

Vysoká škola: strojní a textilní

Katedra: technologie a nauky o mater.

Fakulta: strojní

Školní rok: 1972/73

DIPLOMOVÝ ÚKOL

pro Karla Š P Á N K A

odbor strojírenská technologie

Protože jste splnil..... požadavky učebního plánu, zadává Vám vedoucí katedry ve smyslu směrnic ministerstva školství o státních závěrečných zkouškách tento diplomový úkol:

Název tématu: Racionalizace vstřikování termoplastů

Pokyny pro vypracování:

1. Rozeberte technologické faktory ovlivňující délku vstřikovacího cyklu při zpracování termoplastů.
2. Hlavní pozornost věnujte rozboru doby chlazení hmoty ve formě a způsobu určení její délky.
3. Porovnejte teoreticky stanovenou chladicí dobu se skutečně užívanou v provozních podmínkách.
4. Experimentálně stanovte koeficient teplotní vodivosti a pro vybrané termoplasty a pro různé podmínky chlazení hmoty analogické skutečnému výrobnímu procesu.
5. Na základě získaných výsledků navrhnete racionalizační opatření, která zpřesní výrobní proces.
6. Proveďte ekonomický rozbor řešené úlohy.

Autorské právo na vědi směřující MŠK pro školní
záměrně zločiny č. j. 31 727/52-III/2 ze dne
13. července 1962 Vězeň MŠK VIII, sešit 24 na čísle
31.8.1962 § 19 autorského zákona č. 115/53 Sb.

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ
USILPODNI LADBOVNA
LIBEREČ I. STUDENTSKÁ 5

Rozsah grafických laboratorních prací:

Rozsah průvodní zprávy: 40 - 50 stran

Seznam odborné literatury:

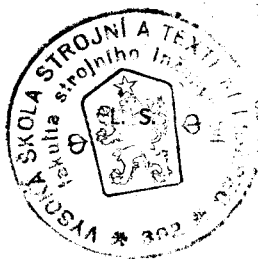
1. Diplomová práce s. Cvejna, 1972
2. Diplomová práce s. Horáčka 1971
3. Časopisy: Plastické hmoty
Plaste und Kautschuk

Vedoucí diplomové práce: Ing. Josef Krebs CSc

Konzultanti: Ing. Josef Louthan

Datum zahájení diplomové práce: 18. 10. 1972

Datum odevzdání diplomové práce: 7. 7. 1973



[Signature]
Doc. Ing. Václav Chaloupecký CSc
vedoucí katedry

[Signature]
Prof. Ing. Dr. techn. Frant. Kotšmíd
děkan

VŠST Liberec		DP - ST 1015/73	
Fakulta strojní		KTM	str. 1

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vypracoval : Karel Špánek

VŠST Liberec		DP - ST 1015/73
Fakulta strojní		KTM str. 2

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

V Liberci dne 6. července 1973

K. Spáček

VŠST Liberec		DP - ST 1015/73	
Fakulta strojní		KTM	str. 3

<u>O B S A H</u>			str.
1.	Úvod		5
2.	Vliv technologických faktorů na délku vstřikovacího cyklu při vstřikování termoplastu		6
2.1.	Doba chladnutí v časové struktuře pracov- ního cyklu		6
2.2.	Proces chladnutí termoplastické hmoty v dutině formy		7
2.3.	Vliv technologických faktorů na délku doby chlazení		9
2.3.1.	Vliv teploty formy		9
2.3.2.	Vliv teploty vstřikované hmoty		15
2.3.3.	Vliv teploty vyjímání výstřiků z formy . . .		18
2.3.4.	Vliv průtokové rychlosti chladicí kapaliny .		18
2.3.5.	Vliv materiálových faktorů		21
3.	Rozbor doby chlazení hmoty ve formě a způsob určení její délky		22
3.1.	Matematické řešení chladnutí tuhých těles .		22
3.2.	Metoda stanovení τ_{ch} dle B. Laczyňského . .		27
3.3.	Zjednodušená metoda pro početní předstano- vení doby chlazení		28
3.4.	Určení doby chladnutí pomocí nomogramu . . .		30
4.	Porovnání teoreticky stanovené doby chladnutí se skutečně používanou v provozních podmín- kách		33
4.1.	Rozložení teploty v příčném řezu stěnou výstřiku		35

VŠST Liberec		DP - ST 1015/73
Fakulta strojní		KTM str. 4

	str.
4.1.1. Řešení průběhu teploty výstřiku v závislosti na čase	36
4.1.2. Kalorimetrické měření teploty výstřiku . . .	37
5. Experimentální stanovení koeficientu teplotní vodivosti <u>a</u>	38
5.1. Měřicí metoda	38
5.2. Snímač teploty	39
5.3. Konstrukce snímače	41
5.4. Měřicí zařízení	42
5.5. Zkušební zařízení	45
5.6. Metody určení součinitele teplotní vodivosti <u>a</u>	47
5.7. Výsledky měření	51
6. Racionalizační opatření plynoucích z výsledků	61
7. Ekonomický rozbor řešené úlohy	63
8. Závěr	64
9. Seznam použité literatury	65
10. Přílohy	68

VŠST Liberec		DP - ST 1015/73	
Fakulta strojní		KTM	str. 5

1. Úvod

Plastické hmoty nabyly v posledních dvou až třech desetiletích takového významu, že dnes patří k nejdůležitějším materiálům v národním hospodářství. Bez nich si některá odvětví průmyslu například elektrotechnika, automobilový průmysl, výroba spotřebního zboží a jiné, již ani neumíme představit.

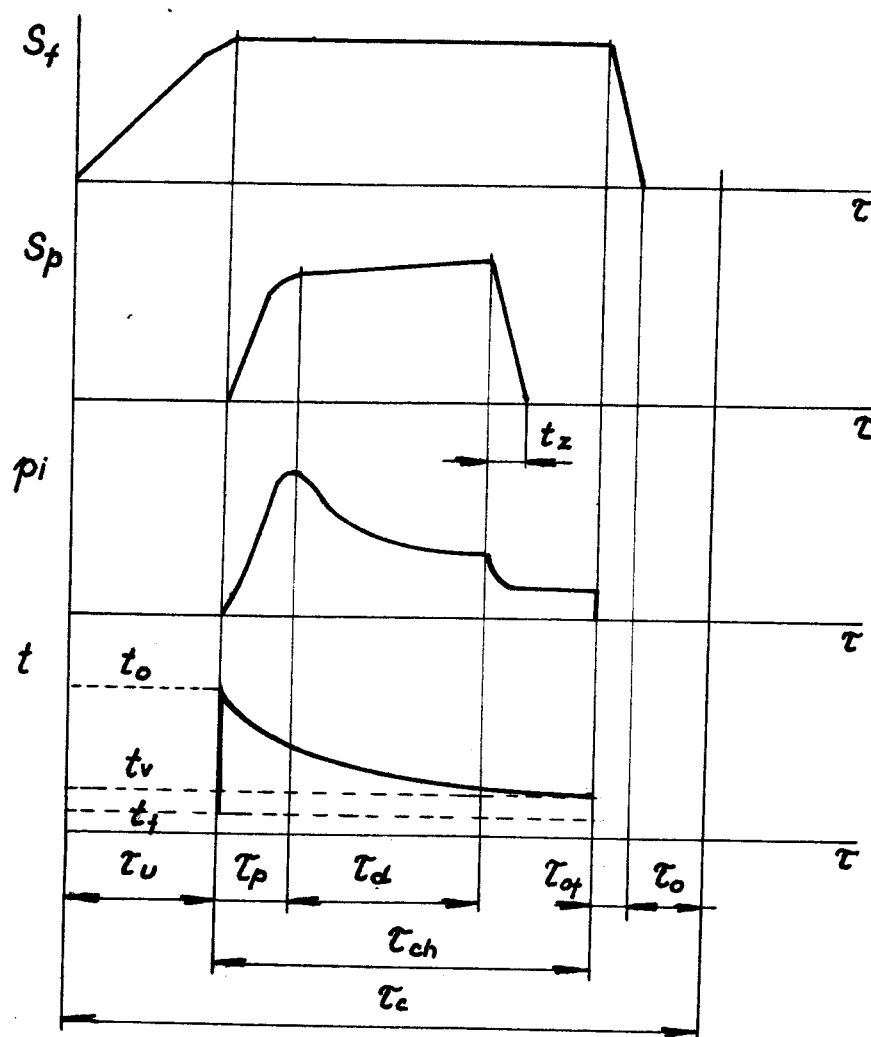
V ČSSR nastává po druhé světové válce, tak jako v ostatních zemích, rychlý rozvoj výroby plastických hmot. Za posledních deset let vzrostl objem výroby zhruba sedmkrát. Při pohledu do nejbližší budoucnosti lze očekávat další vzrůst. S tímto vzrůstem výroby plastických hmot počítala naše strana a vláda. Je to zakotveno i ve směrnících XIV. sjezdu KSČ k 5. pětiletému plánu. Se zvyšováním výroby plastických hmot přichází požadavek co nejekonomičtější výroby a vyšší nároky na úroveň operativního plánování. Hospodárnost výroby souvisí s produktivitou práce vstřikovacích lisů a tak s délkou pracovního cyklu. Podstatnou částí pracovního cyklu je doba chlazení výstřiků v dutině formy. K určení délky doby chlazení je třeba znát vedle vlivů technologických parametrů vstřikování na vlastnosti výstřiků také jejich vliv na dobu chladnutí. Dále je také třeba určit tepelné vlastnosti vstřikované plastické hmoty a z těchto pak určovat dobu chladnutí výstřiků.

Cílem této práce je studium průběhu chladnutí, stanovení teplotové vodivosti a a její případné závislosti na geometrii vstřikovaného výrobku a navržení racionalizačních opatření zpřesňující výrobní proces.

2. Vliv technologických faktorů na délku vstřikovacího cyklu při vstřikování termoplastů

2.1. Doba chlazení v časové struktuře pracovního cyklu

Představu o časové struktuře pracovního cyklu vstřikovacího lisu podává obr. 1. [9].



Obr. 1.

VŠST Liberec		DP - ST 1015/73
Fakulta strojní		KTM str. 7

Jednotlivé symboly na obr. 1. značí :

- S_f - dráha pohybu nástroje
- S_p - dráha pohybu pístu
- p_i - vnitřní vstřikovací tlak
- t - okamžitá teplota hmoty ve formě
- t_o - teplota vstřikované taveniny
- t_f - teplota formy
- t_v - teplota vyjímání výstřiku
- τ_u - doba zavírání formy
- τ_{ch} - doba chlazení výstřiku
- τ_p - doba plnění formy taveninou
- τ_d - doba doplňování formy
- τ_{of} - doba otvírání formy
- τ_o - doba přestávky
- τ_c - celková doba pracovního cyklu

Z uvedeného diagramu vyplývá, že největší část celkové doby pracovního cyklu zaujímá doba chlazení výstřiku.

2.2. Proces chlazení termoplastické hmoty v dutině formy

Proces chlazení hmoty probíhá od prvního okamžiku doteku vstřikované hmoty se stěnou formy, tedy již při plnění dutiny formy. Při styku taveniny s chladnou stěnou formy dochází vlivem sdílení tepla k vytvoření příčného teplotního

spádu. Důsledkem pak je nerovnoměrné rozložení teplot v příčném průřezu výstřiku, zatím co ve slabé vrstvičce materiálu jež je v bezprostředním styku se stěnou formy, poklesne teplota na hodnotu teploty stěny formy. Hmota je tedy v tuhém stavu. Pak ve směru ke středu (k teplotní ose) je hmota se stále vyšší teplotou, až v určité vzdálenosti od středu je teplota tak vysoká, že hmota se nachází ve vysoce viskózním stavu a tento průřez proto nazýváme plastickou duší. Tímto průřezem se uskutečňuje proudění hmoty do dutiny formy a její zaplňování. V celém průběhu tečení hmoty probíhá neustále sdílení tepla, takže v určitém okamžiku, t.j. při dosažení takové vzdálenosti od místa vstupu již není nově přitékající hmota schopna dodávat teplo v takové míře, v jaké je třeba k udržení plastického čela postupující hmoty. V tomto okamžiku přestává probíhat plnění tvarové dutiny formy. V praxi k tomuto nesmí dojít před úplným zaplněním tvarové dutiny formy. Na obr. 1. je tento děj a jemu odpovídající časový úsek označen τ_p .

Další fází chladnutí je chladnutí hmoty, která je již v klidu po zaplnění tvarové dutiny formy. Určitý, nepatrný pohyb je ještě u ústí vstupu, kde se vlivem smrštění hmoty v průběhu chladnutí vytváří dutina, jež je zaplňována při t.zv. dotlačování. Časový úsek označen na obr. 1. symbolem τ_d . Tento pohyb ustane v okamžiku zatuhnutí vstupu. Ostatní částí tedy sdílí teplo se stěnami formy, jde o nestacionární sdílení tepla vedením. K sdílení dochází jen tam, kde je hmota ve styku se stěnou formy. Tam kde dojde vlivem smrštění k přerušení styku hmoty a formy, pak probíhá sdílení konvekcí a sáláním. Ochlazování výstřiku probíhá tak dlouho, dokud je nejteplejší část výstřiku

nedosáhne teploty při které by nedošlo vlastní vahou, nebo vlivem působení vyhazovacího systému k deformaci výstřiku. Tato doba je označena τ_{ch} . Chlazením výstřiku na teplotu okolí dochází po vyjmutí z formy a to konvekcí a sáláním.

2.3. Vliv technologických faktorů na délku doby chlazení

Mezi tyto faktory patří :

- 1) vliv teploty formy
- 2) vliv teploty vstřikované hmoty
- 3) vliv teploty vyjímání výstřiku z formy
- 4) vliv průtokové rychlosti chladicí kapaliny
- 5) vliv materiálových faktorů

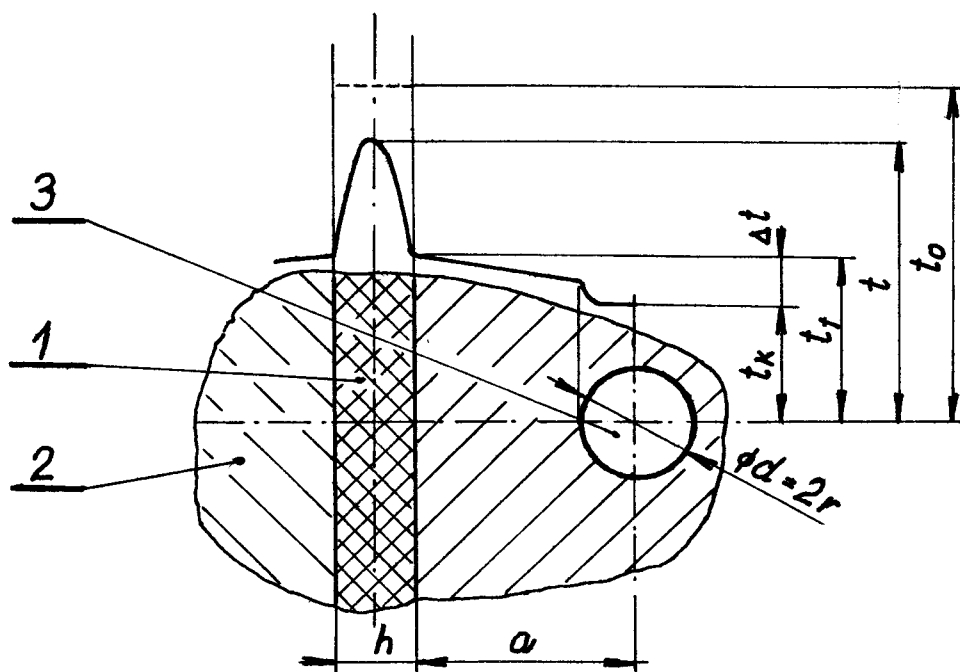
2.3.1. Vliv teploty formy t_f

Tato teplota je velmi obtížně určitelná, neboť kolísá mezi dvěma extrémy a to dosahuje maxima v okamžiku vstřiku plastické hmoty do tvarové dutiny formy a minima při otevření formy a vyhození výstřiku. K změření teploty formy t_f je nutno upravit formu tak, aby bylo možno zabudovat termočlánek k jejímu snímání. Jedním z řešení a také nejužívanějším je předpoklad, že teplota formy t_f je rovna teplotě proudící kapaliny jež formu ochlazuje

$$t_f = t_k$$

Tato je již snadno změřitelná. Nepřesností, které se

zde dopouštíme je rozdíl mezi těmito teplotami, způsobený tepelným spádem, který mezi stěnou formy a stěnou kanálu je. Skutečný průběh teplot je znázorněn na obr. 2.



Obr. 2.

- 1 - plastická hmota
- 2 - stěna formy
- 3 - chladicí kanál

Tepelný spád, který vzniká mezi formou a výstřikem je ovlivňován hlavní měrou teplotou kapaliny, tedy teplota formy je druhotná neboť závisí na teplotě kapaliny t_k .

VŠST Liberec		DP - ST 1015/73
Fakulta strojní		KTM str. 11

Při matematickém vyjádření [2] vycházím z předpokladu, že zanedbám ochlazování, nebo ohřev formy vnějším prostředím, které ji obklopuje. Teplotní spád mezi povrchem formy a chladicí kapalinou pak odpovídá množství tepla odvedenému z výstřiku během pracovního cyklu. Toto množství tepla je možno vyjádřit vztahem

$$q = \frac{1}{3600 R} \int_0^{\tau_c} (t_f - t_k) d\tau \quad (2 - 1)$$

kde q - teplo odvedené z výstřiku během pracovního cyklu dle obr. 3. [kcal]

τ_c - doba pracovního cyklu [s]

R - tepelný odpor uvažovaného chladicího systému [h deg kcal⁻¹]

Výpočet tepelného odporu R lze provést dle vztahu platícího pro kanál v tuhém poloprostoru

$$R = \frac{1}{2\pi L} \left[\frac{1}{\alpha r} + \frac{1}{\lambda_0} \ln \frac{2a}{r} \right] \quad (2 - 2)$$

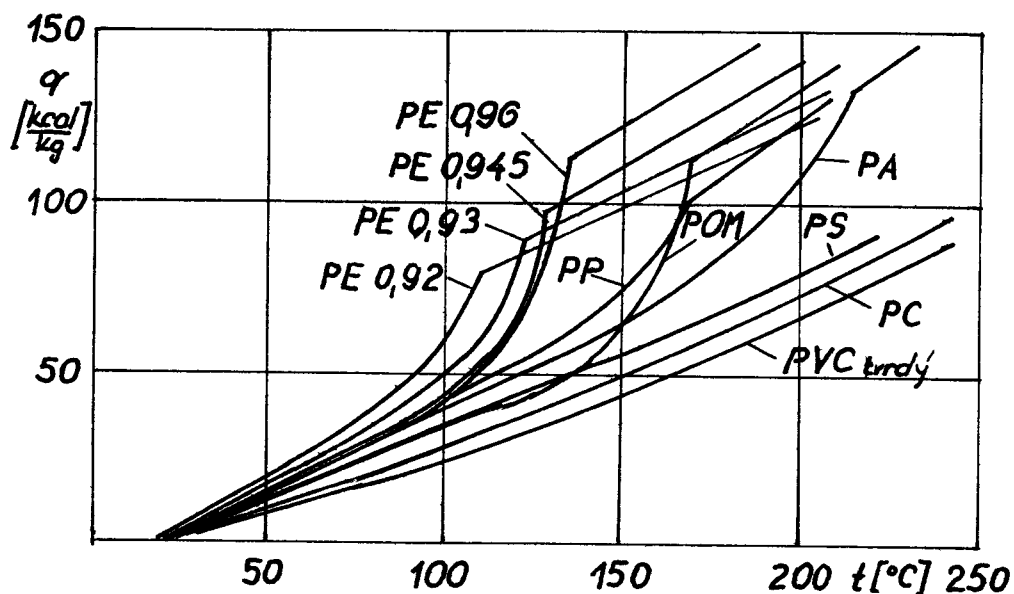
kde L - délka kanálu jímž se teplo sdílí [m]

α - součinitel přestupu tepla v kanálu [kcal m⁻² h⁻¹ deg⁻¹]

λ_0 - součinitel tepelné vodivosti [kcal m⁻¹ h⁻¹ deg⁻¹]

a - vzdálenost osy kanálu od povrchu dutiny formy [m]

r - poloměr vrtání kanálu [m]



Obr. 3.

V rovnici (2 - 1) je vyjádřeno, že rozdíl teplot $t_f - t_k$ je funkcí času, ve skutečnosti závislost teploty formy t_f na čase neznáme a proto provedeme zjednodušení. Za proměnnou teplotu formy dosadíme střední teplotu formy a vztah (2 - 1) přepíšeme do tvaru :

$$q = \frac{\tau_c}{3600 R} (t_{fs} - t_k) \quad (2 - 3)$$

kde t_{fs} - střední teplota formy, kterou definujeme jako stálou teplotu povrchu tvarové dutiny, která zaručuje konstantní odvod tepla během pracovního cyklu $[^{\circ}\text{C}]$

Ze vztahu (2-3) plyne pro střední teplotu formy při dosazení za $\tau_c = \tau_{ch} + \tau_m$:

VŠST Liberec		DP - ST 1015/73	
Fakulta strojní		KTM	str. 13

$$t_{fs} = t_K + Rq \frac{3600}{\tau_{ch} + \tau_m} \quad (2 - 4)$$

kde τ_m - doba chodu lisu naprázdno a doba manipulace s výstřikem během jednoho pracovního cyklu [s]

Ze vztahu (2 - 4) vyplývá, že ke zkracování doby chlazení τ_{ch} dochází při zvětšování rozdílu mezi střední teplotou formy a teplotou chladicí kapaliny. Vliv teploty chladicí kapaliny na dobu chlazení τ_{ch} jde vyjádřit pomocí vztahu

$$\tau_{ch} = \frac{h^2}{\pi^2 a} \ln \left[\frac{4}{\pi} \left(\frac{t_o - t_{fs}}{t_v - t_{fs}} \right) \right] \quad (2 - 5)$$

Tento vztah bude vysvětlen v kapitole 3.1. Za t_{fs} dosadíme dle vztahu

$$t_{fs} = t_K + Rq \frac{3600}{\tau_{ch} + \tau_m} \quad (2 - 6)$$

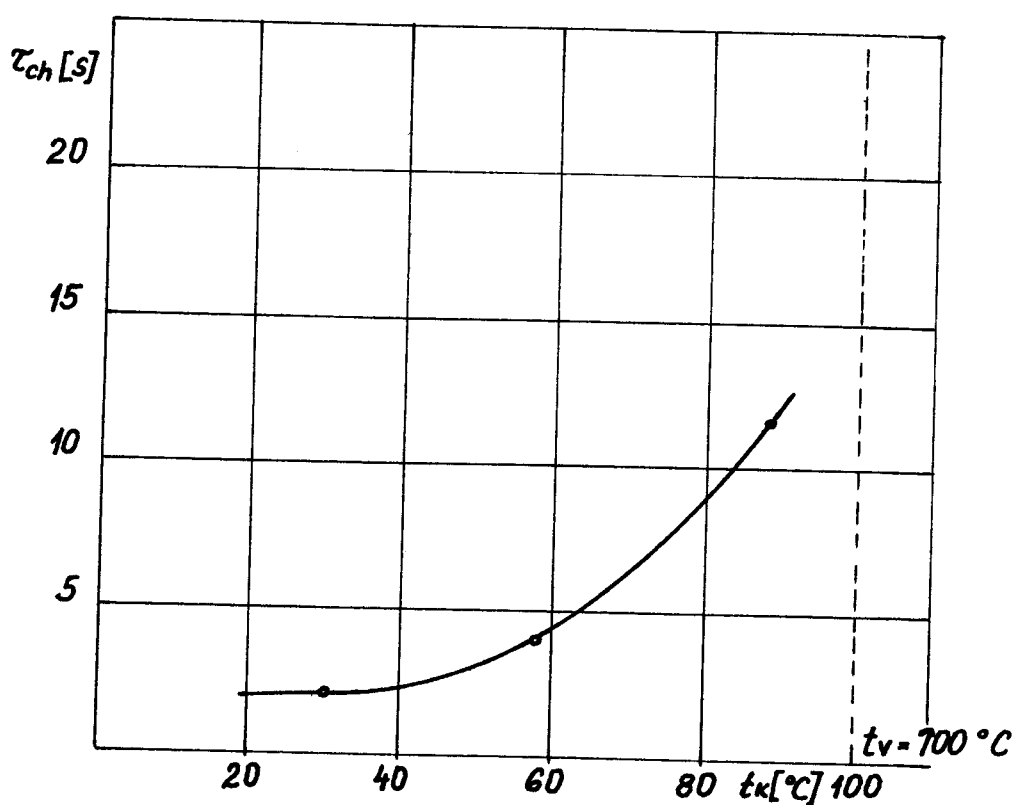
Vliv na rychlost chlazení

$$-\frac{dt}{d\tau} = \left[t_o - \left(t_K + Rq \frac{3600}{\tau_{ch} + \tau_m} \right) \right] \frac{\pi a}{\sigma^2} \exp \left[-\frac{\pi^2}{4} \frac{a\tau}{\sigma^2} \right] \quad (2 - 7)$$

Tyto vztahy, vzhledem k zjednodušujícím předpokladům, nemají absolutní platnost, ale ukazují na vliv jednotlivých faktorů s dostatečnou přesností.

Tedy z předcházejících úvah vyplývá, že pokud mluvíme o vlivu teploty formy, měli bychom mít správně na mysli vliv teploty chladicí kapaliny. Bude-li se tato zvyšovat, dojde ke snížení tepelného spádu, odvedeme méně tepla a doba chlazení se prodlouží a naopak. Je ovšem také nutno uvážit, že vztah (2 - 5)

je složitou funkcí a tuto nelze převést na tvar $\tau_{ch} = f(t_k)$. V závěru je nutno dodat, že rozdíl t_k a $t_{v,u}$ (teplota výstřiku, při kterém je vyjímán) musí být dostatečně velký, v opačném případě se neúměrně prodlužuje doba chlazení. Viz obr. 4.



Obr. 4.

Tento diagram byl sestaven na základě experimentálního měření, kdy bylo vtržováno do zkušební formy, jež byla chlazená chladicí vodou o teplotě :

$$t_{k1} = 30^\circ\text{C}$$

$$t_{k2} = 59^\circ\text{C}$$

VŠST Liberec		DP - ST 1015/73
Fakulta strojní		KTM str. 15

$$t_{k_3} = 88^{\circ} \text{ C}$$

Tato voda byla dodávána z ultratermostatu. Za základní teplotu, při které jsem odečítal čas potřebný k jejímu dosažení, jsem bral $t_v = 100^{\circ} \text{ C}$ (měření provedeno na polyetylénu o teplotě taveniny 250° C).

2.3.2. Vliv teploty vstřikované hmoty

Pokud opět vycházíme z úvahy, že je nutné odvést určité množství tepla z výstřiku, abychom dosáhli žádané teploty při které výstřik vyjímáme. Toto množství tepla můžeme určit pomocí vztahu

$$Q = G [c_s] [t_{v_2} - t_{v_1}] \quad (2 - 8)$$

kde Q - množství odvedeného tepla / kcal /

c_s - střední měrné teplo plastické hmoty
/ kcal kg⁻¹ deg⁻¹ /

t_{v_1} - teplota vyjímaného výstřiku / °C /

t_{v_2} - teplota vstřikované hmoty / °C / (t_o)

Pokud uvažujeme, že $t_{v_1} = \text{konst}$; $G = \text{konst}$; $c_s = \text{konst}$

a t_{v_2} se zvyšuje, pak ze vztahu (2 - 8) vyplývá, že množství tepla potřebného z výstřiku odvést se zvyšuje. Dále dle Fourierova vztahu, který v základním tvaru zní

$$dQ = -\lambda dF \frac{\partial t}{\partial n} d\tau \quad (2 - 9)$$

kde dQ - množství protékajícího tepla
 λ - součinitel tepelné vodivosti
 $-\frac{\partial t}{\partial n}$ - teplotový spád ve směru proudu
 dF - plocha průřezu sdílejícího teplo
 $d\tau$ - diferenciál času

Při uvažování konstantního tepelného toku z rovnice vyplývá, že se prodlužuje čas potřebný k odvodu většího množství tepla při konstantnosti i ostatních členů rovnice. Potvrzení tohoto názoru lze provést pomocí (2 - 5), kde zavedeme pro zjednodušení nezávisle proměnnou teplotu formy t_{fs} na teplotě vstřikované taveniny. Pak doba potřebná k chlazení τ_{ch} vypočtená ze vztahu (2 - 5) bude při zvýšení teploty taveniny t_o (t_{v2}) delší. Dále může být zajímavé, která z teplot ovlivňuje dobu chladnutí více, zda teplota vstřikované hmoty, nebo teplota chladicí kapaliny. Řešení spočívá v porovnání diferenciální změny doby chladnutí vyvolané diferenciálními změnami teploty chladicí kapaliny a teploty vstřikované taveniny. Pro řešení je třeba udělat zjednodušující předpoklady a to, že řešení se provede pro nezávisle proměnnou střední teplotu formy definovanou vztahem (2 - 4) a nikoliv pro nezávisle proměnnou teplotu chladicí kapaliny. Dále se zanedbá závislost střední teploty formy t_{fs} na teplotě vstřikované taveniny t_o . Pak řešení nerovnosti

$$\left| \frac{\partial \tau_{ch}}{\partial t_{fs}} \right| > \left| \frac{\partial \tau_{ch}}{\partial t_o} \right| \quad (2 - 10)$$

přibližně udává podmínku, při které střední teplota formy dává větší změnu doby chladnutí, než změna teploty taveniny.

Derivováním vztahu (2 - 5) dosazením a úpravou plyne

$$t_o > 2t_v - t_{fs}$$

Tato podmínka je při vstřikování téměř vždy splněna, a z toho vyplývá, že změna teploty formy má větší vliv na změnu dobu chlazení, než změna teploty vstřikované hmoty.

Další otázkou je, která z obou teplot bude mít příznivější vliv na dobu chladnutí výstřiku ⁹/tliže stejného technologického zákroku dosáhneme buď změnou teploty formy, nebo změnou teploty vstřikované hmoty. Pak řešení spočívá v určení jak velká změna teploty vstřikované hmoty je z hlediska stejného ovlivnění doby chlazení rovnocenná určité změně střední teploty formy. Při předpokladu, že změně doby chlazení vyvolané změnou střední teploty formy $t_{fs} \rightarrow t'_{fs}$ odpovídá změna teploty vstřikované hmoty z t_o na t'_o . Při výpočtu z rovnice (2 - 5) a položení do rovnosti dostaneme vztah :

$$t'_{ot} = t_{fs} + \frac{(t_v - t_{fs})(t_o - t_{fs})}{t_v - t'_{fs}} \quad (2 - 11)$$

který daný problém řeší.

Pak je-li k dosažení požadovaného zákroku třeba změny jedné nebo druhé teploty, pak rozhodneme o výhodnosti tak, že pokud teplota t'_{ot} určená vztahem (2 - 11) vychází nižší než požadovaná zvýšená teplota vstřikované hmoty t'_o , použijeme zvýšení teploty formy, neboť méně prodlouží dobu chlazení.

Při rozhodování je však třeba brát zřetel na různá technologická omezení vyplývající z technologických vlastností hmoty a z požadavků na vlastnosti výstřiku.

VŠST Liberec		DP - ST 1015/73
Fakulta strojní		KTM str. 18

2.3.3. Vliv teploty vyjímání výstřiku z formy

Vliv této teploty vyplývá rovněž z rovnice (2-5). Vliv teploty vyjímání výstřiku se projeví hlavně ve střední teplotě formy a to prostřednictvím sděleného tepla q , které odvedeme z výstřiku a toto se projeví pak v době chlazení výstřiku. Tato doba se bude prodlužovat tím více čím více se budeme chtít blížit s teplotou výstřiku teplotě formy. Tato teplota je závislá na druhu zpracované hmoty. Dále musíme mít na zřeteli tuhost výstřiku po vyjmutí z formy, neboť při vyhazování působí silově na výstřik vyhazovací systém, dále nesmí dojít ke zborcení výstřiku při vyjmutí z formy.

2.3.4. Vliv průtokové rychlosti chladicí kapaliny [22]

Průtoková rychlost chladicí kapaliny ovlivňuje přestup tepla v chladicím kanálu formy a tak ovlivňuje množství odvedeného tepla. V tomto případě je nutno uvažovat nucené proudění. Dále je nutno určit o jaký druh proudění jde, zda laminární či turbulentní proudění. Kritérium pro určení je Reynoldsovo podobnostní číslo Re .

$$Re = \frac{wd}{\nu} \quad (2 - 12)$$

kde w - střední rychlost proudění $[m\ s^{-1}]$

d - charakteristický rozměr $[(zde\ průměr\ kanálu)]$
 $[m]$

ν - kinematická viskozita $[m^2\ s^{-1}]$

Platí dle [22]

$Re < 2\ 300$ - proudění laminární

$Re > 10\ 000$ - proudění turbulentní

VŠST Liberec		DP - ST 1015/73
Fakulta strojní		KTM str. 19

Rychlost w určíme z průtokového množství za jednotku času při znalosti průměru kanálu. Protože nemůžeme používat vysokých průtokových rychlostí vzhledem k průřezům kanálů jež jsou malé a ztráty při proudění rostou druhou mocninou průtokové rychlosti a s klesajícím průměrem potrubí. Pak hledaný součinitel přestupu tepla při uvažovaném laminárním proudění za použití teorie podobnosti vypočteme dle vztahu

$$Nu = 0,74 Re^{0,2} (Gr Pr)^{0,1} Pr^{0,2} \quad (2 - 13)$$

kde Nu - Nusseltovo podobnostní číslo $Nu = \frac{\alpha D}{\lambda}$

Re - Reynoldsovo podobnostní číslo

Gr - Grashoffovo podobnostní číslo $Gr = \frac{g \beta \Delta t l^3}{\nu^2}$

Pr - Prandtlovo podobnostní číslo $Pr = \frac{\nu}{a}$

Po dosazení a úpravě dostaneme

$$\alpha = 8,651 \lambda^{0,8} c^{0,3} \rho^{0,4} \left(\frac{\beta}{\mu} \right)^{0,1} \frac{w^{0,2}}{d^{0,5}} \Delta t =$$

$$= B_1 \frac{w^{0,2}}{d^{0,5}} \Delta t^{0,1} \quad (2 - 14)$$

kde B_1 - je tabelováno.,

w - rychlost proudění tekutiny $[m s^{-1}]$

d - průměr potrubí $[m]$

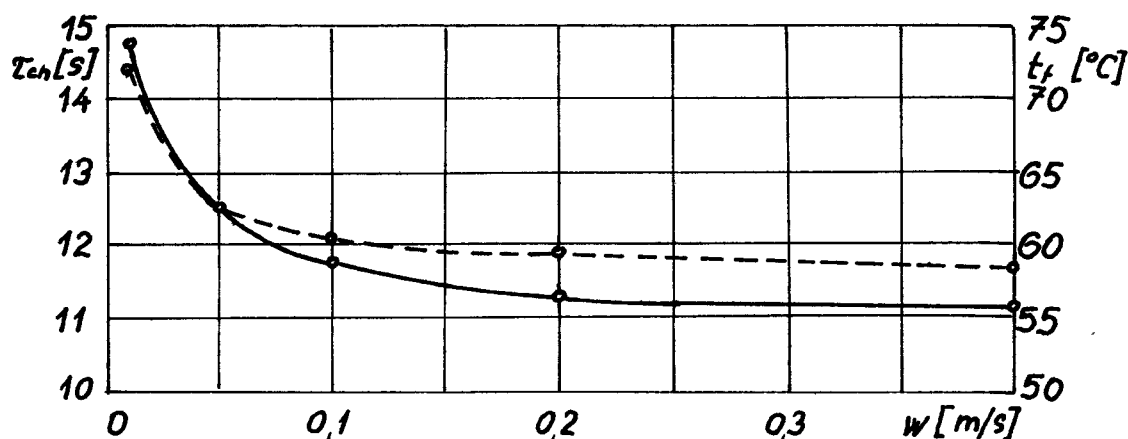
Δt - rozdíl teplot $[^{\circ}C]$

Pokud provedeme rozbor rovnice (2 - 14), ukazuje se, že součinitel přestupu tepla můžeme ovlivnit buď :

- 1) zvýšením měrného tepla c proudící kapaliny
- 2) zvýšením rychlosti proudící kapaliny w
- 3) zvětšením teplotního rozdílu mezi chladicí kapalinou a ochlazovanou stěnou t .

ad 1) se v praxi provádí přidáváním přísad do chladicí kapaliny jež zvýší měrné teplo c .

ad 2) s rostoucí průtokovou rychlostí se bude zkracovat doba chlazení. Pro zlepšení představy je na obr. 5. znázorněna závislost doby chlazení na průtokové rychlosti chladicí kapaliny [21]. Uvádí se, že křivka má obecnou platnost a vyplývá z ní, že pro účinné chlazení je třeba dosáhnout určité průtokové rychlosti. Malá průtoková rychlost znamená zhoršený přestup tepla. Na druhé straně se nevyplatí neúměrně zvyšovat rychlost proudění kapaliny vzhledem k uvedeným ztrátám vznikajících při vysokých rychlostech proudění.



Obr. 5.

2.3.5. Vliv materiálových faktorů

Vliv materiálových faktorů u vstřikované hmoty je vyjádřen teplotní vodivostí a . Se zvyšující se teplotní vodivostí klesá doba potřebná k chlazení výstřiků, toto dokazuje rovněž vztah (2 - 5). Pokud rozebereme vztah pro a

$$a = \frac{\lambda}{c_p \gamma} \quad (2 - 15)$$

pak λ - tepelná vodivost má se zvyšující se hodnotou příznivý vliv na a a tím i na τ_{ch} .

c_p a γ - specifické teplo a měrná váha při zvyšující se hodnotě mají vliv nepříznivý.

Vliv materiálu formy je zastoupen tepelnou vodivostí λ . Ze vztahu (2 - 2) vyplývá, že s rostoucím klesá tepelný odpor materiálu a že tedy materiál je schopen rychleji odvádět sdílené teplo do chladicí kapaliny. Dle vztahu (2 - 4) pak vyplývá, že se sníží i střední teplota formy t_{fs} . Zvýšené tepelné vodivosti některých materiálů jako mědi a mosazi se využívá u forem tam, kde je konstrukčně obtížné nebo vůbec nemožné umístit chladicí kanály.

3. Rozbor doby chlazení hmoty ve formě a způsob určení její délky

3.1. Matematické řešení chlazení tuhých těles [2 ; 11]

Při matematickém vyjádření je třeba uvážit o jaké sdílení tepla v tomto problému jde. Pokud uvážíme podmínky chlazení pak je nutno řešení provést pro nestacionární sdílení tepla. Vycházíme z obecné rovnice vedení tepla, která pro sdílení tepla v tuhých tělesech při neustáleném stavu nabývá tvaru

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} t) + q_v = c_p \frac{\partial t}{\partial \tau} \gamma \quad (3 - 1)$$

kde λ - součinitel tepelné vodivosti materiálu

t - teplota

q_v - teplo dodané z vnitřních zdrojů

c_p - specifické teplo materiálu

γ - měrná váha materiálu

τ - čas

Za předpokladu, že v tělese není vnitřní zdroj tepla a pokládáme-li fyzikální vlastnosti tělesa za konstantní nezávislé na teplotě a souřadnicích, zjednoduší se vztah (3 - 1) na

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (3 - 2)$$

kde a je součinitel teplotové vodivosti materiálu definovaný

$$a = \frac{\lambda}{c \gamma}$$

Řešení této diferenciální rovnice je velmi obtížné. Přesné řešení je známo jen pro některé matematicky snadněji definovatelné geometrické tvary jako jednostranně omezené těleso, nekonečně dlouhý válec o $\varnothing$ d ; nekonečná deska tloušťky 2δ ; koule o poloměru r a průniky těchto těles jako rovnoběžnostěn, válec konečné délky atd.

Pro řešení považujeme tuto úlohu jako jedno-rozměrnou, tedy ochlazování rovinné stěny, pak řešení diferenciální rovnice (3 - 2) napíšeme ve tvaru

$$\theta(x, \tau) = \sum_{i=1}^{\infty} [A(\varepsilon_i) \cos(\varepsilon_i x) + B(\varepsilon_i) \sin(\varepsilon_i x)] e^{-\varepsilon_i^2 a \tau} \quad (3 - 3)$$

kde $\theta(x, \tau) = t_1(x, \tau) - t_0$ - rozdíl proměnné teploty v libovolném místě stěny a konstantní teplotě okolního prostředí

ε_i - kladná rozměrová veličina

$A(\varepsilon_i); B(\varepsilon_i)$ - konstanty závislé na ε_i

Ze souměrnosti změny teploty na obou stranách od počátku souřadnic (tepelné osy) vyplývá pro řešení nestacionárního vedení tepla stěnou

$$\theta(x, \tau) = \sum_{i=1}^{\infty} A(\varepsilon_i) \cos(\varepsilon_i x) e^{-\varepsilon_i^2 a \tau} \quad (3 - 4)$$

dále pak partikulární řešení diferenciální rovnice (3 - 4) je ve tvaru

$$\delta_i t_q \delta_i = B_i \quad (3 - 5)$$

tato transcendentní rovnice má nekonečně mnoho kořenů $\delta_1; \delta_2; \dots; \delta_n$. Z nichž každý vyhovuje okrajové podmínce uvažované úlohy. Tato rovnice se řeší zkusmo volbou hodnot δ_i nebo graficky, případně jsou kořeny

udány v tabulce. Pokud rovnici (3 - 5) řešíme pro plastické hmoty a výstřiky deskovitého tvaru, pak řešení pro ohřev a ochlazování při velkých Bioto- vých číslech ($Bi \gg 1$) kde Bi

$$Bi = \frac{\alpha \frac{L}{2}}{\lambda} \quad (3 - 6)$$

t.j. pro ochlazování při velkých součinitelích přestupu tepla, teplota povrchu tělesa se blíží teplotě okolního prostředí. Pak vyjdou kořeny rovnice (3-5) blízké číslům

$$\frac{\pi}{2} ; 3\frac{\pi}{2} ; 5\frac{\pi}{2} ; 7\frac{\pi}{2} ; \dots$$

a pro všechny tyto kořeny je

$$\sin \delta i \cos \delta i \approx 0$$

Pro střed rovinné stěny získáme teplotní funkci ve tvaru řady

$$\frac{\theta_m(\tau)}{\theta_a} = \frac{4}{\pi} e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 Fo} \left[1 - \frac{1}{3} e^{-8\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 Fo} + \frac{1}{5} e^{-24\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 Fo} - \frac{1}{7} e^{-48\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 Fo} \right] \quad (3 - 7)$$

Pro Fourierovo číslo $Fo \geq 0,2$ (což je pro plastické hmoty splněno) můžeme říci, že výraz v závorkách se s dostatečnou přesností rovná jedné a

$$\frac{\theta_m(\tau)}{\theta_a} = \frac{4}{\pi} e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 Fo} \quad (3 - 8)$$

Odtud pak můžeme určit dobu ohřívání nebo ochlazování středu stěny do dosažení θ_m .

$$\tau = \frac{4}{\pi^2} \frac{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2}{\alpha} \ln \left(\frac{4}{\pi} \frac{\theta_a}{\theta_m} \right) \quad (3 - 9)$$

Celou tuto rovnici upravíme do tvaru

$$\tau_{ch} = \frac{h^2}{\pi^2 a} \ln \left(\frac{4}{\pi} \frac{t_0 - t_f}{t_v - t_f} \right) \quad (3 - 10)$$

kde τ_{cd} - doba chlazení hmoty z teploty vstřikované taveniny t_0 na teplotu vyjímání výstřiku t_v

t_f - teplota stěn formy

$h = 2\sigma$ - tloušťka desky

Řešení této úlohy pro chlazení nekonečné desky převedeme na řešení chlazení desky konečných rozměrů o hranách délky $2\sigma_1$; $2\sigma_2$; $2\sigma_3$ pomocí vztahu

$$\mathcal{V} = \mathcal{V}_1 \cdot \mathcal{V}_2 \cdot \mathcal{V}_3 \quad (3 - 11)$$

kde $\mathcal{V}$ - poměrná teplota uprostřed rovnoběžnostěnu

$\mathcal{V}_1$ - poměrná teplota ve střední vrstvě nekonečné desky tloušťky $h_1 = 2\sigma_1$

$\mathcal{V}_2$ - poměrná teplota ve střední vrstvě nekonečné desky tloušťky $h_2 = 2\sigma_2$

$\mathcal{V}_3$ - poměrná teplota ve střední vrstvě nekonečné desky tloušťky $h_3 = 2\sigma_3$

Dosazením rovnice (3 - 10) do vztahu (3 - 11) dostáváme vztah pro dobu chlazení desky konečných rozměrů.

$$\tau_{ch} = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_1^2} + \frac{1}{h_2^2} + \frac{1}{h_3^2} \right) a \pi^2} \ln \left(\frac{64}{\pi^3} \frac{t_0 - t_f}{t_v - t_f} \right) \quad (3 - 12)$$

Velikost chyby, které se dopustíme nahrazením deskovitého tělesa konečných rozměrů tloušťky h_1 modelem desky nekonečné o téže tloušťce lze určit dle vztahu

$$\eta = \frac{\tau_{ch\infty} - \tau_{ch}}{\tau_{ch}} \cdot 100\% \quad (3 - 13)$$

kde $\tau_{ch\infty}$ - doba chlazení tělesa za předpokladu náhrady nekonečnou deskou [s]

τ_{ch} - doba chlazení tělesa konečných rozměrů z t_0 na t_v [s]

Obdobně byla odvozena řešení problému chlazení i pro některá další geometrická tělesa vyskytující se v praxi [11]

Válec :

$$\tau_{ch} = \frac{(d/2)^2}{5,79a} \ln \left(1,6 \frac{t_0 - t_f}{t_v - t_f} \right) \quad (3 - 14)$$

Koule :

$$\tau_{ch} = \frac{(d/2)^2}{\pi^2 a} \ln \left(2 \frac{t_0 - t_f}{t_v - t_f} \right) \quad (3 - 15)$$

Válec o průměru d a výšce h :

$$\tau_{ch} = \frac{1}{\left(\frac{23,14}{d^2} \frac{\pi^2}{h^2} \right) a} \ln \left[\frac{6,396}{\pi} \left(\frac{t_0 - t_f}{t_v - t_f} \right) \right] \quad (3 - 16)$$

3.2. Metoda stanovení doby chladnutí dle B. Laczyňského [12]

Tato metoda je v podstatě zjednodušeným postupem výpočtu jehož odvození bylo provedeno v kapitole 3.1. Autor vychází rovněž z řešení ohřevu a ochlazování při velkých Biotových číslech. Rovnice (3 - 10) je zjednodušena do tvaru

$$\tau_{ch} = \frac{h^2}{9,87 a} (0,243 - \ln \frac{t_o - t_f}{t_v - t_f}) \quad (3 - 17)$$

Dalším zjednodušením je řešení pro hmoty : polyamid, polyetylén a polystyrén s podmínkou, že síla stěny h $h > 5$ mm, výsledný vztah zní :

$$\tau_{ch} = k \frac{h^2}{a} \quad (3 - 18)$$

kde $k = f \left(\frac{t_o - t_f}{t_v - t_f} \right)$ viz tabulka č.1.

Tabulka č. 1.

$\frac{t_o - t_f}{t_v - t_f}$	k
0	0,25
0,1	0,238
0,2	0,195
0,3	0,1525
0,4	0,125
0,5	0,0975
0,6	0,075

Tuto metodu jsem uvedl jenom jako příklad možného řešení. Další metodou je metoda dle [23].

VŠST Liberec		DP - ST 1015/73
Fakulta strojní		KTM str. 28

3.3. Zjednodušená metoda pro početní předstanovení doby chlazení [23]

Matematické řešení uvedené v odstavci 3.1. je složité, určité zjednodušení představuje metoda uvedená v odst. 3.2. Další postup můžeme provést dle [23].

- 1) Rozdělíme výstřik na pruhy o stejné tloušťce stěny.
- 2) Chladicí kanály uspořádáme tak, aby v pásmech stejné tloušťky výstřiku vytvořily uzavřený systém a účinná plocha chladicích kanálů měla přibližně stejnou velikost jako plocha určená k chlazení,
- 3) Určíme množství chladicí kapaliny, která může protéct chladicím systémem za jednotku času.
- 4) Vypočteme množství tepla, které odvede chladicí kapalina za podmínky, že rozdíl mezi vstupní a výstupní teplotou kapaliny nepřekročí $3 - 5^{\circ}\text{C}$, dle vztahu

$$Q_k = m \cdot c \cdot \Delta t_k \quad [\text{kcal h}^{-1}] \quad (3 - 18)$$

kde m - průtočné množství chladicí kapaliny
[kg h^{-1}]

c - specifické teplo chladicí kapaliny
[$\text{kcal kg}^{-1} \text{ deg}^{-1}$]

Δt_k - rozdíl mezi vstupní a výstupní teplotou kapaliny [$^{\circ}\text{C}$]

- 5) Vypočteme množství tepla odvedeného vzduchovou spárkou vzniklou smrštěním hmoty při chladnutí.

VŠST Liberec		DP - ST 1015/73
Fakulta strojní		KTM str. 29

$$Q_v = \lambda_v \frac{F}{\Delta v} \Delta t_v \quad [\text{kcal h}^{-1}] \quad (3 - 19)$$

λ_v - součinitel tepelné vodivosti vzduchu
[kcal m⁻¹ h⁻¹ deg⁻¹]

F - plocha části výstřiku s nejmenší tloušťkou stěny [m²]

Δv - šířka vzduchové spáry [m]

Δt_v - rozdíl teplot povrchu výstřiku a formy [°C]

- 6) Vypočteme množství tepla odvedeného materiálem formy od povrchu dutiny k chladicím kanálům

$$Q_o = \lambda_o \frac{F}{\Delta o} \Delta t_o \quad [\text{kcal h}^{-1}] \quad (3 - 20)$$

- 7) Určíme množství tepla k odvedení z výstřiku při dané teplotě vyhazování viz obr. 6.

- 8) Porovnáme teplo, které musíme odvést s možným odvodem tepla, který je nejnepříznivější dle vztahů (3 - 18) a (3 - 19) a (3 - 20). Pokud je teplota formy $t_f < 40^\circ\text{C}$, pak by měly být hodnoty možného odvodu tepla za čas a tepla odvedení z výstřiku v rovnováze, protože sálání odvodu tepla nenapomáhá. Při teplotách vyšších než teplota okolí by měl být možný odvod tepla chladicí kapalinou o 20 - 40 % vyšší, zde dochází k toku tepla z okolí do formy (pak provádíme izolaci formy).

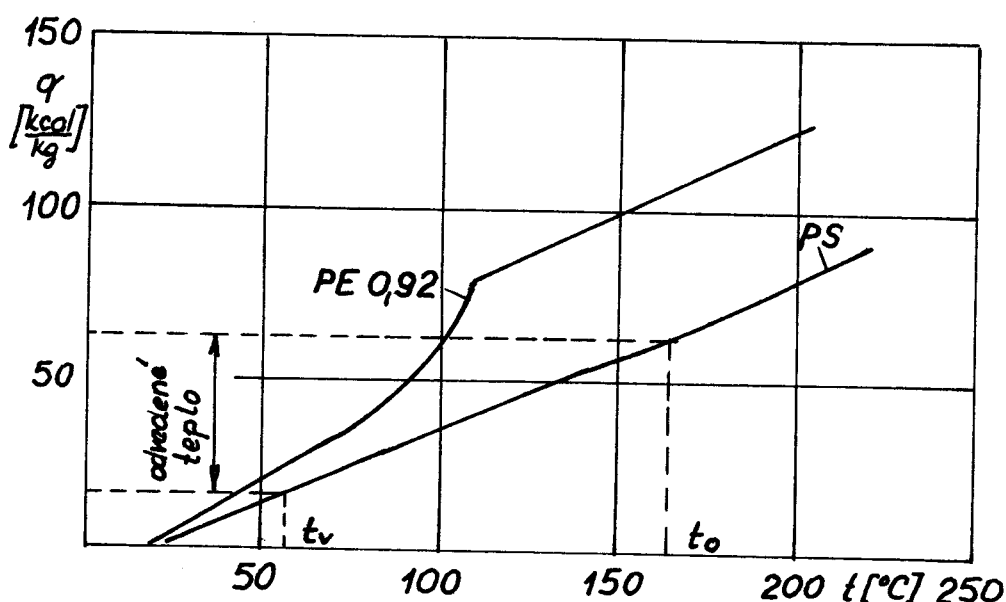
- 9) Pak přibližná doba chlazení je dle vztahu

$$\tau_{ch} = \frac{Q}{Q_{min}} \quad (3 - 21)$$

VŠST Liberec		DP - ST 1015/73
Fakulta strojní		KTM str. 30

kde Q - teplo určené k odvedení / kcal /

$Q_{\min}$ - minimální hodnota z Q_v ; Q_k a Q_p / kcal h⁻¹ /



Obr. 6.

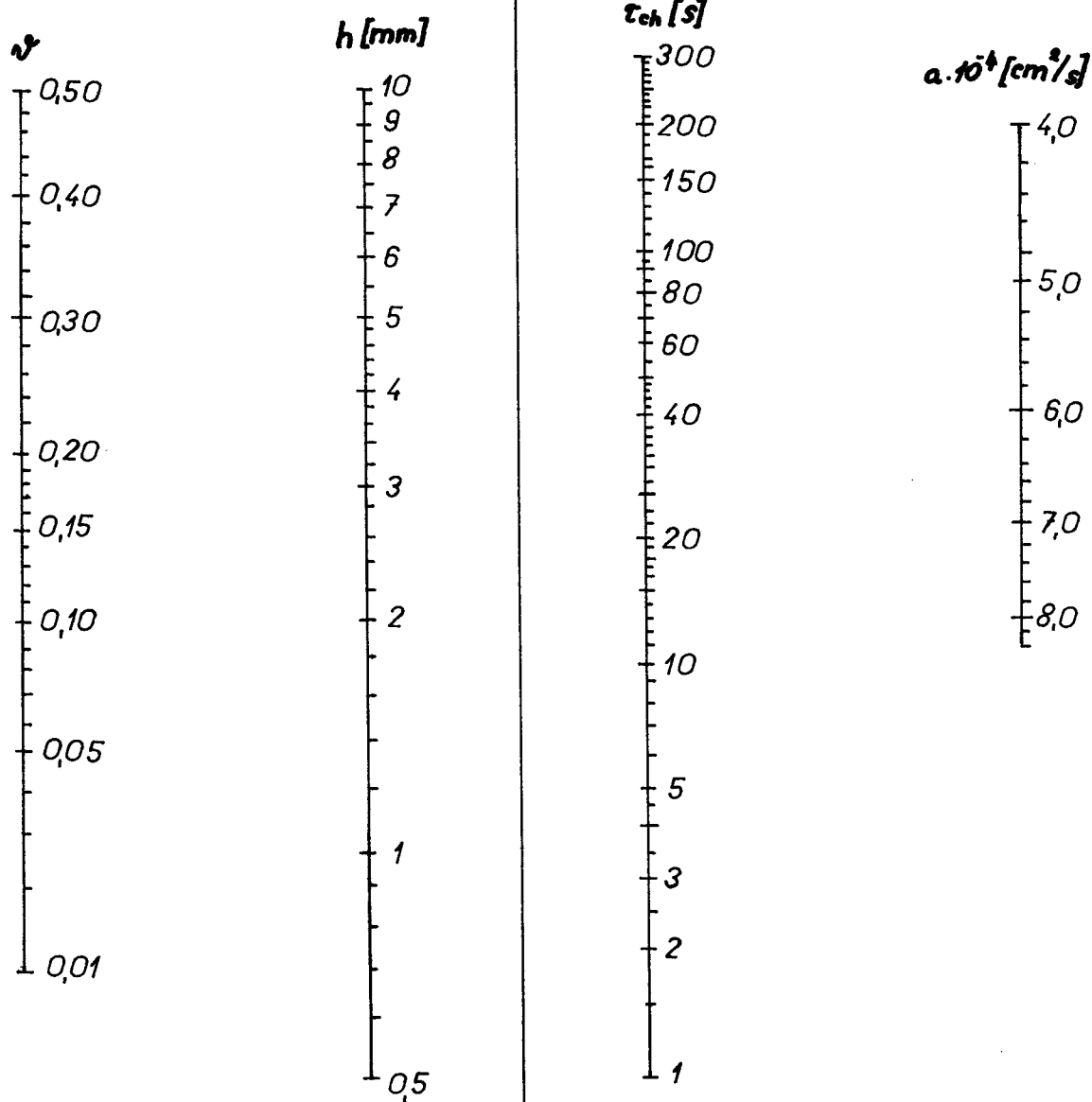
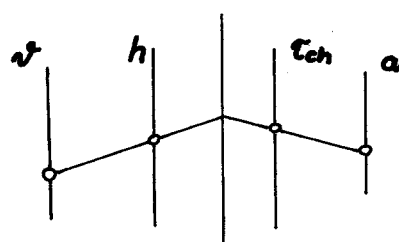
3.4. Určení doby chlazení pomocí nomogramu / 14 /

Tato metoda předběžného určení doby chlazení je používána v n.p. Plastimat Liberec. Jde o úpravu vztahů (3 - 10) do formy nomogramu. Nomogram je na obr. 7. Ze vztahu (3 - 10) vyplývá, že hlavními veličinami na nichž doba chlazení závisí jsou

- určující tloušťka stěny - s
- koeficient teplotní vodivosti zpracovávaného materiálu - a
- teplota taveniny - t_o
- teplota formy - t_f
- teplota výstřiku, při které je výstřik vyjmut z formy - t_v

- h - tloušťka stěny [mm]
 a - součinitel teplotové
 vodivosti [$\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$]
 τ_{ch} - doba chlazení [s]
 ν - poměrná teplota
 uprostřed výstřiku

KLÍČ:



Obr. 7.

Při použití tohoto nomogramu volíme určující tloušťku stěny dle výkresu výstřiku. Má-li výstřik stejnou tloušťku stěny v každém průřezu, je určující složkou tento rozměr. Při rozdílných tloušťkách stěny v různých průřezích výstřiku volíme tu tloušťku stěny, která bude mít na deformaci výstřiku po vyjmutí z formy rozhodující vliv. Neboť v tomto průřezu musí být výstřik natolik ochlazen, aby se deformacím předešlo.

VŠST Liberec		DP - ST 1015/73
Fakulta strojní		KTM str. 33

4. Porovnání teoreticky stanovené chladicí doby se skutečně používanou v provozních podmínkách

Toto porovnání jsem prováděl v provozech n.p. Plastimat Liberec. Výběr měřených výstřiků byl prováděn tak, aby pokud možno pokryl rozsah výrobků jež v době měření byly na strojích vyráběny. Z materiálů jsou zastoupeny :

- 1) ABS
- 2) PEN
- 3) PP
- 4) PS

Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce č. 2. Hodnoty charakterizující výstřik byly vypsány z technologických listů těchto výstřiků, dále jsem vypsál hodnoty teplot taveniny. Pak přímo u jednotlivých strojů byly naměřeny hodnoty teploty formy; teploty vyjímáního výstřiku a doba chlazení výstřiku. U doby T_{ch} a teploty t_f se dá předpokládat, že z pěti provedených měření a z nich vypočtený průměr udává poměrně správnou hodnotu. Ale u hodnoty t_v výstřiku při vyjmutí z formy již ani při provedených pěti měřeních a průměru z nich vypočteného nelze jednoznačně tvrdit, že odpovídá skutečné t_v . Další vysvětlení v kapitole 4.1.

Dále jsem v experimentální části této diplomové práce prováděl měření a určení teplotního koeficientu α u polystyrenu a polyetyleny. Hodnoty, které byly naměřeny mnou se liší od hodnot ze kterých bylo vycházeno při určení doby chlazení dle nomogramu na obr. 7. zhruba o 25%. Z toho vyplývají odchylky doby chlazení skutečně užívané a doby teoreticky stanovené. Hodnoty koeficientu teplotní vodivosti α získané měřením jsou v tabulce č. 4.

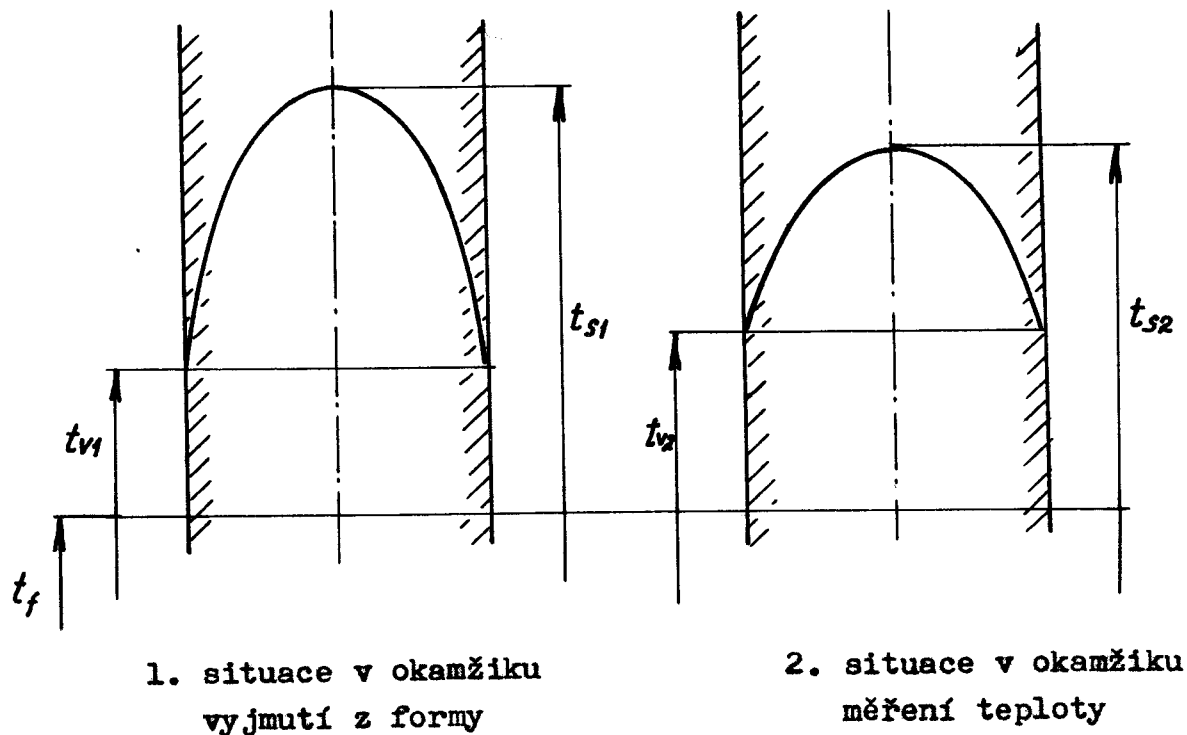
VŠST Liberec		DP - ST 1015/73	
Fakulta strojní		KTM	str. 34

Tabulka č. 2.

Název výrobku	materiál	váha	síla stěny	vypočtené	změř.	% odch.
víčko	ABS	10	1,5	13	25	48
cívka	ABS	5	2	24	57	58
nosník hlaviček	ABS	7	2	24	45	46,5
kryt spínače	ABS	8	2	24	83	71
kryt tónové dr.	ABS	10	2	24	30	20
unašeč	ABS	12	2	24	49	51
kolečko	ABS	5	2,5	38	54	30
knoflík	ABS	14	2,5	38	51	25
mřížka	ABS	23	2,5	38	66	42,5
horní díl vysav.	ABS	53	2,5	38	90	58
hor.díl kávoml.	ABS	88	2,5	38	66	42,5
vrchní kryt	ABS	145	2,5	38	90	58
matice	ABS	19	3	55	82	33
držadlo vysavače	ABS	29	3	55	90	39
krycí vložka	ABS	50	3	55	90	39
pouzdro kazety	ABS	52	3	55	70	21,5
střední víko	ABS	70	3	55	90	39
přepážka	ABS	83	3	55	80	31
držadlo	ABS	35	3	55	70	21,5
plášť kufru	ABS	269	3,5	75	105	32,5
mísa hnětače	ABS	460	4	95	145	35
skříň	ABS	495	4	95	135	30
mísa hnětače	ABS	598	5	150	228	35
pekár.přepravka	PEN	2250	3,5	34	92	56,5
přepravka zelen.	PEN	1770	3,5	40	90	55,5
kryt řízení	PP	93,7	2,5	32	41	22
krabíčka Lipo	PS	3,7	1,2	77,8	10,5	25,6

4.1. Rozložení teploty v příčném řezu stěnou výstřiku

Jak jsem uvedl v odstavci 4.0. je velmi diskutabilní hodnota teploty výstřiku t_v naměřená, stejně tak jako teplota formy t_f pomocí termočlánku. Tento má jako každý jiný měřicí přístroj či čidlo určitou časovou konstantu. Po vyjmutí výstřiku z formy dochází k dalšímu ochlazování výstřiku vlivem proudění vzduchu kolem výstřiku a sáláním. Doba, která nám vyjde po sečtení těchto prodlev než počneme po vyjmutí výstřiku z formy měřit jeho teplotu, sice vyjde řádově jen ve vteřinách, ale za tuto dobu dojde, vlivem vedení tepla tělesem ve směru teplotního gradientu k zvednutí povrchové teploty výstřiku dodaným teplem z teplejšího středu stěny, viz obr. 8.



Obr. 8.

VŠST Liberec		DP - ST 1015/73
Fakulta strojní		KTM str. 36

Jednou z možností jak určit skutečnou teplotu na povrchu v okamžiku otevření formy by bylo řešit toto nestacionární sdílení tepla od okamžiku vstřiku hmoty do formy až po vyjmutí výstřiku.

4.1.1. Řešení průběhu teploty výstřiku v závislosti na čase

Řešení vychází z diferenciální rovnice nestacionárního vedení tepla

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (4 - 1)$$

po úpravách a zjednodušujících předpokladech dostaneme

$$\theta(x, \tau) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i(\delta_i) \cos\left(\delta_i \frac{x}{s/2}\right) e^{-\delta_i^2 \frac{a\tau}{(s/2)^2}} \quad (4 - 2)$$

dosazením za $A_i(\delta_i)$ dostaneme konečný vztah

$$\theta(x, \tau) = \theta_a \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2 \sin \delta_i}{\delta_i + \sin \delta_i \cos \delta_i} \cos\left(\delta_i \frac{x}{s/2}\right) e^{-\delta_i^2 F_0} \quad (4 - 3)$$

Tato rovnice se zjednoduší tím, že hodnoty δ_i jsou tabelovány.

x - vzdálenost od tepelné osy,

s - síla stěny.

Závislost na čase je zahrnuta ve Fourierově čísle

$$F_0 = \frac{a\tau}{(s/2)^2} \quad (4 - 4)$$

Výhodou rovnice (4 - 3) je možnost naprogramovat na číslicový počítač stroj. Přesto je nutno přiznat, že tento způsob řešení je velmi zdlouhavý. Dalším možným řešením je určení teploty výstřiku kalorimetrickým měřením.

VŠST Liberec		DP - ST 1015/73
Fakulta strojní		KTM str. 37

4.1.2. Kalorimetrické určení teploty výstřiku

Při tomto měření použijeme nádoby s přesně určeným obsahem kapaliny, teploměr s nejméně desetinným dělením a míchadlo. Teplota vody míchadla má být přibližně rovna teplotě místnosti. Po přesném změření teploty vody v nádobě, okamžitě výstřik po vyjmutí z formy ponoříme do vody. Je nutno vodu neustále míchat, aby nedošlo k nerovnoměrnému rozložení teploty vody. Mícháme do doby, kdy teplota vody dosáhne maxima. Ze znalosti hmoty výstřiku m , vodní hodnoty kalorimetru M a specifického tepla plastické hmoty při 20°C vypočteme střední hodnotu teploty výstřiku.

$$T_o = \frac{M}{m \cdot c} (T_2 - T_1) + T_2 \quad (4 - 5)$$

kde dále je T_1 - teplota vody před ponořením výstřiku
 T_2 - maximální teplota vody po ponoření výstřiku

Uvádí se, že metoda při dodržení všech podmínek měření dosahuje přesnosti $\pm 1^{\circ}\text{C}$.

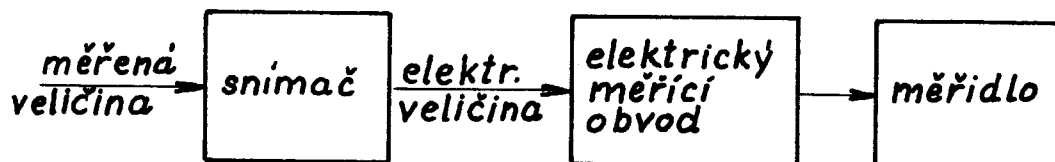
Shrnu-li všechny poznatky, které jsem při porovnání teoreticky stanovené doby chlazení a skutečné doby chlazení zjistil, pak mohu říci, že hlavní zdroj nepřesnosti a rozdílu mezi teoretickou dobou chlazení a skutečnou dobou chlazení je hodnota koeficientu teplotní vodivosti a a neznalost přesné teploty výstřiku při vyjmutí z formy.

VŠST Liberec		DP - ST 1015/73	
Fakulta strojní		KTM	str. 38

5. Experimentální stanovení koeficientu teplotní vodivosti a

5.1. Měřicí metoda

Při volbě měřicí metody je nutno brát zřetel na způsob měření měřené veličiny, technické vybavení příslušného pracoviště, dále na požadovanou přesnost měření. V našem případě jde o měření průběhu teploty ve středu stěny výstřiku v závislosti na čase. Měření je prováděno termoelektrickým teploměrem a to termočlánkem typu Fe-Ko. Jde tedy o elektrické měření neelektrické veličiny. Pro tento typ měření je třeba dodržet obecně platné schema uspořádání z obrázku č. 10.



Obr. 10.

Snímač, kterým je v tomto případě měrný konec termočlánku, měří měřenou veličinu na elektrickou. Tuto přijímá elektrický měřicí obvod a zpracuje ji tak, aby byla vhodná pro měřicí přístroj. Měřicí přístroj ukazuje tuto veličinu na stupnici, případně provádí záznam nebo obojí najednou.

Jak jsem již předeslal jde o měření teploty v závislosti na čase, tedy použitý měřicí přístroj musí zaznamenávat teplotu průběžně, nebo v určitých krátkých

intervalech. nejvhodnějšími přístroji pro takovéto snímání jsou registrační přístroje měřící stejnosměrné elektrické napětí s liniovým nebo bodovým záznamem. Pak je časová osa tvořena posuvem registračního papíru. V tomto případě jde o velmi slabý signál (3 - 12 mV) a je tedy nutno použít zesilovače.

5.2. Snímač teploty

K tomu, aby měření teploty v dutině vstřikovací formy bylo spolehlivé a odpovídalo skutečnosti, je nutno v první řadě zajistit dokonalý tepelný styk mezi teploměrem a měřenou hmotou. V tomto případě jde o měření vysokých teplot za vysokého tlaku, proto je zde nejvhodnější použít elektrického způsobu měření teploty. Jak bylo uvedeno v odstavci 5.1. je naměřená teplota převedena na elektrický signál, jež je možno bez větších obtíží vyvést z formy pomocí vodičů. Je možno použít v zásadě dva typy teploměrů a to

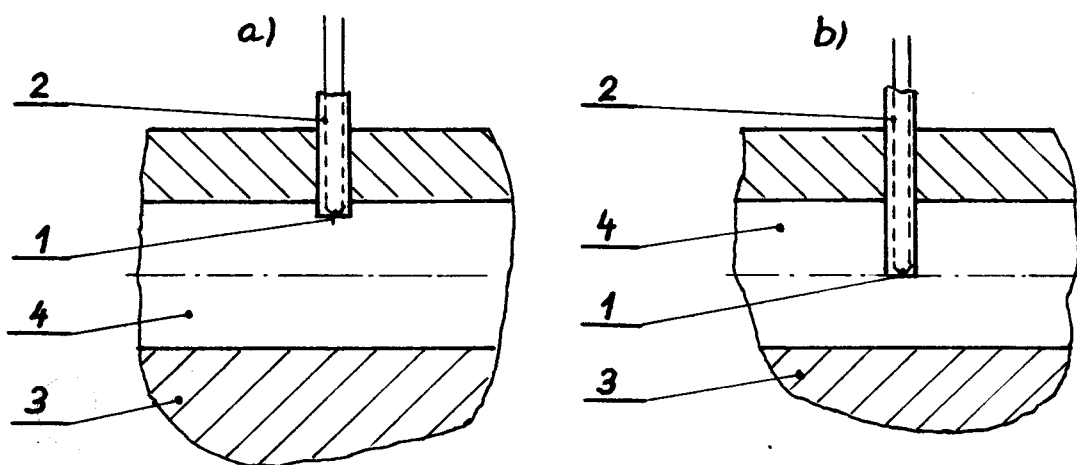
- a) odporové
- b) termoelektrické

ad a) pracuje na principu změny elektrického odporu s měnící se teplotou kovu. Výhodou je, že lze měřit elektrický odpor poměrně vysokou přesností. Nejznámějším a také nejpresnějším teploměrem je platinový odporový teploměr. Citlivost dle uspořádání měřícího obvodu je až $0,001^{\circ}\text{C}$. Ovšem nevýhodou tohoto způsobu měření je, že odporové tělísko zaujímá určitou plochu nebo objem. Takže není možné měření teploty v určitém bodě průřezu a dále je vyžadován zdroj proudu. Ani cena tohoto typu teploměru není zanedbatelná. Z uvedených příčin je proto použití uvedeného způsobu snímání teploty těžko použitelný.

ad b) tento typ teploměru pracuje na principu termo-elektrického jevu, který vzniká ve vodivém spoji dvou různých kovů. Zahřejeme-li tento spoj pak v uzavřeném obvodu složeném z těchto dvou kovů, převládne potenciální rozdíl v jednom spoji (měrný konec) nad rozdílem v druhém spoji (studený konec) a vznikne t.zv. termoelektrické napětí nebo také termoelektrická síla. Výhoda tohoto způsobu je možnost měření teploty v určitém bodě průřezu, poměrně jednoduchá měřicí aparatura a dostupná cena termočlánekového materiálu.

Určitou nevýhodou je odvod tepla termočlánekovými vodiči a dále tepelná kapacita způsobující časové zpoždění údaje a zároveň snížení původní teploty v okolí měrného konce termočlátku.

Dalším ovlivněním výsledku je možné umístění měrného konce termočlátku v dutině formy. Viz schema umístění na obr. 11.



1 - měrný konec termočlátku, 2 - termočlánekové vodiče,
3 - stěna formy, 4 - plastická hmota v tekutém stavu.

Obr. 11.

VŠST Liberec		DP - ST 1015/73
Fakulta strojní		KTM str. 41

V případě 11.a , kdy je měrný konec umístěn v blízkosti stěny formy, je nepochybně ovlivněn údaj teploměru teplotou stěny formy viz kapitola 4. Naproti tomu v případě 11.b je předpoklad, že při dobré izolaci měrného konce termočlánku a umístění měrného konce v proudu roztavené hmoty bude dokonalejší sdílení tepla a tím i spolehlivější údaj o teplotě.

5.3. Konstrukce snímače

Konstrukce snímače byla prováděna vzhledem k těmto požadavkům:

- 1) Rozsah měřených teplot od 20°C - 400°C a zároveň musí těmto teplotám konstrukce odolávat s pokud možná nejdelší životností.
- 2) Odolávat tlakům do 400 kp cm^{-2} .
- 3) Snímač nesmí bránit zaplňování tvarové dutiny.
- 4) Nesmí bránit otevírání formy a vyhazování výstřiků.
- 5) Musí co nejméně ovlivňovat tepelné pole výstřiku.
- 6) Signál čidla natolik silný, aby bylo možno jej zpracovat dostupným zařízením.
- 7) Vzhledem k rychlosti děje mít co nejmenší časovou konstantu.
- 8) Údaj o jedné a téže teplotě se nesmí v průběhu použití snímače měnit.

Těmto požadavkům nejvíce vyhovoval termočlánek typu Fe - Ko. Dráty termočlánku jsou voleny o průměru 0,2 mm, svařené elektrickým výbojem. Rozměr průměru 0,2 mm byl volen z důvodu co nejmenšího odvodu tepla termočlánekovými vodiči. Dalším kritériem pro volbu

VŠST Liberec		DP - ST 1015/73
Fakulta strojní		KTM str. 42

termočlánek Fe - Ko je dostupnost při použitelnosti do 700°C s poměrně lineární charakteristikou a dává termoelektrické napětí $e = 5,37 \text{ mV} / 100^\circ\text{C}$. Dráty termočlánek jsou zabudovány do keramické dvoukapiláry jež zaručuje tepelnou izolaci termočlánek od styku s kovovou částí formy a má zamezit ovlivňování tepelného pole výstřiku. Tento celek byl pak zabudován do ocelové zátky viz obr. 12.a pro zkušební spirálu a 12.b - pro zkušební destičku. Termočlánekové dráty byly zajištěny proti vytažení při otevření formy a vyhození výstřiku, zalepením do dvoukapiláry pomocí epoxydové pryskyřice typu Epoxy 1500. Rovněž i keramická dvoukapilára byla zafixována v ocelové zátce pomocí epoxydové pryskyřice Epoxy 1500. Pro snadné setření z keramické dvoukapiláry při vyhazování výstřiku je konec vyčnívající ocelové zátky opatřen kuželem. Tato konstrukce se velmi osvědčila a dá se o ní říci, že její životnost je téměř neomezená. Termočlánek byl použit bez studeného srovnávacího konce.

5.4. Měřicí zařízení

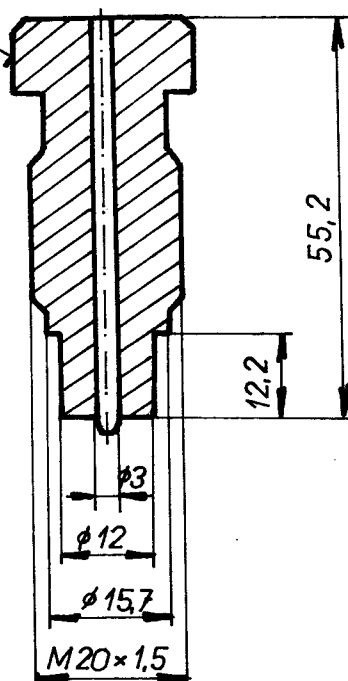
Zařízení jež jsem použil vyhovuje podmínkám uvedeným v odstavci 5.1. Jako měřidlo jsem použil oscilograf typu UV RECORDER 2500. Tento oscilograf zapisuje pomocí ultrafialového paprsku, ^{na papír} jež se vyvolává denním světlem.

Technická data :

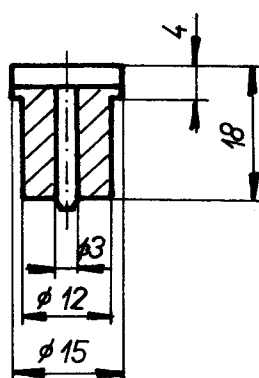
12 kanálů
0,3 mm - tloušťka čáry
12 cm x 30 m - papír
příkon 500 W
rychlost posuvu papíru 0,5; 1,5; 5; 15 cm s^{-1}
časová konstanta 10 - 20 s
vnitřní odpor 100 $\pm 1\%$

MĚŘ. 1:1ŠESTIHRAN 22

A)

MĚŘ. 1:1

B)

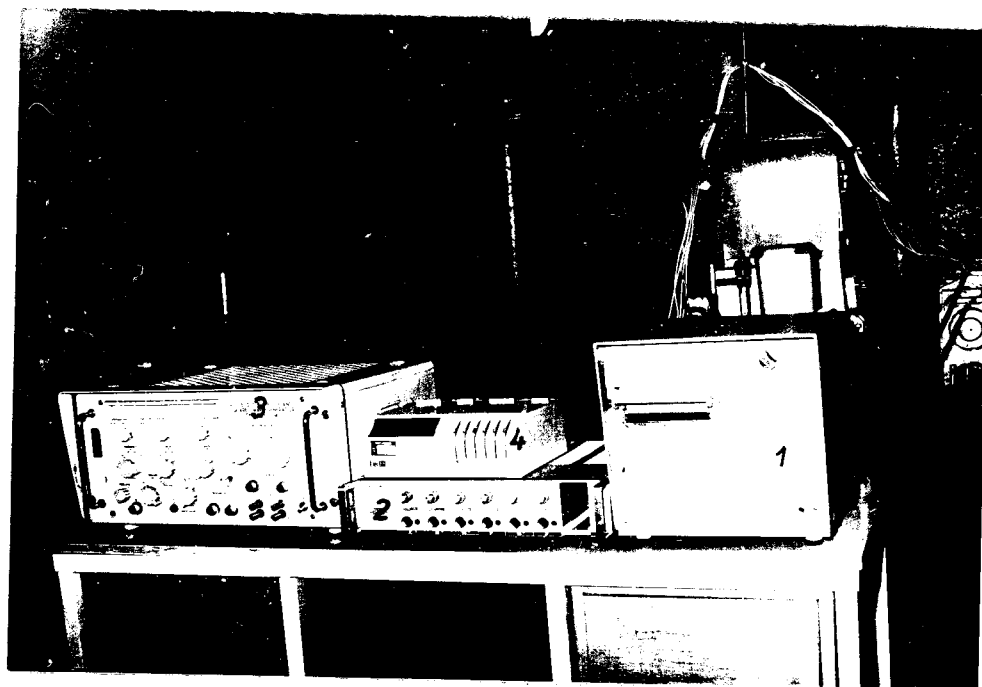


Obr. 12.

VŠST Liberec		DP - ST 1015/73
Fakulta strojní		KTM str. 44

Tento přístroj umožňoval měřit všechna místa najednou. Bylo snímáno pět míst jak u zkušební spirály tak i u zkušební destičky. Citlivost přístroje se dala ovládat použitými smyčkami. Protože však dodávané napětí bylo velmi malé, bylo nutno použít zesilovače. Zde byl použit typ ACCUDATA 112A o zesílení 1; 2; 5; 10; 20; 50; 100; 200; 500 a 1000 krát.

K vytvoření časové základny umožňující přesné odečítání časového průběhu bylo použito generátoru kmitů TR - 0304 o nastavené frekvenci 1 Hz. Celé zařízení je na obr. 13.



1 - oscilograf, 2 - zesilovač, 3 - generátor kmitů,
4 - cejchovací zařízení.

Obr. 13.

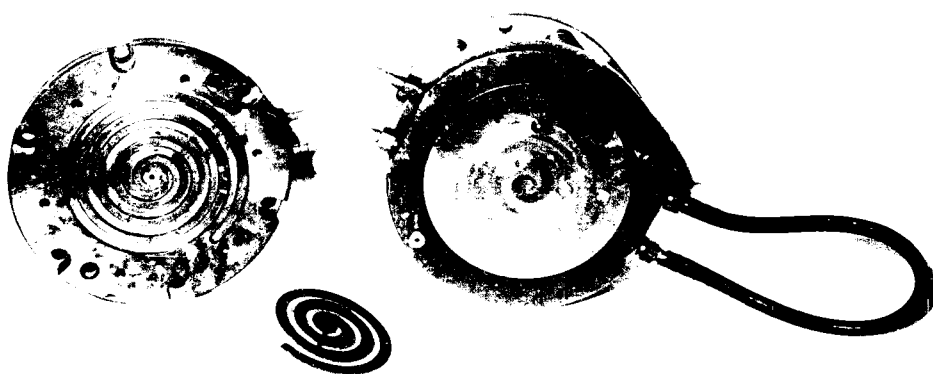
VŠST Liberec		DP - ST 1015/73
Fakulta strojní		KTM str. 45

5.5. Zkušební zařízení

Měření bylo prováděno na vstřikovacím lisu EZ IX, který je umístěn v laboratoři plastických hmot KTM VŠST Liberec. Jde o horizontální pístový lis bez předplastikačního zařízení s ručním mechanickým zavíráním. Ohřev tavné komory je proveden prstencovými topnými tělesy napájenými přes regulační autotransformátor. Regulace teploty je provedena pomocí magnetického regulátoru. Vstřikovací kapacita lisu je 45 g .

Formy, na nichž bylo prováděno měření, byly :

a) Forma na měření zabíhavosti termoplastu. Obr. 14.



Obr. 14.

Kde tvarová dutina formy má tvar Archimedovy spirály o stoupání 16 mm a o hloubkách :

1 mm ; 2 mm ; 4 mm .

VŠST Liberec		DP - ST 1015/73	
Fakulta strojní		KTM	str. 46

Použité hloubky měly zjistit případnou závislost koeficientu teplotní vodivosti α na síle stěny resp. na rychlosti ochlazování. Šířka spirály je konstantní u všech hloubek 10 mm. Podél spirály je v desce tvárníku 5 otvorů se závitem pro umístění snimačů. Vzdálenosti snimačů od vtoku jsou 100; 200; 350; 795 mm. Forma je chlazena vodou pomocí dvou přímých průvrtů $\varnothing$ 8 mm a délky 220 mm v tvárníku formy.

b) Forma pro zkoušení studených spojů ve tvaru kruhové destičky o $\varnothing$ 130 mm a síle 2 mm. Termočlánky byly vloženy do formy místo zátek původně sloužících k výzkumu studených spojů.

Jestliže forma ad a) byla spíše netypickým případem, pak destička měla charakterizovat skutečný tvar výstřiku.

Chlazení bylo provedeno opět vodou pomocí dvou přímých průvrtů rovněž o $\varnothing$ 8 mm a délky 210 mm v tvárníku formy.

Chladicí voda použitá k chlazení (správněji temperování formy), byla udržována na teplotě 30°C; 59°C; 88°C pomocí Höpplerova ultratermostatu, kde regulaci obstarává regulační teploměr Vertex. Kontrola teploty vody v ultratermostatu byla prováděna tyčinkovým teploměrem, temperování topnou spirálou, případné chlazení chladicí spirálou napájenou chladicí vodou z vodovodu. Cirkulace byla zajištěna čerpadlem, jež je příslušenstvím ultratermostatu.

Pro kontrolu byla po každém měření prováděna měření teploty taveniny odstříknutím. Měřeno bylo termočlánkem Fe - Ko jež byl zabudován v duté kovové jehle a pomocí této byl termočlánek ponořován do hroudy odstříknuté taveniny. Příslušné termoelektrické napětí bylo odečítáno na milivoltmetru MTL 10 a s pomocí cejchovní křivky termočlánku byla zjištěna odpovídající teplota hmoty (taveniny).

5.6. Metody určení součinitele teplotní vodivosti a

a) První ze dvou metod, které jsem použil je metoda grafického zpracování křivek chladnutí. Vyplyvá z úpravy a logaritmováním vztahu

$$\gamma = \frac{t - t_f}{t_o - t_f} = \frac{4}{\pi} \exp\left[-\frac{\pi^2}{4} \frac{a\tau}{\delta^2}\right] \quad (5 - 1)$$

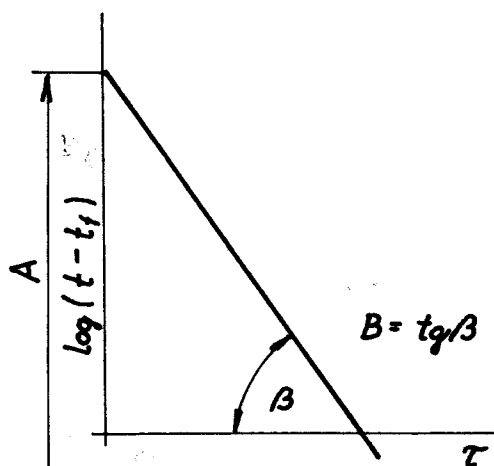
který pak přechází do tvaru :

$$\log(t - t_f) = \log \frac{4}{\pi} (t_o - t_f) - \left[\frac{1}{2,303} \frac{\pi^2}{4} \frac{a}{\delta^2} \right] \tau \quad (5 - 2)$$

Protože všechny veličiny, vyjma teploty t a doby τ jsou konstantami, můžeme napsat vztah (5 - 2) ve tvaru

$$\log(t - t_f) = A - B\tau \quad (5 - 3)$$

konstanty A i B jsou definovány vztahem (5-2). Tento vztah se v semilogaritmické síti zobrazí jako přímka. Obě konstanty lze z grafického záznamu křivek chladnutí zjistit. Čemu odpovídají konstanty je na obr. 15.



Obr. 15.

VŠST Liberec		DP - ST 1015/73
Fakulta strojní		KTM str. 48

Ze znalosti konstanty A můžeme určit skutečnou počáteční teplotu hmoty v měřeném místě. Ze znalosti konstanty B můžeme vyjít při určení součinitele teplovodivosti a . Porovnáním rovnic (5 - 2) a (5 - 3) a úpravou dostaneme vztah

$$\alpha = 2,303 B \sigma^2 \frac{4}{\pi^2} = 0,234 B h^2 \quad (5 - 4)$$

Jelikož jde o konečné těleso musíme respektovat konečné rozměry. Při použití vz-tahu (5 - 4) dosadíme za h^2 :

$$h = \frac{1}{\frac{1}{h_1^2} + \frac{1}{h_2^2} + \frac{1}{h_3^2}} \quad (5 - 5)$$

kde $h_1 = 0,1$ cm	pro spirálu o $h = 1$ mm
$h_1 = 0,2$ cm	pro spirálu o $h = 2$ mm
$h_1 = 0,4$ cm	pro spirálu o $h = 4$ mm
$h_2 = 1$ cm	pro všechny spirály
$h_3 = \infty$	pro všechny spirály
$h = h_1 = 0,2$ cm	pro destičku
$h_2 = \infty$	pro destičku
$h_3 = \infty$	pro destičku

Tato metoda lze použít v případě, že křivky chladnutí jsou přímkového charakteru např. viz obr. 18. Čím více se křivky chladnutí blíží svým tvarem přímkám, tím více se teoretické vztahy blíží skutečnému chladnutí.

b) Druhá metoda, kterou jsem použil pro kontrolu metody ad a) je metoda regulární fáze. Tato metoda vychází z předpokladu, že teplota prostředí se nemění, součinitel se s časem nemění; nejsou žádné vnitřní zdroje

VŠST Liberec		DP - ST 1015/73
Fakulta strojní		KTM str. 49

tepla v tělese. Pak lze děj ochlazování (oteplování) tělesa rozdělit v čase na tři fáze.

1. fáze neuspořádaného pochodu
2. stav regulární fáze
3. fáze tepelné rovnováhy

Charakteristické pro regulární režim je, že počáteční rozložení teplot v tělese ztrácí svůj význam a další průběh se řídí jen podmínkami na hranici. Rychlost časové změny teploty jednotlivých míst tělesa při regulárním tepelném režimu zůstává konstantní. Pro libovolné dva po sobě následující okamžiky regulárního tepelného režimu lze napsat :

$$\begin{aligned}\tau_1 &= -\frac{1}{m_1} \ln \frac{\theta_1(x,y,z,\tau_1)}{A_1 \theta_i(x,y,z)} \\ \tau_2 &= -\frac{1}{m_1} \ln \frac{\theta_2(x,y,z,\tau_2)}{A_1 \theta_i(x,y,z)}\end{aligned}\quad (5 - 6)$$

kde m_1 - veličina charakterizující rychlost regulárního režimu

$\theta_1(x,y,z,\tau_1)$ teplota v okamžiku τ_1 v místě o souřadnicích (x, y, z)

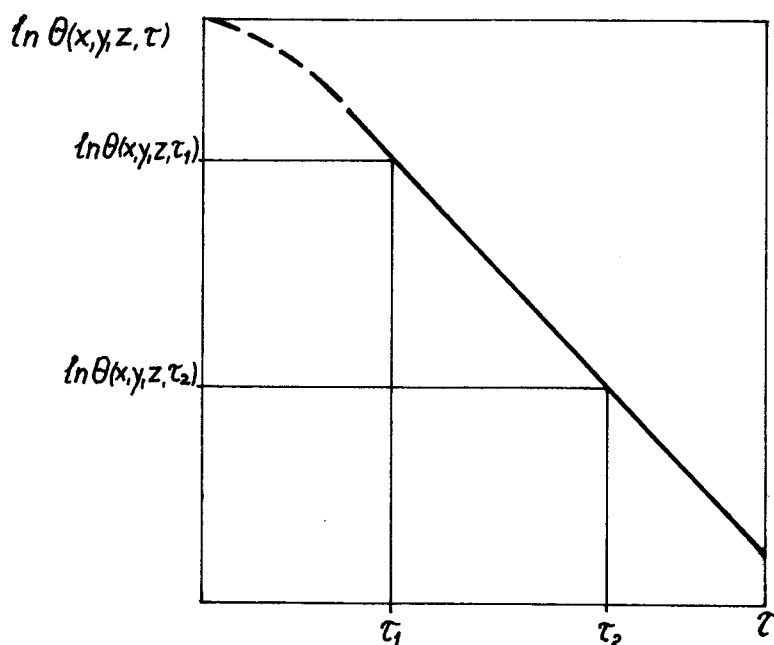
$\theta_i(x,y,z)$ - teplota nezávislá na τ v místě o souřadnicích (x, y, z)

A_1 - konstanta

Z rovnice (5 - 6) dostaneme rychlost regulárního režimu.

$$m_1 = \frac{\ln \theta_1(x,y,z,\tau_1) - \ln \theta_2(x,y,z,\tau_2)}{\tau_2 - \tau_1} \quad (5 - 7)$$

V souřadnicích $\ln \theta (x, y, z, \tau)$ a τ je teplotní funkce pro regulární režim znázorněna přímkou viz obr. 16.



Obr. 16.

Pak při velkých Biotových číslech lze určit a :

$$a = m_1 \frac{l^2}{\gamma} \quad (5 - 8)$$

kde l - určující geometrický rozměr tělesa, pro spirálu určen dle vztahu (5 - 5)

γ - kritérium nesterodnosti teplotového pole, při rovnoměrném rozložení teplot v tělese je

$\gamma = 1$, čím více se liší γ od 1 tím větší je nesterodnost teplotového pole. Až při $\gamma = 0$ je rozložení teplot nejvíce nesterodné. Teplota povrchu tělesa se rovná teplotě okolí a teplota uvnitř tělesa je rozdílná od teploty povrchu. γ je tabelováno. [24].

5.7. Výsledky měření

Měření bylo prováděno na těchto druzích materiálů:

- 1) Krasten 2.4
- 2) Polyetylen - Bralen
- 3) Polyetylen plněný břidlicí typ PV 10

Materiál ad 1) a ad 2) byl použit jak na zkušební spirálu tak i destičce. Materiál ad 3) pouze u spirály o $h = 2 \text{ mm}$ z důvodu omezeného množství zásob. Účelem měření na materiálu ad 3) bylo určit případnou možnost vlivu plniva na teplotní koeficient α . Pro dosažení pokud možno srovnatelných výsledků bylo měřeno při konstantní době cyklu 45 s. Použité teploty taveniny a teploty chladicí kapaliny je uvedeno v tabulce 3. a tabulce 4.

Tabulka č. 3.

Krasten 2.4			
spirála		destička	
t_k	t_o	t_k	t_o
30	210	30	210
	230		230
	250		250
	270		270
	290		-
59	210	59	210
	230		230
	250		250
	270		270
	290		-

Tabulka č. 4.

Bralen			
spirála		destička	
t_k	t_o	t_k	t_o
30	190	30	190
	220		220
	250		250
	280		280
	310		-
59	190	-	-
	220		-
	250		-
	280		-
	310		-

Na následujících diagramech obr. 17 - 22 jsou uvedeny křivky chlazení v semilogaritmické síti jež byly použity při určení koeficientu teplotní vodivosti a . Vyhodnocené výsledky jsou v tabulce č. 5 a 6.

Tabulka č. 5.

materiál Krasten 2.4

zkušební tvar	spirála 1 mm	2 mm	4mm	destička 2 mm
$t_k = 30^{\circ}\text{C}$	1,89	6,1	6,0	4,45
$t_k = 59^{\circ}\text{C}$	1,89	6,1	7,0	4,45

Hodnoty součinitele teplotové vodivosti uvedené v tabulce č. 5. mají rozměr $a = x \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$. (i pro tab.6)

Tabulka č. 6.

Materiál Bralen

zkušební tvar	spirála 2mm	destička 2 mm
$t_k = 30^{\circ}\text{C}$	4,45	2,8
$t_k = 59^{\circ}\text{C}$	4,45	-
$t_k = 88^{\circ}\text{C}$	4,45	-

Vyhodnocené výsledky jsem porovnával a zjistil jsem, že hodnoty na spirále o $h = 1 \text{ mm}$ se oproti hodnotám na spirálách o $h = 2 \text{ mm}$ a $h = 4 \text{ mm}$ liší a to přibližně 3 krát nižší koeficient teplotní vodivosti a u spirály o $h = 1 \text{ mm}$ oproti spirálám o $h = 2 \text{ mm}$ a $h = 4 \text{ mm}$. Dalším srovnáním je výsledek naměřený na spirále o $h = 2 \text{ mm}$ a destičce rovněž o $h = 2 \text{ mm}$. Zde je koeficient teplotní vodivosti a přibližně 0,3 krát menší než u spirály. Vysvětlení těchto rozdílů bych, pro tento naměřený případ, viděl v závislosti na rychlosti chlazení. V případě spirály o $h = 1 \text{ mm}$ je daleko menší množství tepla nutné k odvedení z výstřiku. Chlazení zde tedy probíhá rychleji než u spirál o $h = 2 \text{ mm}$ a $h = 4 \text{ mm}$ kde je nutno odvést daleko větší množství tepla. Toto vyplývá ze vztahu

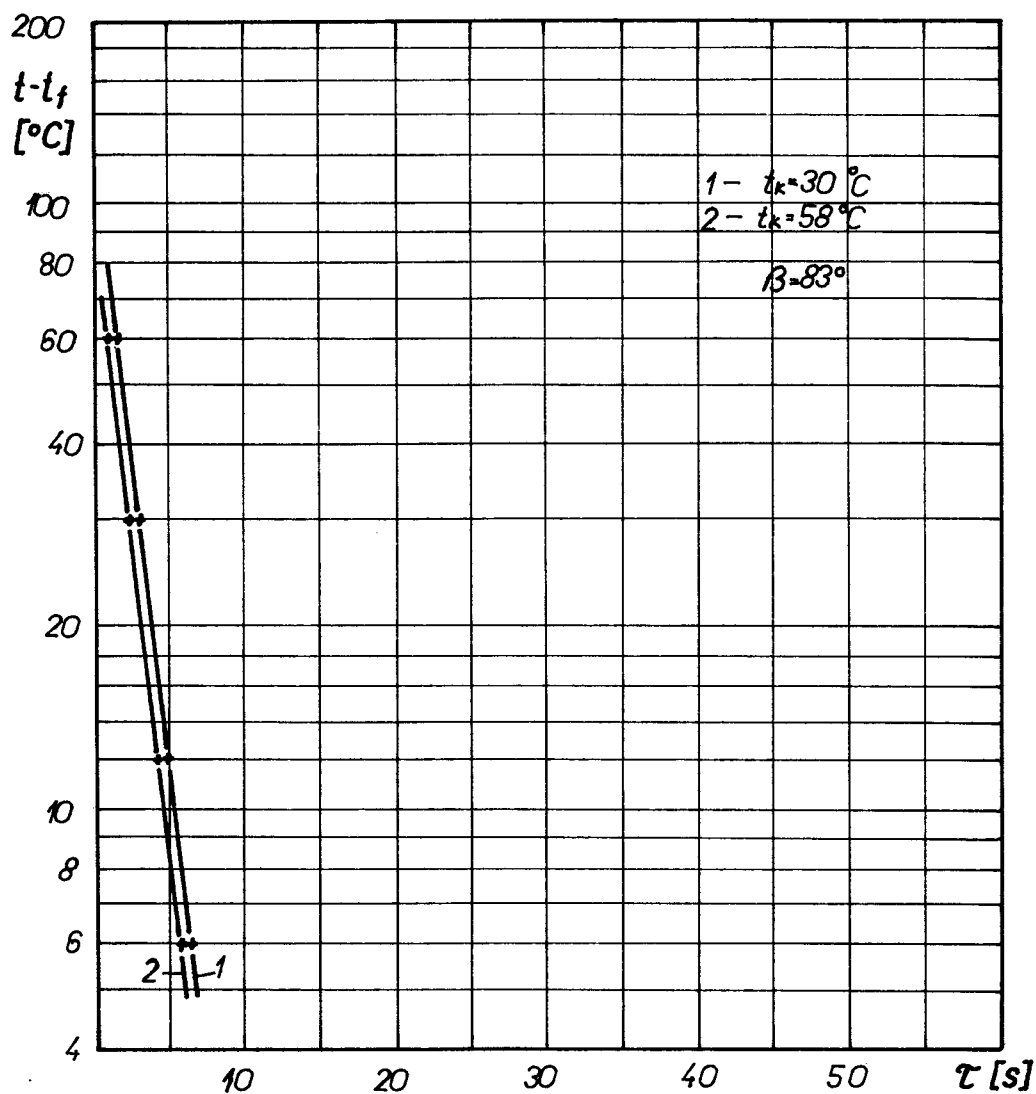
$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t \quad (5 - 9)$$

kde m - hmota výstřiku

c - střední měrné teplo hmoty

t - rozdíl teplot na počátku a konci chlazení

Hmota výstřiku u spirály o $h = 1 \text{ mm}$ je zhruba 2 krát a 4 krát menší než u spirály o $h = 2 \text{ mm}$ a $h = 4 \text{ mm}$. Tepelný tok z výstřiku do formy je u všech spirál přibližně stejný tedy rychlost chlazení $\frac{dt}{d\tau}$ je u spirály o $h = 1 \text{ mm}$ vyšší.



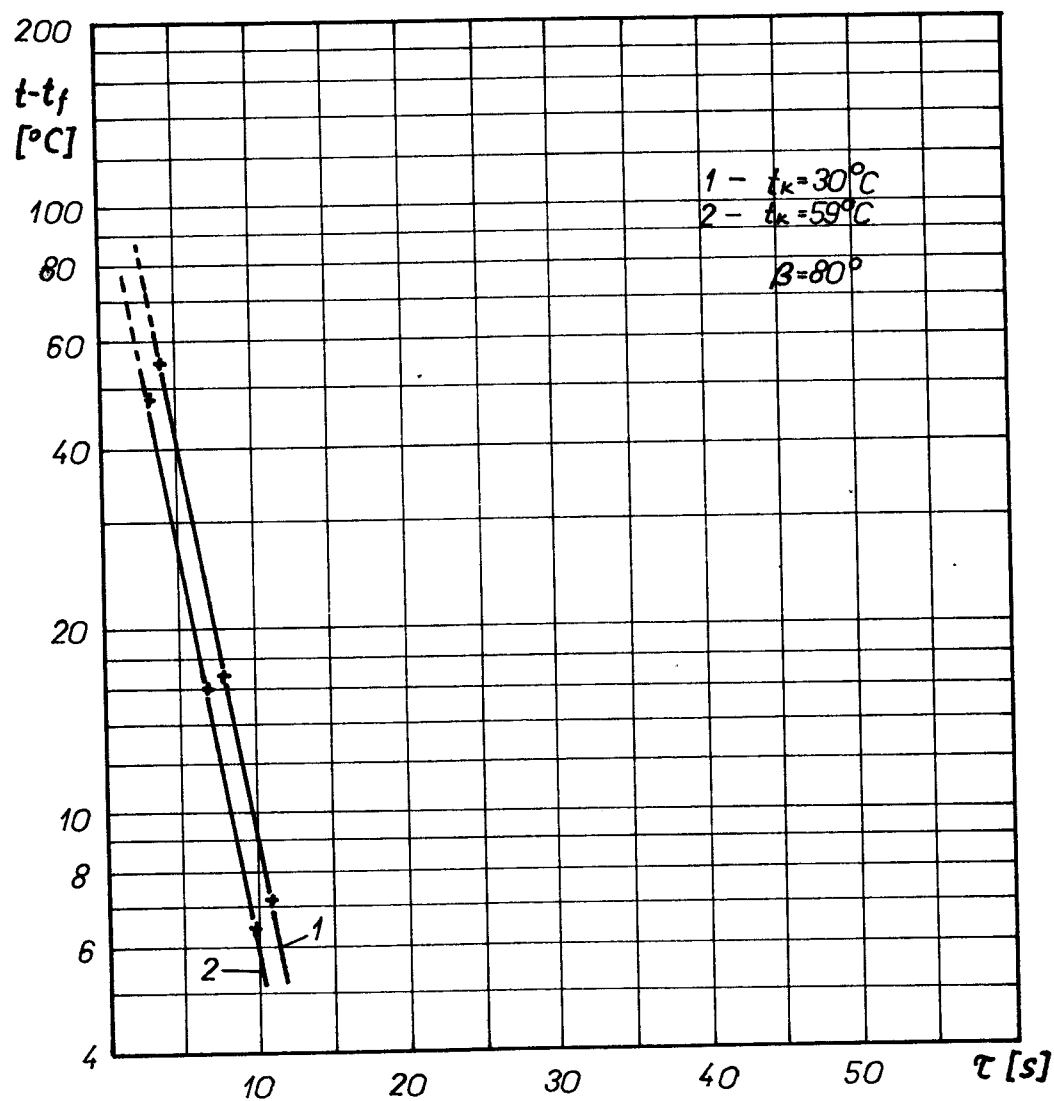
Obr. 17.

Material Krasten 2.4

Spirála $h = 1 \text{ mm}$;

$t_k = 30^\circ\text{C}; 58^\circ\text{C}$

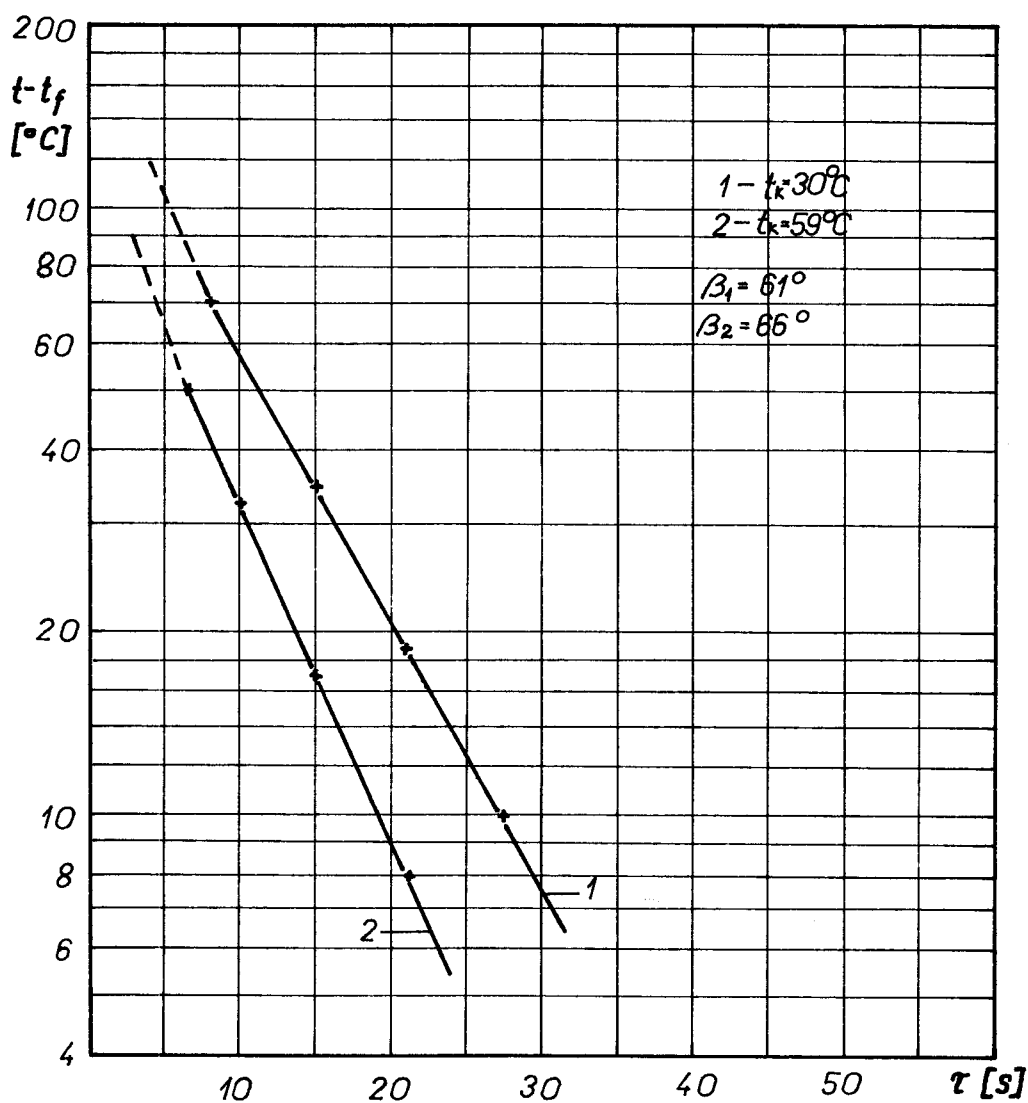
$t_o = 210^\circ\text{C}; 230^\circ\text{C}; 250^\circ\text{C}; 270^\circ\text{C}; 290^\circ\text{C}$



Obr. 18.

Materiál Krasten 2.4

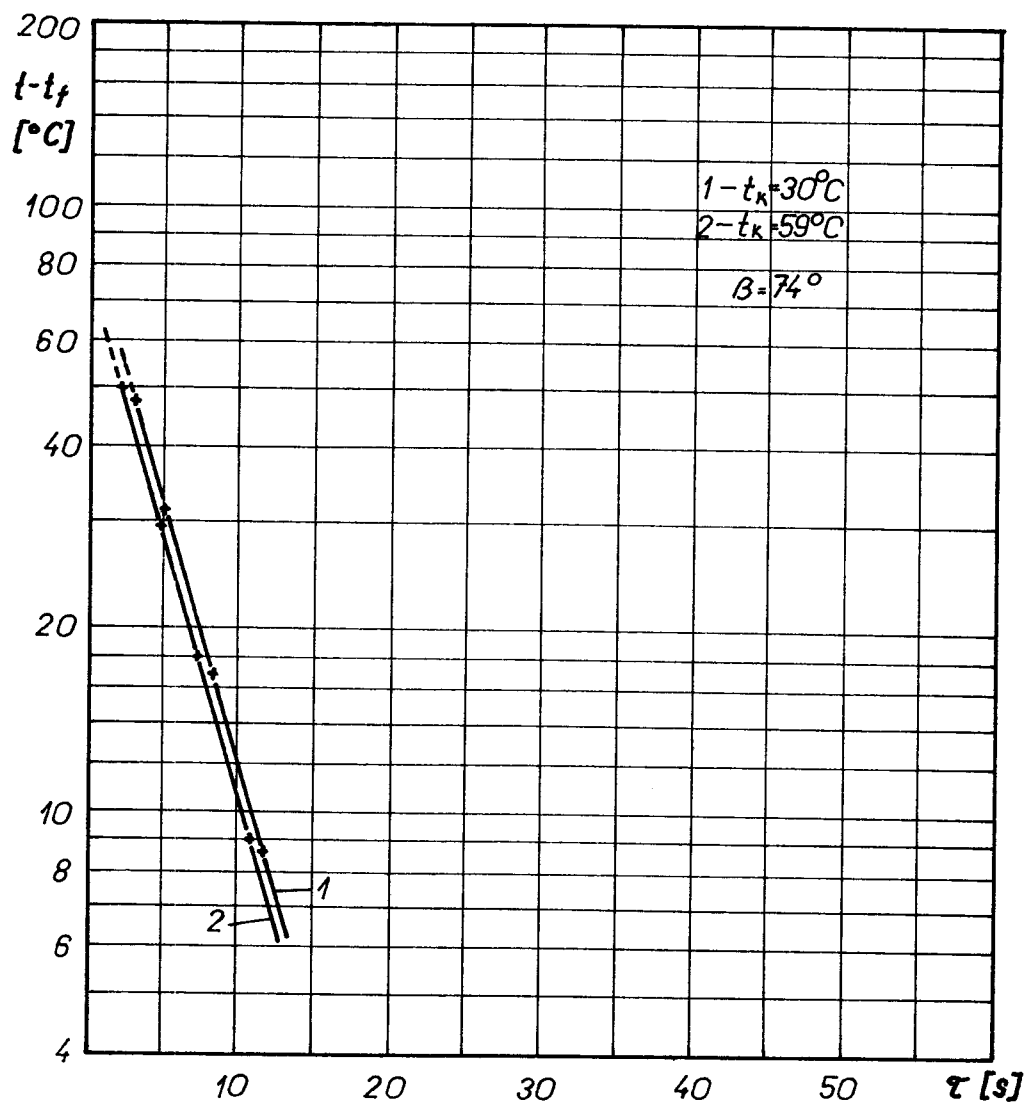
Spirála $h = 2$ mm; $t_k = 30^\circ\text{C}; 59^\circ\text{C}$ $t_\phi = 210^\circ\text{C}; 230^\circ\text{C}; 250^\circ\text{C}; 270^\circ\text{C}; 290^\circ\text{C}$



Obr. 19.

Materiál Krasten 2.4

Spirála $h = 4 \text{ mm}$ $t_k = 30^\circ\text{C}; 59^\circ\text{C}$ $t_0 = 210^\circ\text{C}; 230^\circ\text{C}; 250^\circ\text{C}; 270^\circ\text{C}; 290^\circ\text{C}$



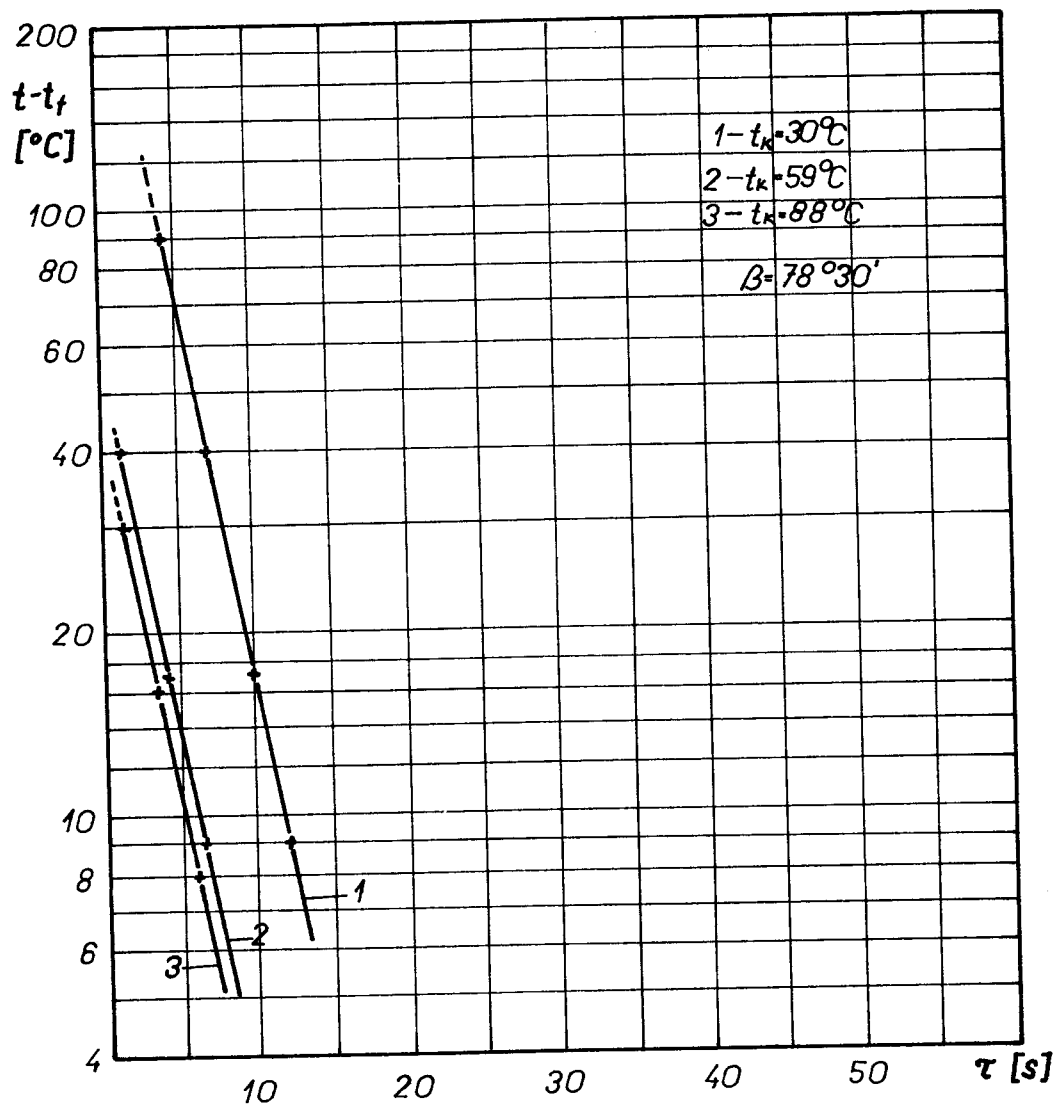
Obr. 20.

Materiál Krasten 2.4

Destička $h = 2$ mm

$t_k = 30^\circ\text{C}; 59^\circ\text{C}$

$t_o = 210^\circ\text{C}; 230^\circ\text{C}; 250^\circ\text{C}; 270^\circ\text{C}$



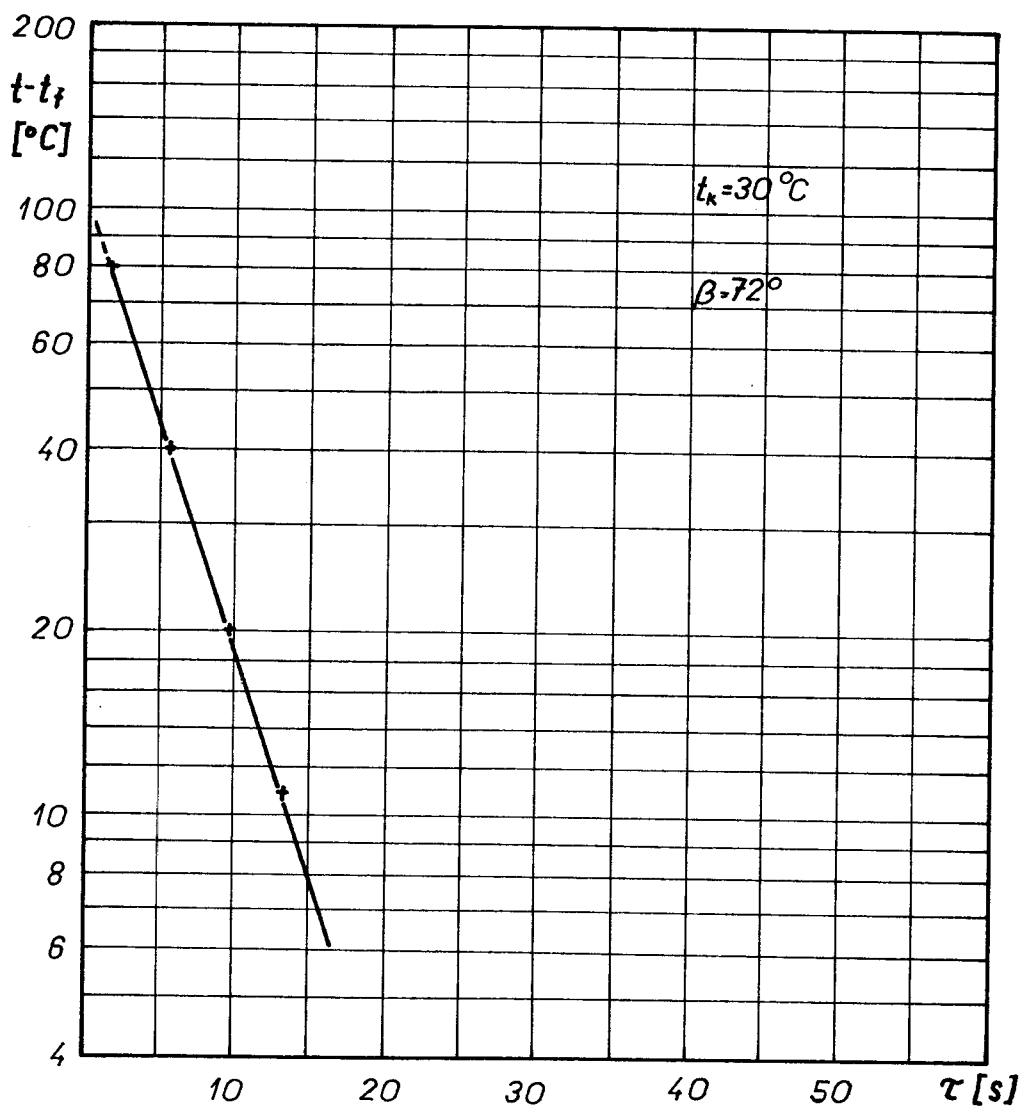
Obr. 21.

Materiál Bralen

Spirála $h = 2 \text{ mm}$

$t_k = 30^\circ\text{C}; 59^\circ\text{C}; 88^\circ\text{C};$

$t_o = 190^\circ\text{C}; 220^\circ\text{C}; 250^\circ\text{C}; 280^\circ\text{C}; 310^\circ\text{C}$



Obr. 22.

Materiál Bralen

Destička $h = 2 \text{ mm}$ $t_k = 30^\circ\text{C}$ $t_0 = 190^\circ\text{C}; 220^\circ\text{C}; 250^\circ\text{C}; 280^\circ\text{C}$

VŠST Liberec		DP - ST 1015/73	
Fakulta strojní		KTM	str. 60

Rovněž tak sdílení tepla u destičky je na daleko větší ploše než u spirály. Teplosměnná plocha u destičky je zhruba 4 krát větší než u spirály. To, že snížení koeficientu teplotní vodivosti a je zde menší než v případě spirály, přičítám pomalejšímu odvodu tepla. Tedy rychlosti chlazení menší než u spirály o $h = 1 \text{ mm}$. z důvodu velké hmoty destičky. Domnívám se, že k důkazu závislosti koeficientu teplotní vodivosti a na rychlosti chlazení, je třeba provést větší počet měření na různých tvarech tak, aby mohla být získána případná statistická závislost.

Takovýmto způsobem je třeba dle mého názoru pohlížet na výsledky této práce. Přesto se domnívám, že ačkoliv výsledky v podstatě platné hlavně pro mé podmínky měření, je možno považovat za naznačení závislosti koeficientu teplotní vodivosti a na rychlosti chlazení.

Vliv plnidla zkoušený u spirály o $h = 2 \text{ mm}$ nebyl v tomto případě zjištěn.

6. Racionalizační opatření plynoucí z výsledků

Jestliže jsem v kapitole 4. provedl porovnání teoreticky stanovené a skutečně používané doby chlazení, pak jsem zjistil, že skutečná doba chlazení je přibližně o 35 - 45% delší než doba teoreticky určená z nomogramu. Důvodem tohoto rozporu je nesporně zjednodušení z kterého vycházíme při sestavení nomogramu. Hlavní příčiny však vidím v neznalosti koeficientu teplotní vodivosti α . Jestliže srovnávám údaje jež jsou udány v [14, 21] a v mé práci, pak je vidět dost značné rozdíly. Dle mého soudu není příčina rozdílu jen v metodě zjištění tohoto koeficientu, podmínky měření, ale také zřejmá proměnnost součinitele teplotní vodivosti α s rychlostí chlazení. Pravděpodobně tento součinitel závisí nejen na rychlosti chlazení ale rovněž na tvaru chlazeného tělesa. Jistým krokem k ověření tohoto předpokladu byla letošní diplomová práce.

Dalším krokem by mělo být podrobné studium tepelných poměrů každé a zvláště složitější formy. Neboť velmi často se prodlužuje neúměrně doba chlazení z toho důvodu, že v některém tepelném uzlu výstřiku vlivem špatného odvodu tepla dochází k daleko pomalejšímu chlazení hmoty než v ostatních částech formy. Rozhodně v tomto případě hraje roli i teplota formy o níž jsem se zmínil v kapitole 2.3.1. a její vliv byl studován v [21]. Řešením pak je temperování forem. Ovšem tímto musí být rozuměno, že chladicí kapalina je ještě před vstupem do chladicího systému předem upravena na předepsanou teplotu. V současné době představuje temperování pouze chlazení kapalinou, nejčastěji vodou čerpanou z vnějšího zdroje, kde je její teplota závislá v podstatě na přírodních podmínkách (léto - zima). Takto dosáhneme ve formě stálého tepelného stavu, teplota formy je kontrolovatelná a není nutno dobu chlazení prodlužovat pro případ nečekaného zvýšení teploty chladicí kapaliny. Dalším přínosem temperování forem je

VŠST Liberec		DP - ST 1015/73	
Fakulta strojní		KTM	str. 62

splnění vysokých požadavků na jakost výstřiku, zejména přesnost, tvarovou stálost a jakost povrchu, jež vyžadují přesnou, stálou a kontrolovanou teplotu formy. Dále ovlivňuje kladně i výkon vstřikovacího lisu.

7. Ekonomický rozbor řešené úlohy

Již v úvodu této diplomové práce bylo uvedeno, jak stoupá výroba plastických hmot a její rozvoj v budoucích letech. Při současném tempu je tedy již nyní nutno uvažovat o radikálních změnách ve výrobě týkající se hlavně zkrácení výrobních časů. V této práci byl proveden jeden z kroků možného zkracování doby chlazení. Výsledkem je zhospodárnění výroby. Zpřesnění předběžného určení doby chlazení je důležité i při konstrukci forem, při operativním plánování výroby a při provádění ekonomických úvahách a investicích. Jestliže rozebereme předcházející řádky, pak jestliže navrhují formu a chci znát její násobnost, pak musím znát vedle plastifikační kapacity lisu i dobu chladnutí a váhu výstřiku. V oblasti operativního plánování pak provádíme kapacitní propočty, určujeme velikosti dávek, průběžné doby, velikosti zásob, objem rozpracované výroby a určuje se plán přísunu a odsunu materiálu od stroje. Pro všechny tyto výpočty je třeba znát celkovou dobu cyklu a mezi nimi i dobu chlazení výstřiku.

Z uvedeného vyplývá, nutnost znát dobu chladnutí výstřiku a z toho plynoucí znalosti koeficientu teplotní vodivosti a a jeho závislosti na fyzikálních a technologických podmínkách.

8. Závěr

Snahou při přípravě a vlastní práci jak na teoretických tak praktických výsledcích této práce bylo co nejúplněji vyčerpat zadanou problematiku. Je ovšem třeba poznamenat, že všechny podmínky zvláště při experimentální části práce, nebyly zdaleka vyjadřujícími podmínky v praxi. Stroj použitý pro měření jejíž konstrukčně zastaralý a cyklus na něm již neodpovídá moderním strojům. Jestliže bylo snahou při volbě forem postihnout vliv rychlosti chladnutí a tvaru chladnoucího výstřiku přesto se domnívám, že ke komplexnějšímu řešení by bylo třeba provést zkoušky na větším množství tvarů o různých silách stěny výstřiku řádově až desítek milimetrů.

Jestliže použitá aparatura byla v současné době tím nejlepším co v našich podmínkách umožňuje VŠST, přesto k zvýšení přesnosti by bylo třeba provádět záznam na širším papíru při současném zmenšení tloušťky čar na záznamu. Přesto se domnívám, že výsledky dosažené tímto zařízením jsou poměrně nejpresnější z dosud prováděných měření.

V závěru děkuji s. ing. J. Krebsovi CSc za vedení při práci a ochotnou pomoc při měření, a A. Podroužkovi za pomoc při zprovoznění a obsluze měřicí aparatury po stránce elektrické.

VŠST Liberec		DP - ST 1015/73
Fakulta strojní		KTM str. 65

9. Seznam použité literatury

[1/ GRINBLAT, V.N. : Tečení taveniny polymerů ve formě při vstřikování. Plastičeskije masy , 1970/2 str. 28

[2/ KUTATELADZE, S.S. - BORIŠANSKIJ, V.N. : Příručka sdílení tepla. SNTL Praha 1960

[3/ SMĚLÝ, Z. :Způsoby přibližného výpočtu a praktické zjišťování minimální doby pro vyhřátí nebo ochlazování masivních výrobků z pryže, plastických hmot a jiných materiálů
Zprávy VÚGPT, 1965/1, str. 12-16

[4/ MIŠČENKO, M.P. - SOMOJLOV, A.V. - BUGACKIJ, V.A. : Tepelné vlastnosti polymerů v širokém intervalu teplot. Plastičeskije massy, 1966/3, str. 59 - 61

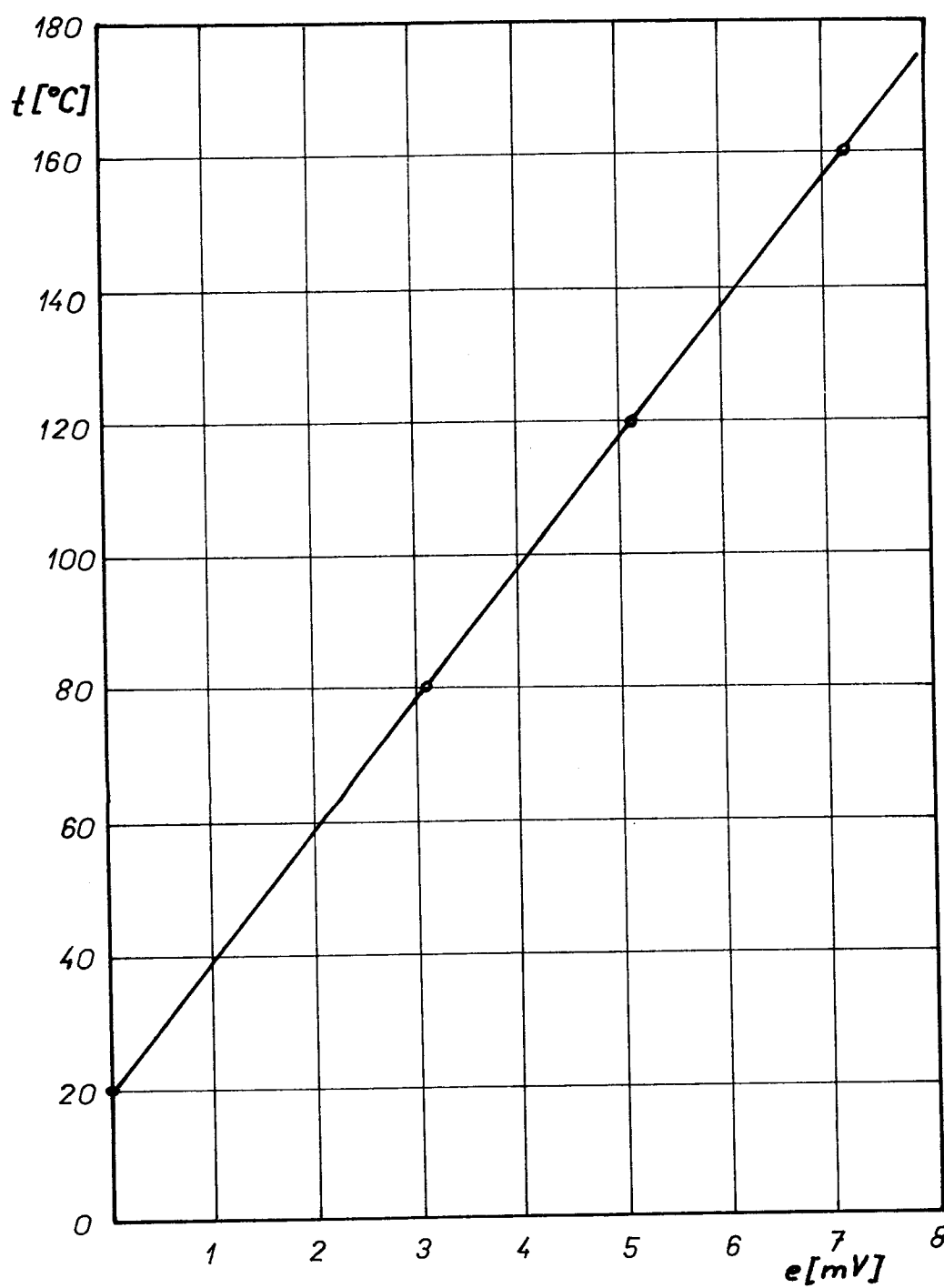
[5/ KREBS, J. : Vliv podmínek vstřikování na vlastnosti výstřiků z termoplastů. Kandidátská práce VŠST, 1967.

[6/ SVOBODA, R. a kol. : Elektrické měření neelektrických veličin. VŠST Liberec, skripta 1969.

[7/ ŠINDELÁŘ, V. - KRUPKA, F. : Měření teploty. Práce Praha 1955.

VŠST Liberec		DP - ST 1015/73	
Fakulta strojní		KTM	str. 66
/ 8/ MICHEJEV, M.A. : Základy sdílení tepla. SNTL Praha 1953. / 9/ CORNELY, J. : Einführung in die Spritzgusstechnologie. VEB Deutscher Verlag für Grundstoff - industrie - Leipzig 1965. /10/ NORTHMANN, D. - SEYFARTH, P. - BERNHOLZ, D. : Einführung in die verarbeitung der plaste. VEB Verlag Technik Berlin + 1963. /11/ ŠORIN, S.N. : Sdílení tepla. SNTL Praha 1968. /12/ LACZYŃSKI, B. : Metody przetworstwa tworzyw sztucznych. Wydawnictwa naukowo-Techniczne - Warszawa. /13/ SÝKORA, K. : Technická měření ve strojnictví. VŠST Liberec, skripta SNTL Praha 1965 /14/ AN : Technologické podklady pro vstřikování n.p. Plastimat Liberec 1971. /15/ DAŠKO, N.M. - NOVIČENOK, L.N. - SPORJAGIN, E.A. : Vliv plnidel na tepelnou vodivost polyetyleny. Plastičeskije massy 1970/11.str.45. /16/ ABRAMOV, V.V. - KANAVEC, I.F. : Změna teploty taveniny při výtoku z trysky vstřikovacího lisu. Plastičeskije massy 1968/4 str. 43.			

VŠST Liberec		DP - ST 1015/73
Fakulta strojní		KTM str. 67
/17/ MATĚJČEK, A. : Příspěvek k řešení nestacionárního chlazení desek z plastické hmoty. Disertační práce. VÚ SPL Pardubice. /18/ VERNER, P. : Vliv teploty vyjímání výrobků z formy na deformaci. Odborná práce VŠST Liberec 1972 /19/ POMOGAJLO, A.D. - KECTELMAN, N.J. : Vliv plnidel na některé vlastnosti tekutého PVC. Plastičeskije massy 1970/7, str. 35. /20/ HUBL, - ŠVÉDA, V. : Měření teploty a tlaku ve šnekových vstřikovacích strojích. Plastické hmoty a kaučuk 1963/10, str. 300. /21/ CVEJN, J. : Diplomová práce DP - ST 964/72 VŠST Liberec 1972. /22/ SÝKORA, K. : Základy sdílení tepla. VŠST Liberec, skripta SNTL 1959. /23/ HARTIG, O. : Zum bestimmung der Zykluszeit beim sprützgiessen amorpher Termoplaste I. Plaste und Kaučuk 1969/16. str. 42.- 46. /24/ KONDRATĚV, A.N. : Tepelný regulární režim. GITL, Moskva 1954.		

10. Přílohy

Cejchovní křivka termočlánku Fe - Ko.

VŠST Liberec		DP - ST 1015/73	
Fakulta strojní		KTM	str. 69

MATERIÁL : PE-PLNĚNÝ BŘIDLICÍ
CEJCH : 7,49 mV $\hat{=}$ 100 mm

Vzorek záznamu z oscilografu.