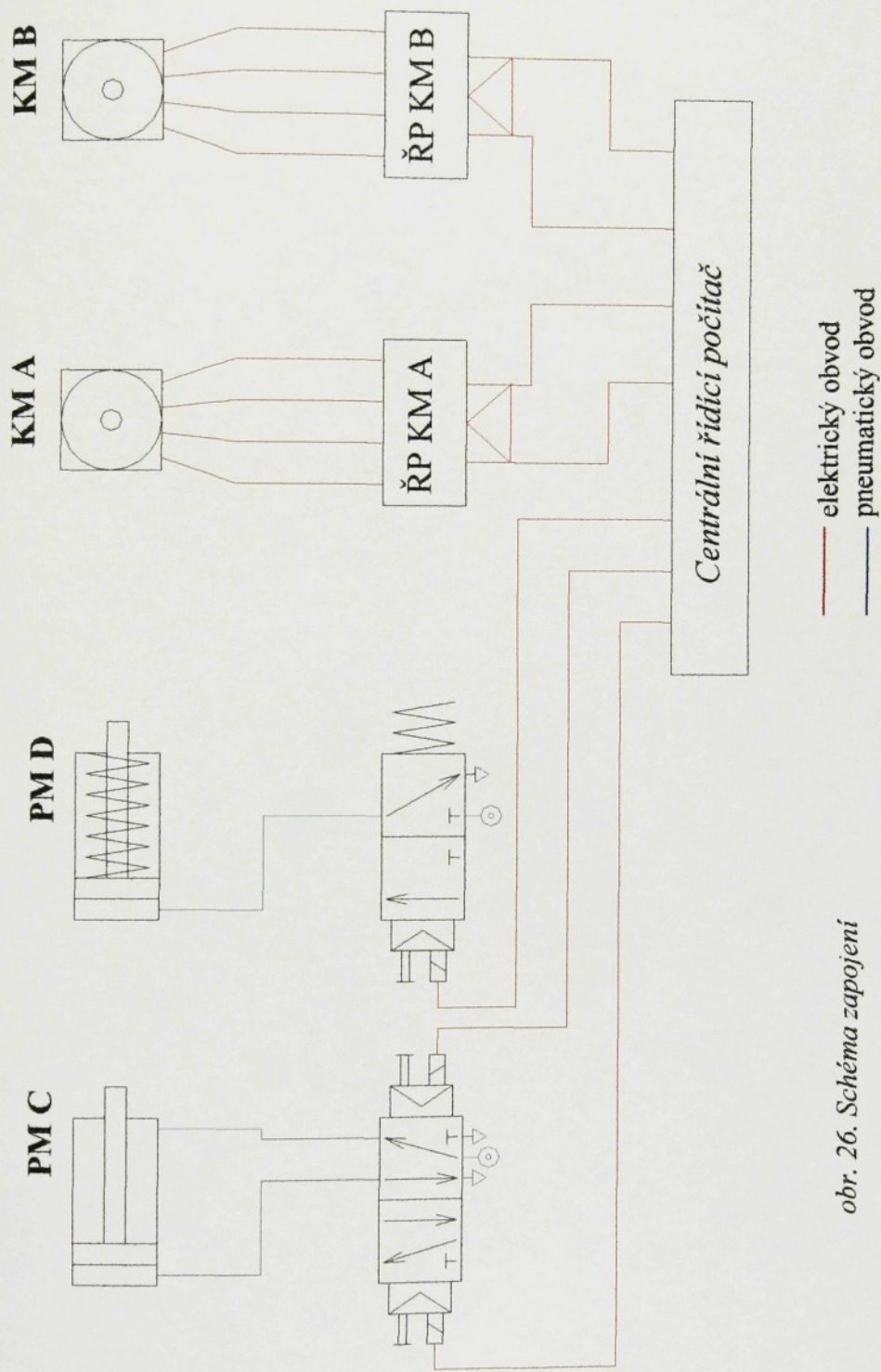
$$\begin{aligned} \tau_{//} &= \frac{R_A}{a \cdot \pi \cdot (d + d_1)} = \\ &= \frac{239,37}{0,005 \cdot \pi \cdot (0,04 + 0,05)} = 0,17\text{MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_{\perp} &= \frac{M_0}{W_{OSV1} + W_{OSW2}} = \frac{R_A \cdot l_1}{\frac{\pi}{32} \cdot \left(\frac{D^4 - d^4}{D} + \frac{D_1^4 - d_1^4}{D_1} \right)} = \\ &= \frac{239,37 \cdot 0,35}{\frac{\pi}{32} \cdot \left(\frac{0,05^4 - 0,04^4}{0,05} + \frac{0,06^4 - 0,05^4}{0,06} \right)} = 4,60\text{MPa} \end{aligned}$$

$$\tau = \sqrt{\tau_{//}^2 + \tau_{\perp}^2} = \sqrt{0,17^2 + 4,60^2} = 4,60\text{MPa} < \tau_{Dsv}$$

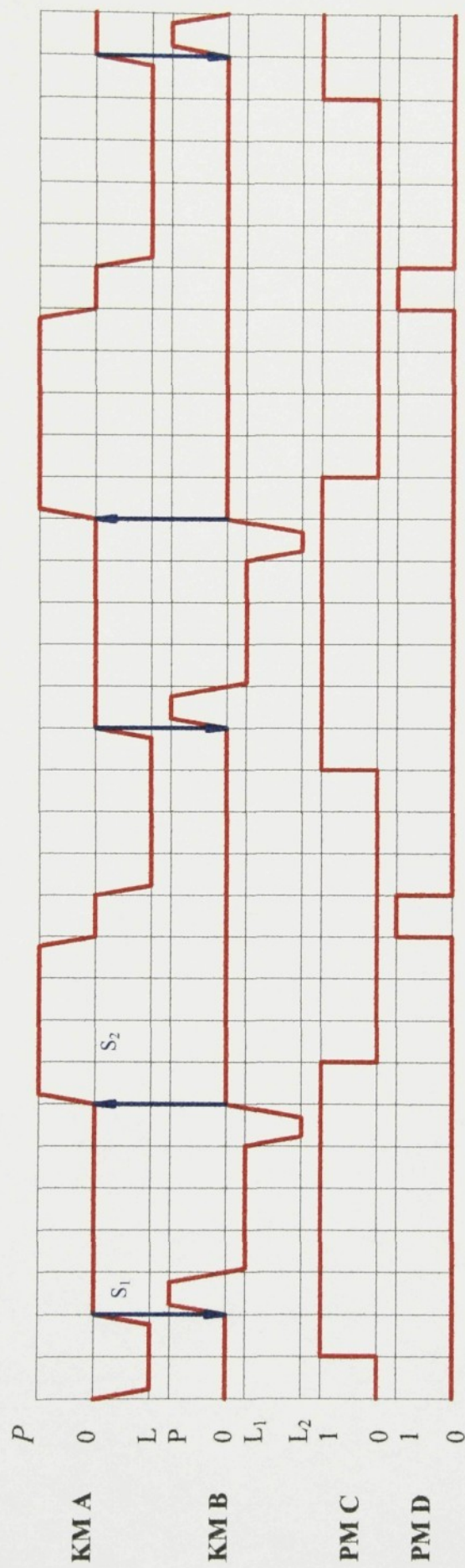


obr. 25. Silové účinky na sloupek



obr. 26. Schéma zapojení

7. Časový harmonogram



obr. 27. Časový harmonogram

7.1. Popis časového harmonogramu

KM A - rotační krokový motor pro přesun komory

ŘP KM A - řídicí prvek krokového motoru A

P - rotace motoru doprava

L - rotace motoru doleva

0 - motor je v klidu

KM B - rotační krokový motor vertikálního posunu trnu

ŘP KM B - řídicí prvek krokového motoru B

P - pohyb trnu nahoru

L₁ - pomalý pohyb dolů

L₂ - rychlý pohyb dolů

PM C - lineární motor na odstranění trnu

1 - motor je vysunut - trn je pod výtokem

2 - motor je zasunut

PM D - motor na otevírání dna

S₁ - indukční snímač pro polohování komory pod výtok

S₂ - indukční snímač pro kontrolu dolní úvratě trnu

Nejprve přijede komora pod výtok, indukční snímač S₁ dá povel, že komora je připravena a trn vyjede do horní úvratě. Poté začne pomalu klesat až ho okamžiku, kdy nůžky odstříhnou dávku, v ten okamžik začne trn klesat rychle. Jakmile dojede trn do dolní úvratě, indukční snímač S₂ to zaznamená a komora může odjed ke stonkolisu. Jakmile opustí komora prostor pod výtokem, odsune se i trn se svým mechanismem. V okamžik, když přijede komora nad stonkolis, vysune se motor D, čímž se otevře dno komory a dávka vypadne. Poté se opět dno zavře a komora může jed pro další dávku. Těsně před dojetím komory pod výtok, dojede též pod výtok trn. A celý cyklus se může opakovat.



8. Technicko ekonomické zhodnocení

Cílem této kapitoly je provést stručné shrnutí technických parametrů navrženého dávkovacího manipulátoru a určit jeho ekonomický přínos z hlediska návratnosti vynaložených prostředků na jeho realizaci.

Provozně technické zhodnocení

Navržený dávkovací manipulátor automaticky rozděluje dávky mezi 2 nebo 3 stonkolisy, čímž se celý provoz zrovnoměří a zrychlí, tím se i zvýší kvalita dávky.

Automatický dávkovací manipulátor nevyžaduje žádnou přímou obsluhu na rozdíl od ručního dávkování.

Ekonomické zhodnocení

Automatizací dávkování skloviny vedou k:

- zrychlení celého provozu
- zvýšení kvality povrchu dávky
- ušetření pracovní síly

Náklady na výrobu automatického dávkovače jsou v tabulce 7. Hodnoty byly obdrženy od jednotlivých dodavatelů komponentů z kterých bude dávkovač sestaven.

tab. 7. Ceny jednotlivých částí dávkovače

základní konstrukce	15 000 Kč
normalizované součásti	3 000 Kč
pneumatika a příslušenství	30 000 Kč
krokové motory, kuličkový šroub a příslušenství	160 000 Kč
centrální počítač	80 000 Kč
celkem	258 000 Kč

Jelikož se zrychlí celý provoz a uspoří se na pracovní síle, můžeme počítat s velice rychlou návratností.

9. Závěr

V diplomové práci byl řešen problém automatického dávkování skloviny do 2 až 3 stonkolisů. Celé pojetí návrhu vycházelo ze snahy zvýšit vnitřní kvalitu dávky. Byly stanoveny podmínky pro zachování kvality dávky. V průběhu vypracování se vyskytlo několik variant, které byly popsány a ze kterých byl po posouzení vybrán nejvhodnější způsob řešení.

Zachování vertikální orientace (teplé sklo nahoře) bylo řešeno otevíráním dna do strany. Pro zajištění rovnoměrného plnění přenášečí komory byl zkonstruován vertikálně se pohybující trn jenž se před začátkem plnění nachází v horní úvrati a při plnění se mikroposuvem pohybuje dolů. Rozměry komory, trnu a dna byly stanoveny tak, aby se samovolně chladily okolním vzduchem na teplotu, jenž zaručuje nepřilepení skloviny a zároveň aby sklovinu zbytečně nepodchlazovali.



Seznam použité literatury

1. BELDA, J.: Sklářské a keramické stroje II., Tepelné výpočty, skriptum VŠST, 1986
2. COENEN, M.: Messungen und Berechnungen über den zeitlichen Temperaturverlang an der Genzzone Metall – Glasschmelze. Advaces in glass technology. Plenum Press, N. York, 1962
3. HLAVÁČ, J.: Základy technologie silikátů, SNTL, Praha, 1981
4. KIRSCH, R.: Kovy ve sklářství, Informatorium, Praha, 1992
5. SMRČEK, A.: Strojní tvarování skla, SNTL, Praha, 1981
5. STANĚK, J.: Elektrické tavení skla, SNTL, Praha, 1976
6. TRIER, W.: Temperaeturmessungen in Glasformen. Glastechn. Ber., 1955
7. VÁVRA, P.: Strojnické tabulky, SNTL, Praha, 1983
8. Firemní katalog FESTO
9. Firemní katalog MICROCON