

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské metalurgie

Školní rok: 1992/93

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro Martinu N A D R C H A L O V O U

obor strojírenská technologie

Vedoucí katedry Vám ve smyslu zákona č. 172/1990 Sb. o vysokých školách určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu: Sledování teplotních polí po odlití v systému odlitek tvaru desky - litinová forma.

Zásady pro vypracování:

1. Prostudujte problematiku tepelných dějů v soustavě odlitek - forma a seznáňte se s metodami stanovení součinitele tepelné akumulace, popř. tepelné a teplotní vodivosti formy s ohledem na odlitek tvaru desky
2. Proveďte odlití vybraných slévárenských slitin do litinové formy, která je k dispozici na KSM. Zjistěte průběh teplot v odlitku a ve formě.
3. Stanovte součinitele tepelné akumulace a teplotní vodivosti formy v závislosti na druhu odlévaného kovu - porovnejte výsledky odlévání do litinové a pískové formy.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky a formulujte závěry.

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ
Ústřední knihovna
LIBEREC 1, STUDENTSKÁ 8
PSC 461 17

V 28 / 93 S

KSM / SM

Rozsah grafických prací:

Rozsah průvodní zprávy: cca 50 stran

Seznam odborné literatury:

/1/ EXNER, J.: Slévárenství XXIII, 1975, č. 9 s. 372.

/2/ HAVLÍČEK, F.: Kapitoly z teplofyziky odlitku a formy. /Skripta/.
VŠB Ostrava, 1970.

/3/ HAVLÍČEK, F. - ELBEL, T.: Slévárenství XVII, 1969, č. 9, s. 366.

/4/ GEDEONOVÁ, Z.: Slévárenství XXV, 1977, č. 2, s. 61.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Iva Nová, CSc.

Konzultant:

Zadání diplomové práce: 5. 10. 1992

Termín odevzdání diplomové práce: 28. 5. 1993



Prof. Ing. Jaroslav Exner, CSc.
Vedoucí katedry

Prof. Ing. Jaroslav Exner, CSc.
Děkan

V Liberci

dne 5. 11. 1992

Vysoká škola strojní a textilní v Liberci
Fakulta strojní



Martina Nadrchalová

**SLEDOVÁNÍ TEPLOTNÍCH POLÍ PO ODLITÍ V SYSTÉMU
ODLITEK TVARU DESKY - LITINOVÁ FORMA**

Diplomová práce

1993

Vysoká škola strojní a textilní v Liberci
Fakulta strojní

Obor 23 - 07 - 8
strojírenská technologie

zaměření
strojírenská metalurgie

Katedra strojírenské metalurgie

SLEDOVÁNÍ TEPLOTNÍCH POLÍ
PO ODLITÍ V SYSTÉMU ODLITEK
TVARU DESKY - LITINOVÁ FORMA

Martina N a d r c h a l o v á

KSM - 421

Vedoucí diplomové práce: Ing. Iva Nová, CSc
VŠST Liberec

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 102
Počet tabulek: 18
Počet obrázků: 28
Počet příloh: 8
Počet výkresů: -

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



3146075781

28. května 1993

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

V Liberci, dne 28.5.1993

Raděchová

OBSAH

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLU	str. 6
1. ÚVOD	8
2. TEORETICKÁ ČÁST.....	10
2.1 TEPELNĚ-FYZIKÁLNÍ VELIČINY SLÉVÁRENSKÝCH FOREM	10
2.1.1 Součinitel tepelné akumulace slévárenských forem	11
2.1.1.1 Metody určení součinitele tepelné akumulace formy	12
2.1.1.2 Stanovení b_F z teplotního pole formy	14
2.1.1.3 Stanovení b_F ze zkoušky odlévání	18
2.1.2 Součinitel tepelné vodivosti slévárenských forem	20
2.1.3 Měrné teplo materiálu slévárenských forem	22
2.1.4 Součinitel teplotní vodivosti	23
2.2 TEPELNÉ POCHODY V SOUSTAVĚ ODLITEK - FORMA	24
2.2.1 Přestup tepla na hranici odlitek - forma	25
2.2.2 Přestup tepla v soustavě odlitek - mezera - forma	28
2.2.2.1 Vznik a růst spáry mezi odlitkem a formou	30
2.2.3 Sdílení tepla uvnitř tělesa	32
2.2.3.1 Vliv různých faktorů na tvorbu teplotního pole	34
2.3 MATERIÁLY KOVOVÝCH SLÉVÁRENSKÝCH FOREM	35
2.3.1 Růst litiny při jejím ohřívání	37

2.4	MĚŘENÍ TEPLoty PŘI TUHNUTÍ A CHLADNUTÍ ODLITKU	38
2.4.1	Požadavky kladené na materiál termočlánků	39
2.4.2	Termoelektrické články	39
2.5	SLÉVÁRENSKÉ SLITINY	40
2.5.1	Čistý hliník	42
2.5.2	Čistý zinek	43
2.5.3	Čisté olovo	44
2.5.4	Krystalizace čistých kovů	45
2.5.4.1	Křivka chlazení čistého kovu	46
2.5.4.2	Mechanismus krystalizace čistého kovu ve formě	47
3.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	50
3.1	POPIS POUŽITÉHO MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ.....	50
3.2	POUŽITÉ SLÉVÁRENSKÉ FORMY	52
3.2.1	Metalografické hodnocení materiálu liti- nové kokily	52
3.3	POUŽITÉ SLÉVÁRENSKÉ SLITINY	53
3.4	MĚŘENÍ TEPLoty	55
3.5	POPIS MĚŘENÍ TEPLOTNÍHO POLE SLÉVÁRENSKÉ FORMY	56
3.5.1	Hlavní část experimentů	56
3.5.2	Srovnávací část experimentů	60
3.6	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ A STANOVENÍ HODNOT TEPELNĚ-FYZIKÁLNÍCH VELIČIN SLÉVÁ- RENSKÉ FORMY	60
3.6.1	Stanovení stupně paraboly	61
3.6.2	Stanovení součinitele tepelné akumulace slévárenské formy	68

3.6.3	Stanovení tepelné vodivosti slévárenské formy	69
3.6.4	Stanovení měrného tepla slévárenské formy	71
3.6.5	Stanovení teplotní vodivosti slévárenské formy	72
3.7	SHRNUTÍ ZÍSKANÝCH HODNOT TEPELNĚ-FYZI- KÁLNÍCH VELIČIN	75
3.7.1	Hodnoty b_F	81
3.7.2	Hodnoty λ_F, c_F, a_F	82
4.	DISKUSE VÝSLEDKŮ	85
5.	ZÁVĚR	95
6.	SEZNAM LITERATURY	99
7.	PŘÍLOHA	102

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

Bi_1	- Biotovo kritérium odlitku	
ΔG	- rozdíl volné entalpie	[J]
G	- teplotní gradient	[°C, K]
K	- tepelné kritérium	
L_c	- celkové latentní teplo	[J.kg ⁻¹]
L_{KR}	- latentní krystalizační teplo	[J.kg ⁻¹]
$M(X_1)$	- charakteristický rozměr odlitku (modul)	[m]
Q_{AK}	- teplo akumulované formou	[J]
Q_o	- teplo uvolněné odlitkem	[J]
Q_{PR}	- teplo prošlé rozhraním odlitek - forma	[J]
S_o	- styčný povrch odlitku a formy	[m ²]
T_F	- počáteční teplota formy	[°C, K]
T_i	- teplota i-tého bodu	[°C, K]
T_{KR}	- teplota krystalizace odlévané slitiny	[°C, K]
T_{OP}	- teplota okolního prostředí	[°C, K]
ΔT_{Pr}	- přehřátí taveniny	[°C, K]
T_{PR}	- teplota na rozhraní odlitek-forma	[°C, K]
T_l	- teplota tání	[°C, K]
X_1	- charakteristický rozměr odlitku	[m]
X_2	- tloušťka prohřáté vrstvy formy	[m]
a_F	- součinitel teplotní vodivosti	[m ² .s ⁻¹]
b_F	- součinitel tepelné akumulace formy	[W.s ^{1/2} .m ⁻² .K ⁻¹]
c_p	- měrné teplo za stálého tlaku	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
c_F	- měrné teplo formy	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
c_{le}	- měrné teplo pro tekutý stav	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
k	- konstanta tuhnutí	[m.s ^{-1/2}]
l	- rozměry tělesa	[m]
n	- výsledný stupeň paraboly	
t	- čas	[s]

t_{tuh}	- doba tuhnutí	[s]
x_1	- rozměr v odlitku	[m]
x_i	- vzdálenost i-tého místa formy	[m]
x_m	- šířka mezery	[m]
x_n	- šířka nátěru	[m]
x_{ox}	- šířka vrstvy oxidů	[m]
x_g	- šířka plynové metody	[m]
x, y, z	- kartézské souřadnice	[m]
w	- rychlost proudění taveniny	[m.s ⁻¹]
θ_i	- teplota i-tého místa formy	[°C, K]
$\theta_{KR}(T_{ef})$	- efektivní teplota	[°C, K]
α_d	- součinitel přestupu dotykem	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
α_p	- součinitel přestupu tepla	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
α	- konstanta	
β	- konstanta	
β	- součtový součinitel přestupu tepla	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
τ	- konstanta	
δ	- tloušťka, přes kterou teplo prochází	[m]
ρ_F	- hustota formy	[kg.m ⁻³]
ρ_M	- hustota materiálu odlitku	[kg.m ⁻³]
λ_F	- koef. tepelné vodivosti formy	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
λ	- celková tepelná vodivost	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
λ_e	- tepelná vodivost volnými elektrony	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
λ_m	- tepelná vodivost mřížky	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
λ_{ox}	- tepelná vodivost vrstvy oxidů	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
λ_n	- tepel. vodivost vrstvy ochran. nátěru	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
λ_p	- tepelná vodivost plynů v mezeře	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
ν	- kinematická viskozita	[m ² .s ⁻¹]
ψ	- tvar ohřívaného tělesa	-
ξ	- tloušťka ztuhlé vrstvy	[m]

1. ÚVOD

V poslední době stále více vystupují do popředí otázky spojené s řešením tuhnutí a chladnutí odlitků, a to jak s ohledem na automatizaci slévárenské výroby, tak i na výrobu těžkých odlitků. Ty mají vliv na zvyšování výrobní kapacity sléváren, na konstrukci automatických linek a konečně i na jakost odlitku samotného. Objasnění zákonů tuhnutí a chladnutí odlitku spočívá ve studiu tepelně-fyzikálních dějů v odlitku, ve formě a na jejich rozhraní.

Mechanismus těchto dějů je však velmi složitý a zahrnuje řadu specifických jevů, které závisí na charakteru zvolené technologie. Za společného činitele pro většinu dílčích jevů a reakcí, z čehož tedy plyne, že se jedná o rozhodující faktor, považujeme tepelné podmínky v soustavě odlitek - forma. Vede nás k tomu fakt, že právě tyto tepelné podmínky určují výsledné vlastnosti odlitku, které jsou žádoucí pro další zpracování. Tepelné podmínky vlastně charakterizují tuhnutí a chladnutí odlitku, tj. období kdy se vytváří vlastnosti odlitku. Jedná se tedy o nestacionární děj v nerovnovážných soustavách, kdy rozhodujícím činitelem je přenos energie provázený fázovými přeměnami nebo případně i chemickými reakcemi.

Hodnoty tepelně-fyzikálních veličin slévárenských forem jsou poměrně málo literárně uváděné. Větší pozornost byla doposud věnována pískovým formám. Vzhledem ke stále většímu použití kovových forem je však nutno provést měření i na nich.

A právě experimenty této práce, která je psána na téma: "Sledování teplotních polí po odlití v soustavě odlitek tvaru

desky - litinová forma" a je součástí výzkumu prováděného na KSM VŠST, mají přispět k získání dílčích informací v oblasti sledování tepelně-fyzikálních vlastností kovových forem.

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1 TEPELNĚ - FYZIKÁLNÍ VELIČINY SLÉVÁRENSKÝCH FOREM

Jedním z rozhodujících činitelů pro utváření výsledných vlastností odlitku jsou tepelné podmínky v soustavě odlitek - forma v průběhu jeho tuhnutí a chladnutí. Pro řízení těchto podmínek je nutno znát některé tepelně-fyzikální vlastnosti formy:

a/ vlastnosti odvozené podle teorie přestupu tepla

1. součinitel tepelné akumulace slévárenské formy

$$b_F \quad [W.s^{1/2}.m^{-2}.K^{-1}]$$

2. součinitel teplotní vodivosti slévárenské formy

$$a_F \quad [m^2.s^{-1}]$$

b/ základní materiálové vlastnosti

3. součinitel tepelné vodivosti slévárenské formy

$$\lambda_F \quad [W.m^{-1}.K^{-1}]$$

4. měrné teplo materiálu slévárenské formy

$$c_F \quad [J.kg^{-1}.K^{-1}]$$

Matematická formulace i fyzikální smysl definice odvozených tepelně-fyzikálních vlastností, především součinitele tepelné akumulace forem jsou poměrně jednoduché, přesto jejich stanovení pro soustavu konkrétní formy a skutečného materiálu odlitku je dosti složité, zejména vzhledem k vlivu teploty na jednotlivé fyzikální vlastnosti formy a k poměrně rychlým změnám teplotního pole formy i odlitku v rozmezí výchozí teploty formy T_F a teploty povrchu rozhraní odlitek - forma T_{PR} . EXNER [6].

2.1.1 Součinitel tepelné akumulace slévárenských forem

Studiem tepelně-fyzikálních vlastností materiálu formy lze zajistit určitou rychlost krystalizace taveniny a v souvislosti s tím i předepsané mechanické vlastnosti odlitků. Rychlost krystalizace je podmíněna velikostí součinitele akumulace tepla materiálu formy, který určíme ze vztahu:

$$b_F = \sqrt{\lambda_F \cdot c_F \cdot \rho_F} \quad , \quad (1.1)$$

kde značí λ_F - koeficient tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],

c_F - měrné teplo [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],

ρ_F - hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$].

Akumulační schopnost materiálu je množství tepla připadající na plošnou jednotku povrchu za jednotku času při rozdílu teplot rovném 1K.

Koeficient tepelné akumulace formy b_F , kterým komplexně charakterizujeme ochlazovací účinek skutečné formy vůči skutečnému odlévanému materiálu, můžeme vyjádřit schematicky jako:

$$b_F = f [\lambda_F(T); c_F(T); \rho_F(T); T(x,t)] \Big|_{T_{F0}}^{T_{PR}} \quad (2.2)$$

Je však problém stanovit přesné funkční závislosti fyzikálních veličin na teplotě (při konkrétním technologickém zpracování), a proto se používají pouze střední hodnoty základních, ale i odvozených vlastností v určitém teplotním intervalu pro konkrétní soustavu odlitek - forma.

Sledováním hodnot součinitele tepelné akumulace formy se mimo zahraničních autorů (HALBARTA, VEJNIKA, GRINKEVIČE, ANISOVIČE) zabývali i naši vědci (HAVLÍČEK, EXNER, PŘIBYL,

VETIŠKA, GEDEONOVÁ).

Tito autoři se zabývali sledováním tepelně-fyzikálních veličin především pískových forem, jen ojediněle jsou literárně uváděny hodnoty α pro kovové slévárenské formy - kokily. Avšak z těchto hodnot není často zřejmé, za jakých podmínek a pomocí jakých metod byly tyto veličiny stanoveny.

Pokud se týká hodnot pro litinové kokily, které jsou uvedeny i v příloze č.1, jsou velmi různé. Nejvyšší hodnotu uvádí VEJNÍK [25] $14\,511\text{ W}\cdot\text{s}^{1/2}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Naopak hodnoty podle PŘIBYLA [19] jsou velmi nízké, ať již uvažuje experimenty s odlitkem se spárou nebo bez spáry a téměř se podobají hodnotám u pískových forem. Hodnoty uváděné HAVLÍČEKEM [9] jsou při odévání LLG do litinové kokily kolem $5\,670\text{ W}\cdot\text{s}^{1/2}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, avšak při odlévání oceli byly zjištěny hodnoty až $6\,298\text{ W}\cdot\text{s}^{1/2}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$. Tyto hodnoty byly stanoveny metodou podle HALBARTA a jsou poměrně nízké, což HAVLÍČEK odůvodňuje tím, že tato metoda není úplně nejvhodnější pro kovové formy.

HAVLÍČKOV přínos v této oblasti výzkumu lze spatřovat v tom, že uvádí na celé řadě nejrozličnějších forem a odlévaných materiálů takto poměrně těžko dostupné hodnoty součinitele tepelné akumulace. EXNER [6] obohatil výzkum součinitele tepelné akumulace formy i ostatních tepelně-fyzikálních veličin pro odlitek tvaru válce, kdy vychází z již uvedené VEJNÍKOVY metody měření teplotního pole. (Tuto problematiku řeší ve své diplomové práci současná diplomantka Konopíková.)

2.1.1.1 Metody určení součinitele tepelné akumulace formy

Součinitel tepelné akumulace lze zjišťovat třemi způsoby:

- 1/ stanovení jednotlivých členů rovnice (2.1) - λ, ρ, c

2/ metodou elektrické analogie a numerickými metodami

3/ experimentálními metodami přímými a nepřímými

1/ Takto získaná hodnota b_f není optimální, neboť literárně uváděné veličiny λ , c , ρ neodpovídají tepelně-fyzikálním podmínkám jež probíhají na hranici odlitek - forma.

2/ Obě metody jsou velmi účinné a s jejich pomocí se dají sledovat četné problémy, které přesahují meze klasických metod. Jsou to metody pokusně velmi náročné, ale progresivní.

3/ Nejvýhodnější jsou metody přímé a z nich nejpoužívanější jsou:

- metoda odlévání, která je založena na měření doby tuhnutí zkušebního odlitku. Tuto metodu propracoval HALBART a též ji používal VEJNIK; dále byla použita v Institute of British Foundryman.

- vylévací zkoušky, je to jedna z nejstarších slévárenských pokusných metod. Její princip je založen na měření tloušťky ztuhlého kovu, která se vytvořila na povrchu odlitku do okamžiku otočení formy. Tloušťku ztuhlé vrstvy vyjádříme vztahem:

$$\xi = k \cdot \sqrt{t} \quad [\text{m}] \quad , \quad (2.3)$$

kde značí k - konstantu tuhnutí [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1/2}$],

t - dobu tuhnutí vrstvy odlitku [s].

Tato metoda byla základem práce CHVORINOVA.

- metoda natuhávání kovu na vzorku byla propracována TARASUTINEM. Metoda je založena na ponořování vzorků z různých formovacích materiálů do taveniny a ve vytažení po

dané době, za kterou natuhne na vzorku určitá vrstva kovu.

- kalorimetrickou metodu propracoval VETIŠKA [30] a pomocí ní zjišťujeme přímo množství tepla přijaté formovacím materiálem.

- metoda měření teplotního pole odlitku a formy spočívá ve zjišťování doby tuhnutí a teplotního pole v odlitku při současném stanovení teplotního pole formy. Byla rozpracována ANISOVIČEM, GRINKEVIČEM i VEJNIKEM [3,25]. Dovoluje stanovit kromě součinitele tepelné akumulace formy i ostatní tepelně-fyzikální vlastnosti formy.

Ukazuje se, že platnost teoretických vztahů má některé zjednodušující předpoklady, které mohou přesnost zjišťování určitým způsobem ovlivnit. Někteří autoři sami kriticky k těmto okolnostem pokusů přihlížejí a poukazují na menší přesnost výsledků.

2.1.1.2 Stanovení br z teplotního pole formy

Tato metoda je založena na experimentálním zjištění teplotního pole ve slévárenské formě v okamžiku ztuhnutí odlitku.

Metodu rozpracovali ANISOVIČ a GRINKEVIČ [3] i VEJNIK [25] a je založena na nahrazení teplotního pole ve formě známou funkcí - parabolou n -tého stupně (řádu) nebo sinusovkou. Autoři vychází při odvození z tepelné bilance mezi odlitkem a formou, kdy uvažují, že teplo uvolněné odlitkem Q_0 , projde rozhraním mezi odlitkem a formou (Q_{PR}) a je akumulováno slévárenskou formou Q_{AK} (Q_F), což lze schematicky zapsat:

$$Q_0 = Q_{PR} = Q_{AK} (Q_F) , \quad (2.4)$$

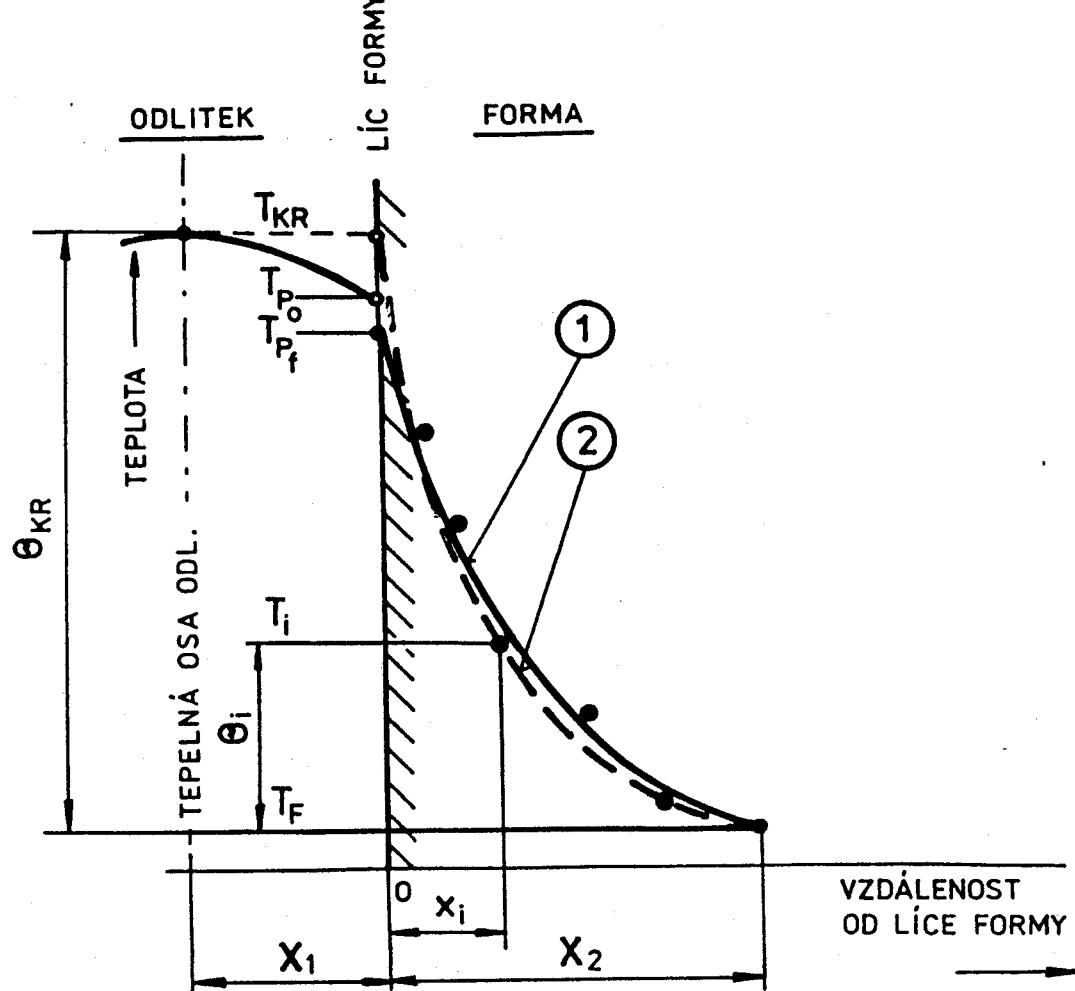
kde značí Q_0 - teplo uvolněné odlitkem,
 Q_{PR} - teplo prošlé rozhraním odlitek - forma,
 $Q_{AK} (Q_F)$ - teplo akumulované formou.

Odvození rozložení teplot ve slévárenské formě v okamžiku ztuhnutí odlitku je uvedeno na obr.2.1., (kde VEJNÍK [27] uvažuje pískovou formu). Z tohoto obrázku je patrné, že nahrazená parabola má vrchol v bodě $[X_2, T_F]$, prochází měrným bodem $[x_1, T_1]$ a bodem $[0, T_{KR}]$. Na základě teplotních a geometrických poměrů lze stanovit následující závislost:

$$\Theta_i = \Theta_{KR} \cdot \left(1 - \frac{x_1}{X_2} \right)^n , \quad (2.5)$$

kde značí Θ_i - teplotu i-tého místa slévárenské formy vztaženou k výchozí teplotě formy $[^{\circ}\text{C}]$,
 Θ_{KR} - efektivní teplotu, tj. rozdíl mezi teplotou krystalizace odlévaného kovu a výchozí teplotou slév. formy $[^{\circ}\text{C}]$,
 x_1 - vzdálenost i-tého místa ve slévárenské formě od jejího líce $[\text{m}]$,
 X_2 - tloušťku prohřáté vrstvy slévárenské formy v okamžiku ztuhnutí odlitku $[\text{m}]$,
 n - výsledný stupeň paraboly (rozložení teplot ve formě v okamžiku ztuhnutí odlitku) formy.

Ze vztahu (2.5) lze odvodit rovnici pro stanovení dílčího stupně paraboly:



1 - hodnoty naměřené $\Theta_{KR} = T_{KR} - T_F$

2 - hodnoty vypočítané $\Theta_i = T_i - T_F$

T_{Po} - teplota povrchu odlitku

T_{Pf} - teplota povrchu formy

T_F - počáteční teplota formy

T_i - teplota i-tého bodu formy

T_{KR} - teplota krystalizace odlévané slitiny

X_1 - charakteristický rozměr odlitku

X_2 - tloušťka prohřáté vrstvy formy v okamžiku ztuhnutí

x_i - vzdálenost i-tého místa formy

Obr.2.1. Schema průběhu teplotního pole ve slévárenské formě a odlitku podle VEJNIKA [24].

$$n_1 = \frac{\log(T_1 - T_F) - \log(T_{KR} - T_F)}{\log\left(1 - \frac{x_1}{x_2}\right)} \quad (2.6)$$

Význam symbolů je uveden v předchozí části práce.

Výsledný stupeň paraboly lze potom stanovit na základě geometrického průměru dílčích stupňů paraboly:

$$n = \sqrt[n]{n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \dots n_m} \quad (2.7)$$

Při odvození vztahu pro určení b_F (i pro určení ostatních tepelně-fyzikálních veličin) vychází VEJNÍK [27] pro určení množství tepla při tuhnutí odlitku z tepla přehřátí a z tepla uvolněného krystalizací odlitku $Q_0 = Q_{PF} + Q_{KR}$. Toto teplo akumuluje slévárenská forma a lze tedy psát, že :

$$Q_0 = Q_{AK} = Q_F = \frac{1}{n+1} S_0 \cdot x_2 \cdot \rho_F \cdot c_F \cdot \Theta_{KR} \quad (2.8)$$

kde značí S_0 - styčný povrch odlitku a formy [m^2],

ρ_F - hustotu [$kg \cdot m^{-3}$],

c_F - měrné teplo formy [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$],

Θ_{KR} - efektivní teplotu [$^{\circ}C$].

Po poměrně složitých matematických úpravách lze ještě pomocí obr.2.1. a akumulovaného tepla slévárenskou formou odvodit vztah pro $x_2 = \sqrt{2n \cdot (n+1) \cdot a_F \cdot t_{tuh}}$; a_F je teplotní vodivost slév. formy a t_{tuh} je celková doba tuhnutí odlitku. Dosazením této rovnice do rovnice (2.8) lze získat vztah (2.9.):

$$Q_{AK} = \frac{1}{n+1} \cdot S_0 \cdot \rho_F \cdot c_F \cdot \Theta_{KR} \cdot \sqrt{2 \cdot n \cdot (n+1) \cdot \frac{\lambda_F}{c_F \cdot \rho_F} \cdot t_{tuh}},$$

kde značí λ_F - tepelnou vodivost slév. formy $[W.m^{-1}.K^{-1}]$,

t_{tuh} - celkový čas tuhnutí odlitku [s].

Dosadíme-li za teplo uvolněné odlitkem; získáme vztah:

$$Q_0 = S_0 \cdot X_1 \cdot \rho_M \cdot [c_M \cdot \Delta T_{Pr} + L_{KR}], \quad (2.10)$$

kde značí: $X_1(M)$ - charakteristický rozměr odlitku

(u desky modul M) [m],

c_M - měrné teplo odlévané taveniny

$[J.kg^{-1}.K^{-1}]$,

ΔT_{Pr} - přehřátí odlévané taveniny $[^{\circ}C]$,

L_{KR} - latentní krystalizační teplo odlévané

taveniny $[J.kg^{-1}]$.

Teplo, uvedené v rovnici (2.10) akumuluje slév. forma, a toto teplo je rovno teplu uvedenému v rovnici (2.9). Po matematických úpravách získáváme rovnici, kterou v podstatě uvádí VEJNÍK i ANISOVIČ (oni u pískových forem neuvažují přehřátí taveniny). Pro odlitek tvaru desky platí:

$$b_F = \sqrt{\frac{n+1}{2n}} \cdot \frac{M \cdot \rho_M \cdot L_c}{\Theta_{KR} \cdot \sqrt{t_{tuh}}} \quad (2.11)$$

Význam jednotlivých symbolů je patrný z předchozí části práce.

Podobným způsobem jsou odvozeny i ostatní tepelně-fyzikální veličiny uvedené v další části práce.

2.1.1.3 Stanovení b_F ze zkoušky odlévání

Z této metody vychází HALBART [11] a při výpočtu uvažuje tepelnou bilanci mezi odlitkem a formou při současné úvaze šíření tepla v jednom směru v homogenním izotropním těle-

se, které charakterizuje jednoduchá, obecně známá, Fourierova rovnice. Přitom se vychází z tepelného toku prošlého za dobu tuhnutí odlitku t_{tuh} jednotkou plochy tenké vrstvy formy na hranici s odlitkem. Po matematických úpravách lze získat rovnici pro celkové teplo ve slév. formě:

$$Q = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot T_{\text{PR}} \cdot b_{\text{F}} \cdot \sqrt{t_{\text{tuh}}} \cdot S_0 \quad , \quad (2.12)$$

kde značí T_{PR} - teplotu na rozhraní odlitek - forma [$^{\circ}\text{C}$].

Podobně jako u metody VEJNIKA (měření teplotních polí) lze stanovit množství tepla uvolněného odlitkem a dosazením do rovnice (2.12) lze získat součinitel tepelné akumulace formy dle HALBARTA při odlévání odlitku tvaru desky:

$$b_{\text{F}} = \frac{\sqrt{\pi} \cdot M \cdot \rho_{\text{M}} \cdot L_{\text{c}}}{2 \cdot T_{\text{PR}} \cdot \sqrt{t_{\text{tuh}}}} \quad (2.13)$$

Význam symbolů byl již dříve uveden.

Použitelnost vztahů (2.11) a (2.13) vychází z omezujících předpokladů:

1. Slévárenská forma i odlitek jsou izotropní homogenní tělesa.
2. Teplota na rozhraní odlitek - forma, resp. efektivní teplota, je konst. během celé doby lití.
3. Hodnoty fyzikálních veličin taveniny, tzn. L_{KR} , ρ_{M} , c_{M} uvažujeme během celé doby experimentu konstantní.
4. Slitina nevykazuje interval teplot tuhnutí.
5. Čas odlévání je velmi malý ; $T \rightarrow 0$. $\underline{t} \rightarrow 0$
6. Odvod tepla přehřátí a krystalizace probíhá současně.
7. Vzniklá mezera neovlivňuje příliš tepelné poměry mezi od-

litkem a formou.

Závěrem této části práce je důležité se zmínit o významu efektivní teploty, resp. teploty rozhraní. Jak je z příslušných uvedených vztahů zřejmé, menší hodnoty těchto teplot vedou k růstu vyšších hodnot tepelně-fyzikálních veličin slévárenských forem.

Stanovení této teploty u kovových forem je poměrně náročné. U pískových forem, které tvoří celkem plochý příčný gradient v odlitku, uvažuje VEJNÍK i někteří další autoři, že tato teplota je blízká teplotě krystalizace odlévaného kovu. Proto VEJNÍK efektivní teplotu u pískových forem stanovuje jako rozdíl teploty krystalizace odlévaného kovu a počáteční teploty formy. Tuto hodnotu uvádí i ve své publikaci [24] a pravděpodobně by ji použil při výpočtu br u kovových forem, ale to není z této publikace zřejmé.

Naproti tomu ANISOVIČ [2] uvádí teplotu rozhraní u kovových forem $(0.5 - 0.7)T_{KR}$ odlévané slitiny.

Jak uvádí ve své diplomové práci NÉMETHOVÁ [15], poměrně složitým způsobem byla stanovena teplota na rozhraní $(0.7 - 0.75)T_{KR}$.

Všechny tyto úvahy budou využity v experimentální části mé práce.

2.1.2 Součinitel tepelné vodivosti slévárenských forem

S tepelnou vodivostí počítáme při vedení tepla v tekutém a pevném odlitku, ve formě i v mezeře při přestupu tepla z odlitku do formy. Z toho plyne jeho velký význam při studiu podmínek tuhnutí i při vzniku napětí a různých vad v odlitku při jeho chladnutí.

Součinitel tepelné vodivosti lze stanovit na základě tepelného toku sledovaným materiálem:

$$\lambda = \frac{Q \cdot \delta}{S \cdot t \cdot (T_1 - T_2)} \quad , \quad (2.14)$$

kde značí Q - množství tepla proteklé za dobu t [J],

S - plochu, přes kterou teplo prochází [m^2],

δ - tloušťku desky, kterou teplo prochází

(vzdálenost dvou pozorovaných míst) [m],

dT - teplotní rozdíl [$^{\circ}C$],

t - čas průchodu [s].

HAVLÍČEK [11] uvádí, že pro většinu látek se tepelná vodivost mění mírně s teplotou podle lineární závislosti. Naopak podle SEDLÁČKA [21] tato závislost nikdy lineární není.

Tepelná vodivost u kovů je vyvolána vodivostí prostorové mřížky pevného kovu a tepelnými vibracemi volných elektronů; lze proto napsat:

$$\lambda = \lambda_m + \lambda_e \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad , \quad (2.15)$$

kde značí λ - celkovou tepelnou vodivost kovu,

λ_m - tepelnou vodivost mřížky,

λ_e - tepelnou vodivost volnými elektrony.

Pokusy bylo prokázáno:

$$\lambda_e \gg \lambda_m \quad .$$

SEDLÁČEK [21] uvádí vzájemnou souvislost mezi tepelnou a elektrickou vodivostí dle tzv. Lorentzova čísla. Výzkumy ukazují, že příspěvek tepelných kmitů mřížek je pro tepelnou vodivost kovů malý nebo přímo zanedbatelný.

Tepelná vodivost čistých kovů je vždy vyšší než u slitin. Vysvětluje se to určitou nehomogenitou v krystalické mřížce vlivem přítomnosti cizích atomů, které ruší pravidelnost mřížky a stěžují přenášení energie.

Z fyzikálního hlediska s rostoucí teplotou tepelná vodivost klesá, to ale neplatí úplně obecně.

Pro slévarenskou formu, na základě měření teplotních polí v okamžiku ztuhnutí odlitku tvaru desky, stanovil VEJNIK součinitel tepelné vodivosti:

$$\lambda_F = \frac{M \cdot X_2 \cdot \rho_M \cdot L_c}{2 \cdot n \cdot \Theta_{KR} \cdot t_{tuh}} \quad (2.16)$$

Význam použitých symbolů byl vysvětlen v předchozí části práce.

2.1.3 Měrné teplo materiálu slévarenských forem

Měrné teplo je definováno jako množství tepla potřebné pro ohřátí hmotnostní jednotky látky o 1K.

Měrné teplo vyjadřuje energii, kterou mřížka odebírá z teplejšího okolí. Důsledkem je vzrůst teploty a s ním spojená změna tepelných kmitů atomů i chování vodivostních elektronů.

Měrné teplo je funkcí teploty podle vztahu:

$$c = \alpha + \beta \cdot T + \gamma \cdot T^2 \quad , \quad (2.17)$$

kde značí α, β, γ - konstanty.

Obecně platí, že se měrné teplo látek s rostoucí teplotou zvyšuje. Měrná tepla pro pevný stav a tekutý stav jsou (při teplotě tavení) ve vztahu:

$$c_{te} - c = \frac{L_t}{T_t} \quad , \quad (2.18)$$

kde značí c - měrné teplo pro pevný stav [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$],

c_{te} - měrné teplo pro tekutý stav [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$],

L_t - skupenské teplo tání [$J \cdot kg^{-1}$],

T_t - teplota tání [$^{\circ}C$].

VEJNIK definuje měrné teplo materiálu slévarenské formy

pro odlitek tvaru desky:

$$c_r = (n+1) \cdot \frac{M \cdot \rho_M \cdot L_c}{X_2 \cdot \rho_F \cdot \Theta_{KR}} \quad (2.19)$$

Symbole použité ve vztahu jsou uvedeny již v předchozí části.

2.1.4 Součinitel teplotní vodivosti

Při neustáleném přenosu tepla počítáme se součinitelem teplotní vodivosti:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad (2.20)$$

kde značí a - součinitel teplotní vodivosti [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$],

c - měrné teplo při stálém tlaku [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],

ρ - hustotu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

λ - součinitel tepelné vodivosti [$\text{J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$].

Neustálenost tepelných jevů se vyznačuje změnou teplotního pole a tepelného obsahu s časem. Rychlost změny tepelných dějů v tělese je přímo úměrná tepelné vodivosti a nepřímo úměrná akumulární schopnosti, tj. objemovému měrnému teplu $c \cdot \rho$. Závislost těchto veličin vyjadřuje teplotní vodivost. Její význam je v tom případě stejný jako význam tepelné vodivosti při dějích ustálených. Vyjadřuje v podstatě charakteristickou vlastnost látky vyrovnávat teplotu. Čím vyšší je teplotní vodivost látky, tím rychleji se v ní (v podmínkách nestacionárního procesu) vyrovnávají teploty.

Součinitel teplotní vodivosti klesá se zvyšující se teplotou; to lze objasnit poklesem tepelné vodivosti a vzestupem měrného tepla s teplotou.

VEJNIK ve svých pracích popisuje součinitel teplotní vodivosti slévárenské formy při odlévání desky vztahem:

$$\alpha_F = \frac{X_2^2}{2 \cdot n \cdot (n+1) \cdot t_{\text{tuh}}} \quad (2.21)$$

Význam symbolů je uveden v předchozí části práce.

2.2 TEPELNÉ POCHODY V SOUSTAVĚ ODLITEK - FORMA

Při styku formy s tekutým kovem dochází k odvodu tepla z kovu do formy, její teplota stoupá a teplota kovu klesá. Klesne-li teplota kovu na teplotu tuhnutí, nastává přechod kovu ze skupenství kapalného do skupenství tuhého postupně od stěny formy směrem k tepelné ose odlitku. Čím rychleji odvádí forma z kovu teplo, tím rychleji probíhá v kovu krystalizační pochod, což se výrazně projeví na charakteru krystalizace, a tím na vlastnostech odlitku. Protože rychlost odvodu tepla z kovu je závislá na tepelně-fyzikálních vlastnostech formy, plyne z toho závěr, že rychlost tuhnutí odlitku je limitována tepelně-fyzikálními a geometrickými vlastnostmi formy.

Podmínky pro přestup tepla z kovu do formy během odlévání, tuhnutí a chladnutí odlitku se neustále mění; při odlévání formy se uskutečňuje přechod tepla z kovu do formy bezprostředně stykem tekoucího kovu se stěnami formy. Po odlití formy trvá určitou dobu ještě bezprostřední styk tekutého kovu se stěnami formy, ovšem s tím rozdílem, že kov je v klidu.

Po vytvoření vrstvy tuhého kovu u stěny formy se mění podmínky pro přestup tepla z odlitku do formy, protože se stěnami formy se stýká již vrstva ztuhlého kovu. Odvod tepla z tekutého kovu do formy probíhá přes ztuhlou vrstvu, jejíž tloušťka neustále vzrůstá.

Brzy po vytvoření vrstvy tuhého kovu se v důsledku

smršťování této tuhé vrstvy tvoří mezera mezi odlitkem a stěnami formy, takže odvod tepla z taveniny do formy se uskutečňuje jednak přes vrstvu tuhého kovu, jednak přes vzniklou mezeru. Tepelná vodivost této mezery, která je vyplněna plynem, je menší než tepelná vodivost formy a tuhého kovu, následkem čehož se sníží intenzita odvodu tepla z taveniny. Vzniklá mezera roste v závislosti na pokračujícím smršťování odlitku a její tloušťka je závislá na smrštění kovu a rozměrech odlitku. Charakter odvodu tepla z odlitku se pak až do úplného vychladnutí odlitku nemění.

Při tuhnutí a chladnutí odlitku probíhají v soustavě odlitek-forma tyto tepelné pochody:

- průtok tepla tekutým kovem,
- průtok tepla tuhým kovem,
- přestup tepla z taveniny do formy,
- přestup tepla z tuhého kovu do formy,
- přestup tepla z tuhého kovu do formy přes mezeru,
- průtok tepla formou,
- sálání tepla otevřenými nálitky [29].

2.2.1 Přestup tepla na hranici odlitek - forma

Mezi odlitkem a formou (kokilou) dochází k výměně tepla vedením (kondukcí), prouděním (konvekcí) a sáláním (radiací). Jde tedy o složitou výměnu tepla. Intenzita přestupu tepla vedením je určena hodnotou součinitele tepelné vodivosti prostředí hraniční vrstvy. Výměna tepla vedením a konvekcí probíhá v těchto podmínkách současně a označuje se souhrně jako výměna tepla dotykem. Je vyjádřena Newtonovým zákonem, podle něhož je tepelný tok součinem rozdílu teplot T a součinitele přestupu tepla dotykem α_d :

$$q_d = \alpha_d \cdot \Delta T = \alpha_d \cdot (T_p - T_{op}) , \quad (2.22)$$

kde značí T_p - teplotu povrchu odlitku [$^{\circ}\text{C}$],

T_{op} - teplotu okolního prostředí [$^{\circ}\text{C}$].

Celkové množství tepla přešlé z povrchu odlitku nebo formy vedením a konvekcí se potom vyjádří vztahem:

$$Q = \alpha_d \cdot (T_p - T_{op}) \cdot S \cdot t . \quad (2.23)$$

Z rovnice (2.40) vyplývá:

$$\alpha_d = \frac{Q}{\Delta T \cdot S \cdot t} , \quad (2.24)$$

kde značí S - plochu dotyku [m^2],

t - čas [s].

Součinitel přestupu tepla dotykem je, v případě námi uvažovaném, v podstatě veličinou složitou a v obecném vyjádření závisí na těchto činitelích:

$$\alpha_d = f (w, T_t, T_p, \lambda, c_p, \rho, \nu, \psi, l)$$

kde značí w - rychlost proudění taveniny [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

T_t - teplotu taveniny [$^{\circ}\text{C}$],

T_p - teplotu povrchu tělesa [$^{\circ}\text{C}$],

λ - tepelnou vodivost [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],

c_p - měrné teplo za stálého tlaku [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],

ρ - hustotu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

ν - kinematickou viskozitu [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$],

l - rozměry tělesa [m],

ψ - tvar ohřívajícího tělesa .

Intenzita výměny tepla mezi odlitkem a formou za předpokladu jejich těsného dotyku je charakterizována bezrozměrným Biotovým kritériem odlitku, popř. formy. Biotovo kritérium odlitku je dáno poměrem:

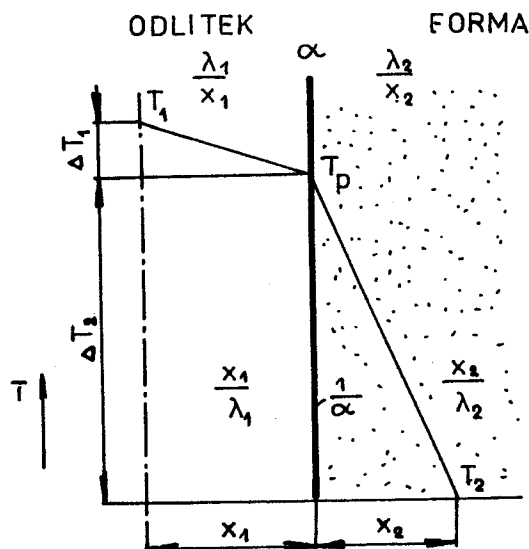
$$Bi_1 = \frac{\alpha_p}{\frac{\lambda_1}{x_1}} = \frac{\alpha_p}{\lambda_1} x_1, \quad (2.25)$$

kde značí Bi_1 - Biotovo kritérium odlitku ,

α_p - součinitel přestupu tepla [$J.m^{-2}.s^{-1}.K^{-1}$],

λ_1 - tepelnou vodivost odlitku [$W.m^{-1}.K^{-1}$],

x_1 - rozměr v odlitku [m].



Obr. 2.2. Schema rozložení teplot při přestupu tepla z odlitku do formy při těsném dotyku [5].

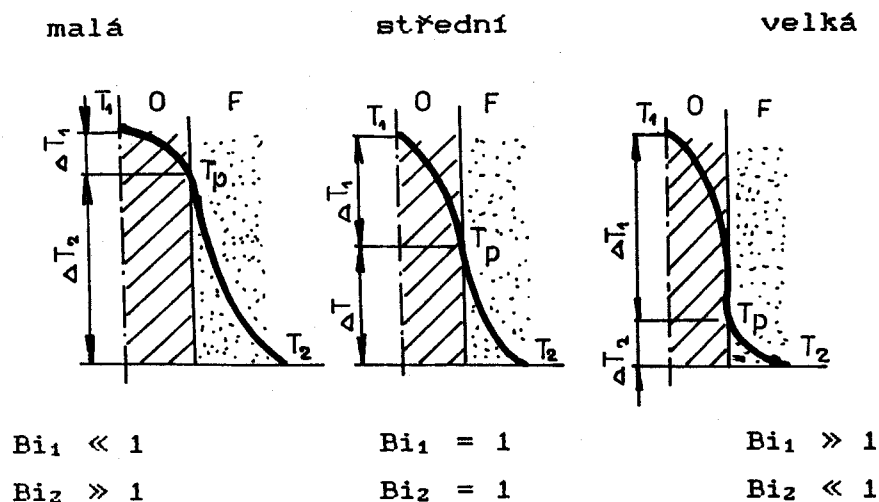
Biotovo kritérium odlitku je současně určeno poměrem teplotních rozdílů (heterogenitou teplotního pole) v odlitku s ΔT_1 a ve formě ΔT_2 :

$$Bi_1 = \frac{T_1 - T_p}{T_p - T_2} = \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}. \quad (2.26)$$

Schematicky jsou tyto poměry vyjádřeny na obr. 2.3. Je-li hodnota $Bi_1 \ll 1$, dojde k vytvoření plochého teplotního gradientu (obr. a) a naopak, je-li $Bi_1 \gg 1$, dojde v příčném průřezu odlitku k vytvoření strmého teplotního gradientu (obr. c).

V reálných podmínkách se mění hodnota Bi_1 s časem, protože

teplotní pole je nestacionární. Obdobně lze vyjádřit intenzitu ohřevu formy teplem z odlitu.



Obr.2.3. Intenzita přestupu tepla z odlitku do formy při odlévání a/ do suché pískové formy, b/ do kokily, c/ do krystalizátoru [5].

2.2.2 Přestup tepla v soustavě odlitek - mezera - forma

Při řešení přestupu tepla z odlitku do formy přes mezeru se zavádí tzv. součtový součinitel přestupu tepla β , vyjadřující tepelnou vodivost mezery (spáry). Místo Biotova kritéria se zavádějí tepelná kritéria K:

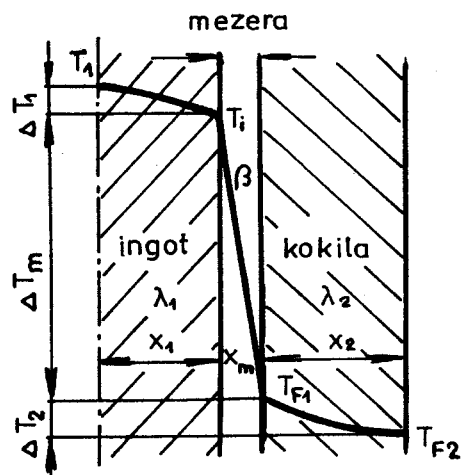
$$K_1 = \frac{\beta}{\lambda_1} = \frac{\beta}{\lambda_1} \cdot x_1 \quad \text{nebo} \quad K_1 = \frac{\Delta T_1}{\Delta T_m}, \quad (2.27)$$

$$K_2 = \frac{\beta}{\lambda_2} = \frac{\beta}{\lambda_2} \cdot x_2 \quad \text{nebo} \quad K_2 = \frac{\Delta T_2}{\Delta T_m}, \quad (2.28)$$

kde značí β - součinitel přestupu tepla mezerou [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$],
 λ_1, λ_2 - tepelnou vodivost odlitku, formy [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
 x_1 - polovinu tloušťky odlitku [m],

x_2 - šířku kokily [m],

$\Delta T_1, \Delta T_2, \Delta T_m$ - rozdíly teplot v odlitku, ve formě, v mezeře [°C].



Obr. 2.4. Schema pro určení intenzity přestupu tepla [5].

V případě na obr.2.4. jsou tepelná kritéria $K_1 < 1$, $K_2 < 1$. Intenzita ochlazování odlitku a přehřívání formy je malá; tento stav nastává při vysokých hodnotách λ_1, λ_2 a nízké hodnotě β .

Výsledný součinitel přestupu tepla mezerou je roven:

$$\beta = \frac{\lambda_{ox}}{x_{ox}} + \frac{\lambda_n}{x_n} + \frac{\lambda_p}{x_s} + \alpha_s, \quad (2.29)$$

kde výraz $\frac{\lambda_p}{x_s} \rightarrow 0$,

po úpravě
$$\beta = \frac{\lambda_m}{x_m},$$

kde značí λ_{ox} - tepelnou vodivost vrstvy oxidů [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$],

λ_n - tepelnou vodivost vrstvy ochranného nátěru,

λ_p - tepelnou vodivost plynů v mezeře,

x_{ox} - šířku vrstvy oxidů [m],

x_n - šířku nátěru [m],

x_s - šířku plynové mezery [m],

α_s - součinitel přestupu tepla sáláním
[W.m⁻².K⁻¹],

λ_m - střední tepenou vodivost mezery [W.m⁻¹.K⁻¹],

x_m - šířku mezery [m].

Hustotu tepelného toku mezi odlitkem a formou můžeme potom opět vyjádřit Newtonovou rovnicí:

$$q = \beta \cdot (T_1 - T_{f1}) \quad , \quad (2.30)$$

kde značí T_1 , T_{f1} - teploty povrchů odlitku a formy
[°C]. (obr.2.4)

Rovnice (2.30) je základní vztah pro výpočet výměny tepla při tuhnutí odlitku. Nejdůležitější je součinitel přestupu tepla β , který je funkcí času. Z rovnice (2.29) je patrné, že β je přímo závislý na tepelné vodivosti jednotlivých složek mezery a nepřímo úměrný jejich šířkám. To potvrzuje, že nejlepší přestup tepla nastává v době těsného dotyku obou těles, bez jakýchkoliv oddělovajících vrstev [5].

2.2.2.1 Vznik a růst spáry mezi odlitkem a formou

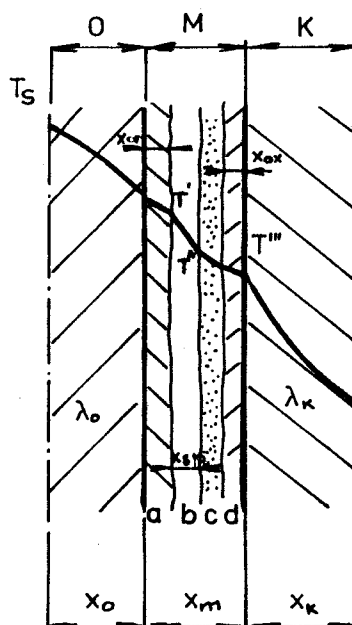
Spára je hlavní složkou mezery, jež navzájem odděluje odlitek od formy (obr.2.5). Spára vzniká za určitou dobu po odlití; její tepelný odpor je tak silný, že v okamžiku jejího vzniku dojde k dočasnému přerušení přestupu tepla z odlitku, což se projeví mírným zvýšením jeho povrchové teploty a silným poklesem vnitřního (pracovního) povrchu formy. Tím ovlivňuje spára velmi silně intenzitu výměny tepla mezi oběma tělesy, (hlavně v počátečním stádiu tuhnutí) i další děje, jako rychlost tuhnutí, dilataci, deformaci a napětí.

Za hlavní příčiny vzniku spáry lze považovat:

a/ lineární smršťování tuhnoucího odlitku,

b/ rozšiřování formy (kokily) jejím prohřátím.

Kromě toho na vznik a tloušťku spáry působí vedlejší činitele jako deformace formy, konstrukce kokily, lící teplota, rychlost lití a způsob lití, výchozí teplota formy, tloušťka nátěru a jiné.



- a - vrstva oxidů na povrchu odlitku (přestup tepla se uskutečňuje vedením)
- b - vrstva ochranného nátěru na povrchu formy (přestup tepla se uskutečňuje vedením)
- c - spára (přestup tepla se uskutečňuje tepelnou vodivostí plynu a sáláním)

Obr.2.5. Schema spáry [11].

Spára se netvoří kolem celého povrchu odlitku; vzniká pouze na plochách kolmých na podélný směr odlitku, tudíž ve směru velkého absolutního lineárního smrštění. Tato místa mohou být na svislých i vodorovných horních plochách odlitku. Na spodní ploše odlitku se tvoří spára ojediněle. Protože vznik a tloušťka spáry jsou také podstatně ovlivněny dilatací formy, vytváří se daleko snadněji u kovových forem.

Teoretický výpočet vzniku spáry je velmi složitý. Z tohoto důvodu se omezujeme pouze na empirické stanovení.

Zjištění skutečné doby vzniku spáry nemá význam pouze teoretický, ale slouží k stanovení tepelné výměny mezi oběma tělesy a je velmi důležitým údajem k určení a ovlivnění vzniku různých vad [11].

2.2.3 Sdílení tepla uvnitř tělesa

Sdílení tepla uvnitř tělesa je charakterizováno prostorovým a časovým rozdělením teploty. Matematická definice teplotního pole je:

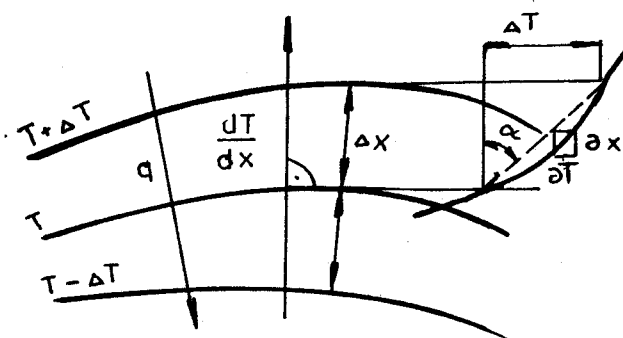
$$T = f(x, y, z, t) ,$$

kde značí T - teplotu uvažovaného bodu,

x, y, z - souřadnice uvažovaného bodu,

t - čas.

Teplotní pole lze popsat pomocí izoterm a teplotních gradientů. Izotermy jsou geometrická místa bodů se stejnými teplotami. V chladnoucím odlitku jsou nejvíce sledované izotermy s teplotami počátku a konce tuhnutí, tzv. izolikvida a izosolida.



Obr. 2.6. Schematické znázornění teplotního gradientu dT/dx a tepelného toku q [5].

Teplotní gradient G je vektor kolmý na izotermickou plochu. Je dán podílem rozdílu teplot mezi dvěma izotermami

(ΔT) a jejich vzdáleností (Δx). Platí:

$$G \sim \operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta T}{\Delta x}, \quad (2.31)$$

a v diferenciálním tvaru

$$G = \lim \left(\frac{\Delta T}{\Delta x} \right)_{x \rightarrow 0} = \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right). \quad (2.32)$$

Kladná hodnota teplotního gradientu je ve směru rostoucích teplot; teplotní gradient se záporným znaménkem se nazývá teplotní spád ($-\partial T / \partial x$) [5].

Obecně je nestacionární přestup tepla vedením vyjádřen diferenciální rovnicí, tzv. Fourierovým zákonem:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = a \cdot \nabla^2 \cdot T. \quad (2.33)$$

Někdy se mohou při řešení problémů vyskytnout kladné nebo záporné zdroje tepla (uvolnění krystalizačního tepla, vypařování vlhkosti apod.). Pak rovnice přejde do tvaru:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \nabla^2 \cdot T + \frac{L}{c \cdot \rho}, \quad (2.34)$$

kde značí T - teplotu [$^{\circ}\text{C}$],

t - čas [s],

x, y, z - kartézské souřadnice [m],

a - součinitel teplotní vodivosti [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$],

∇^2 - Laplaceův operátor,

L - množství tepla uvolněného ze zdroje nebo pohlceného za jednotku času v jednotce objemu [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$],

c - měrné teplo [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],

ρ - hustotu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$].

Řešení této rovnice je velmi náročné, je nutno znát počáteční

a okrajové podmínky, které daný děj charakterizují. Dále jsou k výpočtu potřeba geometrické a fyzikální vlastnosti popisovaného tělesa.

V podmínkách styku deskovitého odlitku a formy při polokonečných rozměrech lze uvažovat rovnici pro jednorozměrné teplotní pole:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2.35)$$

2.2.3.1 Vliv různých faktorů na tvorbu teplotního pole

Pro zhotovení kvalitního odlitku je nutno zajistit určitý stupeň heterogenity pole obou systémů (odlitek - forma). Tento stupeň ovlivňují:

- a/ vlastnosti a tvar odlitku,
- b/ vlastnosti formy,
- c/ konstrukční faktor formy.

a/ Slitiny s vyšší hodnotou měrného tepla c vytváří velkou nehomogenitu teplotního pole odlitku a naopak slitiny s nízkou hodnotou měrného tepla vytváří homogennější teplotní pole odlitku. Stejný vliv má i hustota ρ , tj. s vyšší hustotou klesá heterogenita teplotního pole. Tepelná vodivost má opačný vliv na stupeň heterogenity teplotního pole než na rychlost poklesu teploty odlitku. Vyšší hodnota tepelné vodivosti vede k vyšší teplotě na líci formy.

Teplotní pole reálných těles je deformované, tj. izotermy již nemají snahu rovnoběžně sledovat povrchy těles. Uplatňuje se zde tzv. zákon stability teplotního pole odlitku a formy; izotermy v reálných tělesech se mění s hloubkou a časem tak, že se jejich tvar blíží jednomu ze základních těles (nekonečná deska, nekonečný válec,

koule, dutý válec, dutá koule), případně v určité hloubce tento základní tvar dosáhnou. BECHNÝ [5]. Tímto zákonem se dá vysvětlit tepelný efekt hran, rohů a koutů. Od vnějších hran a rohů chladne odlitek rychleji než od stěn a forma se tu ohřívá pomaleji. Vnitřní hrany působí na teplotní pole opačně. Přiměřeně zaoblené hrany a rohy ne-deformují tolik izotermy jako ostré [20].

- b/ Vlastnosti formy ovlivňují teplotní pole nejen odlitku, ale i formy. Důležitá je zde rychlost rozvádění tepla uvnitř odlitku a odvádění tepla od povrchu odlitku do formy. Slévárenská forma je nejen vodič, ale hlavně akumulátor tepla. PŘIBYL [20]. Akumulační schopnost formy ovlivňuje stupeň heterogenity teplotního pole odlitku; vysoká hodnota součinitelů tepelné vodivosti slévárenské formy vede k rychlejšímu chladnutí odlitku a tím k většímu stupni heterogenity teplotního pole odlitku.
- c/ Zde hraje důležitou roli velikost slévárenské formy, respektive její hmotnost a tloušťka stěny v porovnání s velikostí odlitku, která ovlivňuje tepelné poměry v soustavě odlitek - forma.

2.3 MATERIÁLY KOVOVÝCH SLÉVÁRENSKÝCH FOREM

Slévárenské kovové formy - kokily mají široké uplatnění při zhotovování odlitků, od kterých se vyžadují vyšší mechanické vlastnosti. Při použití těchto forem je důležité kritérium jejich životnosti, která závisí na materiálu kokil a tím i na schopnosti odolávat jejich tepelnému, mechanickému i chemickému namáhání. Z tohoto hlediska je důležitá jejich pracovní teplota, která ovlivňuje tuhnutí a chladnutí odlitku.

Povrch pracovní části - líc kokily podléhá při styku s roztaveným kovem tepelnému namáhání - tepelné únavě, proto je nutné při výrobě kokil volit vhodný materiál. V současné době se kokily nejčastěji vyrábějí z litiny s lupínkovým nebo kuličkovým grafitem a z uhlíkové oceli. Vyšší podíl připadá na kokily z litiny s lupínkovým grafitem z důvodu lepší obrobitelnosti a malého součinitele teplotní roztažnosti. Litinové kokily se vyznačují také nízkým modulem pružnosti a poměrně dobrou hodnotou tepelné vodivosti.

Charakteristickým činitelem určujícím, s dostatečnou přesností, zda je materiál vhodný pro podmínky, ve kterých pracuje kokila, je jeho struktura. Vzájemné množství jednotlivých strukturních složek, způsob vyloučení a tvar grafitu ovlivňují mechanické a fyzikální hodnoty a stálost litiny za vyšších teplot.

Velkou důležitost vzhledem k trvanlivosti kokily má velikost, tvar, množství a vyloučení grafitu v základní kovové hmotě, což závisí především na obsahu uhlíku, křemíku a rychlosti ochlazování i na očkování litiny. Čím je více uhlíku v litině, tím je větší lupínkový grafit.

HAVLÍČEK poukazuje na vliv hrubě vyloučeného grafitu, který snižuje tepelnou vodivost materiálu (porušuje kompaktnost zákl. kovové hmoty litiny), avšak tato litina lépe odolává tepelnému namáhání - tepelným rázům, protože při napětovém stavu u ní dochází k mikrodilatacím a tím k uvolňování napětí. Naproti tomu litiny s hrubým grafitem jsou náchylnější na oxidaci líce kokily (což způsobuje grafit, který vyhovívá). Jemně vyloučený grafit přispívá k praskání litiny. Náchylnost k praskání lze odůvodnit vysokým modulem pružnosti a tím nízkou plasticitou materiálu.

Důležitá je i základní kovová hmota (matrice) litiny. Hrubozrnná feritická struktura podporuje náchylnost litiny k mapování pracovního povrchu, perlitická k praskání stěn kokily.

Ferit nepodléhá při ohřevu a ochlazování v pracovním cyklu kokily žádným objemovým změnám, snadno snáší deformaci při opakovaném ohřevu, avšak lehce podléhá oxidaci a sekundárnímu růstu litiny.

Perlit není stabilní vůči opakovanému zahřívání, dochází k jeho rozpadu a vyvolává tzv. primární růst litiny.

Nepřípustný je v litině volný cementit, který svým vysokým modulem pružnosti a nízkou odolností vůči teplotním změnám utváří litinu křehkou a značně náchylnou k praskání.

Z uvedeného je patrné, že pro kokily není vhodná struktura litiny čistě perlitická ani čistě feritická. Za nejvhodnější je považována litina s matricí feriticko - perlitickou, s obsahem 60 - 70% feritu.

2.3.1 Růst litiny při její ohřívání

Při ohřívání litiny dochází v nežádoucím jevu, který se označuje růst. Zde nejde o pouhou tepelnou roztažnost, ale o zvětšení objemu, které je větší než tepelná roztažnost základní kovové hmoty. Trvalé zvětšení může dosáhnout 30 - 50% . K růstu litiny dochází již při teplotách 400°C, zvláště patrný je růst při opakovaném ohřevu v rozmezí teplot 650 - 800°C. GIRŠOVIČ [8]. Celkový růst litiny lze rozdělit na primární a sekundární.

Primárním růstem označujeme zvětšení objemu v důsledku grafitizace rozpadem cementitu na ferit a grafit. Metalografickým rozbořem lze zjistit, že zahříváním šedé litiny dochá-

zí k rozpadu cementitu:



Zvětšení objemu při tomto rozpadu je spojeno s rozdílnou hustotou cementitu, feritu a grafitu.

Sekundárním růstem litiny nazýváme zvětšení objemu v důsledku ostatních vlivů jako je např. působení tlaku plynů rozpuštěných v litině, oxidace, fázová přeměna $\text{Fe } \gamma - \text{Fe } \alpha$, plastická deformace. Hlavním činitelem sekundárního růstu litiny je oxidace základní kovové hmoty a dalších příměsí. Zvětšení objemu při oxidaci je podle GIRŠOVIČE [8] 5 až 10 krát větší než objemová změna během tepelného namáhání.

Nejvíce oxidaci podléhá ferit, perlit a grafit. Kolem grafitu se objevuje pásmo oxidů, které se stále rozšiřuje a působí na rozestupování základní kovové hmoty litiny. Oxidační pochod ještě podporuje a urychluje porušení a smršťování zahřívanych částí kokily. Oxidace probíhá velmi intenzivně v trhlinách, které se dále rozšiřují a prohlubují a vzniká tzv. mapování. Jeho podstata spočívá v tepelném pnutí. Dalším činitelem sekundárního růstu litiny je přeměna austenitu na perlit nebo ferit. Také plyny obsažené v litině difundují a slučují se a způsobují mikroskopické trhlinky. Takto porušená litina umožňuje difuzi oxidačních plynů, které podporují růst. Sekundární růst ovlivňují také plastické deformace způsobené střídavým tepelným namáháním kokily během odlévání.

2.4 MĚŘENÍ TEPLoty PŘI TUHNUTÍ A CHLADNUTÍ ODLITKU

K měření teploty při tuhnutí a chlazení odlitku se používají termoelektrické teploměry, které k měření využívají tzv. termoelektrického jevu.

2.4.1 Požadavky kladené na materiál termočlánků

Volba materiálu pro výrobu termočlánků se řídí použitím termoelektrického teploměru. Požadavky, které má termoelektrický teploměr splňovat jsou v hlavních rysech tyto:

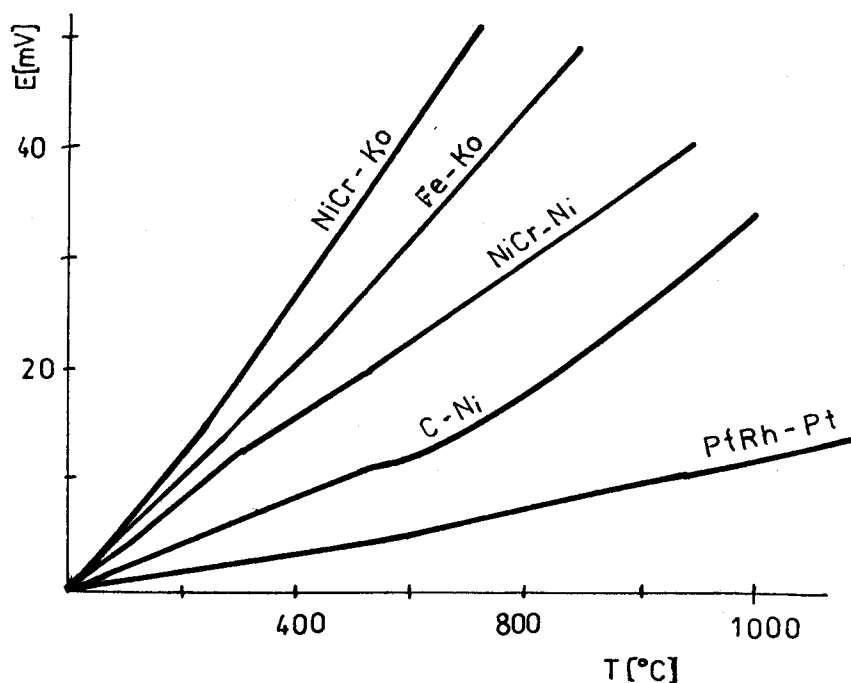
1. Relativně vysoká termosíla na jednotku teploty.
2. Lineární závislost termosíly na teplotě (tento požadavek nesplňuje žádný termoelektrický materiál, pouze se mu více či méně přibližuje).
3. Stabilita údaje při dlouhodobém provozu, nepatrný opal, odolnost proti chemickým vlivům a korozi.
4. Dostatečná mechanická pevnost.
5. Vyměnitelnost.

2.4.2 Termoelektrické články

Nejčastější dvojice kovů používaných k výrobě termočlánků jsou uvedeny na obr.2.7., kde je zároveň uvedena závislost termoelektrického napětí dvojic kovů na teplotě.

Z hlediska experimentální části práce je vhodné se podrobněji seznámit s termočlánky:

Termočlánek Železo - konstantan (Fe - Ko). Je to jeden z nej-používanějších termočlánků pro nižší teploty, protože je levný a vykazuje poměrně velkou termoelektrickou sílu. Kladnou větev tvoří čisté železo, zápornou větev tvoří konstantan (CuNi 45). Běžně se používá do teploty 600°C, krátkodobě do 900°C. Při teplotách nad 700°C klesá jeho životnost vlivem zvýšené oxidace, proto je nutno chránit termočlánekové dráty ochranným pouzdem. Průměr drátů pro provozní teploměry se volí 0.2 - 0.4 mm. Čím je drát silnější, tím je jeho životnost delší.



Obr. 2.7. Závislost termoelektrického napětí na teplotě pro různé druhy termočlánků [13].

Termočlánek niklchrom - nikl (NiCr - Ni). Pro teploty do 900°C je to nejpoužívanější termočlánek. Pro krátkodobá měření se používá do 1200°C. Pro nedosažitelnost absolutní přesnosti legování chromu ve slitině, liší se vyrobená slitina co do velikosti termoelektrické síly při 1000°C asi o $\pm 12^\circ\text{C}$. Termoelektrickou sílu ovlivňuje i čistota niklu. Proto byla stanovena pro tento termočlánek srovnávací mezinárodní stupnice termosíly v závislosti na teplotě. Tato stupnice je odvozena z přesných měření termočlánkem; kladná větev - chromel (NiCr10Co), záporná větev - alumel (NiAl2Mn2SiCo). Tento termočlánek již netrpí v redukční atmosféře. Průměr drátů se volí 0.2 - 5 mm.

2.5 SLÉVÁRENSKÉ SLITINY

Jedny z nejpoužívanějších slévárenských slitin jsou slévárenské slitiny hliníku. Jejich slévatelnost, zlepšující se

podílem eutektika ve struktuře, je velmi dobrá a dovoluje odlévat i složité a tenkostěnné odlitky. Ve srovnání se slitinami tvářenými, jsou mechanické vlastnosti slévárenských slitin nižší. Jejich hodnota však nezáleží jen na druhu slitiny, ale často velmi výrazně na způsobu odlévání.

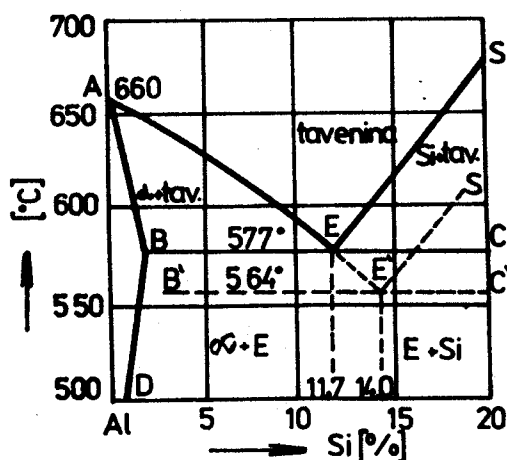
Slitiny hliníku mají tyto vlastnosti:

- mají nízkou teplotu tání a tím také nízkou teplotu lití ($680 - 780^{\circ}\text{C}$), což je výhodné z hlediska lití do kovových forem,
- povrch roztavené slitiny je vždy chráněn slabou vrstvou oxidů,
- mají vysoké latentní teplo tání přibližně 38 kJ.kg^{-1} ,
- mají malou náchylnost ke vzniku trhlin pod vlivem napětí,
- některé ze slitin jsou vytvrditelné, lze dosáhnout pevnosti až 300 MPa .

Slitiny hliníku s křemíkem patří k nejdůležitějším slévárenským slitinám hliníku. Jejich vžitý název je silumin. Jsou to slitiny s různým obsahem křemíku, podle něhož je možno je rozdělit na slitiny podeutektické ($4.5 - 10\% \text{ Si}$), eutektické ($10 - 13\% \text{ Si}$) a nadeutektické s vyšším obsahem Si.

Slitiny s Si dobře vyplňují formy, málo smršťují, mají velmi dobrou zabíhavost a malou náchylnost ke tvoření trhlin za tepla. Tyto vlastnosti mají především slitiny eutektické. Mechanické vlastnosti siluminů se zlepšují tzv. očkováním, tj. přidáváním malých množství např. sodných solí ($\text{NaF} + \text{NaCl}$ apod.), které vede k podstatnému zjemnění zrna. Tím se zvyšuje pevnost i tažnost.

Vedle jednoduchých siluminů Al-Si se v praxi používají i slitiny s dalšími přísadami (Mg, Cu, Ni apod.).



Obr.2.8. Rovnovážný diagram Al-Si

Z hlediska experimentální části práce je vhodné popsat i méně používané materiály a to čistý hliník, čistý zinek a čisté olovo.

2.5.1 Čistý hliník

Hliník vyniká nízkou hustotou a velmi příznivým poměrem hustoty k pevnosti. V čistém stavu vyniká elektrickou a tepelnou vodivostí.

Je vysoce korozně odolný a na běžné atmosféře se rychle pokrývá jeho povrch oxidem hlinitým, který zpomaluje nebo zastavuje další oxidaci. Dobře odolává slabým kyselinám. Nerozrušuje ho ani koncentrovaná kyselina dusičná. Velmi koroduje ve styku s alkalickými látkami, vyjma amoniaku.

Technicky je velmi nepříjemné, že ochranný účinek Al_2O_3 na povrchu čistého hliníku velmi rychle mizí, jestliže hliník přijde ve vlhkém prostředí do styku s jiným kovem, který má elektrochemický potenciál vyšší (např. železo).

hustota /kg.dm ⁻³ /	2.703
mez pevnosti /MPa/	50 - 120
teplota tání / °C/	660
souč. tepelné vodivosti /W.m ⁻¹ .K ⁻¹ /	
při teplotě 20°C	209
200°C	218
400°C	230
skupenské teplo tání /kJ.kg ⁻¹ /	396.1
měrná tepel. kapacita /J.kg ⁻¹ K ⁻¹ /	
při teplotě 20°C	896
tepelná roztažnost /K ⁻¹ /	24.7 . 10 ⁻⁶

Tab.2.1. Vlastnosti čistého hliníku.

2.5.2 Čistý zinek

Charakteristickou vlastností zinku je jeho dobrá slévateľnosť; odlitky z čistého Zn, ktoré majú veľmi dobrý povrch, sa však používa len málo pro špatné mechanické vlastnosti.

hustota /kg.dm ⁻³ /	
při teplotě 25°C	7.14
mez pevnosti v litém stavu /MPa/	
ve směru hl. krystalograf. osy	50 - 55
kolmém ke krystalograf. ose	15
teplota tání /°C/	419
souč. tepelné vodivosti /W.m ⁻¹ .K ⁻¹ /	
při teplotě 25°C	110
skupenské teplo tání /kJ.kg ⁻¹ /	100.86
měrná tepelná kapacita /kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹ /	
při teplotě 20°C	0.383
tepelná roztažnost /K ⁻¹ /	
hl. osa	63.9 . 10 ⁻⁶
kolmo na hl. osu	14.1 . 10 ⁻⁶

Tab. 2.2. Vlastnosti čistého zinku.

Zinek krystalizuje v hexagonální soustavě. Hlavní osa jeho elementární mřížky je však podstatně delší, než odpovídá

těsnému uspořádání. Tato nepravidelnost má značný vliv na vlastnosti zinku. Mechanické vlastnosti vykazují značnou anizotropii a jsou ovlivňované i nečistotami. Obvyklou nečistotou provázející zinek je olovo, železo a cín. Všechny uvedené kovy působí na vlastnosti zinku nepříznivě. Méně škodlivě působí arsen, křemík, antimon a vizmut, někdy stříbro.

2.5.3 Čisté olovo

Olovo je měkký a těžký, dobře slévateľný kov. Krystalizuje v soustavě kubické plošně centrované. Mechanické vlastnosti olova závisejí na jeho čistotě a na podmínkách zkoušky, neboť čisté olovo za normální teploty je nad rekrystalizační teplotou a již při malých zatíženích intenzivně teče.

hustota /kg.dm ⁻³ / při teplotě 20°C 328°C	11.34
	10.686
mez pevnosti /MPa/	14
teplota tání / °C/	327.4
souč. tepelné vodivosti /W.m ⁻¹ .K ⁻¹ / při teplotě 20°C	35
skupenské teplo tání /kJ.kg ⁻¹ /	24.53
měrná tepel. kapacita /J.kg ⁻¹ K ⁻¹ / při teplotě 20°C 100°C	128
	134
tepelná roztažnost /K ⁻¹ /	29.3 . 10 ⁻⁶

Tab.2.3. Vlastnosti čistého olova.

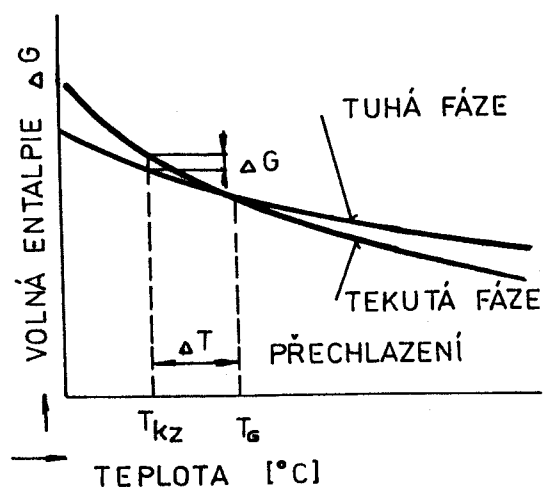
Z výroby přecházejí do olova jako přimíšeniny zejména vizmut, měď a stříbro a dále cín, zinek a železo. Záměrně se někdy přidávají do olova arsen a antimon, aby se upravily některé jeho vlastnosti. Hlavním účelem těchto přísad je zlepšit, pro olovo tak charakteristickou, malou pevnost, pro

kterou ho není možno použít přímo jako konstrukčního materiálu.

2.5.4 Krystalizace čistých kovů

Krystalizací rozumíme děj, při němž z původní tekuté fáze vzniká tuhá fáze krystalického charakteru.

Příčinou krystalizace je snaha kovu dosáhnout při změně teploty stabilního stavu. Tento stav je charakterizován minimální volnou entalpií ΔG . Tato podmínka vyplývá ze schematu na obr.2.9. Je zřejmé, že nad teplotou T_0 má menší volnou entalpii tavenina a je proto fází termodynamicky stabilnější než fáze krystalická. Pod teplotou T_0 je tomu naopak. Za teploty T_0 jsou hodnoty volné entalpie u obou fází stejné, proto existuje termodynamická rovnováha obou fází. T_0 je teoretická teplota krystalizace [29].



Obr.2.9. Termodynamické podmínky krystalizace [29].

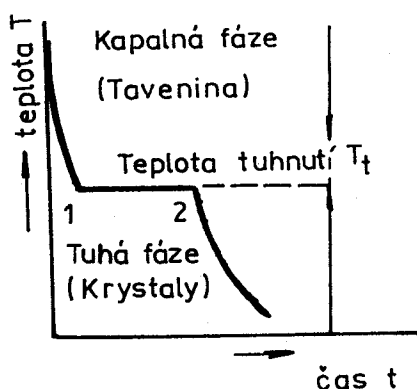
Protože krystalizace je difuzní pochod s postupujícím vznikem zárodků a jejich růstem, nelze očekávat jejich vznik za teoretické teploty tuhnutí. Musí tedy dojít k určitému přechlazení pod tuto teplotu, aby rozdíl volné entalpie G

mezi novou a původní fází byl dostačující k podnícení krystalizace. Z tohoto rozdílu volných entalpií se hradí práce potřebná pro vznik a růst zárodků [29].

2.5.4.1 Křivka chlazení čistého kovu

Roztavený čistý kov představuje soustavu tvořenou jedinou fází ($f = 1$) - taveninou. Je-li $P = \text{konst.}$, pak $v = 1$. Za teploty tuhnutí čistého kovu (koexistence dvou fází, tj. taveniny a krystalů čistého kovu) pro soustavu platí $v = 0$. Znamená to, že čistý kov tuhne (ale i taje) při jediné teplotě.

Tato přeměna je doprovázena uvolňováním skupenského tepla tuhnutí. Ustavuje se rovnováha mezi uvolňovaným skupenským teplem a teplem, které z kovu přechází do okolí. Rychlost odvádění tepla určuje rychlost tuhnutí.

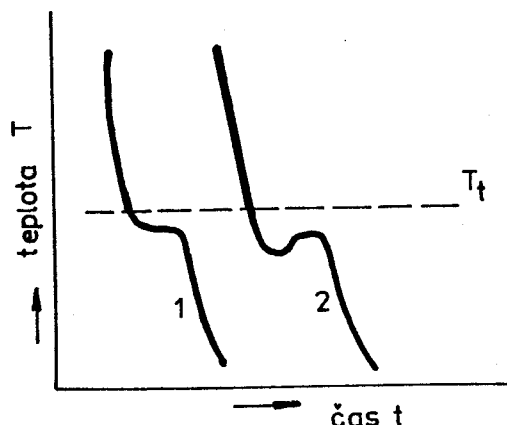


Obr. 2.10. Ideální křivka chlazení čistého kovu [1].

Měříme-li při ochlazování taveniny čistého kovu v určitých časových intervalech t a získané hodnoty vyneseme v soustavě souřadnic teplotu T - čas t , získáme křivku chlazení čistého kovu.

V oblasti nad teplotou tuhnutí T_t probíhá ochlazování

taveniny podle logaritmické křivky. Prodleva za teploty T_t (1-2) udává dobu, po kterou se uskutečňuje krystalizace. Další ochlazování tuhé fáze (krystalu) probíhá podle jiné logaritmické křivky.



Obr.2.11. Skutečné křivky chlazení čistého kovu [1].

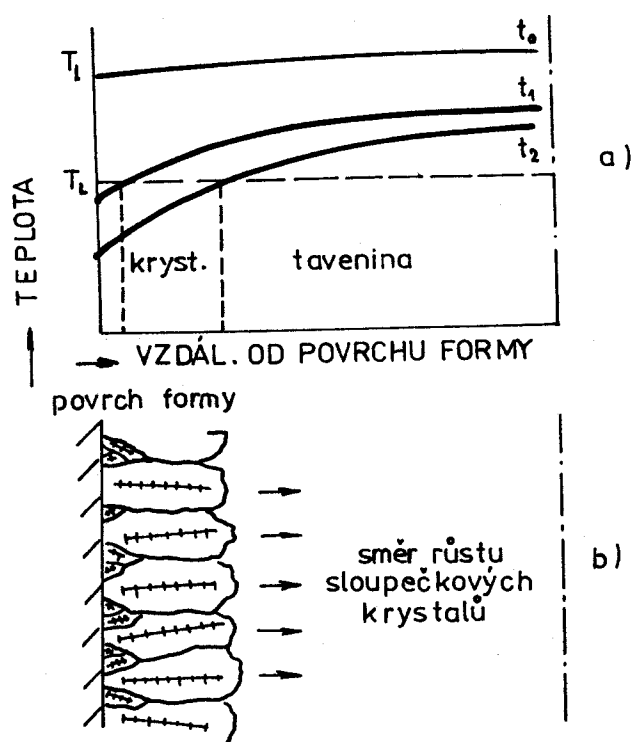
Skutečný průběh chlazení čistého kovu je poněkud odlišný od ideální křivky. V důsledku rychlejšího ochlazování taveniny dochází k začátku tuhnutí až při určitém podchlazení taveniny, tj. pod teplotou tuhnutí (obr. 2.11, křivka 1). Při značném přechlazení taveniny může se dokonce, vlivem uvolňovaného skupenského tepla, teplota zvýšit (obr. 2.11., křivka 2) [1].

2.5.4.2 Mechanismus krystalizace čistého kovu ve formě

Za předpokladu, že teplota ochlazovaného kovu je v celém průřezu jednotná, vyrůstá z každého zárodku s kritickou velikostí krystal, přičemž latentní teplo vyvíjející se během krystalizace působí ke zvýšení teploty v okolí vznikajících krystalů. Proto další krystaly, vznikající za těchto podmínek, se musí vytvářet odlehle od prvních, což vede k rovno-

měrnému rozložení zárodků.

Za skutečných podmínek postupuje krystalizace od stěn formy, kde jsou výhodnější podmínky pro vznik krystalizačních zárodků a uvolňující se latentní teplo může být odváděno krystalickou fází do formy.



Obr.2.12. Podmínky pro růst orientovaných sloupečkových krystalů [29].

Např. při vlití čistého kovu za teploty T_1 do formy nevytvoří se ihned v čase t_0 teplotní gradient, ale teprve po určité době t_1 (obr.2.12.), kdy došlo k odvodu tepla z kovu do stěn formy. Jakmile teplota na povrchu formy klesne pod tavicí teplotu T_L , nastává v těch místech nukleace krystalů

zace. Zárodky, které mají vhodnou orientaci růstu (kolmo k povrchu stěny formy), rostou mnohem rychleji než ostatní, jinak orientované krystaly. V čase t_2 pokračuje růst vhodně orientovaných sloupečkových krystalů směrem ke středu odlitku, přičemž gradient teploty zůstává již během postupného tuhnutí přibližně konstantní [29].

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Prováděné experimenty byly zaměřeny na stanovení hodnot tepelně-fyzikálních veličin, především tepelné akumulace slévárenské formy - kokily, která je k dispozici na KSM.

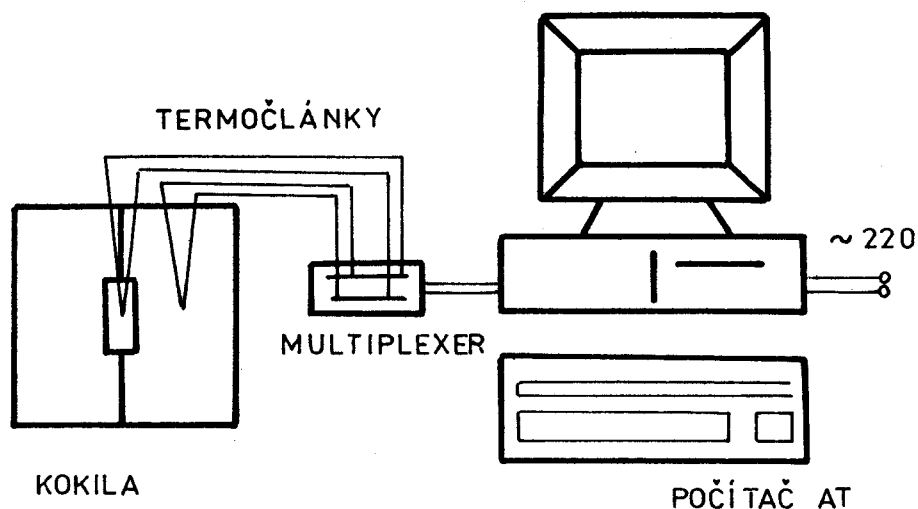
Jako základní metoda byla použita metoda měření teplotních polí ve slévárenské formě v okamžiku ztuhnutí odlitku (tzv. VEJNIKOVA metoda), která je založena na nahrazení průběhu teplot od líce formy známou funkcí - parabolou n -tého stupně nebo sinusovkou.

Při měření se vycházelo ze zjednodušujícího předpokladu, že slévárenská forma i odlitek jsou homogenní a tvoří polonekonečný prostor. V těchto experimentech je brána efektivní teplota rozhraní při tuhnutí konstantní a dále jsou za konstantní považovány i známé hodnoty c_m , L_c , ρ_m , přičemž byly použity čisté kovy. Doba odlévání je považována za velmi malou $t \rightarrow 0$ a odvod tepla přehřátí taveniny a tuhnutí probíhají současně.

Teplotní pole byla sledována na litinové kokile $200 \times 300 \times 400$ mm pro výrobu odlitků tvaru desky a pro porovnání výsledků byla provedena i odlití do pískové formy $300 \times 300 \times 200$ mm (opět odlitek tvaru desky).

3.1 POPIS POUŽITÉHO MĚŘÍCÍHO ZAŘÍZENÍ

Pro sledování prováděných experimentů na kokile (hlavní část experimentů), bylo použito zařízení, kde registrace sledovaných teplot byla realizována počítačem AT 286 se 16-ti čidlovým analogovým převodníkem PC LABDAS CARD PCL 718 s multiplexerem PCL 789, který převádí analogový signál na digitální. Schema zařízení je uvedeno na obr. 3.1.



Obr.3.1. Blokové schema měřicího zařízení s počítačem a multiplexerem.

Při sledování experimentů na pískové formě (srovnávací část experimentů) byl záznam teploty v teplotní ose odlitku a v dalších definovaných místech slévárenské formy proveden pomocí šestibodového zapisovače EPP 093 M.

Od měřících zařízení bylo požadováno:

- a/ Velikost a tvar formy a její dutiny musí v určité míře zabezpečovat nezkreslení podmínek měření.
- b/ Termoelektrické články, použité pro měření teploty, byly voleny tak, aby potlačovaly škodlivý vliv odvodu tepla z měřících míst (lze ovlivnit zmenšením průměru drátu). Rozmístění termočlánků ve formě bylo voleno tak, aby byla spolehlivě sledována skutečná teplota.
- c/ Musí zajistit co nejjednodušší, dostatečně přesný a přehledný způsob zápisu a jednoduché vyhodnocení naměřených hodnot.

3.2 POUŽITÉ SLÉVÁRENSKÉ FORMY

K experimentům byly použity tyto formy:

- a/ Litinová kokila 200 x 300 x 400 mm pro výrobu odlitků tvaru desky 200 x 200 x 20 mm. Materiálem této kokily byla litina s lupínkovým grafitem ČSN 42 2420, jejíž chemické složení bylo zjištěno analyzátozem LECO a je následující: 3.4% C, 0.88% Mn, 1.95% Si, 0.149% P, 0.091% S, ($C_e = 3.950$).
- b/ Pískové formy byly zhotoveny z formovací směsi Frydštejn, jejíž hustota je 1700 kg.m^{-3} , pevnost v tlaku 0.108 MPa, prodyšnost $80 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$. Rozměry forem pro odlitky tvaru desky 200 x 200 x 20 mm měly rozměr 300 x 300 x 200 mm.

Odlévání do těchto pískových forem bylo pouze orientační, protože hlavní náplní práce je odlévání do kovových forem.

3.2.1 Metalografické hodnocení materiálu litinové kokily

Metalografické hodnocení materiálu litinové kokily pro výrobu odlitků tvaru desky 200 x 200 x 20 mm bylo provedeno na základě mikroskopického pozorování na světelném mikroskopu Neophot 21. K vyhodnocení byla použita zvětšení 20, 100, 500 a 1000 násobné. Vzorek pro pozorování byl upraven běžně používaným způsobem pro sledování v nenaleptaném i naleptaném stavu. Jako leptadlo byl použit Nital 3%.

Hodnocení bylo provedeno podle ČSN 42 0461 a její etalonové řady.

Hodnocení grafitu:

Záznam IC 4/5 charakterizuje grafit lupínkový, rozložený smíšeně, velikost v rozmezí 60 - 250 μm , přičemž převládá ve-

likost v rozmezí 60 - 120 μm .

Hodnocení ostatních fází a strukturních součástí:

Matrice popisované litiny je feriticko-perlitická, Fe 70 P 30 (obsah feritu je od 60 do 80 %, obsah perlitu od 20 do 40 %).

Perlit - tvar lamelární, odpovídá to označení P1; disperzita perlitu 1.4 (tj. nad 1.3 do 1.6 μm).

Cementit - obsah eutektického cementitu je od 0 do 2 %, což odpovídá označení C2. Velikost útvarů cementitu je do 2000 μm^2 , značení Cv 2000.

Fosfidické eutektikum - jemnozrnné (označení F2), rozložené v souvislém síťoví (Fr 3). Velikost síťoví do 250 μm (Fd 250). Velikost útvarů eutektika nepřesahuje velikost plochy 2000 μm^2 (Fv 2000).

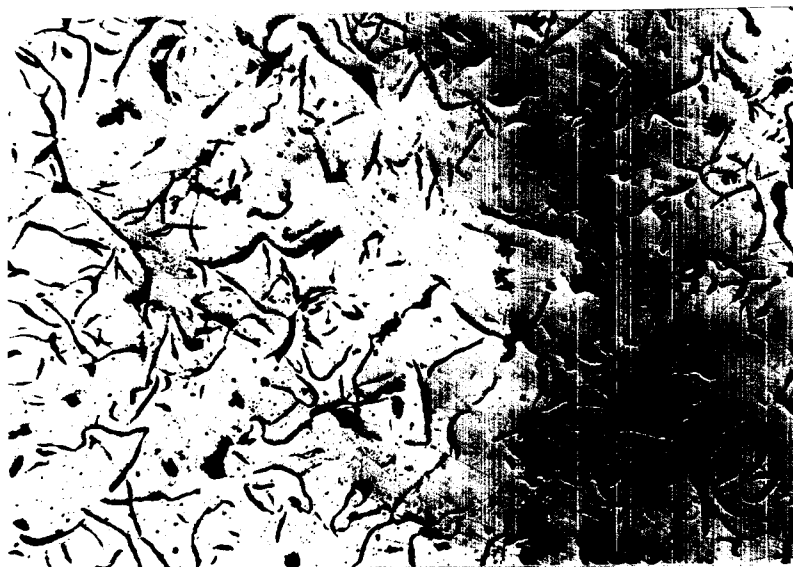
Záznam úplného hodnocení struktury dle ČSN 42 0461:

IC 4/5 - P1 - P 30 - Pd 1.4 - F 2 - Fr 3 - Fd 250 - Fv 2000
charakterizuje strukturu šedé litiny s lupínkovým grafitem velikosti 60 - 250 μm . Velikost grafitu 60 - 120 μm převládá. Grafit je rozložen smíšeně. Struktura je dále tvořena lamelárním perlitem o disperzitě 1.3 až 1.6 μm a feritem, kterého je více než 60 %, ale jehož obsah nepřesahuje 80 %. Ternární jemnozrnné fosfidické eutektikum je vyloučeno v souvislém síťoví o velikosti do 250 μm . Velikost útvarů fosfidického eutektika je do 2000 μm^2 .

Na obr. 3.2 je uveden tvar, velikost a rozložení grafitu a na obr. 3.3. charakter základní kovové hmoty sledované litiny.

3.3 POUŽITÉ SLVÁRENSKÉ SLITINY

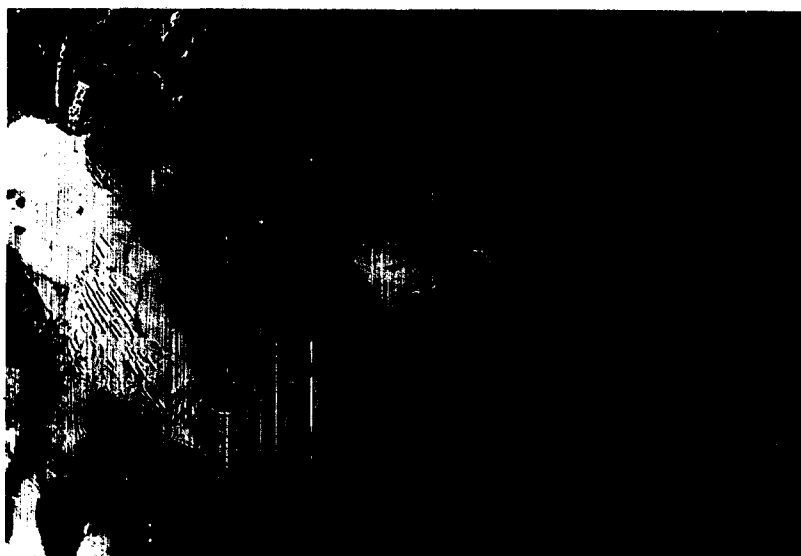
Pro odlévání do dříve popsaných forem byl použit v nej-



neleptáno

100x

Obr.3.2. Tvar, velikost a rozložení grafitu v materiálu liti-
nové kokily.



nital

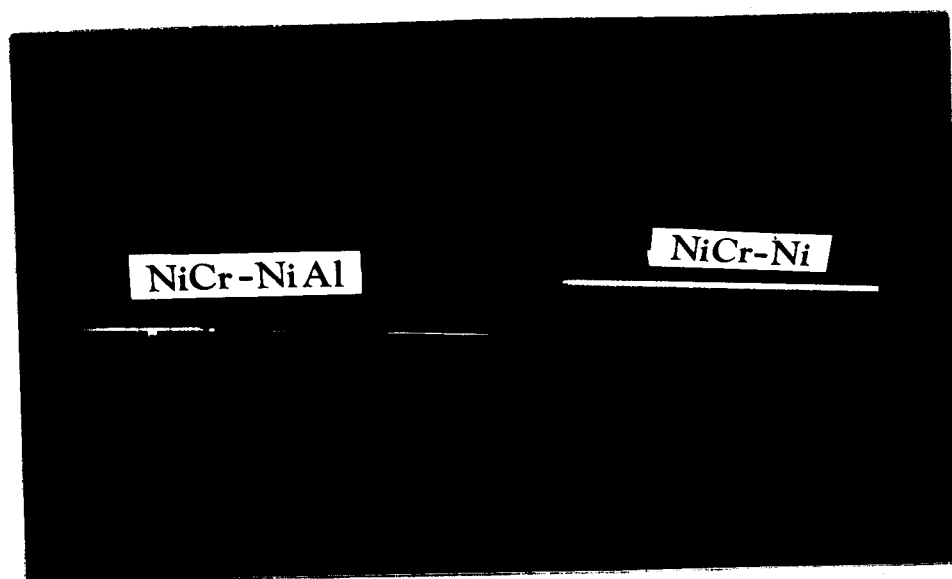
500x

Obr.3.3. Struktura litiny s lupínkovým grafitem.

větší míře Al 99.9 % se stále stejnou teplotou přehřátí (teplota lití 800°C). Dále byly také použity čistý zinek a olovo.

3.4 MĚŘENÍ TEPLOTY

Pro měření teploty byly použity termočlánky $\varnothing$ 0.2 mm NiCr - Ni - pro měření teploty v tavenině, jejichž měřicí konce byly opatřeny korundovou dvoukapilárou $\varnothing$ 4mm a větve termočlánku byly chráněny běžně používanou elektrickou izolací z plastu. Kalibrační křivka tohoto termočlánku je uvedena v příloze č.3. Pro měření teplot ve slévárenské formě - kokile, byly použity speciální termočlánky NiCr - NiAl $\varnothing$ 2mm (plášťované), dovezené z Rakouska (výroba Švýcarsko). Jejich měřicí čidlo je upraveno pro rychlou manipulaci v hlubokých dutinách. Termočlánky jsou uvedeny na obr. 3.4.



Obr.3.4. Termočlánky použité při měření teplotního pole v litinové kokile a odlitku.

Před měřením byly termočlánky vsunuty do tělesa formy

a do středu dutiny odlitku. Všechna jejich čidla byla umístěna do poloviny výšky formy (tj. 100 mm pod povrchem), aby teploty byly sledovány v jedné rovině slévárenské formy. Na obr. 3.5. je uvedeno rozmístění termočlánků v litinové kokile.

Pomocí počítače byl kontrolován správný styk termočlánků s formou. Po spuštění počítače při nesprávném dotyku výrazně kolísá hodnota teploty (v rozmezí až desítek °C) a zobrazené teploty jsou na první pohled nereálné.

V pískových formách bylo rozmístění termočlánků NiCr - Ni též provedeno ve svislé poloze s rozložením od líce 0.005; 0.01; 0.02; 0.045; 0.06 mm.

3.5 POPIS MĚŘENÍ TEPLOTNÍHO POLE SLÉVÁRENSKÉ FORMY

Do slévárenské formy byly zavedeny termočlánky tak, aby forma byla připravena k měření.

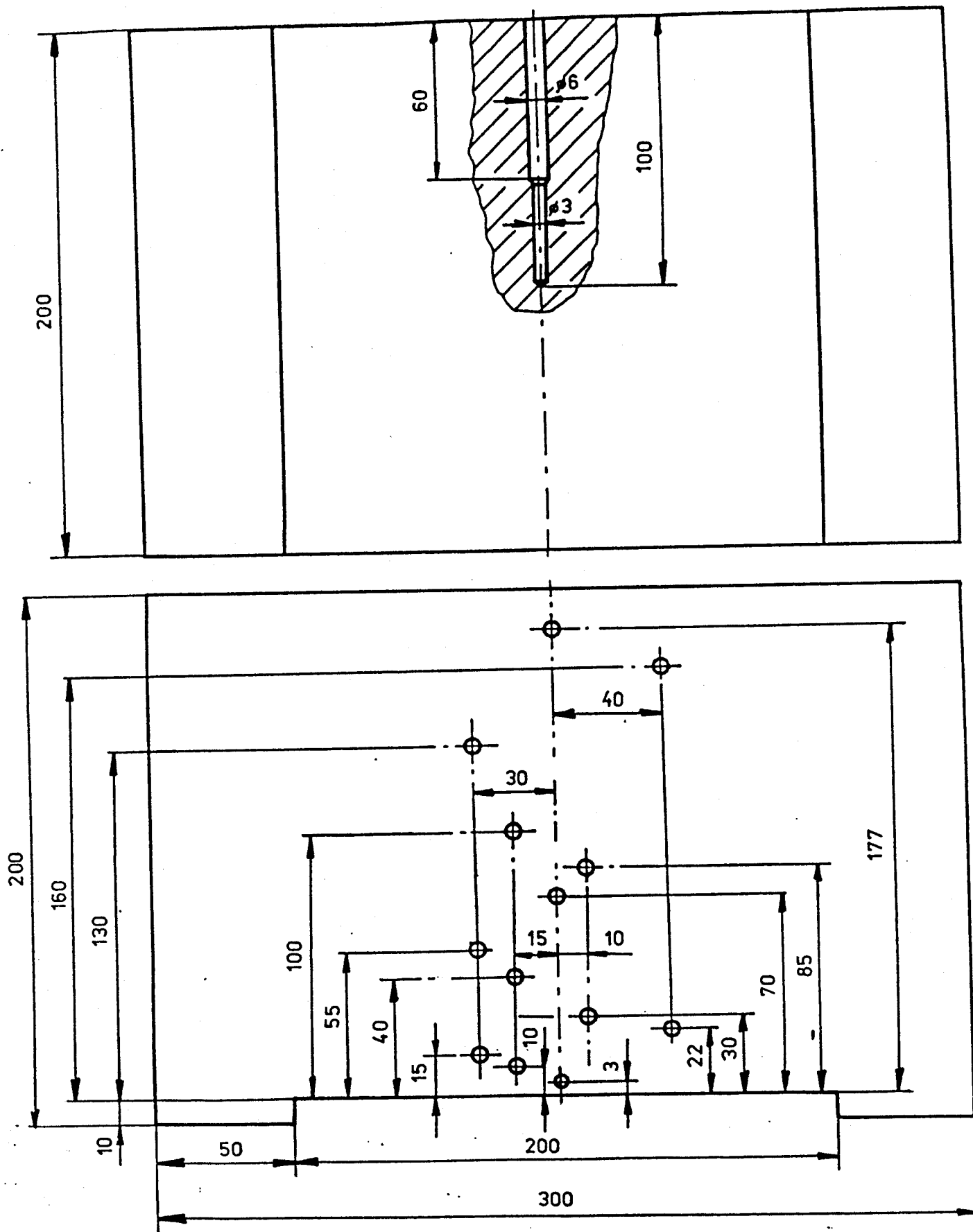
V hlavní části experimentů měření teploty ve slévárenské formě byl použit AT počítač s analogovým převodníkem a multiplexerem a teplota byla sledována ve 13-ti místech od jejího líce.

Ve srovnávací části experimentů byly teploty sledovány pěti termočlánky a registrovány zapisovačem.

Pro sledování teploty v tepelné ose odlitku byl vždy použit jeden termočlánek (pro každý experiment nový).

3.5.1 Hlavní část experimentu

Experimenty byly prováděny při odlévání čistého Al 99.9% (10 měření) a tavenina byla vždy přehřáta na 800°C. Forma byla před každým odlitím předem ošetřena. Výchozí teploty formy (teploty přehřevu formy) byly 20, 45, 63,



Obr. 3.5. Schéma rozmístění termočlánků ve slévárenské formě 200 x 300 x 400 mm

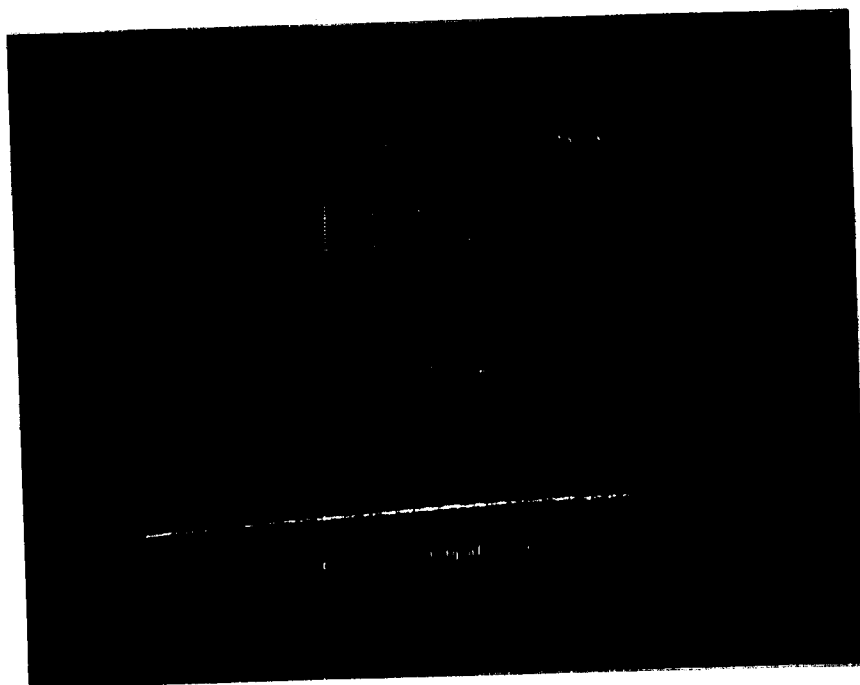
100, 120, 125, 130, 135, 150 a 170°C. Dále bylo provedeno pokusné odlití zinku z teploty 463°C a olova z teploty 365°C. Obě dvě měření byla provedena při počáteční teplotě formy 20°C. Výše teplot lití byla stanovena pomocí homologické teploty.



Obr.3.6. Pohled na multiplexer a formu připravenou k měření.

Před každým odléváním byla tavenina ošetřena a pečlivě byla stanovena její teplota na digitálním teploměru. Současně bylo dbáno, aby čas odlévání byl co nejkratší a tím byly splněny přibližně stejné podmínky všech experimentů.

Na základě zjištěných teplot v uvedených místech slévárenské formy byly pro jednotlivá měření sestrojeny závislosti teplota - vzdálenost od líce formy obr.3.8.(I - III) a z těchto průběhů byly zjištěny hodnoty prohřáté vrstvy formy (X_2) v okamžiku ztuhnutí odlitku. Zjištěné hodnoty jsou uvedeny v tab. 3.2.



Obr.3.7. Ukázka záznamu časových průběhů teplot, tak jak byly registrovány přímo při měření.

Jak již bylo dříve uvedeno, časové záznamy teplot v kokile při tuhnutí odlitku byly zaznamenávány přímo počítačem a jeho dalším příslušenstvím. Takto získané záznamy experimentů jsou uvedeny v příloze - Grafické záznamy experimentů.

Pro stanovení tepelně-fyzikálních vlastností slévárenských forem je důležitá hodnota teploty rozhraní mezi odlitkem a formou; podle VEJNIKA tzv. efektivní teplota. Její hodnota byla stanovena na $(0.75 \text{ } T_{KR})$ a opět je zapsána

v tab. 3.2.

3.5.2 Srovnávací část experimentů

Tato část experimentů byla prováděna při odlévání čisté-
ho hliníku, zinku a olova do pískové formy. Lící teplota byla
u hliníku 720°C , u zinku 463°C a u olova 365°C . Teploty byly
opět stanoveny pomocí tzv. homologické teploty.

Záznam teplot (viz příloha - Grafické záznamy experimen-
tů), resp. napětí termočlánků byl vyhodnocen pomocí kalibrač-
ní křivky uvedené v příloze č.3 a č.4.

I zde byly ze všech měření získány hodnoty potřebné
k dalším výpočtům (tab.3.3.). Podobně jako v předchozí etapě
měření byly odečteny hodnoty teplot odpovídající sledovaným
místům pískové formy v okamžiku ztuhnutí odlitku obr.3.9.
(I-III) a byly stanoveny hodnoty X_2 , které jsou zapsány
v tab. 3.3.

3.6 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ A STANOVENÍ HODNOT TEPELNĚ- FYZIKÁLNÍCH VELIČIN SLÉVÁRENSKÉ FORMY

Na základě zjištěných časových průběhů teplot v určitých
vzdálenostech od líce formy v okamžiku ztuhnutí odlitku
(obr.3.8. I-III, 3.9. I-III) a z průběhu teplota - vzdálenost
od líce formy (příloha - Grafické záznamy experimentů)
a z dalších potřebných údajů (tab.3.1., 3.2., 3.3.) byly vy-
počteny:

1/ Hodnota součinitele tepelné akumulace slévárenské formy
podle:

a/VEJNIKA - nahrazení teplot ve slévárenské formě
v okamžiku ztuhnutí odlitku parabolou; s přihlédnutím
na přehřátí taveniny,

b/VEJNIKA - nahrazení sinusovkou,

c/HALBARTA.

2/ Podle VEJNIKOVY metody nahrazení parabolou byly stanoveny hodnoty:

a/měrného tepla materiálu kokily,

b/teplotní vodivosti materiálu kokily,

c/tepelné vodivosti materiálu kokily.

3/ Podle VEJNIKOVY metody nahrazení sinusovkou byly opět stanoveny hodnoty veličin jako v bodě 2/.

Vypočítané hodnoty tepelně-fyzikálních veličin pro kovovou formu jsou v tab.3.2. V tab.3.3. jsou uvedeny hodnoty b_F i ostatních veličin pro pískovou formu.

3.6.1 Stanovení stupně paraboly

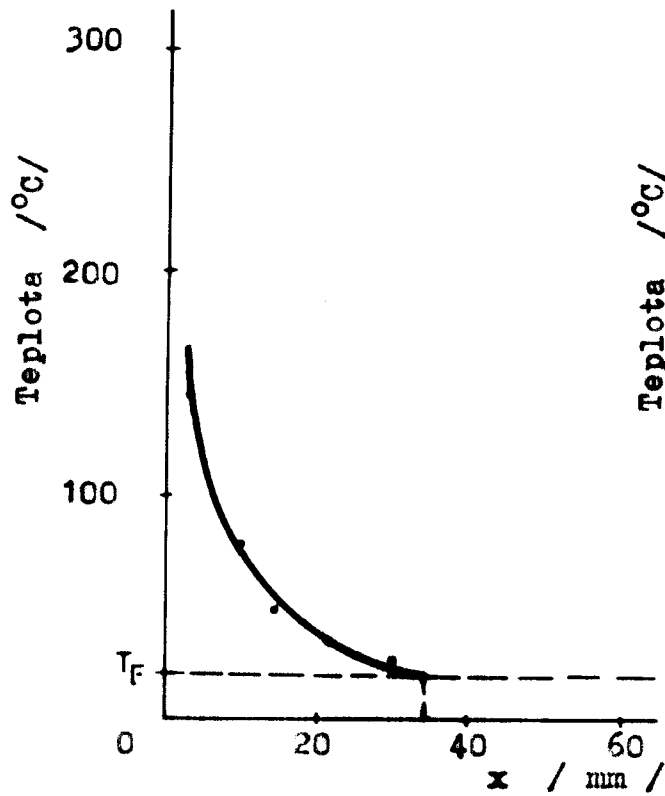
Stanovení stupně paraboly bylo provedeno pomocí vztahů (2.6) a (2.7) pro jednotlivá měření. Stupeň paraboly byl stanoven dvakrát, v jednom případě byla uvažována efektivní teplota ($T_{KR} - T_F$), tato metoda je označována jako klasický VEJNIK a dále byla uvažována efektivní teplota ($0.75 T_{KR} - T_F$), tato metoda je označována jako upravená VEJNIKOVA metoda. Obdobně byly označeny i jednotlivé stupně paraboly, které byly pro každé měření zaznamenány do tab. 3.2.

Ukázka výpočtu:

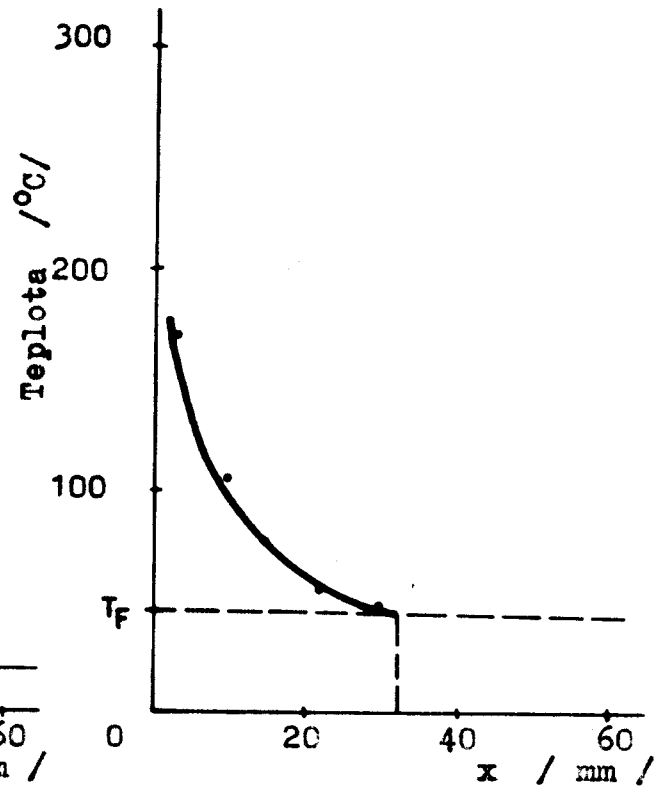
Vstupní hodnoty:

$x_1 = 0.003 \text{ m}$, $x_2 = 0.01 \text{ m}$, $x_3 = 0.015 \text{ m}$, $x_4 = 0.022 \text{ m}$,
 $x_5 = 0.03 \text{ m}$, $T_1 = 142.9^\circ\text{C}$, $T_2 = 78.6^\circ\text{C}$, $T_3 = 50^\circ\text{C}$,
 $T_4 = 34.3^\circ\text{C}$, $T_5 = 26.4^\circ\text{C}$, $T_F = 20^\circ\text{C}$, $T_{KR} = 660^\circ\text{C}$,
 $x_2 = 0.0345 \text{ m}$

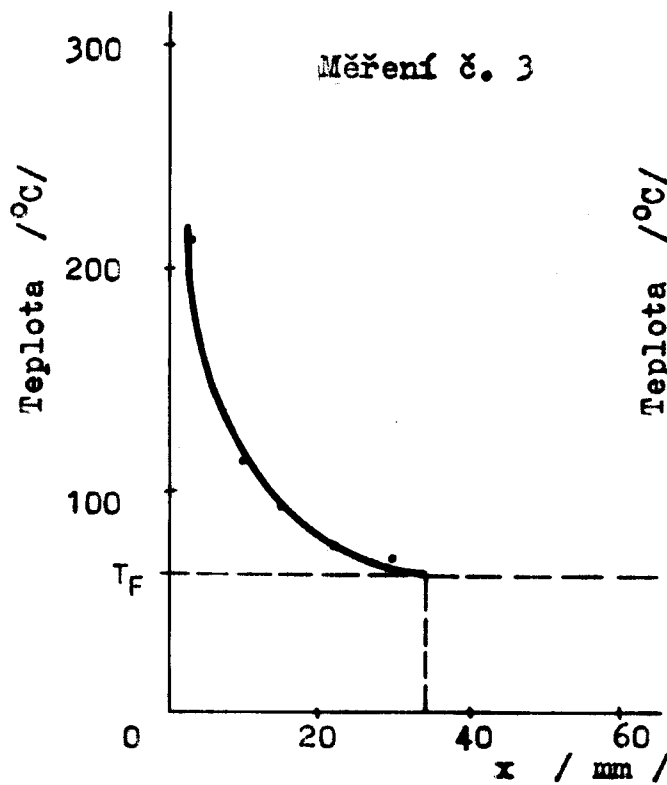
Měření č. 1



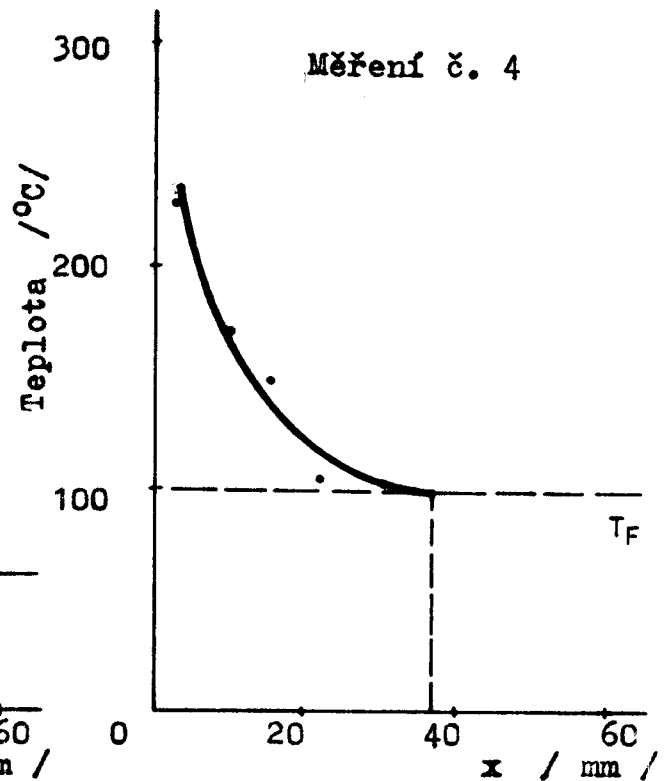
Měření č. 2



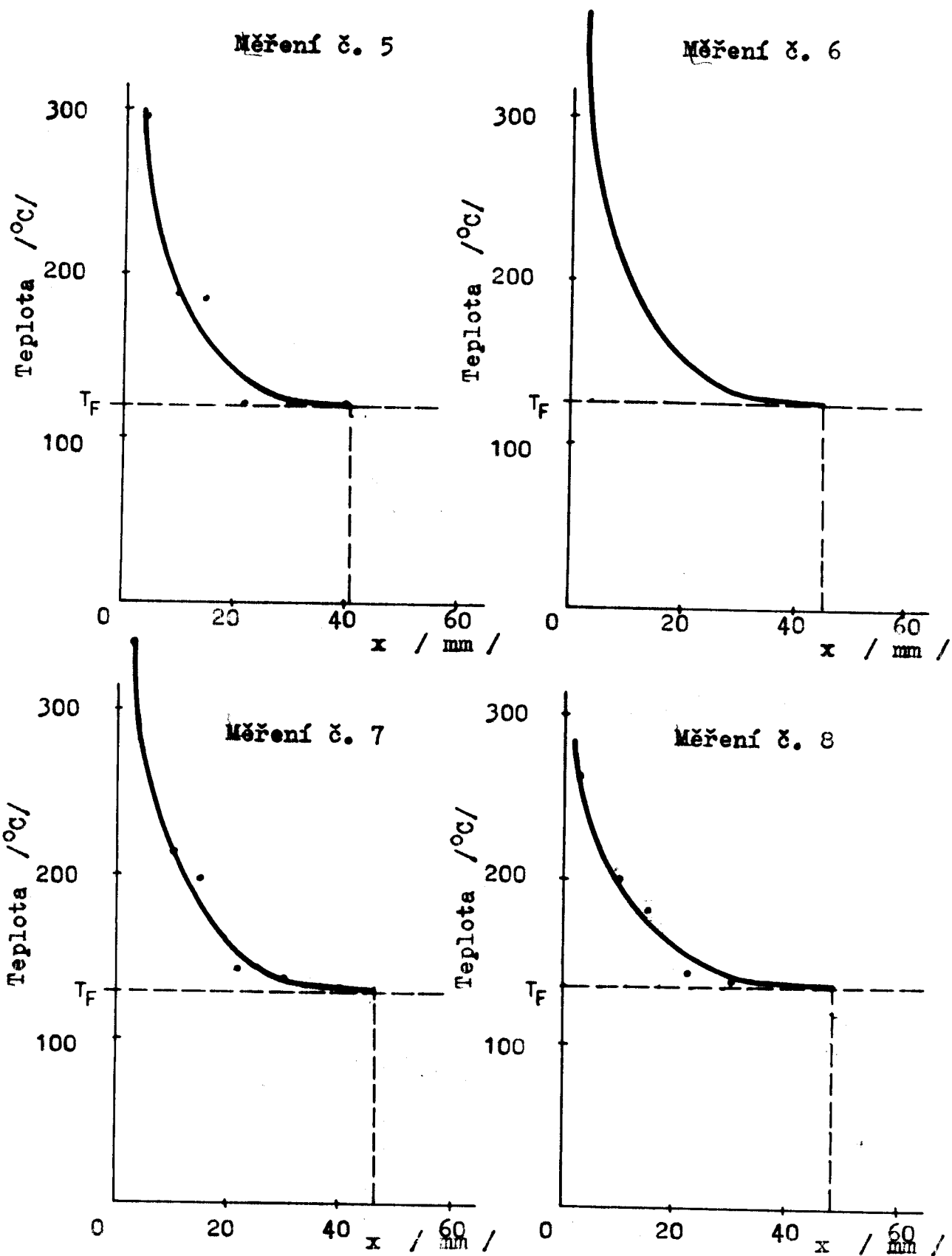
Měření č. 3



Měření č. 4

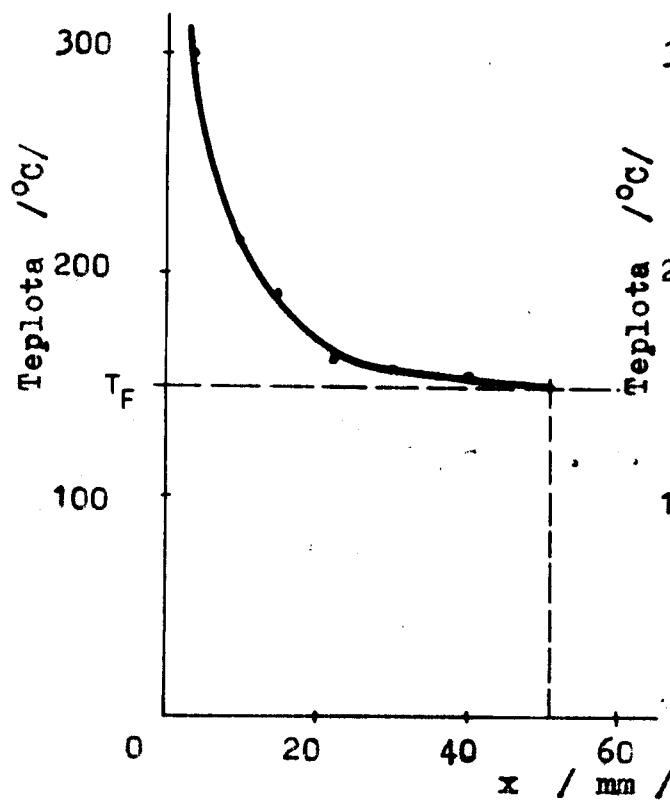


Obr. 3.6. - I Rozložení teplot ve slévárenské formě
v okamžiku ztuhnutí odlitku

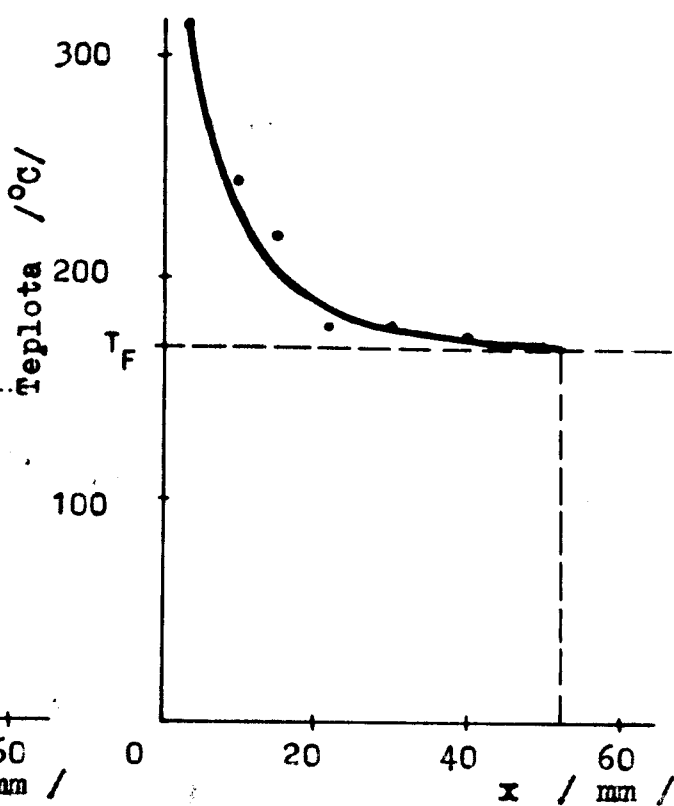


Obr. 3.8. - II Rozložení teplot ve slévárenské formě
v okamžiku ztuhnutí odlitku

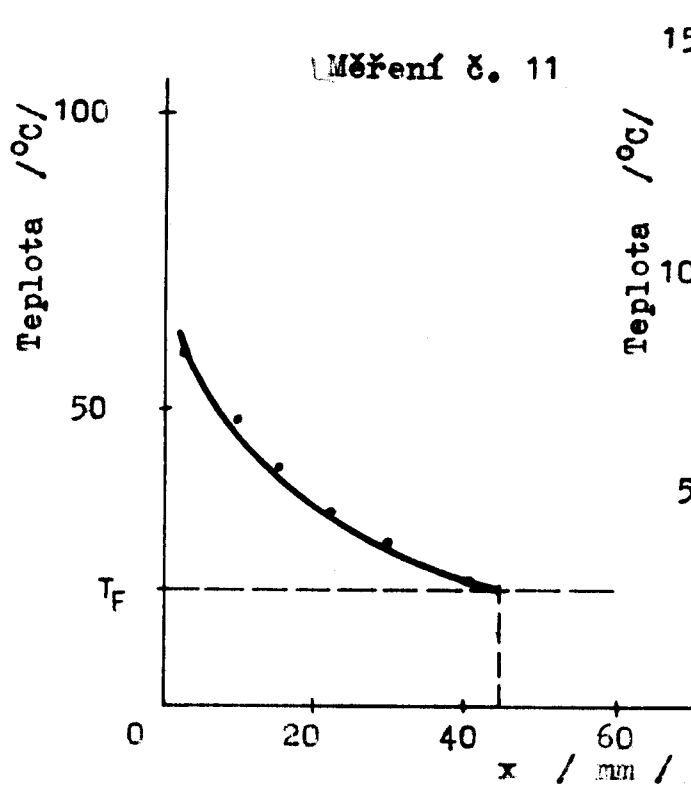
Měření č. 9



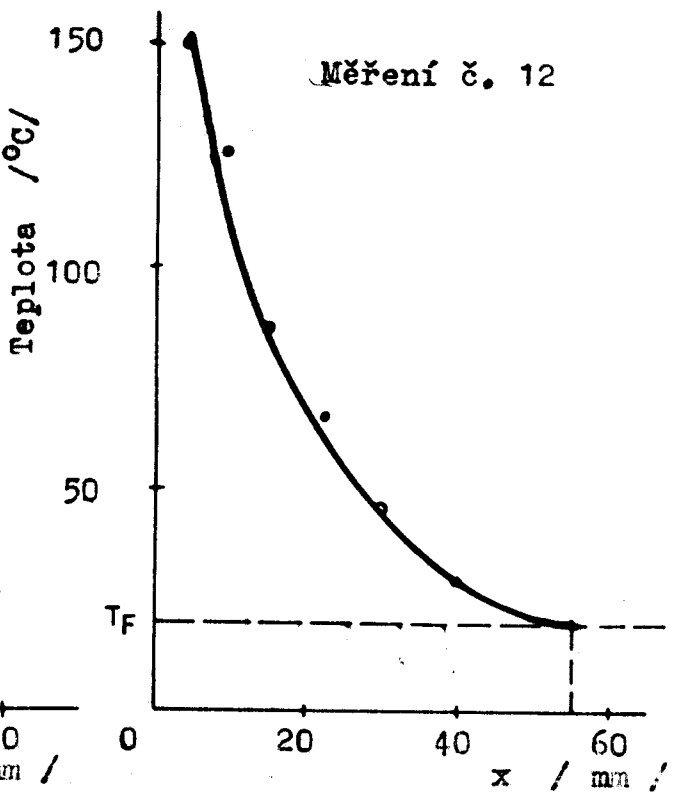
Měření č. 10



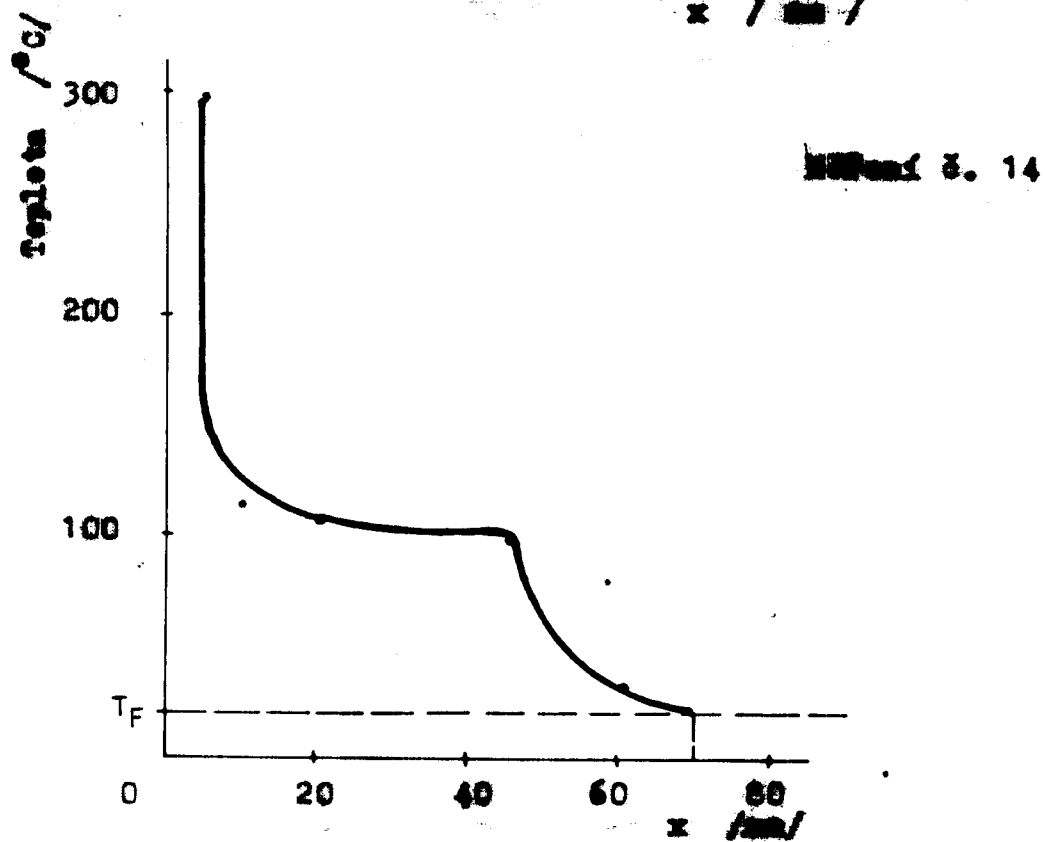
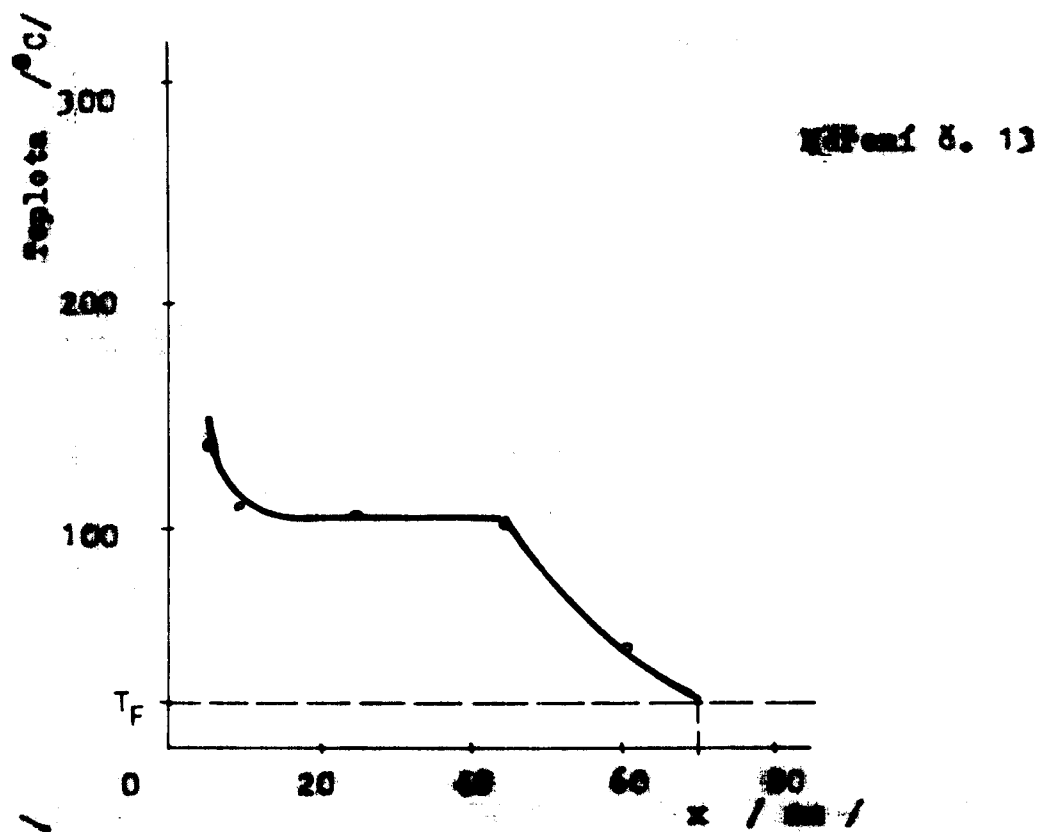
Měření č. 11



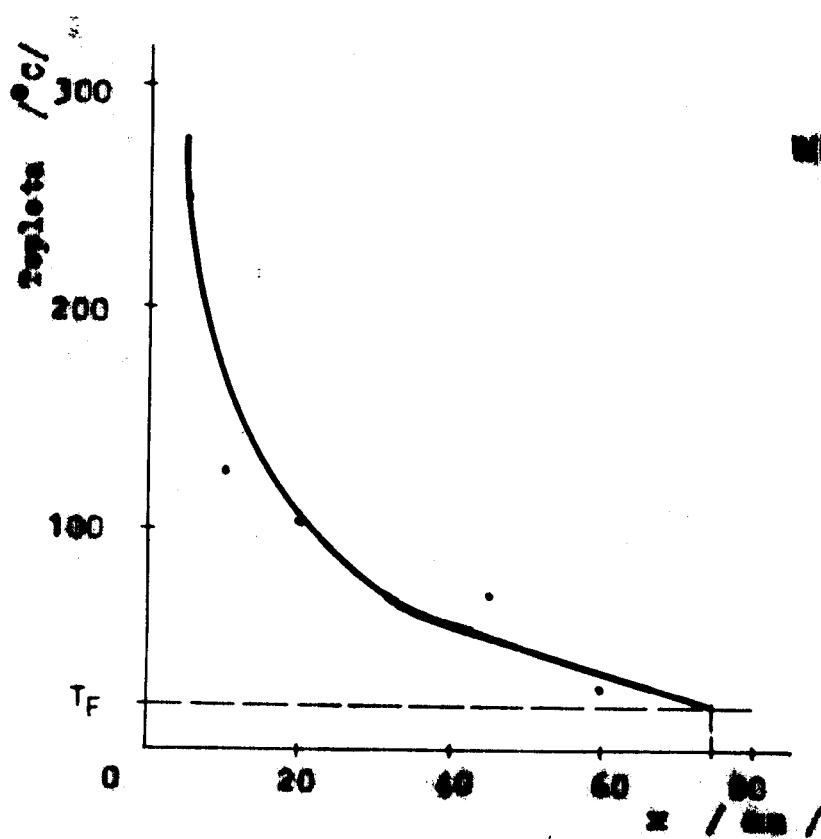
Měření č. 12



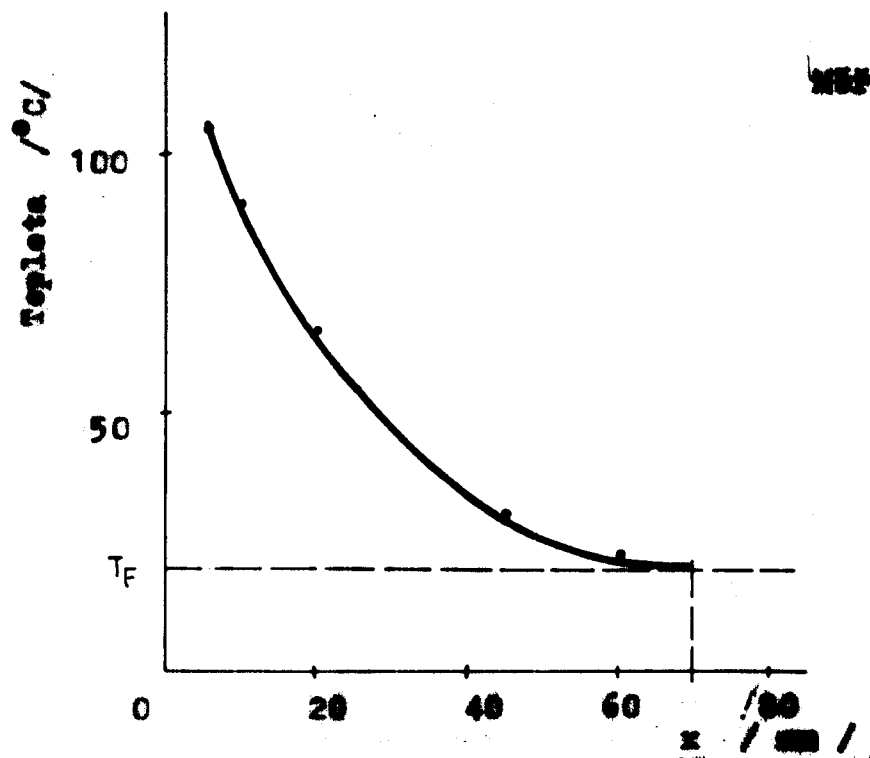
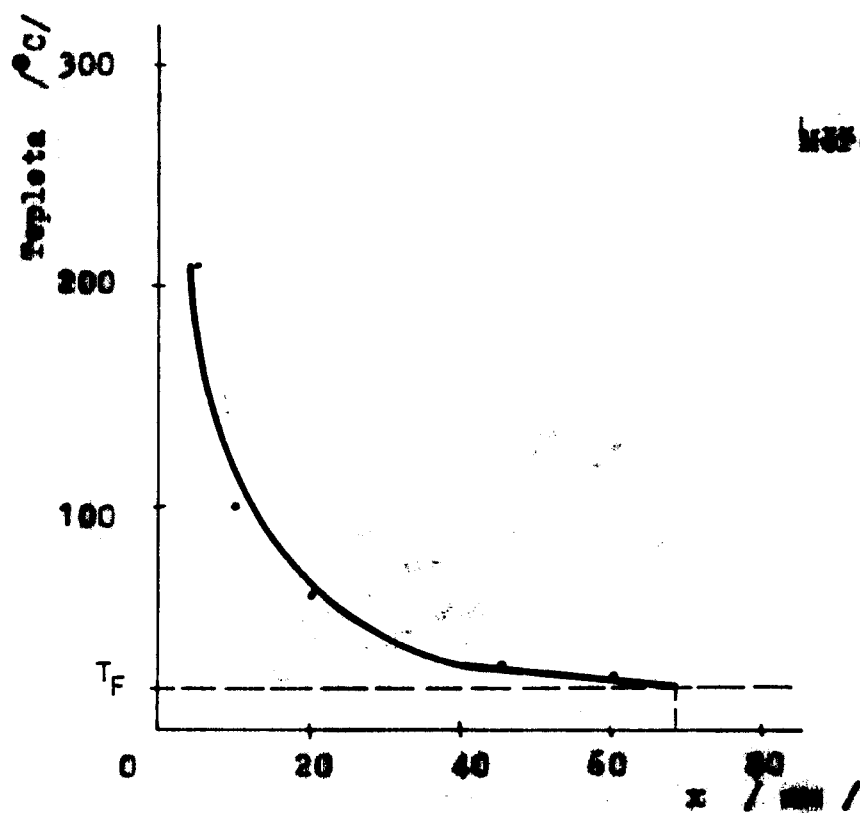
Obr. 3.8. - III Rozložení teplot ve slévárenské formě
v okamžiku ztuhnutí odlitku



Obr. 3.9. - I Rozložení teplot ve sčítárenské formě
v charakteru stálé odlišnosti



Obr. 1.9. - II Rozložení teplot ve srovnávací soustavě
v okamžiku státní odlišení



Obr. 1.9. - III Rozložení teplot ve středovém řezu
v okamžiku stuhnutí odlitku

Vypočtené hodnoty:

Dílčí stupeň paraboly dle vztahu (2.6):

$$n_1 = \frac{\log (142.9 - 20) - \log (660 - 20)}{\log \left(1 - \frac{0.0030}{0.0345} \right)} = 18.14$$

$$n_2 = 6.98, n_3 = 5.36, n_4 = 3.74, n_5 = 2.26$$

Výsledný stupeň paraboly dle vztahu (2.7):

$$n = \sqrt[5]{18.14 \cdot 6.98 \cdot 5.36 \cdot 3.74 \cdot 2.26}$$
$$n = 5.65$$

Stejně bylo postupováno i při stanovení stupně paraboly u dalších měření provedených na kokile. Tab.3.2.

Vztahů (2.6) a (2.7) bylo využito i pro výpočet stupně paraboly u měření na pískové formě. V tomto případě je však použit pouze klasický VEJNIK. Tab.3.3.

3.6.2 Stanovení součinitele tepelné akumulace slévárenské formy

Stanovení b_F bylo provedeno podle metod:

- | | |
|--------------------------------|--------------------------------------|
| a/ klasické VEJNIKOVY paraboly | $\Theta_{0f} = (T_{KR} - T_F),$ |
| b/ upravené VEJNIKOVY paraboly | $\Theta_{0f} = (0.75 T_{KR} - T_F),$ |
| c/ VEJNIKOVY sinusovky | $\Theta_{0f} = (0.75 T_{KR} - T_F),$ |
| d/ HALBARTA | $\Theta_{0f} = (0.75 T_{KR} - T_F).$ |

Ve všech případech bylo uvažováno přehřátí taveniny. Byly použity vztahy (2.11) a (2.13) a vztah pro VEJNIKOVU sinusovku, který je uveden v příloze č.2.

Hodnoty potřebné pro výpočty, které nebyly stanoveny

experimenty, byly získány výpočtem z literárně převzatých fyzikálních hodnot, které jsou uvedeny v tab.3.1.

Ukázka výpočtu b_F - klasický VEJNIK (pro hodnoty 1.měření):

Vstupní hodnoty:

$n = 5.65$; $M = 0.001 \text{ m}$; $\rho_M = 2380 \text{ kg.m}^{-3}$; $T_{KR} = 660^\circ\text{C}$;

$T_F = 20^\circ\text{C}$; $T_{i,t_i} = 800^\circ\text{C}$; $c_M = 1289 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$;

$L_{KR} = 396.1 \text{ kJ.kg}^{-1}$; $t_{uh} = 12.5 \text{ s}$

Tepelná akumulace slévárenské formy dle vztahu (2.11):

$$b_F = \sqrt{\frac{5.65 + 1}{2 \cdot 5.65}} \cdot \frac{0.01 \cdot 2380 \cdot [(800 - 660) \cdot 1289 + 396100]}{(660 - 20) \cdot \sqrt{12.5}}$$

$$b_F = 4652 \text{ W.s}^{1/2}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$$

Stejným postupem byly vypočítány i zbývající hodnoty b_F pro další měření. Získané výsledky byly zaznamenány do tab.3.2.

Obdobný postup byl použit i pro pískovou formu, kde se však nestanovovala hodnota b_F metodou upraveného VEJNIKA a hodnota efektivní teploty byla brána pouze $(T_{KR} - T_F)$. Vypočtené hodnoty b_F pro všechny tři metody jsou v tab.3.3.

3.6.3 Stanovení tepelné vodivosti slévárenské formy

Stanovení λ_F bylo provedeno způsoby:

- | | |
|--------------------------------|--------------------------------------|
| a/ klasické VEJNIKOVY paraboly | $\Theta_{ef} = (T_{KR} - T_F),$ |
| b/ upravené VEJNIKOVY paraboly | $\Theta_{ef} = (0.75 T_{KR} - T_F),$ |
| c/ VEJNIKOVY sinusovky | $\Theta_{ef} = (0.75 T_{KR} - T_F),$ |

K výpočtům byl použit vztah (2.16) a vztah z přílohy č.2. Hodnoty potřebné k výpočtu, které nebyly získány expe-

rimentem, byly opět vzaty z tab.3.1. Číselné hodnoty tepelné vodivosti pro jednotlivá měření při konkrétní teplotě formy jsou zaznamenány v tab.3.2.

Materiál	Měrné skupenské teplo L_{KR} [J.kg ⁻¹]	Měrné teplo taveniny c_M [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Hustota taveniny ρ_M [kg.m ⁻³]
Al 99.9%	396.1 . 10 ³	1289.5	2380
Zn 99.9%	110.9 . 10 ³	502.0	6700
Pb 99.9%	24.5 . 10 ³	113.0	10300

Při přehřátí taveniny $Q_c = (T_{lit} - T_{KR}) \cdot c_M + L_{KR}$

Tab.3.1. Hodnoty tepelně-fyzikálních veličin použitých čistých kovů dle PŘIBYLA [18].

Ukázka výpočtu λ_F - dle VEJNÍKOVY paraboly (1.měření):

Vstupní hodnoty:

$n = 5.65$; $M = 0.001$ m; $\rho_M = 2380$ kg.m⁻³; $T_{KR} = 660^\circ\text{C}$;

$T_F = 20^\circ\text{C}$; $T_{lit} = 800^\circ\text{C}$; $c_M = 1289$ J.kg⁻¹.K⁻¹;

$L_{KR} = 396.1$ kJ.kg⁻¹; $t_{un} = 12.5$ s; $X_2 = 0.0345$ m

Tepelná vodivost slévárenské formy dle vztahu (2.16):

$$\lambda_F = \frac{0.01 \cdot 0.0345 \cdot 2380 \cdot [(800-660) \cdot 1289 + 396100]}{2 \cdot 5.65 \cdot (660 - 20) \cdot \sqrt{12.5}}$$

$$\lambda_F = 5.24 \text{ W. m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Obdobně bylo postupováno při výpočtu podle b/ a c/.
Všechny vypočtené hodnoty λ_F jsou zapsány v tab.3.2.

Pro pískovou formu byly použity metody a/ a c/, pro obě

byla ovšem použita efektivní teplota pouze $(T_{KR} - T_F)$. Získané hodnoty jsou v tab.3.3.

3.6.4 Stanovení měrného tepla slévárenské formy

Stanovení c_F bylo provedeno způsoby:

- | | |
|--------------------------------|--------------------------------------|
| a/ klasické VEJNIKOVY paraboly | $\Theta_{ef} = (T_{KR} - T_F),$ |
| b/ upravené VEJNIKOVY paraboly | $\Theta_{ef} = (0.75 T_{KR} - T_F),$ |
| c/ VEJNIKOVY sinusovky | $\Theta_{ef} = (0.75 T_{KR} - T_F),$ |

Pro výpočet byl použit vztah (2.19) a vztah z přílohy č.2 a dále hodnoty přímo získané experimenty a také fyzikální hodnoty z tab.3.1. Ve všech měřeních bylo počítáno s přehřátím taveniny.

Ukázka výpočtu c_F - klasický VEJNIK (pro hodnoty 1. měření):

Vstupní hodnoty:

$$\begin{aligned} n &= 5.65; M = 0.001 \text{ m}; \rho_M = 2380 \text{ kg.m}^{-3}; T_{KR} = 660^\circ\text{C}; \\ T_F &= 20^\circ\text{C}; T_{lit} = 800^\circ\text{C}; c_M = 1289 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}; \\ L_{KR} &= 396.1 \text{ kJ.kg}^{-1}; t_{tuh} = 12.5 \text{ s}; X_2 = 0.0345 \text{ m}; \\ \rho_F &= 7200 \text{ kg.m}^{-3} \end{aligned}$$

Měrné teplo slévárenské formy dle vztahu (2.19):

$$c_F = (5.65 + 1) \cdot \frac{0.01 \cdot 2380 \cdot [(800-660) \cdot 1289 + 396100]}{0.0345 \cdot 7200 \cdot (660 - 20)}$$

$$c_F = 573.9 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

Stejný postup byl dodržen při stanovení měrného tepla i u zbývajících metod. Vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tab.3.2.

Stanovení c_F pískové formy bylo taktéž provedeno s použitím hodnot získaných experimenty a hodnot z tab. 3.1. podle

vztahu (2.19) a vztahu z přílohy č.2. Byly však použity pouze dvě metody, a to metoda a/ a c/ s efektivní teplotou ($T_{KR} - T_F$). Je to zapsáno v tab.3.3.

3.6.5 Stanovení teplotní vodivosti slévárenské formy

Teplotní vodivost slévárenské formy - kokily, byla stanovena pomocí tří způsobů:

- | | |
|--------------------------------|--------------------------------------|
| a/ klasické VEJNIKOVY paraboly | $\Theta_{ef} = (T_{KR} - T_F),$ |
| b/ upravené VEJNIKOVY paraboly | $\Theta_{ef} = (0.75 T_{KR} - T_F),$ |
| c/ VEJNIKOVY sinusovky | $\Theta_{ef} = (0.75 T_{KR} - T_F),$ |

Výpočet byl proveden pro hodnoty získané experimenty při daném přehřátí taveniny.

Ukázka výpočtu a_F - klasický VEJNIK (pro hodnoty 1. měření)

Vstupní hodnoty:

$$X_2 = 0.0345 \text{ m}; n = 5.56; t_{tuh} = 12.5 \text{ s}$$

$$a_F = \frac{0.0345^2}{2 \cdot 5.56 \cdot (5.56 + 1) \cdot 12.5}$$

$$a_F = 1.27 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Podobně byly stanoveny hodnoty pro zbývající metody a jsou zapsané v tab. 3.2.

Postup pro stanovení teplotní vodivosti pískové formy byl stejný, byly však použity pouze metody:

- | | |
|--------------------------------|---------------------------------|
| a/ klasické VEJNIKOVY paraboly | $\Theta_{ef} = (T_{KR} - T_F),$ |
| b/ VEJNIKOVY sinusovky | $\Theta_{ef} = (T_{KR} - T_F),$ |

Získané hodnoty jsou uvedeny v tab. 3.3.

Některé vztahy pro výpočet jednotlivých tepelně-fyzikálních veličin byly zpracovány na počítači, programy jsou

Tab. 3.2. Naměřené a vypočtené hodnoty

Měření číslo:	Podmínky experimentů	Teplota odlěveného kovu /°C/:	Čas tuhnutí odlitku /°C/	Teplota ve vzdálenosti x od				
				Vzdálenost x				
				0,003	0,010	0,015	0,022	0,
1.	Litínová kokila DESKA - čistý Al $T_F = 20^\circ\text{C}$	800	12,5	142,9	78,6	50,0	34,3	2
2.	Litínová kokila DESKA - čistý Al $T_F = 45^\circ\text{C}$	800	10,5	167,9	105,0	78,6	56,4	4
3.	Litínová kokila DESKA - čistý Al $T_F = 63^\circ\text{C}$	800	10,5	213,6	114,3	92,9	75,7	7
4.	Litínová kokila DESKA - čistý Al $T_F = 100^\circ\text{C}$	800	11,0	228,6	171,4	150,0	105,7	10
5.	Litínová kokila DESKA - čistý Al $T_F = 120^\circ\text{C}$	800	11,5	296,4	187,1	185,0	122,1	12
6.	Litínová kokila DESKA - čistý Al $T_F = 125^\circ\text{C}$	800	12,0	336,4	212,9	187,1	135,0	13
7.	Litínová kokila DESKA - čistý Al $T_F = 130^\circ\text{C}$	800	13,0	342,1	214,3	199,3	142,9	13
8.	Litínová kokila DESKA - čistý Al $T_F = 135^\circ\text{C}$	800	13,5	263,6	201,4	182,1	141,4	13
9.	Litínová kokila DESKA - čistý Al $T_F = 150^\circ\text{C}$	800	13,5	292,9	214,3	191,4	160,7	15
10.	Litínová kokila DESKA - čistý Al $T_F = 170^\circ\text{C}$	800	13,0	313,6	243,6	220,0	178,6	17
11.	Litínová kokila DESKA - čisté Pb $T_F = 20^\circ\text{C}$	365	11,0	60,0	50,0	42,0	33,0	2
12.	Litínová kokila DESKA - čistý Zn $T_F = 20^\circ\text{C}$	463	21,5	149,0	127,0	88,0	68,0	4

líce formy /°C/				Prohřátá vrstva formy x ₂ /°C/	Teplota líce formy /°C/	Efektivní teplota /°C/	Stupen paraboly /1/	Stupen upravené paraboly /1/
/m/								
0,30	0,040	0,055	0,070					
6,4	20,0	20,0	-	0,0345	640	475	5,65	5,03
8,6	45,0	45,0	-	0,0325	615	450	5,11	4,52
10,0	63,0	63,0	-	0,0340	597	432	5,29	4,61
12,9	100,0	100,0	-	0,0370	560	395	6,11	5,25
14,1	120,9	120,0	120,0	0,0405	540	375	5,30	4,52
16,7	126,8	125,0	125,0	0,0455	535	370	5,76	4,74
17,1	131,4	130,0	130,0	0,0465	530	365	5,84	4,77
17,9	135,5	135,0	135,0	0,0480	525	360	7,54	6,48
19,3	155,7	150,3	150,0	0,0510	510	345	7,12	5,98
17,1	172,9	170,9	170,0	0,0525	490	325	7,43	6,15
19,0	22,0	20,0	20,0	0,0440	307	225	6,04	5,38
17,0	32,0	20,0	20,0	0,0550	399	294	5,51	4,56

Dle VEJNIKOVY klas. parab.

Součinitel tepelné akumulace b_F $/W.s^{1/2}.m^{-2}.K^{-1}/$				Tepelná vodivost λ_F $/W.m^{-1}.K^{-1}/$	Měrné teplo c_F $/J.kg^{-1}.K^{-1}/$	Tepelná vodivost a_F
VEJNIK klasická parabola	VEJNIK upravená parabola	VEJNIK sinusovka	HALBART			
4652	6326	7647	7242	5,24	573,9	1,27.10 ⁻¹
5324	7354	8808	8340	6,65	519,7	1,16.10 ⁻¹
5469	7646	9175	8688	7,0	590,6	1,7.10 ⁻¹
5636	8082	9803	9283	6,7	654,0	1,4.10 ⁻¹
5777	8433	10099	9563	8,3	555,9	2,1.10 ⁻¹
5672	8331	10020	9488	8,5	523,6	2,3.10 ⁻¹
5495	8109	9759	9241	7,9	529,0	2,1.10 ⁻¹
5353	7881	9709	9194	6,2	645,9	1,3.10 ⁻¹
5530	8270	10132	9594	7,1	595,0	1,7.10 ⁻¹
5850	8929	10960	10378	7,7	618,6	1,7.10 ⁻¹
2224	3060	3720	2581	3,2	214,7	2,1.10 ⁻¹
3699	5103	6117	4268	5,2	367,2	2,0.10 ⁻¹

Dle VEJNÍKOVY uprav. parab. Dle VEJNÍKOVY sinusovky

$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} /$	Tepelná vodivost λ_F $/\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} /$	Měrné teplo c_F $/\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} /$	Teplotní vodivost a_F $/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} /$	Tepelná vodivost λ_F $/\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} /$	Měrné teplo c_F $/\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} /$	Teplotní vodivost a_F $/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} /$
0-6	7,9	701,2	$1,6 \cdot 10^{-6}$	25,3	320,0	$1,1 \cdot 10^{-5}$
0-6	10,4	719,3	$2,0 \cdot 10^{-6}$	30,0	358,6	$1,2 \cdot 10^{-5}$
-6	11,2	728,3	$2,1 \cdot 10^{-6}$	32,7	357,1	$1,3 \cdot 10^{-5}$
-6	11,1	814,4	$1,9 \cdot 10^{-6}$	37,2	359,0	$1,4 \cdot 10^{-5}$
-6	14,3	692,1	$2,9 \cdot 10^{-6}$	41,5	341,1	$1,7 \cdot 10^{-5}$
-6	14,8	649,8	$3,2 \cdot 10^{-6}$	44,3	315,0	$2,0 \cdot 10^{-5}$
-6	14,1	647,9	$3,0 \cdot 10^{-6}$	43,3	305,7	$2,0 \cdot 10^{-5}$
-6	10,5	825,5	$1,8 \cdot 10^{-6}$	43,1	303,5	$2,0 \cdot 10^{-5}$
-6	12,6	755,9	$2,3 \cdot 10^{-6}$	47,0	298,1	$2,2 \cdot 10^{-5}$
-6	13,9	798,1	$2,4 \cdot 10^{-6}$	54,8	304,5	$2,5 \cdot 10^{-5}$
-6	4,9	256,6	$2,6 \cdot 10^{-6}$	16,8	114,5	$2,0 \cdot 10^{-5}$
-6	8,5	425,8	$2,8 \cdot 10^{-6}$	24,7	210,6	$1,6 \cdot 10^{-5}$

Poznámka

$$L_c = 576\,560 \text{ J.kg}^{-1}$$

$$L_c = 28\,794 \text{ J.kg}^{-1}$$

$$L_c = 132\,988 \text{ J.kg}^{-1}$$

Tab. 3.3.

Naměřené a vypočtené hodnoty

Měření číslo	Podmínky experimentů	Teplota odlévaného kovu /°C/	Čas tuhnutí odlitku /°C/	Teplota ve vzdálenosti x		
				Vzdálenost x		
				0,005	0,010	0,020
13.	Písková forma DESKA - čistý Al $T_F = 20^\circ\text{C}$	720	210	135	110	105
14.	Písková forma DESKA - čistý Al $T_F = 20^\circ\text{C}$	720	180	300	115	105
15.	Písková forma DESKA - čistý Al $T_F = 20^\circ\text{C}$	720	210	250	128	101
16.	Písková forma DESKA - čisté Pb $T_F = 20^\circ\text{C}$	365	69	105	90	65
17.	Písková forma DESKA - čistý Zn $T_F = 20^\circ\text{C}$	463	192	210	100	95

od líce formy /°C/			Prohřátá vrstva formy X_2 /m/	Teplota líce formy /°C/	Stupeň paraboly /1/
/m/					
	0,045	0,060			
	103	45	0,070	640	7,77
	100	25	0,070	640	5,73
	70	24	0,075	640	6,40
	30	25	0,068	307	5,54
	30	25	0,070	399	5,30

Dle VEJNIKOVY klas. parat

Součinitel tepelné akumulace b_F /W.s ^{1/2} .m ⁻² .K ⁻¹ /			Tepelná vodivost λ_{F-1} .K ⁻¹ / /W.m ⁻¹ .K ⁻¹ /	Měrné teplo c_F /J.kg ⁻¹ .K ⁻¹ /	Teplotní vodivost a_F
VEJNIK klasická parabola	VEJNIK sinusovka	HALBART			
913	1137	1077	0,4	1297,6	1,7.1
1006	1228	1163	0,6	995,8	3,5.1
924	1137	1077	0,5	1021,9	2,8.1
894	1088	1031	0,9	546,5	9,2.1
1243	1508	1428	0,8	1182,3	3,8.1

9. Dle VEJNÍKOVY sinusovky

$/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}/$	Tepelná vodivost λ_F $/\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}/$	Měrné teplo c_F $/\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}/$	Teplotní vodivost a_F $/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}/$	Poznámka
0^{-7}	1,9	407,2	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$L_c = 473\,470 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$
0^{-7}	2,2	407,2	$3,2 \cdot 10^{-6}$	
0^{-7}	2,1	367,3	$3,4 \cdot 10^{-6}$	
0^{-7}	3,1	223,4	$8,2 \cdot 10^{-6}$	$L_c = 28\,794 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$
0^{-7}	2,6	516,4	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$L_c = 132\,988 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$

uvedeny v příloze č.7 a č. 8.

Hodnoty v tab. 3.2. a 3.3. jsou přiměřeně zaokrouhleny.

3.7 SHRNUTÍ ZÍSKANÝCH HODNOT TEPELNĚ-FYZIKÁLNÍCH VELIČIN

Pro výpočet tepelně-fyzikálních veličin byly použity čtyři metody: 1/ VEJNIKOVA klasická parabola,

2/ VEJNIKOVA upravená parabola,

3/ VEJNIKOVA sinusovka,

4/ HALBARTOVA.

Pro získání vstupních hodnot byly provedeny experimenty, kdy jako odlévaný materiál byl použit čistý Al 99.9 % s konstantní teplotou lití 800 °C a předeřev litinové kokily 200 x 300 x 400 mm byl volen 20, 45, 63, 100, 120, 125, 130, 135, 150 a 170 °C. Dále byl orientačně odlit čistý zinek (z teploty 463 °C) a čisté olovo (z teploty 365 °C) do kokily s počáteční teplotou 20 °C.

Pro srovnání byla provedena také odlití do pískové formy ($T_f = 20$ °C). Jednalo se o tři experimenty s Al 99.9 %, kdy teplota odlévaného kovu byla 720 °C a po jednom experimentu se zinkem (teplota lití byla 463 °C) a s olovem (teplota odlévaného kovu byla 365 °C).

Při stanovení licích teplot byl brán zřetel na tzv. homologickou teplotu.

Ze získaných hodnot byly sestrojeny závislosti

Pozn. V okamžiku, kdy známe hodnoty c_F , λ_F (tab.3.2. a 3.3.) můžeme provést orientační kontrolu, zda je výpočet správný. Použijeme k tomu vztahu (1.1) a hodnoty $\rho_F = 7\ 200\ \text{kg.m}^{-3}$ - pro kokilu (popř. $\rho_F = 1\ 700\ \text{kg.m}^{-3}$ - pro pískovou formu). Pro měření č.1:

$$b_F = \sqrt{573.9 \cdot 5.24 \cdot 7200}$$
$$b_F = 4653\ \text{W.s}^{1/2}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$$

Hodnota je blízká hodnotě vypočtené dle vztahu (2.11), z toho se dá usuzovat, že výpočet byl proveden správně. Případné odchylky (řádově až desítkové) jsou dané zaokrouhlováním a nepřesností vztahu (1.1).

tepelně-fyzikálních veličin na teplotě předehřevu formy, obr.3.10. - 3.13.

Při bližším pohledu na obr.3.10 - Závislost součinitele tepelné akumulace slévárenské formy na teplotě předehřevu kokily, je patrné, že součinitel b_F s rostoucí teplotou T_F není, jak bychom mohli předpokládat, lineárně rostoucí. Průběh křivky lze rozdělit do čtyřech částí:

- | | |
|--|-------------|
| a/ $T_F = 20 - 63 \text{ } ^\circ\text{C}$ | b_F roste |
| b/ $T_F = 63 - 120 \text{ } ^\circ\text{C}$ | b_F roste |
| c/ $T_F = 120 - 135 \text{ } ^\circ\text{C}$ | b_F klesá |
| d/ $T_F = 135 - 170 \text{ } ^\circ\text{C}$ | b_F roste |

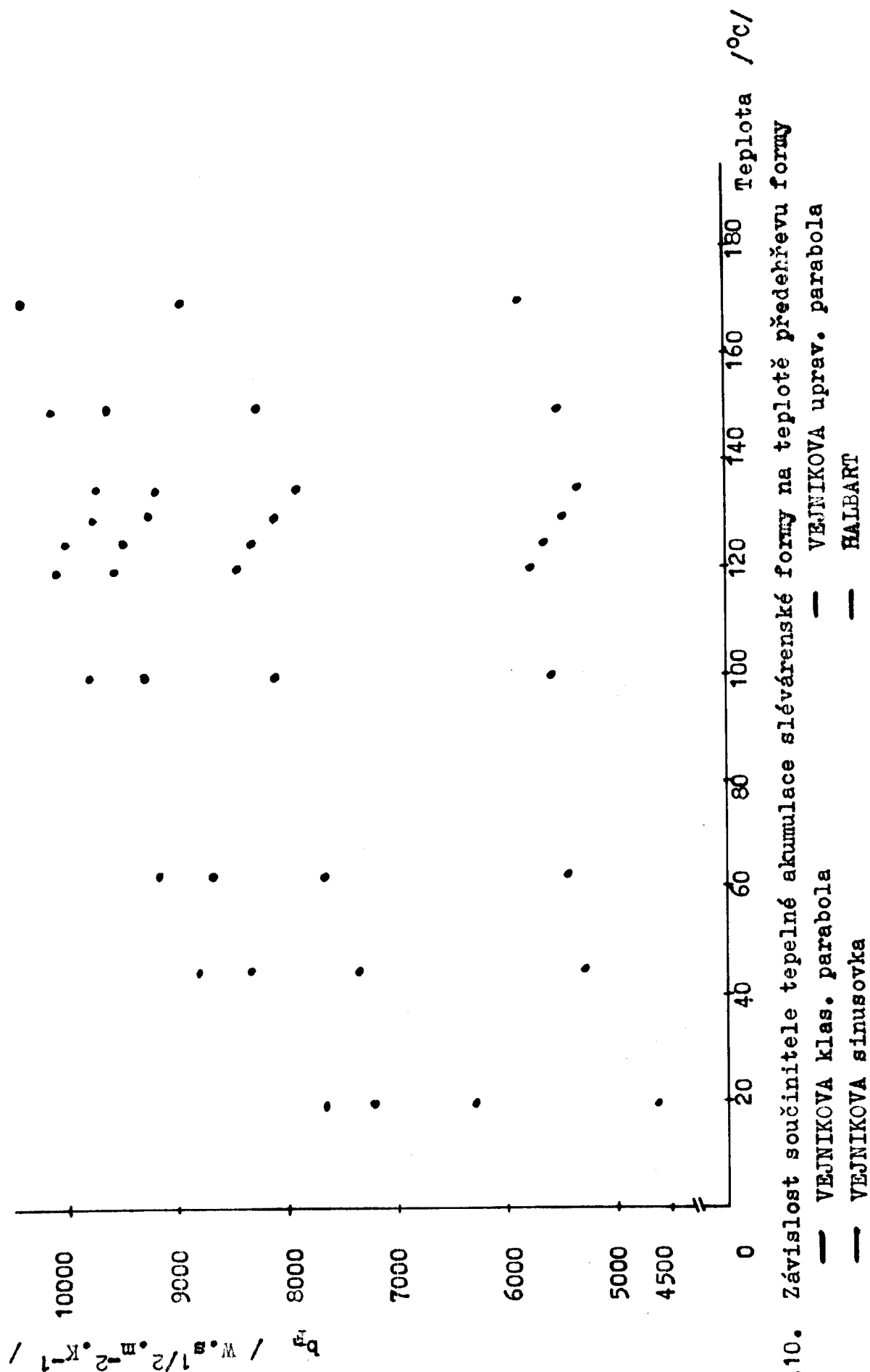
Obdobně je to i u dalších závislostí tepelně-fyzikálních veličin na teplotě formy.

Obecně je známo, že tepelná vodivost materiálu s rostoucí teplotou klesá. Avšak při pohledu na obr. 3.11. je patrné, že tepelná vodivost při měření spíše rostla. U VEJNIKOVY klasické paraboly to bylo o $30 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. U zbývajících dvou metod nebyl nárůst tak vysoký (zhruba $7 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

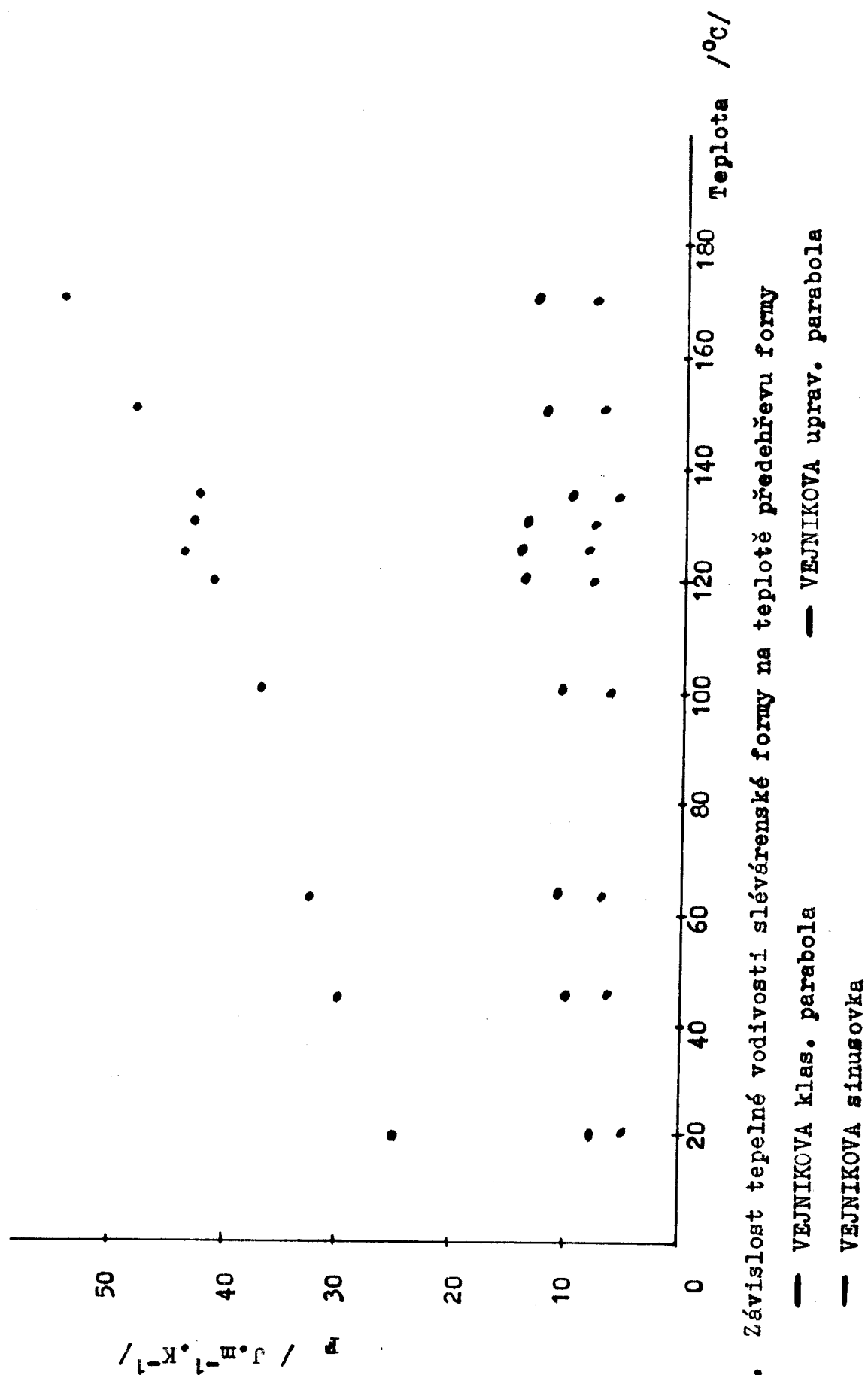
V literatuře se uvádí, že měrné teplo s rostoucí teplotou roste, což se v podstatě potvrdilo i při experimentech. Ovšem v rozmezí $100 - 125 \text{ } ^\circ\text{C}$ došlo k určitému poklesu.

Teplotní vodivost dle fyzikálních zákonů s rostoucí teplotou klesá. Při provedených experimentech je však její závislost jiná. U VEJNIKOVY sinusovky jasně teplotní vodivost roste. U metod dle "klasické a upravené" paraboly je závislost skoro konstantní.

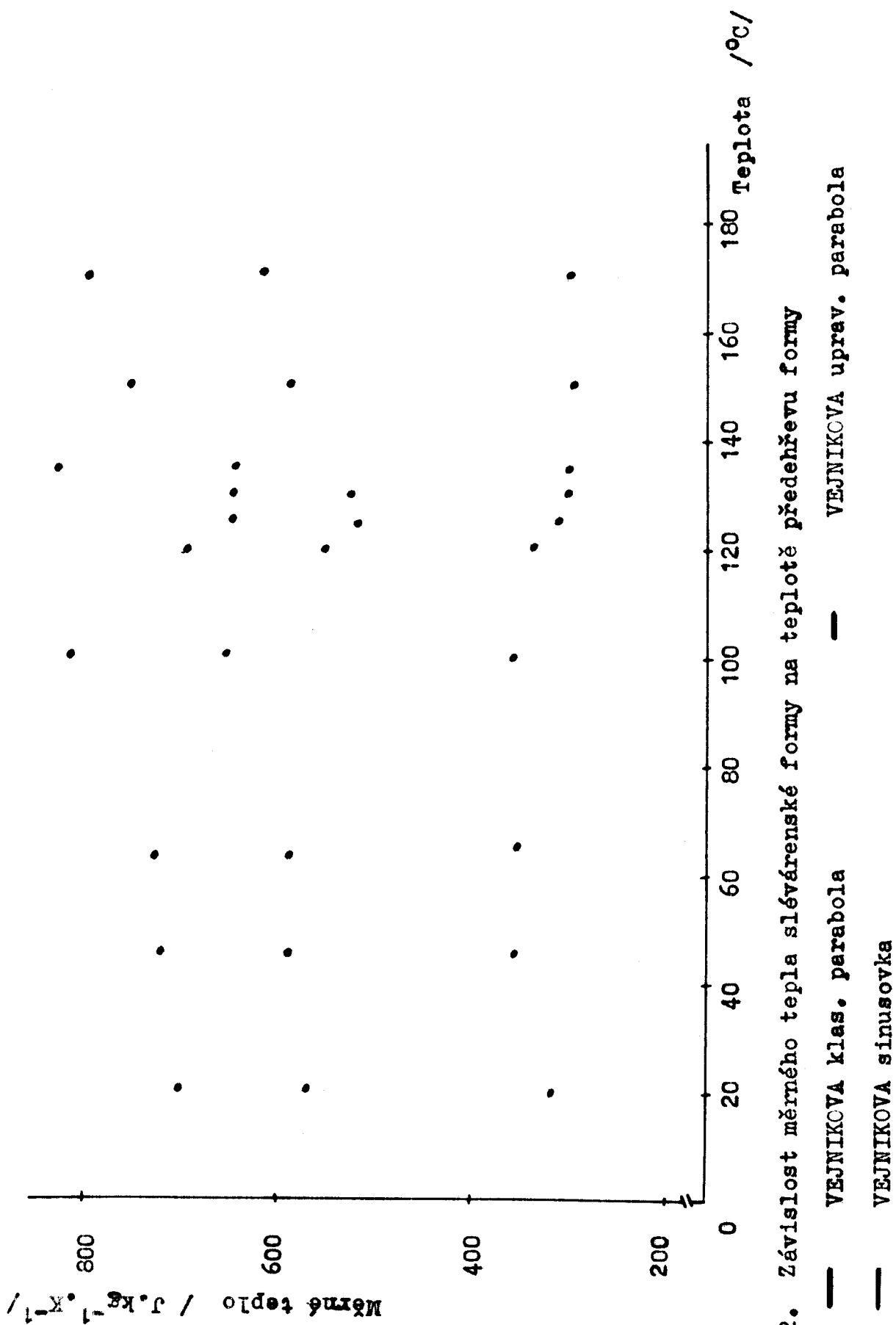
Tyto odlišnosti by se daly vysvětlit tím, že pro experimenty byla použita litinová kokila. A jak je známo, tak litina je heterogenní materiál, který se projevuje jinak než čistý kov. Rozdíl který nastal, může dále spočívat v metodě pou-



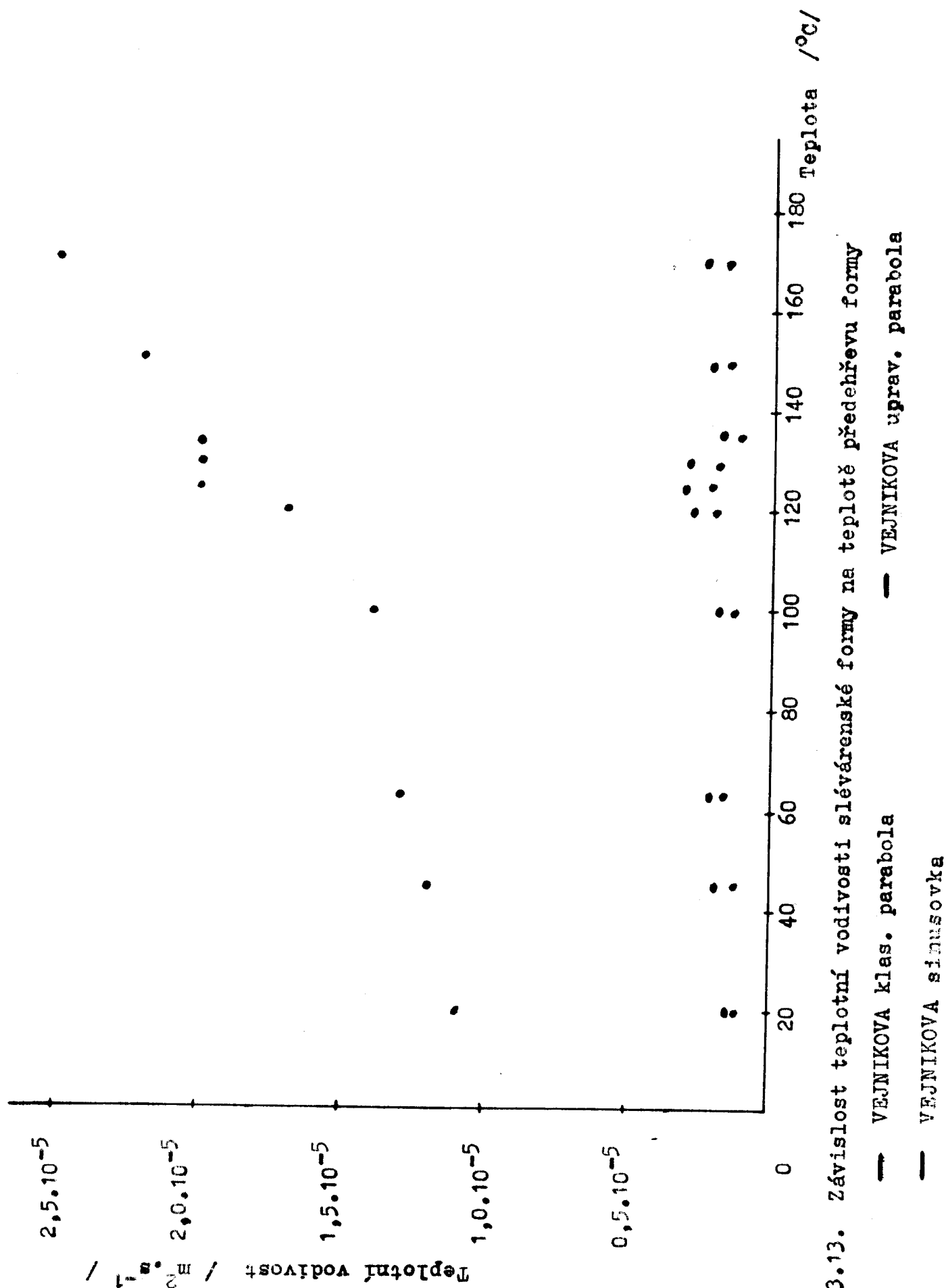
Obr. 3.10. Závislost součinitele tepelné akumulace slévárenské formy na teplotě přehřevu formy



Obr. 3.11. Závislost tepelné vodivosti slévárenské formy na teplotě předehřevu formy



Obr. 3.12. Závislost měrného tepla slévárenské formy na teplotě předehřevu formy



Obr. 3.13. Závislost teplotní vodivosti slévárenské formy na teplotě předehřevu formy

— VEJNIKOVA klas. parabola

--- VEJNIKOVA uprav. parabola

- · - VEJNIKOVA sinusovka

žité pro stanovení těchto tepelně-fyzikálních veličin.

3.7.1 Hodnoty b_f

Ze získaných výsledků je patrné, že nejvyšší hodnoty byly získány při výpočtu podle VEJNIKOVY sinusovky, potom podle HALBARTOVY metody. Nejnižší hodnoty součinitele tepelné akumulace byly vypočteny při stanovení podle VEJNIKOVY upravené paraboly a hlavně při použití klasické VEJNIKOVY paraboly.

Získané hodnoty při různých podmínkách experimentů se při odlévání hliníku pohybují od $4652 \text{ W.s}^{1/2}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ (dle klasického VEJNIKA) do $10378 \text{ W.s}^{1/2}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ (zjištěno podle HALBARTA).

U klasické VEJNIKOVY metody byly zjištěny hodnoty od 4652 do $5850 \text{ W.s}^{1/2}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. A při upravené této metodě, tj. $\Theta_{ef} = 0.75 T_{KR} - T_f$ a ne pouze $\Theta = T_{KR} - T_f$, byly tyto hodnoty již 6326 až $8929 \text{ W.s}^{1/2}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Tyto hodnoty jsou zhruba o 45 % vyšší než hodnoty dle klasického VEJNIKA.

Blízké, co do velikosti, jsou si hodnoty pro jednotlivá měření stanovené dle VEJNIKOVY sinusovky (od 7647 do $10960 \text{ W.s}^{1/2}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) a HALBARTA (7242 až $10378 \text{ W.s}^{1/2}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$). Rozdíl mezi nimi činí průměrně $500 \text{ W.s}^{1/2}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$.

Je možno pozorovat, že hodnoty b_f jsou nižší u metod, kde byl k výpočtu použit stupeň paraboly.

Hodnoty tepelné akumulace formy pro Zn se pohybují, dle použité metody, v rozmezí 3699 do $6117 \text{ W.s}^{1/2}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Nejvyšší hodnota byla opět stanovena pomocí VEJNIKOVY sinusovky.

Hodnoty pro Pb byly zjištěny podstatně nižší; od $2224 \text{ W.s}^{1/2}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ (VEJNIKOVA parabola) do $3720 \text{ W.s}^{1/2}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ (VEJNIKOVA sinusovka).

Hodnoty získané pro pískové formy při lití Al byly nesrovnatelně nižší, 913 až 1228 $\text{W.s}^{1/2}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Konkrétní velikost b_F závisí na použité metodě.

Při odlévání Zn a Pb jsou zjištěné hodnoty přibližně tři krát nižší než hodnoty pro kokilu (zinek 1243 až 1508 $\text{W.s}^{1/2}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ a olovo 894 až 1088 $\text{W.s}^{1/2}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$).

3.7.2 Hodnoty λ_F , c_F , a_F

Rozmezí získaných hodnot tepelné vodivosti je velmi široké a závisí na metodě výpočtu. Číselné hodnoty se pohybují od 5.24 do 54.8 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Nejvyšší hodnoty byly získány metodou podle VEJNIKOVY sinusovky.

Nejvyšší měrné teplo bylo stanoveno podle VEJNIKOVY upravené paraboly 798.1 $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ a nejnižší 303.7 $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ podle VEJNIKOVY sinusovky. Ostatní hodnoty jsou v jejich rozmezí.

Velký rozdíl je mezi teplotní vodivostí spočtenou dle VEJNIKOVY sinusovky ($1.1 \cdot 10^{-6}$ až $2.5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) a podle zbylých dvou metod, kdy se pohybuje v rozmezí $1.27 \cdot 10^{-6}$ až $3.2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-2}.\text{s}^{-1}$.

Hodnoty pro olovo i zinek jsou mimo teplotní vodivosti všechny nižší než hodnoty pro hliník při stejných počátečních podmínkách.

Pískové formy

Zde byly uplatněny pouze výpočty podle klasické VEJNIKOVY paraboly a VEJNIKOVY sinusovky. Bylo zjištěno:

$$\lambda_F \quad 0.4 - 3.1 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

$$c_F \quad 223.4 - 1297 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

$$a_F \quad 1.7 \cdot 10^{-7} - 8.2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-2}.\text{s}^{-1}$$

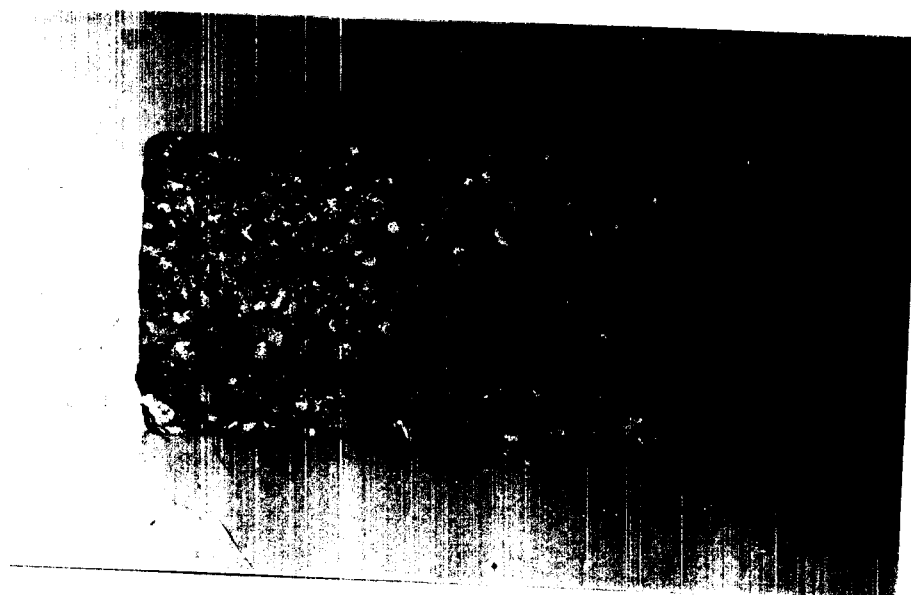
Konkrétní hodnoty závisí, mimo jiné, na materiálu odlévaného

kovu.

Rozdíly ve zjištěných výsledcích, které jsou patrné z tab. 3.2 a 3.3, můžeme přičíst rozdílnosti principů jednotlivých metod.



Obr. 3.14. Makrostruktura Al vzorku při $T_F = 20\text{ °C}$.

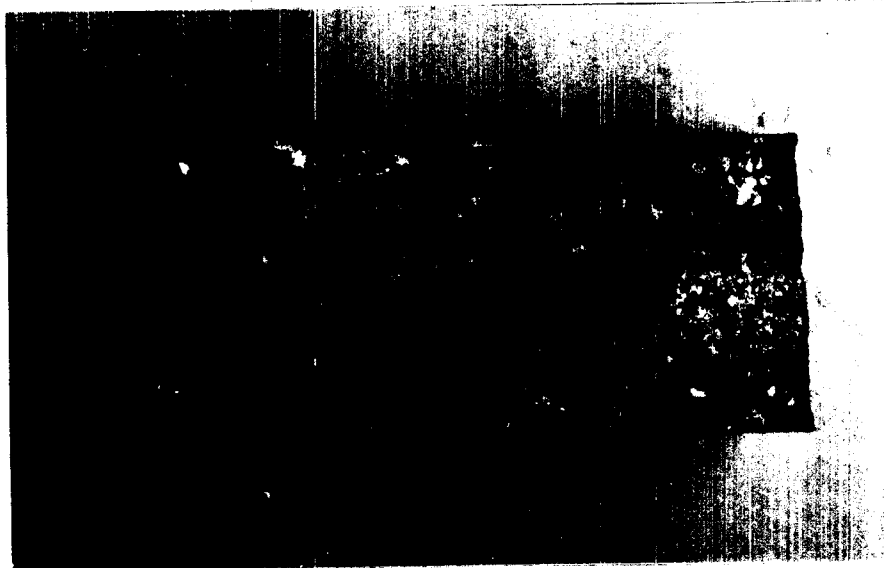


Obr 3.15. Makrostruktura Al vzorku při $T_F = 63\text{ °C}$.

V rámci studia tepelně-fyzikálních vlastností formy se odebraly vzorky z odlitých desek a byl proveden rozbor

makrostruktury. Byla snaha zjistit vliv teploty formy (kokily), při stejných ostatních počátečních podmínkách, na velikost zrna.

Byly vybrány a fotograficky zachyceny vzorky s počáteční teplotou formy 20, 63 a 130 °C. Teoreticky by mělo platit, čím nižší teplota přehřevu formy, tím menší krystaly v struktuře odlitku. Prakticky se to však vůbec nepotvrdilo, což dokumentují fotky. Obr. 3.14. - 3.16.



Obr. 3.16. Makrostruktura Al vzorku při $T_f = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Na fotkách je však alespoň možno pozorovat vliv podložky, která byla z azbestu a ten, jak je všeobecně známo, izoluje. Na levé straně fotek jsou vždy krystaly podstatně větší, protože právě zde byl spodek odlitku a ten se dotýkal azbestové podložky. Nedochozelo zde k rychlému odvodu tepla jako u líce kokily, tudíž krystaly měly dostatek času vyrůst.

4. DISKUSE VÝSLEDKŮ

Výsledky, které přináší tato práce, můžeme zařadit mezi dílčí informace v oblasti sledování tepelně-fyzikálních vlastností slévárenských forem a jejich teplotních polí po odlití. Jedná se o malou část problematiky a to odlévání především Al 99.9 % do litinové kokily s feriticko-perlitickou strukturou při teplotách jejího předehřevu 20 až 170 °C. Většina měření byla provedena s pomocí počítače.

Výsledky práce se mohou shrnout do několika základních oblastí:

1. S pomocí literatury byla provedena rešerše problematiky teplotních polí, kde byly stručně charakterizovány jednotlivé metody stanovení tepelné akumulace slévárenské formy a ostatních tepelně-fyzikálních veličin.

Největší pozornost byla věnována metodě podle VEJNIKA, který rozložení teplot v okamžiku ztuhnutí odlitku nahrazuje parabolou. VEJNIK metodu uplatňoval hlavně pro pískové formy a tuto problematiku rozebírá ve svých publikacích [24 - 27], kdy neuvažuje přehřátí taveniny a tedy při výpočtu vychází pouze z L_{KR} , neboť přehřátí taveniny u pískových forem výrazně prodlužuje dobu tuhnutí odlitku a tím i snižuje br.

A právě zde je jedna z důležitých odlišností, protože u kovové formy hraje velkou roli právě toto přehřátí taveniny. Proto bylo ve výpočtech nahrazeno latentní krystalizační teplo L_{KR} celkovým latentním teplem L_c (2.11). Jak se ukazuje z experimentů prováděných na KSM VŠST, přehřátí taveniny při lití do kovové formy neovlivňuje čas tuhnutí a tím tedy přispívá k zvýšení čitatele výrazu (2.11) a po-

zitivně působí na hodnotu br .

Druhou odlišnost lze spatřovat i v definování efektivní teploty, která je pro výpočty hodnot sledovaných veličin velmi důležitá. Pro kokily není zdaleka tak vhodné použít $T_{KR} - T_F$. HAVLÍČEK ve své práci [10] uvádí, že teplota rozhraní se u kokil mění. K tomu přispívají tepelně-fyzikální vlastnosti formy, ale také velkou roli hraje vznik mezery mezi odlitkem a formou.

2. Prováděné experimenty, které byly zaměřeny na sledování hodnot tepelně-fyzikálních veličin slévárenské formy (br , cr , λ_F , af), lze rozdělit do dvou částí - z hlediska použité formy. U kokily byl k experimentům pro registraci teploty použit AT počítač a u pískové formy se teploty zaznamenávaly pomocí šestibodového zapisovače, který je postačující pro registraci potřebných časových průběhů teplotních závislostí.

Pro odlévání byl použit hliník a v jednom případě zinek a olovo.

Počáteční teplota formy pro jednotlivá měření byla v rozmezí 20 až 170 °C, což je pod hranicí běžných předehřevů v praxi.

3. Naměřené hodnoty v jednotlivých experimentech byly zpracovány podle metod:

a/ VEJNIKOVA parabola - pro efektivní teplotu ($T_{KR} - T_F$) je tato metoda nazývána klasickou VEJNIKOVOU metodou. Vzhledem k aplikaci již dříve uvedených poznatků o kovových formách byla použita ještě metoda "upravené paraboly".

b/ VEJNIKOVA sinusovka - tato metoda již uplatňuje určité poznatky o kovových formách.

c/ metoda HALBARTOVA - tato metoda je počítána orientačně, neboť zavádí určité zjednodušující předpoklady, které vedou ke zkreslení výsledků.

Je vhodné si připomenout všechny zjednodušující předpoklady, které byly využity pro zpracování experimentů:

1. Slévárenská forma i odlitek představují polonekonečný prostor a pro řešení byla využita Fourierova diferenciální rovnice pro jednorozměrný přenos tepla.
2. Forma i odlitek představují homogenní těleso.
3. Efektivní teplota je při tuhnutí konstantní.
4. Hodnoty veličin c , L , ρ jsou známy a konstantní během tuhnutí.
5. Doba odlévání je velmi malá; $t \rightarrow 0$.
6. Odvod tepla přehřátí taveniny a tuhnutí probíhají současně.
7. Efektivní teplota je nižší než $(T_{KR} - T_F)$.
8. Vzniklá mezera mezi odlitkem a formou příliš neovlivňuje je tuhnutí odlitku.

Nesmíme zapomenout na význam efektivní teploty, která je uplatňována ve výpočtech. Pojem efektivní teplota zavádí při svých úvahách VEJNIK, je však možné se setkat i s názvem teplota rozhraní, který ve svých pracích používá HALBART. Ze vztahu (2.11) a (2.13) je ale zřejmé, že fyzikální význam těchto hodnot je stejný.

U pískových forem bylo zjištěno, že teplota rozhraní, resp. efektivní teplota se blíží teplotě krystalizace odlévaného kovu. Podle VEJNIKA [25], kdy dělal rozbor tuhnutí odlitků litých do pískových forem, se nechá teplotní rozhraní stanovit pomocí poměru součinitele tepelné akumulace slévárenské formy a odlitku b_f/b_o a z rozdílů teplot

krystalizace a rozhraní $(T_{KR}-T_{PR})/(T_{PR}-T_{KR})$.

Problematikou teploty na rozhraní forma - kov se zabýval ANISOVIČ a uvažuje tuto hodnotu jako 50 - 70 % teploty krystalizace odlévaného kovu.

Kovová forma se vyznačuje vyšší intenzitou přestupu tepla mezi odlitkem a formou, jak vyplývá z teorie tepelných kritérií, v tomto případě Biotova kritéria, které vyjadřuje souvislost součinitele přestupu tepla α (v našem případě přestup tepla z odlitku do formy), potom tloušťky tělesa - formy (rozměr X_2) a tepelné vodivosti materiálu formy. Z toho je zřejmé, že teplota na rozhraní u kovových forem nebude tak vysoká, jako u pískových forem.

Ve své práci jsem použila, na základě uvedených poznatků, teplotu rozhraní $0.75 \cdot T_{KR}$, avšak jsem si vědoma určité nepřesnosti, která bude nějakým způsobem ovlivňovat hodnotu Br i ostatní tepelně-fyzikální veličiny. Nejvhodnější by bylo, aby při každém měření byla též experimentálně stanovena tato teplota. Avšak to je velmi složité, zvláště v případě, že se pracuje s velmi hmotnými kokilami.

U kovových forem, používaných pro výrobu kvalitních odlitků, je důležitá hodnota jejich přehřevu (resp. teplota formy). Bez přehřevu formy by odlitek rychle tuhnul a na povrchu by vznikaly vady - závaly.

Pracovní teplota kokil se pohybuje okolo 300 - 350°C. V této souvislosti je třeba vysvětlit, proč byly naše experimenty prováděny při teplotách nižších. Bylo to z toho důvodu, že bylo třeba vysvětlit velký rozptyl hodnot právě v tomto teplotním intervalu, který byl při minulých měřeních zjištěn pouze informativně.

Z hodnoty T_{ef} je patrné, že s rostoucí teplotou formy se snižuje efektivní teplota a tím se zvyšují hodnoty br (při neměnných dalších hodnotách potřebných pro výpočet).

Ještě je vhodné se zastavit u měření teploty odlitku, s jejíž pomocí se stanovuje čas tuhnutí. U některých měření se musel vzít ohled na předčasné spuštění počítače, a proto došlo k úpravě času tuhnutí (patrné z přílohy č.1 - Grafické záznamy experimentů)

Závěrem této části práce je třeba připomenout ještě další faktor, který ovlivňuje tepelné pochody mezi odlitkem a formou a tím i hodnoty dalších veličin; je jím vznik mezery. Ve svých úvahách jsem pro výpočet uvedených veličin vznik mezery zanedbala.

V této souvislosti je nutno poukázat na studii NECHENDZIHO a GIRŠOVIČE, kteří ve vztahu pro výpočet br uvažují opravné koeficienty nejen na vznik mezery, ale také na přehřátí taveniny a na interval tuhnutí slitiny, jak uvádí EXNER [6]. Tento vztah v mé práci není uveden.

Problematiku vzniku mezery popisuje ve svých publikacích HAVLÍČEK [11] a další autoři, ale odsud není zřejmé, jak tuto problematiku zahrnout do vztahu pro výpočet br .

4. Naměřené hodnoty lze shnout:

Stanovené hodnoty tepelně-fyzikálních veličin se pohybují v poměrně širokém intervalu hodnot. Oproti hodnotám publikovaným, jsem se snažila o uvedení i podmínek experimentů a to proto, jak uvádí HAVLÍČEK [11], že součinitel br není konstantou, ale je závislý na mnoha činitelích (teplota přehřevu formy, odlévavý materiál a teplota jeho přehřátí, tvar odlitku).

Literárně uváděné hodnoty dosahují širokého rozmezí

a nemají často blíže specifikované podmínky lití. Nejvyšší hodnotu pro litinové kokily stanovil VEJNIK (14511 $\text{W.s}^{1/2}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$), avšak neuvádí metodu, kterou tento výsledek získal a ani další podmínky měření. HAVLÍČEK uvádí hodnoty 4224 - 6298 $\text{W.s}^{1/2}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$.

Hodnoty b_f (pro kokilu), které jsem získala měřením při odlévání hliníku, jsou pro lepší přehlednost seřazeny vzestupně v tab. 4.1.

metoda	b_f [$\text{W.s}^{1/2}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$]
VEJNIKOVA klas. parabola	4652 - 5850
VEJNIKOVA uprav. parabola	6326 - 8929
HALBART	7242 - 10378
VEJNIKOVA sinusovka	7647 - 10960

Tab.4.1. Intervaly naměřených hodnot b_f u jednotlivých metod výpočtu (odlévaný materiál - hliník).

Hodnoty získané při odlévání zinku a olova jsou shrnuty obdobně v tab. 4.2. a 4.3.

metoda	b_f [$\text{W.s}^{1/2}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$]
VEJNIKOVA klas. parabola	3699
HALBART	4268
VEJNIKOVA uprav. parabola	5103
VEJNIKOVA sinusovka	6117

Tab.4.2. Naměřené hodnoty b_f u jednotlivých metod výpočtu (odlévaný materiál - zinek).

metoda	b_f [$\text{W.s}^{1/2}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$]
VEJNIKOVA klas. parabola	2224
HALBART	2581
VEJNIKOVA uprav. parabola	3060
VEJNIKOVA sinusovka	3720

Tab.4.3. Naměřené hodnoty b_f u jednotlivých metod výpočtu (odlévaný materiál - olovo).

Pokud sledujeme závislost tepelné akumulace formy na

teplotě přehřevu kokily, pak lze říci, že hodnoty c_F vykazují při určitých teplotách různé hodnoty. Celý průběh sledované veličiny (obr. 3.10.) můžeme rozdělit do čtyř částí. Z počátku hodnoty rostou až do teploty $63\text{ }^{\circ}\text{C}$, kde dochází ke zlomu a zpomalení růstu, který je ukončen při $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Od této teploty dochází k poklesu, který se zastaví na $135\text{ }^{\circ}\text{C}$. V poslední části dochází opět k nárůstu hodnot.

Hodnoty měrného tepla stanovené různými metodami při odlévání hliníku jsou uvedeny v tab. 4.4., zinku v tab. 4.5. a olova v tab. 4.6.

metoda	c_F [$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$]
VEJNIKOVA sinusovka	298.1 - 358.6
VEJNIKOVA klas. parabola	573.9 - 645.9
VEJNIKOVA uprav. parabola	647.9 - 825.5

Tab. 4.4. Intervaly naměřených hodnot c_F u jednotlivých metod výpočtu (odlévaný materiál - hliník).

metoda	c_F [$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$]
VEJNIKOVA sinusovka	210.6
VEJNIKOVA klas. parabola	367.2
VEJNIKOVA uprav. parabola	425.8

Tab. 4.5. Naměřené hodnoty c_F u jednotlivých metod výpočtu (odlévaný materiál - zinek).

metoda	c_F [$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$]
VEJNIKOVA sinusovka	114.5
VEJNIKOVA klas. parabola	214.7
VEJNIKOVA uprav. parabola	265.6

Tab. 4.6. Naměřené hodnoty c_F u jednotlivých metod výpočtu (odlévaný materiál - olovo).

Hodnoty tepelné vodivosti získané při výpočtu různými metodami jsou uvedeny pro odlévání hliníku v tab. 4.7., zinku

v tab. 4.8. a olova v tab. 4.9.

metoda	λ_F [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
VEJNIKOVA klas. parabola	5.2 - 8.5
VEJNIKOVA uprav. parabola	7.9 - 13.9
VEJNIKOVA sinusovka	25.3 - 44.3

Tab. 4.7. Intervaly naměřených hodnot λ_F u jednotlivých metod výpočtu (odlévaný materiál - hliník).

metoda	λ_F [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
VEJNIKOVA klas. parabola	5.2
VEJNIKOVA uprav. parabola	8.5
VEJNIKOVA sinusovka	24.7

Tab. 4.8. Naměřené hodnoty λ_F u jednotlivých metod výpočtu (odlévaný materiál - zinek).

metoda	λ_F [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
VEJNIKOVA klas. parabola	3.2
VEJNIKOVA uprav. parabola	4.9
VEJNIKOVA sinusovka	16.3

Tab. 4.9. Naměřené hodnoty λ_F u jednotlivých metod výpočtu (odlévaný materiál - olovo).

Poslední určovanou hodnotou byla teplotní vodivost. Její hodnoty získané při výpočtu různými metodami jsou uvedeny pro odlévání hliníku v tab. 4.10., zinku v tab. 4.11. a olova v tab. 4.12.

metoda	α_F [m ² .s ⁻¹]
VEJNIKOVA klas. parabola	1.3 .10 ⁻⁶ - 2.3 .10 ⁻⁶
VEJNIKOVA uprav. parabola	1.6 .10 ⁻⁶ - 3.2 .10 ⁻⁶
VEJNIKOVA sinusovka	1.1 .10 ⁻⁶ - 2.5 .10 ⁻⁶

Tab. 4.10. Intervaly naměřených hodnot α_F u jednotlivých metod výpočtu (odlévaný materiál - hliník).

Fyzikální zákonitosti týkající se tepelně-fyzikálních

vlastností a výsledky v grafu na obr. 3.10 - 3.13 jsou v určitých rozporech. Ty byly blíže popsány v kapitole 3.7 a zřejmě vyplývají z použitých metod a vlastností litinového materiálu, který je heterogenní.

metoda	α_f [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
VEJNIKOVA klas. parabola	$2.0 \cdot 10^{-6}$
VEJNIKOVA uprav. parabola	$2.8 \cdot 10^{-6}$
VEJNIKOVA sinusovka	$1.6 \cdot 10^{-6}$

Tab. 4.11. Naměřené hodnoty α_f u jednotlivých metod výpočtu (odlévaný materiál - zinek).

metoda	α_f [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
VEJNIKOVA klas. parabola	$2.1 \cdot 10^{-6}$
VEJNIKOVA uprav. parabola	$2.6 \cdot 10^{-6}$
VEJNIKOVA sinusovka	$2.0 \cdot 10^{-6}$

Tab. 4.12. Naměřené hodnoty α_f u jednotlivých metod výpočtu (odlévaný materiál - olovo).

Porovnáme-li hodnoty veličin získané pro pískovou formu s hodnotami pro kokilu vidíme ihned velké rozdíly ve zkoumaných tepelně-fyzikálních vlastnostech a to bez ohledu na odlévaný materiál.

Součinitel tepelné akumulace je u pískové formy při stejné počáteční teplotě 3 - 5 krát menší a pohybuje se v rozmezí $894 - 1508 \text{ W} \cdot \text{s}^{1/2} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. S tím je spojena i velikost ostatních tepelně-fyzikálních veličin. Tepelná vodivost o řád klesla a pohybuje se v rozmezí $0.4 - 3.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. O řád klesla i teplotní vodivost, jejíž hodnoty jsou $1.7 \cdot 10^{-7} - 8.2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Naopak měrné teplo vzrostlo a to na $223.4 - 1297.6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Tyto výsledky jsou dány zcela odlišným charakterem materiálu formy.

V pískové formě (kapilárně pórovité těleso) probíhá přenos tepla ve třech známých formách: vedením, prouděním a

sáláním. Vedení tepla má vysokou hodnotu uvnitř každého monolitického zrna ostřiva, avšak celková vodivost je limitována tepelnými odpory v místech styku zrn disperzní soustavy. Závisí tedy na stupni zhuštění směsi (pórovitosti), kvalitě a geometrii styku zrn přes mosty pojiva (obsahu vody, pojiva a přísad) a teplotě. S rostoucí teplotou vodivost klesá až do teploty 500°C, kde začíná výrazně celý přenos tepla ovlivňovat sálavá složka a přenos se zvyšuje.

5. ZÁVĚR

Tato diplomová práce řešila téma "Sledování teplotních polí po odlití v systému litinová kokila - odlitek tvaru desky". Práce je rozdělena do dvou hlavních částí; teoretické a experimentální.

V části rešeršní jsou shrnuty poznatky o tepelně-fyzikálních veličinách slévárenských forem, především součiniteli tepelné akumulace formy br. Dále jsou zde popsány tepelné děje a jejich ovlivnění v soustavě odlitek - forma, teplotní pole této soustavy, materiály kokil, slévárenské slitiny, krystalizace čistých kovů a měření teploty.

Hlavní část práce - experimentální, je zaměřena na sledování teplotních polí v soustavě odlitek tvaru desky - litinová forma, cílem kterého je stanovení tepelně-fyzikálních veličin formy, v tomto případě kokily 200 x 300 x 400 mm z feriticko-perlitické litiny pro odlévání desky 20 x 200 x 200 mm. Odlévaným materiálem byl čistý Al, Zn a Pb. Pro srovnání je také použita písková forma o rozměrech 300 x 300 x 200 mm pro stejný odlitek.

Při měření na pískové formě byly použity termočlánky NiCr - Ni a Fe - Co a šestibodový zapisovač. Přesnější však bylo měření na kokile s použitím AT počítače, multiplexeru a termočlánků NiCr - NiAl.

Ke stanovení požadovaných veličin byly použity metody:

- a/ VEJNIKOVA parabola, která se podle použité efektivní teploty dělila na VEJNIKOVU klasickou parabolu a VEJNIKOVU upravenou parabolu,
- b/ VEJNIKOVA sinusovka,
- c/ HALBARTOVA metoda.

Pro všechny metody byly použity určité zjednodušující předpoklady, které se dají shrnout do těchto bodů:

1. Teplota rozhraní kov - forma je během tuhnutí konstantní.
2. Tepelně-fyzikální veličiny L, c, ρ jsou známy a konstantní během tuhnutí.
3. Tloušťka formy vzhledem k odlitku je nekonečně velká.
4. Doba odlévání je velmi krátká.
5. Odvod tepla přehřátí taveniny a tuhnutí probíhají současně.
6. Vzniklá mezera příliš neovlivňuje tuhnutí odlitku.

Při výše uvedených zjednodušujících předpokladech jsem došla k výsledkům:

1. Součinitel tepelné akumulace slévárenské formy.

a/ Pro kokilu se br pohybuje v rozmezí 4652 - 10960 $W.s^{1/2}.m^{-2}.K^{-1}$. Velikost konkrétní hodnoty závisí na použité metodě výpočtu. Nejnížší hodnoty jsou dosahovány při stanovení podle VEJNIKOVY klasické paraboly a naopak nejvyšší hodnoty, při zachování stejných výchozích podmínek, poskytuje metoda dle VEJNIKOVY sinusovky.

Pro experimenty se zinkem a olovem jsou hodnoty br nižší; 2224 - 6117 $W.s^{1/2}.m^{-2}.K^{-1}$. Opět i zde velikost stanoveného br závisí na použité metodě.

b/ Srovnávací měření na pískové formě potvrdila předpoklad, že nejintenzivněji při pohlcování tepla z odlitku působí formy kovové, zatím co odvod tepla z forem pískových je menší. U těch je možno počítat s dosti širokým rozmezím tepelně-akumulačních vlastností v návaznosti na použité ostřivo, pojivo a přísady.

Mnou zjištěné hodnoty br , při přesně definovaných podmínkách (tab. 3.3.), jsou 894 - 1508 $W.s^{1/2}.m^{-2}.K^{-1}$.

2. Tepelná vodivost slévárenské formy.

a/ Hodnoty získané při měřeních na kokile mají poměrně široké rozpětí. Pohybují se v závislosti na použité metodě stanovení od 3.2 do 54.8 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Bližší hodnoty jsou uvedeny v tab. 3.2 popř. na obr. 3.11.

b/ Pro pískovou formu hodnoty tepelné vodivosti klesly o celý řád, v porovnání s kokilou a pohybují se v rozmezí 0.4 - 3.1 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Konkrétní velikost závisí nejen na odlévaném kovu, ale hlavně na použité metodě výpočtu.

3. Měrné teplo slévárenské formy.

a/ Při výpočtech z naměřených hodnot na kokile byla stanovena velikost c_p v rozmezí 298.1 - 825.5 $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Konkrétní velikost pro jednotlivá měření je dána metodou výpočtu (tab. 3.2., obr. 3.12.).

b/ Hodnota měrného tepla u pískové formy nepřesáhla hodnotu 1297.6 $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Minimální zjištěná hodnota je 223.4 $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Hodnoty pro jednotlivá měření jsou v tab. 3.3.

4. Teplotní vodivost slévárenské formy.

a/ Z tab. 3.2. je patrné, že hodnota teplotní vodivosti pro kokilu se pohybuje od $1.3 \cdot 10^{-6}$ do $2.5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$. Je zde vidět, že velký vliv má použitá metoda výpočtu, protože rozdíl mezi metodou podle VEJNÍKOVY klas. paraboly a VEJNÍKOVY sinusovky činí 1 řád.

b/ U pískové formy byla zjištěna hodnota teplotní vodivosti o řád nižší než u kovové formy. Pohybuje se v rozmezí $1.7 \cdot 10^{-7}$ až $3.2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$.

Ve výsledcích práce lze pozorovat značnou různorodost získaných hodnot. Důvod lze spatřovat v rozdílnosti použitých metod. Výsledky jsou dále značně ovlivněny převzatými fyzi-

kálními hodnotami; výše těchto hodnot je závislá na použitém prameni informací.

Je nutno přemýšlet i o tom, zda použité metody výpočtu jsou vhodné pro kovové formy, neboť velkou roli zde hraje teplota rozhraní. Tu by bylo vhodné přesně stanovit a ne vycházet jen z určitých předpokladů, které vedou k vnesení určité chyby a ke zkreslení výsledku.

Proto doporučuji při dalším studiu tepelně-fyzikálních veličin slévárenských forem se zaměřit i na stanovení teploty rozhraní a to u každého experimentu zvlášť, jelikož se domnívám, že to je nutná podmínka přesnějšího stanovení tepelně-fyzikálních veličin.

Ekonomické hodnocení problematiky nebylo z hlediska prvotnosti výzkumu provedeno.

Madeira 10.11.77

6. Seznam literatury

- [1] ALAXIN, J.: Nauka o materiálu. [Skripta]. VŠST Liberec 1989.
- [2] ANISOVIČ, G.A.: Zatvėrdėvenije otlivok. Minsk, Nauka i tehnika. 1979.
- [3] ANISOVIČ, G.A. - GRINKEVIČ, R.N.: Metoda opredelenija termofizičeskich svojst formovačnych zemel. In: Sborník BPL, Minsk 1960.
- [4] ANISOVIČ, G.A. - VEJNIK, A.I.: Issledovanija processov perenosa tepla i vlagi v litejnoj forme. In: Sborník Vyšejšaja škola. Minsk 1966.
- [5] BECHNÝ, L. a kol.: Teória zlievania. [Skripta]. VŠDS Žilina 1989.
- [6] EXNER, J.: Metodika stanovení tepelně-fyzikálních vlastností formovacích a jádrových směsí. Slévárenství XXII (1975) č. 9, s. 372
- [7] GEDEONOVÁ, Z.: Určenie súčiniteľa tepelnej akumulácie pre niektoré formovacie zmesi v prevádzke zlievárne VSŽ n.p. Košice. Slévárenství XXV (1977) č. 2, s. 61.
- [8] GIRŠOVIČ, N.G.: Šedá litina I, II. [Překlad z ruského originálu]. 1. vyd. Praha 1955.
- [9] HAVLÍČEK, F. - ELBEL, T.: Studium tepelně-fyzikálních vlastností formy. Slévárenství XVII (1969) č. 9, s. 366.
- [10] HAVLÍČEK, F. - ELBEL, T.: Matematické a experimentální stanovení součinitele tepelné akumulace br. [Sborník prací]. VŠB Ostrava 1968.
- [11] HAVLÍČEK, F.: Kapitoly z teplofyziky odlitku a formy. [Skripta]. HF VŠB Ostrava 1970.

- [12] JELÍNEK, P.: Tepelná vodivost formovacích směsí používaných při výrobě jader a forem masivních ocelových odlitků. Slévárenství XXX (1982) č. 8, s. 325.
- [13] JENČÍK, J. - PREISLER, V. - SEDLICKÝ, O.: Vybrané statí z technického měření. 2. část. [Skriptá]. Praha 1961.
- [14] KRULIŠ, P. - RŮŽIČKA, A.: Stanovení doby krystalizace a chlazení tuhnoucího odlitku při lití pod nízkým tlakem. Slévárenství XVI (1968) č. 6, s. 226.
- [15] NÉMETHOVÁ, P.: Sledování teplotních polí po odlití v systému litinová kokila - odlitek tvaru desky. [Diplová práce]. Liberec 1992. VŠST. Fakulta strojní.
- [16] NOVÁ, I.: Vliv tepelně-fyzikálních podmínek na vlastnosti kokil ze šedé litiny. [Sborník prací]. VŠST Liberec 1987.
- [17] PÍŠEK, F. - JENÍČEK, L. - RYŠ, P.: Nauka o materiálu I. Nauka o kovech 3. svazek. Neželezné kovy. 2. vyd., Praha 1973
- [18] PŘIBYL, J.: Tuhnutí a nálitkování odlitků. 1. vyd. Praha 1954.
- [19] PŘIBYL, J.: Ke stanovení koeficientu tuhnutí a tepelné pohltivosti formy. Slévárenství XXVIII (1980) č. 5, s.178.
- [20] PŘIBYL, J.: Teorie slévárenských pochodů. [Skriptá]. VŠB Ostrava 1979.
- [21] SEDLÁČEK, V.: Neželezné kovy a slitiny. 1. vyd. Praha 1979.
- [22] ŠORIN, S.N.: Sdílení tepla. 1. vyd. Praha 1968.
- [23] VEJNIK, A.I.: Teplonyje osnovy teorii litja. Mašgiz 1953 .

- [24] VEJNIK, A.I.: Teorija i razčot processa zatverděvanija otlivki nemetalličnoj forme. 1. vyd. Moskva 1954.
- [25] VEJNIK, A.I.: Teorija zatverděvanija otlivki. 1. vyd. Moskva 1960.
- [26] VEJNIK, A.I.: Rasčot otlivki. 1. vyd. Moskva 1964.
- [27] VEJNIK, A.I.: Termodinamika litějnoj formy. 1. vyd. Moskva 1968.
- [28] VEJNIK, A.I.: Kokil. 1. vyd. Minsk 1972.
- [29] VETIŠKA, A.: Teoretické základy slévárenské technologie. 2. vyd. Praha 1974.
- [30] VETIŠKA, A.: K problematice kalorimetrického zjišťování tepelně-akumulačních vlastností formy. Slévárenství XXII (1974) č. 1, s. 13.
- [31] ČSN 42 0461.

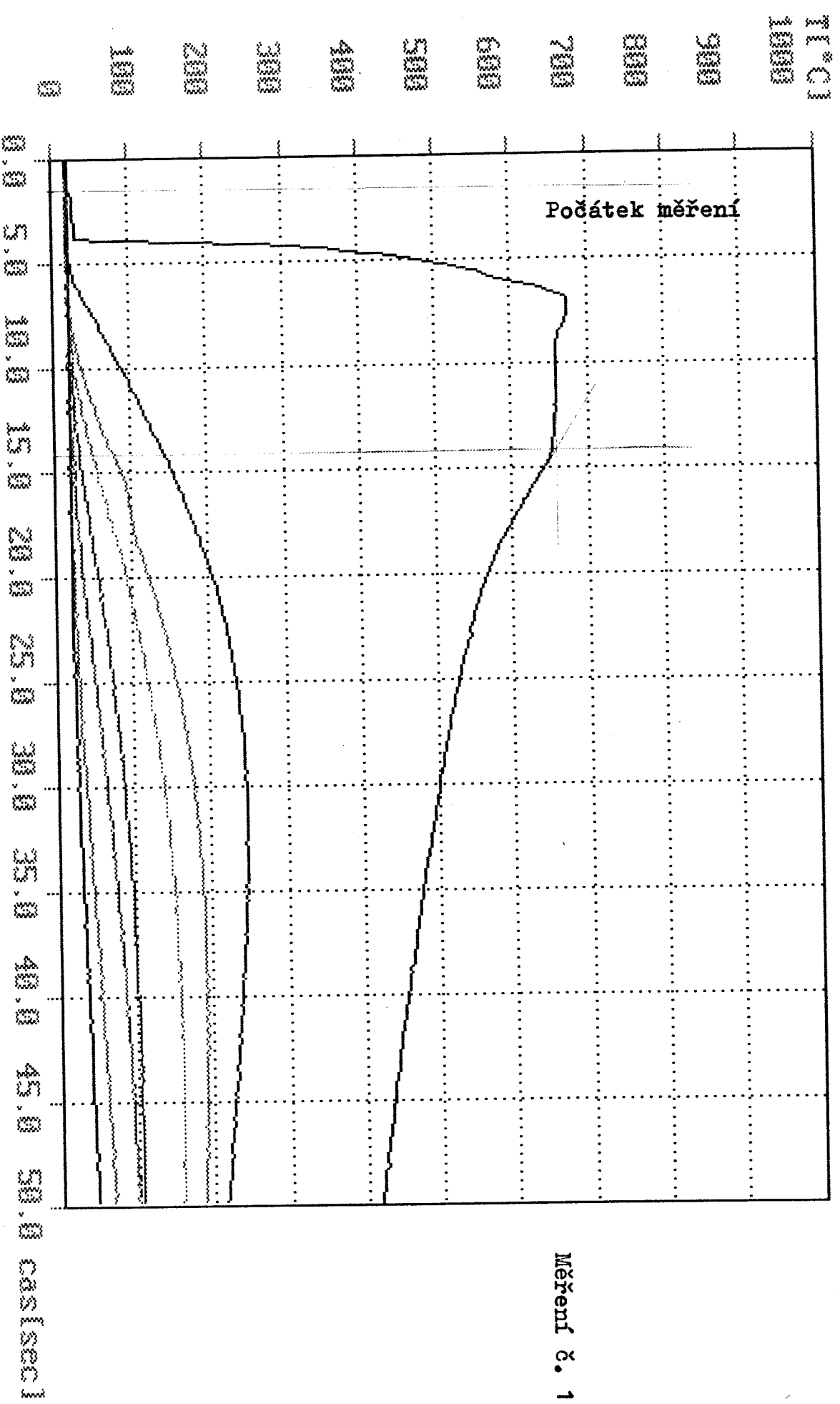
7. PŘÍLOHA

1. Grafické záznamy experimentů
2. Výpočtové vztahy pro VEJNIKOVU sinusovku
3. Kalibrační křivka termočlánu NiCr - Ni
4. Kalibrační křivka termočlánu Fe - Ko
5. Tabulka hodnot b_f dle různých autorů
6. Tabulka literárních hodnot λ_f
7. Počítačový program
8. Počítačový program

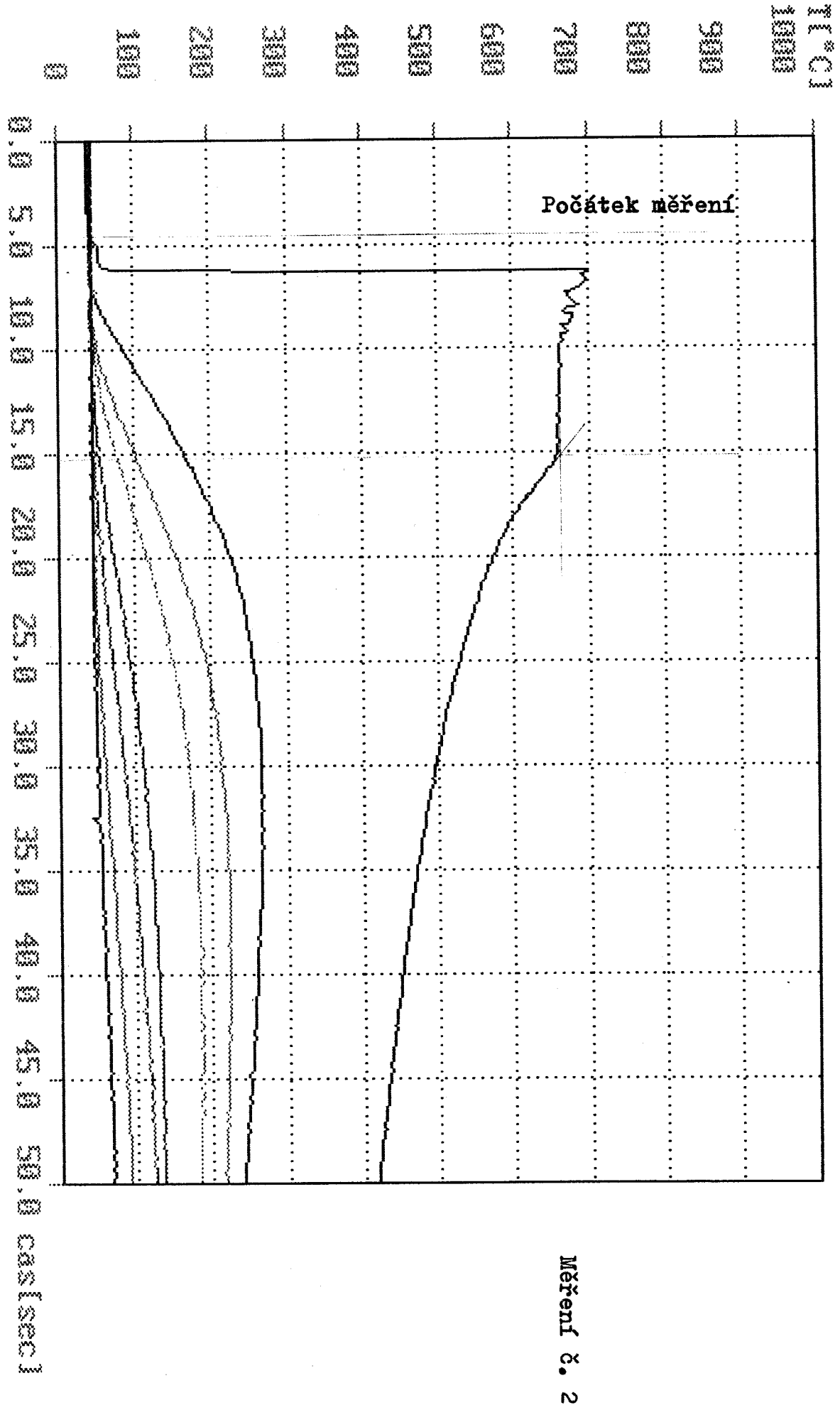
GRAFICKÉ ZÁZNAMY EXPERIMENTŮ

NADRCHALOVÁ MARTINA

Nazev : Deska_20
Popis : teploota-formu-20-degc
Mer.misto: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7,



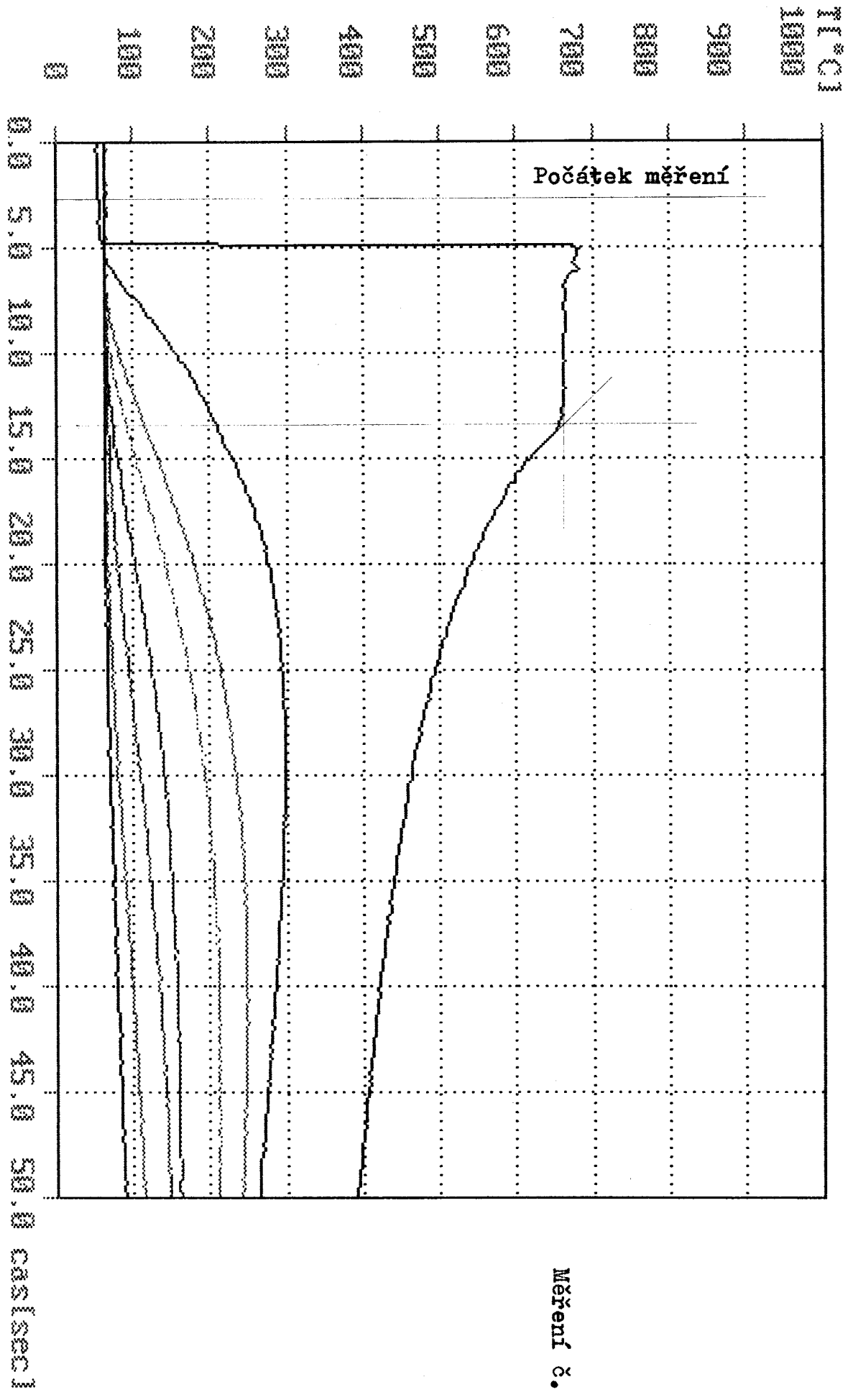
Mazeu : Deska_40
Popis : teploota-formuj-45-degc
Mer.misto: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7,



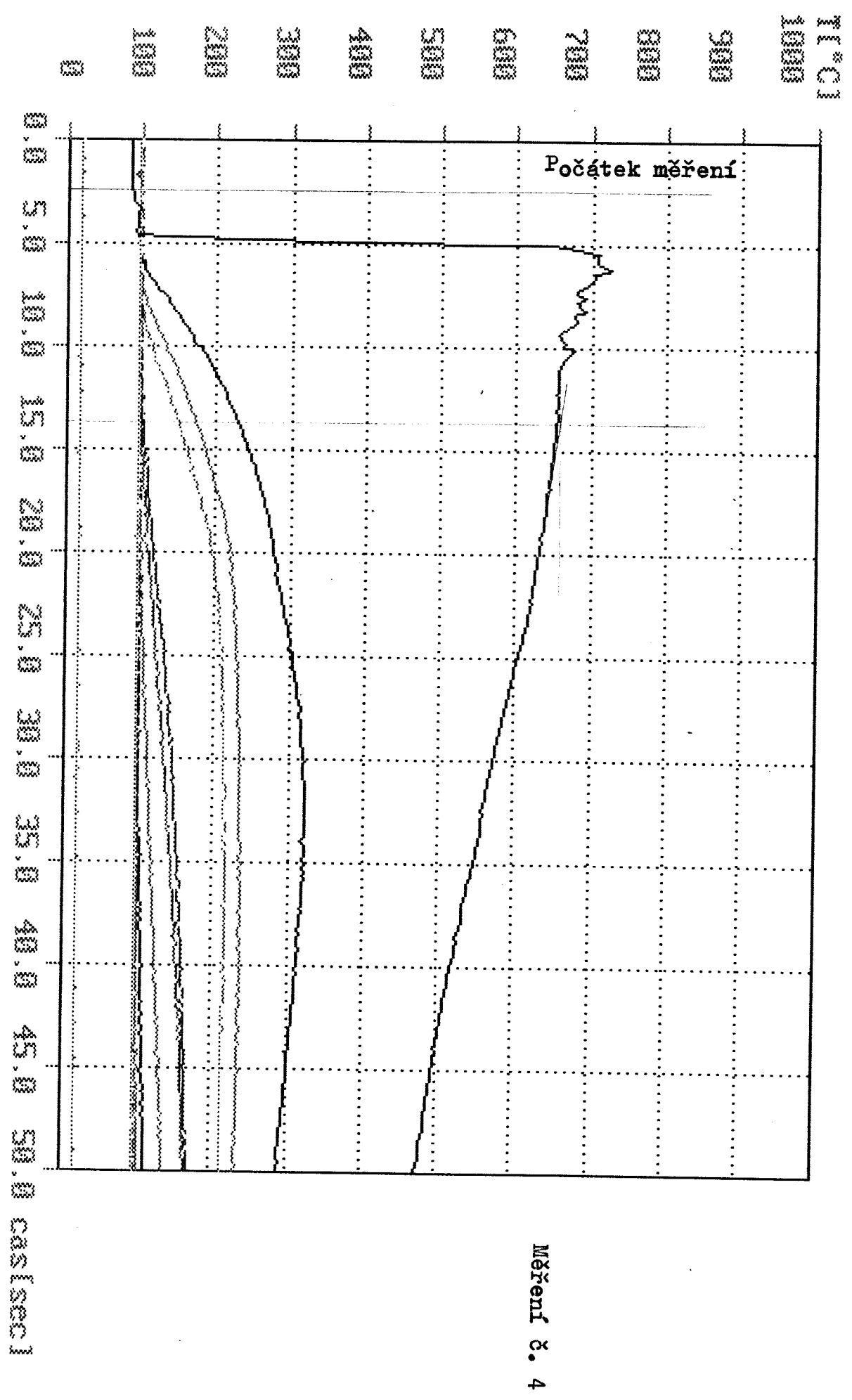
Nazev : Deska_60

Popis : teploota-formuj-63-degc

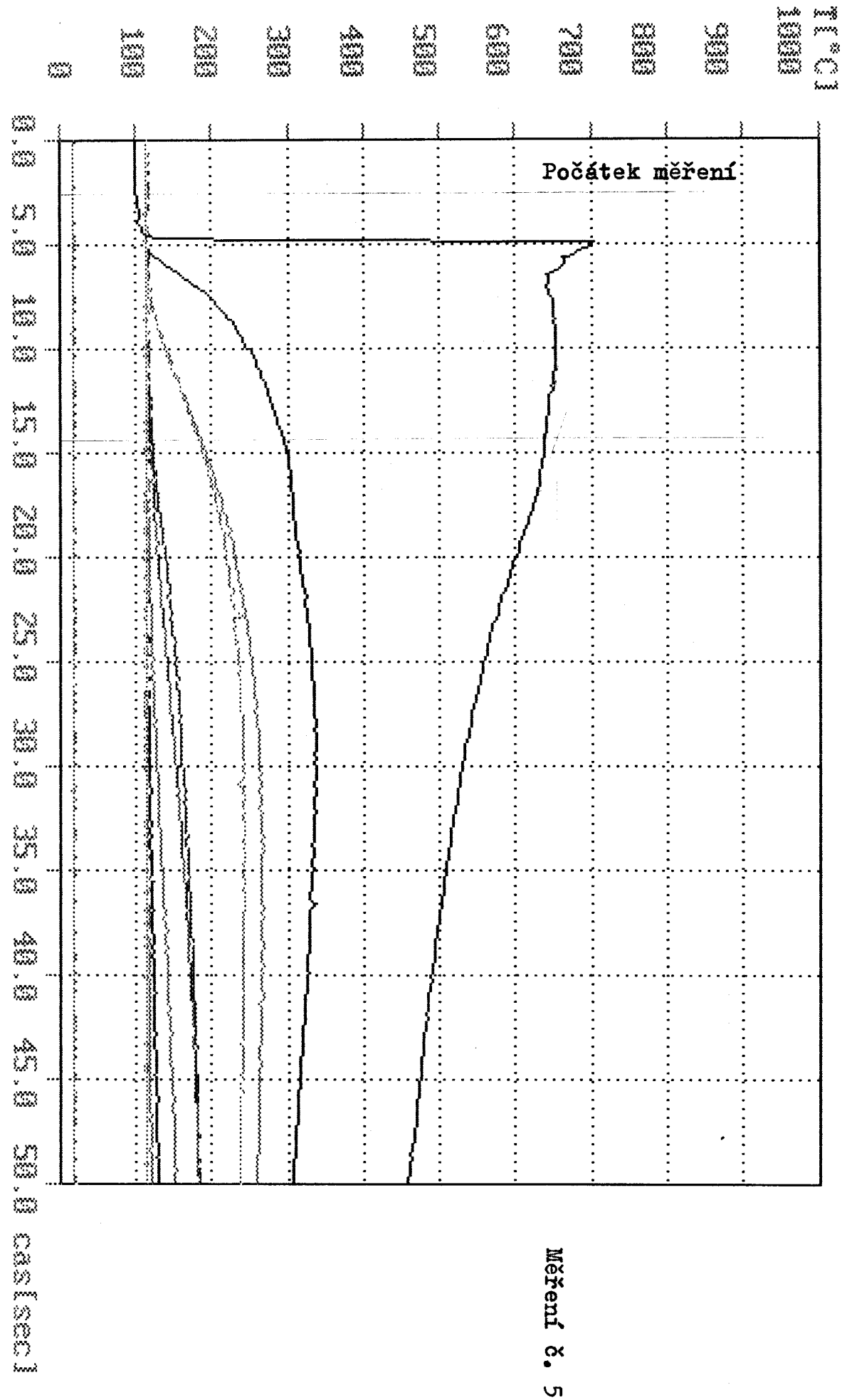
Mer.mista: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7,



Nazev : DESKA_100
Popis : tepnota-formy-100-degc
Mer.misto: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9,10,11,12,13,



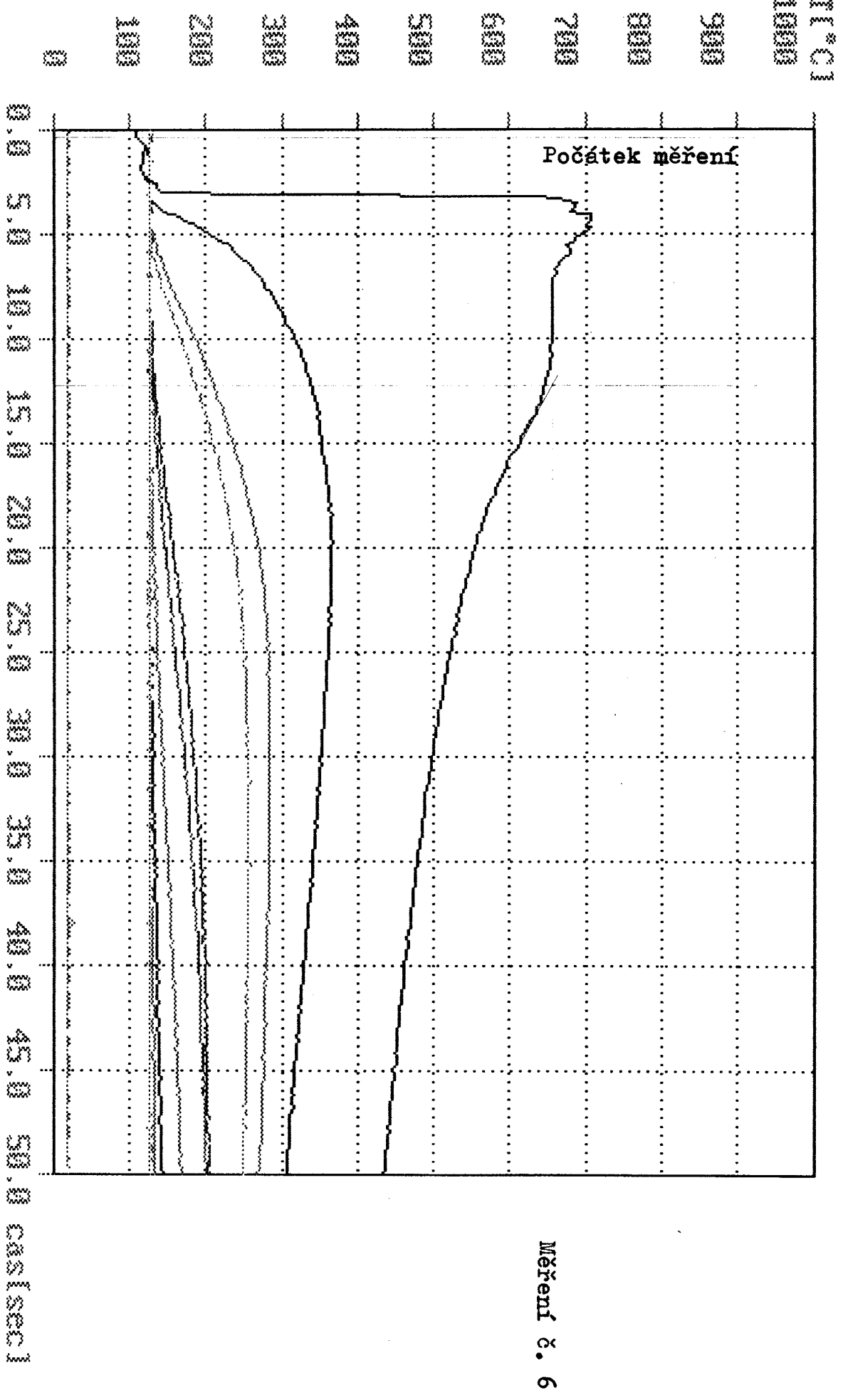
Nazev : DSKA_120
Popis : teplota-formuj-120
Mer.misto: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9,10,11,12,13,



Nazev : DESKA_130

Popis : teploota-formy-125-degc

Mer.misto: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9,10,11,12,13,



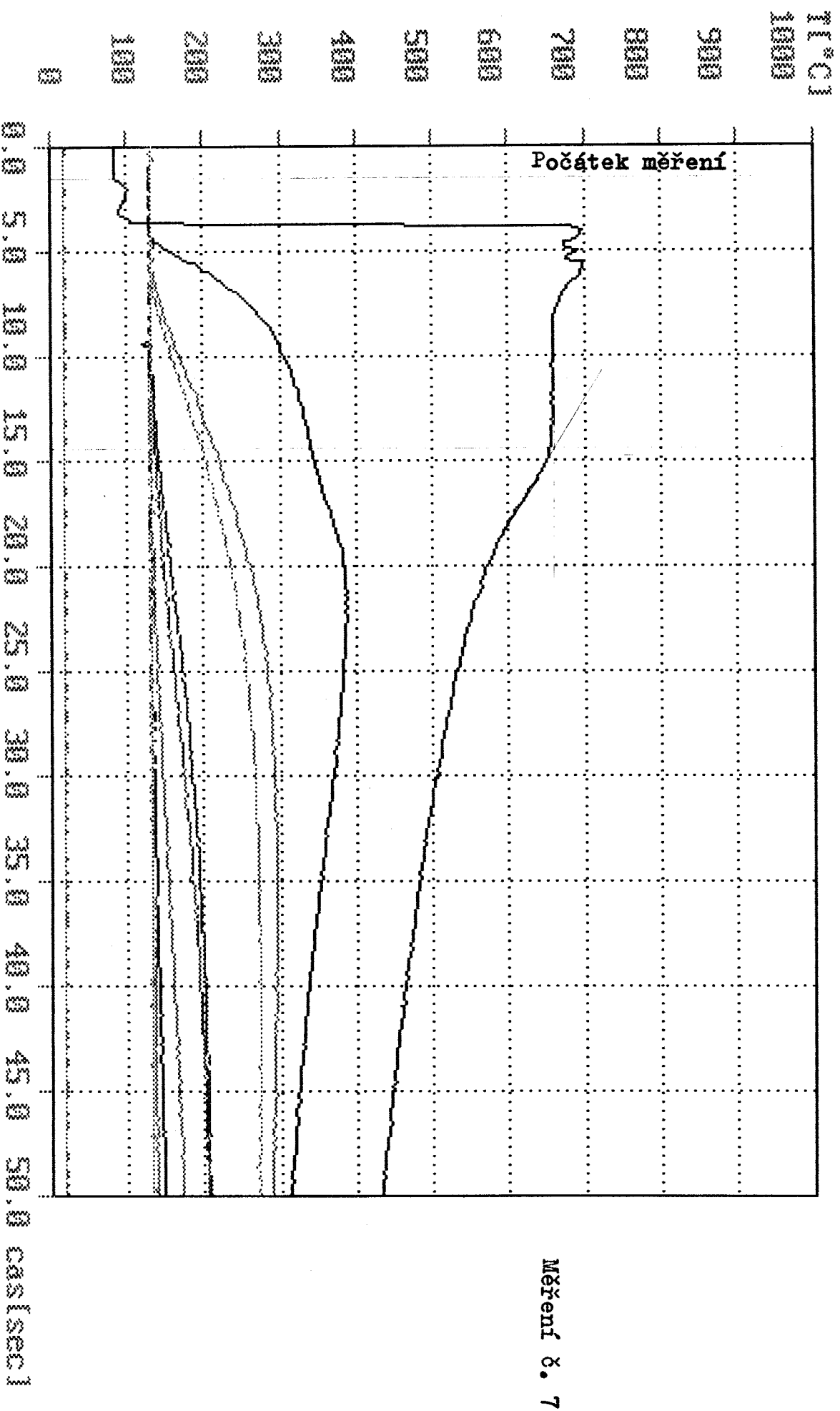
Plotter (6/11/77

WPA(C)

Nazev : DESKA_120

Popis : tepnota-formy-130-degc

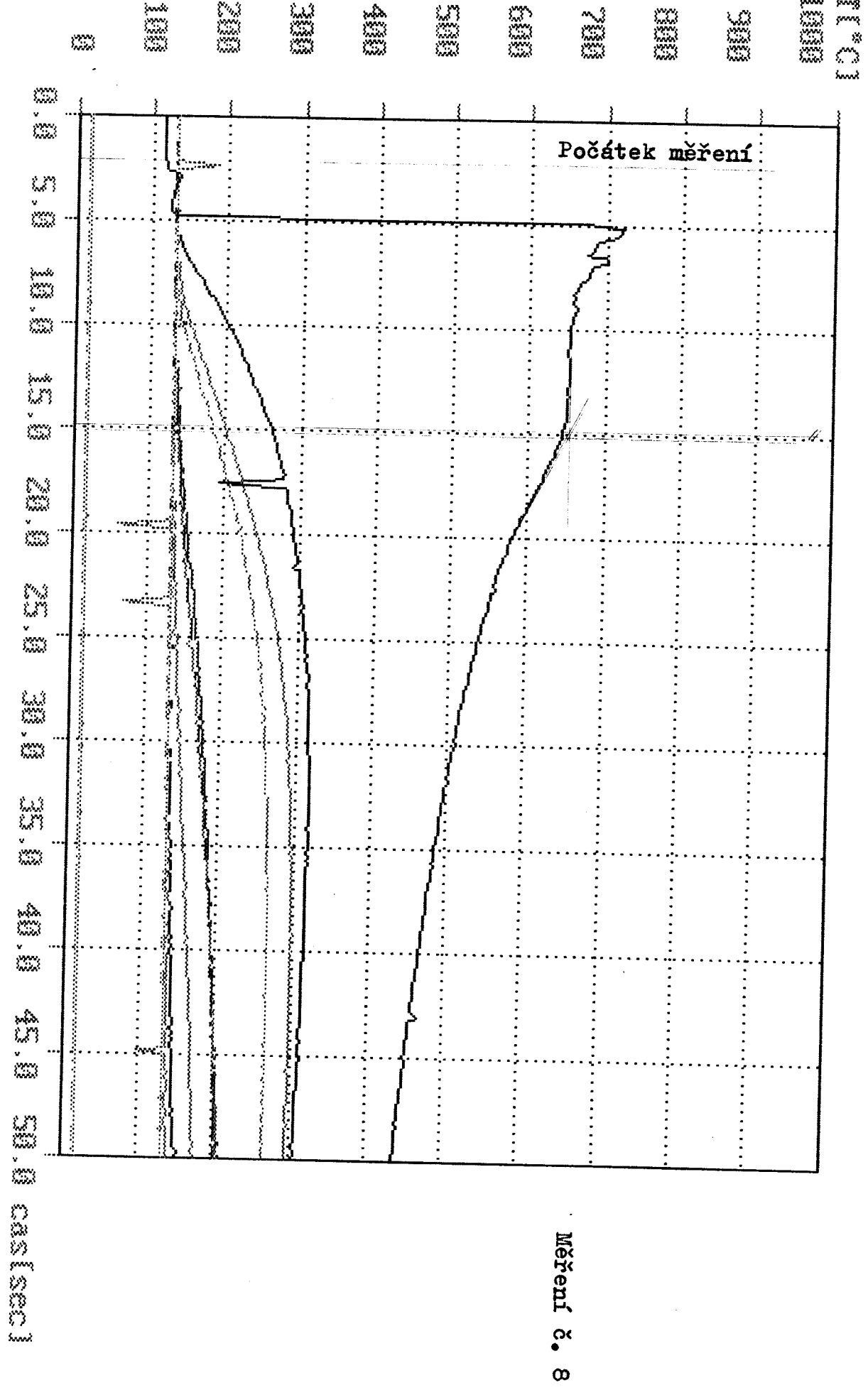
Mer.misto: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9,10,11,12,13,



Název : DESKA_150

Popis : teplota-formy-135-degc

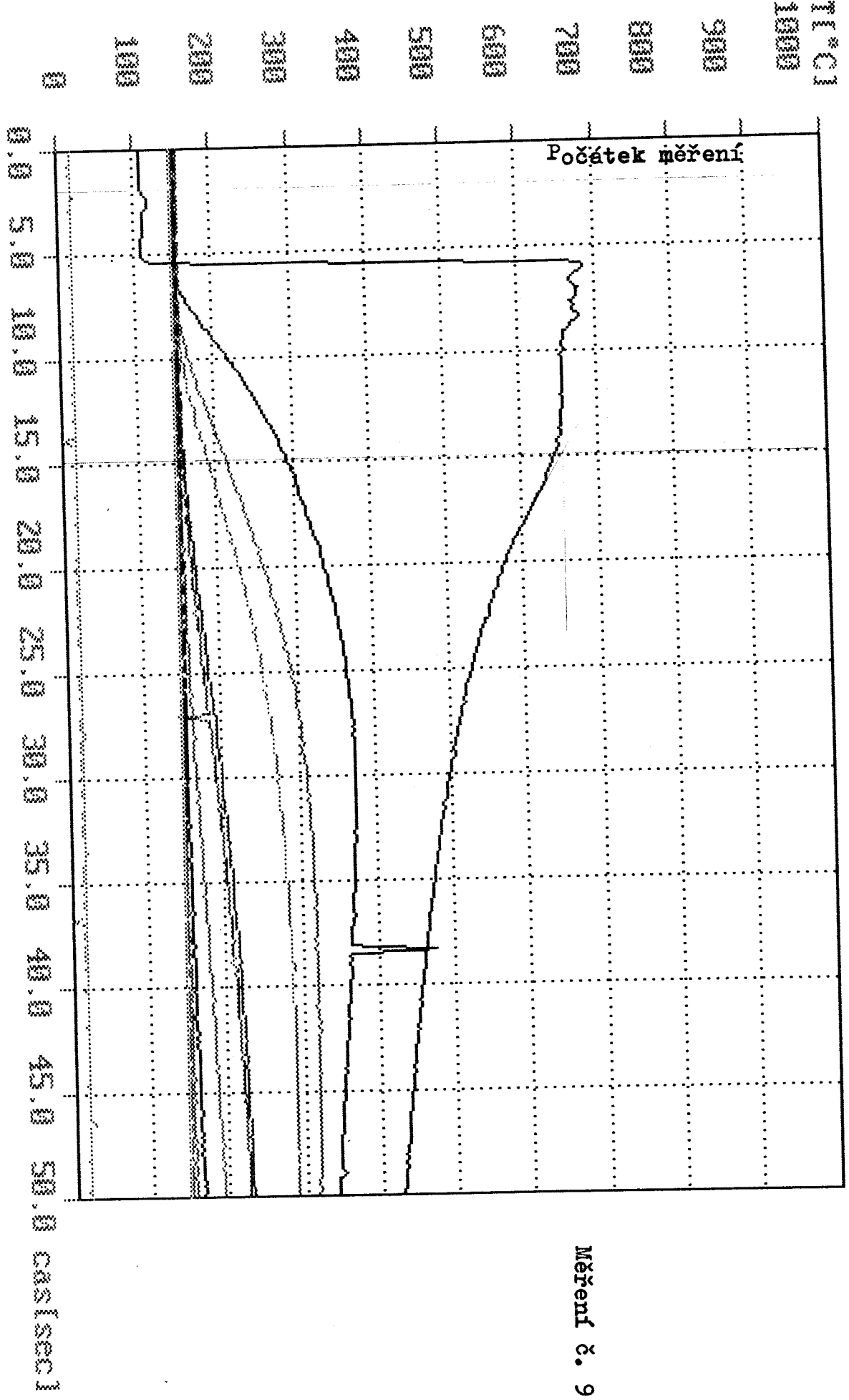
Mer.misto: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9,10,11,12,13,



Nazev : DESKA_150

Popis : teplota-formy-150-degc

Mer.misto: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9,10,11,12,13,



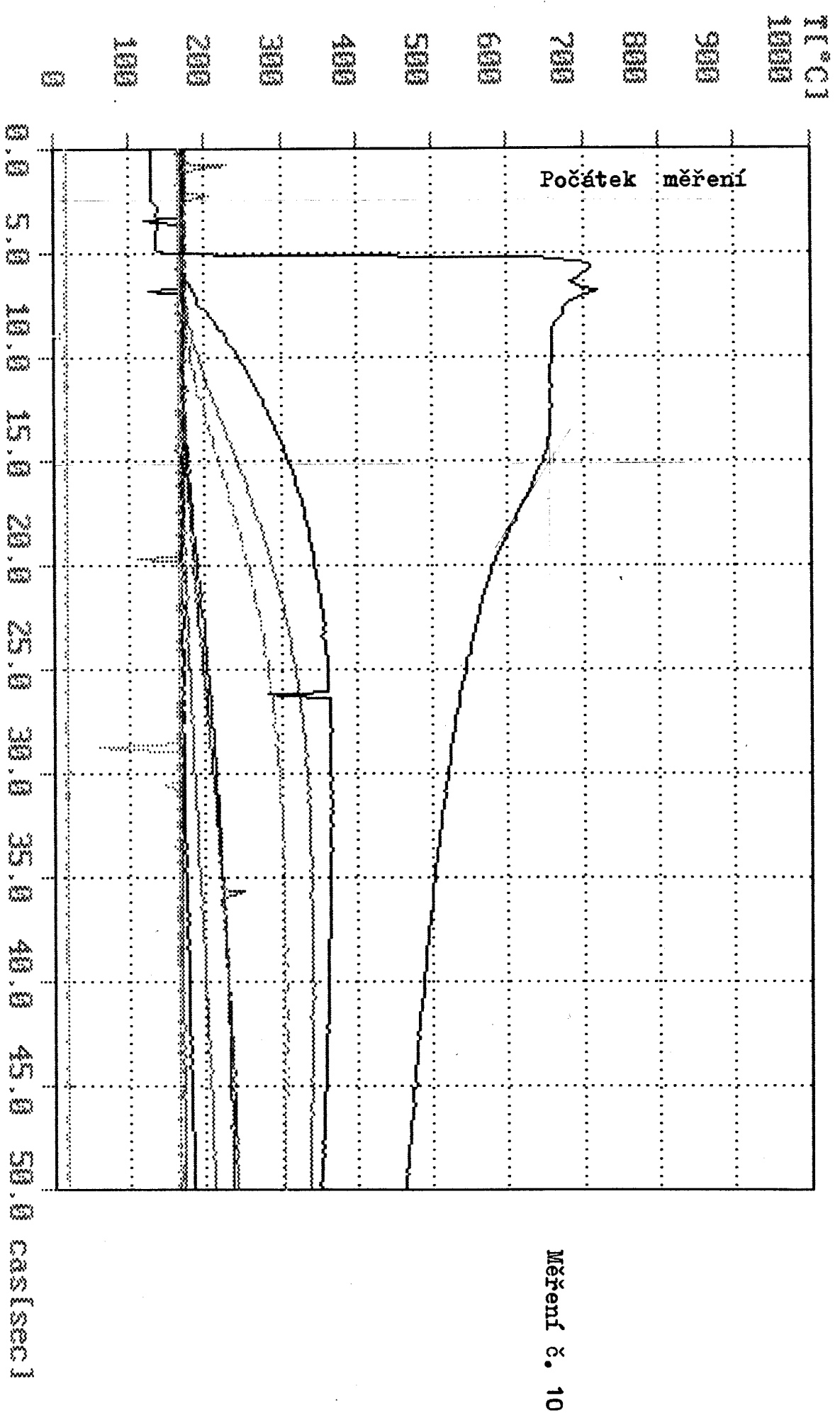
Printer (6/4/7)

KLIA1(6)

Nazev : DESKA_170

Popis : teploota-formuj-170-degc

Mer.misto: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9,10,11,12,13,

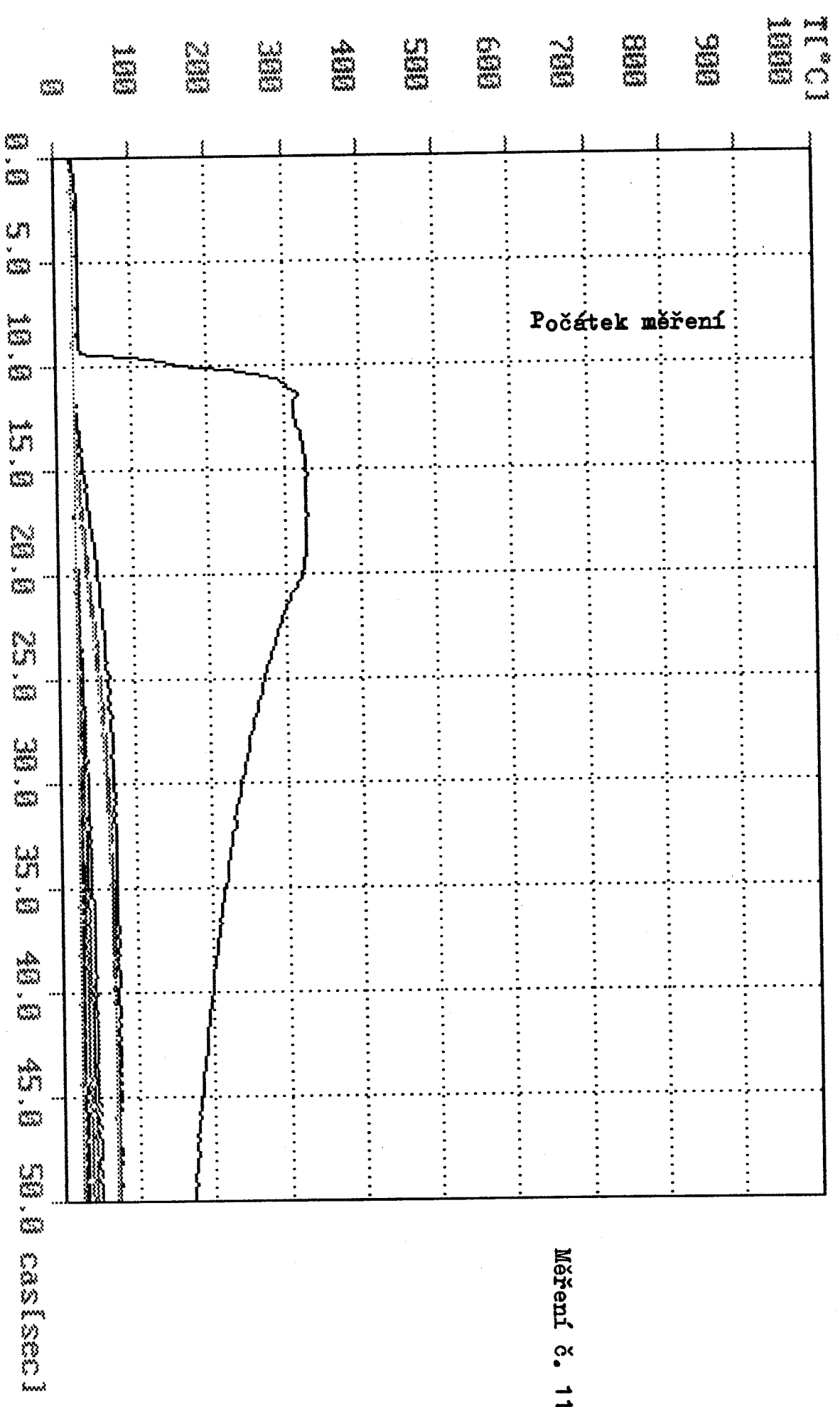


Měření č. 10

Plotter (A/M)?

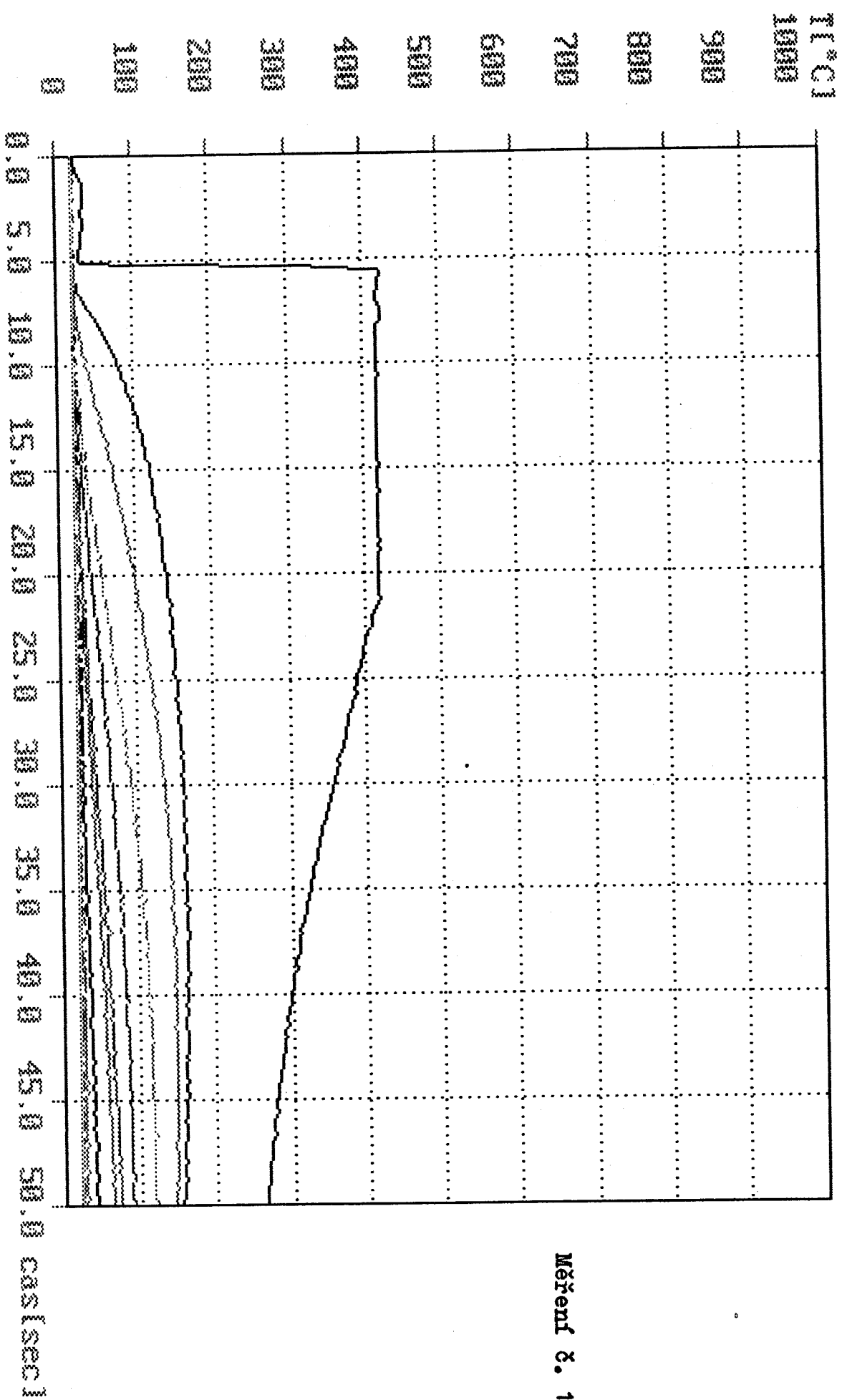
WMA1(c)

Nazev :deska_ph_Zo
Popis :deska-ph-Z0gradC
Mer.misto: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9,10,11,12,13,



Měření č. 11

Nazev :deska_20
Popis :deska-2n-20gradC
Mer.misto: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9,10,11,12,13,

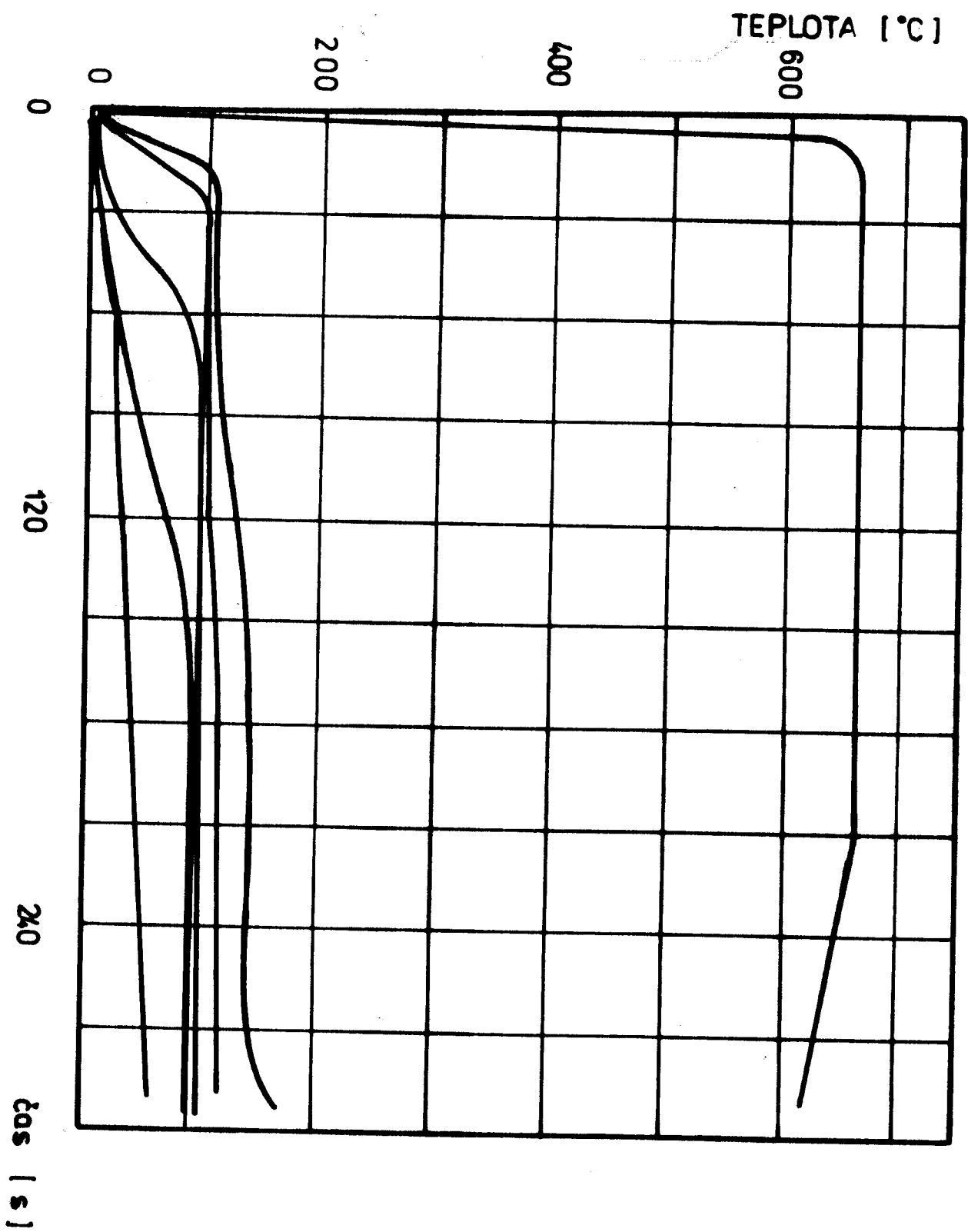


Měření č. 12

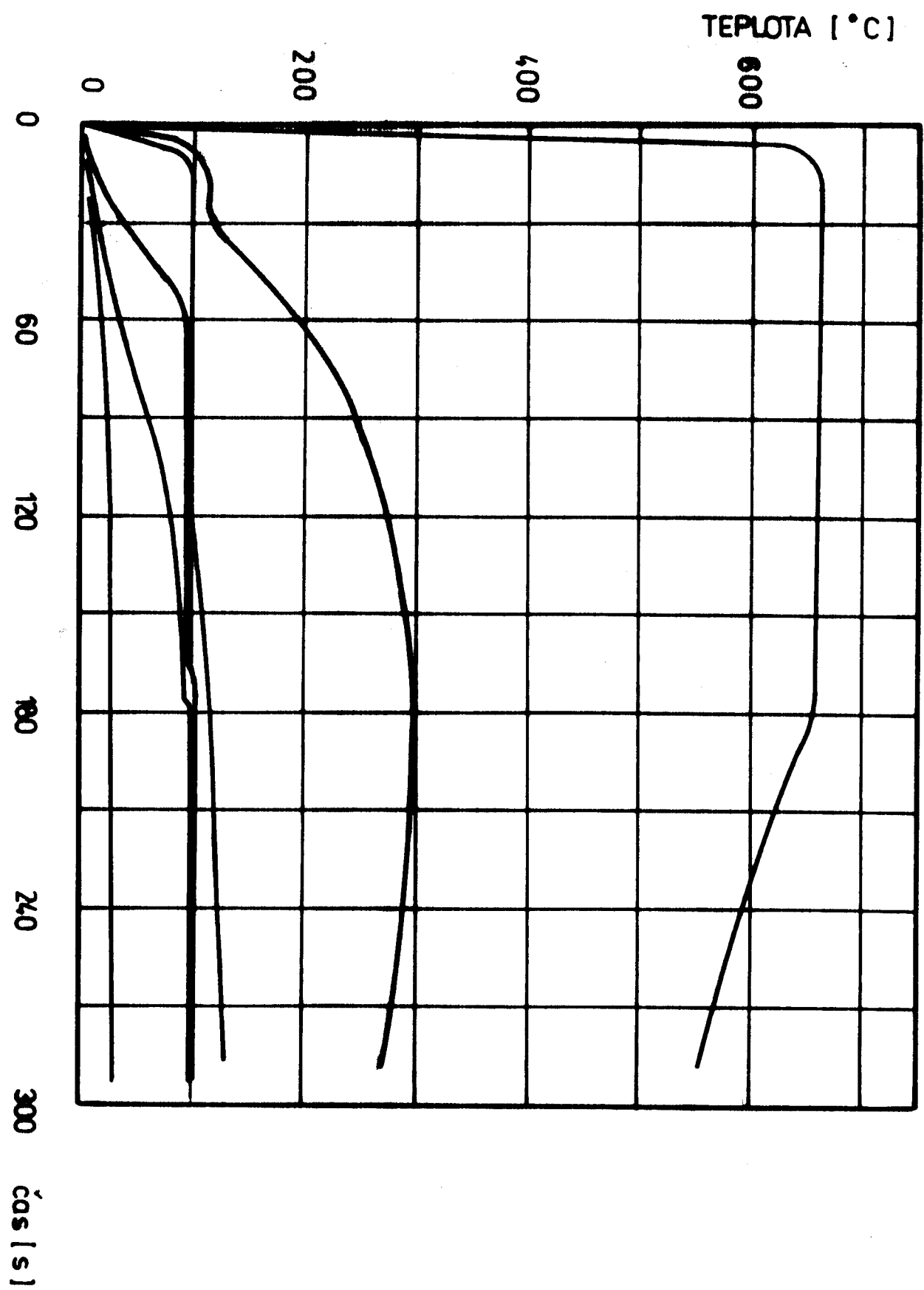
Plotter (A/N)?

KUH1(c)

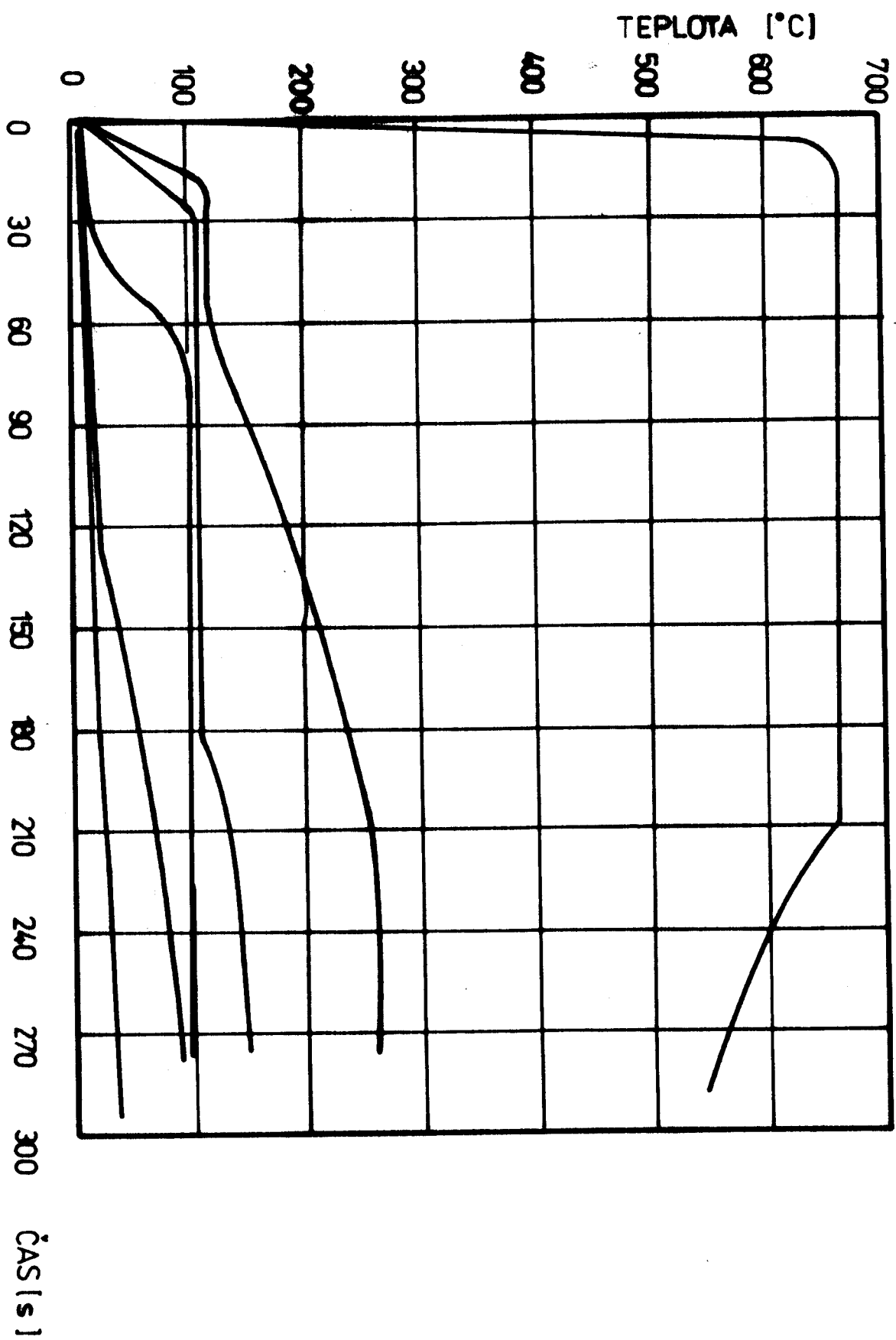
MĚŘENÍ č.13 - Al



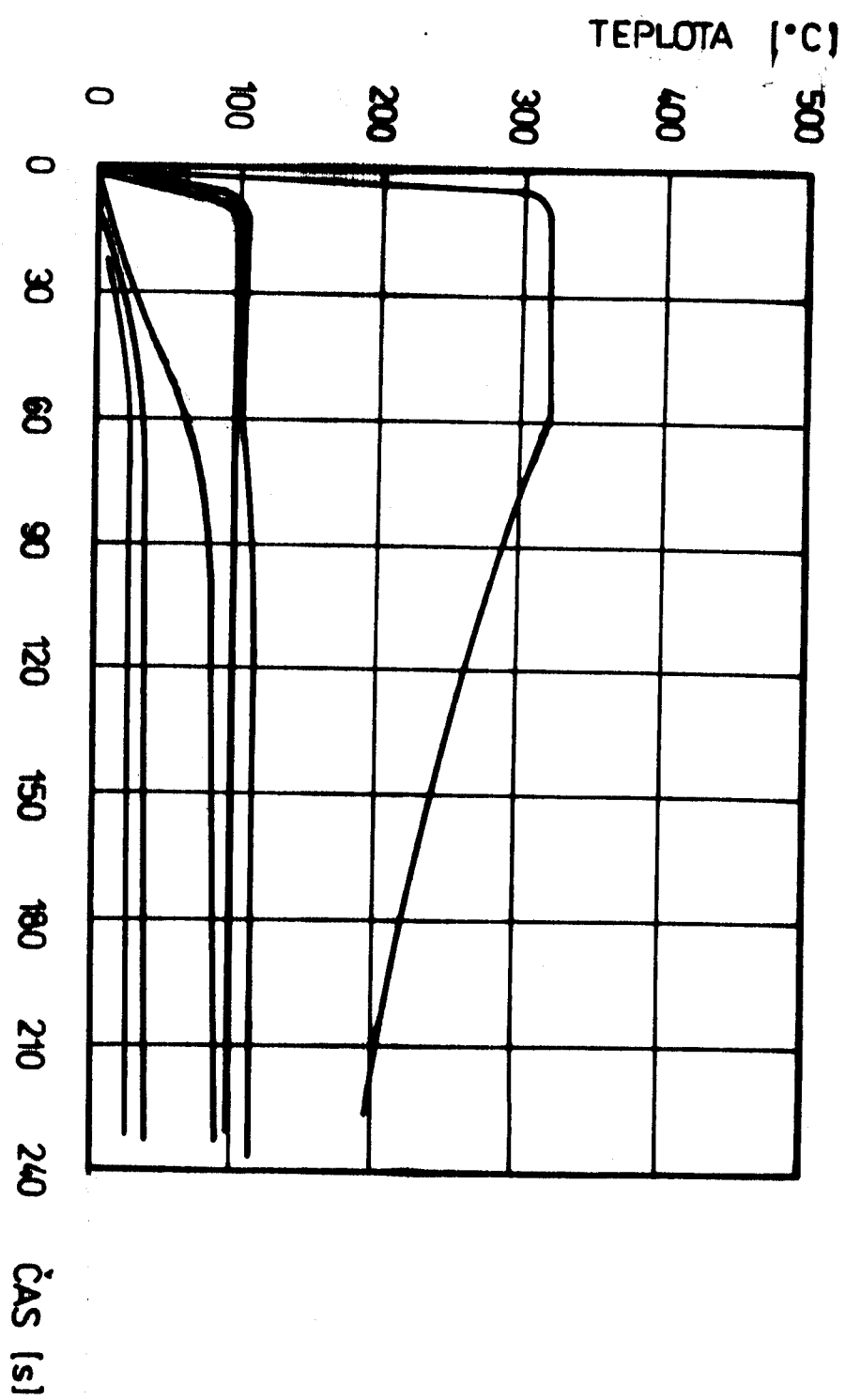
MĚŘENÍ č. 14 - AL



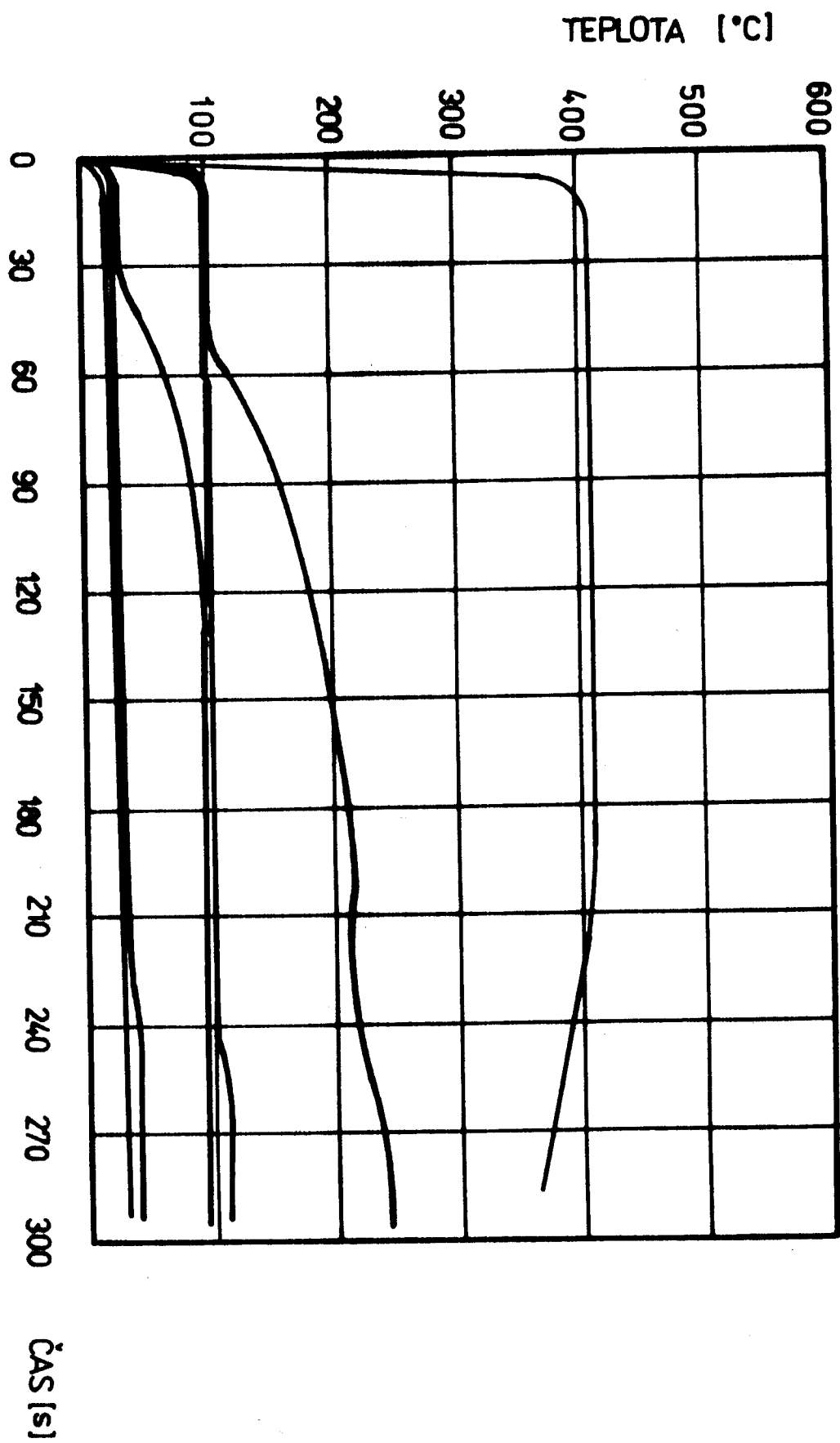
MĚŘENÍ č. 15 - Al



MĚŘENÍ č. 16 - Pb



MĚŘENÍ č. 17 - Zn



Vztahy pro výpočet tepelně-fyzikálních veličin podle metody VEJNÍKOVY sinusovky:

$$b_F = \frac{1}{\sqrt{\pi - 2}} \cdot \frac{M \cdot \rho_M \cdot L_{KR}}{\Theta_{KR} \cdot \sqrt{t_{\text{leh}}}}$$

$$c_F = \frac{\pi \cdot M \cdot \rho_M \cdot L_{KR}}{(\pi - 2) \cdot \rho_F \cdot X_2 \cdot \Theta_{KR}}$$

$$F = \frac{b_F^2}{c_F \cdot \rho_F}$$

$$a_F = \frac{\lambda_F}{c_F \cdot \rho_F} = \left(\frac{b_F}{c_F \cdot \rho_F} \right)^2$$

kde značí b_F - součinitel tepelné akumulace formy
[W.s^{1/2}.m⁻².K⁻¹],

c_F - měrné teplo materiálu formy [J.kg⁻¹.K⁻¹],

λ_F - součinitel tepelné vodivosti formy
[W.m⁻¹.K⁻¹],

a_F - součinitel teplotní vodivosti formy
[m².s⁻¹],

n - stupeň paraboly ,

ρ_M - hustota roztaveného kovu [kg.m⁻³],

ρ_F - hustota materiálu formy [kg.m⁻³],

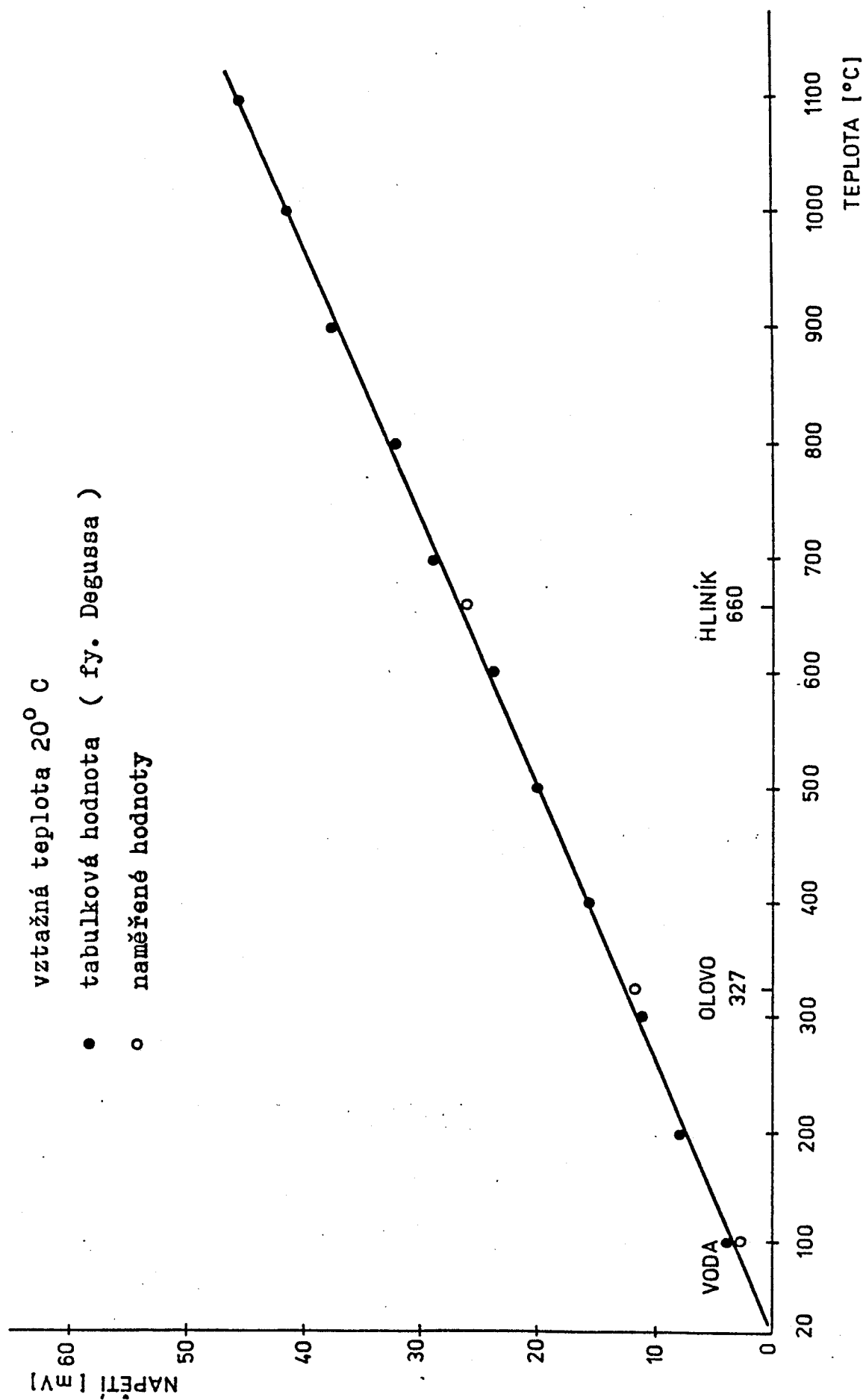
X_2 - prohřátá vrstva formy [m],

M - modul odlitku [m],

L_c - celkové latentní teplo [J.kg⁻¹],

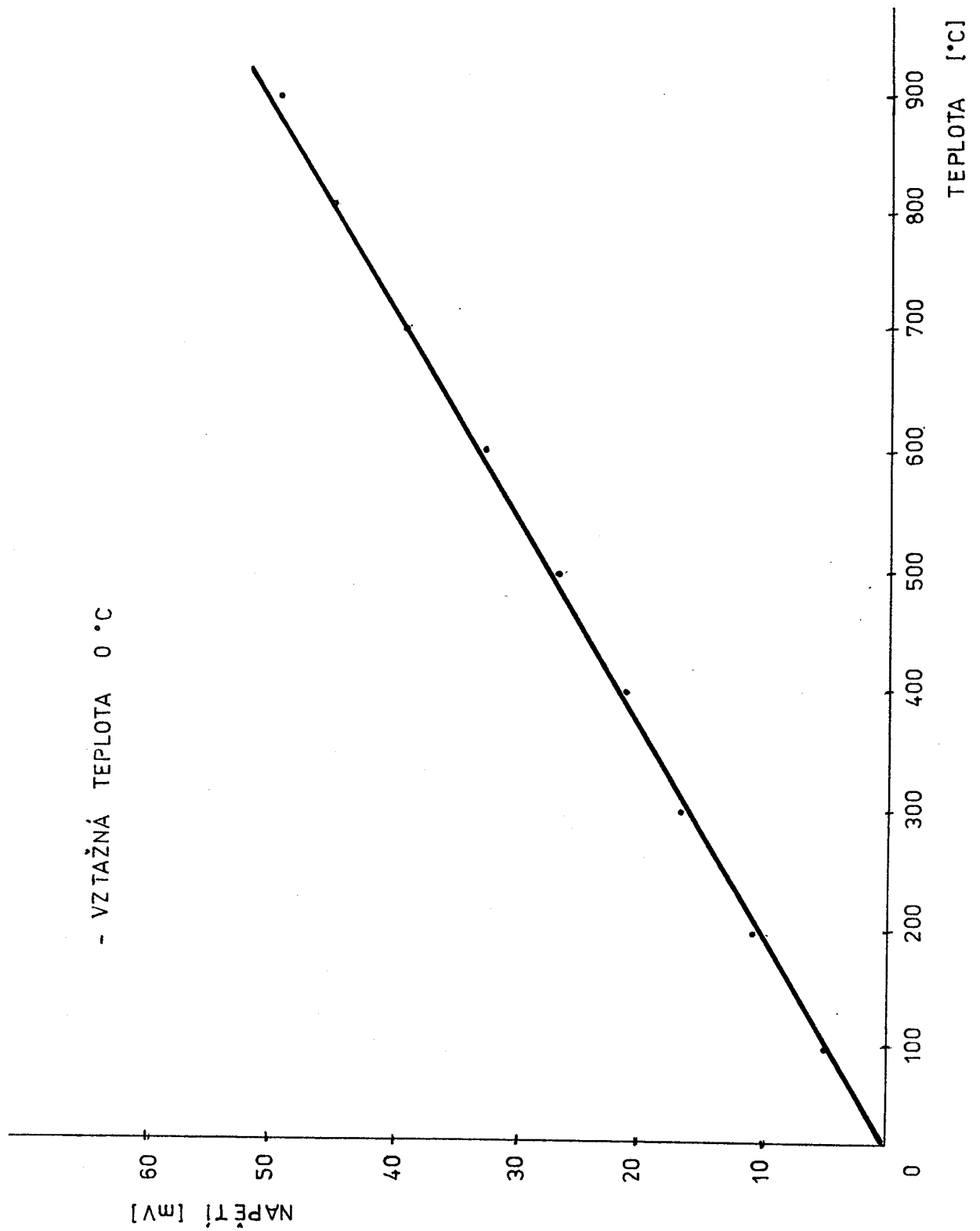
Θ_{KR} - efektivní teplota [°C].

Kalibrační křivka termoelektrického článku NiCr - Ni Ø 0,2 mm



Kalibrační křivka termoelektrického článku Fe - Ko

- VZTAŽNÁ TEPLOTA 0 °C



Příloha č. 5

Přehled hodnot součinitele tepelné akumulace forem

Materiál formy	Materiál odlithu	Teplota liti/°C/	Teplota formy/°C/	ρ_F /kg.m ⁻³ /	Čas tuh. odlithy/s/	b_F /W.s ^{1/2} .m ⁻² .K ⁻¹ /
Litinová kokila	LLG	1190		7200	18	6 070 /9/
	LLG	1190		7200	22	5 260 /9/
	LLG					5 670 /9/
	silumin					4 220 /9/
	ocel					6 298 /9/
	LLG	1230				4 430 /30/
Kokila se spárou	Al		98		24	14 511 /20/
	ocel, 0,3%C	1540				2 100 /20/
	ocel, 0,3%C	1540				3 140 /20/
Kokila - uhlík. ocel	LLG	1300				4 920 /30/
Kokila - měď	LLG	1320				6 060 /30/

Pozn. Další upřesňující údaje autoři neuvádějí.

Druh litiny									$\lambda_{\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}}$	
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	při 100 °C	při 400 °C
šedá litina	3,20	1,56	0,72	-	-	-	-	-	48,5	45,0
litina s obs. Cu	3,18	1,58	0,69	-	-	-	1,58	-	47,0	42,2
litina s obs. Mo	2,56	2,70	0,63	-	-	0,58	-	-	49,3	45,3
litina s obs. Ni, Cr	2,80	2,51	0,68	4,71	0,54	-	-	-	42,2	38,9
litina s obs. Cr, Al	2,70	0,96	0,58	-	0,95	-	-	7,00	33,0	30,1

Tepelná vodivost litin dle HAVLÍČKA /11/

Pozn. Z tabulky je zřejmé, že s obsahem legujících prvků a zvýšenou teplotou součinitel λ klesá.

P r o g r a m

pro výpočet hodnot tepelně-fyzikálních veličin litinové kokily
při odlévání odlitku 20 x 200 x 200 mm dle metody podle VEJNIKA
("nahrazení parabolou")

```

cls
120 print "Výp. bfv, měř. tepla a tepel. a teplot. vodiv. mater. forem"
121 print "=====
173 input "Modul [m] (např. 0.01) : M=";m
174 input "stupeň paraboly [-1] (např.3.45) : n=";n
175 input "hustotu materiálu odlitku [kg/m3] (např. 2520) : rom=";rom
176 input "latentní teplo mater. odlitku [J/kg] (např. 401900) : L=";l
177 input "efektivní teplota [stupeň Celsia] (např. 560) : Tef=";tef
178 input "vzdálenost [m] (např. 0.045):xf=";xf
179 input "hustota materiálu formy [kg/m3] (např. 7200) :rof=";rof
180 input "doba tuhnutí [s] (např. 180) : t=";t
181 input "Opravit=1 ";inp1
if inp1=1 then goto 173
bfv=sqr((n+1)/(2*n))*m*rom*1/(tef*sqr(t))
c=(n+1)*m*rom*1/(xf*rof*tef)
a=xf*xf/(2*n*(n+1)*t)
lambda=m*xf*rom*1/(2*n*tef*t)
print "modul : M=";using ".###";m
print "stupeň paraboly : n=";using "#.##";n
print "vzdálenost : xf=";using ".###";xf
print "hustotu materiálu odlitku : rom=";using "#####";rom
print "latentní teplo mater. odlitku : L=";using "#####";l
print "efektivní teplota : Tef=";using "#####";tef
print "hustota materiálu formy : rof=";using "#####";rof
print "doba tuhnutí : t=";using "#####";t
print "=====
print "Koef. tepel. akumulace (bfv) = ";using "#####.###";bfv
print "Měrné teplo formy (c)=";using "#####.###";c
print "Koef. teplot. vodivosti formy (a) = ";using ".#####";a
print "Koef. tepel vodivosti formy (lambda) = ";using "###.###";lambda
print "=====
input "Vytisknout=1 ";inp2
if inp2<>1 goto 200
lprint " "
lprint "Výp. měř. tepla forem, tepel. a teplot. vodiv. a bf"
lprint "=====
lprint "modul : M=";using ".###";m
lprint "stupeň paraboly : n=";using "#.##";n
lprint "vzdálenost : xf=";using ".###";xf
lprint "hustotu materiálu odlitku : rom=";using "#####";rom
lprint "latentní teplo mater. odlitku : L=";using "#####";l
lprint "efektivní teplota : Tef=";using "#####";tef
lprint "hustota materiálu formy :rof=";using "#####";rof
lprint "doba tuhnutí : t=";using "#####";t
lprint "=====
lprint "Měrné teplo formy (c) = ";using "#####.###";c
lprint "Koef. teplot. vodivosti formy (a) = ";using ".#####";a
lprint "Koef. tepel vodivosti formy (lambda) = ";using "###.###";lambda
lprint "Koef. tepel. akumulace (bfv) = ";using "#####.###";bfv
lprint "=====
200
end

```

P r o g r a m

pro výpočet tepelné akumulace forem podle HALBARTA

```

cls
120 print "Výpočet bfh forem"
173 input "Modul [m] (např. 0.01) : M=";m
174 input "konstanta [-] (např. 1.7725) : k=";k
175 input "hustotu materiálu odlitku [kg/m3] (např. 2520) : rom=";rom
176 input "latentní teplo mater. odlitku [J/kg] (např. 401900) : L=";l
177 input "efektivní teplota [stupeň Celsia] (např. 560) : Tef=";tef
178 input "doba tuhnutí [s] (např. 180) : t=";t
185 input "Opravit=1 ";inp1
if inp1=1 then goto 173
bfh=m*k*rom*l/(2*tef*sqr(t))
print "modul : M=";using "####";m
print "konstanta : k=";using "#####";k
print "hustotu materiálu odlitku : rom=";using "####";rom
print "latentní teplo mater. odlitku : L=";using "#####";l
print "efektivní teplota : Tef=";using "####";tef
print "doba tuhnutí : t=";using "####";t
print "=====
print "Koef. tepel. akumulace (bfh) = ";using "#####.###";bfh
print "=====
input "Vytisknout=1 ";inp2
if inp2<>1 goto 200
lprint " "
lprint "Výpočet koeficientu tepelné akumulace forem"
lprint "=====
lprint "modul : M=";using "####";m
lprint "konstanta : kf=";using "#####";k
lprint "hustotu materiálu odlitku : rom=";using "####";rom
lprint "latentní teplo mater. odlitku : L=";using "#####";l
lprint "efektivní teplota : Tef=";using "####";tef
lprint "doba tuhnutí : t=";using "####";t
lprint "=====
lprint "Koef. tepel. akumulace (bfh) = ";using "#####.###";bfh
lprint "=====
200
end

```