

**Výběh železa z roztoku a sorpce v labori,
analiza železa pomocí
železných sorpcí**

Číslo: 23 - 07 - 6

**Spektroskopická analýza
železa**

**Spektroskopická analýza
železa pomocí železných sorpcí**

**Spektroskopická analýza železa
v kyselém roztoku**

**Číslo: 23 - 07 - 6
27 - 07 - 1969/70**

**Vedoucí práce: Ing. Stanislav Křížek, CSc. /Jiří Václav/
Komentátor: Ing. Pavel Štěpán /Jiří Václav/**

Obsah práce a příloh

Práce železa:	64
Práce železa a kobaltu:	18
Práce kobaltu:	15
Práce niklu:	*

Číslo: 62.74.01

23. srpna 1969

Vysoká škola: strojn^í a textiln^í
v Liberci

Fakulta: strojn^í

Katedra: materiálu a strojírenské
metalurgie

Školní rok: 1979/80

DIPLOMOVÝ ÚKOL

pro Helena K O V Á Č O V Á

obor strojírenská technologie

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

Název tématu: Studium problematiky tuhnutí odlitku
v kombinované formě

Pokyny pro vypracování:

1. Shromážděte podklady o použití kombinovaných forem (z materiálů s různými tepelně-fyzikálními vlastnostmi) k výrobě odlitků a o podmínkách tuhnutí odlitků v kombinovaných formách.
2. Na stávajícím zařízení proveďte stanovení koeficientu tepelné akumulace b_F různých materiálů.
3. Proveďte odlití zkušebních odlitků z Al slitin do forem kombinovaných z různých materiálů a vyhodnoťte průběh jejich tuhnutí.
4. Získané poznatky zhodnoťte a formulujte dílčí závěry o možnostech řízení procesu tuhnutí odlitků v kombinovaných formách.

Autorské právo se řídí směrnicí
MŠK pro státní záv. zkoušky č. j.
727/62-III/2 ze dne 13. června
1962-Věstník MŠK XVIII, šesti 24 ze
dne 31. 8. 1962 § 19 aut. z. č. 115/53 Sb.

V. 37/1980 S

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

Rozsah grafických laboratorních prací: schemata, grafy, tabulky

Rozsah průvodní zprávy: cca 50 stran

Seznam odborné literatury:

Příbyl : Tuhnutí a nálitkování odlitků
Vejník : Teorija zatverděvanija otlivki
Anitovič: Ochložděníje otlivki v kombinirovanoj forme

Vedoucí diplomové práce: Ing. Zdeněk Holubec, CSc

Konsultanti: Ing. Pavel Simon

Datum zahájení diplomové práce: 8.10.1979

Datum odevzdání diplomové práce: 23.5.1980



Doc. Ing. Václav Chaloupecký, CSc

Vedoucí katedry

Doc. RNDr. Bohuslav Stříž, CSc

Děkan

Miestoprísahažné prehlásenie

Miestoprísahažne prehlasujem, že som diplomovú prácu
vypracovala samostatne s použitím uvedenej literatúry.

V Liberci dňa 23. mája 1980

O B S A H :

1.	ÚVOD	5
2.	TEORETICKÁ ČASŤ	7
2.1.	Rozbor tuhnutia a chladnutia kovu vo forme	7
2.2.	Kryštalizácia kovov a zliatin	9
2.2.1.	Kryštalizácia neželezných kovov a zliatin	10
2.3.	Tepelné pochody v sústave kov - forma	11
2.3.1.	Diferenciálne rovnice vedenia tepla	11
2.3.2.	Prestup tepla z taveniny do formy	12
2.3.3.	Prietok tepla zvislou stenou	13
2.4.	Doba tuhnutia	14
2.4.1.	Metódy zisťovania doby tuhnutia	15
2.4.1.1.	Matematické riešenie doby tuhnutia podľa A. I. Vejnika	17
2.4.1.2.	Kritéria odvodu tepla	18
2.4.2.	Konštanta tuhnutia	19
2.5.	Tepelná os odliatku	20
2.5.1.	Priečny teplotný gradient v odliatku, alebo vo forme	21
2.6.	Namáhanie zlievarenských foriem	22
2.7.	Tepelná vodivosť formy	24
2.8.	Koeficient tepelnej akumulácie formy	25
2.8.1.	Experimentálne stanovenie koeficientu tepelnej akumulácie	29
2.9.	Sádra a sádrové formovacie materiály	30
2.10.	Kombinované formy	32
2.10.1.	Použitie kombinovaných foriem	32
3.	EXPERIMENTÁLNA ČASŤ	33
3.1.	Návrh metodiky a skúšobnej formy	33

3.2.	Popis skúšobného zariadenia	33
3.3.	Použité skúšobné materiály	35
3.3.1.	Príprava keramickej zmesi	35
3.3.1.1.	Žihanie keramickej zmesi	36
3.3.2.	Postup prípravy sádrových dosiek	37
3.3.2.1.	Tepelné spracovanie sádrových dosiek	38
3.3.2.2.	Určovanie vodného súčiniteľa	39
3.4.	Kalibrácia termočlánkov	40
3.5.	Určovanie koeficientu tepelnej akumulácie formy	41
3.6.	Vyhodnotenie koeficientu tepelnej akumulácie	47
3.6.1.	Vyhodnotenie koeficientu tepelnej akumulácie u foriem rôzne tepelne spracovaných	49
3.7.	Meranie priebehu tuhnutia odliatku v kombinovaných formách	51
3.7.1.	Vyhodnotenie priebehu tuhnutia odliatku v kombinovaných formách	53
3.8.	Sledovanie priebehu tuhnutia odliatkov podľa makroštruktúry skúšobných odliatkov	54
3.8.1.	Vyhodnotenie priebehu tuhnutia odliatkov podľa makroštruktúry	54
4.	ZÁVER	58
5.	ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	61
6.	ZOZNAM PRÍLOH	62

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV :

a	- súčiniteľ teplotnej vodivosti	/m ² /s/
b _f	- koeficient tepelnej akumulácie	/Ws ^{1/2} /Km ² /
Bi	- Biotovo kritérium	
c	- merné teplo	/J/kgK/
Fo	- Fourierovo kritérium	
△G	- voľná entalpia	/J/
h	- hrúbka steny	/m/
k	- konštanta tuhnutia	/m/s ^{1/2} /
f	- hrúbka stuhnutej vrstvy	/m/
L	- latentné teplo	/J/kg/
λ	- súčiniteľ tepelnej vodivosti	/W/Km/
n ₂	- koeficient paraboly	
R	- redukovaná hrúbka odliatku	/m/
ρ	- merná hmotnosť	/kg/m ³ /
S	- povrch odliatku	/m ² /
s	- hrúbka dosky	/m/
σ _{s-1}	- povrchové napätie	/N/m/
T	- teplota	/°C/
t	- čas	/s/
Δ	- rozdiel teplôt	/°C/
V	- objem odliatku	/m ³ /
v	- rýchlosť	/m/s/
X	- charakteristický rozmer odliatku	/m/
x	- obecná vzdialenosť	/m/
x ₂	- udáva vzdialenosť prehriatia formy od líca	/m/
Q	- množstvo tepla	/J/
Δ	- Laplaceov operátor	

1. Ú V O D :

Jednou z hlavných úloh vychádzajúcich zo záverov XV. zjazdu KSČ súvisiacich s neustále rastúcim rozvojom strojár-
renskej výroby, je zvyšovanie nielen produktivity práce,
ale aj presnosti a kvality výrobkov so znižujúcimi sa ná-
kladmi na suroviny a energiu.

Vedecko-technický rozvoj socialistickej výroby je zalo-
žený na vývoji techniky v plnom využití poznatkov vedecko-
technického pokroku vo výrobnnej praxi.

Zlievarenstvo je dôležitou súčasťou celej strojárrenskej
výroby, preto sa musí orientovať na také druhy odliatkov,
ktoré umožnia znížiť spotrebu kovov a pracnosť výroby. Ide
predovšetkým o rast výroby odliatkov s vyššou rozmerovou
a tvarovou presnosťou. Jednou z týchto metód je aj výroba
odliatkov liatím do sádrových foriem. Súčasti vyrobené
touto technológiou nevyžadujú skoro žiadnu ďalšiu úpravu
povrchu a ich tvarová a rozmerová presnosť je veľmi dobrá.
Táto metóda sa používa pri výrobe odliatkov, u ktorých vyža-
dujeme veľmi hladký povrch. K odlievaniu sa používa hliník,
zriedka aj meď.

Táto práca rieši jednu z dielčích otázok výroby odliat-
kov v sádrových formách. V súčasnej dobe sa veľmi presné
odliatky vyrábajú odlievaním do celosádrových foriem.
Vzhľadom k tomu, že sádra je pomerne drahý materiál a každá
dodávka sádrovej formovacej zmesi "Garasin" vykazuje iné
vlastnosti, bolo rozhodnuté skúmať, či by sa dali tieto
presné odliatky vyrábať v kombinovaných formách, pričom

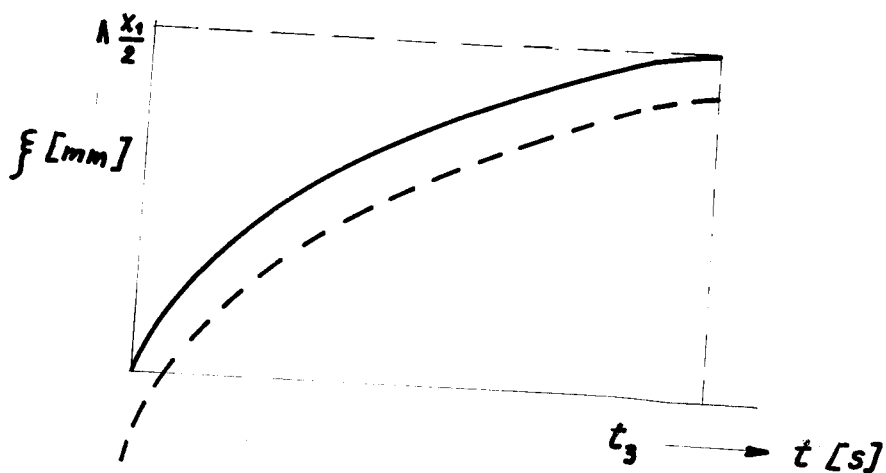
z dôvodov dodržiavania presnosti a kvality povrchu dutín vyrábaných odliatkov by jadrá zostali sádrové a na výrobu foriem by sa použil iný formovací materiál. Preto sa snažíme zvyšovať vodivosť "Stavebnej sádry", ktorá z ekonomického hľadiska je lacnejšia ako sádrová formovacia zmes "Garasin", rôznymi prísadami, aby sa potom z najvodivejšej zmesi mohlo zhotoviť len jadro, tým by sa zachovala hladkosť povrchu dutiny a forma by mohla byť zhotovená z iného formovacieho materiálu.

2. T E O R E T I C K Á Č A S Ť :

2.1. Rozbor tuhnutia a chladnutia kovu vo forme : /6/

Tuhnutím tekutého kovu vo forme rozumieme prechod z tekutej do tuhej fázy bez ohľadu na amorfnosť materiálu. Ide prakticky o zdielanie tepla medzi odliatkom a formou. Toto teplo je odvedené do zlievarenskej formy, alebo do okolia.

Pri styku formy s tekutým kovom odvádza forma z kovu teplo, jej teplota stúpa a teplota kovu klesá. Ak klesne teplota kovu na teplotu tuhnutia, nastáva prechod kovu zo skupenstva kvapalného do skupenstva tuhého, a to postupne od steny formy /jadra/ smerom k tepelnej osi odliatku. Čím rýchlejšie odvádza forma z kovu teplo, tým rýchlejšie prebieha v kove kryštalizačný pochod, čo sa výrazne prejaví na charaktere kryštalizácie a tým tiež na vlastnostiach odliatku. Pretože rýchlosť odvodu tepla z kovu formou je závislá na tepelne fyzikálnych vlastnostiach formy, je aj rýchlosť tuhnutia odliatku závislá na tepelne fyzikálnych a geometrických vlastnostiach formy.



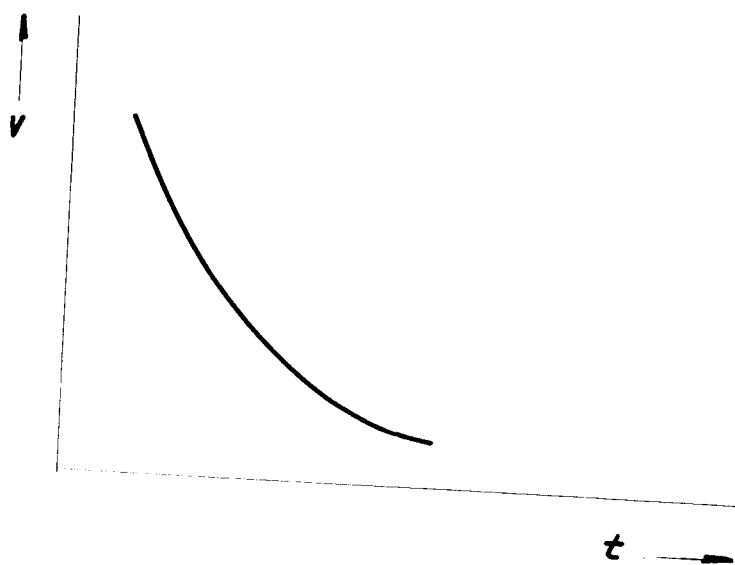
Obr. 1. Závislosť stuhnutej vrstvy kovu na čase.

Podmienky pre prestup tepla z taveniny do formy počas liatia, tuhnutia a chladnutia odliatku sa neustále mení. Po odliati do formy trvá určitú dobu bezprostredný styk tekutého kovu so stenou formy. Po čase sa vytvorí určitá vrstva tuhého kovu u steny formy a tým sa menia podmienky pre prestup tepla z kovu do steny formy. Táto vrstva neustále narastá v závislosti na čase približne parabolicky. Túto závislosť odvodil Chvorinov.

$$f = k \cdot \sqrt{t} \quad (1)$$

Pre veľké prehriatie taveniny sa krivka $f = f / t$ posúva dole ako uvádza Přebyl /3/.

Závislosť okamžitej rýchlosti tuhnutia na čase podľa Přebyla je na obrázku č. 2. Táto krivka je teoreticky polytropa.



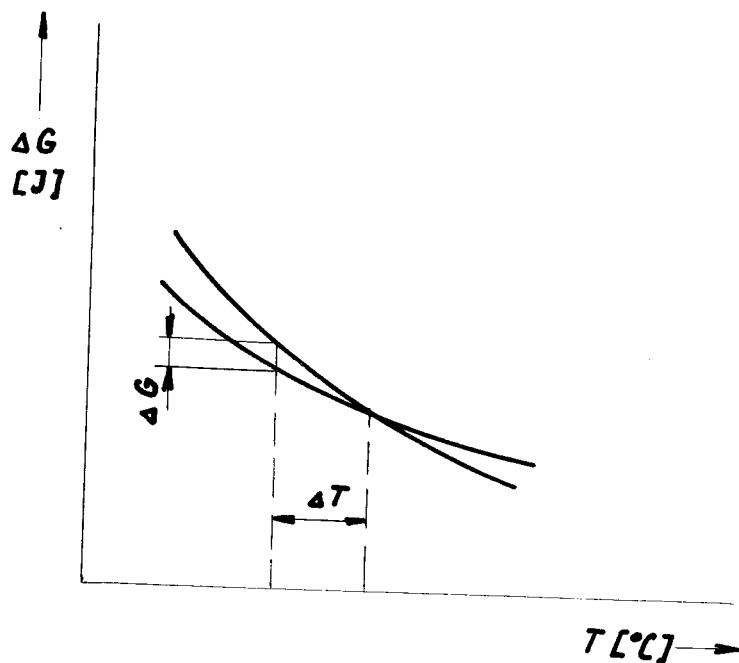
Obr. 2. Závislosť rýchlosti tuhnutia na čase.

Po vytvorení vrstvy stuhnutého kovu dochádza k zmršťovaniu odliatku a medzi ním a stenou formy sa vytvára medzera. V tomto prípade sa prestup tepla uskutočňuje cez vzniknutú vrstvu a cez medzeru. Tepelná vodivosť medzery, ktorá je vyplnená plynmi je menšia ako tepelná vodivosť formy a už stuhnutého kovu, a tým sa zníži intenzita odvodu tepla z taveniny. Táto medzera sa neustále rozširuje v závislosti na zmršťovaní odliatku a tepelných dilatáciách formy. Jej hrúbka je závislá na rozmeroch odliatku a na zmrštení kovu /5/.

2.2. Kryštalizácia kovov a zliatin : /6/

Kryštalizácia je dej, pri ktorom z pôvodnej tekutej fáze vzniká tuhá fáza kryštalického charakteru. Čisté kovy a eutektické zliatiny kryštalizujú za určitej stálej teploty tuhnutia. Ostatné zliatiny kryštalizujú v rozmedzí teplôt danom vzdialenosťou likvidu od solidu v rovnovážnom diagrame. Počas kryštalizácie sa uvoľňuje skupenské teplo tuhnutia. Príčinou kryštalizácie je snaha kovu, alebo zliatiny dosiahnúť pri zmene teploty stabilného stavu. Tento stav je charakterizovaný minimálnou voľnou entalpiou.

Kryštalizácia je difúzny pochod s postupujúcim zakladaním zárodkov a ich rastom. Musí dôjsť k prechladeniu pod teoretickú teplotu tuhnutia, aby rozdiel voľnej entalpie ΔG medzi fázou novo vznikajúcou a pôvodnou bol dostačujúci k podnieteniu kryštalizácie. Je to exotermný pochod, u väčšiny kovov pri tuhnutí dochádza k objemovej kontrakcii. Pri kryštalizácii v kove sledujeme voľnú entalpiu jednotlivých fáz závislú na teplote.



Obr. 3. Termodynamické podmienky kryštalizácie.

Stabilnejšia je tá fáza, ktorá má nižšiu voľnú entalpiu. Tavenina v mieste, kde má vzniknúť kryštál musí byť mierne podchladená, čo je príčinou zmeny energie, spotrebovanej na vznik nových častíc a to je sprevádzané zmenou voľnej entalpie.

$$\Delta G_z = V_z \cdot \Delta G_v + S_z \cdot \sigma_{s-l} \quad (2)$$

2.2.1. Kryštalizácia neželezných kovov a zliatin : /6/

Postup tuhnutia odliatkov z čistého hliníku je ovplyvnený jeho vysokou tepelnou vodivosťou. Pri tuhnutí v pieskovej forme dochádza k rastu dendritov, ktoré rastú pozvoľna, pokiaľ sa sami v raste nezačnú obmedzovať. Tavenina, ktorá zostane uzavretá medzi vetvami dendritov sa nemôže počas zmršťovania premiestniť, tak sa vytvorí sťažneniny, ktoré sú rozptýlené po celom vnútornom priestore odliatku.

Pri tuhnutí v kovovej forme tomu tak nie je, lebo kryštalické pásmo je veľmi úzke, čím sa znižuje nebezpečie vzniku sťažení medzi vetvami dendritov.

2.3. Tepelné pochody v sústave kov - forma : /6/

Pri styku formy s tekutým kovom odvádza forma z kovu teplo, jej teplota stúpa a teplota kovu klesá. Ak klesne teplota kovu na teplotu tuhnutia, nastáva prechod kovu zo skupenstva kvapalného do skupenstva tuhého a to postupne od stien formy smerom k tepelnej osi odliatku. Čím rýchlejšie odvádza forma z kovu teplo, tým rýchlejšie prebieha v kove kryštalizačný proces, čo sa prejaví na charaktere kryštalizácie a tiež na vlastnostiach odliatku.

Pri tuhnutí a chladnutí odliatku prebiehajú v sústave odliatok-forma tieto tepelné pochody:

- a/ prietok tepla tekutým kovom
- b/ prietok tepla tuhým kovom
- c/ prestup tepla z taveniny do formy
- d/ prestup tepla z tuhého kovu do formy
- e/ prestup tepla z tuhého kovu do formy cez medzeru
- f/ prietok tepla formou
- g/ sálanie tepla otvorenými naliatkami

2.3.1. Diferenciálne rovnice vedenia tepla : /6/

Pre riešenie nestacionárneho tepelného deja musíme nájsť závislosť teploty a množstva odvedeného tepla podľa času pre ľubovoľný bod telesa. Pre prietok tepla akoukoľvek pevnou látkou pri jednorozmernom teplotnom poli

platí Fourierova diferenciálna rovnica prietoku tepla:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (3)$$

Pri trojrozmernom teplotnom poli musíme uvažovať so šírením tepla vo všetkých smeroch a diferenciálna rovnica vedenia tepla bude mať tvar:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (4)$$

Prenos tepla v tavenine je zložitejší ako v tuhej látke, pretože teplo sa odvádza tiež konvekciou /prúdením/, čo znamená, že uvažovaný elementárny objem sa pohybuje. Ak uvažujeme zmenu teploty v závislosti na čase a súčasne zmeny spôsobené premiestňovaním elementu z jedného miesta na druhé, dostaneme vzťah:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} = a \Delta^2 T \quad (5)$$

kde

$$\Delta^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (6)$$

Pričom v_x , v_y , v_z je rýchlosť premiestňovania elementu v danom smere. Táto rovnica, tzv. Fourier-Kirchhoffova, je diferenciálna rovnica vedenia tepla pre tekutý kov.

2.3.2. Prestup tepla z taveniny do formy : /6/

Pre prestup tepla z taveniny do formy platí Newtonov vzťah:

$$dQ = \alpha (T_t - T_f) \cdot dS \quad (7)$$

Súčiniteľ prestupu tepla α udáva množstvo tepla prestupujúceho za jednotku času jednotkou povrchu pri spáde

teploty 1°C medzi teplotou kovu a teplotou formy.

K určení množstva tepla Q podľa Newtonovho vzťahu musíme poznať hodnotu \mathcal{L} , tá môže byť určená z podmienok, ktoré pri prestupe tepla nastávajú:

v medznej laminárnej vrstvičke, ktorá sa nachádza medzi tekutým kovom a formou, prechádza teplo iba vedením, preto tu platí Fourierov vzťah vedenia tepla:

$$dQ = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \cdot dS \quad (8)$$

Môžeme napísať:

$$dQ = \mathcal{L} (T_k - T_f) \cdot dS = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \cdot dS \quad (9)$$

Z toho potom určíme:

$$\mathcal{L} = \frac{-\lambda}{(T_k - T_f)} \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \quad (10)$$

To je diferenciálna rovnica prestupu tepla z taveniny na stenu formy.

2.3.3. Prietok tepla zvislou stenou: /1/

Pri prietoku tepla zvislou stenou formy sa predpokladá stacionárny priebeh teploty a jednorozmerné vedenie tepla, ktoré nastáva u nekonečne veľkej rovinatej dosky s konštantnými teplotami povrchových plôch. V skutočnosti však priebeh teploty je nestacionárny, to znamená, že teplota v telese formy sa s časom mení. Vyjadruje sa to tzv. stupňom paraboly n_2 , ktorý sa s klesajúcou teplotou blíži k jednej. Obecne sa dá určiť z obrázku č. 4 pomocou vzťahu: $n_2 = \frac{S}{S_1}$ ak poznáme priebeh paraboly v stene formy.

U nekovových foriem pre odlievanie hliníka bol experi-

mentálne stanovený empirický vzorec:

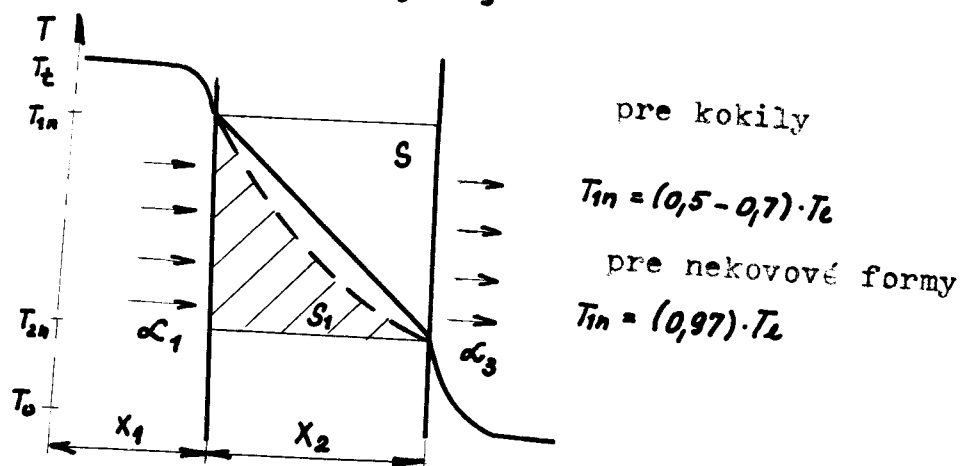
$$n_2 = 3 - 1,67 \cdot \frac{v_{kr} - v_1}{v_{kr}} \quad (11)$$

platí však len ak:

$$\frac{v_{kr} - v_1}{v_{kr}} \approx 0,8 \quad (12)$$

$$v_1 = T_c - T_{kr} \quad (13)$$

$$Q = \frac{T_c - T_0}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_1^n \frac{x_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_3}} \quad (14)$$



Obr. 4. Priebeh teploty v stene formy

2.4. Doba tuhnutia: /3/

Doba tuhnutia nepriamo závisí na konštante tuhnutia k , pretože čím rýchlejšie odliatok tuhne, tým kratšiu dobu bude potrebovať na stuhnutie.

Štúdiom tuhnutia sa zaoberal N. Chvorinov, ktorý zistil, že tvar odliatku má veľký vplyv na dobu tuhnutia, tenkostenné odliatky tuhnú rýchlejšie ako hrubostenné. Hrúbku stien odliatku vyjadril pomerom objemu odliatku k jeho povrchu. Tento pomer sa dá nazvať relatívnou

hrúbkou odliatku. Platí vzťah:

$$R = \frac{V}{S} \quad (15)$$

Doba tuhnutia bude priamo závisieť na relatívnej hrúbke odliatku R. Zo známej relatívnej hrúbky R môžeme stanoviť dobu tuhnutia podľa N. Chvorinova takto :

$$t = \left(\frac{R}{k}\right)^2 \quad (16)$$

Doba tuhnutia doskovitého odliatku môžeme stanoviť podľa N. Chvorinova takto:

$$t = \left(\frac{s}{2k}\right)^2 \quad (17)$$

2.4.1. Metódy zisťovania doby tuhnutia: /6/

Zisťovanie rýchlosti a doby tuhnutia odliatku je dôležitou úlohou teórie tuhnutia, cieľom je nájsť riešenie, pomocou ktorého by bolo možné nielen v každom okamihu určiť hrúbku stuhnutej vrstvy, ale aj okamih, kedy stuhnutie odliatku skončilo.

Pre riešenie problému sú najviac používané metódy zostavené do štyroch skupín:

- a/ matematické riešenie rýchlosti tuhnutia
- b/ aproximatívne metódy
- c/ použitie modelovej techniky
- d/ experimentálne zisťovanie doby tuhnutia.

Z uvedených metód pre zisťovanie doby tuhnutia bola na katedre materiálov a strojárenskej metalurgie podrobne rozpracovaná metóda experimentálneho zisťovania doby tuhnutia.

Používame priameho merania rýchlosti postupu tuhej

vrstvy kovu v závislosti na čase. Z nameraných hodnôt sa potom vypočíta hodnota konštanty k , ktorá sa potom dosadzuje do vzťahu:

$$f = k\sqrt{t} \quad (1)$$

Prietok tepla v tuhých telesách má parabolický priebeh a aj priebeh tuhnutia sa musí riadiť parabolickým zákonom. Používame 3 metódy:

1. metóda vylievacej skúšky:

Princíp spočíva v tom, že sa jedným kovom s rovnakou liacou teplotou odleje niekoľko foriem. Vo vopred určených časových intervaloch sa potom postupne z jednotlivých foriem vylieva tekutý kov a meria sa hrúbka vrstvy kovu, ktorá za túto dobu stuhla.

2. metóda priameho merania teplotného poľa odliatku a formy:

Meria sa pomocou termočlánkov zabudovaných jak do odliatku, tak do formy. Metóda uľahčuje previesť analýzu teplotného poľa odliatku a formy.

3. metóda sledovania priebehu tuhnutia podľa makroštruktúrnych vrstiev.

Táto metóda má niekoľko modifikácií:

a/ pridávaním síry, poprípade rádioaktívneho prvku do taveniny počas tuhnutia, dá sa stanoviť oblasť taveniny proti stuhnutej kôre,

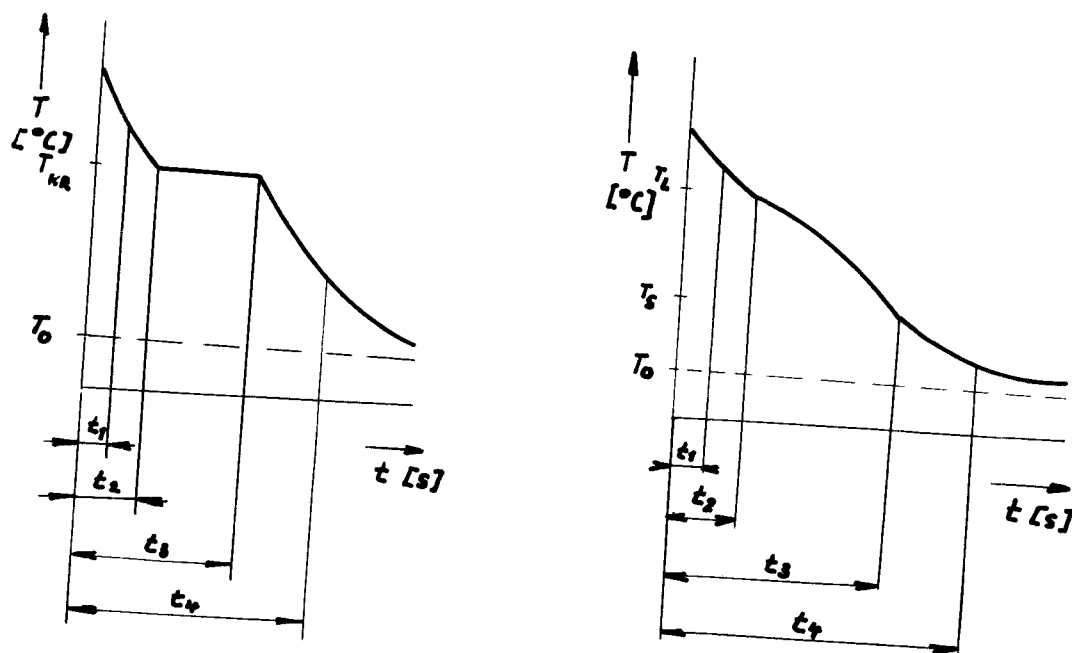
b/ vibráciou formy počas tuhnutia vzniknú v štruktúre vrstvy, podľa ktorých sa dá usudzovať na priebeh tuhnutia.

2.4.1.1. Matematické riešenie doby tuhnutia podľa A.I. Vejnika :

Vejnikov spôsob riešenia problému tuhnutia spočíva v tom, že odvod tepla z kovu rozdeľuje na 5 štádií:

1. štádium t_1 - odvádzanie tepla z kovu formou počas odlievania do formy, čo predstavuje dobu liatia do formy, ktorá je závislá na veľkosti formy a na hydrodynamických podmienkach liatia.
2. štádium t_2 - odvádzanie tepla prehriateho kovu, toto štádium končí, keď posledná časť tekutého kovu dosiahne teploty likvidu.
3. štádium t_3 - odvádzanie skupenského tepla tuhnutia, toto štádium končí, keď teplota naposledy tuhúcej časti taveniny klesne pod teplotu solidu, v tomto okamihu končí tuhnutie odliatku.
4. štádium t_4 - chladnutie stuhnutého odliatku vo forme
5. štádium t_5 - chladnutie odliatku mimo formu

Najväčší význam má tretie štádium, kedy prebieha tuhnutie odliatku



kov tuhne pri jednej teplote kov tuhne v intervale teplôt

Obr. 5. Priebeh tuhnutia kovu vo forme

2.4.1.2. Kritéria odvodu tepla: /6/

Za hlavnú charakteristiku intenzity odvodu tepla z kovu formou volí Vejník Biotovo kritérium Bi :

$$Bi = \frac{\mathcal{L}}{\lambda_s} \cdot \chi \quad (18)$$

$$\mathcal{L} = \frac{-\lambda}{(T_k - T_f)} \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \quad (10)$$

$Bi \ll 1$ znamená to, že súčiniteľ prestupu tepla \mathcal{L} je v porovnaní s λ veľmi malé, tepelná vodivosť kovu λ prevláda nad prestupom tepla z kovu do formy a v kove sa vytvorí mierny teplotný gradient.

$Bi \gg 1$ znamená to, že L je v porovnaní s λ veľmi veľké, teplota v kove sa v dôsledku veľkého odvodu tepla formou a malej tepelnej vodivosti kovu nestačí po priereze odliatku vyrovnávať a v odliatku sa vytvorí strmý priečny teplotný gradient. Čím väčšia je vypočítaná hodnota Bi , tým pomalšie odliatok tuhne.

Fourierovo kritérium:

$$\bar{F}_0 = \frac{a \cdot t}{x^2} \quad (19)$$

Čím je vypočítaná hodnota F_0 menšia, tým väčší je priečny teplotný gradient a tým pomalšie odliatok tuhne.

2.4.2. Konštanta tuhnutia: /3/

Najväčší význam pre tuhnutie má konštanta tuhnutia k . Čím je konštanta k väčšia, tým rýchlejšie prebieha tuhnutie a tým rýchlejšie narastá stuhnutá kovová vrstva. Vhodné je posudzovať konstantu tuhnutia podľa skutočnej stuhnutej hrúbky v jednotke času, teda podľa izosolidy, preto vzorec podľa J. A. Nechendziho má tvar:

$$k = \frac{T_s \cdot b_f}{L_k + (T_{tuh} - T_s) \cdot c_k \cdot \rho_k} \cdot 1,158 \quad (20)$$

Čím vyššia je teplota solidu T_s zliatiny, tým väčšia je konštanta tuhnutia.

Zo vzorca vidieť ako môžeme do istej miery regulovať rýchlosť tuhnutia danej zliatiny. Je to okrem koeficientu tepelnej akumulácie formy tiež liacia teplota.

Čím vyššia je liacia teplota zliatiny, tým väčšie je jej fyzikálne teplo a tým pomalšie bude tuhnúť.

Materiál formy	Materiál odliatku	k /m/s ^{1/2} /	Literatúra
Piesková forma	šedá liatina	0,00067	/3/
kokile		0,00280	
kokila	hliník	0,00400	
piesková forma	ocel'	0,00100	
kokila		0,00333	

Tab. 1. Hodnoty konštánt tuhnutia pre rôzne materiály odliatku a formy.

2.5. Tepelná os odliatku: /2/

Geometrické miesto bodov, ktoré majú v danom okamihu najväčšiu teplotu, je tepelná os odliatku. V mieste tepelnej osi odliatku tuhne kov najneskôr. Ak ochladzujeme odliatok zo strán rovnomerne, stuhne posledný tekutý kov v strede steny odliatku. Ak je odliatok ochladzovaný zo strán nerovnomerne, bude koniec tuhnutia posunutý k stene pomalšie ochladzovanej, preto je veľmi dôležité pri konštrukcii odliatku, aby tepelná os odliatku bola totožná s geometrickou osou odliatku. U všetkých odliatkov, kde dôjde k oddeleniu geometrickej osi

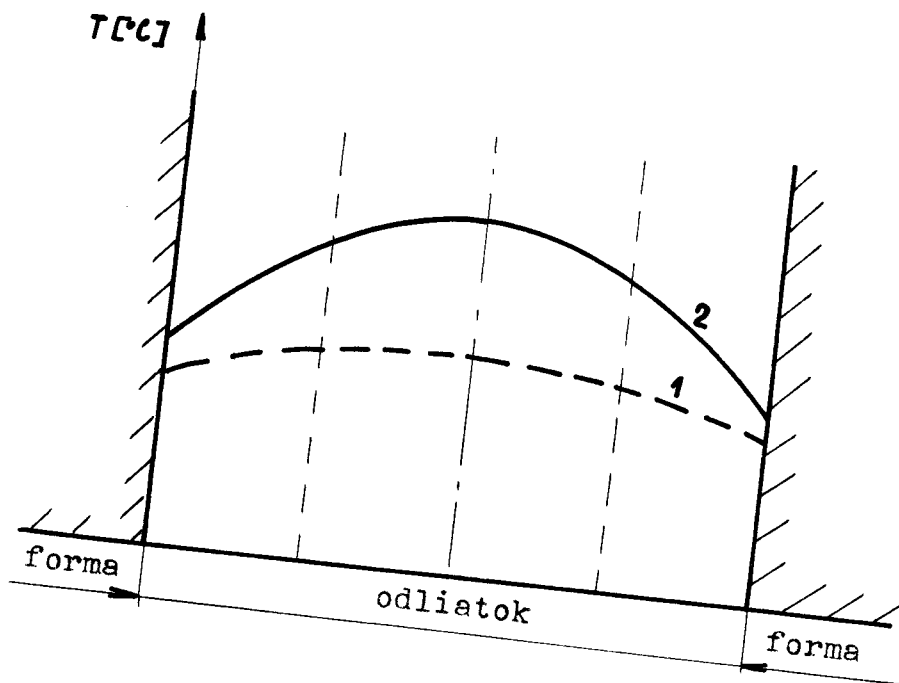
od tepelnej je nebezpečenstvo vzniku sústredených sťažení v stenách odliatku, pretože tieto uzavreté miesta chladnú najneskôr. Na tuhnutie má vplyv rôznych formovacích materiálov.

Pásmo tuhnutia posledných kryštálov postupuje v krivkách zvaných izosolidy. U kombinovaných foriem z dvoch materiálov sa teplotný gradient skladá z dvoch vetví. Napríklad kovová forma - sádrová forma, teplotný gradient má maximum bližšie k sádrovej forme, lebo horšie odvádza teplo ako forma kovová a v mieste maximálneho gradientu prechádza tepelná os odliatku kombinovanej formy.

2.5.1. Priechny teplotný gradient v odliatku, alebo vo forme:

Zliatina v stene odliatku chladne od povrchu, preto aj jej teplota pri povrchu bude obyčajne nižšia ako uprostred. Zliatina sa odlieva s liacou teplotou T a v okamihu, kedy liatie končí je rozdelenie teplôt priechne cez stenu odliatku dané krivkou, ktorú nazveme priechnym teplotným gradientom.

Priechnym teplotným gradientom v odliatku, alebo vo forme rozumieme rozdiel teplôt odliatku v danom čase t napriech odliatkom, t.j. v hrúbke odliatku.



Obr. 6. Príklady priečných teplotných gradientov.

Krivka 1 predstavuje teplotný gradient pre odlievanie do pieskových foriem.

Krivka 2 predstavuje teplotný gradient pre odlievanie do kokily.

Plochým teplotným gradientom sa vyznačuje ochladzovanie odliatku v pieskovej forme. Pre kovovú formu je typický strmý teplotný gradient, lebo kokila lepšie sprostredkováva prestup tepla ako piesková forma. Sádrové formy majú teplotný gradient tiež veľmi plochý, pretože sádra je veľmi zlý vodič tepla.

2.6. Namáhanie zlievarenských foriem :

Zlievarenské formy sú namáhané

a/ mechanicky

b/ tepelne

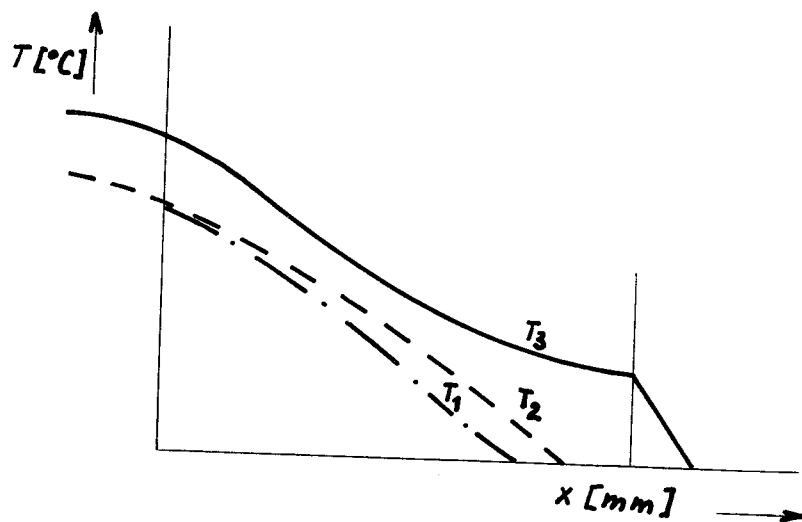
c/ chemicky

a/ mechanické namáhanie:

- pri výrobe formy - tlak
- pri manipulácii - rázy
- pri plnení formy kovom - tlakom - statickým $p = hg\rho$
 - dynamickým $p = 2 hg\rho$
- pri prúdení kovu vo forme - trenie
- pri tuhnutí a chladení odliatku - namáhanie od brzdeného zmršťovania

b/ tepelné namáhanie:

- v dôsledku ohrevu od vysokej teploty roztaveného kovu, ktorej musí materiál formy odolávať
- nerovnomerné rozdelenie teplôt v stene formy



Obr. 7. Graf znázorňuje časový priebeh tepelného namáhania vo forme.

- krivka T_1 - predstavuje materiál s malou tepelnou vodivosťou
- krivka T_2 - predstavuje materiál s lepšou tepelnou vodivosťou
- krivka T_3 - predstavuje ideálny materiál, ktorý sa veľmi málo prehreje.

Vznik tepelných napätí vo forme spôsobuje teplotnú deformáciu formy a teplotné napätie.

c/ chemické namáhanie:

Všetky reakcie medzi formou a kovom sa uskutočňujú na líci formy. Reakcie komplexných zlúčenín, ktoré majú iné vlastnosti ako formovací materiál - vznikajú zapečeniny.

Zmeny fyzikálne - chemické vnútri formy sú charakterizované uvoľňovaním plynov a pár.

K reakciám dochádza pri styku roztaveného kovu s materiálom formy.

Pri styku materiálu formy s roztaveným kovom musí mať forma určité vlastnosti.

2.7. Tepelná vodivosť formy: /3/

Tepelná vodivosť je definovaná ako množstvo tepla, ktoré prejde stenou o ploche 1 m² a hrúbky 1 m, pri rozdielne teplôt zúčastnených povrchov stien 1°C za 1 hodinu.

Forma okrem kokily je materiál pórovitý, preto odvod tepla formou bude závisieť na tepelnej vodivosti, mernom teple a najmä na pórovitosti vyjadrenej mernou hmotnosťou upechovanej formovacej hmoty ρ . Veľká pórovitosť je charakterizovaná nízkou objemovou hmotnosťou formovacej hmoty. Čím pórovitejšia je hmota, tým horšie odvádza teplo z odliatku a tým pomalšie odliatok tuhne.

Vlastnosti formy sú vyjadrené koeficientom tepelnej akumulácie formy b_f , ktorý znamená schopnosť formy pohlcovať teplo. Čím väčšia je tepelná vodivosť a merné teplo

formy, tým väčší bude koeficient tepelnej akumulácie formy b_f , ktorý určíme zo vzťahu:

$$b_f = \sqrt{\lambda_f \cdot c_f \cdot \rho_f} \quad (21)$$

2.8. Koeficient tepelnej akumulácie formy: /6/

Taveninu odliavame do formy vždy s určitým prehriatim nad teplotu likvidu, tavenina nezačína tuhnúť v okamihu, keď sa dotkne formy, ale zostáva určitú dobu po odliati v tekutom stave. Táto doba závisí na teplote prehriatia, množstve kovu a tepelne fyzikálnych vlastnostiach formy. Tepelne fyzikálne vlastnosti jak kovu tak aj formy sa vyjadrujú koeficientom tepelnej akumulácie b .

Koeficient tepelnej akumulácie formy b_f zahrňuje schopnosť formy odvádzať a pohlcovať teplo, čím je b_f väčšie, tým intenzívnejšie forma teplo z odliatku odvádza, a teda forma si drží chladiaci účinok /u izolantov je malý chladiaci účinok/.

Všetko teplo sa formou akumuluje, čo je dôležitá tepelná vlastnosť. Napríklad v literatúre sú uvedené nasledujúce hodnoty koeficienta tepelnej akumulácie :

Materiál	Teplota /°C/	b /Ws ^{1/2} /Km ² /	Literatúra
Piesčitohlinitá zmes s prísadou 20 % azbestového prášku, vysušená	20 až 1 500	840 až 1 050	/6/

Materiál	Teplota /°C/	$\frac{b}{W s^{1/2} / K m^2}$	Literatúra
Piesčitohlinitá zmes, sušená, s 10 % hlíny	20 až 1 500	1 400 až 1 750	/6/
Šamotová zmes	20 až 1 500	2 100 až 2 450	/6/
Chrommagnezit s prísadou vodného skla	20 až 1 500	3 500 až 3 850	/6/
Železo	100 až 1 535	22 964 až 27 222	/6/
Oceľ uhlíková	100 až 1 500	14 518 až 12 784	/6/
Liatina - 3 % C	100 až 1 300	14 518 až 13 400	/6/
Meď	100 až 1 083	36 714 až 37 203	/6/
Mosadz - 10 % Zn	100 až 1 050	19 753 až 25 616	/6/
Sádra	80 až 680	434 až 495	/7/
Zmes CT-SiO ₂	-	1 493 až 1 880	/8/
Zmes CT-CrMg	-	2 265 až 3 600	/8/
Vazná zmes s vodným sklom	-	110 až 1 377	/8/
Listový azbest	-	908	/8/
Vzduch	0	564	/5/

Tab. 2. Hodnoty koeficientu tepelnej akumulácie pre rôzne materiály.

Sádrové formy sa vyznačujú neobyčajne nízkymi hodnotami tepelnej akumulácie b_f , v porovnaní s inými materiálmi zlievarenských foriem, to teda v podstate viac negatívne ovplyvňuje kryštalizáciu a javy, ktoré súvisia s priebehom tuhnutia a chladnutia odliatku. Najväčší vplyv na hodnotu b_f v závislosti na teplote má špecifické teplo sádrových zmesí, ktorého zmeny najviac ovplyvňujú hodnotu b_f .

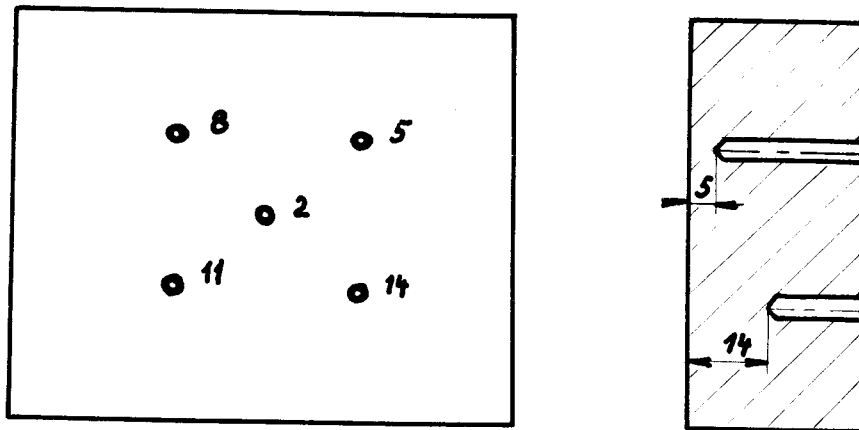
veličina	hodnota
$T / ^\circ\text{C} /$	660
$/\text{kg}/\text{m}^3 /$	2 700
$/\text{kg}/\text{m}^3 /$	2 380
c pri 100 $^\circ\text{C}$ $/\text{J}/\text{K kg} /$	912,72
c pri 600 $^\circ\text{C}$ $/\text{J}/\text{K kg} /$	1 888,57
c_t $/\text{J}/\text{kg K} /$	1 289,53
pri 100 $^\circ\text{C}$ $/\text{W}/\text{Km} /$	212,83

veličina	hodnota
pri 600 °C /W/Km/	261,68
/W/Km/	103,62
a pri 100 °C	85.10 ⁻⁶
a pri 600 °C	83.10 ⁻⁶
a _t /m ² /s/	40.10 ⁻⁶
b pri 100 °C /Ws ^{1/2} /Km ² /	22 957,62
b pri 600 °C /Ws ^{1/2} /Km ² /	27 214,2
b _t /Ws ^{1/2} /Km ² /	16 328,52
L /J/kg/	389 372,4

Tab. 3. Tepelne fyzikálne konštanty pre čistý hliník. /4/

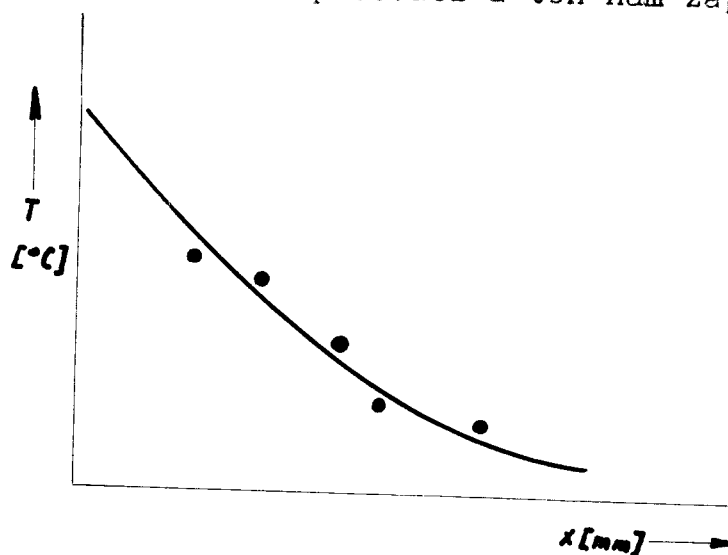
2.8.1. Experimentálne stanovenie koeficientu tepelnej akumulácie: /6/

Meranie prevádzame v experimentálnej forme, kde sa odliatok používa v tvare dosky, alebo válcu, bežnejšie však v tvare dosky.



Obr. 8. Zabudovanie termočlánkov v stene formy.

Jeden termočlánok je v tavenine a ďalšie sú zabudované v stene formy v rôznej vzdialenosti od jej líca. Termočlánky sú vyvedené na zapisovači a ten nám zapisuje teploty.



Obr. 9. Priebeh teploty v rôznych vzdialenostiach od líca formy.

Závislosť teploty na vzdialenosti sa stanovuje v okamihu stuhnutia odliatku.

Vejník /9/ uvádza dva spôsoby vyhodnocovania koeficientu tepelnej akumulácie formy b_f .

- a/ náhrada parabolou
- b/ náhrada sínusovkou.

a/ náhrada parabolou:

Celkom obecnú krivku nahradíme parabolou

$$V = V_{kr} \left(1 - \frac{x}{x_2}\right)^{n_2} \quad (22)$$

$$n_2 = \frac{n_{21} + \dots + n_{25}}{5} \quad (23)$$

$$b_f = \sqrt{\frac{n_2 + 1}{2n_2}} \cdot \frac{R \cdot L_k \cdot \rho}{T_{ka} - T_f} \cdot \sqrt{\frac{1}{t_{tuh}}} \quad (24)$$

b/ náhrada sínusovkou:

Volíme tú náhradnú krivku, ktorá sa najviac blíži priebehu skutočnej krivky.

$$V = V_{ka} \left(1 - \sin \frac{\pi}{2} \cdot \frac{x}{x_2}\right) \quad (25)$$

$$b_f = \sqrt{\frac{1}{\pi - 2}} \cdot \frac{R \cdot L_k \cdot \rho}{T_{ka} - T_f} \cdot \frac{1}{\sqrt{t_{tuh}}} \quad (26)$$

2.9. Sádra a sádrové formovacie materiály: /7/

Metóda liatia do sádrových foriem má prednosti po stránke vysokej presnosti modelov, hladkosti povrchu a technickej možnosti odlievať tenkostenné a tvarovo zložité od-

liatky. Ľahké odstránenie formy z odliatkov šetrí čistenie ich povrchu.

Sádru získavame pálením sádrovca, rozhodujúci vplyv na jej vlastnosti majú okrem výrobných faktorov aj rôzne podmienky vzniku sádrovca.

Základná zmes, ktorá sa osvedčila pre odlievanie hliníka má nasledujúce zloženie:

- 65 % - prášková sádra
- 28 % - kremenná múčka
- 2 % - jemne mletá kremelina
- 5 % - jemne mletý mastenec

Pre prípravu sa používa prášková sádra MG 11, druh II., podľa T GL 21 843 /výrobca Gipswerk Stadttoldendorf - NDR/. Používaná kremenná múčka FF je v akosti bežnej pre prípravu keramických škrupín.

Sádrové formovacie zmesi, ktoré sa používajú na Katedre materiálov a strojárenskej metalurgie, Vysokej školy strojníckej a textilnej v Liberci su :

1. Modellgips MG 11 druh II - NDR, táto sa nazýva alabastrová.
2. Sádru tuzemského pôvodu, ktorá je u nás známa pod názvom "Stavebná sádra" vyrába SOSD n. p. Ostrava závod Koběřice u Opavy.
3. Okrem toho boli skúšané aj niektoré zatmelovacie hmoty bežne používané v dentálnej technike označované obchodným názvom Garasin, ktorého pôvod a zloženie výrobca Dentál Jičín neuvádza.

2.10. Kombinované formy:

2.10.1. Použitie kombinovaných foriem: /1/

Kombinované formy majú hlavné použitie pre výrobu odliatkov z hliníka a jeho zliatin. Metódou presného liatia sa hliníkové zliatiny dajú odlievať do celosádrových foriem, ktoré spĺňajú požiadavky na rozmerovú a tvarovú presnosť odliatku a tiež na konečný povrch odliatku. Vzhľadom k tomu, že sádrové formovacie materiály sú pomerne drahé, preto sa snažíme obmedziť ich použitie len na časti, ktoré vyžadujú rozmerovú presnosť a kvalitný konečný povrch.

Dôvody pre použitie kombinovaných foriem :

- zníženie ceny formovacieho materiálu - nahradenie drahého formovacieho materiálu lacnejším
- skrátenie procesu formovania - veľké formy môžu byť nahradené napríklad "CT" zmesou, ktorá je zhotovená skoro okamžite, sádra sa obmedzí len na jadrá a menšie časti formy.

3. EXPERIMENTÁLNA ČASŤ :

3.1. Návrh metodiky a skúšobnej formy :

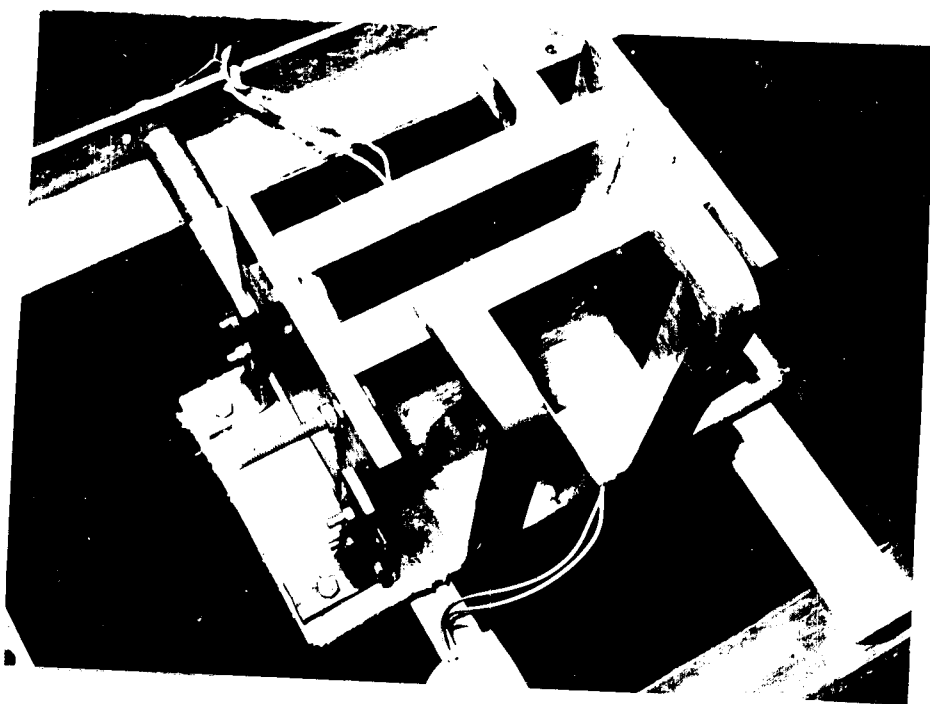
Pre zisťovanie priebehu tuhnutia odliatku z čistého hliníku vo formách z rôznych materiálov boli použité nasledujúce metódy:

1. metóda priameho merania teplotného poľa odliatku a formy. Meranie sa prevádzalo pomocou termočlánkov, ktoré boli zabudované jak do odliatku, tak do formy.
2. metóda sledovania priebehu tuhnutia podľa makroštruktúry skúšobných odliatkov.

K tomuto účelu bola navrhnutá a vyrobená skúšobná forma pre odliatok tvaru dosky tak, aby bol zaistený odvod tepla z roztaveného kovu len v jednom smere. Forma vzhľadom k odliatku mala polonekonečné rozmery, toho sa dosiahlo tým, že výška a dĺžka odliatku bola zvolená 6 krát väčšia ako hrúbka odliatku. Spodná a bočné časti formy boli od odliatku odizolované azbestovými vložkami.

3.2. Popis skúšobného zariadenia :

Používané zariadenie sa skladá z vlastnej formy pre odlievanie kovu a z pomocného stojana. /9/



Obr. 10. Skúšobná forma pripravená k odlietaniu.

Skúšobná forma je zostavená z ocelevej základnej dosky hrúbky 10 mm a rozmerov 260 x 135 mm, na ktorej je prinitovaná izolačná azbestová doska hrúbky 5 mm. Na tejto základnej doske sú pripevnené dve oceleové dosky rozmerov 80x120x150 mm, vzdialené od seba 150 mm, ktoré tvoria dve steny skúšobnej formy. Medzi tieto dve dosky sa vkladajú dve výmenné dosky rozmerov 150x150x20 mm z rôznych materiálov, ktoré tvoria ďalšie dve steny formy.

Vytvorená dutina formy je izolovaná od pevných oceľových bokov azbestovými vložkami, aby sa zabránilo odvodu tepla z roztaveného kovu a zaistil sa odvod tepla z odliatku len v jednom smere a to výmennými doskami.

Táto forma je otočne upevnená na oceľovom stojane tak, že na jednej strane je pevne priskrutkovaná k tyči, ktorá

sa môže v ráme voľne otáčať. Druhá strana formy je voľne uložená na výsuvnej ocelevej tyči. Ďalej je na ráme upevnená zarážka, ktorá slúži k zachyteniu formy po prevedení vylievacej skúšky, t.j. po otočení formy o 180° .

Toto zariadenie slúži nielen k stanoveniu tepelnej akumulácie formy b_f , ale aj k stanoveniu tepelnej osi odliatku /priechneho teplotného gradientu/.

3.3. Použité skúšobné materiály :

Ku skúškam boli použité nasledujúce formovacie materiály:

1. Keramický formovací materiál pre metódu "Schaw"
2. Zmes "stavebná sádra + kremičitý piesok SiO_2 "
3. Zmes "stavebná sádra + karbid kremíku SiC "
4. Zmes "stavebná sádra + železný prášok"
5. Zmes "stavebná sádra + hliníkový prášok ALBO-40"
6. Zmes "stavebná sádra + hliníkový prášok zrnitosti 0,1 mm"
7. Zmes "stavebná sádra + zirkónový prášok"
8. Kokila so zirkónovým náterom.

3.3.1. Príprava keramickej zmesi :

Ako väzná kvapalina bol použitý hydrolyzovaný etylsilikát, ako ostrivo FF múčka a kremičitý piesok SiO_2 zrnitosti 0,6 mm.

Zloženie keramickej zmesi:

hydrolyzovaný etylsilikát	- 200 cm ³
FF múčka	- 400 g
kremičitý piesok SiO_2	- 500 g

Do odmeraného množstva hydrolyzovaného etylsilikátu bolo miešačkou vmiešané 400 g FF múčky, po dvoch minútach bolo ešte vmiešané 500 g kremičitého piesku SiO_2 . Takto pripravená zmes sa miešala ešte desať minút a tým bola pripravená k odlietaniu do rámečkov a k vytvrdeniu.

Tesne pred odliatím sa do pripravenej zmesi vmiešalo 14 g MgO ako gelačný katalyzátor. Po odliati je výhodné ešte poklepať na modelnú dosku, čím sa uvoľnia vzduchové bublinky.

Množstvo gelačného katalyzátoru vo veľkom rozsahu reguluje dobu vytvrdenia. V našom prípade bola v rozmedzí 1,5 - 2 hodiny.

MgO /g/	7	14	21
doba vytvrdenia	4 - 6 /hodín/	1,5 - 2 /hodín/	5 - 20 /minút/

Tab. 4. Doba vytvrdenia v závislosti na množstve MgO.

Aby nedošlo k popraskaniu keramiky je výhodné spomaliť odparovanie etylalkoholu, napríklad prikrytím keramiky, alebo vložením do prostredia s nižšou teplotou.

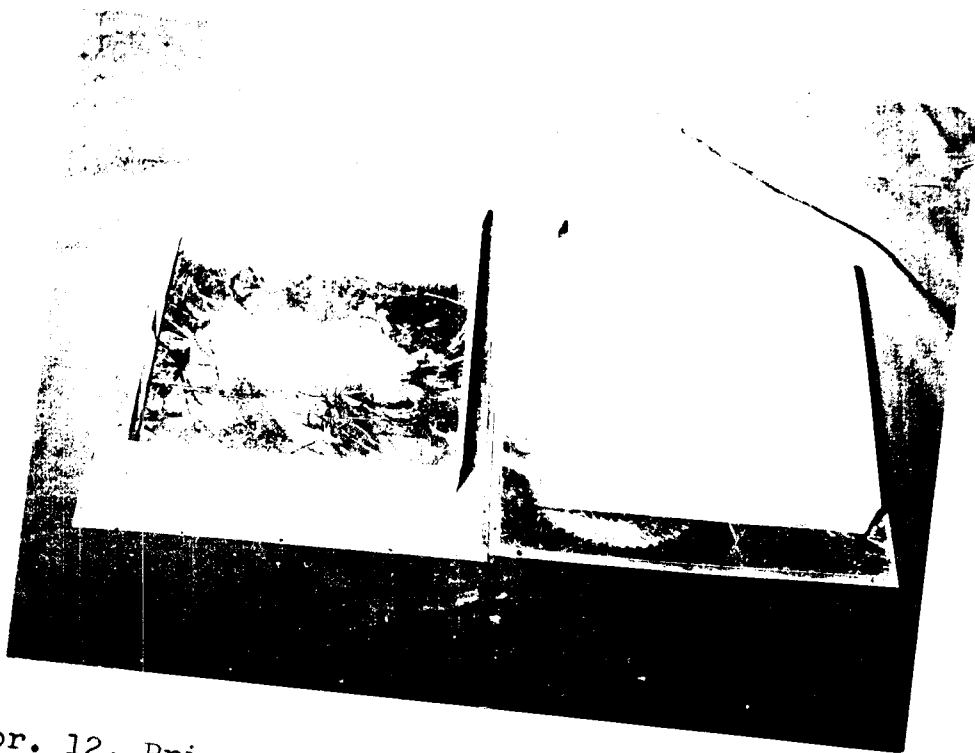
3.3.1.1. Žihanie keramickej zmesi:

Do elektrickej odporovej pece vyhriatej na teplotu 200 - 250 °C boli vložené dosky a rýchlosťou 40-65 °C/hod sa zvýšila teplota na 600 °C, potom sa teplota čo najrýchlejšie zvýši až na teplotu 900 °C. Tento postup je nutný preto, lebo vzorok je vyrobený z kremenného piesku. Kyslíčnik kremičitý SiO_2 mení svoju kryštalografickú štruktúru pri 575 °C, čo je spojené so zväčšením

objemu. Rýchly ohrev by vyvolal túto premenu nedokonalým prehrievaním miestne a dosky by popraskali. Na teplote 900 °C boli ponechané jednu hodinu, potom sa pec vypne a dosky sa vyberajú pri teplote 300 °C.

3.3.2. Postup prípravy sádrových dosiek :

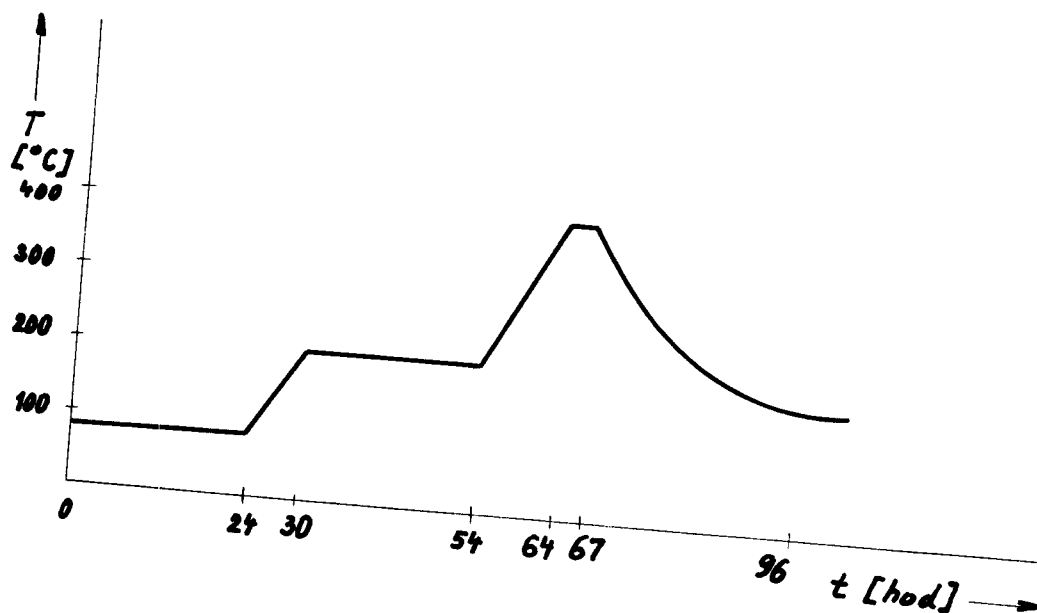
Na jeden pár dosiek bolo použité 900 g zmesi "stavebnej sádry" s rôznym pomerom prísad. Zmes sa 15 sekúnd sypala do potrebného množstva vody, ktoré je určené tzv. vodným súčiniteľom. Miešalo sa 45 sekúnd, 30 sekúnd bol vyklepávaný vzduch a potom sa ešte 20 sekúnd miešala pomaly. Takto pripravená zmes sa naliala do rámčeka rozmerov 150x150x20 mm, v ktorom sa 20 minút stvrdla. Rámček bol položený na skle, aby sme dostali dokonale hladký povrch sádrovej dosky a po vonkajšom obvode bol utesnený, aby zmes z rámčeka nevytekla. Sádrové dosky sa nechali voľne na vzduchu 24 hodín mierne vysušiť, potom sa vložili do pece a tepelne sa spracovávali.



Obr. 12. Pripravený rámček a odliata sádrová doska.

3.3.2.1. Tepelné spracovanie sádrových dosiek :

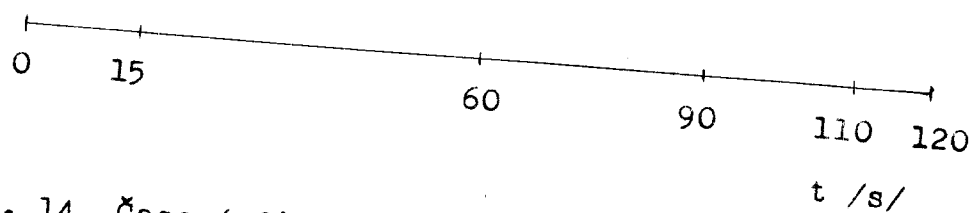
Sádrová doska sa vloží do pece a suší sa pri $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 24 hodín. Potom sa doska suší pri teplote $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, nábeh na teplotu je $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hod}$. Pri tejto teplote sa uvoľňuje voľná voda. Po 24 hodinách sa zvýši teplota na $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ a po dobu troch hodín sa forma žiha, pri ňom sa uvoľňuje viazaná voda, potom sa opäť zníži teplota na $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Používané teploty foriem pri liati sú $100 - 150\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Obr. 13. Diagram tepelného spracovania sádrových dosiek.

3.3.2.2. Určovanie vodného súčiniteľa :

Vodný súčiniteľ určuje podiel vody z váhového množstva sádrovej formovacej zmesi.



Obr. 14. Časový diagram zisťovania vodného súčiniteľa sádrových formovacích zmesí.

- | | |
|------------------|----------------------------------|
| 0 - 15 sekúnd | - sypanie |
| 15 - 60 sekúnd | - miešanie |
| 60 - 90 sekúnd | - odstraňovanie plynových bublin |
| 90 - 110 sekúnd | - pomalé miešanie |
| 110 - 120 sekúnd | - liatie |
| 120. sekunda | - zdvihnutie formy |

Rozmiešaná sádrová zmes sa naliala do válcovej formy s vnútorným priemerom 35 mm a výškou 50 mm. Po naplnení sa forma zdvihla a sádrová kaša sa roztekla po sklenej podložke. Pri správnom pomere vody a sádrovej zmesi by mal byť priemer vzniknutého koláča asi 10 mm.

Vodný súčiniteľ závisí na teplote vody, teplote miestnosti. So vzrastajúcou teplotou vody sa predlžuje doba tuhnutia zmesi, preto sa musí dať voda studená. V našom prípade bola použitá teplota vody 18 °C.

3.4. Kalibrácia termočlánkov :

Pre kalibráciu termočlánkov boli použité tri rôzne druhy materiálov : destilovaná voda

čisté olovo

čistý hliník

Kalibrácia bola prevedená nasledovne:

Termočlánky sa postupne vnášali do destilovanej vody zahriatej na 100 °C, potom do roztaveného čistého olova, ktorého teplota topenia je 327 °C a nakoniec do roztaveného čistého hliníku, ktorého teplota topenia je 658 °C. Na stupnici zapisovača sa odčítalo napätie v /mV/. Získané hodnoty sa vyniesli do grafu závislosti napätia U /mV/ na teplote T /°C/, tým bola získaná kalibračná priamka. Namerané hodnoty sa nepatrne líšia od tabuľkových hodnôt, čo je spôsobené nepresnosťou merania. Kalibrácia bola prevedená pre termočlánky NiCr - Ni.

3.5. Určovanie koeficientu tepelnej akumulácie formy :

Pri stanovení koeficientu tepelnej akumulácie formy b_f bola použitá experimentálna početná metóda podľa Vejnika /2/.

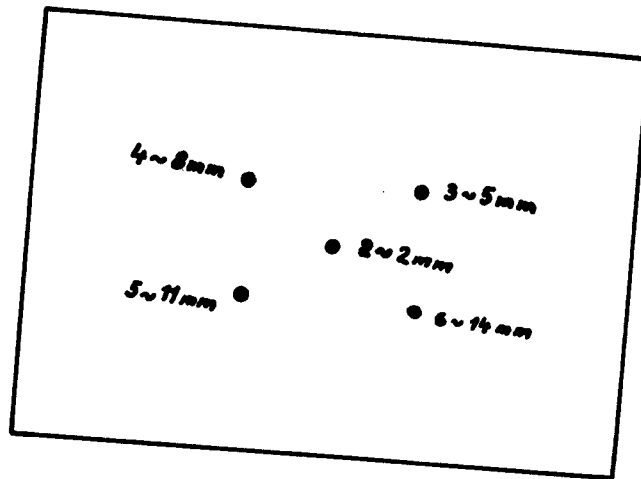
Z rozloženia teplôt v stene formy v okamihu, keď skončilo tuhnutie odliatku a forma prevzala všetko kryštalizačné teplo, je možné určiť hodnotu tepelnej akumulácie formy b_f . Vejnik nahradzuje skutočný priebeh teplôt v stene formy vhodnou jednoduchou funkčnou závislosťou /parabolou, alebo sínusoidou/, aby zjednodušil a uľahčil výpočet.

Ak nahradíme skutočný priebeh teploty vo forme parabolou, je výsledny vzorec pre určenie tepelnej akumulácie formy b_f daný vzťahom :

$$b_f = \sqrt{\frac{n_2 + 1}{2n_2}} \cdot \frac{R \cdot L_k \cdot \rho}{T_{kr} - T_f} \cdot \sqrt{\frac{1}{t_{tuh}}}$$

Vzťah je uvedený bez opravených koeficientov. Pre ciele tejto práce však takto získané hodnoty tepelnej akumulácie formy b_f úplne postačia, najmä pre zistenie priemerných hodnôt tepelne fyzikálnych vlastností foriem.

K meraniu tepelného poľa dosky bol použitý Hoskinsov termočlánok NiCr - Ni s priemerom 0,3 mm, ktoré boli zabudované v skúšobnej doske v rôznych vzdialenostiach od líca formy.



Obr. 15. Rozmiestnenie termočlánkov pri stanovení súčiniteľa tepelnej akumulácie formy b_f .

Rozmiestnenie termočlánkov 2 - 6 je vidieť z obrázku. Termočlánok č. 1 bol umiestnený v dutine formy pre stanovenie okamihu stuhnutia odliatku. Termočlánky boli pripojené k šesťbodovému zapisovaču sovietskej výroby "Elektronnyj avtomatí-českij potenciometr" typ EPP - 09 M3.

Po stuhnutí kovu bolo meranie zastavené a záznam sa nasledovne vyhodnocoval:

Získanými bodmi sa preložili krivky a v okamihu stuhnutia sa podľa kalibračnej priamky odčítali teploty, ktoré boli použité pre výpočet koeficientu tepelnej akumulácie formy b_f .

Namerané priebehy teplôt v stene formy pre rôzne materiály sú znázornené na grafoch č. 2 - 15.

Stanovené hodnoty súčiniteľa tepelnej akumulácie formy b_f sú zhrnuté v tabuľke č. 5 a závislosť súčiniteľa tepelnej akumulácie formy b_f na percentuálnom množstve prísad je znázornená na grafoch číslo 16 - 19.

Tab. 5 Hodnoty koeficientov tepelnej akumulácie

odlievaný kov	Materiál formy	Teplota /°C/		b_f /Ws ^{1/2} /Km ² /
		formy	liaca	
Al	ocel'	20	720	10 565
		220		11 335
	ocel' so zirkono- vým náterom	20		3 626
		220		5 553
	keramická forma vyrobená metódou "Schaw"	20		2 008
		100		2 126
	Napenená sádra	20		906
		Sádrová zmes "Garasin"		100
	Stavebná sádra + 10 % SiO ₂			20
		100		1 564
	Stavebná sádra + 20 % SiO ₂	20		1 463
		100		1 620
	Stavebná sádra + 30 % SiO ₂	20		1 548
		100		1 722

odlievaný kov	Materiál formy	Teplota /°C/		b_f /Ws ^{1/2} /Km ² /
		formy	liaca	
Al	Stavebná sádra + 40 % SiO ₂	20	720	1 811
		100		1 914
	Stavebná sádra + 5 % SiC	20		1 499
		100		1 321
	Stavebná sádra + 10 % SiC	20		1 594
		100		1 563
	Stavebná sádra + 15 % SiC	20		2 077
		100		1 589
	Stavebná sádra + 20 % SiC	20		1 560
		100		1 713
	Stavebná sádra + 25 % SiC	20		1 630
		100		1 783
	Stavebná sádra + 30 % SiC	20		1 802
		100		1 862

odlievany kov	Materiál formy	Teplota /°C/		b_f /Ws ^{1/2} /Km ² /
		formy	lieca	
Al	Stavebná sádra + 40 % SiC	20	720	1 846
		100		1 989
	Stavebná sádra + 50 % SiC	20		2 207
		100		2 288
	Stavebná sádra + 5 % železného prášku	20		1 740
		100		2 140
	Stavebná sádra + 10 % železného prášku	20		1 854
		100		2 455
	Stavebná sádra + 15 % železného prášku	20		2 002
		100		2 492
	Stavebná sádra + 20 % železného prášku	20		2 496
		100		2 519
	Stavebná sádra + 2,5 % hliníko- vého prášku AlBo-40	20		1 675
		100		2 670

odlievaný kov	Materiál formy	Teplota /°C/		b_f /Ws ^{1/2} /Km ² /
		formy	liace	
Al	Stavebná sádra + 5 % hliníkového prášku AlBo-40	20	720	2 048
		100		2 088
	Stavebná sádra + 7,5 % hliníko- vého prášku AlBo-40	20		1 812
		100		1 867
	Stavebná sádra + 10 % hliníkového prášku AlBo-40	20		2 077
		100		1 647
	Stavebná sádra + 5 % Al zrnitosti 0,01 mm	20		1 630
		100		1 563
	Stavebná sádra + 10 % zirkónového prášku	20		1 445
		100		1 521

3.6. Vyhodnotenie koeficientu tepelnej akumulácie :

Prevádzané merania boli zamerané na zisťovanie koeficientu tepelnej akumulácie formy b_f zmesi stavebnej sádry s rôznym pomerom prísad ako ostrivom. Hodnoty sa nedajú porovnať s údajmi v literatúre, lebo tam nie sú uvedené, hodnoty uvedené pre sádru sú podstatne nižšie z toho dôvodu, že pridávané ostrivo zvýšilo tepelnú akumuláciu sádrových foriem.

Získané hodnoty koeficientu tepelnej akumulácie formy b_f zo zmesi "stavebná sádra + kremičitý piesok SiO_2 zrnitosti 0,6 mm" rastú s rastúcim obsahom kremičitého piesku SiO_2 . Súčasne klesala pevnosť sádrových foriem a pri obsahu 40 % kremičitého piesku dosky úplne rozpraskali.

Hodnoty koeficientu tepelnej akumulácie formy b_f zo zmesi "stavebná sádra + karbid kremíku SiC zrnitosti 0,4 mm" s rastúcim obsahom SiC rastú,

Pri odlievaní do studených sádrových foriem s obsahom karbidu kremíku v rozmedzí od 5 % do 20 % sú hodnoty koeficientu b_f vyššie, ako pri odlievaní do teplých foriem zahriatych na 100°C , ako je vidieť z grafu č. 17. Táto anomália sa zatiaľ nedá vysvetliť, lebo merania boli prevádzané len raz a výsledky sa nedajú porovnať, preto bude potrebné znovu previesť skúšky a overiť zistené výsledky. Pri odlievaní do sádrových foriem s obsahom karbidu kremíku v rozmedzí od 20 % do 50 % rastie hodnota koeficientu b_f , ale pri odlievaní do studených foriem je nižšia ako pri odlievaní do foriem zahriatych na 100°C .

Hodnoty koeficientu tepelnej akumulácie u foriem zo zmesi "stavebná sádra + železný prášok" s rastúcim obsahom železného prášku rastú, pri odlievaní do studených foriem sú nižšie ako pri odlievaní do foriem zahriatych na 100 °C. Pritom aj pevnosť sádrových foriem je veľmi dobrá, ale pri obsahu 20 % železného prášku už dochádza pri výrobe sádrovej kaše k jeho usadzovaniu a nie je v zmesi rovnomerne rozptýlený.

Získané hodnoty koeficientu tepelnej akumulácie formy b_f sú vyššie ako u všetkých doteraz použitých formovacích materiálov. Napríklad zmes stavebnej sádry s 5 % železného prášku vyhriata na 100 °C má hodnotu koeficientu b_f vyššiu ako keramická forma vyrobená metódou "Schaw" a ďaleko vyššiu ako zmes stavebnej sádry so 40 % SiO_2 , alebo so 40 % SiC. Zmes stavebnej sádry s 15 % železného prášku má približne 2,5 krát vyššiu hodnotu koeficientu b_f ako sádrová zmes "Garasin".

Z ekonomického hľadiska nie je veľký rozdiel medzi zmesou stavebnej sádry so železným práškom a sádrovou formovacou zmesou "Garasin", pretože 1 kg železného prášku stojí 11,- Kčs a 1 kg "Garasinu" stojí 12,- Kčs. Avšak každá dodávka sádrovej zmesi "Garasin" vykazuje iné vlastnosti, pritom zmes stavebnej sádry so železným práškom sa dá rovnako ľahko odstrániť z odliatku ako sádrová zmes "Garasin".

Hodnoty koeficientu tepelnej akumulácie formy b_f u foriem zo zmesi "stavebná sádra + hliníkový prášok AlBo-40" ohriatej na 100 °C s rastúcim obsahom hliníkového prášku klesajú. V porovnaní s hodnotami u sádrovej zmesi so železným práškom sú nižšie, okrem zmesi stavebnej sádry s 2,5 % hliníkového

prášku, ktorá predohriata na $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ mala hodnotu koeficientu tepelnej akumulácie najvyššiu v porovnaní s hodnotami všetkých použitých skúšobných materiálov, ako je vidieť z tabuľky č. 5.

Koeficienty b_f klesajú parabolicky u foriem zahriatych na $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, ako je vidieť z grafu č. 19. Je to spôsobené pravdepodobne tým, že hliníkový prášok je veľmi ľahký a so stavebnou sádrou sa zle rozmiešaval, ešte bez použitia vody. Pri príprave sádrovej kaše, v dôsledku malej zmáčavosti sa vyplavoval, preto nie je možné určiť presné množstvo hliníkového prášku v sádrovej zmesi. Len množstvo 2,5 % hliníkového prášku AlBo-40 sa rozmiešavalo dobre v oboch prípadoch. Z grafu je vidieť, že ešte menšie množstvo hliníkového prášku zvýši hodnotu koeficientu tepelnej akumulácie.

Z ekonomického hľadiska je však používanie hliníkového prášku málo výhodné, lebo 1 kg hliníkového prášku stojí až 90,- Kčs.

3.6.1. Vyhodnotenie koeficientu tepelnej akumulácie u foriem rôzne tepelne spracovaných :

Boli prevedené aj pokusné merania pre stanovenie koeficientu tepelnej akumulácie u foriem rôzne tepelne spracovaných. K tomuto účelu bola použitá zmes "stavebná sádra + 25 % karbidu kremíku SiC zrnitosti 0,4 mm", z ktorej boli zhotovené tri dosky. Dve dosky boli vysušené, každá pri inej teplote a tretia doska bola vyžíhaná pri teplote $300\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Odlievateľný kov	Materiál formy	Teplota /°C/		b_f /Ws ^{1/2} /Km ² /
		formy	liaca	
Al	Stavebná sádra + 25 % SiC vysušená pri 100 °C	20	720	1 973
		100		1 842
	Stavebná sádra + 25 % SiC vysušená pri 200 °C	20		1 854
		100		1 783
	Stavebná sádra + 25 % SiC vyžíhaná pri 300 °C	20		1 801
		100		1 783

Tab. 6. Hodnoty koeficientu tepelnej akumulácie u foriem rôzne tepelne spracovaných.

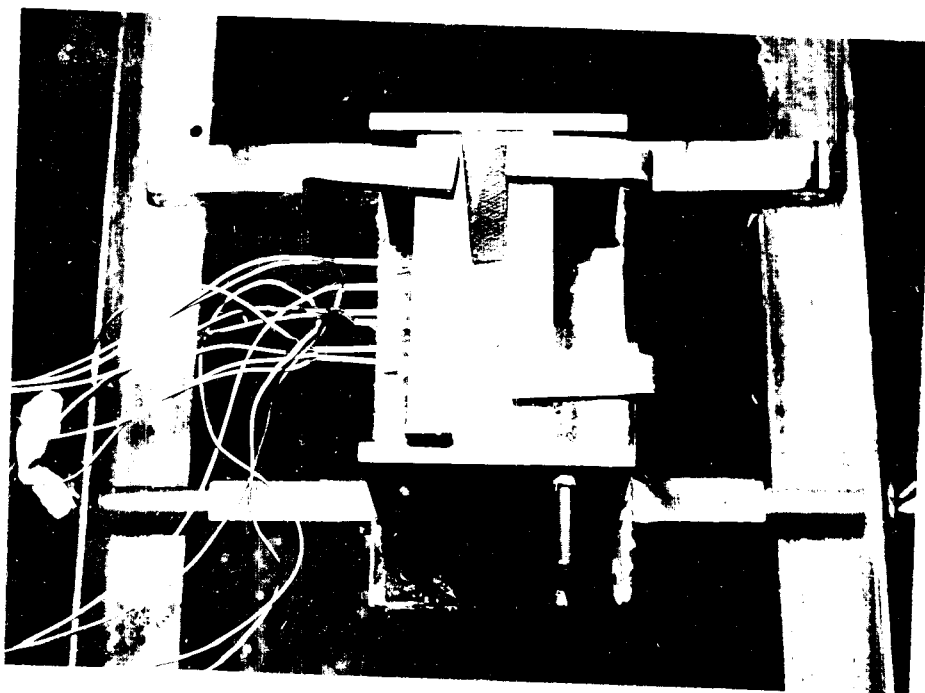
Z uvedených hodnôt je vidieť, že so stúpajúcim obsahom vody, ako dobrého vodiča, stúpa aj koeficient tepelnej akumulácie a jeho hodnoty pri odlievaní do studených foriem sú vyššie ako hodnoty pri odlievaní do foriem zahriatych na 100 °C. Hodnota koeficientu tepelnej akumulácie u formy vysušenej pri 200 °C a u formy vyžíhanej pri 300 °C je pri odlievaní do zahriatych foriem na 100 °C rovnaká, ako pri odlievaní do formy zo zmesi stavebnej sádry s 25 % karbidu kremíku SiC vyžíhanej pri 400 °C a zahriatej na 100 °C.

3.7. Meranie priebehu tuhnutia odliatku v kombinovaných formách :

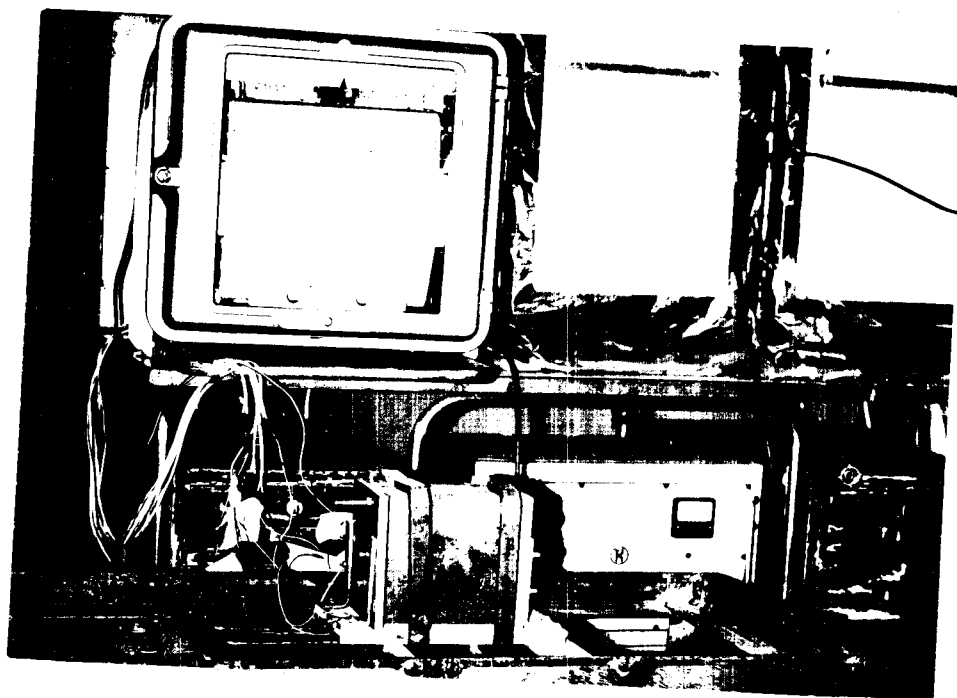
K tomuto meraniu boli použité termočlánky NiCr-Ni o priemere 0,3 mm. Všetkých 6 termočlánkov bolo umiestnených uprostred steny sádrovej formy v rôznych vzdialenostiach od líca protiláhlej formy, ako je to vidieť na obrázku č. 16, boli vyvedené na šesťbodový zapisovač.

K odlievaniu bol použitý čistý hliník a odliatok mal tvar dosky rozmerov 150x150x20 mm. Bola sledovaná doba tuhnutia v závislosti na vzdialenosti od líca sádrovej formy. Teplota predohriatia sádrových foriem sa pohybovala medzi 100 - 150 °C a závislosť doby tuhnutia na vzdialenosti x je znázornená na grafoch č. 20-25. Boli použité nasledujúce kombinácie formovacích materiálov :

1. kokila so zirkónovým náterom - stavebná sádra + 15 %
železného prášku
2. kokila so zirkónovým náterom - stavebná sádra + 20 %
železného prášku
3. kokila so zirkónovým náterom - stavebná sádra + 50 %
karbidu kremíku SiC
4. kokila so zirkónovým náterom - stavebná sádra + 2,5 %
hliníkového prášku
AlBo-40
5. keramická forma vyrobená - stavebná sádra + 20 %
metódou "Schaw" železného prášku
6. keramická forma vyrobená - stavebná sádra + 50 %
metódou "Schaw" karbidu kremíku SiC



Obr. 16. Skúšobná forma pripravená k liatiu.



Obr. 17. Pracovisko pre prevádzkanie skúšok.

3.7.1. Vyhodnotenie priebehu tuhnutia odliatku v kombinovaných formách :

Priebeh tuhnutia v kombinovaných formách je znázornený na grafoch č. 20-25, v ktorých je vynesená závislosť doby tuhnutia na vzdialenosti x /mm/.

Graf č. 20-24 znázorňuje priebeh tuhnutia v kombinovanej forme zloženej z kokily so zirkónovým náterom a zmesi stavebnej sádry s rôznym pomerom prísad. Aj napriek tomu, že boli použité zmesi s najväčšími hodnotami koeficientu tepelnej akumulácie, rozdiel medzi týmito hodnotami a hodnotou pre kokilu so zirkónovým náterom je dosť veľký, čo dokazuje aj poloha tepelnej osi, ktorá je posunutá k stene formy zo sádrovej zmesi.

Na grafoch č. 24-25 je znázornená závislosť doby tuhnutia na vzdialenosti x /mm/ v kombinovanej forme zloženej z keramickej formy vyrobenej metódou "Schaw" a zmesi stavebnej sádry so železným práškom a stavebnej sádry s karbidom kremíku SiC.

V prvom prípade bola použitá studená keramická forma a teplá sádrová forma zahriata na 100°C . Z grafu č. 24. je vidieť, že tepelná os je posunutá bližšie k sádrovej forme.

V druhom prípade bola použitá teplá keramická forma a teplá sádrová forma, obe zahriate na 100°C . Z grafu č. 25. je vidieť, že tepelná os je v strede odliatku.

Na grafoch č. 26 - 31, v ktorých je vynesená závislosť teploty na vzdialenosti x /mm/ je vidieť, že priebeh tuhnutia je parabolický a poloha tepelnej osi je taká istá ako v grafoch č. 20-25.

Z každej kombinácie bol prevedený len jeden pokus, ale z výsledkov je vidieť, že najvhodnejšia kombinácia je kombinácia keramickej formy vyrobenej metódou "Schaw" s formou zo sádrovej zmesi s prísadou karbidu kremíku SiC, alebo železného prášku.

3.8. Sledovanie priebehu tuhnutia odliatkov podľa makroštruktúry skúšobných odliatkov :

Pre vyhodnocovanie makroštruktúry boli použité odliatky odliate do kombinovaných foriem. Odliatky boli uprostred priečne rozrezané, trieskovo obrobené na frézke a brúsené na brúsnych papieroch. Vzorky boli naleptané leptadlom nasledovného zloženia:

25 ml	- destilovaná voda
45 ml	- kyselina solná
15 ml	- kyselina fluorovodíková
15 ml	- kyselina dusičná

Postup práce :

Vzorky po odmastení etylalkoholom boli ponorené do leptadla a vznikajúca zrazenina bola stieraná. Po naleptaní boli vzorky opláchnuté v teplej vode, umyté etylalkoholom a osušené. Makroštruktúry jednotlivých odliatkov sú v prílohe.

3.8.1. Vyhodnotenie priebehu tuhnutia odliatkov podľa makroštruktúry:

Vzorok č. 1.

Odliatok bol odliaty do kombinovanej formy zloženej z kokily zo zirkónovým náterom /20 °C/ a zmesi stavebnej sádry s 50 % karbidu kremíku SiC zrnitosti 0,4 mm /100 °C/:

zo strany kokily sú stípkovité dendrity narastajúce v smere odvodu tepla do dĺžky 6 mm, zo strany sádrovej formy je pravidelná, jemnozrnná kryštalizácia. Povrchová nerovnosť spôsobená postupným tuhnutím na hornom povrchu odliatku je výrazne nesúmerná. Poloha tepelnej osi je 5 mm od sádrovej formy.

Vzorok č. 2.

Odliatok bol odliaty do kombinovanej formy zloženej z kokily so zirkónovým náterom /20 °C/ a zmesi stavebnej sádry s 15 % železného prášku /100 °C/:

zo strany kokily sú stípkovité dendrity narastajúce v smere odvodu tepla do dĺžky asi 9 mm, zo strany sádrovej formy je v spodnej a hornej časti odliatku pravidelná jemnozrnná kryštalizácia, v strednej časti odliatku je štruktúra hrubozrnejšia. Poloha tepelnej osi je asi 5 mm od sádrovej formy.

Vzorok č. 3.

Odliatok bol odliaty do kombinovanej formy zloženej z kokily so zirkónovým náterom /20 °C/ a zmesi stavebnej sádry s 2,5 % hliníkového prášku AlBo-40 /100 °C/:

v celom priereze odliatku je pomerne pravidelná jemnozrnná štruktúra, len v spodnej časti odliatku zo strany kokily je pásmo stípkovitých kryštálov. Polohu tepelnej osi nie je možné z obrázku určiť /na odliatku bolo možné určiť polohu tepelnej osi asi 4 mm od sádrovej formy/.

Vzorok č. 4.

Odliatok bol odliaty do kombinovanej formy zloženej z kokily so zirkónovým náterom /20 °C/ a zmesi stavebnej

sádry a 20 % železného prášku /100 °C/:
zo strany kokily sú výrazné stípkovité dendrity v smere
odvodu tepla asi do stredu odliatku, zo strany sádrovej
formy je pomerne pravidelná štruktúra aj keď hrubozrnnej-
šia ako v predchádzajúcom odliatku. Poloha tepelnej osi
je asi 4 mm od sádrovej formy.

Vzorok č. 5.

Odliatok bol odliaty do kombinovanej formy zloženej
z keramickej formy vyrobenej metódou "Schaw" /20 °C/
a zmesi stavebnej sádry s 20 % železného prášku /100 °C/:
zo strany keramickej škrupiny je asi trojmilimetrová
vrstva hrubozrnných kryštálov, ináč v celom priereze od-
liatku je pravidelná jemnozrnná štruktúra. Poloha tepel-
nej osi je asi 6 mm od sádrovej formy.

Vzorok č. 6.

Odliatok bol odliaty do kombinovanej formy zloženej z ke-
ramickej formy vyrobenej metódou "Schaw" /100 °C/ a zmesi
stavebnej sádry s 50 % karbidu kremíku SiC /100 °C/:
v celom priereze odliatku je rovnomerná jemnozrnná kryš-
talizácia, od stien formy do hĺbky 2 mm je kryštalizácia
trochu hrubozrnnejšia. Povrchová staženina je výrazná,
poloha tepelnej osi je zhruba v strede odliatku.

Z prevedených skúšok sa ako najvýhodnejšia javí posled-
ná kombinácia.

Pri gravitačnom spôsobe liatia je kombinácia kovovej
formy a jadra zo zmesi stavebnej sádry s ktorýmkoľvek adi-
tívom, aj keď sa zvýši koeficient tepelnej akumulácie sá-
drovej zmesi, prakticky nepoužiteľná. Preto je potrebné

aby boli ďalšie práce zamerané na výskum iného spôsobu odlievania, napríklad nízkotlakého liatia, pre dané kombinácie.

4. Z Á V E R :

Hlavná časť tejto diplomovej práce bola zameraná na zisťovanie koeficientu tepelnej akumulácie u foriem zo zmesi stavebnej sádry s rôznym pomerom prísad ako ostrivom.

Výsledky meraní sú zhrnuté v tabuľke č. 5, z ktorej je vidieť, že najväčšie hodnoty koeficientu tepelnej akumulácie má zmes stavebnej sádry so železným práškom, ktorá je aj ekonomicky najvýhodnejšia, pretože 1 kg železného prášku stojí 11,- Kčs. V porovnaní s ostatnými používanými prísadami je to najnižšia cena, lebo napríklad 1 kg hliníkového prášku AlBo-40 stojí až 90,- Kčs. Cena za 1 kg kremičitého piesku SiO_2 zrnitosti 0,6 mm je síce najnižšia, nie je ani 10 halierov, ale aj koeficient tepelnej akumulácie bol najnižší a kvalita foriem bola veľmi zlá.

Druhá časť experimentálnych meraní sa zaoberá tuhnutím odliatkov v kombinovaných formách. Jedna stena formy bola tvorená kokilou so zirkónovým náterom, alebo keramickou formou vyrobenou metódou "Schaw" a druhú stenu formy tvorili najvodivejšie zmesi stavebnej sádry s prísadami. Z výsledkov je vidieť, že najvhodnejšia kombinácia je kombinácia keramickej formy so sádrovou formou s prísadou karbidu kremíku SiC , alebo s prísadou železného prášku.

Zistené výsledky sa však nedajú porovnať s údajmi v literatúre, lebo tam nie sú uvedené. Niektoré merania však boli prevádzané len raz, a preto bude potrebné znovu pre viesť niektoré skúšky, hlavne u zmesi stavebnej sádry so železným práškom a overiť správnosť výsledkov a ďalej hľadať vhodné

kombinácie formovacích materiálov.

Ďalšie práce by sa mali zamerať na odlievanie konkrétnych pokusných odliatkov, u ktorých sa bude sledovať hlavne rozmerová presnosť a akosť povrchu.

Je mojou milou povinnosťou poďakovať na tomto mieste
svojmu konzultantovi Ing. Pavlu Simonovi za jeho dohliadanie
a odborné vedenie diplomovej práce v oblasti teoretickej i
experimentálnej a vedúcemu diplomovej práce Doc. Ing. Zdeňku
Holubcovi, CSc za jeho cenné rady a pripomienky.

Súčasne chcem poďakovať aj súdruhovi Jaroslavovi Vorlovi
za jeho praktické pripomienky, týkajúce sa danej problematiky.

Rovnako patrí aj moja vďaka všetkým, ktorí mi akoukoľvek
mierou pomáhali pri vyhotovení tejto diplomovej práce.

5. Z O Z N A M P O U Z I T E J L I T E R A T Ú R Y :

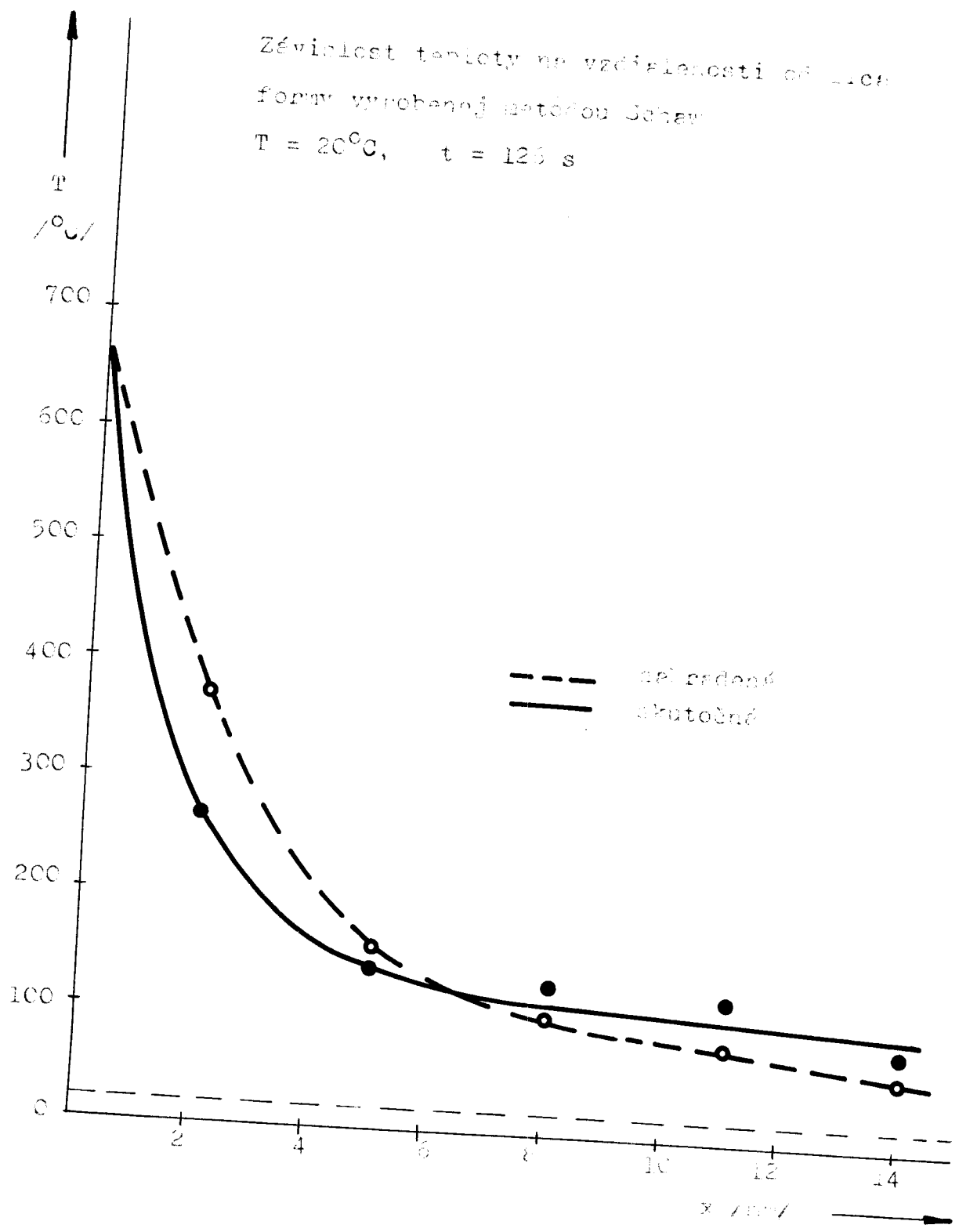
- /1/ Anisovič, G. A. : Ochloždenije otlivki v kombiniro-
Žmakin, N. P. : vanoj forme.
Moskva 1969
- /2/ Čabelka, J. : Mechanická technológia.
Bratislava 1967
- /3/ Příbyl, J. : Tuhnutí a nálitkování odlitků.
I. vyd. Praha 1954
- /4/ Vejnik, A. I. : Teória zatverdevanija otlivki.
Moskva 1960
- /5/ Vejnik, A. I. : Rasčot otlivki.
Moskva 1964
- /6/ Vetiška, A. : Teoretické základy slévárenské
technologie.
II. vyd. Praha 1974
- /7/ Kolektív : Studium výroby odlitků litím
do sádrových forem. /Výzkumná zpráva/.
Liberec, KTM VŠST 1973
- /8/ Příbyl, J. : Slévárenství, XXVII, 1979, s. 147
- /9/ Dvořák, V. : Studium problematiky tuhnutí
odlitků v kombinované formě.
/Diplomová práce/
Liberec, KTM VŠST 1979

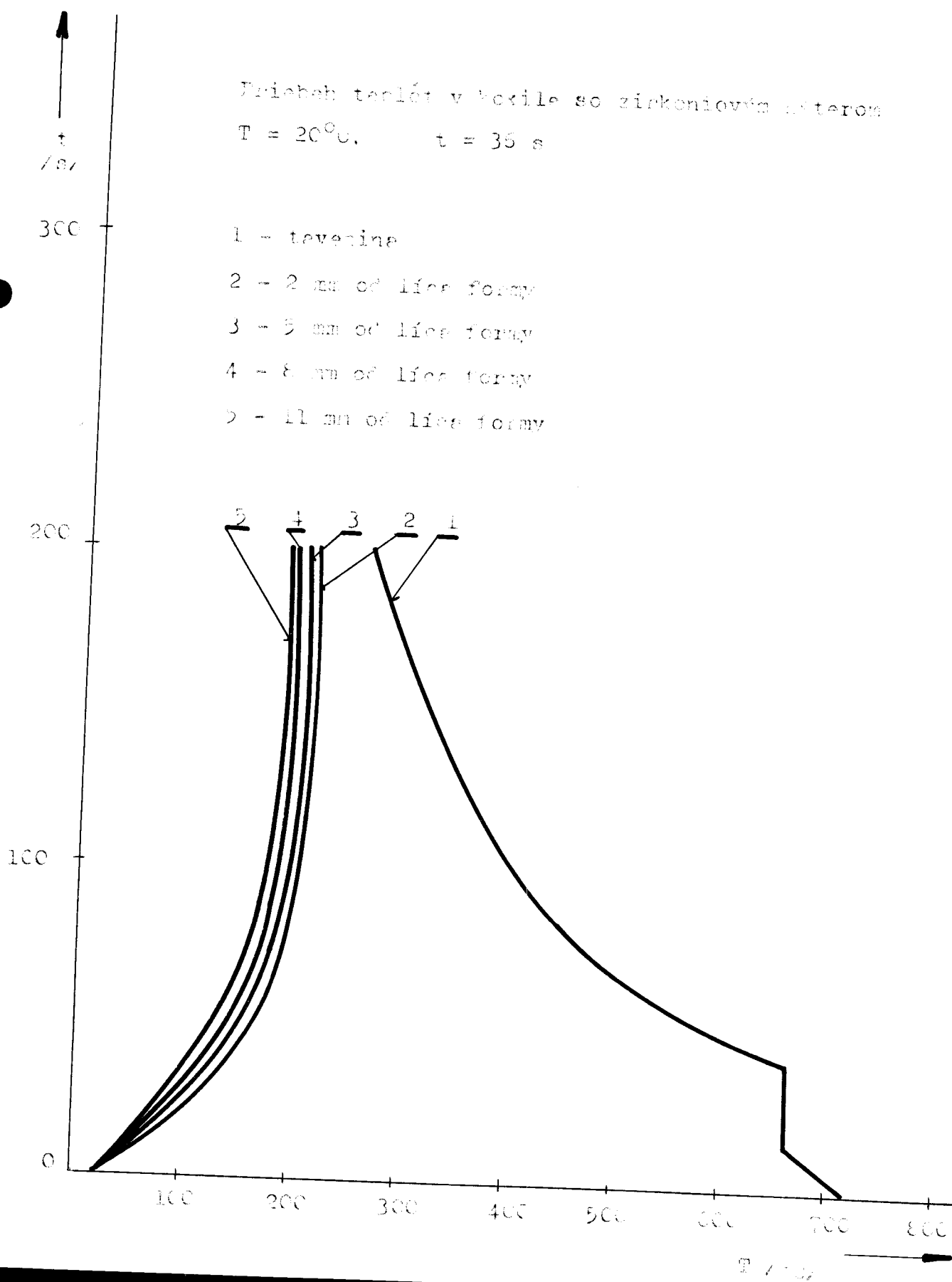
6. Z O Z N A M P R Í L O H :

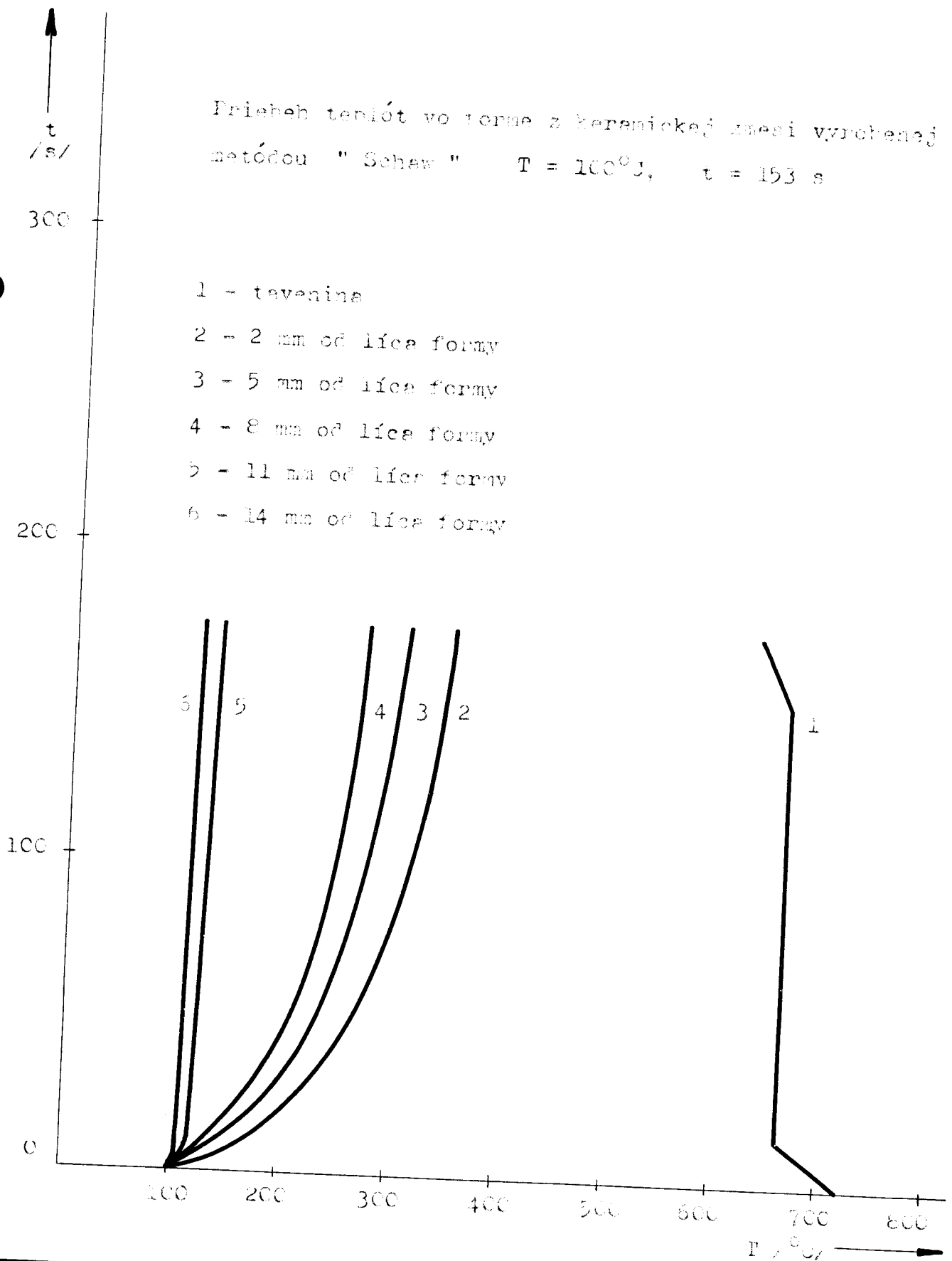
1. Kalibračná priamka termočlánku NiCr-Ni o priemere 0,3 mm.
2. Závislosť teploty na vzdialenosti x od líca formy vyrobenej metódou "Schaw".
3. Priebeh teplôt v kokile so zirkónovým náterom.
4. Priebeh teplôt v keramickej forme vyrobenej metódou "Sahaw" pri $T_f = 100$ °C.
5. Priebeh teplôt vo forme zo zmesi "stavebná sádra + 10 % kremičitého piesku SiO_2 " pri $T_f = 100$ °C.
6. Priebeh teplôt vo forme zo zmesi "stavebná sádra + 10 % karbidu kremíku SiC " pri $T_f = 100$ °C.
7. Priebeh teplôt vo forme zo zmesi "stavebná sádra + 10 % železného prášku" pri $T_f = 100$ °C.
8. Priebeh teplôt vo forme zo zmesi "stavebná sádra + 10 % hliníkového prášku AlBo-40" pri $T_f = 100$ °C.
9. Priebeh teplôt vo forme zo zmesi "stavebná sádra + 10 % zirkónového prášku" pri $T_f = 100$ °C.
10. Priebeh teplôt v keramickej forme vyrobenej metódou "Schaw" pri $T_f = 20$ °C.
11. Priebeh teplôt vo forme zo zmesi "stavebná sádra + 10 % kremičitého piesku SiO_2 " pri $T_f = 20$ °C.
12. Priebeh teplôt vo forme zo zmesi "stavebná sádra + 10 % karbidu kremíku SiC " pri $T_f = 20$ °C.
13. Priebeh teplôt vo forme zo zmesi "stavebná sádra + 10 % železného prášku" pri $T_f = 20$ °C.
14. Priebeh teplôt vo forme zo zmesi "stavebná sádra + 10 % hliníkového prášku AlBo-40" pri $T_f = 20$ °C.

15. Priebeh teplôt vo forme zo zmesi "stavebná sádra + 10 % zirkónového prášku" pri $T_f = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.
16. Závislosť koeficientu tepelnej akumulácie formy na obsahu kremičitého piesku SiO_2 .
17. Závislosť koeficientu tepelnej akumulácie formy na obsahu karbidu kremíku SiC .
18. Závislosť koeficientu tepelnej akumulácie formy na obsahu železného prášku.
19. Závislosť koeficientu tepelnej akumulácie formy na obsahu hliníkového prášku AlBo-40.
20. Priebeh tuhnutia hliníkového odliatku v kombinovaných formách kokila so Zr náterom - "stavebná sádra + 50 % SiC ".
21. Priebeh tuhnutia hliníkového odliatku v kombinovaných formách kokila so Zr náterom - "stavebná sádra + 15 % Fe prášku".
22. Priebeh tuhnutia hliníkového odliatku v kombinovaných formách kokila so Zr náterom - "stavebná sádra + 2,5 % AlBo-40".
23. Priebeh tuhnutia hliníkového odliatku v kombinovaných formách kokila so Zr náterom - "stavebná sádra + 20 % Fe prášku".
24. Priebeh tuhnutia hliníkového odliatku v kombinovaných formách keramická forma - "stavebná sádra + 20 % Fe prášku".
25. Priebeh tuhnutia hliníkového odliatku v kombinovaných formách keramická forma - "stavebná sádra + 50 % SiC ".
26. Závislosť teploty na vzdialenosti x /mm/ v kombinovanej forme kokila so Zr náterom - "stavebná sádra + 50 % SiC ".
27. Závislosť teploty na vzdialenosti x /mm/ v kombinovanej forme kokila so Zr náterom - "stavebná sádra + 15 % Fe prášku".
28. Závislosť teploty na vzdialenosti x /mm/ v kombinovanej forme kokila so Zr náterom - "stavebná sádra + 2,5 % hliníkového prášku".

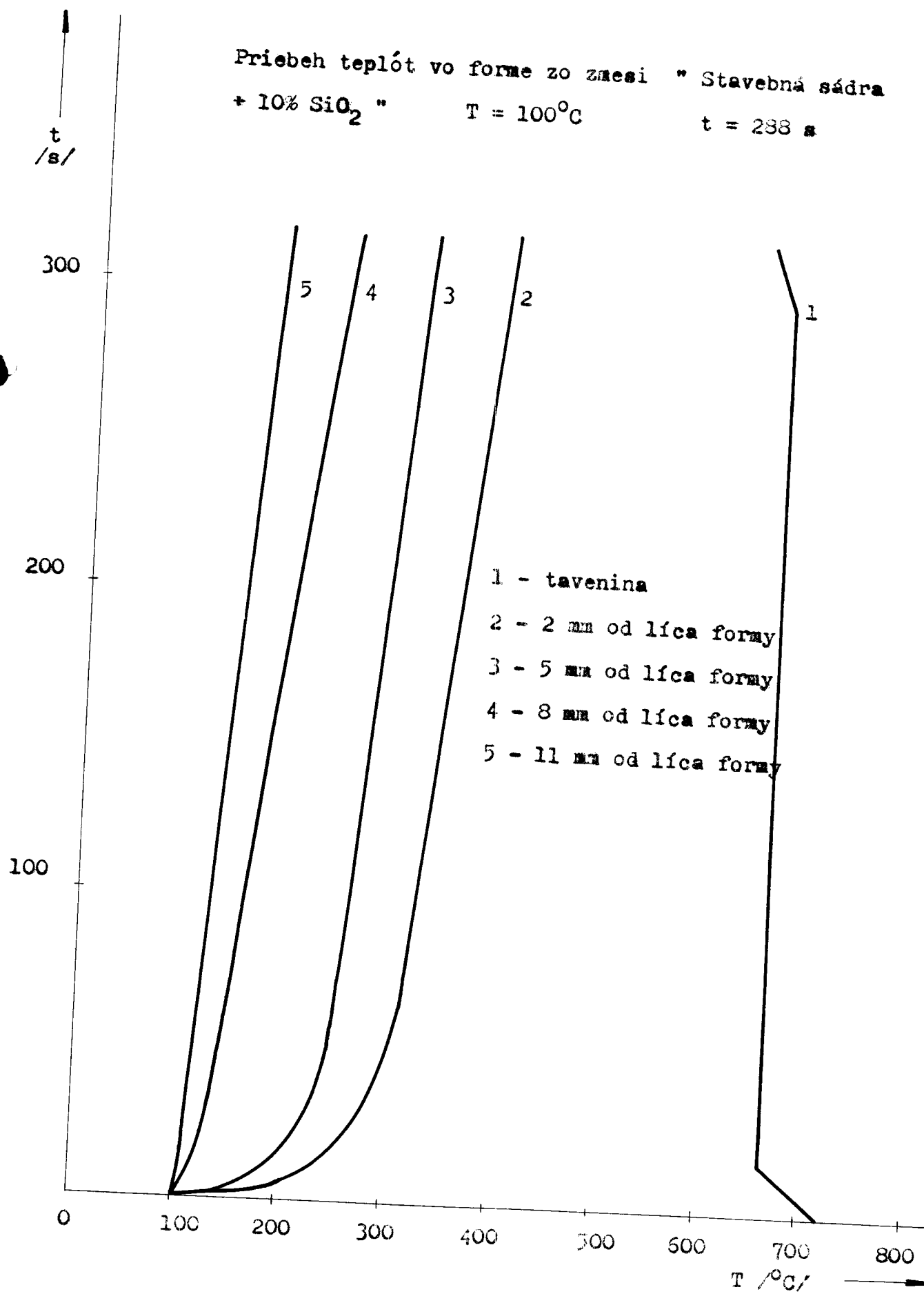
29. Závislosť teploty na vzdialenosti x /mm/ v kombinovanej forme kokila so Zr náterom - "stavebná sádra + 20 % železného prášku".
30. Závislosť teploty na vzdialenosti x /mm/ v kombinovanej forme keramická forma - "stavebná sádra + 20 % Fe prášku".
31. Závislosť teploty na vzdialenosti x /mm/ v kombinovanej forme keramická forma - "stavebná sádra + 50 % SiC".
32. Makroštruktúry odliatkov liatych do kombinovaných foriem.

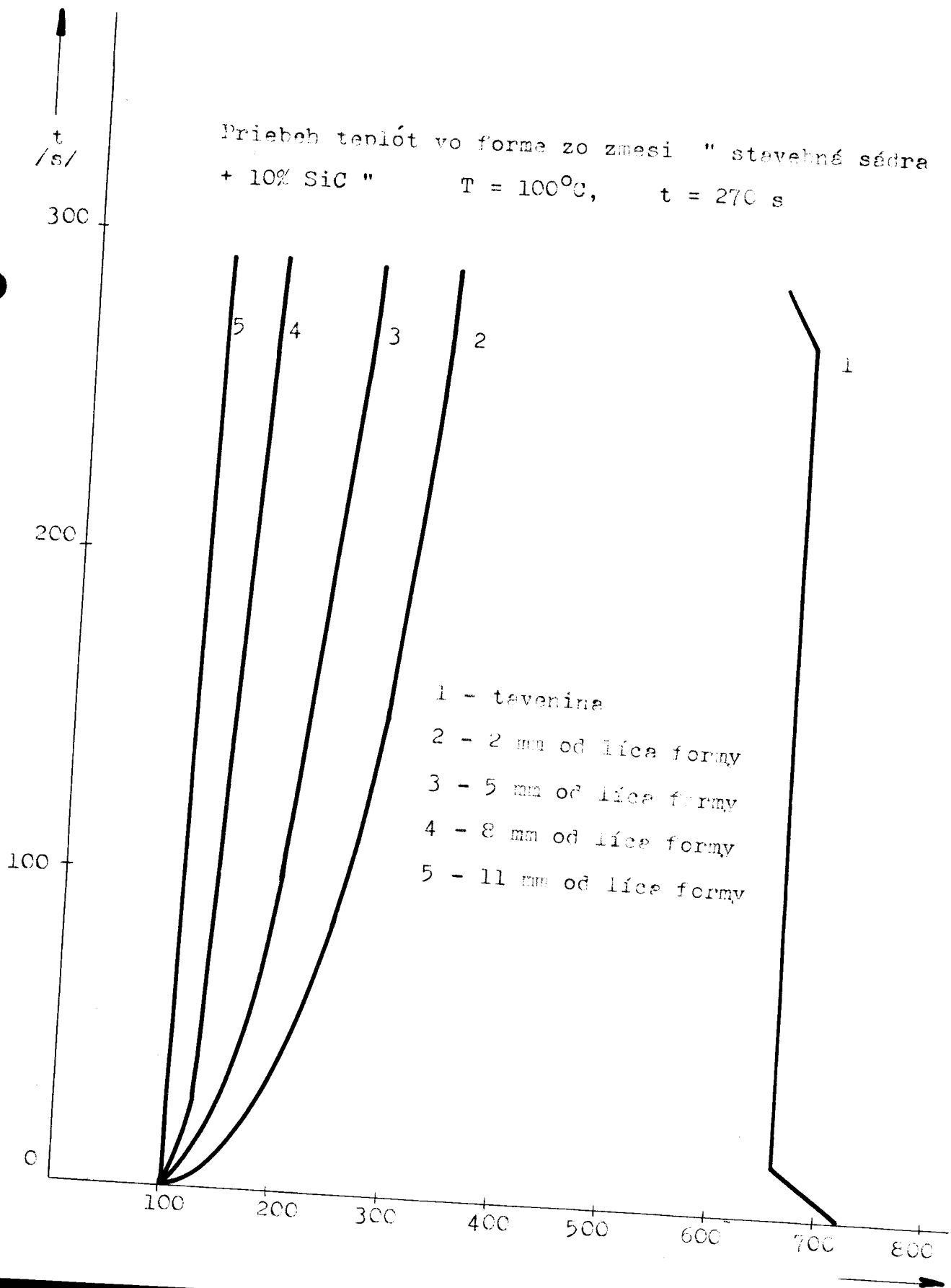


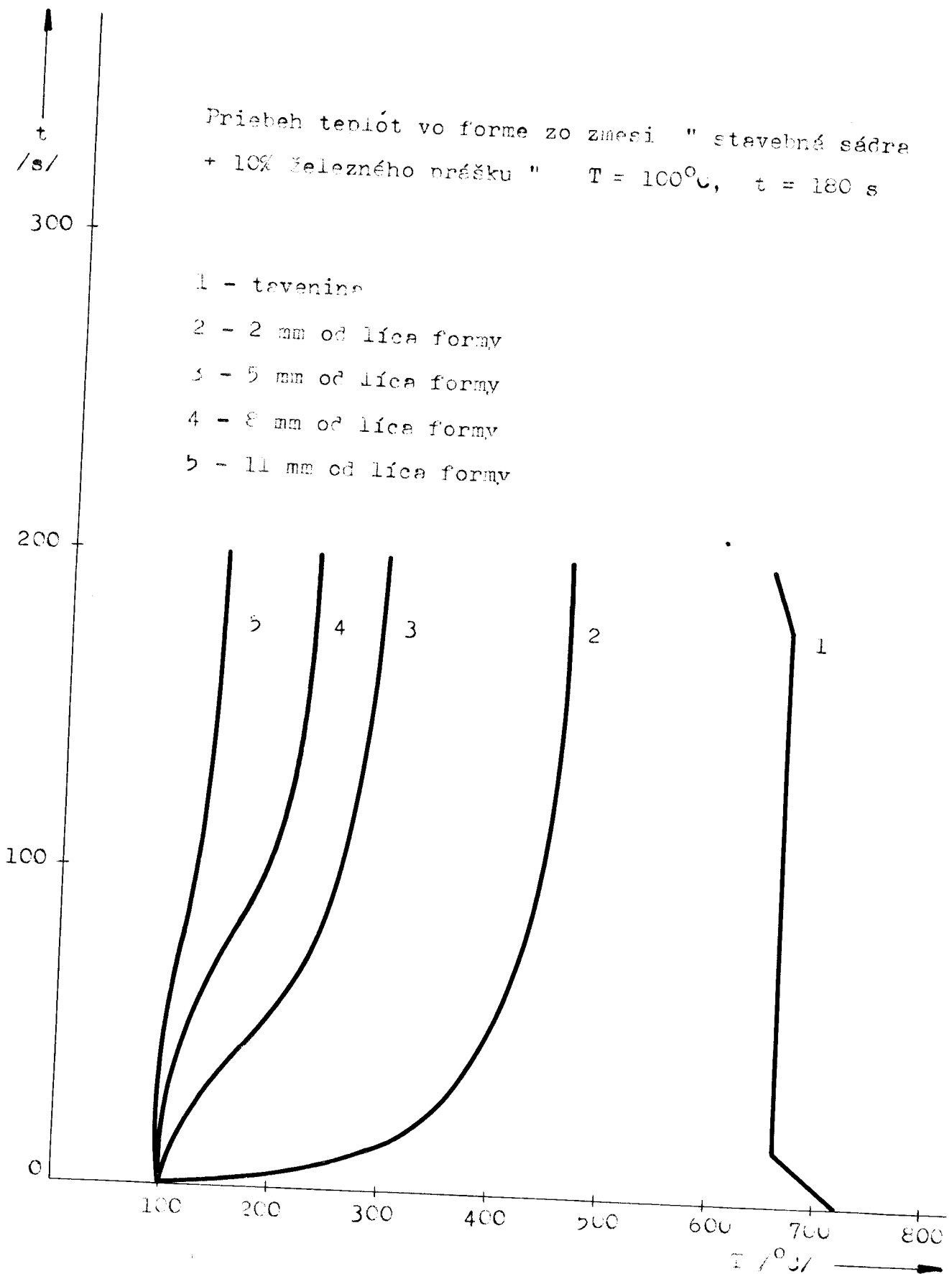




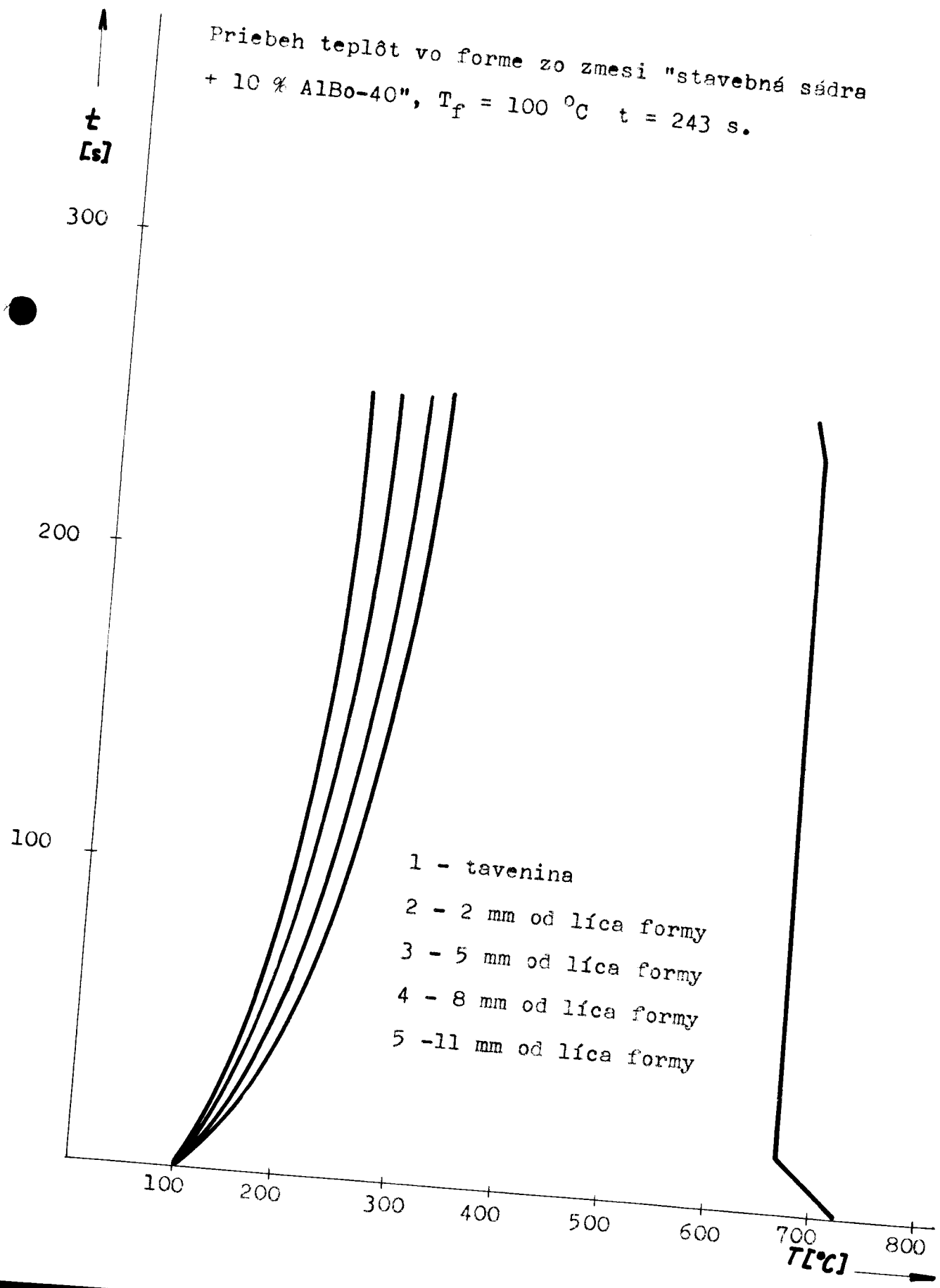
Priebeh teplôt vo forme zo zmesi " Stavebná sádra
+ 10% SiO₂ " T = 100°C t = 288 s

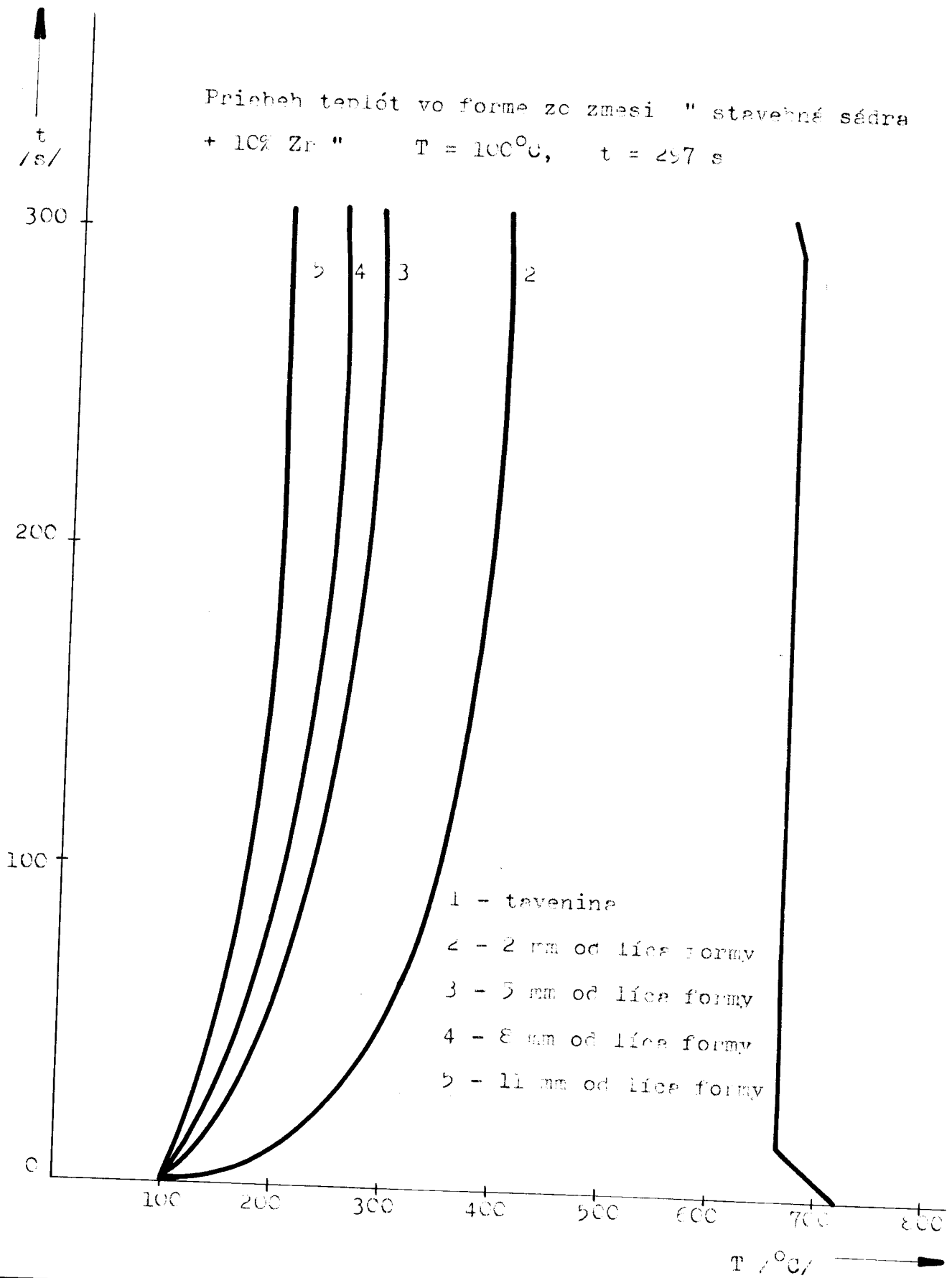


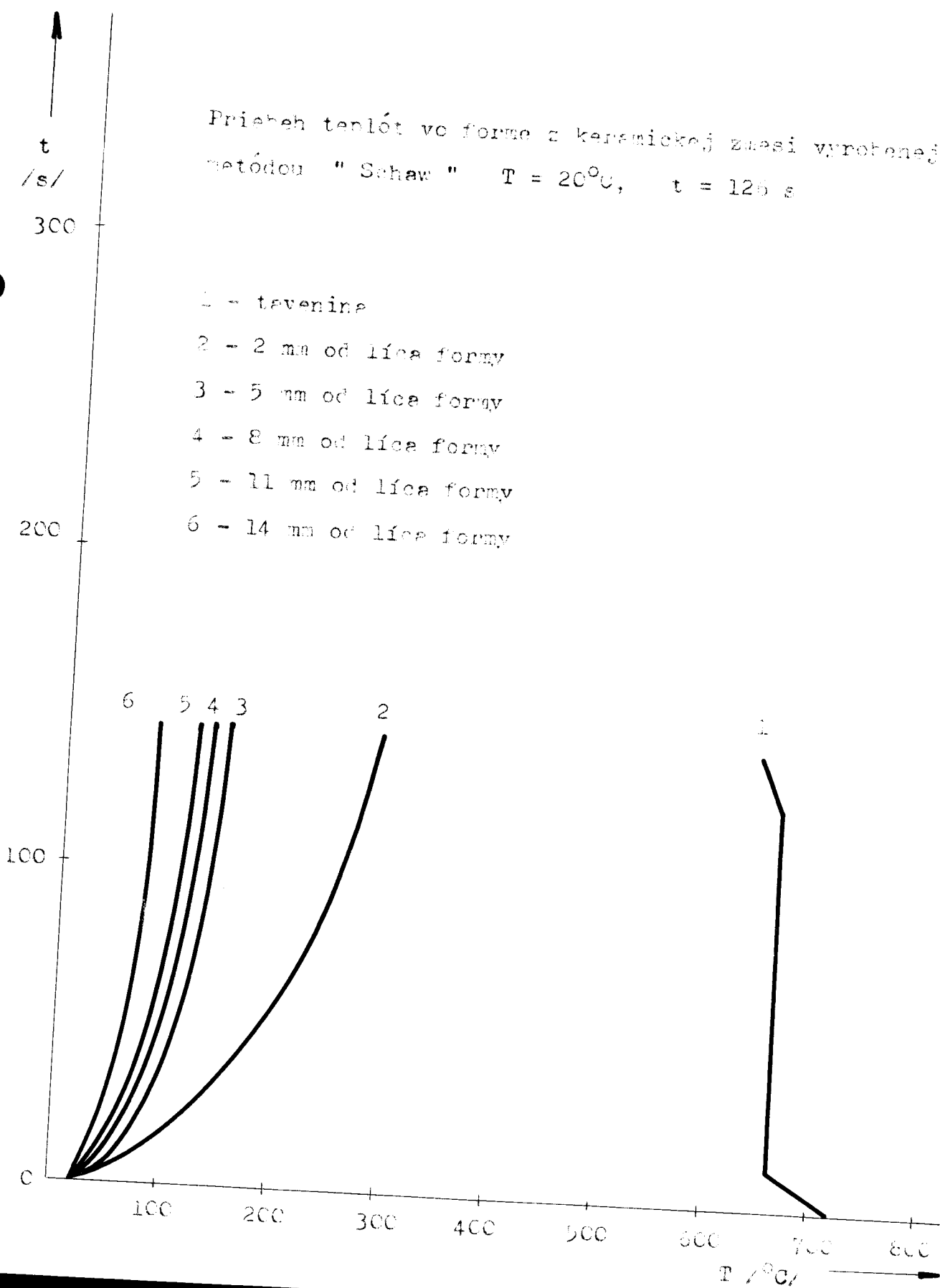


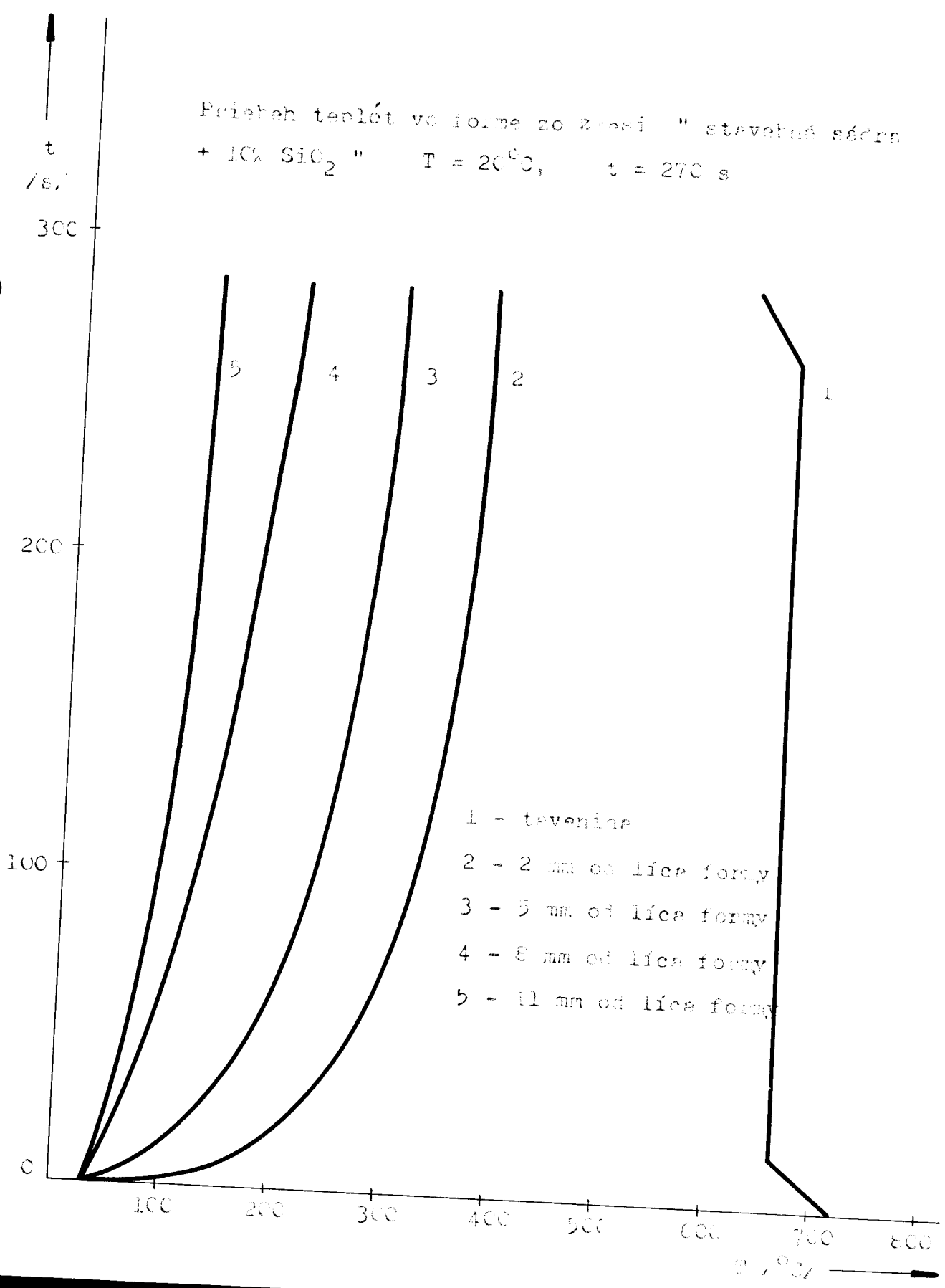


Priebeh teplôt vo forme zo zmesi "stavebná sádra + 10 % AlBo-40", $T_f = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ $t = 243 \text{ s}$.

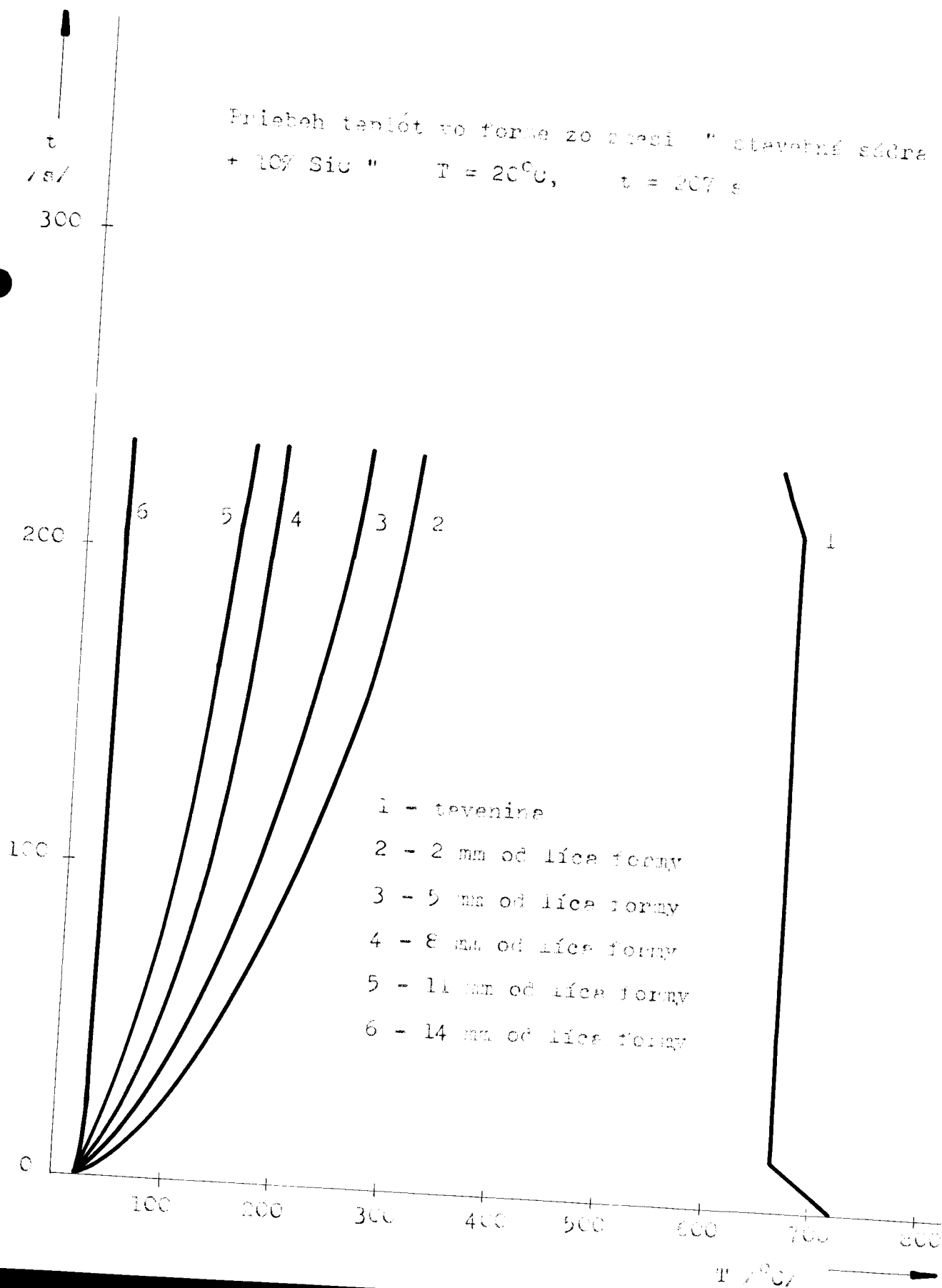


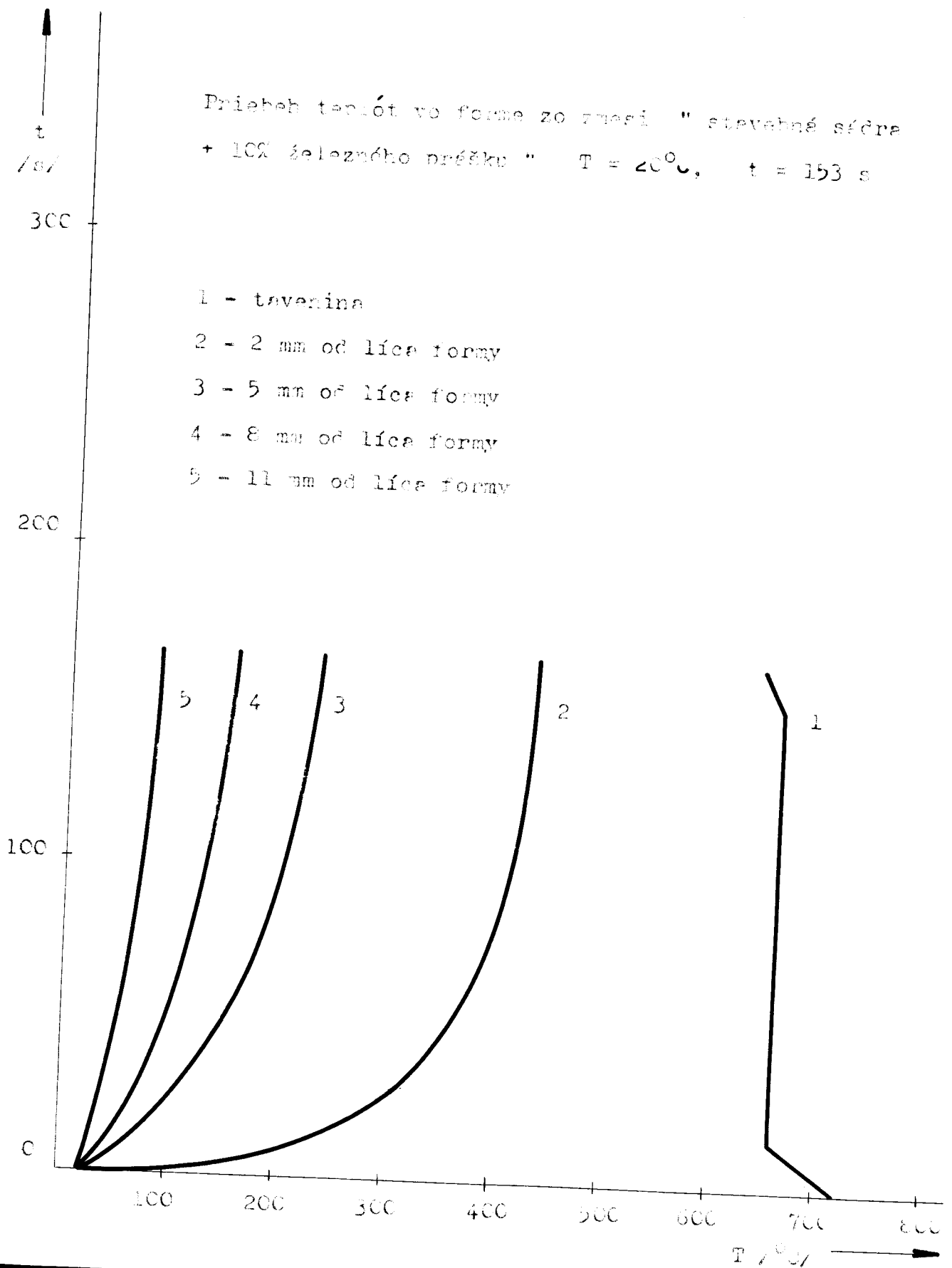




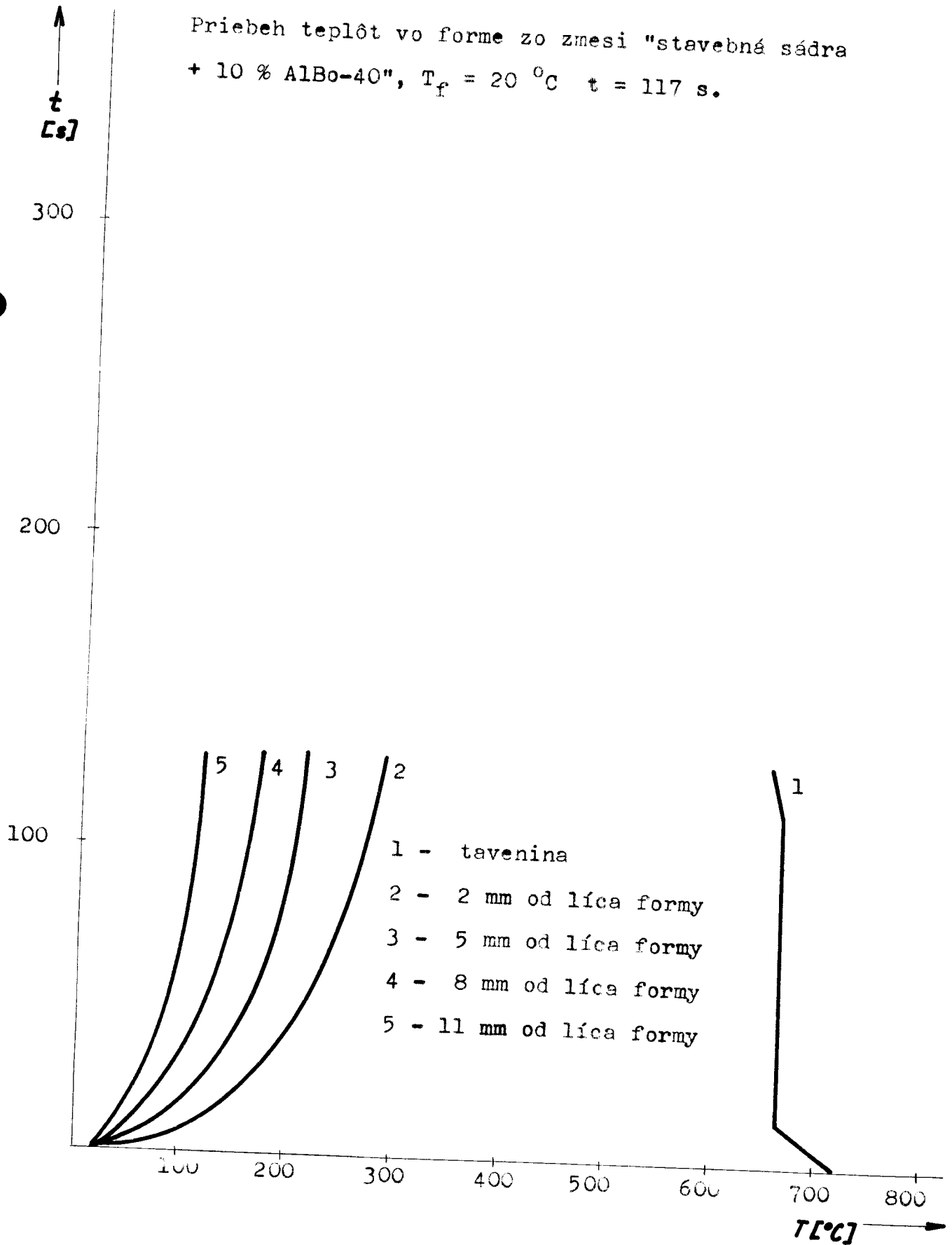


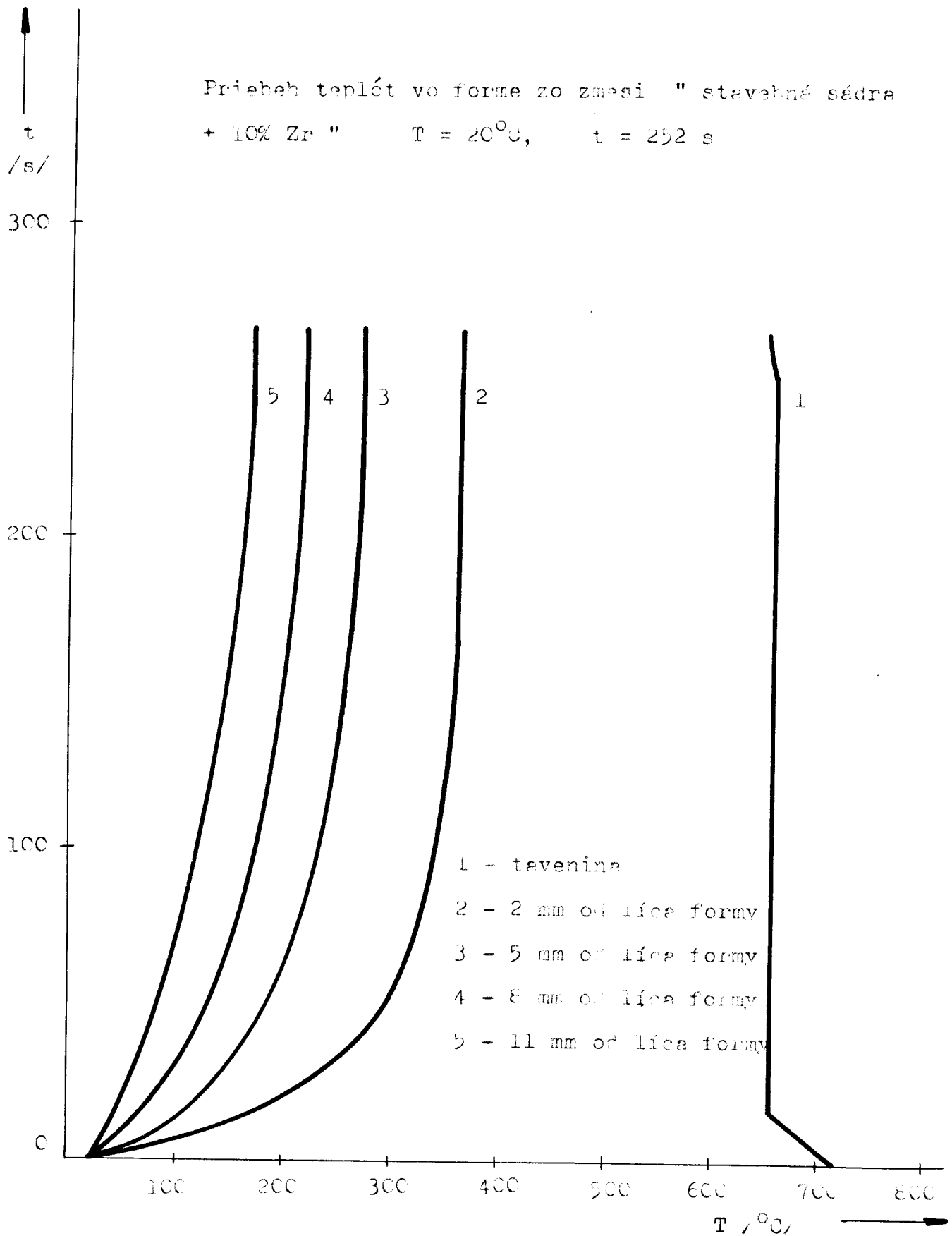
Príbeh teplot vo forme zo zmesi " obľavrná sádra
 + 10% SiO₂ " T = 20°C, t = 207 s



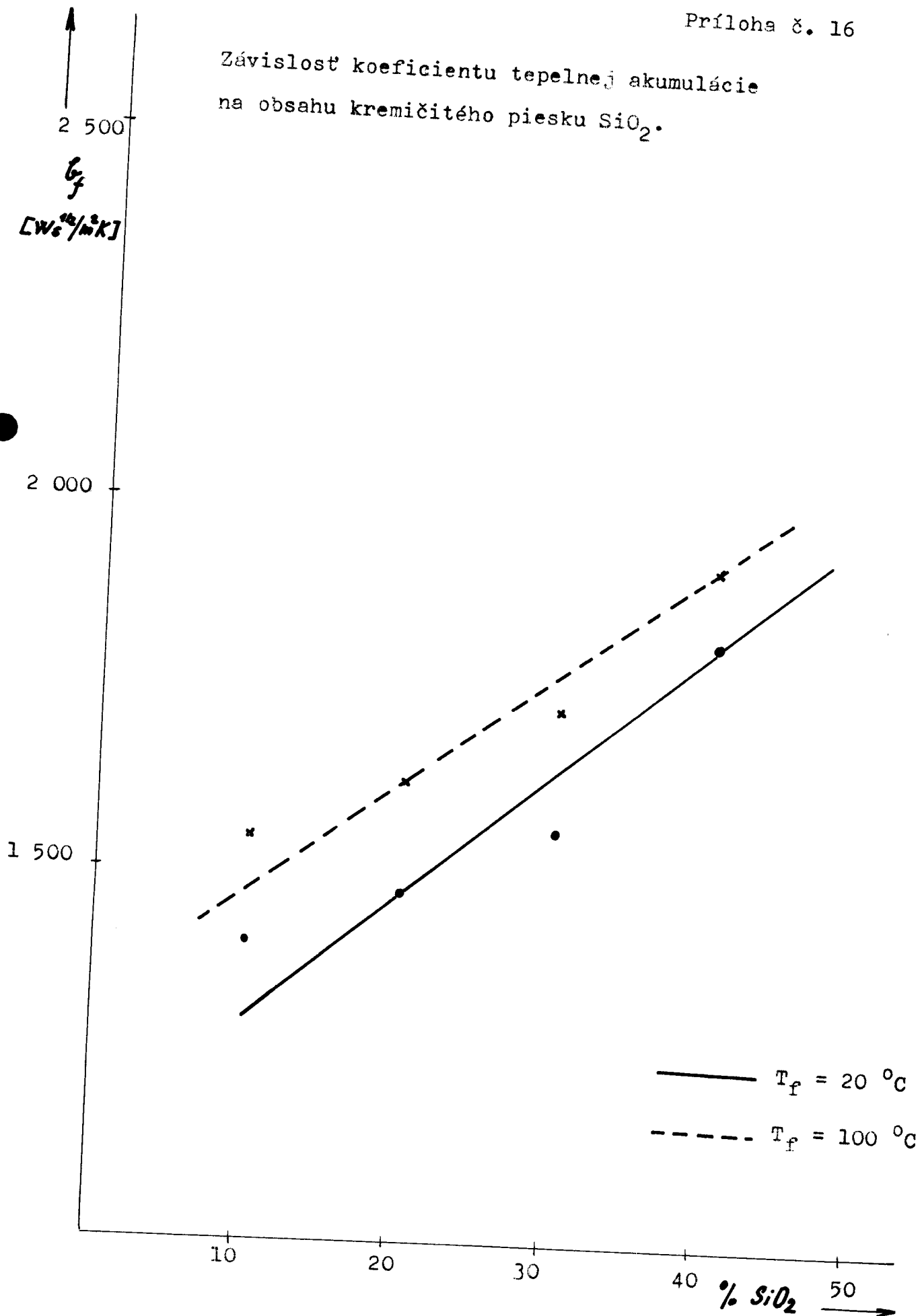


Priebeh teplôt vo forme zo zmesi "stavebná sádra
 + 10 % AlBo-40", $T_f = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ $t = 117\text{ s}$.

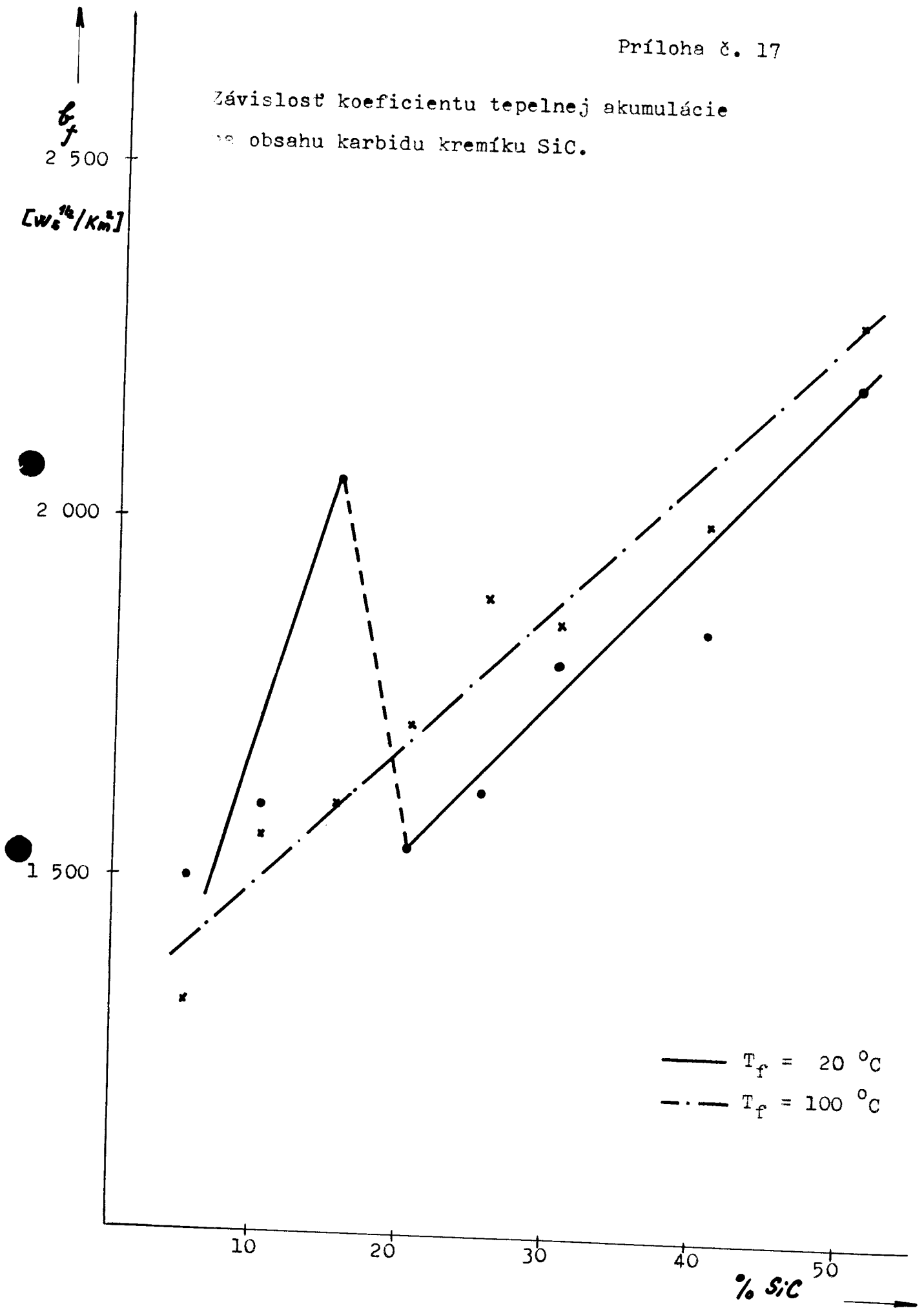




Závislosť koeficientu tepelnej akumulácie
na obsahu kremičitého piesku SiO_2 .

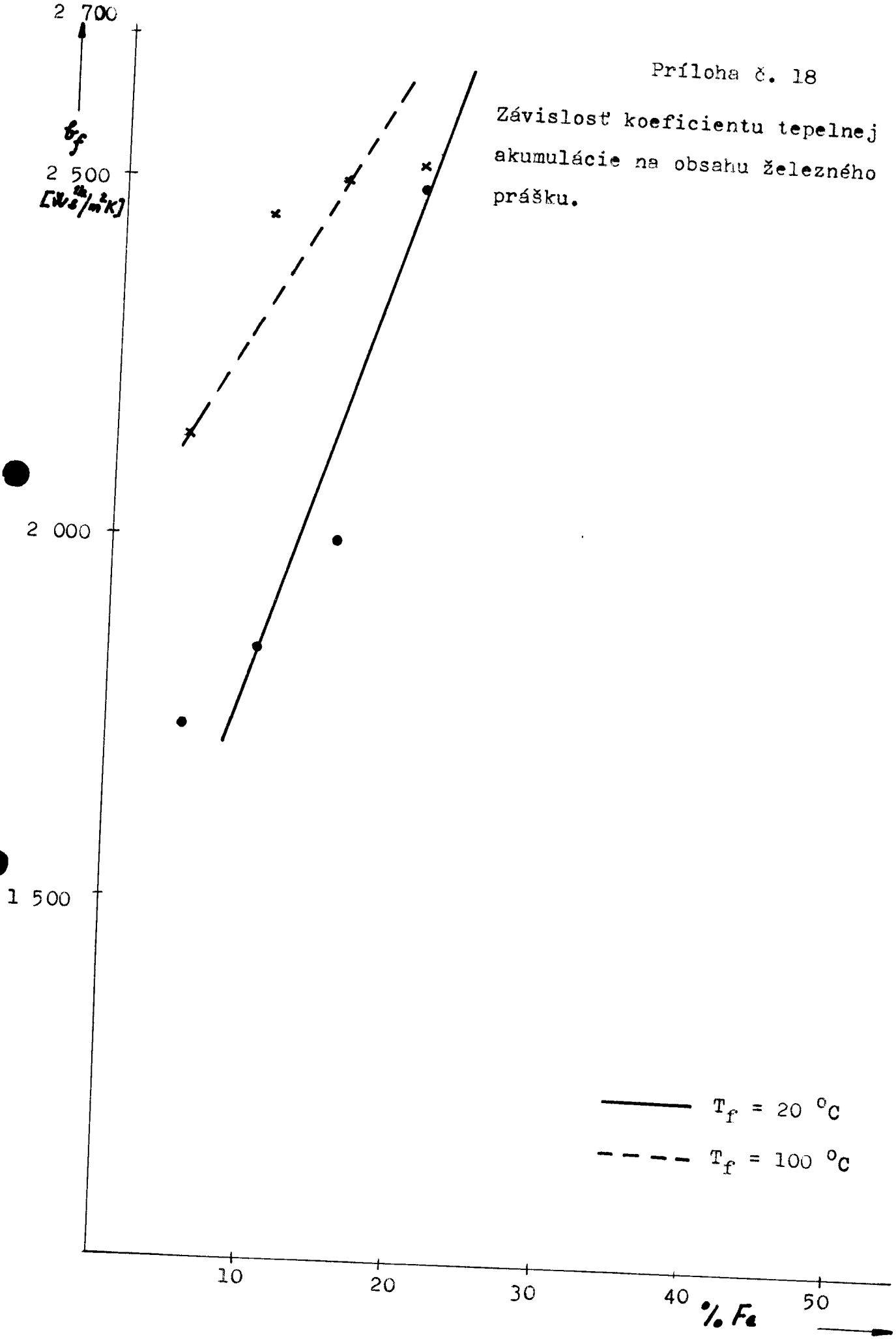


Závislosť koeficientu tepelnej akumulácie
na obsahu karbidu kremíku SiC.

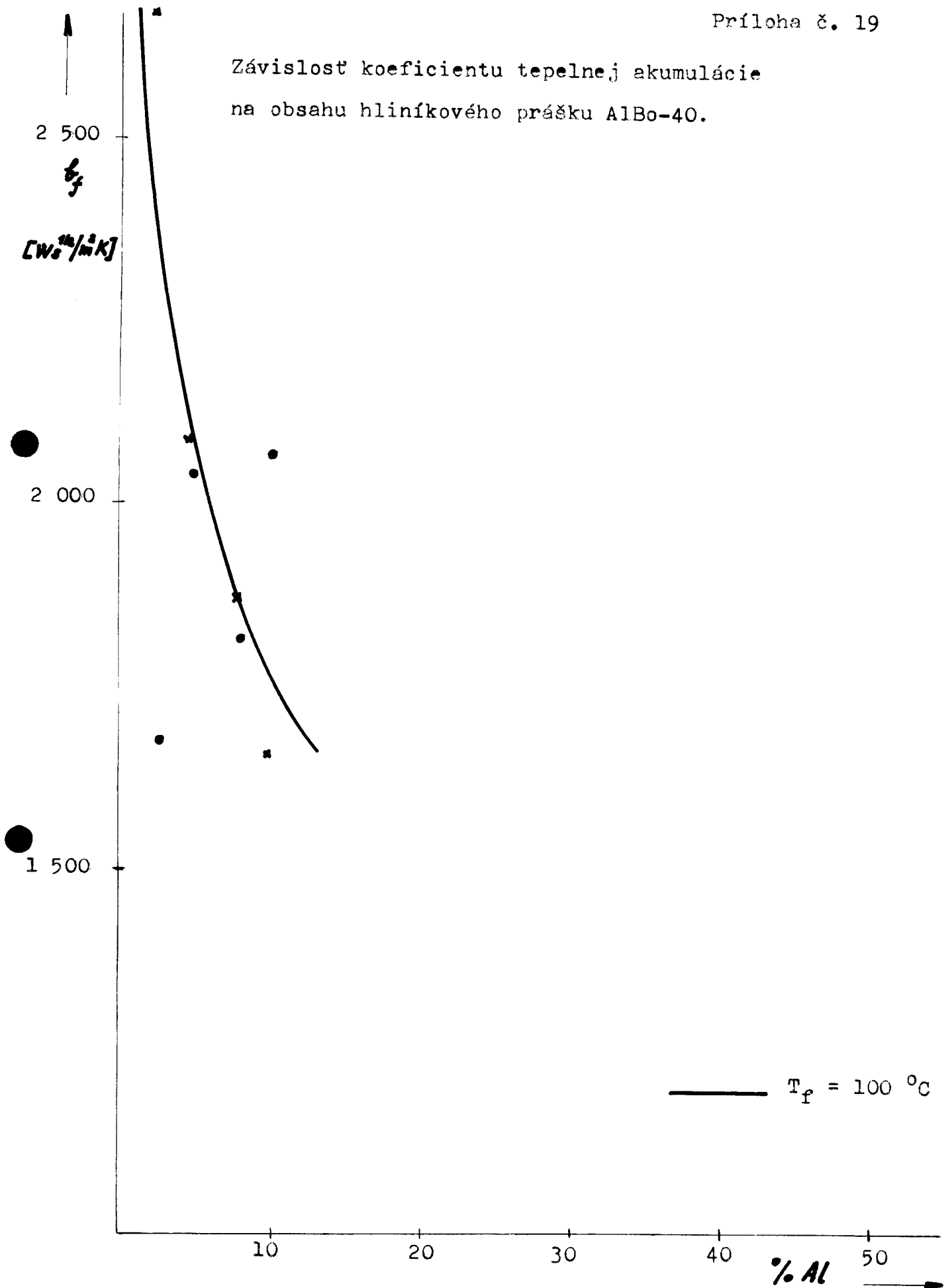


Príloha č. 18

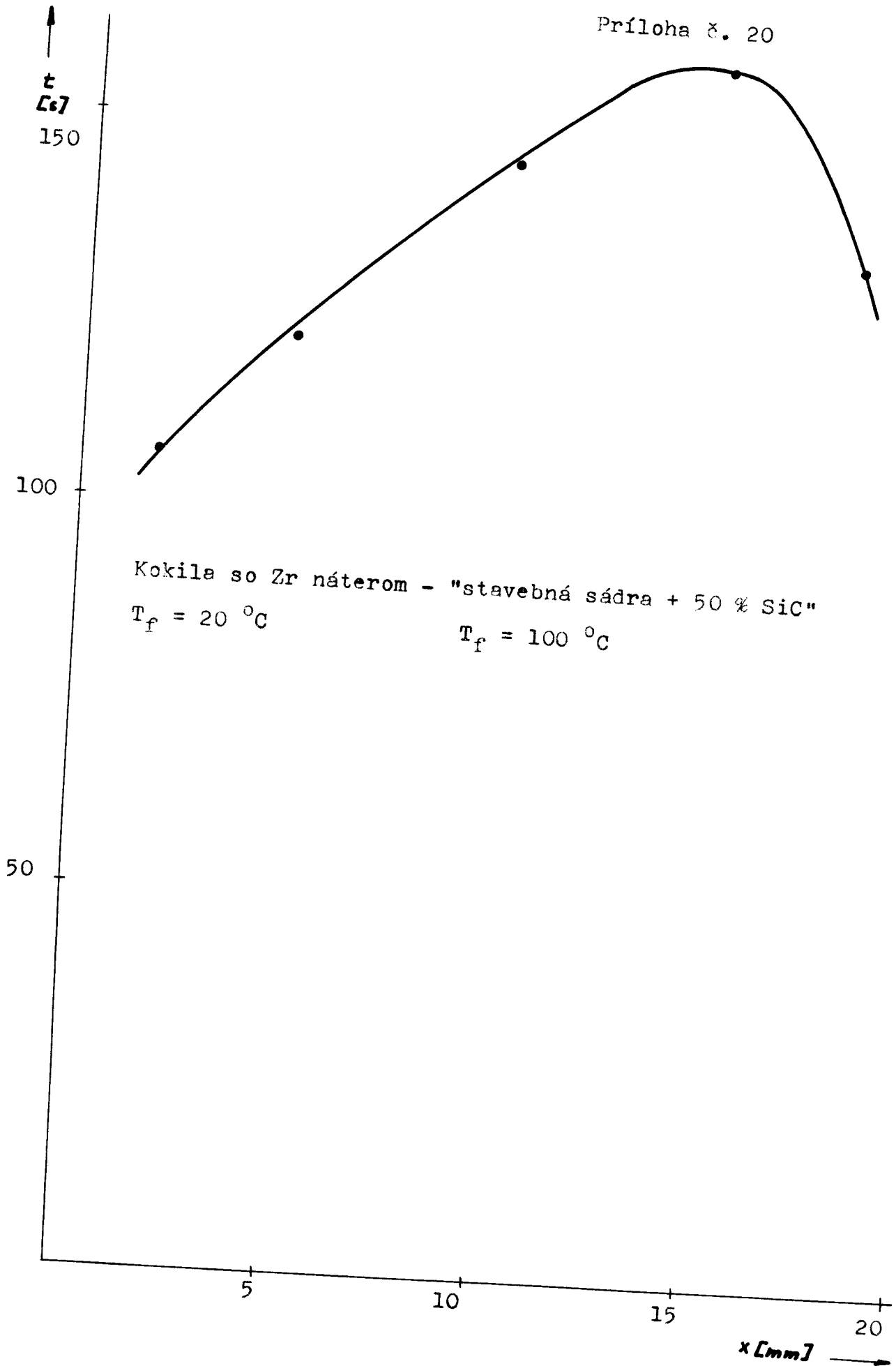
Závislosť koeficientu tepelnej akumulácie na obsahu železného prášku.



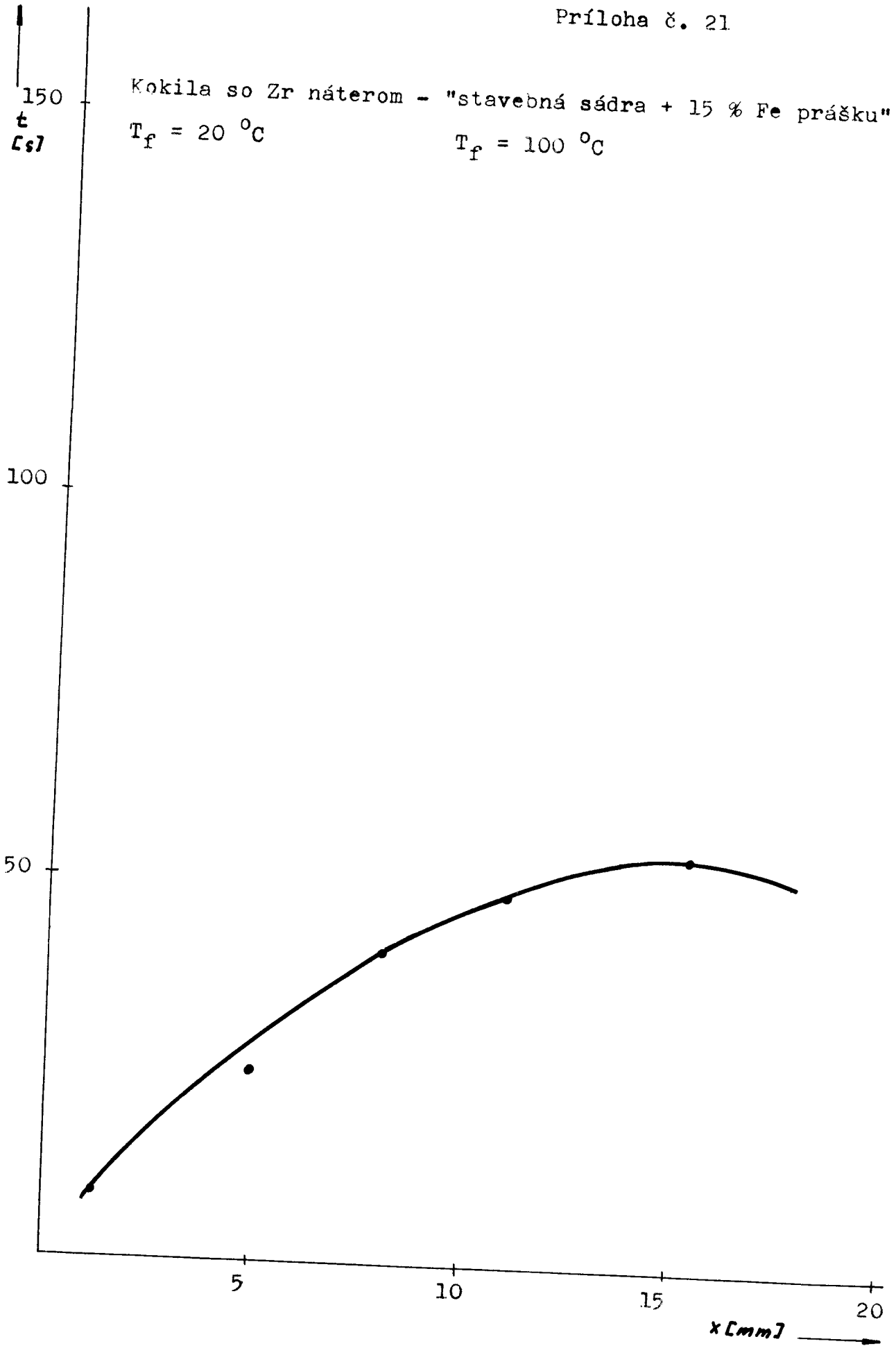
Závislosť koeficientu tepelnej akumulácie
na obsahu hliníkového prášku AlBo-40.

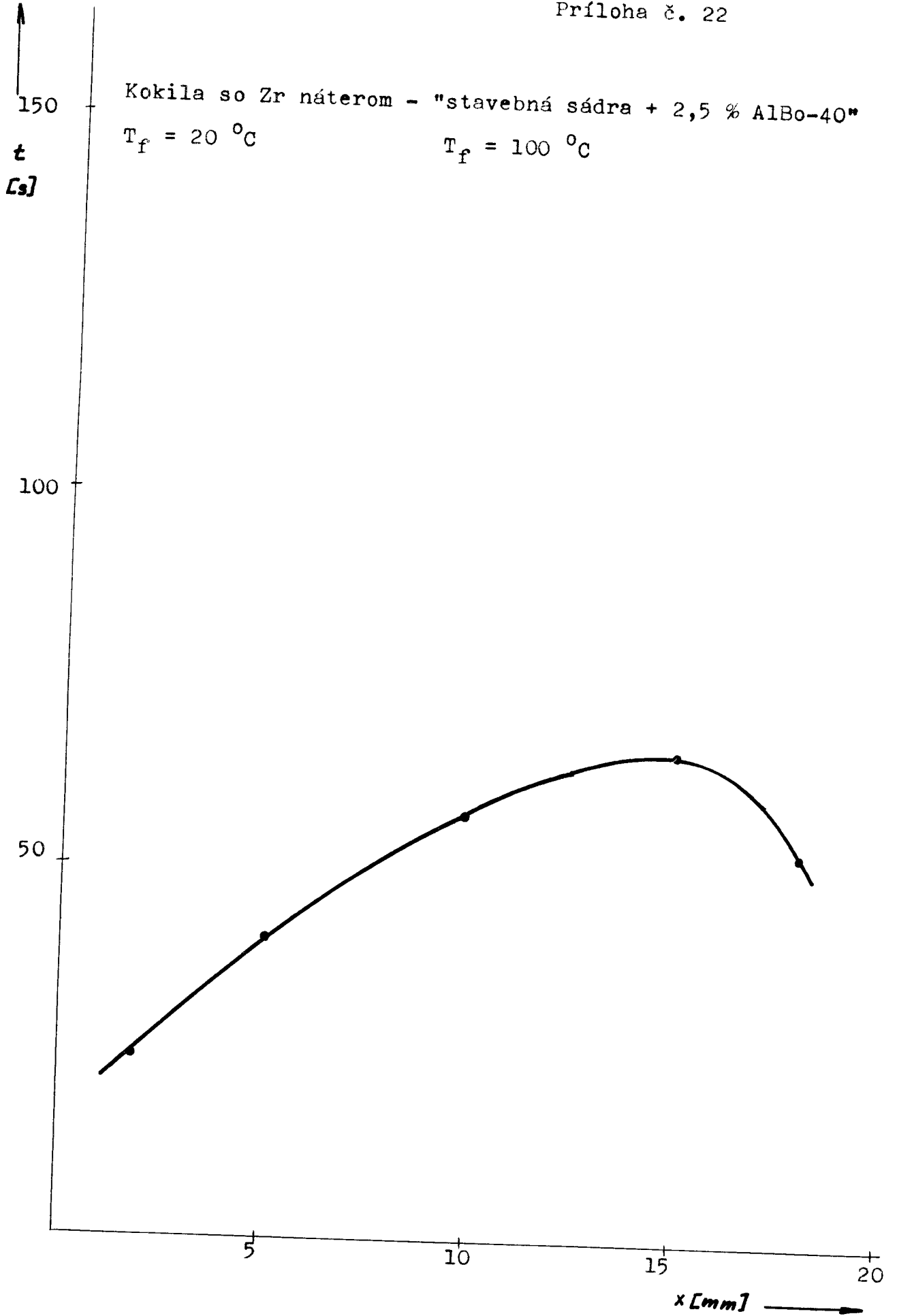


Priebeh tuhnutia hliníkového
odliatku v kombinovaných formách.



Kokila so Zr náterom - "stavebná sádra + 15 % Fe prášku"
 $T_f = 20\text{ }^\circ\text{C}$ $T_f = 100\text{ }^\circ\text{C}$

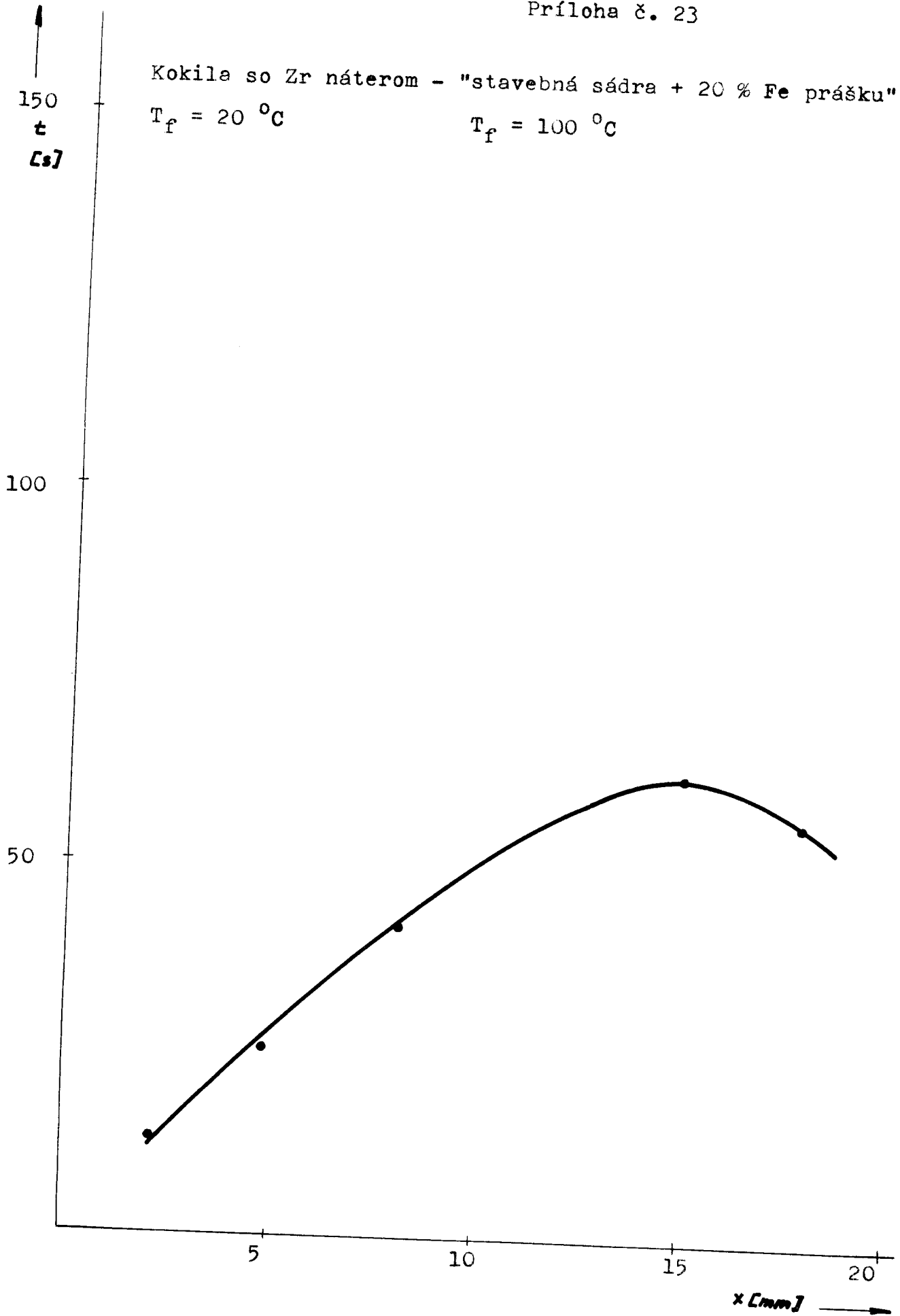




Kokila so Zr náterom - "stavebná sádra + 20 % Fe prášku"

$T_f = 20\text{ }^\circ\text{C}$

$T_f = 100\text{ }^\circ\text{C}$

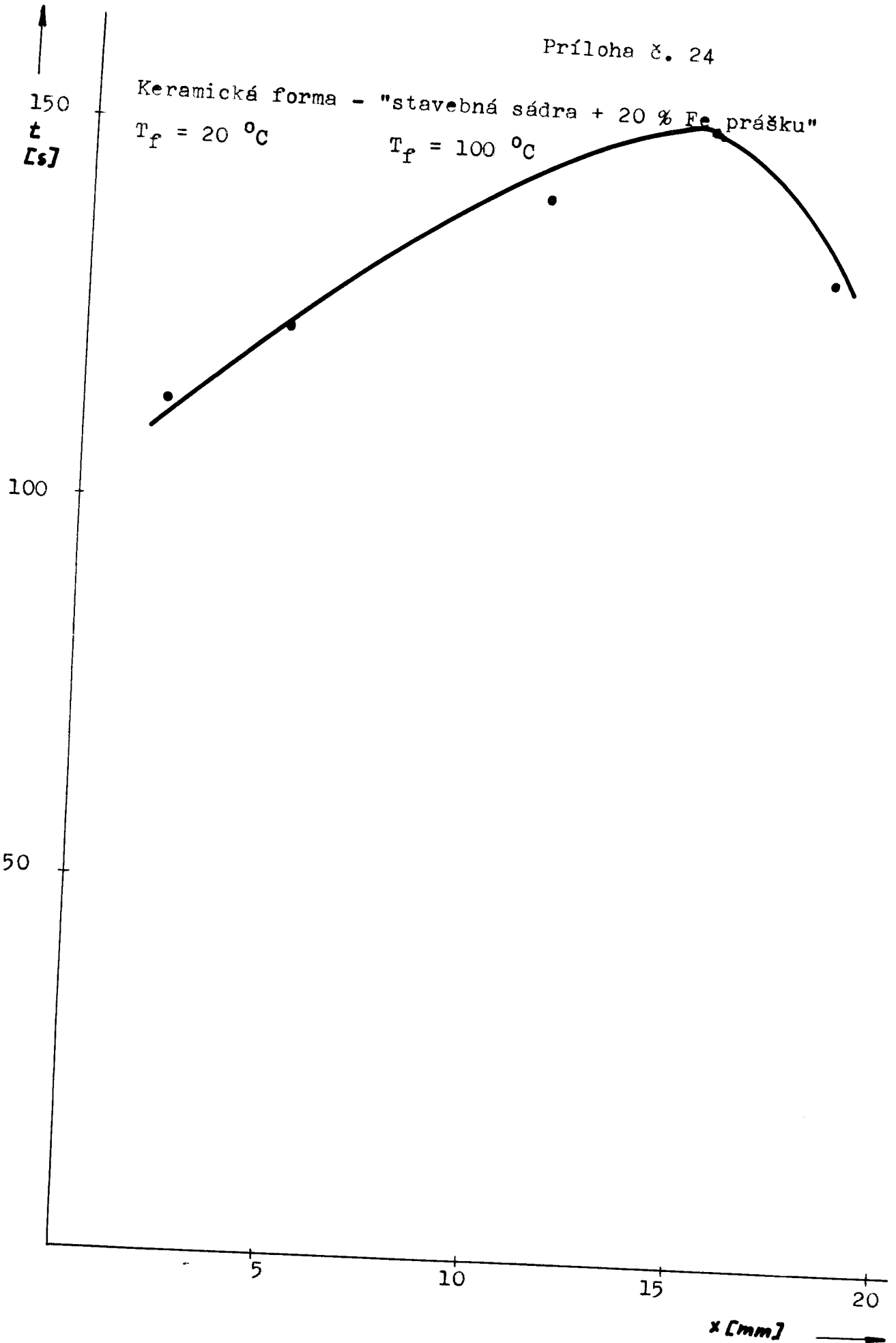


Príloha č. 24

Keramická forma - "stavebná sádra + 20 % Fe prášku"

$T_f = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

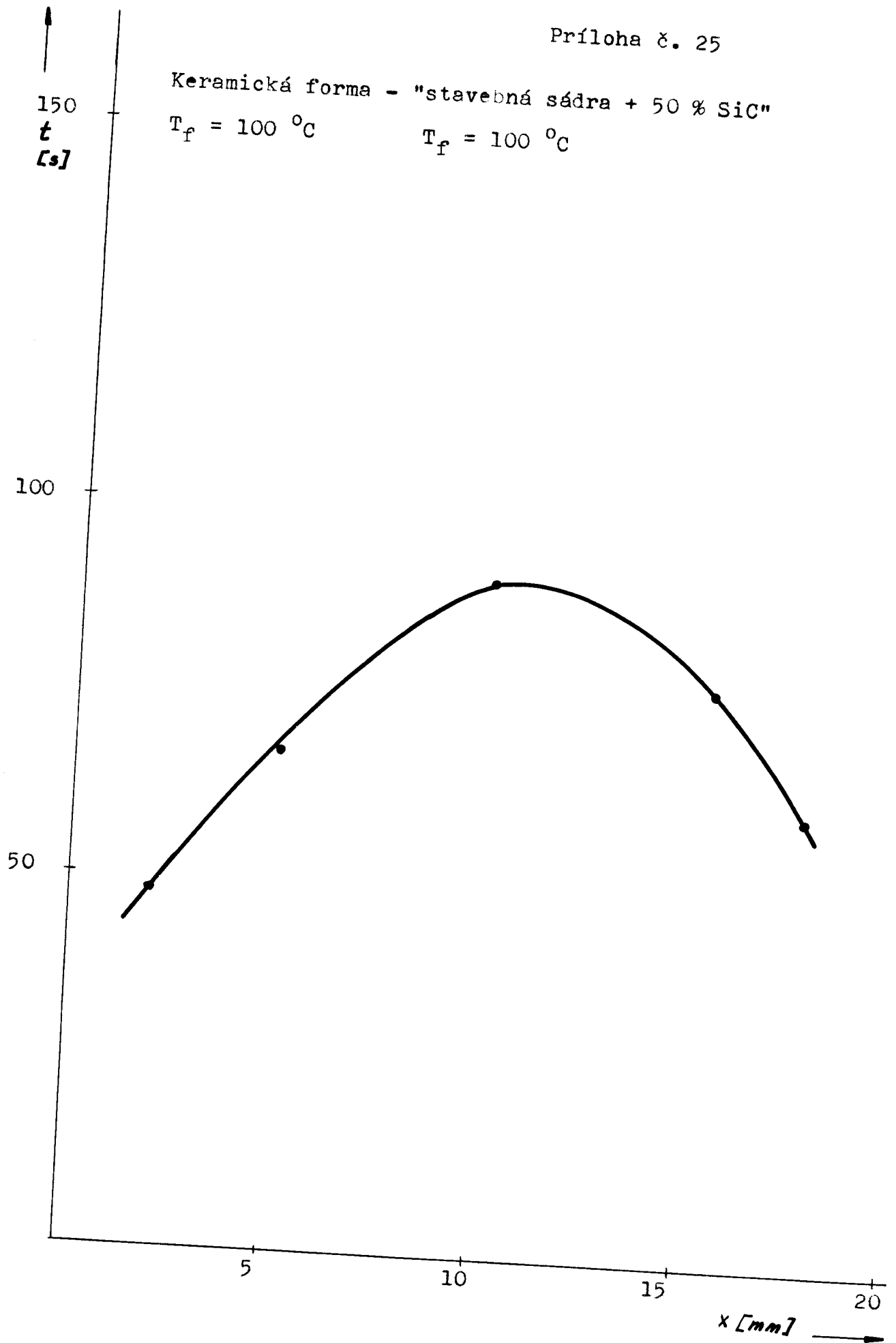
$T_f = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$



Keramická forma - "stavebná sádra + 50 % SiC"

$T_f = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$

$T_f = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$

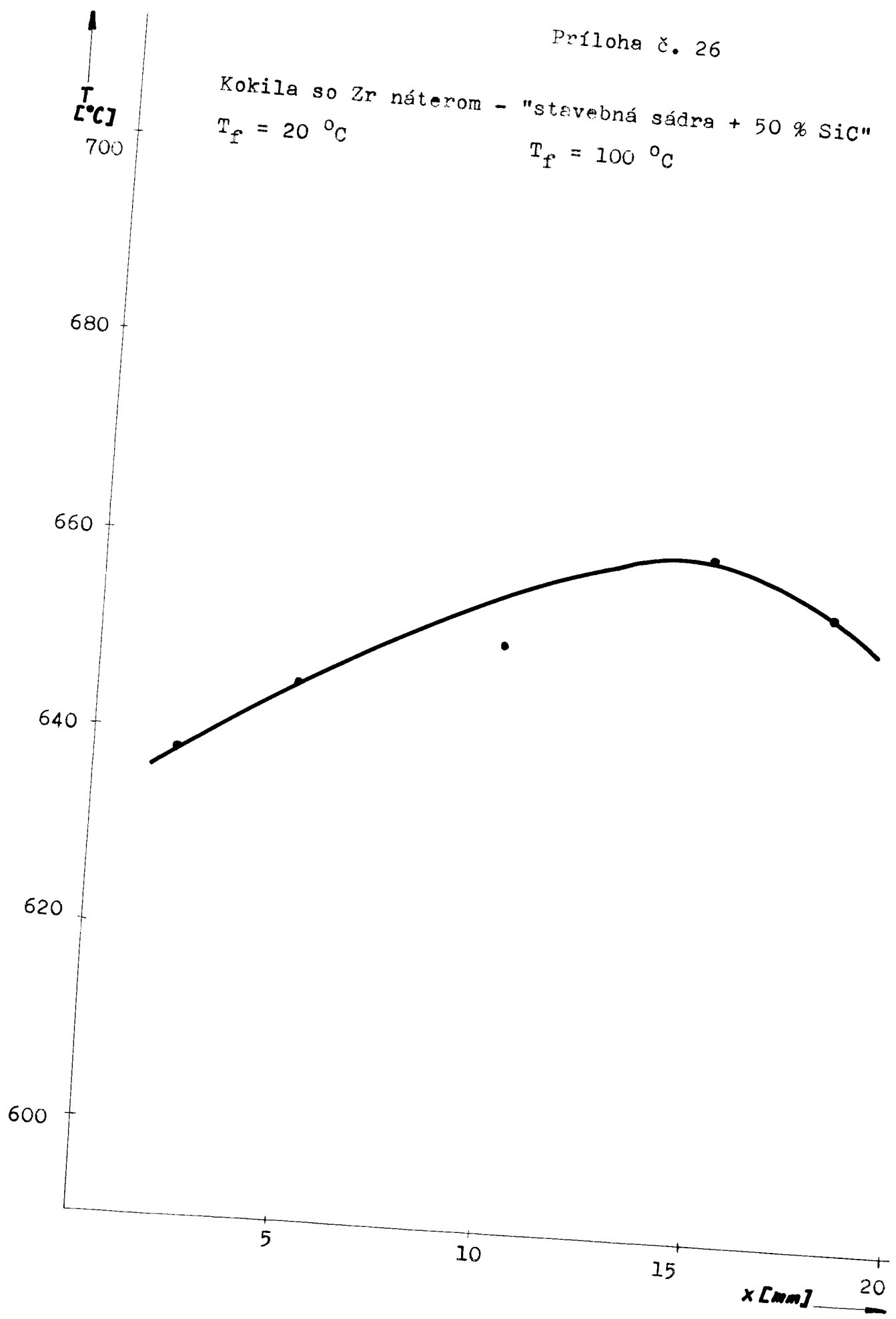


Príloha č. 26

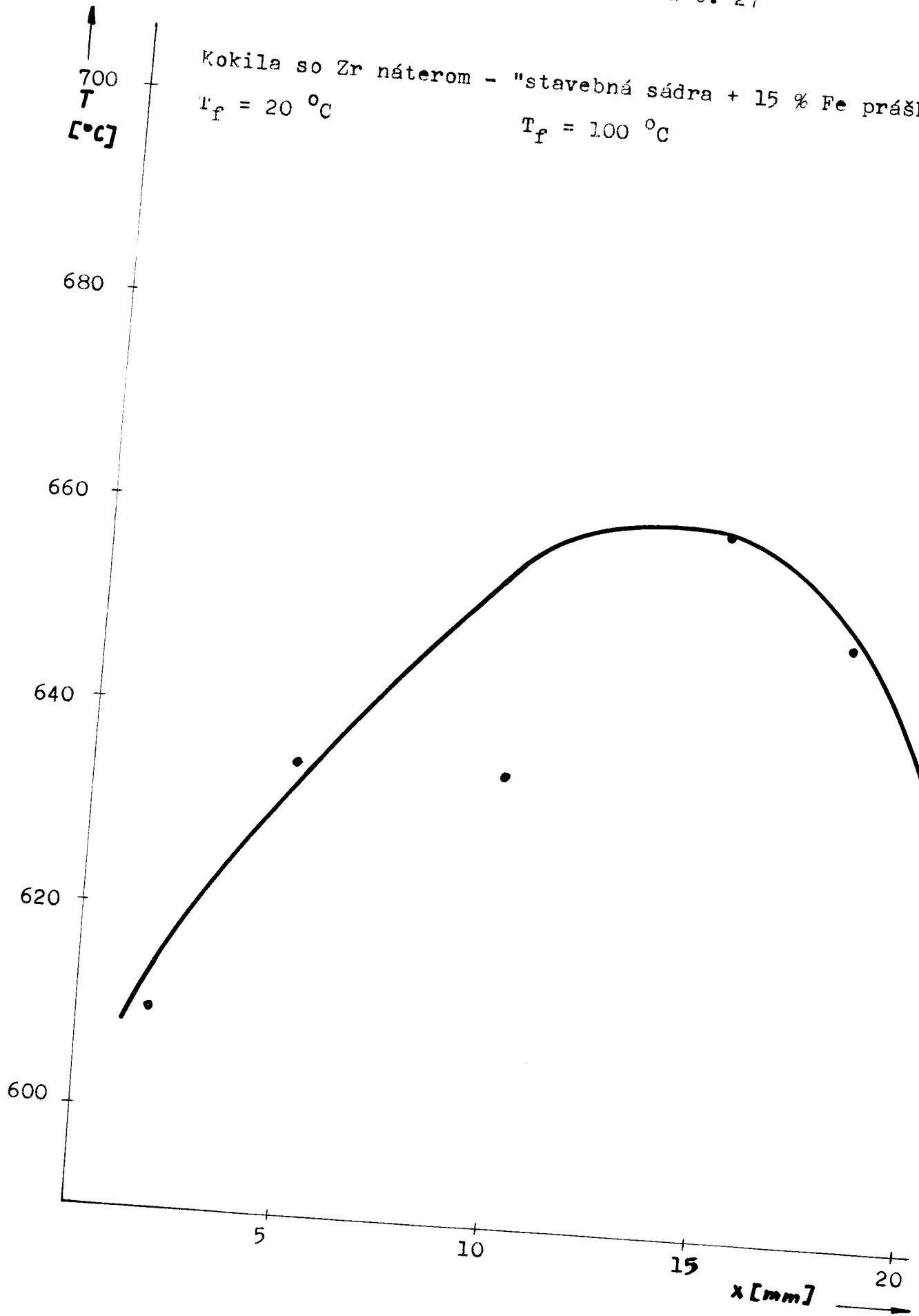
Kokila so Zr náterom - "stavebná sádra + 50 % SiC"

$T_f = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$

$T_f = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$



Kokila so Zr náterom - "stavebná sádra + 15 % Fe prášku"
 $T_f = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_f = 100 \text{ }^\circ\text{C}$

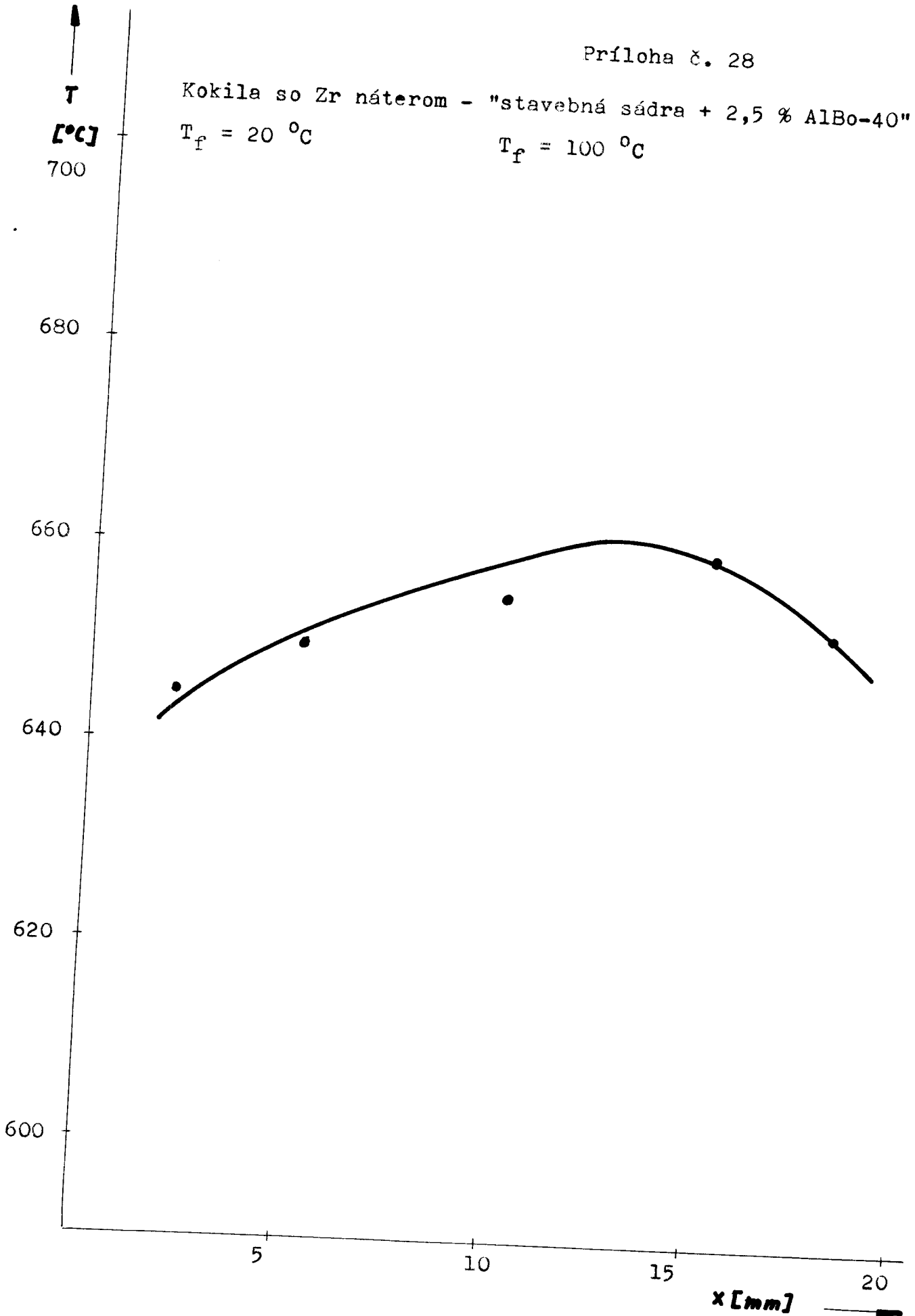


Príloha č. 28

Kokila so Zr náterom - "stavebná sádra + 2,5 % AlBo-40"

$T_f = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$

$T_f = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$

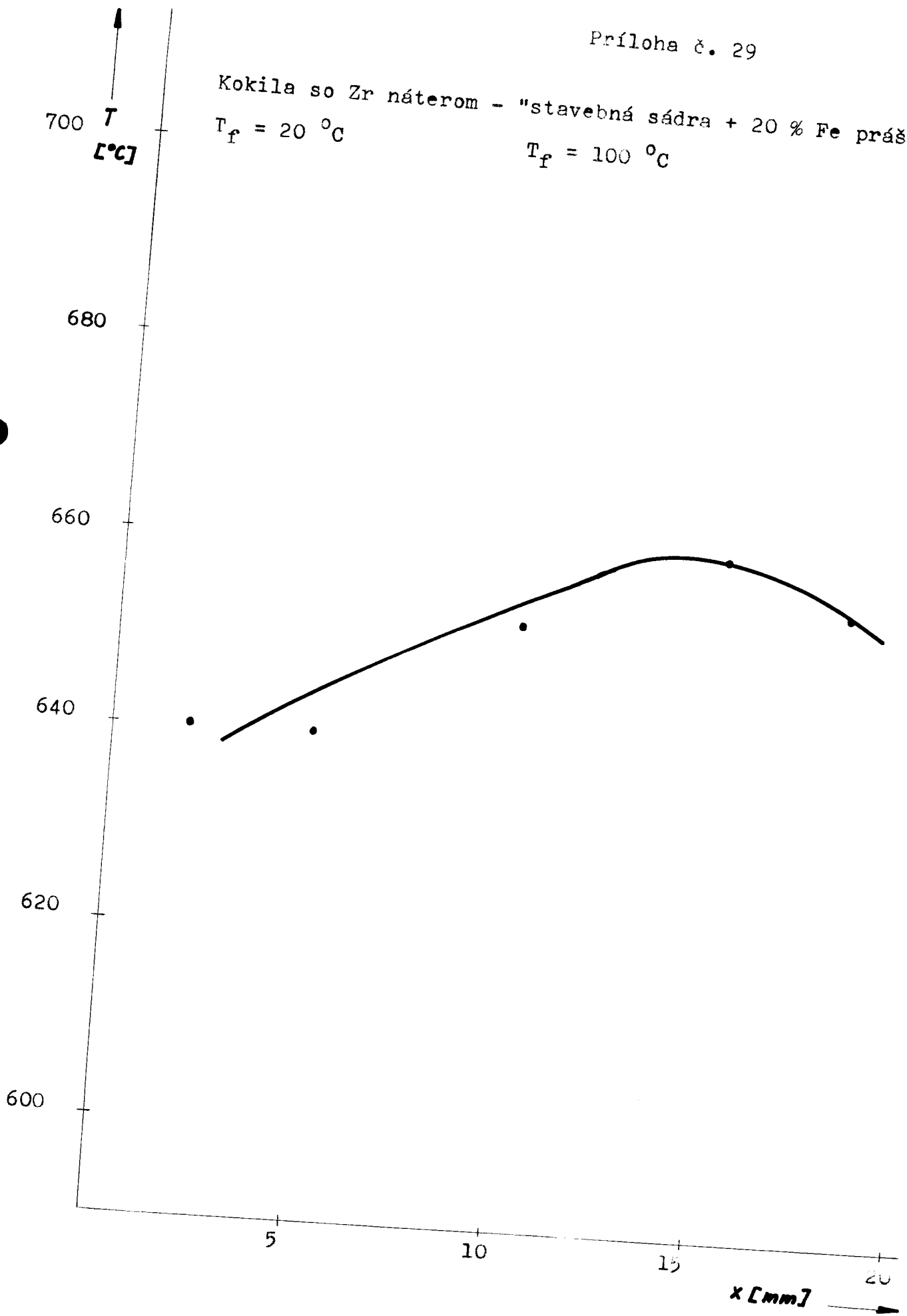


Príloha č. 29

Kokila so Zr náterom - "stavebná sádra + 20 % Fe prášku"

$T_f = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

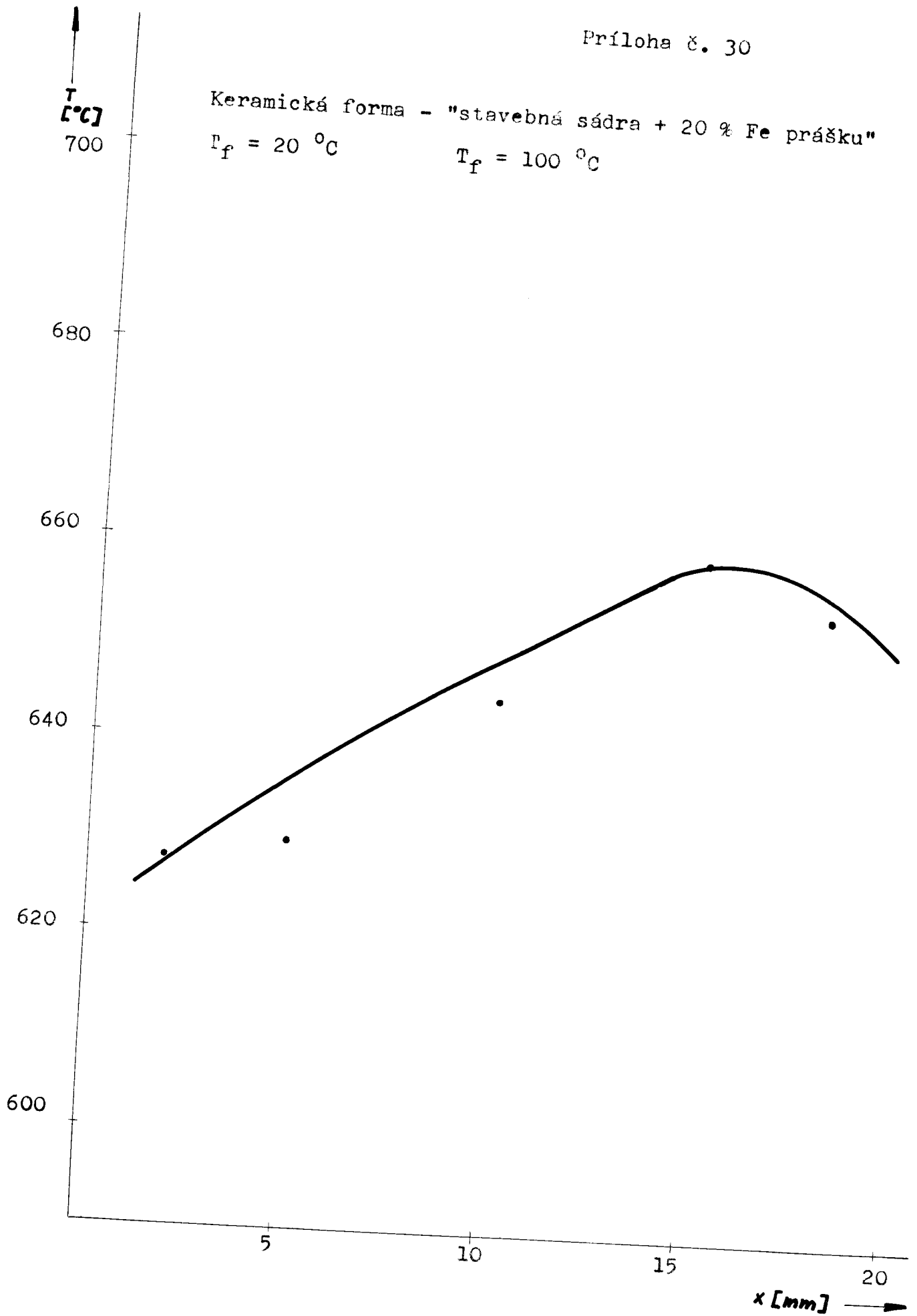
$T_f = 100 \text{ }^\circ\text{C}$



Keramická forma - "stavebná sádra + 20 % Fe prášku"

$T_f = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$

$T_f = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$

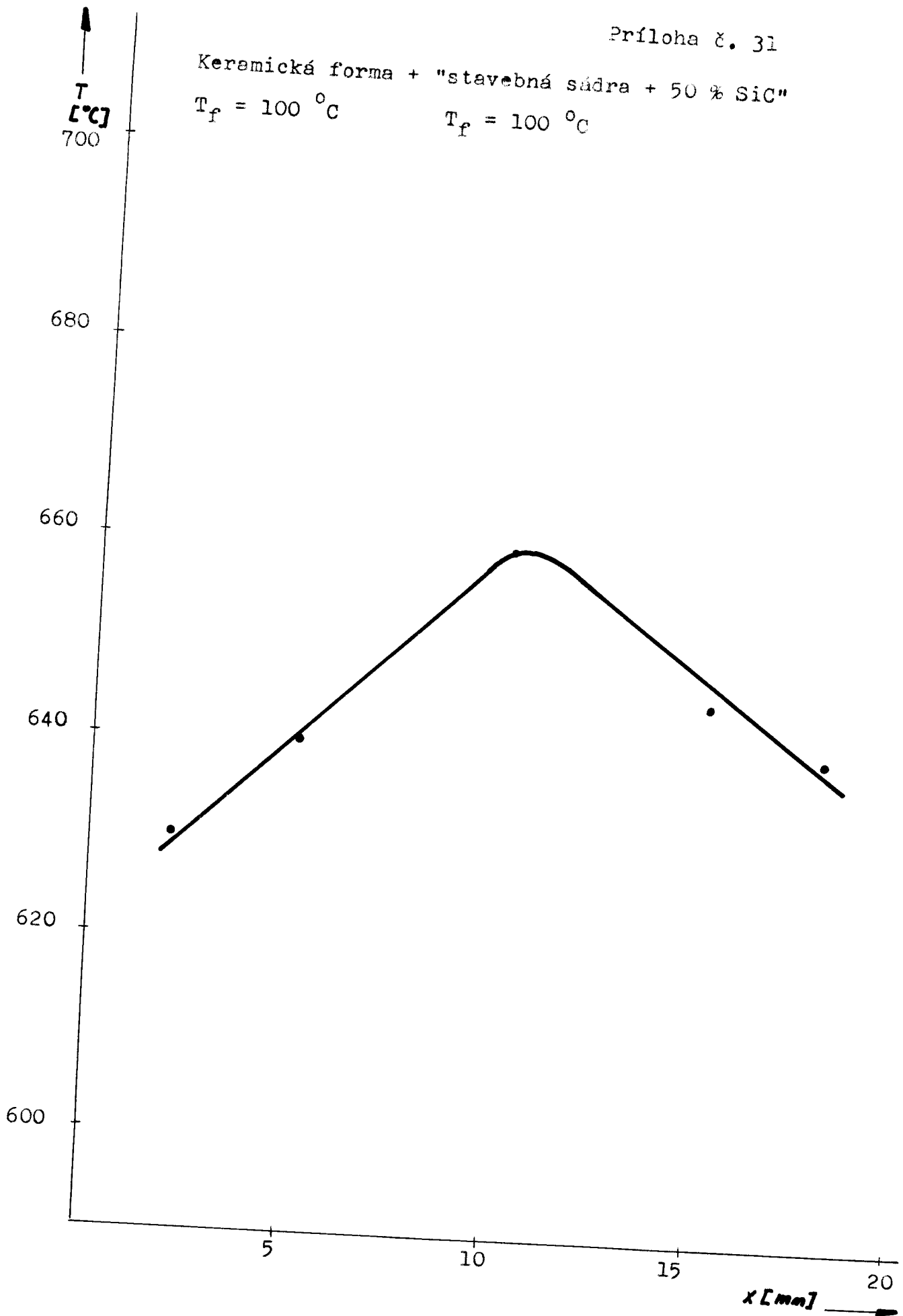


Príloha č. 31

Keramická forma + "stavebná sádra + 50 % SiC"

$T_f = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$

$T_f = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$



Makroštruktúry odliatkov liatych
do kombinovaných foriem.

Vzorok č. 1



Vzorok č. 2



Vzorok č. 3



Faint, illegible text, possibly a header or address block.

Helena Kováčová
Tichá ulice č. 21
911 01 Třebíč

Faint, illegible text at the bottom of the page.

P r o h l á s e n í

Souhlasím, aby moje diplomová práce byla podle směrnice uveřejněné v Pokynech a informacích č. 1/1975, se kterou jsem byl seznámen, zapůjčena nebo odprodána za účelem využívání jejího obsahu. Jsem si vědom, že práce je majetkem školy a že s ní nemohu sám disponovat.

Souhlasím, aby po pěti letech byla diplomová práce vrácena na uvedenou adresu, nebo v případě nedoručitelnosti skartována.

Helena Kovačová

podpis

Jméno a příjmení Helena K o v á č o v á

Adresa stálého bydliště Tichá ulica č. 21

911 01 T r e n č í n

Adresa podniku, ve kterém budete pracovat (pokud víte)

nnnn

Termočlánok NiCr - Ni Ø 0,3 mm

Vzťažná teplota: 0°C

U
/mV/

+ tabuľkové hodnoty / Degussa /
○ namerané hodnoty

