

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**SLEDOVÁNÍ TEPLOTNÍCH POLÍ V SOUSTAVĚ
ODLITEK - PÍSKOVÁ FORMA**

Michaela HÝBLEROVÁ

1999

Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní
Katedra strojírenské metalurgie

Obor 23 - 07 - 8
strojírenská technologie

zaměření strojírenská metalurgie

**SLEDOVÁNÍ TEPLOTNÍCH POLÍ V SYSTÉMU ODLITEK - PÍSKOVÁ
FORMA**

Bc. Michaela HÝBLEROVÁ

KSM - 475

Vedoucí práce: Doc. Ing. Iva Nová, CSc., TU Liberec
Konzultant: Ing. Jiří Rus, TU Liberec

Rozsah práce a příloh:

Počet stran:	130
Počet tabulek:	10
Počet obrázků:	52
Počet příloh:	12
Počet výkresů:	-

27. května 1999



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení

Bc. Michaela H Ý B L E R O V Á

obor
zaměření

**23 - 07 - 8 Strojírenská technologie
Strojírenská metalurgie**

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

Sledování teplotních polí v soustavě odlitek - písková forma

Zásady pro vypracování:

1. Prostudujte tepelné děje v soustavě odlitek - písková slévárenská forma, zaměřte se na specifika přenosu tepla v pískové formě. Seznamte se s metodami modelování teplotních polí v systému odlitek - písková slévárenská forma.
2. Připravte a proveďte experimentální měření teplotních polí v pískových formách. Použijte průmyslově užívané formovací směsi. Zvolte rozměry odlitku i formy. Zjistěte při každém experimentálním měření průběh teplot v odlitku a ve formě.
3. Pomocí software SIMTEC (poslední verze) se pokuste o simulaci vybraných časových závislostí teplot ve slévárenské formě po odlití taveniny.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky a formulujte závěry.

Forma zpracování diplomové práce:

- průvodní zpráva cca 50 stran (včetně obrázků)
- grafické práce výkresy, tabulky a grafy (k doplnění textu)

Seznam literatury :

- [1] KLEČKOVÁ, M.: Nestacionární teplotní pole a napjatost ve strojních součástech. 1. vyd., Praha 1979.
- [2] KUNEŠ, J.: Modelování tepelných procesů. 1. vyd., Praha 1989.
- [3] HAVLÍČEK, F., ELBEL, T.: Studium tepelně fyzikálních vlastností formy. Slévárství XVII, 1969, č. 9, s. 366.
- [4] RUSÍN, K.: Teorie slévárenských pochodů. [Skripta]. VUT Brno 1987.
- [5] Časopisy: Slévárství, Hutnické listy, Strojírenství.
- [6] Firemní podklady RWP Aachen.

Vedoucí diplomové práce:

Doc. Ing. Iva Nová, CSc.,

Konzultant diplomové práce:

Ing. Jiří Rus

Prof. Ing. Jaroslav Exner, CSc.
vedoucí katedry

L.S.



Doc. Ing. Ludvík Prášil, CSc.
děkan

V Liberci dne 31. 10. 1998

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

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Téma: **SLEDOVÁNÍ TEPLOTNÍCH POLÍ V SOUSTAVĚ
ODLITEK - PÍSKOVÁ FORMA**

Anotace:

Práce shrnuje informace o tepelných dějích mezi odlitkem a pískovou slévárenskou formou. Zabývá se simulací teplot v pískových slévárenských formách pomocí programu SIMTEC (verze z 22. 10. 1997) a stanovením teploty rozhraní pro tyto formy.

Theme: **OBSERVATION OF TEMPERATUR FIELDS IN SYSTEM
CAST - SAND MOULD**

Annotation:

The work summarises information about heat actions between cast and sand mould. It deals with simulation of temperatures in sand moulds by means of software SIMTEC (the version from 22. 10 1997) and determination of temperature value of boundary surface for sand moulds.

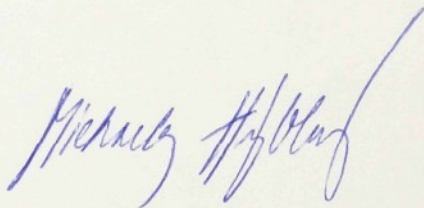
P o d ě k o v á n í

Touto formou bych chtěla poděkovat všem, kteří svou pomocí přispěli k vypracování této diplomové práce. Nejvíce pak Doc. Ing. Ivě Nové, CSc. za odborné rady, připomínky, ochotu i čas, který mi věnovala.

Můj dík patří i Ing. Jiřímu Rusovi, Ing. Marku Kalinovi a Ing. Milanu Havlovi za pomoc při simulaci a panu Jaroslavu Vorlovi za praktické rady a pomoc.

V neposlední řadě bych také ráda poděkovala mým rodičům za jejich podporu v průběhu celého studia.

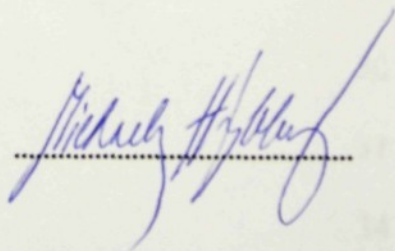
V Liberci dne 27. 5. 1999



V Liberci 27. května 1999

Obsah	
Seznam použitých zdrojů	7
1 Úvod	20
2 REŠERŠNÍ ČÁST PRÁCE	42
2.1 Seznam a popis sledovaných tepelných procesů uvnitř učebny a tělocvičny	42
2.2 Tepelné procesy v rámci učebny a tělocvičny	48
2.2.1 Seznam a popis sledovaných tepelných procesů	48
2.2.2 Tepelné procesy v rámci učebny a tělocvičny	48
2.3 Charakteristika tepelných procesů	51
2.3.1 Tepelné procesy v rámci učebny a tělocvičny	51
2.3.2 Tepelné procesy v rámci učebny a tělocvičny	51
2.3.3 Tepelné procesy v rámci učebny a tělocvičny	51
2.4 Tepelné procesy v rámci učebny a tělocvičny	51
2.4.1 Tepelné procesy v rámci učebny a tělocvičny	51
2.4.1.1 Tepelné procesy v rámci učebny a tělocvičny	51
2.4.1.2 Tepelné procesy v rámci učebny a tělocvičny	51
2.4.2 Tepelné procesy v rámci učebny a tělocvičny	51
2.4.3 Tepelné procesy v rámci učebny a tělocvičny	51
2.5 Charakteristika tepelných procesů	51

„Místopřisežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury.“



W Liberci 27. května 1999

O B S A H

	str.
Seznam použitých zkratk a symbolů	7
1. ÚVOD	10
2. REŠERŠNÍ ČÁST PRÁCE	12
2.1 Současný stav sledování tepelných procesů mezi odlitkem a formou	12
2.2 Tepelné poměry mezi odlitkem a slévárenskou formou	13
2.2.1 Sdílení tepla stěnou slévárenské formy	14
2.2.2 Matematicko-fyzikální rozbor řešení teplotních polí	18
2.2.2.1 Řešení teplotního pole	21
2.3 Základní charakteristika pískových formovacích směsí	23
2.3.1 Bentonitové směsi	25
2.3.2 CT směsi	26
2.3.3 Kondenzační zóna	27
2.4 Tepelně-fyzikální veličiny slévárenských forem	28
2.4.1 Součinitel tepelné akumulace b_F	29
2.4.1.1 Metody stanovení b_F	29
2.4.1.2 Metoda měření teplotních polí	30
2.4.2 Měrná tepelná kapacita	30
2.4.3 Tepelná vodivost	31
2.4.4 Teplotní vodivost	34
2.5 Charakteristika litin	35

2.5.1	Litina s lupínkovým grafitem (LLG) a její krystalizace	35
2.5.1.2	Křivka tuhnutí a chladnutí litin	37
2.6	Měření teploty při sledování slévárenských procesů	40
2.7	Charakteristika software SIMTEC	41
3.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE	43
3.1	Popis měřicího zařízení pro sledování teplot	44
3.1.1	Použité termočlánky a jejich rozmístění ve formách	44
3.2	Charakteristika použitých slévárenských forem	45
3.3	Použitý slévárenský materiál	48
3.4	Popis prováděných experimentů	50
3.4.1	Zpracování naměřených experimentů	54
3.4.1.2	Experimenty první etapy měření	54
3.4.1.2	Experimenty druhé etapy měření	54
3.4.2	Vyhodnocení výsledků experimentů	62
3.5	Modelování provedených experimentů	65
4.	DISKUSE VÝSLEDKŮ	118
5.	ZÁVĚR	127
6.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	129

Příloha

Seznam použitých zkratk a symbolů

α	- součinitel přestupu tepla [W.m ⁻²]
α_D	- součinitel přestupu tepla dotykem [W.m ⁻²]
α_P	- součinitel přestupu tepla konvekcí (prouděním) [W.m ⁻²]
a	- součinitel teplotní vodivosti [m ² . s ⁻¹]
A, B, C	- konstanty, jež se určují z empiricky stanoveného průběhu měrné tepelné kapacity
a_F	- součinitel teplotní vodivosti formy [m ² . s ⁻¹]
β	- součinitel závislý na jemnosti ostřiva
b_F	- součinitel teplotní akumulace formy [W. s ^{1/2} . m ⁻² . K ⁻¹]
c	- měrná tepelná kapacita vypařování [J. kg ⁻¹ . K ⁻¹]
c'	- měrná kapacita sledovaného systému [J. kg ⁻¹ . K ⁻¹]
Co	- součinitel sálavosti dokonale černého tělesa [J. kg ⁻¹ . K ⁻¹]
c_F	- měrná tepelná kapacita materiálu formy [J. kg ⁻¹ . K ⁻¹]
c_P	- měrná tepelná kapacita tělesa [J. kg ⁻¹ .K ⁻¹]
δ	- koeficient přenosu látky, resp. plynu
ε	- součinitel poměrné sálavosti
E	- koeficient charakterizující fázovou přeměnu
grad T	- teplotní gradient ve formě
χ	- hustota tepelného toku [W.m ⁻²]
k	- koeficient přenosu látky, resp. vlhkosti
λ	- součinitel tepelné vodivosti tělesa [W.m ⁻¹ . K ⁻¹]
λ_K	- součinitel přestupu tepla vedením (kondukcí) [W.m ⁻¹ . K ⁻¹]
λ_F	- součinitel tepelné vodivosti materiálu formy [W.m ⁻¹ . K ⁻¹]
λ_o	- tepelná vodivost při teplotě 0 °C [W.m ⁻¹ . K ⁻¹]
λ_S	- tepelná vodivost pevného skeletu (ostřiva) [W.m ⁻¹ . K ⁻¹]
λ_V	- tepelná vodivost vzduchu nebo plynu obsaženého v pórech mezi zrny [W.m ⁻¹ . K ⁻¹]
λ_{VZ}	- tepelná vodivost vzduchu [W.m ⁻¹ . K ⁻¹]

$\lambda_X, \lambda_Y, \lambda_Z$	- součinitel teplotní vodivosti v jednotlivých směrech os kartézského systému [W.m ⁻¹ . K ⁻¹]
m	- pórovitost materiálu
n	- stupeň paraboly
$Q^\bullet$	- teplo vnitřních zdrojů [J]
q	- intenzita tepelného toku ve slévárenské formě způsobená vedením tepla [J]
q_{ZDR}	- teplo vnitřních zdrojů [J]
ρ	- hustota [kg. m ⁻³]
ρ_F	- hustota materiálu formy [kg. m ⁻³]
ρ_S	- hustota pevného skeletu (ostrůva) [kg. m ⁻³]
ρ_V	- hustota formovací směsi [kg. m ⁻³]
R	- povrch tělesa [m ²]
S_O	- styčná plocha mezi odlitkem a formou [m ²]
t	- čas [s]
t	- čas přestupu tepla dotykem [s]
t_1	- čas vylučování prvních krystalů [s]
t_2	- čas vylučování eutektika [s]
t_3	- čas konce tuhnutí [s]
T	- teplota [°C]
T_E	- teplota eutektická [°C]
T_{ef}	- efektivní teplota [°C]
T_{EU}	- teplota eutektoidní [°C]
T_F	- teplota formy [°C]
T_{KR}	- teplota krystalizace odlévaného kovu [°C]
T_L	- teplota likvidu (počátku krystalizace) [°C]
T_O	- teplota po odlití (počátku chladnutí) [°C]
T_p	- teplota plynu [°C]
T_{pO}	- teplota povrchu odlitku [°C]
T_{PR}	- teplota rozhraní mezi odlitkem a formou [°C]
T_S	- teplota solidu (konce krystalizace) [°C]
T_s	- teplota stěny [°C]

- T_{STR} - střední teplota formy [°C]
- u - obsah vlhkosti [%]
- u, v - souřadnice uváděného místa plochy [m]
- V - objem tělesa [m³]
- V_F - objem formy [m³]
- x_i - vzdálenost libovolného místa formy od líce [m]
- X_2 - prohřátá vrstva slévárenské formy v okamžiku ztuhnutí odlitku [m]
- x, y, z - souřadnice systému [m]
- ∇^2 - Laplaceův operátor
- JFS - jednotná formovací směs
- GICH - Gaussův integrál chyb
- MKP - metoda konečných prvků
- MKO - metoda konečných objemů

Tabulka 1 - 3 Možnosti slévárenských systémů [32]

Název programu	Zdroj přívodu	Metoda tvorby síti	Využití pro výsledky			
			Plocha formy	Teplota odlícení	Zbytková molí	Střední
PROCAST	ESA	FEM	X	X	-	(X)
SIMTEC	SRN	FEM	X	X	X	X
MAGMASOFT	SRN	FDM/FEM	X	X	X	X
THEL	SRN	FDM/FEM	-	X	(X)	-
SIMULOE	F	FDM	X	X	-	-
SOLSTAR	DK	MM	-	X	-	-

Negrozředněnější programové systémy jsou u nás SIMTEC a MAGMASOFT, které mají zastoupení školními a poradenskými centry.

1. ÚVOD

Současná slévárenská výroba se zaměřuje na nové možnosti, které usnadňují výrobu kvalitních odlitků. K těmto možnostem se řadí metody modelování, které se také označují jako metody simulace slévárenských procesů. Jde především o modelování, jak tuhnutí a chladnutí odlitků, tak i rozložení teplot v odlitku a slévárenské formě.

Tepelné procesy mezi odlitkem a slévárenskou formou jsou děje velmi složité, nestacionární, při kterých probíhá tuhnutí taveniny za intenzivního uvolňování latentního krystalizačního tepla, které je sdíleno přes rozhraní kov - forma, a akumulováno slévárenskou formou. Sledování těchto dějů je velmi náročné a vyžaduje možnosti matematického zpracování dat.

Teprve rozvoj výpočetní techniky, systémů CAD/CAM a numerických metod (metoda konečných prvků, popř. konečných objemů) ukazuje nové možnosti řešení slévárenských procesů v systému odlitek - slévárenská forma. V této souvislosti vznikla celá řada slévárenských systémů pro modelování tepelných dějů.

Tabulka 1 - 1 Přehled slévárenských systémů [32]

Název programu	Země původu	Metoda tvorby sítí	Využití pro výpočty			
			Plnění formy	Tuhnutí chladnutí	Zbytková pnutí	Struktura
PROCAST	USA	FEM	X	X	-	(X)
SIMTEC	SRN	FEM	X	X	X	X
MAGMASOFT	SRN	FDM/FEM	X	X	X	X
THEL	SRN	FDM/FEM		X	(X)	-
SIMULOR	F	FDM	X	X	-	-
SOLSTAR	UK	MM	-	X	-	-

Nejrozšířenějšími programovými systémy jsou u nás SIMTEC a MAGMASOFT, které mají zastoupení školicími a poradenskými centry.

Katedra strojírenské metalurgie TU Liberec v rámci odborné spolupráce se specializovanou firmou RWP Aachen, GmbH využívá simulační program SIMTEC, který je aplikován na pracovní stanici HEWLETT PACKARD 715. V tomto směru je prováděn i výzkum na KSM, který se týká experimentálního měření tuhnutí a chladnutí odlitků v různých typech slévárenských forem s následným uskutečňováním simulačního výpočtu pro stejné podmínky odlévání i použité materiály. Při simulaci se uplatňují tepelně-fyzikální veličiny stanovené na základě experimentu. Shoda simulačního výpočtu s experimentem je známkou správného použití systému výpočtu i použitých dat.

V rámci bakalářské práce jsem stanovila tepelně-fyzikální veličiny CT formovacích směsí. Při řešení diplomové práce bych chtěla rozšířit a uplatnit některé další poznatky, které jsem získala v rámci řešení bakalářské práce.

Úkolem mé diplomové práce je sledování teplotních polí v pískové slévárenské formě (z CT směsi, ze směsi se 7 % bentonitu, ze směsi z přírodního rájeckého písku a z jednotné formovací směsi) za účelem dalšího ověření simulačního programu SIMTEC s využitím dat obsažených v databance tohoto programu a tepelně-fyzikálních veličin obsažených v bakalářské práci.

2. REŠERŠNÍ ČÁST PRÁCE

2.1 Současný stav sledování tepelných procesů mezi odlitkem a formou

Sledování tepelných procesů mezi odlitkem a formou bylo vždy v popředí zájmu, neboť je zřejmé, že probíhající tepelné procesy v konečném efektu ovlivňují vlastnosti i kvalitu odlitků.

Významné slévárenské práce, které aplikovaly procesy tepelných dějů mezi odlitkem a formou byly práce CHVORINOVA [8] za účelem stanovení ztuhlé tloušťky odlitku ve slévárenské formě.

Mnoho výzkumníků sledovalo tepelné děje za účelem stanovení teplotních polí, především v systému odlitek - slévárenská forma. U nás to byl HAVLÍČEK [4], [5], [6], EXNER [2], GEDEONOVÁ [3], JELÍNEK [10], ze zahraničních VEJNIK, např. svými pracemi [25], [26], ANISOVIČ [1].

VEJNIK [25] a ANISOVIČ [1] se zabývali měřením teplotních polí v odlitku a slévárenské formě za účelem stanovení tepelně-fyzikálních vlastností formy, především **součinitele tepelné akumulace formy** b_F , popř. měrné tepelné kapacity, tepelné a teplotní vodivosti pískových slévárenských forem. Též stanovení hodnot součinitele tepelné akumulace slévárenských forem z nejrůznějších formovacích směsí prováděl HAVLÍČEK [5], který aplikoval metodu dle HALBARTA. Hodnoty tepelné akumulace pískových forem stanovené různými autory jsou uvedeny v příloze č. 1.

Měření a matematická stanovení teplotních polí ve slévárenských formách, která prováděl HAVLÍČEK [5] byla velmi přínosná nejen po stránce praktické, ale i teoretické. Ve svých výzkumech se zaměřil nejen na pískové formy, ale i na hutnické kokily.

Matematickým řešením teplotních polí v systému odlitek - forma - okolí se u nás delší dobu zabývají pracovníci VUT Brno KAVIČKA a HLOUŠEK [12]. Nejdříve měli k dispozici analogový počítač a zaměřili se na tuhnutí odlitku ve formě. Postupně rozpracovali metodiku řešení teplotních polí v ocelářských kokilách při odlévání ingotů i v běžných slévárenských formách, své poznatky publikovali [12], [13]. Hlavním cílem jejich výzkumu bylo porovnání analytického řešení problému s řešením numerickým. Z jejich publikací však nejsou často

patrné hodnoty tepelně-fyzikálních veličin použitých materiálů ani záměry a zhodnocení získaných výsledků.

Další rozvoj sledování teplotních polí a tepelných dějů ve slévárenských formách nastal v posledním desetiletí tohoto století, kdy byly s rozvojem výpočetní techniky vytvořeny výpočtové programy uvedené v tabulce č. 1 (úvod), které jsou nejčastěji založeny na Fourierově diferenciální rovnici prostorového sdílení tepla a aplikují numerické metody výpočtu - metodu konečných prvků MKP (FEM) nebo metodu konečných objemů MKO (FDM).

2.2 Tepelné poměry mezi odlitkem a slévárenskou formou

Tepelné poměry mezi odlitkem a formou jsou důležitým činitelem při utváření odlitku ve slévárenské formě. Z hlediska obecného pohledu dochází mezi odlitkem a formou k výměně tepla :

- a) vedením;
- b) prouděním;
- c) sáláním.

Podmínky tepelných dějů mezi odlitkem a formou závisí především na *intenzitě přestupu tepla*.

Intenzita přestupu tepla vedením a konvekcí probíhá často současně a označuje se souhrnně jako výměna tepla dotykem, která je vyjádřena Newtonovým zákonem, jež definuje tepelný tok. Celkové množství tepla prošlého z povrchu odlitku do formy dotykem je přímo úměrné tepelnému toku prošlému styčnou plochou odlitku a formy za určitý čas:

$$Q = \alpha_D (T_{pO} - T_F) \cdot S_O \cdot t, \quad (2.1)$$

kde značí: α_D - součinitel přestupu tepla dotykem;

T_{pO} - teplotu povrchu odlitku;

T_F - teplotu formy;

S_O - styčnou plochu mezi odlitkem a formou;

t - čas přestupu tepla dotykem.

Množství tepla, které je slévárenská forma schopna akumulovat:

$$Q_{AK} = V_F \cdot \rho_F \cdot c_F \cdot T_{STR}, \quad (2.2)$$

kde značí:

- V_F - objem formy;
- c_F - měrnou tepelnou kapacitu formy;
- T_{STR} - střední teplotu formy;
- ρ_F - hustotu materiálu formy.

Současně se vychází z úvahy, že teplo uvolněné odlitkem Q_O projde rozhraním odlitek - forma a je akumulováno slévárenskou formou. Lze psát: $Q_O = Q_{PR} = Q_{AK}$. Teplo uvolněné odlitkem je teplo: přehřátí, latentní krystalizační, popř. teplo na interval tuhnutí. Často je však při výpočtu tepelných dějů uvažováno teplo, které se uvolní do okamžiku ztuhnutí odlitku.

2.2.1 Sdílení tepla stěnou slévárenské formy

Písková forma, resp. stěna formy představuje disperzní systém, proto sdílení tepla v pískové formě lze považovat za děj totožný, jako je přenos tepla v kapilárně - pórovitém tělese. Přenosem tepla v kapilárně pórovitých tělesech se zabýval LYKOV [17], z jeho práce je patrné, že se jedná o velmi složitý tepelný děj, kdy se uplatňuje nejen přenos tepla, ale také přenos hmoty. Pokud poznatky LYKOVA [17] aplikujeme na podmínky pískové slévárenské formy, pak se v ní přenos (sdílení) tepla uskutečňuje:

- a) vedením (kondukcí) - prostřednictvím tepelné vodivosti pevné a plynné fáze formy;
- b) prouděním (konvekci) plynu i vody;
- c) sáláním (radiací) v prostorech mezi zrny ostřiva.

Rozdělení celkového děje sdílení tepla na jednotlivé elementární děje (kondukcii, konvekci a sálání) má podle MICHEJEVA [18] pouze teoretický význam, neboť velmi často tyto děje probíhají současně v různé intenzitě nebo se ovlivňují. Tak např. konvekce je vždy doprovázena kondukcí a sáláním a při kondukcii v pórovitých hmotách nastává konvekce a sálání.

HAVLÍČEK [4] uvádí při popisu tepelných dějů v pískové formě jednotlivé způsoby

přenosu tepla a jejich maximální účinky v určitém rozsahu teplot:

- 1) do teplot 200° C převládá přenos tepla vedením;
- 2) od 200 do 600° C je účinné proudění tepla;
- 3) při vyšších teplotách formy nad 600° C převládá přenos tepla sáláním.

Přenos tepla vedením v pískové formě je dán tepelnou vodivostí skeletu, pojiva, vody, popř. i plynů. Mírou sdílení tepla vedením je intenzita tepelného toku, kterou lze vyjádřit Fourierovým vztahem:

$$q_K = -\lambda_K (T) \cdot \text{grad } T, \quad (2.3)$$

kde značí: q - intenzitu tepelného toku ve slévárenské formě způsobenou vedením tepla;

λ_K - součinitel přestupu tepla vedením (kondukce);

grad T - teplotní gradient ve formě.

Vedení tepla má vysokou hodnotu uvnitř každého monolitického zrna ostřiva, avšak celková vodivost systému je limitována tepelnými odpory v místech (plochách) styku zrn disperzní soustavy. Bude tedy záviset na stupni zhuštění směsi, resp. pórovitosti směsi, kvalitě a geometrii styku zrn přes mosty pojiva (obsahu vody, pojiva a přísad) a teplotě. Obecně však s rostoucí teplotou vodivost celého systému klesá, čímž se sdílení tepla snižuje [4], i když nad 500° C se začíná výrazně uplatňovat sdílení tepla sáláním a přenos tepla se zvyšuje.

Je třeba konstatovat, že pískové formy jsou proti formám kovovým špatnými vodiči tepla, a proto se v nich ustavují značné teplotní gradienty.

Přenos tepla konvekcí (prouděním) je dán konvekcí plynu, u velké formy také konvekcí vody. Konvekci lze obecně rozdělit na přirozenou a vynucenou. Oba typy konvekce se uplatňují při přenosu tepla a hmoty u pískových forem.

a) Přirozená konvekce (gravitační konvekce) plynu je způsobena rozdílnou teplotou částic plynu, resp. rozdílnou hustotou částic plynu, které jsou ohřáté na různou teplotu (teplejší částice jsou lehčí a naopak). U přirozené konvekce dochází k dvojstranné výměně média (plynu), kdy teplejší (lehčí) částice směřují do horních míst pórů a naopak, čímž se

vyvolá konvekce ve vertikálním a horizontálním směru. Tímto způsobem je vyvoláno proudění plynu jak v oddělených mezizrnných pórech, tak v celé prohřáté formě nebo v jejím určitém pásmu vlivem filtrace (prostoupení) plynu kapilárami formy. Plyn může proto proudit od vnitřního povrchu do hloubky stěny formy.

b) Vynucená konvekce je vyvolána rozdílným tlakem plynů v průřezu stěny formy. V prvních okamžicích po odlití je ve vrstvách formy při lici vyšší tlak plynů než ve vrstvách vzdálenějších, neboť objem vyloučených plynů je závislý na množství přijatého tepla. Do těchto vrstev pronikají plyny uvolněné z taveniny a splodiny z vyhořívání příměsí ve formě, tvoří se pára a s rostoucí teplotou značně vzrůstá objem plynů a vzduchu v pórech formy. Na rozdíl od přirozené konvekce dochází u tohoto způsobu pouze k jednostranné výměně (jednosměrnému toku) plynu a to z míst o vyšším tlaku plynů do míst s nižším tlakem. Teplejší plyn prostupuje kapilárami od vzdálenějších chladnějších oblastí formy a zvyšuje tak intenzitu přenosu tepla. Jak uvádí HAVLÍČEK [4] v podstatě jde o vynucenou tzv. filtraci v jednom směru, nikoliv o cirkulaci. S postupem doby se vývin plynů snižuje, neboť také klesá rozdíl tlaků a tím klesá intenzita vynucené konvekce.

Ukázalo se, že přenos tepla přirozeným prouděním (cirkulací) plynu v jednotlivých pórech je poměrně málo účinný, zvláště jsou-li kapiláry příliš malé. Poměrně silnější přenos tepla ve formě vyvolává přirozené proudění plynu v celém objemu formy. Z tohoto důvodu je intenzita přenosu tepla přirozenou konvekcí plynu přímo závislá na velikosti pórů nebo rozměrnosti formy. Čím jsou póry větší, tím větší je přenos tepla.

Jak uvádí JELÍNEK [10], není nutné u sušených forem s ohledem na nízkou tepelnou akumulaci plynných složek (vzduchu) s prouděním vzduchu počítat (součinitel tepelné vodivosti vzduchu je o řád nižší než je součinitel tepelné vodivosti formovací směsi). U syrových (nevysušených) forem, jak uvádí JELÍNEK [10], probíhá konvekce vody, a to jak ve formě páry, tak i ve formě kapaliny. Při lití do syrových forem se vlhkost intenzivně odpařuje po dosažení teploty varu. Povrchová vrstva formy, která se stýká s odlitkem dehydratuje. Postupně dehydratují i vzdálenější vrstvy formy, jež jsou prohřáté na teplotu varu, čímž ve formě vzniká kondenzační zóna. Přitom se přenáší velké množství tepla (k odpaření 1 kg vody je nutno $2,3 \cdot 10^6$ J).

Tepelný tok prouděním lze stanovit:

$$q_P = \alpha_P (T_P - T_S) \quad (2.4)$$

kde značí: α_P - součinitel přestupu tepla konvekci (prouděním) ;

T_P - teplotu plynu [°C];

T_S - teplotu stěny [°C].

Přenos tepla sáláním závisí na geometrických charakteristikách pórů (nebo částic), na stupni černosti povrchu částic a na teplotě. Rozhodující při sálání je vliv teploty. S rostoucí teplotou částic více tepla vysálá do mezizrnných prostorů. Součinitel černosti povrchu tělesa se pohybuje od 0 (absolutně bílé těleso) do $5,67 \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ (absolutně černé těleso), jak uvádí LYKOV [17]. Přidání přísad černé barvy do směsi (kamenouhelná moučka) zvyšuje účinnost přenosu tepla sáláním. Jak uvádí JELÍNEK [10], jedno procento sazí v CT směsi zvyšuje přenos tepla při teplotě 692 K o 12 % a při 1670 K o 33 %.

Tepelný tok sáláním lze stanovit:

$$q_s = \varepsilon \cdot C_o \cdot [(T_P/100)^4 - (T_S/100)^4], \quad (2.5)$$

kde značí: ε - součinitel poměrné sálavosti;

C_o - součinitel sálavosti dokonale černého tělesa;

T_P - teplotu plynu [K];

T_S - teplotu stěny formy [K].

LYKOV [17] dospěl k poznatku, že při sledování přenosu tepla v kapilárně pórovitém tělese je nutno se sdílením tepla sledovat i přenos hmoty. Celou fyzikálně-matematickou problematiku sdílení tepla a hmoty při neustálených podmínkách popisuje velmi složitou diferenciální rovnicí, do které zahrnuje oba přenosové děje:

$$\partial T / \partial t = a \cdot \nabla^2 T + E \cdot c / c' \cdot \partial u / \partial t; \quad (2.6)$$

$$\partial u / \partial t = k \cdot \nabla^2 \cdot u + k \cdot \delta \cdot \nabla^2 \cdot T, \quad (2.7)$$

kde značí: T - teplotu;

t - čas;

a - součinitel teplotní vodivosti;

∇^2 - Laplaceův operátor;

E - koeficient charakterizující fázovou přeměnu;

c - měrnou tepelnou kapacitu vypařování;

c' - měrnou kapacitu sledovaného systému;

k - koeficient přenosu látky, resp. vlhkosti;

u - obsah vlhkosti;

δ - koeficient přenosu látky, resp. plynu.

2.2.2 Matematicko-fyzikální rozbor řešení teplotních polí

Ovládnutí teplotního pole odlitku a formy, popř. jádra je velmi důležitým procesem při utváření odlitků (především litinových - z LLG, popř. LKG, LČG) požadovaných vlastností, tvarů, rozměrů i kvality jejich povrchu.

Tuhnutí a chladnutí odlitku a současný ohřev formy je z hlediska nauky sdílení tepla a hmoty dějem velmi komplikovaným a v obecné míře jde o případ nestacionárního prostorového sdílení tepla a hmoty, jak vyplývá z předešlé kapitoly 2.2.1. Doposud se při sledování tepelných dějů v pískových slévárenských formách nepodařilo uplatnit rovnice (2.6) a (2.7) při popisu této problematiky. Proto zatím vycházíme při řešení tepelných dějů v odlitku a v pískové formě i tak z dosti složité Fourierovy diferenciální rovnice, která matematicky představuje popis časové změny teploty v libovolném místě sledovaného tělesa, vyvolané přenosem tepla vedením a při působení vnitřních zdrojů energie.

Zápis Fourierovy diferenciální rovnice v kartézských souřadnicích je:

$$\partial T(c_v \cdot \rho) / \partial t = \partial / \partial x (\lambda_x \cdot \partial T / \partial x) + \partial / \partial y (\lambda_y \cdot \partial T / \partial y) + \partial / \partial z (\lambda_z \cdot \partial T / \partial z) + Q_{ZDR}, \quad (2.8)$$

kde značí: T - teplotu;

ρ - hustotu;

c_V - měrnou tepelnou kapacitu;

$\lambda_X, \lambda_Y, \lambda_Z$ - součinitel teplotní vodivosti v jednotlivých směrech os kartézského systému;

x, y, z - souřadnice systému;

Q_{ZDR} - teplo vnitřních zdrojů.

Pokud je rovnice (2.8) aplikována pro přesné výpočty ve slévárenské praxi, kde je značný rozsah teplot (od počáteční teploty formy do teploty lití odlévané taveniny), je nutné pro její řešení respektovat teplotní závislost tepelně-fyzikálních veličin použitých materiálů. Řešení této rovnice je náročné a je třeba znát okrajovou a počáteční podmínku.

Fourierova diferenciální rovnice (2.8) je založena na obecných fyzikálních zákonitostech, a proto popisuje přenos tepla v nejobecnější podobě. Jejím řešením tak lze získat výsledky, které se více nebo méně přibližují dané problematice. K tomu, aby bylo možno vybrat řešení odpovídající právě dané problematice, je třeba matematicky formulovat jeho zvláštnosti a to v podobě vymezení počáteční a okrajové podmínky. Obě podmínky musí řešená rovnice splňovat.

Počáteční podmínka popisuje rozložení teploty v tělese v počátečním časovém okamžiku. Okrajová podmínka (podle typu úlohy může být I. až V. druhu) zahrnuje především fyzikální a geometrické charakteristiky sledovaného tělesa, popř. charakterizuje pochod mezi tělesem a jeho okolím.

Pokud sdílení tepla v tělese probíhá pouze v jednom směru (těleso považujeme za polomasiv) a uvažujeme-li materiál tělesa za homogenní izotropní, lze diferenciální rovnici sdílení tepla (2.8) napsat ve tvaru:

$$\partial T / \partial t = a \cdot \partial^2 T / \partial x^2 \quad (2.9)$$

Počáteční teplota polonekonečného tělesa T_0 je v čase $t = 0$ konstantní, pak $T_0 = \text{konst.}$. Tento zjednodušený případ Fourierovy diferenciální rovnice lze aplikovat při sledování rozložení teplot ve stěně slévárenské formy. Pak lze počáteční teplotu tělesa, resp. slévárenské formy (T_F) náhlou změnou odlité taveniny přeměnit na teplotu T_{PR} . Tato teplota

se po celou dobu nestacionárního děje považuje za konstantní ($T_{PR} = \text{konst.}$). Sledujeme-li teplotu ve stěně slévárenské formy ve vzdálenosti x od líce v určitém časovém okamžiku po odlití ($T_{(x,t)}$), pak lze řešit tento problém pomocí Gaussova integrálu chyb - error funkcion (Kramponova funkce), jehož název vyplývá z uplatnění v teorii pravděpodobnosti.

Po matematickém odvození lze psát:

$$T_{(x,t)} = T_{PR} - (T_{PR} - T_F) \cdot \text{erf} \left[x / 2 (a_F \cdot t)^{-1/2} \right] \quad (2.10)$$

kde značí: a_F - součinitel teplotní vodivosti materiálu formy, $a = \lambda / (c \cdot \rho)$;

t - čas.

V příloze č. 2 je uvedena souvislost mezi $\text{erf} \left[x / 2 (a \cdot t)^{-1/2} \right]$ a omezenou plochou poloviny Gaussovy křivky a číselné hodnoty Gaussova integrálu chyb. V příloze č.3 je uvedena grafická závislost Gaussova integrálu chyb na jeho argumentu.

Argument funkce $\left[x / 2 (a \cdot t)^{-1/2} \right]$ lze zapsat: $\left[1/2 (a \cdot t / x^2)^{-1/2} \right]$. Vztah $(a \cdot t / x^2)$ představuje Fourierovo číslo. Argument funkce lze vyjádřit pomocí Fourierova kritéria: $(1/2 \cdot Fo^{-1/2})$.

Uvedený způsob výpočtu teplotního pole podle Gaussova integrálu chyb je vhodný pro izotropní materiál, kde je přenos tepla určen především tepelnou vodivostí materiálu a jeho tepelně-fyzikální vlastnosti se s teplotou nemění. Proto bude výhodnější a do jisté míry i přesnější pro výpočet teplotních polí kovových forem. Pro výpočet teplotních polí pískových forem je použití Gaussova integrálu chyb méně přesné, neboť se přestup tepla uskutečňuje, jak již bylo uvedeno - nejen vedením, ale také prouděním a sáláním. I přes tento poznatek, HAVLÍČEK [4] počítá, pravděpodobně orientačně, teplotní pole pískové formy podle Gaussova integrálu chyb.

V této souvislosti je nutno upozornit, že i když práce LYKOVA a VEJNIKA jsou téměř ze stejného období, neřeší VEJNIK tepelné poměry v odlitku a pískové slévárenské formě na základě složitých přenosových procesů, jak jsou uvedeny v kapitole 2.2.1, ale pro sledování teplotních polí ve stěně pískové formy vypracoval VEJNIK [25] a ANISOVIČ [1] metodu, podle níž je křivka představující teplotní pole ve stěně slévárenské formy vyjádřena jednodušší, např. parabolickou závislostí (teplotní křivka je nahrazena parabolou

n - tého stupně). Z tohoto nahrazení vychází VEJNIKOVA metoda při stanovení součinitele tepelné akumulace formy (b_F), jak je uvedeno v kapitole 2.4.1.

Na základě parabolické závislosti lze vyjádřit souvislost mezi teplotami ve stěně slévárenské formy a parabolou n - tého stupně: $[(T_{(x)} - T_F) / (T_{PR} - T_F)] = [1 - (x_i/X_2)]^n$. Z této závislosti lze v libovolném místě prohřáté stěny formy stanovit teplotu $T_{(x)}$, která je vyjádřena vztahem:

$$T_{(x)} = (T_{PR} - T_F) \cdot [1 - (x_i/X_2)]^n + T_F, \quad (2.11)$$

kde značí: T_F - počáteční teplotu formy;

T_{PR} - teplotu rozhraní mezi odlitkem a formou;

n - stupeň paraboly;

x_i - vzdálenost libovolného místa formy od líce;

X_2 - prohřátá vrstva pískové formy v určitém časovém okamžiku, resp. v okamžiku ztuhnutí odlitku.

Výpočet teplotního pole formy podle rovnice (2.10) je mimo jiné závislý na znalosti teplotní vodivosti jejího materiálu.

Výpočet teplotního pole podle rovnice (2.11) je náročný na znalost stupně paraboly n a hodnoty X. Obě tyto hodnoty lze zjistit na základě experimentálního měření. Hodnoty teploty povrchu rozhraní T_{PR} lze vypočítat u pískové formy na základě poznatků ANISOVIČE [1] $T_{PR} = 0,97 \cdot T_{KR}$. Výchozí teplotu formy (T_F) lze zjistit měřením.

2.2.2.1 Řešení teplotního pole

Obecně je známo, že řešení teplotního pole, resp. řešení tepelných úloh lze provést: **numericky, analyticky, experimentálně**. Poměrně podrobně tyto metody charakterizuje KUNEŠ [16].

Metody analytické - umožňují získat řešení ve tvaru matematického výrazu pro teplotu jako funkci prostorových souřadnic a času. Mezi klasické analytické metody patří:

a) separace proměnných (Fourierova metoda);

b) metoda Greenových funkcí;

c) metoda tepelných potenciálů.

Existuje celá řada dalších analytických metod (metody integrálních transformací, metody variační, metody algebro-logistické atd.).

Pro řešení technických tepelných úloh mají analytické metody omezené použití, neboť je lze dobře použít jen při řešení jednorozměrných úloh s jednoduchými podmínkami řešení.

Metody numerické - využívají matematický popis na základě zvolených numerických metod s použitím počítačů. Numerické metody umožňují získat řešení tepelné úlohy v konečném počtu diskrétních míst (uzlů) zvolené diferenční sítě nebo sítě určitých prostorových obrazců. Tím lze získat výsledek výpočtu v krátké době i s dodatečnou přesností. Pro numerický výpočet je třeba převést základní diferenciální rovnici (popisující danou problematiku) na diferenční rovnici a základní řídicí rovnice musí být ve tvaru matice. Pak další zpracování umožňuje již některá z numerických metod:

1) metoda konečných prvků MKP (FEM);

2) metoda konečných diferencí (metoda sítí);

3) metoda okrajových prvků (metoda okrajových integrálních rovnic).

Metoda konečných prvků (MKP) se dnes velmi často používá při řešení složitých tepelných úloh, které jsou popsány parciální diferenciální rovnicí a lze je stanovit na počítači. Tato metoda vychází při řešení z jedné varianty *Ritzovy varianční metody*, jež je spojena s minimalizací funkcionálu. Spojitá oblast se rozdělí na konečné prvky vhodného tvaru (trojúhelníky, čtyřstěny atd.) vzájemně spolu svázané v uzlech. Bližší informace o matematickém rozpracování této metody podává KLEČKOVÁ [15] nebo KUNEŠ [16]. Metoda konečných prvků má proti metodě konečných diferencí řadu předností, jako je např. snadné vyjádření oblasti sledovaného materiálu složeného z anizotropního i izotropního prostředí, tvar a počet prvků lze přizpůsobovat požadavkům řešení, spolehlivost výsledků atd.. Obtíže nečiní ani vyjádření okrajových podmínek. K nevýhodám patří především vysoké nároky na kapacitu a rychlost počítače a na složitost výpočtového programu.

Metoda konečných diferencí (MKD) je založena na aproximaci základní diferenciální rovnice (jež popisuje sledovaný tepelný děj) s příslušnými okrajovými podmínkami odpovídajícími diferenční rovnici, jež má tvar soustavy algebraických rovnic. Aproximace je tím dokonalejší, čím přesnějším vyjádřením nahrazuje derivace. Náhrada se provádí v diskrétních místech tvořených uzly sítě pokrývajících zkoumanou oblast. Konečným výsledkem algebraických operací je určení teploty v daném uzlu. Nedostatek této metody lze spatřovat v získání méně přesných výsledků při řešení složitých tepelných úloh.

Metoda okrajových prvků (MOP) vychází z principu základního řešení okrajové úlohy, která odpovídá funkci zadané ve tvaru *Diracovy δ - funkce*. Pak se dají použít konečné prvky k aproximaci hranice oblasti a integrální rovnice pro vnitřní části sledované oblasti.

Zvláštnost metody okrajových prvků (metody hraničních prvků nebo-li metody povrchových prvků) od metody konečných prvků a metody konečných diferencí je v tom, že nevyžaduje diskretizaci a určování hodnot teploty v celé oblasti, ale jen v její okrajové části. To je dáno tím, že metoda využívá možnosti převedení tepelné úlohy na určitou integrální rovnici. Je výhodné řešit jednodušší trojrozměrné případy tepelných úloh MOP proti MKP, neboť MKP je pro tyto úlohy málo efektivní.

2.3 Základní charakteristika pískových formovacích směsí

Jak je obecně známo, formovací směsi, resp. pískové formovací směsi, se skládají ze dvou základních komponent: **ostřiva** a **pojiva**, dále může formovací směs obsahovat **vodu** a **přísady**.

Ostřivo - zrnitý žáruvzdorný materiál, je nosnou částí směsi, tvoří až 98 hmot. % formovací směsi a jeho částice jsou větší než 0,02 mm. Nejrozšířenějším ostřivem je ostřivo křemenné (SiO_2), které je kyselé povahy.

Při použití ostřiva je nutno sledovat jeho granulometrickou skladbu (součtovou křivku) dle které hodnotíme d_{50} (střední velikost zrna) d_{25} , d_{75} , resp. stupeň stejnoměrnosti s ($s = d_{75} / d_{25}$). Granulometrická skladba zrn ostřiva je výhodná od 0,1 do 0,5 mm se střední velikostí zrn $d_{50} = 0,15$ až 0,30 mm. Dále je nutno sledovat chemickou čistotu, náchylnost na spékání a tvar zrn.

Vedle dostupnosti, mají křemenná ostřiva tyto nevýhody: vysoká reaktivnost

za vysokých teplot s oxidy železa a jiných kovů (důsledkem jsou vady odlitků - připečeniny chemického charakteru), neplynulá tepelná dilatace v důsledku modifikačních přeměn (při teplotě 573°C se mění β - křemen na α - křemen, což je doprovázeno zvětšením objemu), usazování jemných částic křemene v plicích způsobuje nemoc - silikózu. Problematiku ostřív charakterizuje JELÍNEK [9].

Pojivo - látka nebo směs látek organického nebo anorganického původu, které dávají formovací směsi potřebné vlastnosti: vaznost - plasticitu (pevnost syrové směsi v tlaku), pevnost po vysušení (vypálení) nebo vytvrzení chemickou cestou, pevnost při vysokých teplotách (poddajnost a odpor forem nebo jader při smršťování odlitku) a pevnost po odlití, která určuje rozpadavost (zbytkovou pevnost).

Dnes se ve slévárenství používá celá řada pojiv, která mají nejrozličnější obchodní názvy a podle jejich charakteru se dělí na generace. Dělíme pojivové systémy, resp. formovací směsi, do čtyř generací:

Směsi I. generace - směsi s jílovými pojivy - pojení se provádí mechanicky (zhušťováním směsi ve formovacím rámu), kdy pojení je výsledkem sil kapilárního tlaku a van der Waalsových sil.

Směsi II. generace - směsi s anorganickými pojivy (např. vodním sklem), směsi s organickými pojivy (umělé pryskyřice, sacharidy, oleje) - využívají chemickou podstatu pojení.

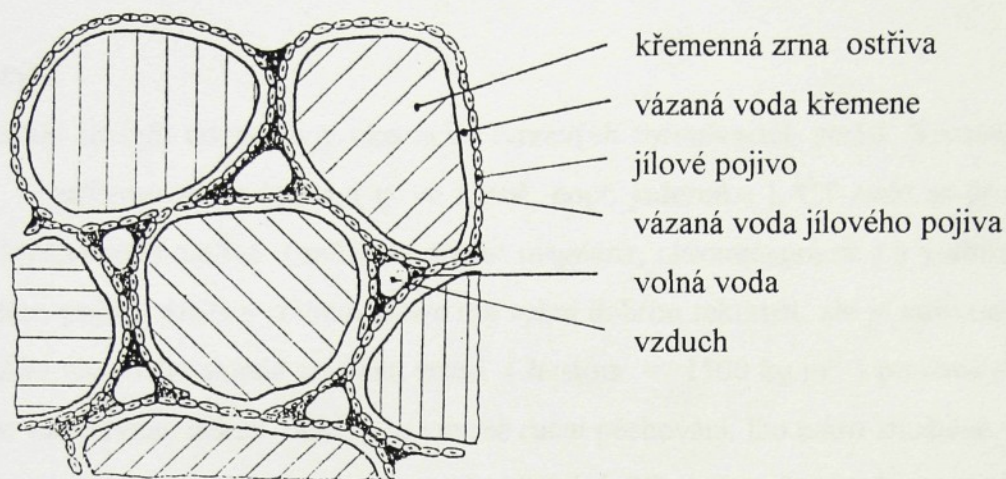
Směsi III generace - využívají fyzikálních účinků pojení (magnetické pole, vakuum, zmrazování).

Směsi IV. generace - skupina výhledových formovacích směsí, kdy by měly být z ekologického hlediska k pojení využity biologické pochody.

Voda - působí jako plastifikátor v pískových směsích. Podle množství vody, jak je obecně známo, rozlišujeme směsi: bezvodé, polosuché (do 3 % vody), na syrovo (do 5 % vody), na přisušení (do cca 7 % vody), na sušení (nad 7 % vody). Dále je důležitou součástí při přípravě anorganických pojiv (vodní sklo, sádra, cement).

Příspěvky - látky, které zlepšují vlastnosti formovacích směsí (rozpadavost, prodyšnost, odolnost proti penetraci taveniny atd). Pro přípravu směsí pro odlévání litiny je důležitou přísadou kamenouhelná moučka (letek), která zlepšuje povrchovou kvalitu odlitků.

Z uvedeného je zřejmé, že písková forma představuje složitý systém, jehož schéma je na obr. 2 - 1.



Obr. 2 - 1 Schéma ideální stavby formovací směsi s křemenným ostřivem a jílovým pojivem

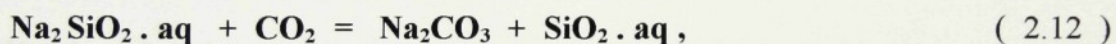
2.3.1 Bentonitové směsi

Bentonitové formovací směsi se nejčastěji používají v našich slévárnách pro výrobu litinových odlitků do hmotnosti 150 kg, méně pro odlitky do 500 kg. Základním představitelem jsou směsi pojené bentonitem, který se vyznačuje velkou vazností a umožňuje pracovat s menší vlhkostí. Bentonit patří do skupiny jílových pojiv, vznikl zvětráváním sopečných hornin (čediče, dinasu a hlavně sopečného popela). Bentonit je na omak mastný; pro svou dobrou plastičnost a absorpční schopnost vody obzvláště v natrifikovaném stavu je časté jeho uplatnění ve slévárenské výrobě netrvalých forem. Bentonit se používá pro přípravu syntetických formovacích směsí. Zde je důležité pravidelné rozptýlení částic bentonitu kolem zrn ostřiva. K této přípravě se používá kolových míšičů. Složky se dávkuje v pořadí ostřivo, práškové komponenty, popř. tekuté komponenty. Bentonit s kamenouhelnou moučkou lze přidávat v břečce s vodou. Omezujícím činitelem je množství vody. To se nejčastěji dává do směsi prostřednictvím břečky. Břečka se připravuje při tomto optimálním složení: 28 hmot. dílů bentonitu, 20 hmotnostních dílů černouhelné moučky, 52 hmot. dílů vody. Na zlepšení tekutosti břečky se používají např. smáčedla cca 0,1 hmot. dílu atd..

Na vlastnosti bentonitových směsí má vliv teplota ostřiva. Je-li teplota ostřiva nad 40° C, formovací směs nadměrně osychá a je lepivá, vykazuje zvýšený sklon k zálupům. U těchto směsí je velmi důležitá prodyšnost. Optimální prodyšnost je cca 300 [n.j.p.], při obsahu vody 4,5 % , tomu odpovídá vaznost 65 [kPa] RUSÍN [20].

2.3.2 CT směsi

CT směs se řadí do skupiny chemicky tvrzených formovacích směsí. Tvrzení směsi probíhá až v zaformovaném útvaru (tj. ve formě, popř. jaderníku). CT směs se připravuje nejčastěji z křemenného ostřiva (může se použít magnezit, chrommagnezit) a vodního skla, které má funkci pojiva. Směs s vodním sklem má velmi dobrou tekutost, ale je nevazná, proto se pro dosažení vhodného stupně zhuštění směsi (hustota = 1500 kg.m⁻³) používá střešení, foukání nebo vstřelování, někdy postačuje i mírné ruční pýchování. Do takto zhuštěné směsi v rámu nebo v jaderníku se přivádí plynný oxid uhličitý (CO₂), který působí na vodní sklo (Na₂SiO₂ . aq) a probíhá chemická reakce:



Při této reakci vzniká hydratovaný oxid křemičitý, který je pak vlastním pevným pojivem jednotlivých zrn ostřiva ve vytvrzené formovací (nebo jádrové) směsi. Tento způsob výroby forem a jader je také nazýván CO₂ - procesem. Jde v podstatě o technologii, kterou lze připravovat formy pro výrobu odlitků od několika kg do několika desítek tun, jak pro kusovou, tak sériovou výrobu. Tato metoda je určena pro odlévání slitin s vyšší teplotou tavení. Nepříznivou vlastností těchto forem a jader je velmi špatná rozpadavost.

Pro výrobu CT směsí pro odlévání litiny se nejčastěji používají křemenné písky Šajdíkovy Humence (d₅₀ = 0,27 mm), dále sodné vodní sklo (je roztok křemičitanu sodného NaO₂ . SiO₂ . n H₂ O) s modulem 3 až 3,2 o hustotě 36 až 38° Bé. Obsah a kvalita vodního skla má vliv na zbytkovou pevnost formovací směsi (tj. pevnost po odlití), ale také na případný vznik trhlin v odlitku i na vytloukání jader. Do směsi se přidávají i nejrůznější přísady jako např. dextrin, který způsobuje dodatečné zpevnění jádra nebo uhlikaté přísady, které napomáhají rozpadavosti směsi. Nejvhodnější pro přípravu CT směsí jsou kolové mísiče. Při mísení směsi se musí dodržet určitý postup, nejdříve se míchá křemenný písek

s práškovými přísadami a dextrinem, pak se přidává voda podle použitého vodního skla a nakonec vodní sklo. Obsah vodního skla ve směsi bývá cca 4,5 hmot. %. Oxidu uhličitého se v provozních podmínkách k vytvrzení formovací (jádrové) směsi používá cca 3 až 5 hmot. %.

Poznámka: HAVLÍČEK, F., JELÍNEK, P., Čs. patent č. 1094440, navrhli metodu k zastavení přívodu CO_2 do směsi.

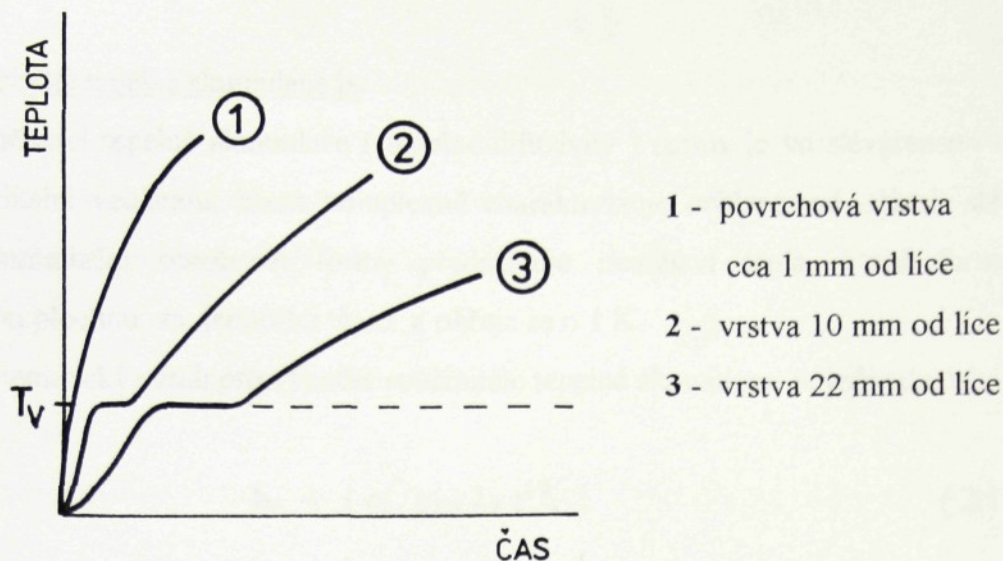
Modelová zařízení i zařízení pro výrobu jader musí obsahovat konstrukční úpravy i prvky, které dovolují profukování zhuštěné formovací (jádrové) směsi CO_2 .

Formy a jádra vyrobené touto metodou mají sklon k zapékání . Tomuto nepříznivému jevu lze zabránit přidáním přísad do směsi nebo použitím vhodných nátěrů forem a jader.

2.3.3 Kondenzační zóna

Vznik kondenzační zóny (převlhčené oblasti) v pískové slévárenské formě je založen na obecném fyzikálním ději, který nastává po naplnění formy taveninou kovu. Po nalití kovu do této formy obr. 2 - 2 se začnou prohřívat nejdříve její povrchové vrstvy při lici, jak je patrné z křivky 1, a teprve potom vzdálenější místa od líce podle křivky 2, 3. Teplota formy postupně stoupá až do teploty 100°C , při této teplotě se její vzrůst zastaví, neboť začne docházet k odpařování volné vody (prodleva při teplotě 100°C), která je ve formovací směsi vázána kapilárními a absorpčními silami. Teplo, které z tuhnoucí taveniny odvedla forma, se spotřebovalo na přeměnu vody v páru, proto teplota formy v místě přeměny nestoupá. Pokud dojde k vypaření vody v daném místě formy, tj. forma se v tomto místě vysuší, pak teplota může stoupat. Při lici formy, je v tenké vrstvě malý obsah vody a současně dochází k jejímu intenzivnímu vypařování, čímž na křivce 1 nevzniká prodleva. Ve vzdálenějších místech (tj. ve větší vrstvě) je více vody a prodleva na křivce se již projevuje (křivky 2, 3).

Provedeme-li v takovémto případě řez stěnou pískové formy pak lze charakterizovat následující vrstvy:



Obr. 2 - 2 Průběhy časových závislostí teplot v různých místech formy

a) povrchová vrstva - první vrstva, je vysušená (zbavená volné vody) a je prohřáta na vyšší teplotu než je teplota vypařování ($T_v = 100^\circ \text{C}$);

b) kondenzační zóna - druhá vrstva, která je převlhčená, obsahuje 2 až 2,5 krát více vody než je původní obsah vody ve formě;

c) přechodová vrstva - třetí vrstva, je to přechod z vysokého obsahu vody v kondenzační zóně do původního obsahu vody ve formě;

d) neovlivněná vrstva - čtvrtá vrstva, charakterizuje doposud neprohřátou stěnu formy od tuhnutí odlitku; tato vrstva si uchovává původní obsah vody.

2.4 Tepelně-fyzikální veličiny slévárenských forem

Tepelně-fyzikální veličiny slévárenské formy jsou důležité veličiny, které přispívají k průběhu tepelných dějů mezi odlitkem a slévárenskou formou. K těmto veličinám se řadí:

a) součinitel tepelné akumulace formy (b_F);

b) součinitel teplotní vodivosti formy (a_F);

tyto veličiny byly odvozeny z teorie přestupu tepla mezi odlitkem a formou;

c) součinitel tepelné vodivosti (λ_F);

d) měrná tepelná kapacita (c_F);

obě tyto veličiny se řadí k základním materiálovým hodnotám.

2.4.1 Součinitel tepelné akumulace b_F

Součinitel tepelné akumulace (tepelné difuzivity) formy je ve slévárenství důležitou tepelně-fyzikální veličinou, která komplexně charakterizuje ochlazovací účinek slévárenské formy. Akumulační schopnost formy představuje množství tepla, které forma pohltí jednotkovou plochou za jednotku času a ohřeje se o 1 K.

Matematický vztah pro výpočet součinitele tepelné akumulace je jednoduchý:

$$b_F = (c_F \cdot \rho_F \cdot \lambda_F)^{1/2}, \quad (2.13)$$

kde značí: c_F - měrnou tepelnou kapacitu materiálu formy;

ρ_F - hustotu materiálu formy;

λ_F - součinitel tepelné vodivosti materiálu formy.

Stanovení b_F pro konkrétní soustavu odlitek - forma je dosti složitý. Tato složitost vyplývá zejména z vlivu teploty na jednotlivé fyzikální veličiny, a dále dochází k rychlým změnám teplotního pole odlitku i formy v rozmezí teplot od T_F (výchozí teplota formy) do T_{PR} (teplota rozhraní odlitek - forma).

Také je třeba upozornit na nesprávnou záměnu akumulační schopnosti formovací směsi a akumulační schopnosti slévárenské formy. Má-li součinitel tepelné akumulace formovací směsi být totožný se součinitelem tepelné akumulace formy, pak musí být tloušťka vrstvy směsi (x_s) větší než tloušťka prohřáté vrstvy formy (X_2), přičemž $X_2 \geq 2M$ (M -modul odlitku).

Tento součinitel má pro posouzení tepelných účinků forem a formovacích směsí velký význam, a proto mu celá řada autorů věnovala značnou pozornost: HALBART, jak uvádí HAVLÍČEK [4], VEJNÍK [26], HALÍČEK [4], JELÍNEK [10], GEDEONOVÁ [3].

V příloze č.1 jsou uvedeny hodnoty tohoto součinitele pro formy z vybraných pískových formovacích směsí.

2.4.1.1 Metody stanovení b_F

Pro stanovení b_F konkrétní slévárenské formy při odlévání odlitků jednoduchých tvarů byla vypracována řada metod:

1. Výpočtem ze vztahu (2.13), který však nezahrnuje modul odlitku ani odléváný materiál popř. další podmínky;
2. Metody elektrické analogie i numerické metody jsou pro stanovení b_F dosti náročné.
3. Experimentální metody, které jsou bližší pro konkrétní řešení slévárenské problematiky a lze je rozdělit:

a) metoda měření teplotního pole v odlitku a ve stěně slévárenské formy v okamžiku ztuhnutí odlitku;

b) metoda odlévání, která je založena na sledování doby tuhnutí odlitku určitého tvaru a velikosti ve slévárenské formě.

Poznámka: *Fyzikální smysl akumulční schopnosti materiálu lze vysvětlit na základě jeho ohmatávání. Položíme-li ruku na materiál, který má teplotu cca 20 °C, pak hmatem pocít'ujeme chladnější ten předmět, který má větší akumulční schopnost.*

2.4.1.2 Metoda měření teplotních polí

Tuto metodu rozpracoval a experimentálně ověřil VEJNIK [25] a použil ji při sledování tepelně-fyzikálních veličin pískové formy, především součinitele tepelné akumulace (b_F). Metoda je založena na experimentálním stanovení rozložení teplot (teplotního pole) ve stěně slévárenské formy v okamžiku ztuhnutí odlitku a v nahrazení tohoto pole (průběhu teplot) parabolou n - tého řádu, popř. sinusoidou. Schéma rozložení a nahrazení teplot parabolou n - tého řádu je uvedeno v příloze č.10. Parabola má vrchol v bodě [X_2, T_F], prochází měřeným bodem [x_i, T_i] a bodem [$0, T_{KR}$]. Na základě geometrické podobnosti lze vyjádřit souvislost mezi teplotami ve stěně slévárenské formy a parabolou n - tého stupně.

Lze psát: $[(T_{(x)} - T_F) / (T_{PR} - T_F)] = [1 - (x_i / X_2)]^n$. Uvedenou metodu rozpracoval pro odlitek tvaru válce EXNER [2]. V příloze č. 11 jsou uvedeny vztahy pro výpočet tepelně - fyzikálních veličin, které jsou odvozené na základě Vejnikovy metody.

2.4.2 Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita je mírou tepelné jímavosti látky vztažené na jednotku hmotnosti (je množství tepla potřebné k ohřevu 1 kg látky, aby se zvýšila její teplota o 1 °C).

S teplotou měrná tepelná kapacita roste u všech látek. Tato závislost je dána vztahem:

$$c = A + BT + CT^2, \quad (2.14)$$

kde značí: A, B, C - konstanty, jež se určují z empiricky stanoveného průběhu měrné tepelné kapacity.

Měrná tepelná kapacita suché pískové formovací směsi činí $1050 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ a vlhké formovací směsi (6 % vody) $1430 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [21]. V příloze č. 5 jsou uvedeny hodnoty měrné tepelné kapacity různých formovacích směsí. Hodnoty měrné tepelné kapacity se u sypkých hmot též mírně mění s teplotou. Křemenné ostřívo má při teplotě $300 \text{ }^\circ\text{C}$ měrnou tepelnou kapacitu cca $1005 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, teplotě $600 \text{ }^\circ\text{C}$ odpovídá hodnota $1047 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ a při teplotě $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ činí $1214 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Měrná tepelná kapacita formovacích směsí také roste s jejich vlhkostí [4]. Tyto hodnoty jsou uvedeny v příloze č. 4 pro blíže nedefinovanou pískovou formovací směs.

Současně je třeba uvést, že literárně uváděné hodnoty měrné tepelné kapacity formovacích směsí se značně od sebe liší. Např. CHVORINOV [8] uvádí pro suchou pískovou formovací směs $1050 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ a pro chemicky pojenou formovací směs $1060 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. RUSÍN [21] uvádí pro pískovou formovací směs $1300 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ a pro chemicky pojenou formovací směs $1400 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

2.4.3 Tepelná vodivost

Součinitel tepelné vodivosti je důležitou tepelně-fyzikální veličinou při výpočtech tepelných procesů v odlitku i slévarenské formě. Je veličinou potřebnou při charakterizování stacionárních dějů (představuje množství tepla, které proteče jednotkou délky za jednotku času daným materiálem a způsobí rozdíl teploty 1 K).

Pro většinu látek platí, že se součinitel tepelné vodivosti mění mírně při nízkých teplotách dle lineární závislosti. Nejmenší tepelnou vodivost vykazují plyny $0,05$ až $0,58 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, u izolačních materiálů je tepelná vodivost $0,02$ až $2,7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Nejvyšší tepelnou vodivost mají kovy (např. litina s lupínkovým grafitem $42 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, čistý hliník $213 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

Pokud se jedná o tepelnou vodivost pískových formovacích směsí, resp. pískových forem, její stanovení je složitější, neboť jak již bylo uvedeno, se jedná o disperzní systém (heterogenní pórovitou hmotu). Tepelná vodivost formovacích směsí závisí na tepelné vodivosti vlastního ostřiva, vzduchu a plynů v dutinách mezi zrny. Z tohoto důvodu je tepelná vodivost formovací směsi závislá na zrnitosti, druhu ostřiva, hustotě spěchování a na teplotě. Tepelná vodivost má vliv na prostup tepla formovací směsí v počátečním stádiu ohřevu formy, tj. cca do teploty 200 °C (někteří autoři jako např. RUSÍN [21], uvádí do teploty 300 °C).

U suché pískové formovací hmoty se předpokládá šíření tepla vedením od zrna k zrnu a částečně sáláním mezi pískovými zrny. Součinitel tepelné vodivosti suchého písku činí cca 0,38 W. m⁻¹. K⁻¹. Součinitel tepelné vodivosti vlhkého písku je vyšší, činí 0,59 W. m⁻¹. K⁻¹. K vyšší hodnotě součinitele tepelné vodivosti přispívá nejen ostřivo ale také voda, která vyplňuje mezery ve formovací směsi. Při teplotě nad 100 °C, kdy dochází k odpaření vody, nemá vlhkost formovací směsi vliv na zvyšování součinitele tepelné vodivosti [21].

Jak uvádí RUSÍN [21], KONDRATĚJEV, který se zabýval výzkumem písků stanovil pro suché písky pro rozsah teplot 0 až 600 °C vztah pro určení tepelné vodivosti:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot (1 + \beta T), \quad (2.15)$$

kde značí: λ_0 - tepelnou vodivost při teplotě 0 °C;
 β - součinitel závislý na jemnosti ostřiva.

HAVLÍČEK [4] udává vztah pro určení součinitele tepelné vodivosti, který vychází z tepelné vodivosti disperzních materiálů. Tepelná vodivost disperzních materiálů je určena pórovitostí (ta souvisí s hustotou) a rozměry pórů. Čím je vyšší hustota tím je vyšší jejich tepelná vodivost. Součinitel tepelné vodivosti pískové formy lze vyjádřit:

$$\lambda = \lambda_s (1,17 - \rho_v/\rho_s) \cdot (\lambda_s - \lambda_v), \quad (2.16)$$

kde značí: λ_s - tepelnou vodivost pevného skeletu (ostřiva);
 λ_v - tepelnou vodivost vzduchu nebo plynu obsaženého v pórech mezi zrny;

ρ_s - hustotu pevného skeletu (ostrřiva);

ρ_v - hustotu formovací směsi.

V příloze č. 7 jsou uvedeny závislosti součinitele tepelné vodivosti formovací směsi na vlhkosti a závislost tepelné vodivosti formovací směsi na teplotě a velikosti zrn ostrřiva. Z obrázku je zřejmé, že z počátku tato závislost klesá a potom roste. Při nižších teplotách, zvětšení velikosti pórů přispívá k poklesu součinitele tepelné vodivosti. Avšak při teplotě 540 °C, jak uvádí HAVLÍČEK [4], zvětšení pórů součinitel tepelné vodivosti zvyšuje o 10 % a při teplotě 1100 °C o 14 %. Z toho vyplývá, že ke zvyšování tepelné vodivosti při vysokých teplotách přispívá přestup tepla radiací.

Tepelná vodivost skeletu ostrřiva je přímo úměrná součiniteli tepelné vodivosti jednotlivých zrn ostrřiva. Teplo se sdílí od jednoho zrna ostrřiva k druhému přes dotykové plochy. Přenos tepla přes dotykovou plochu ostrřiva je však nižší než při vedení tepla kompaktní hmotou (dotykové plochy způsobují určitý tepelný odpor). Tak např. krystalický křemen (SiO_2) má hustotu 2500 kg.m^{-3} a součinitel tepelné vodivosti 7,2 $\text{W. m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Křemenné ostrřivo o hustotě 1500 kg.m^{-3} vykazuje součinitel tepelné vodivosti 0,33 $\text{W. m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (to je 22 krát méně než je součinitel tepelné vodivosti základního materiálu).

Jak uvádí JELÍNEK [9], BOGOMOLOV odvodil závislost součinitele tepelné vodivosti na pórovitosti materiálu:

$$\lambda = 3 \cdot \pi \cdot \lambda_{vz} \cdot \ln [(43 + 0,31 m) / (m - 26)], \quad (2.17)$$

kde značí: λ_{vz} - tepelnou vodivost vzduchu;

m - pórovitost materiálu.

V příloze č. 6 je uvedena závislost součinitele tepelné vodivosti na pórovitosti směsi dle experimentálního měření a teoreticky odvozená JELÍNEK [9]. S jemností ostrřiva ve směsi roste pórovitost směsi a tím klesá hodnota součinitele tepelné vodivosti.

Jak uvádí JELÍNEK [9], při ohřevu pórovitých materiálů jejich součinitel tepelné vodivosti nejčastěji s teplotou roste. Tento růst lze považovat za lineární a lze jej zapsat:

$\lambda = A \pm BT$ (A, B jsou konstanty; T - teplota). Záporné znaménko platí pro případ, kdy součinitel tepelné vodivosti materiálu s teplotou klesá (např. u magnezitu, grafitu).

Pojivo (jíly, vodní sklo, atd.), další přísady formovací směsi (např. voda, kamenouhelná moučka, atd.) zvyšují dotykovou plochu mezi zrny, čímž se podílejí na zvýšení součinitele tepelné vodivosti. Velký význam na vzrůstu součinitele tepelné vodivosti má volná voda. Bylo zjištěno [4], že přidáním 10 % vody ke křemennému ostřivu se zvýší jeho součinitel tepelné vodivosti z hodnoty 0,33 na 1,13 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$, což je asi 3,5 krát více. Též přidáním jílu do formovací směsi se zvýší její součinitel tepelné vodivosti asi 3 krát.

Nepatrně, téměř zanedbatelně ke zvýšení součinitele tepelné vodivosti formovací směsi přispívají plyny a vzduch v pórech. Součinitel tepelné vodivosti vzduchu činí jen 0,033 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$.

EXNER [2] na základě Vejniovky metody měření teplotních polí v odlitku a ve formě odvodil vztah pro stanovení tepelné vodivosti slévárenské formy pro odlitek tvaru válce, který je uveden v příloze č. 9.

2.4.4 Teplotní vodivost

Teplotní vodivost je důležitou tepelně-fyzikální veličinou při průběhu nestacionárních dějů. Význam teplotní vodivosti je stejný jako význam tepelné vodivosti při ustálených dějích. Rychlost tepelných dějů v tělese je přímo úměrná jeho tepelné vodivosti (λ) a nepřímo úměrná objemové tepelné kapacitě ($c \cdot \rho$):

$$a = \lambda / c \cdot \rho, \quad (2.18)$$

kde značí : λ - tepelnou vodivost;

c - měrnou tepelnou kapacitu;

ρ - hustotu.

Čím je vyšší teplotní vodivost látky, tím rychleji se v ní vyrovnávají teploty. V příloze č. 9 jsou uvedeny hodnoty teplotní vodivosti různých formovacích směsí.

Problematikou stanovení součinitele teplotní vodivosti různých formovacích směsí na teplotě se zabývala KLEČKOVÁ [14] a dospěla k závěru, že teplotní vodivost formovacích směsí se pohybuje pro rozsah teplot 100 až 1000 °C od $4,5 \cdot 10^{-7}$ do $9,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ a v příloze č. 9 jsou uvedeny teplotní závislosti tepelné vodivosti formovacích směsí: křemenný písek s vodním sklem; křemenný písek s bentonitem.

Též je v příloze č. 9 uveden vztah pro stanovení teplotní vodivosti pískových forem podle EXNERA [2].

2.5 Charakteristika litin

Litiny jsou heterogenní materiály na bázi Fe a C s obsahem Si, P, S, Mn a popř. dalších legujících prvků. Obsah C v litinách je teoreticky větší než 2,11%.

Litiny obecně dělíme na bílé a grafitické. Grafitické litiny mají velké průmyslové uplatnění. Dle tvaru vyloučeného grafitu je dělíme na LKG (litina s kuličkovým grafitem), LČG (litina s červíkovitým grafitem) a LLG (litina s lupínkovitým grafitem).

2.5.1 Litina s lupínkovým grafitem (LLG) a její krystalizace

U LLG bývá obsah C nad 3%, Si nad 1%, Mn v rozmezí (0,4 - 0,8)%, P 0,01% a S 0,08%.

Při výrobě LLG lze s ohledem na chemické složení hovořit o krystalizaci mírně podeutektické až eutektické litiny.

Krystalizace podeutektické litiny začíná vylučováním dendritických krystalů austenitu z taveniny. Dendrity během krystalizace rostou na úkor kapalné fáze, která se zároveň obohacuje uhlíkem. Jakmile dosáhne obsah C v kapalné fázi eutektické koncentrace, začne tavenina tuhnout jako eutektikum.

Při eutektické krystalizaci je vedoucí fází grafit. Jeho zárodky se tvoří buď na povrchu již přítomných krystalů austenitu nebo přímo v tavenině. Austenit společně se vzniklým grafitem tvoří t.zv. *eutektické buňky*, které mají poměrně rychlý růst.

Lupínky grafitu mají okraje v přímém kontaktu s taveninou a tak mají tendenci přednostně růst do délky. Protože je však každý lupínek grafitu od kapalné fáze izolován

krystaly austenitu (obklopují jej a ztěžují tak difúzi uhlíku z taveniny), je bržděn příčný růst lupínků. Grafit tak vytváří plošné útvary s malou výškou.

Průběh krystalizace eutektických a nadeutektických litin se příliš neliší. Není-li litina příliš přehřátá a ochlazování probíhá pomalu, vytváří se hrubé, málo rozvětvené lupínky grafitu. (Při větším přehřátí taveniny a rychlém ochlazování dochází k většímu podchlazení a vznikají tak drobné značně zohýbané lupínky grafitu.)

Zvětšení počtu zárodků a tím i počtu eutektických buněk lze ovlivnit přidáním vhodných přísad - *očkovačů*. Očkování se provádí za účelem jemnějšího vyloučení grafitu a tím menších vrubových účinků v matrici. Celkově dochází ke zlepšení mechanických vlastností a zmenšuje se přechlazení taveniny.

2.5.1.1 Křivka tuhnutí a chladnutí litin

Pomocí křivek chladnutí roztavených kovů je možno sledovat krystalizační pochody, resp. jejich teplotní a časovou závislost.

Znalosti časových průběhů ukončení krystalizace kovů ve slévárenské formě využili HALBART, jak uvádí HAVLÍČEK [4] a VEJNÍK [25] při stanovování tepelně-fyzikálních vlastností slévárenských forem.

Litina s lupínkovým grafitem, jejíž krystalizace je velmi složitá, je heterogenní materiál, při jehož tuhnutí dochází k důležitým procesům:

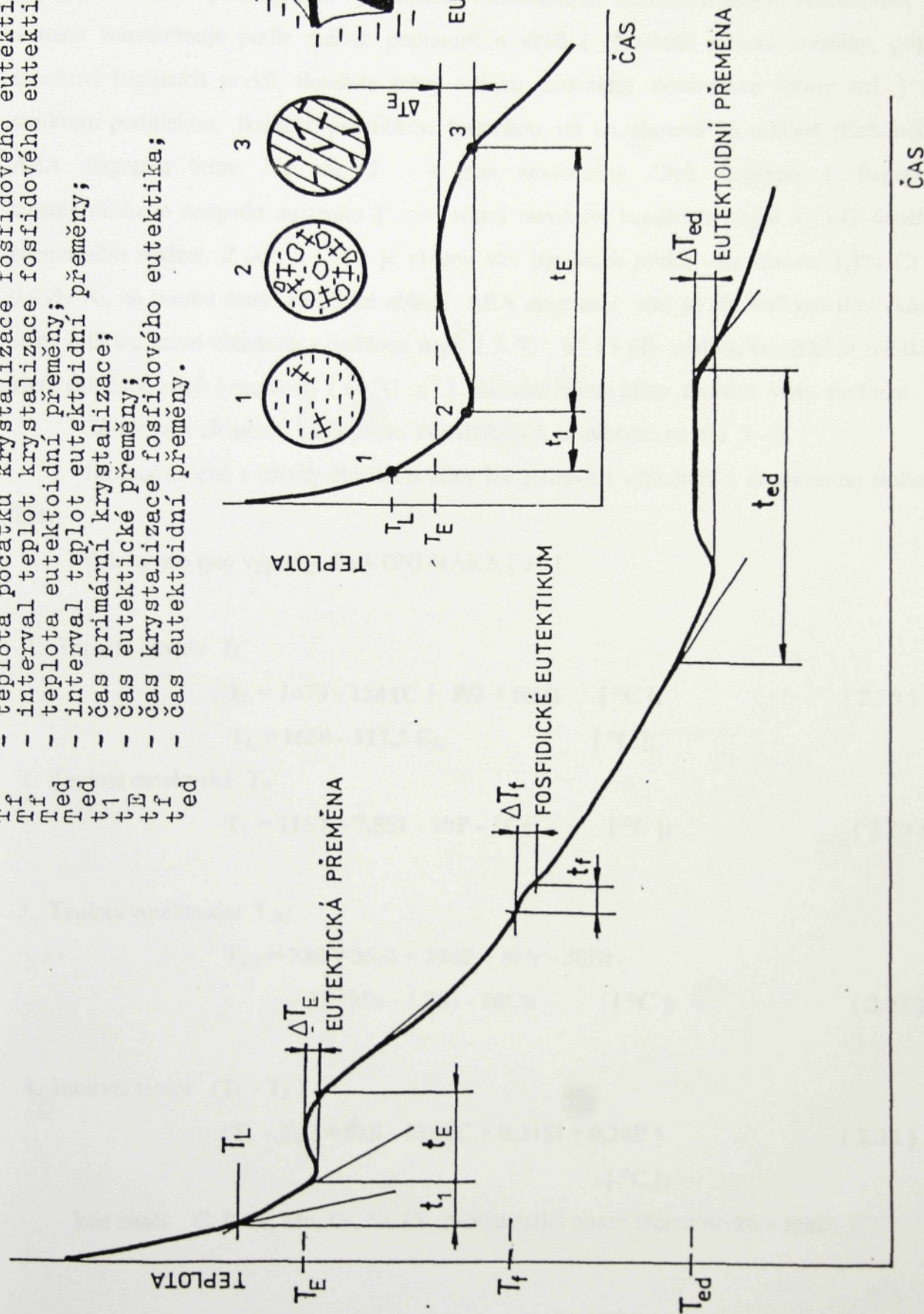
- a) primární krystalizace;
- b) eutektická přeměna (popř. krystalizace fosfidického eutektika);
- c) rozpad austenitu a eutektoidní přeměna.

Křivka tuhnutí a chladnutí litiny s lupínkovým grafitem podle ŘEZNÍČKA [30] je znázorněna na obr. 2 - 3.

Při tuhnutí je přeměna tekutého skupenství na tuhé doprovázena uvolňováním skupenského tepla tuhnutí. To se projevuje i na křivce chladnutí. Při určité teplotě (likvidu T_L) dochází ke změně rychlosti chladnutí (dochází k primární krystalizaci) a to vlivem vývinu tepla při tvorbě prvních krystalů tuhé fáze. Dále, dokud litina nedosáhne eutektickou teplotu, při které probíhá eutektická přeměna (resp. krystalizace eutektika), probíhá ochlazování poněkud menší rychlostí. Dochází tak k tuhnutí zbylé tekuté fáze a

T_E
 T_f
 T_f
 T_{ed}
 T_{ed}
 t_1
 t_E
 t_f
 t_{ed}

- interval teplot eutektické přeměny;
- teplota počátku krystalizace fosfidového eutektika;
- interval teplot krystalizace fosfidového eutektika;
- teplota eutektoidní přeměny;
- interval teplot eutektoidní přeměny;
- čas primární krystalizace;
- čas eutektické přeměny;
- čas krystalizace fosfidového eutektika;
- čas eutektoidní přeměny.



Obr. 2-3 Křivka tuhnutí a chlazení litiny s lupinkovým grafitem

k vývinu dalšího množství tepla při teplotě solidu T_s . Je-li krystalizace litiny ukončena, skládá se její struktura z lupínků grafitu vyloučených v austenitické hmotě. Při dalším ochlazování se austenit transformuje podle dalších podmínek a vlivů (chemické složení taveniny, popř. množství legujících prvků, tloušťka stěny odlitku, charakter slévárenské formy atd.) na strukturu perlitickou, feriticko-perlitickou, feritickou, jak lze stanovit na základě příslušného ARA diagramu litiny. Na obr. 2 - 4 jsou znázorněny ARA diagramy (diagramy anizotermického rozpadu austenitu) pro různá množství legujících prvků v LLG daného chemického složení. Z obr. 2 - 4 c je zřejmý vliv legujících prvků v kombinaci 1,1% Cr a 0,94% Ni, na tvorbu čistě perlitické oblasti ARA diagramu. Pak je při velkých tloušťkách stěny odlitku, které chladnou s rychlostí např. ($3\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$) i při malých tloušťkách odlitku, které chladnou např. s rychlostí ($60\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$) základní hmota litiny tvořena vždy perlitem.

Část křivky chladnutí LLG podle VONDRÁKA je uvedena na obr. 2 - 5.

Teploty určené z křivky chladnutí litiny lze stanovit i výpočtem z chemického složení litiny.

Vztahy pro tyto výpočty dle VONDRÁKA [31]:

1. Teplota likvidu T_L

$$T_L = 1670 - 124 (C + P/2 + Si/4) \quad [^{\circ}\text{C}]; \quad (2.19)$$

$$T_L = 1650 - 117,5 C_E \quad [^{\circ}\text{C}];$$

2. Teplota eutektická T_E

$$T_E = 1152 + 7,5Si - 30P - 2Cr \quad [^{\circ}\text{C}]; \quad (2.20)$$

3. Teplota eutektoidní T_{EU}

$$T_{EU} = 738 + 35Si + 200P + 8Cr - 30Ni - \\ - 35 (Mn - 1,7S) - 10Cu \quad [^{\circ}\text{C}]; \quad (2.21)$$

4. Interval teplot ($T_L - T_s$)

$$(T_L - T_s) = 518 - 124 (C + 0,31Si + 0,26P) \quad (2.22) \\ [^{\circ}\text{C}];$$

kde značí: C, P, Si, Mn, Cr, Ni, Cu procentuální obsah těchto prvků v litině.

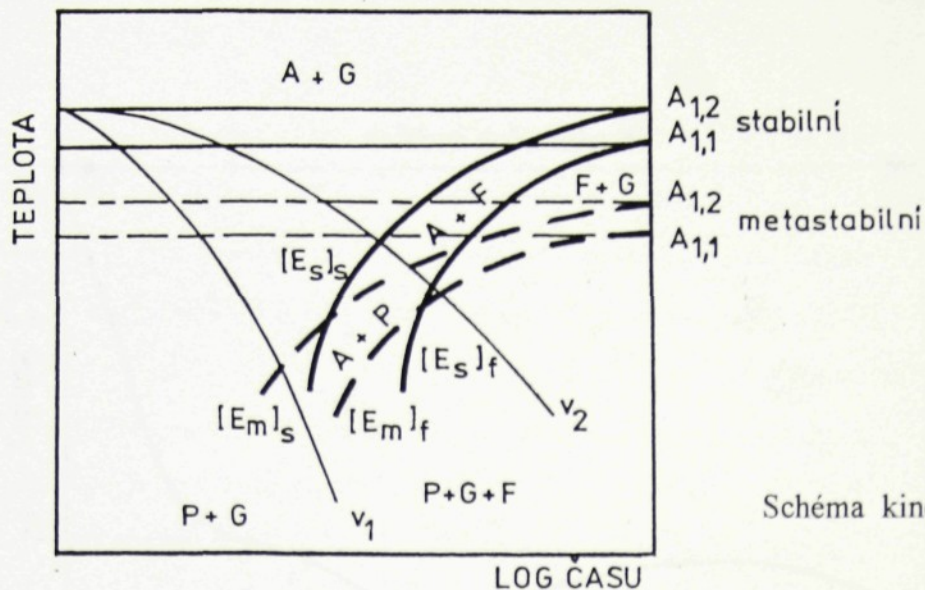
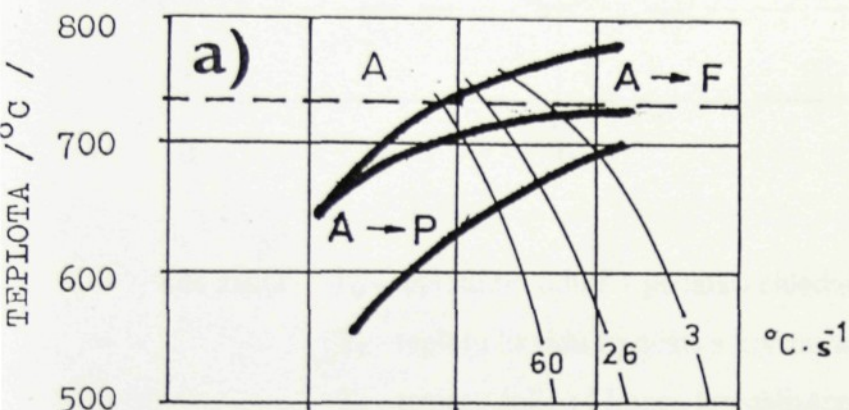
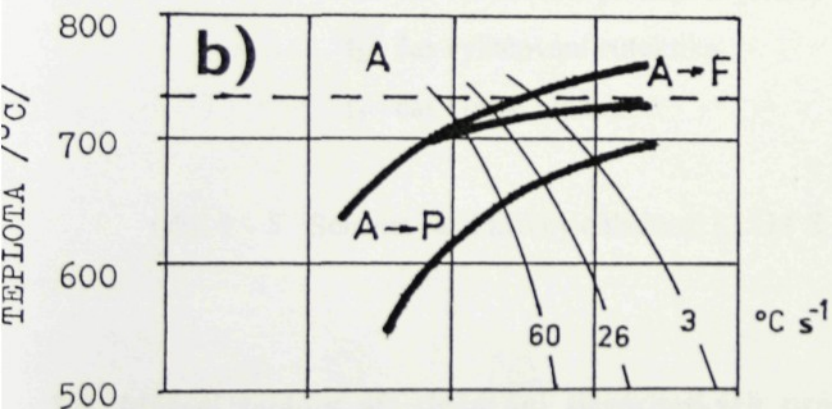


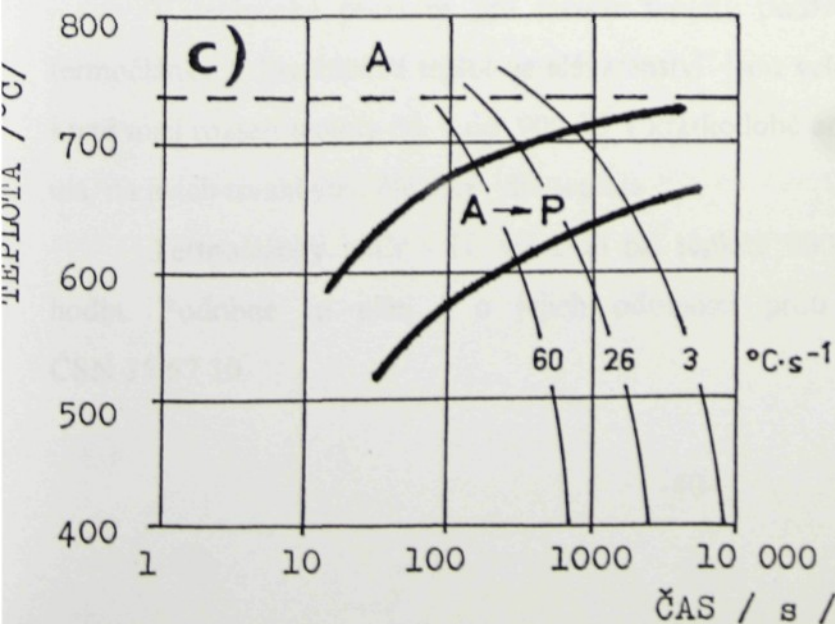
Schéma kinetických diagramů litin



LLG: C - 3,5 %
Si - 1,89 %
Mn - 0,46 %
P - 0,04 %
S - 0,037 %

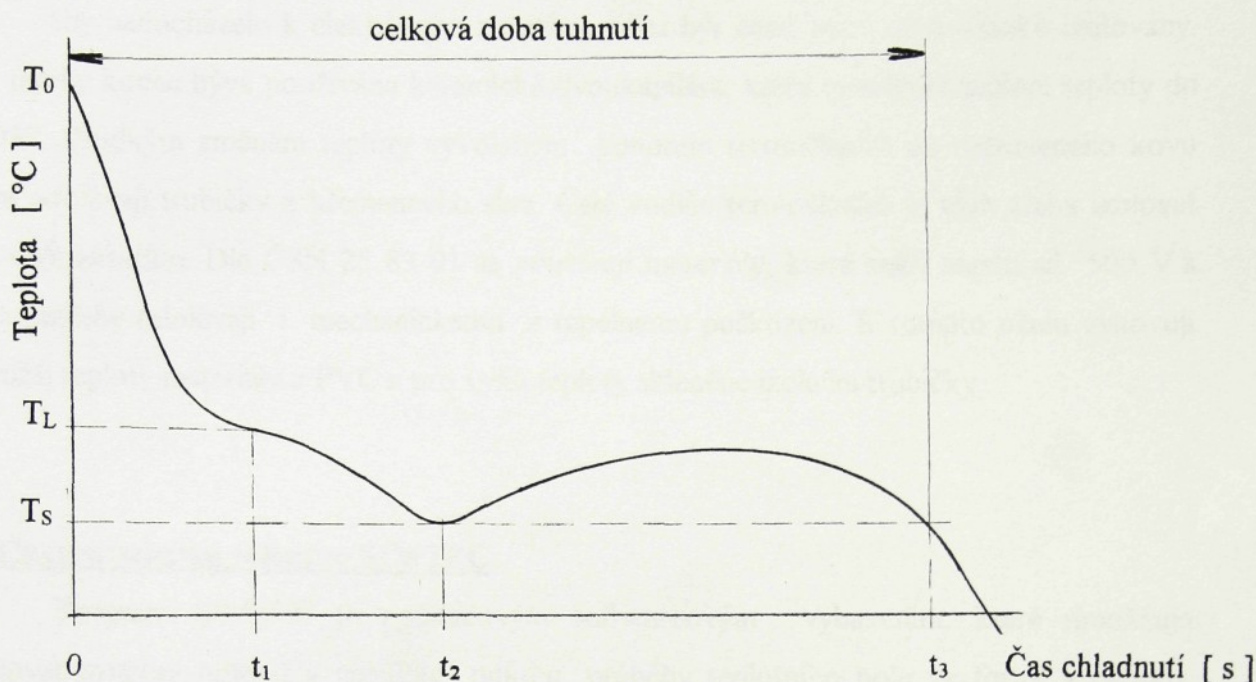


legováno:
Cr - 0,56 %



legováno:
Cr - 1,1 %
Ni - 0,94 %

Obr. 2 - 4
Diagramy ARA pro různá množství
legujících prvků v LLG



kde značí: T_0 - teplotu po odlití (počátku chladnutí),
 T_L - teplotu likvidu (počátku krystalizace),
 T_S - teplotu solidu (konce krystalizace),
 t_1 - čas vylučování prvních krystalů,
 t_2 - čas vylučování eutektika,
 t_3 - čas konce tuhnutí.

Obr. 2 - 5 Schéma části křivky chladnutí LLG ($S_c = 0,9$) podle VONDRÁKA [31]

2.6 Měření teploty při sledování slévárenských procesů

V technické praxi se pro měření teploty používají termoelektrické články (dále termočlánky). Pro měření teplot ve slévárenství jsou velmi vhodné termočlánky NiCr - Ni, které mají rozsah teploty od 0 do $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ (krátkodobě odolávají $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$). Při jejich použití má na jejich trvanlivost důležitý vliv teplota.

Termočlánky NiCr - Ni vykazují při teplotě $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ spolehlivou použitelnost 1000 hodin. Podobně to platí i o jejich odolnosti proti oxidaci. Bližší informace uvádí ČSN 35 67 10.

Aby nedocházelo k elektrickým zkratům, musí být části větví termočlánků izolovány. Pro měrný konec bývá používána keramická dvoukapilára, která umožňuje měření teploty do 1600°C. Prudkým změnám teploty vyvolaným ponorem termočlánků do roztaveného kovu dobře odolávají trubičky z křemenného skla. Celé vodiče termočlánků je však třeba izolovat také vůči zkratům. Dle ČSN 25 83 01 se používají materiály, které snášejí napětí až 500 V a podle potřeby odolávají i mechanickému a tepelnému poškození. K tomuto účelu vyhovují pro nižší teploty materiály z PVC a pro vyšší teploty skleněné izolační trubičky.

2.7 Charakteristika software SIMTEC

Program SIMTEC je počítačovým softwareovým vybavením, které umožňuje simulovat procesy tuhnutí a chladnutí odlitku, průběhy teplotního pole ve formě i odlitku, napěťové pole a průběh stažení a deformací odlitku. Program pro svou činnost využívá vstupní data, která sestávají jak z hodnot termofyzikálních veličin charakterizujících příslušný slévárenský proces, tak i z dat specifikujících teplovodné vlastnosti všech materiálů sledované soustavy.

Program SIMTEC umožňuje pracovat ve 2D i ve 3D prostoru. Ve výpočtech se využívá metody konečných prvků. Jednotlivé moduly, ze kterých je systém SIMTEC sestaven, jsou tvořeny samostatnými programy na manipulaci se vstupními daty, realizaci vlastních výpočtů a zobrazování výsledků.

Program je díky široké paletě dat ve vestavěné databázi možno používat pro simulaci mnoha licích postupů. Systém je vhodný nejen pro sledování procesů při různých způsobech lití do pískových, kovových a skořepinových forem, ale i pro sledování tepelných procesů při tepelném zpracování již ztuhlých odlitků. Knihovna databáze obsahuje pro realizaci simulace potřebná tepelně-fyzikální data všech v současné době průmyslově používaných materiálů, které vstupují do procesu výroby a zpracování odlitků jak na straně odlitku, tak na straně formy.

Simulační program SIMTEC používá Fourierovu diferenciální rovnici, kterou pokládá rovnou hodnotě hledaného funkcionálu $F(T)$, který je závislý na teplotě.

Lze psát:

$$F(T) = \iiint_V \{ \lambda/2 \cdot [(\partial T/\partial x)^2 + (\partial T/\partial y)^2 + (\partial T/\partial z)^2] + \rho \cdot c_p \cdot T \cdot \partial T/\partial t - Q^\circ \cdot T \} \cdot dx \cdot dy \cdot dz + \iint_R \{ 1/2 \cdot \alpha(u,v) \cdot T^2 - \chi(u,v) \cdot T \} \cdot du \cdot dv, \quad (2.23)$$

kde značí: V - objem tělesa [m³];

R - povrch tělesa [m²];

u, v - souřadnice uváděného místa plochy [m];

Q° - teplo vnitřních zdrojů [W];

χ - hustotu tepelného toku [W.m⁻²];

α - součinitel přestupu tepla [W.m⁻²];

T - teplotu [°C];

λ - součinitel tepelné vodivosti tělesa [W.m⁻¹ . K⁻¹];

t - čas [s];

c_p - měrnou tepelnou kapacitu tělesa [J . kg⁻¹ . K⁻¹].

Proces simulace se provádí ve třech krocích:

- a) vytvoření geometrických dat odlitku (používá se CAD systém A. M. G.);
- b) výpočet teplot během sledovaného slévárenského procesu (k tomu jsou důležité tepelně-fyzikální a další potřebné veličiny, které jsou součástí programu, avšak také lze uplatnit veličiny dodané);
- c) zobrazení výsledků simulačního výpočtu (nejčastěji je to zobrazení izoterm a křivek minimální a maximální teploty).

Celková práce se simulačním programem SIMTEC je dosti náročná, vyžaduje nejen počítačovou odbornost, ale také odborné znalosti ze slévárenské teorie i praxe.

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

Experimentální část této diplomové práce byla zaměřena na sledování teplotních polí v pískových slévárenských formách, a to z CT směsi, jednotné formovací směsi, bentonitu a směsi z rájeckého písku, při tuhnutí a chladnutí odlitku tvaru válce $\varnothing 40 \times 200$ mm.

Cílem této diplomové práce bylo ověření modelování pomocí programu SIMTEC a ověření možnosti modelování eutektické a eutektoidní přeměny u litiny s lupínkovým grafitem.

Měření byla provedena na katedře strojírenské metalurgie TU Liberec. Zde byly i vyhodnoceny všechny dále uvedené experimenty.

Vlastní experimenty byly rozděleny do dvou základních etap:

1) V první etapě byla provedena 4 měření. Dvě měření na slévárenské formě z CT směsi a dvě na formě z jednotné formovací směsi. Pro tuto etapu měření byla použita slévárenská forma o rozměru $170 \times 220 \times 200$ mm. Byl odléván odlitek tvaru válce z litiny s lupínkovým grafitem o $\varnothing 40 \times 200$ mm.

Záměrem bylo sledování teploty v tepelné ose odlitku, na lici i ve vzdálenějších místech slévárenské formy. Bylo použito celkem 9 termoelektrických článků, jejichž prostřednictvím byly zaznamenávány průběhy jednotlivých teplot.

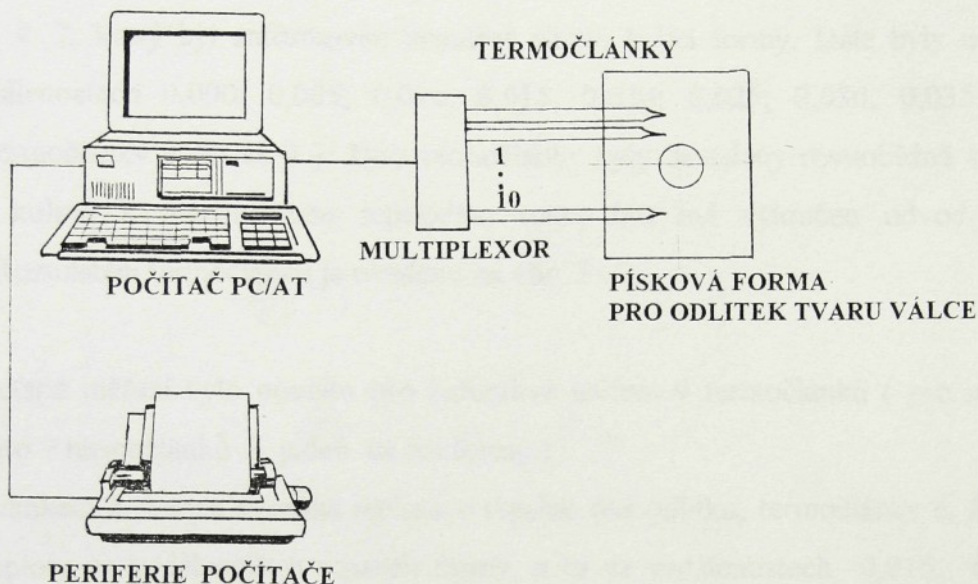
2) Ve druhé etapě měření bylo záměrem sledování průběhů teplot v pískových slévárenských formách s možností orientačního výpočtu základních tepelně - fyzikálních veličin podle metody VEJNIKA, současně byl záměr sledovat práci s programem SIMTEC.

Pro tuto etapu měření byla použita slévárenská forma $250 \times 250 \times 260$ mm pro odlévání odlitku tvaru válce z LLG o $\varnothing 40 \times 200$ mm. Bylo provedeno celkem 8 měření. Dvě na formě z CT směsi, dvě na formě z jednotné formovací směsi (JFS), dvě na formě z bentonitu a dvě na formě z rájeckého písku.

Byly sledovány teploty v tepelné ose odlitku, na lici (pouze v měření č. 8) i ve vzdálenějších místech slévárenské formy.

3.1 Popis měřicího zařízení

Pro sledování a registraci experimentů bylo použito měřicí zařízení, jehož schéma je uvedeno na obr. 3 - 1. Měřicí zařízení tvořil mikropočítač PC - AT s 16-ti čidlovým analogovým převodníkem PC LABDAS CARD PCL 718 v kombinaci s multiplexorem PCLD 789.



Obr. 3 - 1 Skupinové schéma měřicího zařízení.

Měřicí zařízení by mělo umožnit

- a) co nejprehlednější a nejpřesnější zápis a vyhodnocení měřených veličin;
- b) rozmístěním termočlánků ve slévárenské formě co nejspolehlivější a nezkreslené sledování skutečných teplot.

3.1.1 Použité termočlánky a jejich rozmístění ve formách

Pro registraci teploty byly použity termoelektrické články (termočlánky) NiCr - Ni. Teplota v tepelné ose odlitku a na lici slévárenské formy byla sledována termočlánky NiCr - Ni s vodiči o $\varnothing$ 1 mm. Jednotlivé větve byly izolovány trubičkami z křemenného skla (vnější $\varnothing$ 2,5 x 50 mm).

Ke sledování teplot v ostatních místech slévárenské formy byly použity termočlánky NiCr - Ni s vodiči o $\varnothing$ 0,3 mm. Jednotlivé větve byly izolovány běžným elektrotechnickým materiálem a pracovní čidlo bylo opatřeno korundovou dvoukapilárou LUXAL o $\varnothing$ 4 mm.

1) Pro první etapu bylo pro jednotlivá měření použito vždy 9 termočlánků. Teplota v tepelné ose odlitku (v tavenině) byla snímána termočlánkem č. 1 a teplota líce formy termočlánkem č. 2, který byl zaformován nepatrně šikmo k líci formy. Dále byly měřeny teploty ve vzdálenostech 0,000; 0,005; 0,010; 0,015; 0,020; 0,025; 0,030; 0,035 m od líce formy (termočlánky č. 3 až 9). Tyto termočlánky byly zavedeny rovnoběžně s osou odlitku (t.j. kolmo k maximálnímu tepelnému toku, tím byl vyloučen odvod tepla termočlánky). Rozmístění termočlánků je uvedeno na obr. 3 - 2.

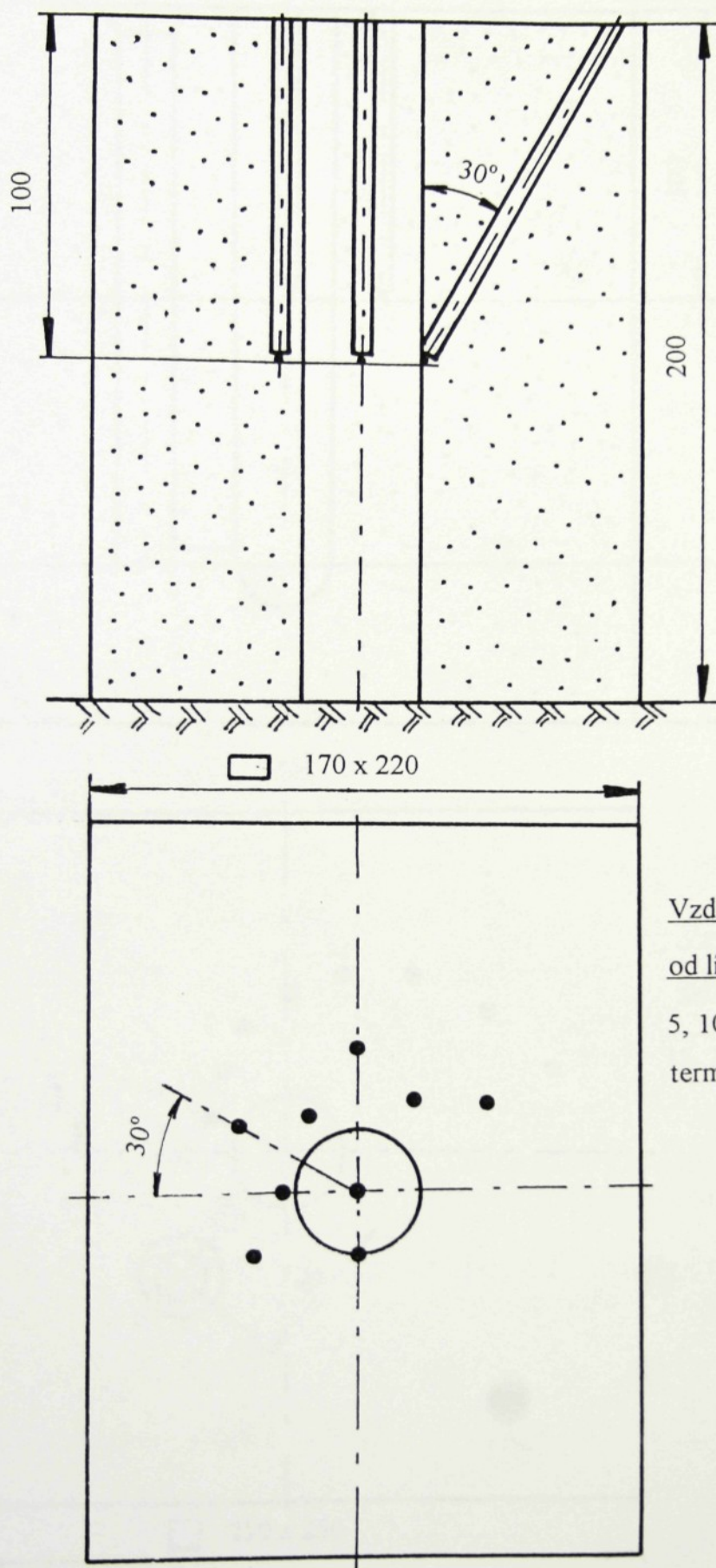
2) Ve druhé etapě měření bylo použito pro jednotlivá měření 9 termočlánků (pro měření č. 8 bylo použito 9 termočlánků a jeden na líci formy).

Termočlánkem č. 1 byla snímána teplota v tepelné ose odlitku, termočlánky č. 2 až 9 byly měřeny teploty ve vzdálenějších místech formy, a to ve vzdálenostech 0,015; 0,025; 0,035; 0,045; 0,055; 0,065; 0,075; 0,085 m od líce formy. Rozmístění termočlánků je znázorněno na obr. 3 - 3.

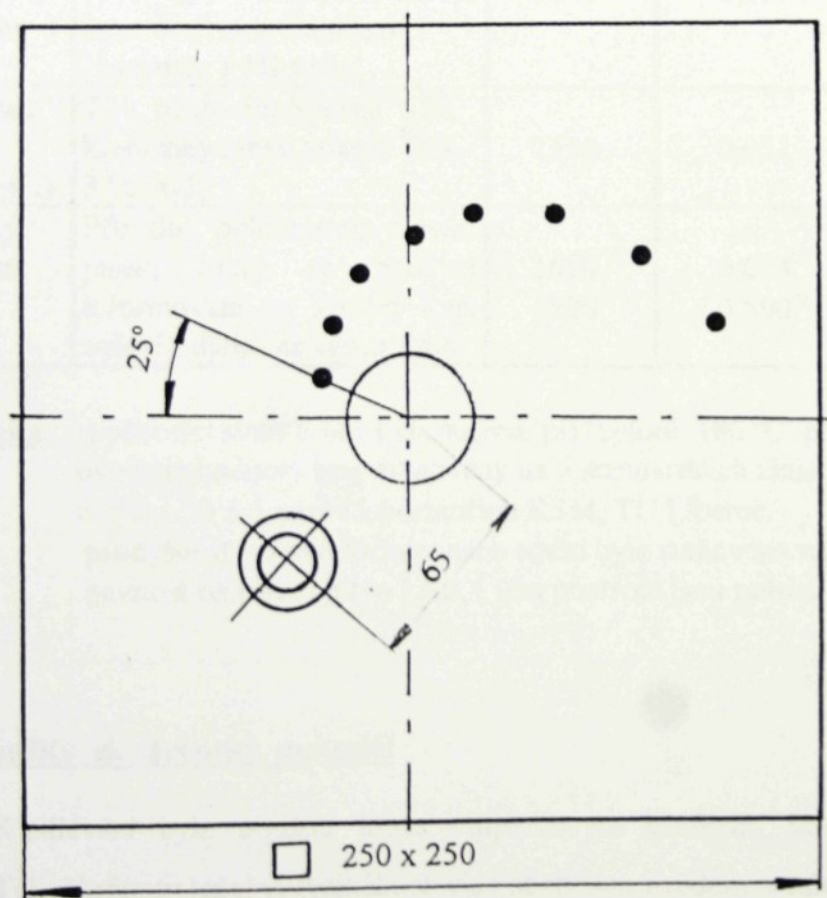
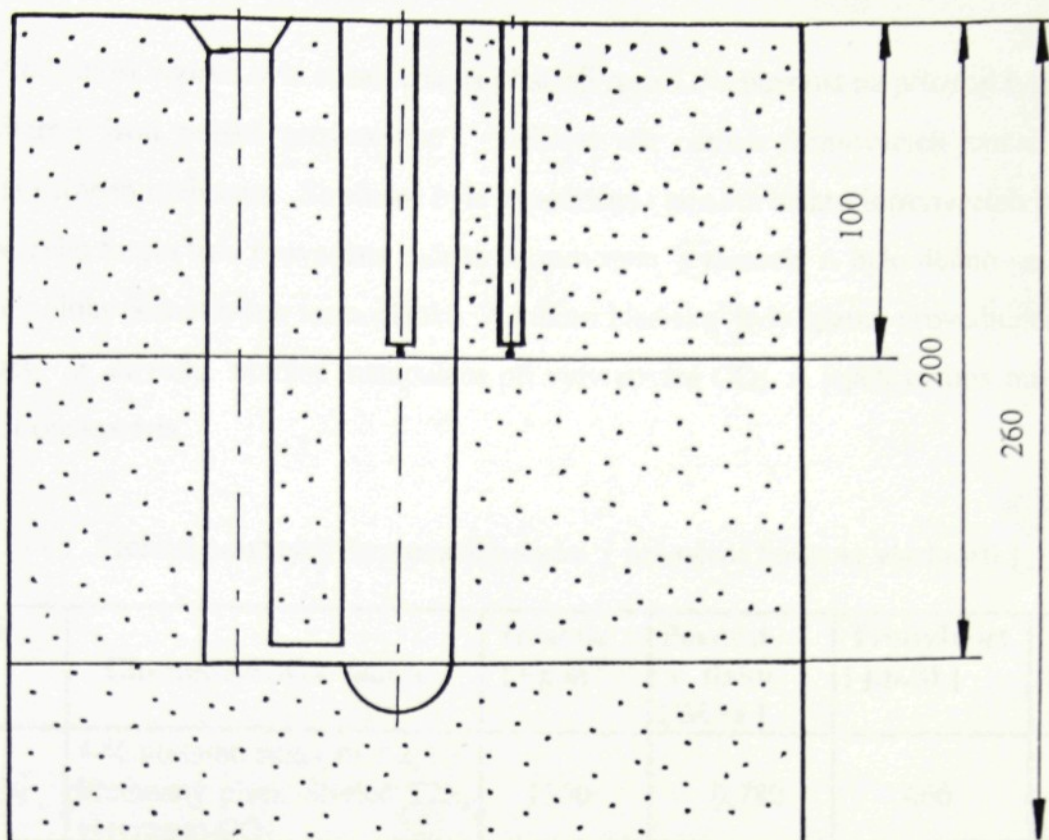
3.2 Charakteristika použitých slévárenských forem

Jak již bylo dříve uvedeno, experimenty byly prováděny ve dvou etapách. V obou případech byly použity dělené slévárenské formy. Pro první etapu byly použity formy o rozměrech 170 x 220 x 200 mm z CT směsi a JFS, s dutinou pro odlitek tvaru válce $\varnothing$ 40 x 200 mm. Ve druhé etapě byly použity formy z CT směsi, z JFS, ze směsi se 7% bentonitu a ze směsi z přírodního rájeckého písku, s rozměry 250 x 250 x 260 mm. Přírodní směs rájeckého písku byla sušena v peci při teplotě 180 °C podobu 16 hod.

Přehled základních vlastností použitých formovacích směsí je uveden v tabulce 3 - 1. Zkoušky byly prováděny na standardních vzorcích v laboratoři KSM - TU. Bylo použito pět vzorků pro každý formovací materiál.



Obr. 3 - 2 Schéma formy 170 x 220 x 200 mm pro odlitek tvaru válce $\varnothing 40 \times 200$ mm s vyznačením rozmístění termočlánků



Vzdálenost termočlánků
od lící formy:

15, 25, 35, 45, 55, 65, 75, 85 mm

Obr. 3 - 3 Schéma formy 250 x 250 x 260 mm pro odlitek tvaru válce $\varnothing 40 \times 200$ mm s vyznačením rozmístění termočlánků

Prodyšnost vzorků byla stanovena na přístroji typu LP a pevnost na přístroji typu LRU (oba přístroje jsou polské provenience). Velikost zrn ostřiva formovacích směsí byla stanovena síťovým rozbořem. Současně byla vypočítána i hustota těchto formovacích směsí.

Výroba forem byla prováděna ručním formováním v rámech. A bylo dbáno na správné vymezení polohy jednotlivých termočlánků. Z tohoto hlediska byly špatně proveditelné formy z CT směsi, z důvodu obtížné manipulace při vytvrzování CO₂. A jejich výroba musela být několikrát opakována.

Tabulka 3 - 1 Přehled použitých formovacích směsí (průměrné hodnoty vlastností)

Použitá směs	Charakteristika směsi	Hustota [kg.m ⁻³]	Pevnost v tlaku [MPa]	Prodyšnost [j.p.SI]	d ₅₀ [mm]
CT - SiO ₂	4 % vodního skla (m = 2,4), křemenný písek Střeleč T2S, vytvrzeno CO ₂	1500	0,780	460	0,27
Jednot. form. směs (Ostašov)	Bentonit Sabenil 50 (10,9 kg) vratný písek 989,1 kg, (ostřivo - Šajdíkovy Humence) 4% vody	1600	0,039	268	0,28
Bentonit. směs (7% ben .)	7 % bentonitu Speciál 550, křemenný písek Střeleč T2S, 3 % vody	1550	0,051	334	0,27
Rájecký přírodní písek	Přírodní polomastný slévár. písek, který se používá k formování na syrovo i na sušení odlitků ze všech slitin	1650 1600 ^{•)}	0,064 0,500 ^{•)}	271 250 ^{•)}	0,22

Poznámka: •) přírodní směs Rájec byla sušena při teplotě 180 °C po dobu 16 hod; uvedené hodnoty byly stanoveny na 5 standardních zkušebních tělískách Ø 50 x 50 ± 1 mm v laboratořích KSM, TU Liberec.
prodyšnost vzorků formovacích směsí byla stanovena na přístroji typ LP a pevnost na přístroji typ LRU, (oba přístroje jsou polské provenience).

3.3 Použitý slévárenský materiál

K odlévání byla použita litina s lupínkovým grafitem, která byla k dispozici na KSM - TU. Hodnoty tepelně-fyzikálních vlastností jsou uvedeny v tabulce 3 - 2.

Tabulka 3 - 2 Hodnoty tepelně-fyzikálních vlastností vybraných slévarenských materiálů

Materiál	Měrné skupenské teplo (L_{KR}) [J.kg ⁻¹]	Měrná tepelná kapacita (c_M) (tavenina) [J . kg ⁻¹ . K ⁻¹]	Hustota (ρ_M) (tavenina) [kg.m ⁻³]	Liter.
Litina s lupínk. grafitem	259 200	544,20	6 950	[3]
	299 200	837,20	6 950	[4]
	299 000	837,36	neuvádí	[26]

Poznámka: autoři neuvádí chemické složení litiny, v literatuře nejsou známe ani hodnoty jiných typů litin (jako např. litiny s červíkovitým, popř. globulárním grafitem)

Byly provedeny celkem tři tavby. Tavba č. 1 byla použita při odlévání do forem 170 x 220 x 200 mm (1. etapa měření). Pro 2. etapu byly použity tavby č. 2 a č. 3. Tavba č. 2 (měření č. 5, 6, 7, 8) a tavba č. 3 (měření č. 1, 2, 3, 4). Litina byla tavena ve středofrekvenční indukční peci (hmotnost tavby 20 kg), německé provenience. Analýzy chemického složení jednotlivých taveb byly provedeny na přístroji LECO (Slévárna Liberec - Ostašov). Přehled chemického složení je uveden v tabulce 3 - 3. Tabulka obsahuje i vypočítané hodnoty uhlíkového ekvivalentu a stupně eutektičnosti jednotlivých taveb, podle obecně známých vztahů.

Tabulka 3 - 3 Přehled chemického složení použité litiny

Označení tavby	Chemické složení litiny hmot. [%]									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	C _E	Sc
Tavba č. 1	3,25	2,31	0.16	0,042	0,028	0,04	0,03	0,28	3,28	0,72
Tavba č. 2	3,43	1,79	0,10	0,025	0,014	0,03	0,61	0,03	3,97	0,93
Tavba č. 3	3,56	2,79	0,11	0,024	0,009	0,003	0,73	0,01	4,40	1,05

Poznámka: analýza chemického složení byla provedena na přístroji LECO (Slévárna Liberec - Ostašov).
Tavba č. 1 byla použita v 1. etapě měření. Ve 2. etapě měření byla použita tavba č. 2 (měření č. 5, 6, 7, 8) a tavba č. 3 (měření č. 1, 2, 3, 4).

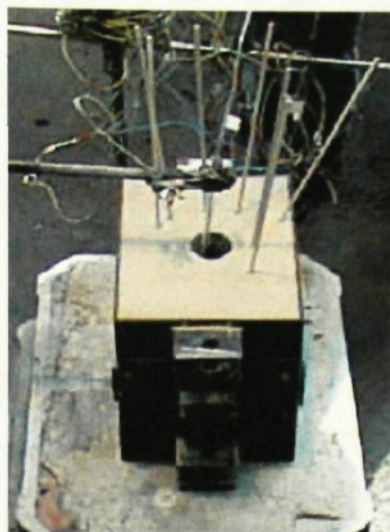
3.4 Popis prováděných experimentů

Experimenty prováděné v této diplomové práci byly rozděleny do dvou etap. Jejich cílem bylo sledování časových závislostí teplot v pískových slévárenských formách 170 x 220 x 200 mm z CT směsi a JFS (1. etapa měření) a ve formách 250 x 250 x 260 mm z CT směsi, z JFS, ze směsi se 7% bentonitu a ze směsi z přírodního rájeckého písku při odlévání odlitků tvaru válce $\varnothing 40 \times 200$ mm.

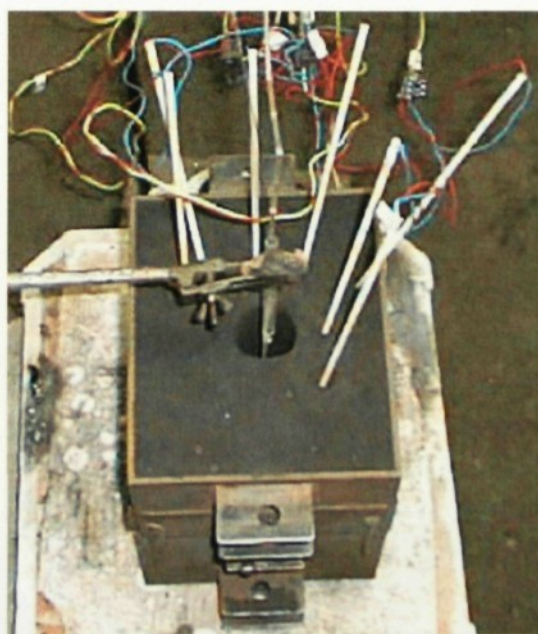
Do zvolených míst připravené slévárenské formy byly vertikálně zabudovány termočlánky, které byly odzkoušeny prostřednictvím měřicího zařízení (viz obr. 3 - 1). Pouze termočlánek na lici formy byl zabudován mírně šikmo z důvodu obtížné zaformovatelnosti těchto směsí. Také byl zaveden i termočlánek do dutiny formy, tak aby měřil teplotu v tepelné ose odlitku. Hloubka zavedení termočlánků odpovídala polovině výšky odlitku, jak je patrné z obr. 3 - 2 a 3 - 3. Po natavení litiny byla změřena její lici teplota optickým pyrometrem a byla odlita do slévárenské formy. Bylo dbáno na to, aby čas lití byl krátký a nepřesáhl 10 s. Od tohoto okamžiku byly pomocí počítače registrovány a zapisovány do grafů teploty v jednotlivých místech formy i v tepelné ose odlitku. Naměřené průběhy teplot v čase pro jednotlivá měření jsou uvedeny v kapitole 3.4.1.

Na obr. 3 - 4 až 3 - 9 jsou uvedeny jednotlivé typy forem 170 x 220 x 200 mm a 250 x 250 x 260 mm, které byly použity při odlévání.

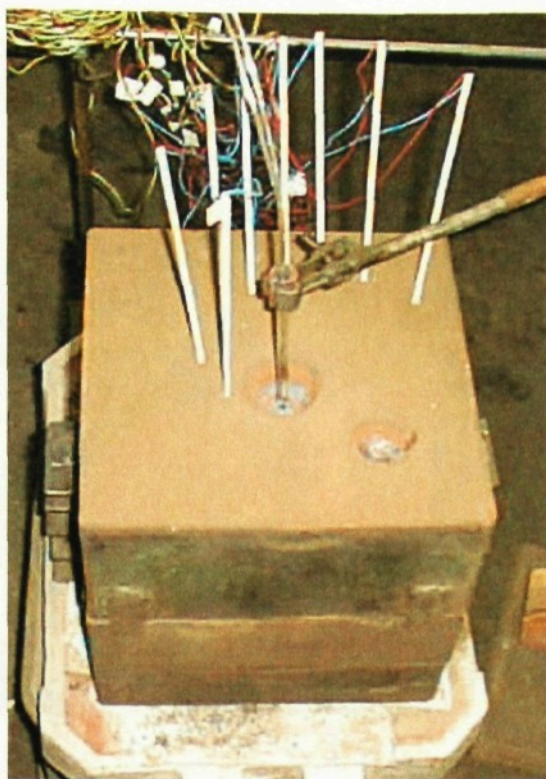
Na obr. 3 - 9 je uvedena forma z JFS (250 x 250 x 260 mm - měření č. 7, II. etapa měření), do které bylo odlito v úvodu II. etapy měření. Tato forma neobsahuje vtokovou soustavu. Následně odlévané formy pro II. etapu měření již obsahují vtokovou soustavu včetně další formy z JFS (měření č. 8 - II. etapa).



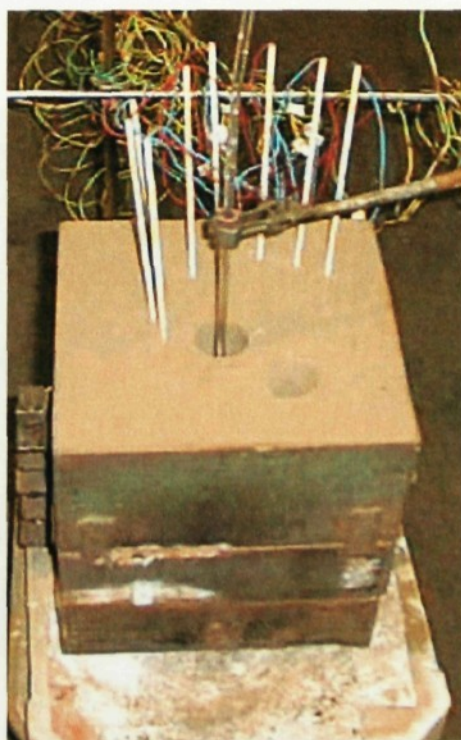
Obr. 3 – 4 Pohled na formu z CT směsi 170 x 220 x 200 mm s dutinou
 $\varnothing 40 \times 200$ mm pro odlévání LLG (I. etapa měření)



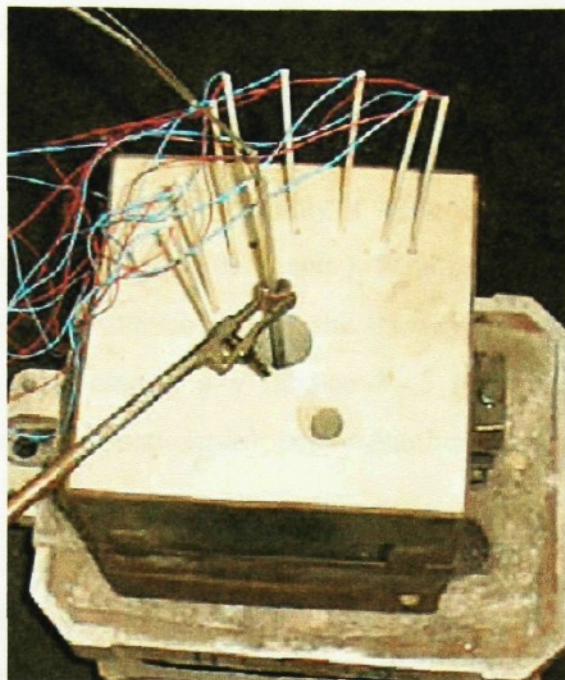
Obr. 3 – 5 Pohled na formu z JFS 170 x 220 x 200 mm s dutinou
 $\varnothing 40 \times 200$ mm pro odlévání LLG (I. etapa měření)



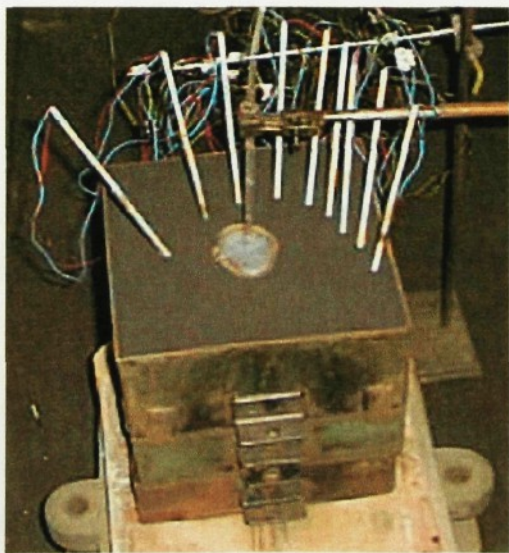
Obr. 3 – 6 Pohled na formu ze směsi se 7% bentonitu 250 x 250 x 260 mm s dutinou $\varnothing$ 40 x 200 mm pro odlévání LLG (II. etapa měření)



Obr. 3 – 7 Pohled na formu z přírodní směsi rájeckého písku 250 x 250 x 260 mm s dutinou $\varnothing$ 40 x 200 mm pro odlévání LLG (II. etapa měření)



Obr. 3 – 8 Pohled na formu z CT směsi 250 x 250 x 260 mm s dutinou $\varnothing 40 \times 200$ mm pro odlévání LLG (II. etapa měření)



Obr. 3 – 9 Pohled na formu z JFS 250 x 250 x 260 mm po odlití odlitku $\varnothing 40 \times 200$ mm z LLG (II. etapa měření)

3.4.1 Zpracování naměřených experimentů

Z naměřených časových závislostí teplot (obr. 3 - 12, 3 - 15, 3 - 18, 3 - 21, 3 - 24, 3 - 27, 3 - 30, 3 - 33, 3 - 36, 3 - 39, 3 - 42 a 3 - 45) byly stanoveny pro jednotlivá měření časy ztuhnutí odlitku, teploty lití ($T_{\text{lití}}$) a teploty formy (T_F), které jsou uvedeny v tabulce 3 - 4 (pro I. etapu) a v tabulce 3 - 7 (pro II. etapu). Dále byly pro tyto časové okamžiky zaznamenány hodnoty teplot ve sledovaných místech slévárenských forem. Tyto hodnoty teplot jsou uvedeny v tabulce 3 - 4 (pro I. etapu) a v tabulce 3 - 5 (pro II. etapu).

Vyhodnocení časových závislostí teplot pro jednotlivé experimenty obou etap je provedeno v kapitole 4.

3.4.1.1 Experimenty první etapy měření

Záměrem první etapy bylo stanovení poměru $T_{\text{PR}} / T_{\text{KR}}$. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3 - 4. Současně byly pro informaci vypočteny dle rovnice (2.10) pomocí Gaussova integrálu chyb teploty v jednotlivých místech slévárenské formy. Místa formy byla shodná pro měření i výpočet. Teploty získané výpočtem a měřením jsou uvedeny v tabulce 3 - 4.

Výpočet teplotního pole pomocí metody podle VEJNIKA nemohl být použit, protože hodnota prohřátí slévárenské formy byla větší než tloušťka stěny slévárenské formy.

Dále bylo provedeno modelování (simulace) časových závislostí teplot pomocí programu SIMTEC (verze 22.10 1997) při stejných podmínkách jako byly realizovány experimenty. Naměřené časové závislosti teplot spolu s podmínkami modelování, závislosti simulačních výpočtů teplot a závislosti teploty na vzdálenosti od líce slévárenské formy jsou pro jednotlivá měření uvedeny v kapitole 3.5.

Jak bylo dříve uvedeno, měření byla provedena na dvou formách z CT směsi a dvou formách z JFS (170 x 220 x 200 mm).

3.4.1.2 Experimenty druhé etapy měření

Ze získaných hodnot jednotlivých teplot v okamžiku ztuhnutí odlitku, byly sestrojeny závislosti teplot na vzdálenosti od líce formy. Z těchto závislostí bylo pomocí proložení příslušné křivky stanoveno prohřátí slévárenské formy (X_2) v okamžiku ztuhnutí odlitku.

Získané hodnoty prohřátí jsou uvedeny v tabulce 3 - 7. Na základě metody podle VEJNIKA byly vypočteny dle vztahu (2.11) hodnoty jednotlivých teplot v příslušných místech slévárenských forem v okamžiku ztuhnutí odlitku. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3 - 5. Pro stanovení efektivní teploty formy ($T_{ef} = T_{PR} - T_F$) byl použit vztah, který uvádí ANISOVIČ [1] $T_{PR} = 0,97 \cdot T_{KR}$.

Z důvodu odlišnosti některých teplot (zejména blíže k lici slévárenské formy) byl pro měření č. 5 proveden informativní výpočet teplot dle vztahu podle VEJNIKA (2.11) v jednotlivých místech slévárenské formy s použitím jiných efektivních teplot. Vypočítané hodnoty teplot jsou uvedeny v tabulce 3 - 6.

Současně byl proveden orientační výpočet tepelně-fyzikálních veličin forem dle vztahů uvedených v příloze č. 11. Do těchto vztahů byly dosazovány hodnoty $M = 0,01$ m, $\rho = 6950$ kg. m⁻³, L_c dle tabulky 3 - 7, t_{tuh} dle tabulky 3 - 7, 3 - 8 a X_2 dle tabulky 3 - 7. Hodnoty těchto veličin jsou uvedeny v tabulce 3 - 8, pro jejich výpočet byla použita $T_{PR} = 0,97 \cdot T_{KR}$. Na základě měření č. 8, kdy byla měřena teplota líce formy (T_{PR}), bylo zjištěno, že teplota $T_{PR} / T_{KR} = 0,8$. Ze srovnání tohoto poměru teplot s jeho hodnotami v etapě č. 1, které jsou vyšší, byl zvolen poměr $T_{PR} / T_{KR} = 0,85$. Z takto vypočtené hodnoty teploty rozhraní byla stanovena efektivní teplota každého měření. Ze získaných hodnot efektivní teploty byly pro každé měření vypočteny hodnoty tepelně-fyzikálních veličin, které jsou uvedeny v tabulce 3 - 9. Záměrem těchto výpočtů bylo zjištění hodnot tepelně-fyzikálních veličin.

Tabulka 3 - 4 Přehled naměřených a vypočtených hodnot při odlévání litinových odlitků Ø 40 x 200mm do slévarenských forem 170 x 220 x 200 mm (I. etapa měření)

Materiál formy	T _F [°C]	Hodnoty teplot	Vzdálenost termočlánků od líce formy [m]								T _{lití} [°C]	T _{PR} /T _{KR} [°C]	t _{tuh} [s]
			Teplota [°C]										
			0,000	0,005	0,010	0,015	0,020	0,025	0,030	0,035			
1.	CT-SiO ₂ (170x220x200mm)	21	naměřené vypočtené	985 985	870 770	792 572	495 405	285 272	158 175	97 110	92 69	0,86	355
2.	CT-SiO ₂ (170x220x200mm)	25	naměřené vypočtené	986 986	862 786	821 602	539 444	391 305	233 211	113 147	102 108	0,87	405
3.	JFS (Ostašov) (170x220x200mm)	21	naměřené vypočtené	1063 1063	882 828	828 614	538 434	202 293	97 191	96 123	94 79	0,93	445
4.	JFS (Ostašov) (170x220x200mm)	21	naměřené vypočtené	1018 1018	901 772	819 547	406 371	227 229	137 150	94 84	94 66	0,90	370

Poznámka: T_F - počáteční teplota formy; T_{KR} - teplota krystalizace; T_{lití} - teplota lití; t_{tuh} - doba ztuhnutí odlitku;
Příslušné hodnoty teplot byly vypočteny na základě Gaussova integrálu chyb dle vztahu (2. 10); pro výpočet teplot CT směsi
byly použity tyto hodnoty veličin: λ = 0,70 [W . m⁻¹ . K⁻¹]; c = 1048 [J . kg⁻¹ . K⁻¹]; ρ = 1500 [kg . m³], pro výpočet
teplot JFS byly použity tyto hodnoty: λ = 0,59 [W . m⁻¹ . K⁻¹]; c = 1090 [J . kg⁻¹ . K⁻¹]; ρ = 1600 [kg . m³].

Tabulka 3 - 5 Přehled naměřených a vypočítaných teplot ve slévárenských formách 250 x 250 x 260 mm z různých formovacích směsí při odlévání odlitků Ø 40 x 200 mm z litiny; v okamžiku jejich ztuhnutí (II. etapa měření)

Materiál formy	Hodnoty teplot	Vzdálenost termočlánků od líce formy [m] Teplota [°C]										
		0,000	0,005	0,010	0,015	0,025	0,035	0,045	0,055	0,065	0,075	
Bentonit 7 % (měření č. 1)	naměřené	-	-	-	411	115	80	61	29	21	18	
	vypočtené	1106	845	635	466	236	106	45	23	19	-	
Bentonit 7 % (měření č. 2)	naměřené	-	-	-	386	99	85	58	29	21	20	
	vypočtené	1101	845	636	486	258	124	54	24	16	15	
Přírodní rájecký písek (měření č. 3)	naměřené	-	-	-	308	100	44	22	19	18		
	vypočtené	1103	783	539	359	142	49	22	19	-	-	

Tabulka 3 - 6 Přehled vypočtených hodnot teplot v okamžiku ztuhnutí odlitku (dle metody Vejníka) ve slévárenské formě 250 x 250 x 260 mm z CT směsi při odlévání litinových odlitků Ø 40 x 200 mm; výpočty byly provedeny při různých hodnotách teploty rozhraní T_{PR} (II. etapa měření)

Podmínky stanovení teplot	Stupeň paraboly n [1]	Vzdálenosti termočlánků od líce formy [m] Teplota [° C]									
		Líc formy	0,005	0,010	0,015	0,025	0,035	0,045	0,055	0,065	0,075
Teploty exper. naměřeny	-	-	-	-	372	95	80	39	20	17	16
0,97 . T_{KR}	3,60	1113	826	598	420	187	71	26	17	16	-
0,90 . T_{KR}	3,47	1031	775	501	405	185	73	27	17	16	-
0,85 . T_{KR}	3,40	974	734	543	390	182	72	28	17	16	-
0,80 . T_{KR}	3,03	917	714	545	405	205	85	34	17	16	-

Poznámka: Pro výpočet byly použity hodnoty: $T_{KR} = 1147\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_F = 16\text{ }^{\circ}\text{C}$; $X_2 = 0,062\text{ m}$.

Tabulka 3 - 7 Přehled podmínek experimentů a důležitých hodnot; formy 250 x 250 x 260 mm (II. etapa měření)

Měření	$T_{\text{lití}}$ [°C]	1)		2)		t_{tuh} [s]	X_2 [m]	1)		2)		L_C [J . kg ⁻¹]
		T_F [°C]	T_{ef} [°C]	T_{ef} [°C]	T_{ef} [°C]			n [1]	n [1]	n [1]	n [1]	
1. Bentonit 7 %	1330	18	1088	1088	952	355	0,073	3,85	3,85	3,64	3,64	457431
2. Bentonit 7 %	1300	14	1088	1088	952	325	0,080	3,99	3,99	3,70	3,70	436501
3. Rájecký př. p. (vysušený)	1260	18	1086	1086	949	275	0,060	4,03	4,03	3,84	3,84	401338
4. Rájecký př. p. (vysušený)	1280	14	1091	1091	954	283	0,065	3,65	3,65	3,41	3,41	417245
5. CT - SiO ₂	1300	16	1097	1097	960	247	0,062	3,60	3,60	3,40	3,40	427292
6. CT - SiO ₂	1310	16	1133	1133	963	265	0,055	3,26	3,26	3,02	3,02	431478
7. JFS (Ostašov)	1280	15	1097	1097	959	265	0,073	3,00	3,00	2,76	2,76	410548
8. JFS (Ostašov)	1300	20	^{*)} 907 1091	^{*)} 907 1091	953	310	0,075	^{*)} 3,98 4,61	^{*)} 3,98 4,61	4,06	4,06	427292

Poznámka: T_F - počáteční teplota formy; T_{ef} - efektivní teplota ($T_{\text{PR}} - T_F$); t_{tuh} - čas ztuhnutí odlitku; X_2 - vzdálenost prohřáté vrstvy formy v okamžiku ztuhnutí odlitku; n - stupeň paraboly; ^{*)} hodnoty vypočtené z naměřené; **1)** vypočteno z $T_{\text{PR}}^{(1)} = 0,97 \cdot T_{\text{KR}} ; 2)$ z $T_{\text{PR}}^{(2)} = 0,85 \cdot T_{\text{KR}}$

Tabulka 3 - 8 Přehled důležitých hodnot měření a hodnot vypočtených tepelně-fyzikálních veličin s $T_{PR} = 0,97 \cdot T_{KR}$ (II. etapa měření)

Měření		T_F [°C]	T_{ef} [°C]	t_{tuh} [s]	X_2 [m]	n [1]	b_F [W.s ^{1/2} .m ⁻² .K ⁻¹]	λ_F [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	a_F [m ² .s ⁻¹]	c_F [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	L_C [J.kg ⁻¹]
1.	Bentonit 7 %	18	1088	355	0,073	3,85	1026	0,88	$7,3 \cdot 10^{-7}$	771,2	457431
2.	Bentonit 7 %	14	1088	325	0,080	3,99	1008	0,98	$9,3 \cdot 10^{-7}$	672,7	436501
3.	Rájecký př. p. (vysušený)	18	1086	275	0,060	4,03	1054	0,77	$5,3 \cdot 10^{-7}$	898,6	401338
4.	Rájecký př. p. (vysušený)	14	1091	283	0,065	3,65	1064	0,93	$7,8 \cdot 10^{-7}$	754,4	417245
5.	CT - SiO ₂	16	1097	247	0,062	3,60	1168	1,06	$8,2 \cdot 10^{-7}$	861,8	427292
6.	CT - SiO ₂	16	1133	265	0,055	3,26	1124	0,99	$6,9 \cdot 10^{-7}$	897,4	431478
7.	JFS (Ostašov)	15	1097	265	0,073	3,00	1059	1,36	$1,65 \cdot 10^{-6}$	515,3	410548
8.	JFS (Ostašov)	20	* ¹ 907 1091	310	0,075	* ¹ 3,98 4,61	1165 1020	1,07 0,80	$8,4 \cdot 10^{-7}$ $6,16 \cdot 10^{-7}$	794,8 811,9	427292

Poznámka: T_F - počáteční teplota formy; T_{ef} - efektivní teplota ($T_{PR} - T_F$); t_{Tuh} - čas ztuhnutí odlitku; X_2 - vzdálenost prohráté vrstvy formy v okamžiku ztuhnutí odlitku; n - stupeň paraboly; *¹) hodnoty vypočtené z naměřené T_{ice} ; $T_{PR} = 0,85 \cdot T_{KR}$

Tabulka 3 - 9 Přehled hodnot vypočítaných tepelně-fyzikálních veličin s efektivní teplotou: $T_{PR} = 0,85 \cdot T_{KR}$ (II. etapa měření)

Měření	T_F [°C]	T_{ef} [°C]	t_{tuh} [s]	X_2 [m]	n [1]	b_F [W.s ^{1/2} .m ⁻² .K ⁻¹]	λ_F [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	a_F [m ² .s ⁻¹]	c_F [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	L_C [J.kg ⁻¹]
1. Bentonit 7 %	18	952	355	0,073	3,64	1172	1,01	$8,2.10^{-7}$	831,3	457431
2. Bentonit 7 %	14	952	325	0,080	3,70	1152	1,21	$1,1.10^{-6}$	709,7	436501
3. Rájecký př. p. (vysušený)	18	949	275	0,060	3,84	1207	0,93	$6,1.10^{-7}$	978,9	401338
4. Rájecký př. p. (vysušený)	14	954	283	0,065	3,41	1218	1,15	$7,8.10^{-7}$	805,2	417245
5. CT - SiO ₂	16	960	247	0,062	3,40	1336	1,28	$9,1.10^{-7}$	929,7	427292
6. CT - SiO ₂	16	963	265	0,055	3,02	1326	1,20	$8,1.10^{-7}$	980,3	431478
7. JFS (Ostašov)	15	959	265	0,073	2,76	1214	1,60	$1,65.10^{-6}$	542,1	410548
8. JFS (Ostašov)	20	953	310	0,075	^{*)} 3,98 4,06	1165 1166	1,07 1,05	$8,4.10^{-7}$ $8,0.10^{-7}$	794,8 811,7	427292

Poznámka: T_F - počáteční teplota formy; T_{ef} - efektivní teplota ($T_{PR} - T_F$); t_{tuh} - čas ztuhnutí odlitku; X_2 - vzdálenost prohráté vrstvy formy v okamžiku ztuhnutí odlitku; n - stupeň paraboly; ^{*)} hodnoty vypočtené z naměřené T_{lic} ; $T_{PR} = 0,85 \cdot T_{KR}$

3.4.2 Vyhodnocení výsledků experimentů

1) *Vyhodnocení výsledků 1. etapy měření* (formy 170 x 220 x 200 mm)

Původním záměrem této etapy měření byla pouhá následná simulace teplotních polí pomocí programu SIMTEC. Vzhledem k tomu, že simulace nepřinesla očekávané výsledky, bylo přistoupeno k tomu, i když jen orientačně, stanovit teploty v jednotlivých místech formy v okamžiku ztuhnutí odlitku jiným způsobem. Proto byl použit výpočet metodou Gaussova integrálu chyb (GICH). Současně byla tato metoda použita s vědomím, že plně neobsahuje všechny složité způsoby sdílení tepla v pískových slévárenských formách.

Z výsledků je zřejmé, že poměr teploty rozhraní a teploty krystalizace odlévané litiny činí 0,86 až 0,87 u forem z CT směsi a 0,90 až 0,93 u forem z jednotné formovací směsi (JFS).

Z orientačně vypočtených hodnot teplot v okamžiku ztuhnutí odlitku ve slévárenských formách z CT směsi a JFS pomocí GICH je patrné, že teploty se liší více či méně u jednotlivých experimentů, jak je patrné z tabulky 3 - 4. Největší rozdíly jsou v místech formy blíže jejímu líci, např. ve vzdálenosti 0,005 nebo 0,010 m. Tyto teploty se od naměřených odlišují až o 129 °C ve vzdálenosti 0,010 m a o 129 °C ve vzdálenosti 0,005 m (obě hodnoty měření č. 4). Tyto rozdíly teplot potvrzují, že opravdu při teplotách vyšších než je teplota 200 až 300 °C již nepřevažuje sdílení tepla vedením ve formě. Naopak při teplotách nižších, kdy se ve formě projevuje především vedení tepla, lze pro výpočet teplot uplatnit i metodu GICH, která je závislá mimo jiné na tepelné vodivosti.

2) *Vyhodnocení získaných výsledků 2. etapy měření* (formy 250 x 250 x 260 mm)

a) Zhodnocení naměřených a vypočtených hodnot

Též podobná situace při výpočtu teplot ve slévárenských formách v okamžiku ztuhnutí odlitku je při použití Vejniovky metody, kdy se teplota ve formě vypočítává na základě stupně paraboly (náhradní křivky). Zde z technických důvodů výroby forem nebylo možné přesně vymezit vzdálenosti měřených míst u líce forem, a proto bylo přistoupeno až na nejbližší možnou vzdálenost od líce formy 0,015 m.

Touto metodou byly naopak teploty při líci formy dopočítány. Pokud se jedná o teploty naměřené a vypočítané, viz. tabulka 3 - 5, ve vzdálenějších místech od líce tj. 0,015; 0,025 m,

je jejich odlišnost případ od případu různá. Rozdíly naměřených a vypočtených teplot činí ve vzdálenosti 0,015 m od líce max. 100 °C (měření č. 2). Větší rozdíly teplot jsou patrné ve vzdálenosti 0,025 m. Zde se naměřené teploty pohybovaly cca 100 °C. A je nutné připomenout, že při této teplotě se vypařuje voda. Největší rozdíly teplot jsou v této vzdálenosti 159 °C (měření č. 2) a 130 °C (měření č. 7). Ve vzdálenějších místech formy rozdíl sledovaných teplot klesá a ve vzdálenosti 0,035 m od líce jsou rozdíly nižší než 39 °C, pouze u měření č. 7 činí rozdíl teplot 77 °C. Ve vzdálenosti 0,055 m je max. rozdíl teplot 12 °C (měření č. 7).

V této souvislosti byla provedena studie, resp. výpočet teplot u měření č. 5, viz tabulka 3 - 6, kdy byly uvažovány různé hodnoty teploty rozhraní na základě teploty krystalizace odlévané litiny. Uvedené výsledky ukazují, že rozdíl teplot ve vzdálenosti 0,025 m od líce činí až 92 °C. Též naměřená hodnota teploty v tomto místě činí 95 °C a lze v těchto místech očekávat vypařování vody. V dalších vzdálenějších místech od líce se rozdíly sledovaných teplot snižují tak, jako v předchozích případech, viz. tabulka 3 - 5.

b) Zhodnocení vypočtených tepelně-fyzikálních veličin pískových forem

Měření teplotních polí ve výše uvedených slévárenských formách pro jejich následné modelování (simulování) bylo využito k orientačnímu výpočtu jejich tepelně-fyzikálních veličin (b_F , λ_F , c_F , a_F).

Nedostatek metody podle Vejníka byl spatřen v tom, že pro výpočet jsou mimo jiné nutné tzv. efektivní teplota a hodnota prohřátí formy v okamžiku ztuhnutí odlitku. Pro jejich určení je potřebné nalézt příslušnou funkci, která by průběh teplot dobře vyjadřovala.

Z důvodu, že ANISOVIČ [1] doporučuje počítat teplotu rozhraní dle vztahu $T_{PR} = 0,97 T_{KR}$, byly také pro jednotlivá měření na základě tohoto vztahu stanoveny efektivní teploty forem. Tyto teploty jsou uvedeny v tabulce 3 - 7 a 3 - 8. Pomocí těchto teplot byly vypočítány potřebné hodnoty pro výpočet hodnot tepelně-fyzikálních veličin. Pokud se týká hodnot prohřátí (X_2) jednotlivých forem v okamžiku ztuhnutí odlitku, nejnižší hodnoty vykazují formy z CT směsi a vysušené formy z rájeckého přírodního písku. Hodnoty prohřátí forem se 7 % bentonitu a JFS jsou vyšší, viz tabulka 3 - 7.

Z tabulky 3 - 8 je zřejmé, že hodnoty b_F se u jednotlivých forem příliš neliší. Jsou od 1008 (bentonitová forma) do 1168 [$W.s^{1/2}.m^{-2}.K^{-1}$] (forma z CT směsi). Protože tyto

výsledky nepotvrdily očekávání, neboť HAVLÍČEK [4] uvádí např. b_F CT směsi při odlévání litiny určené Halbartovou metodou $1510 [W.s^{1/2}.m^{-2}.K^{-1}]$, byla na základě takto různých hodnot b_F volena pro výpočet tepelně-fyzikálních veličin nižší hodnota $T_{PR} = 0,85 . T_{KR}$, resp. nižší efektivní teplota forem. K tomu též přispělo měření č. 8, kde se podařilo změřit teplotu na líci formy. S touto změnou efektivní teploty formy musely být přepočítány i výsledné stupně paraboly jednotlivých experimentů, jak je uvedeno v tabulce 3 - 7 a 3 - 9.

Pokud se jedná o další tepelně-fyzikální veličiny z tabulky 3 - 8, je zřejmé, že hodnoty tepelné vodivosti λ_F , které jsou nutné pro modelování (simulaci) teplot ve formě, se pohybují od 0,88 do 1,36 $[W.m^{-1}.K^{-1}]$. Nejnižší hodnotu 0,77 $[W.m^{-1}.K^{-1}]$ vykazuje forma z rájeckého přírodního písku, vyšší jsou hodnoty pro formu z CT směsi 1,06 $[W.m^{-1}.K^{-1}]$ a nejvyšší hodnoty vykazuje JFS 1,36 $[W.m^{-1}.K^{-1}]$. Jak uvádí HAVLÍČEK [4], nejen přidání vody, ale i přidání jílu zvyšuje tepelnou vodivost křemenného ostřiva cca 3 x, což je z hodnoty 0,33 na hodnotu 0,99 $[W.m^{-1}.K^{-1}]$. Tomu se vypočtené hodnoty přibližují.

Hodnoty měrné tepelné kapacity c_F v žádném případě nepřesahují 1000 $[J.kg^{-1}.K^{-1}]$. Pro ty formy, kde byla vypočítána minimální hodnota tepelné vodivosti, je naopak nejvyšší hodnota měrné tepelné kapacity 898,6 $[J.kg^{-1}.K^{-1}]$ (rájecký přírodní písek), nejnižší 515,3 $[J.kg^{-1}.K^{-1}]$ u formy z JFS.

Také hodnoty teplotní vodivosti a_F , jak je patrné z tabulky 3 - 8, korespondují s hodnotami tepelné vodivosti. Nejvyšší hodnotu teplotní vodivosti $1,65.10^{-6} [m^2.s^{-1}]$ vykazuje forma z JFS. Hodnoty pro formu z CT směsi činí $8,2. 10^{-7} [m^2.s^{-1}]$ a $6,9. 10^{-7} [m^2.s^{-1}]$, tyto hodnoty lze porovnat s hodnotami, které udává KLEČKOVÁ [14] a jsou patrné z přílohy č. 9.

Pokud se jedná o hodnoty tepelně-fyzikálních veličin uvedených v tabulce 3 - 9, je zřejmé, že hodnoty b_F se pohybují od 1152 do 1336 $[W.s^{1/2}.m^{-2}.K^{-1}]$. Nejvyšší hodnotu 1336 $[W.s^{1/2}.m^{-2}.K^{-1}]$ vykazuje forma z CT směsi. Součinitelé b_F se u jednotlivých forem se příliš neliší. Byly očekávány hodnoty b_F nižší u forem z vysušeného rájeckého písku. To proto, že voda je vodičem tepla.

Pokud se jedná o hodnoty tepelné vodivosti, ty se pohybují od 0,93 do 1,60 $[W.m^{-1}.K^{-1}]$. Nejnižší je u rájeckého písku, nejvyšší u JFS. Celkově však lze říci, že se tepelné vodivosti jednotlivých forem příliš neliší.

S ohledem na použitou $T_{PR} = 0,85 \cdot T_{KR}$ se při těchto výpočtech také zvýšily hodnoty měrné tepelné kapacity, které jsou od 542,1 do 980,3 [J.kg⁻¹.K⁻¹]. Nejvyšší vykazuje forma z CT směsi, nejnižší forma z JFS. Podle literárních podkladů [8], [21] je měrná tepelná kapacita v tabulce 3 - 8 i 3 - 9 od 1050 do 1214 [J.kg⁻¹.K⁻¹]. Vypočítané hodnoty měrné tepelné kapacity jsou tak nižší.

Podobně se výpočtem naopak zvýšily hodnoty teplotní vodivosti, která činí od $1,65 \cdot 10^{-6}$ [m².s⁻¹] do $6,1 \cdot 10^{-7}$ [m².s⁻¹]. Hodnoty pro CT směs byly vypočítány $6,9 \cdot 10^{-7}$ [m².s⁻¹] a $8,2 \cdot 10^{-7}$ [m².s⁻¹] při efektivní teplotě formy stanovené z $T_{PR} = 0,97 \cdot T_{KR}$ a při $T_{PR} = 0,85 \cdot T_{KR}$ hodnoty $9,1 \cdot 10^{-7}$ [m².s⁻¹] a $8,1 \cdot 10^{-6}$ [m².s⁻¹]. Hodnoty pro CT směs, které uvádí KLEČKOVÁ [14], jsou nižší a pohybují se od $5,4 \cdot 10^{-7}$ [m².s⁻¹] do $6,8 \cdot 10^{-7}$ [m².s⁻¹] (pro interval teplot 200 °C až 800 °C).

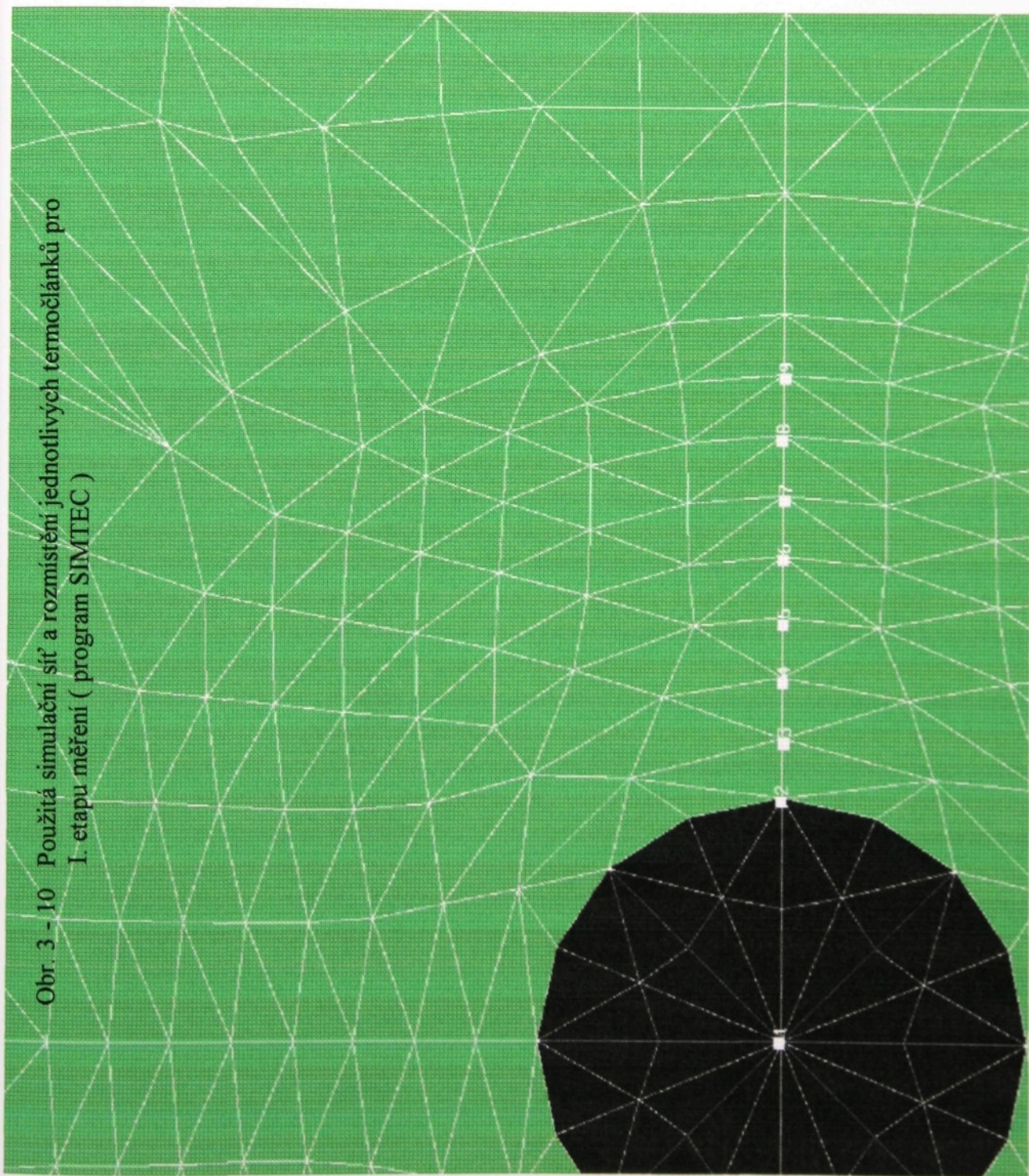
Celkově lze k výsledkům uvedeným v této kapitole konstatovat, že nepřinesly předpokládané očekávání. Bylo vycházeno z toho, že Vejníkova metoda je určena především pro pískové formy.

3.5 Modelování provedených experimentů

Modelování naměřených experimentů bylo realizováno pomocí programu SIMTEC (verze z 22.10.1997), který je dostupný na KSM - TU. Nejprve byla zadána geometrie odlitku a slévárenské formy. Poté bylo nutno vytvořit vhodnou síť. Použitá síť pro I. etapu měření je znázorněna na obr. 3 - 10 a pro II. etapu na obr. 3 - 11. Na volbě prvků sítě závisí i úspěšnost provedené simulace. Současně přesnost simulace závisí na hodnotách použitých tepelně-fyzikálních veličin. S ohledem na velké množství používaných pískových forem ve slévárenské praxi je možno konstatovat, že databáze tepelně-fyzikálních veličin programu SIMTEC byla nedostačující pro kvalitní simulaci. Z tohoto důvodu bylo nutné hodnoty tepelně-fyzikálních veličin zjistit z různých literárních podkladů, popř. je upravit.

Dále budou v této kapitole z důvodu přehlednosti uvedeny pro jednotlivá měření naměřené časové závislosti teplot na čase, závislosti teplot na vzdálenosti od líce (pro teploty naměřené a vypočtené) a časové závislosti teplot namodelované programem SIMTEC.

Obr. 3 - 10 Použitá simulační síť a rozmístění jednotlivých termočlánků pro I. etapu měření (program SIMTEC)



Bez_plneni1.prj/F_ctpisek

DRAW NEW

2D POINTS

3D-POINTS

CALCULATE

TIME CURV.

01-05 INFO

06-10 INFO

11-15 INFO

PRINT

END

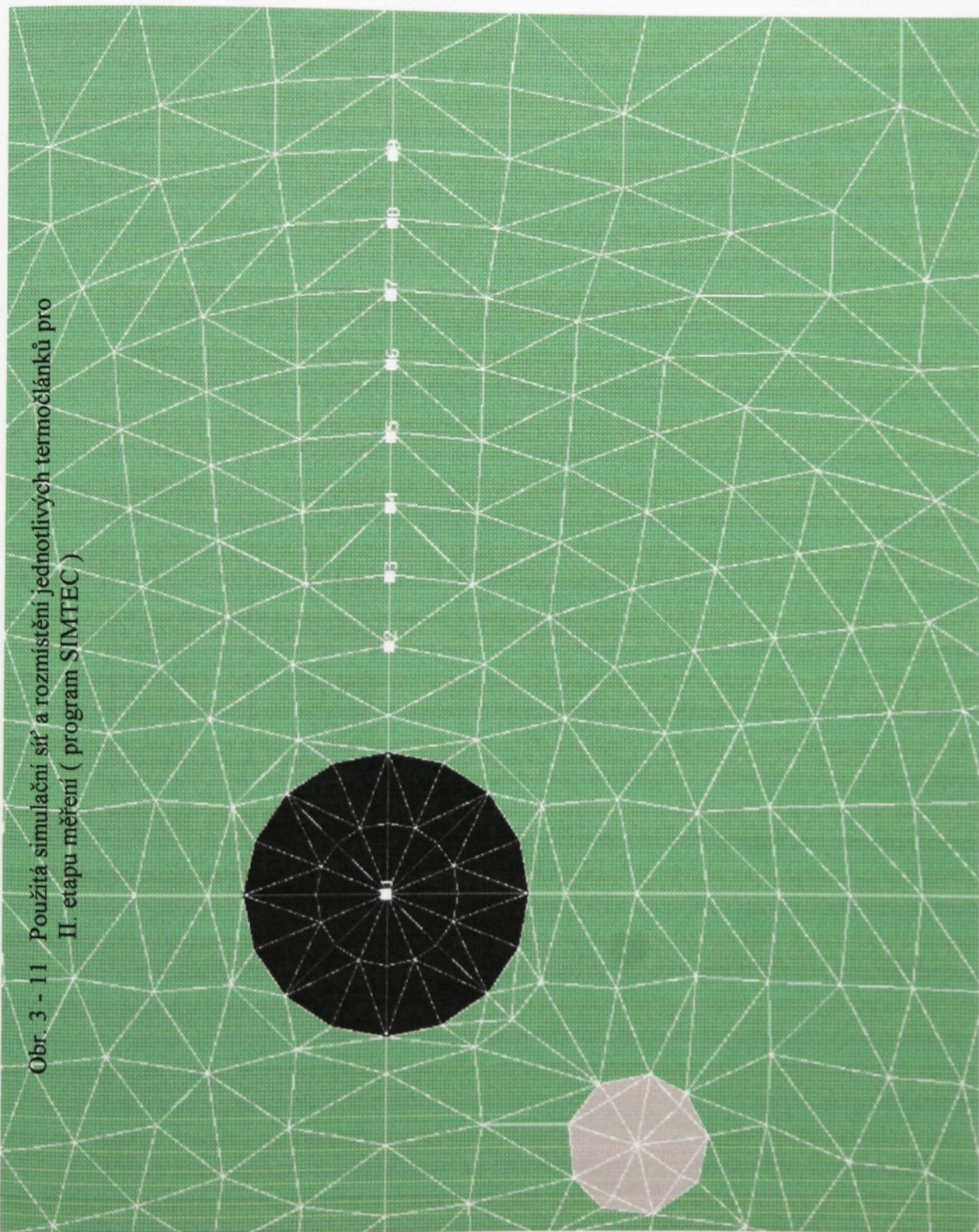
PARAM INFO

COLOR FONT

PRINT HELP



Obr. 3 - 11 Použitá simulační síť a rozmístění jednotlivých termočlánků pro II. etapu měření (program SIMTEC)



Eut_s_plnenim.prj/F_ctpisek

DRAW MENU

2D POINTS

3D POINTS

CALCULATE

TIME CURV.

01-05 INFO

06-10 INFO

11-15 INFO

PRINT

END

PARAM INFO

COLOR FONT

PRINT HELP



MĚŘENÍ č. 1 (I. etapa měření)

použitá forma: 170 x 220 x 200 mm
materiál formy: CT směs
odlévaný materiál: LLG
počáteční teplota formy: $T_F = 21\text{ }^{\circ}\text{C}$
teplota likvidu: $T_L = 1230\text{ }^{\circ}\text{C}$
teplota solidu: $T_S = 1143\text{ }^{\circ}\text{C}$
latentní teplo: $900\text{ [J . cm}^{-3}\text{]}$

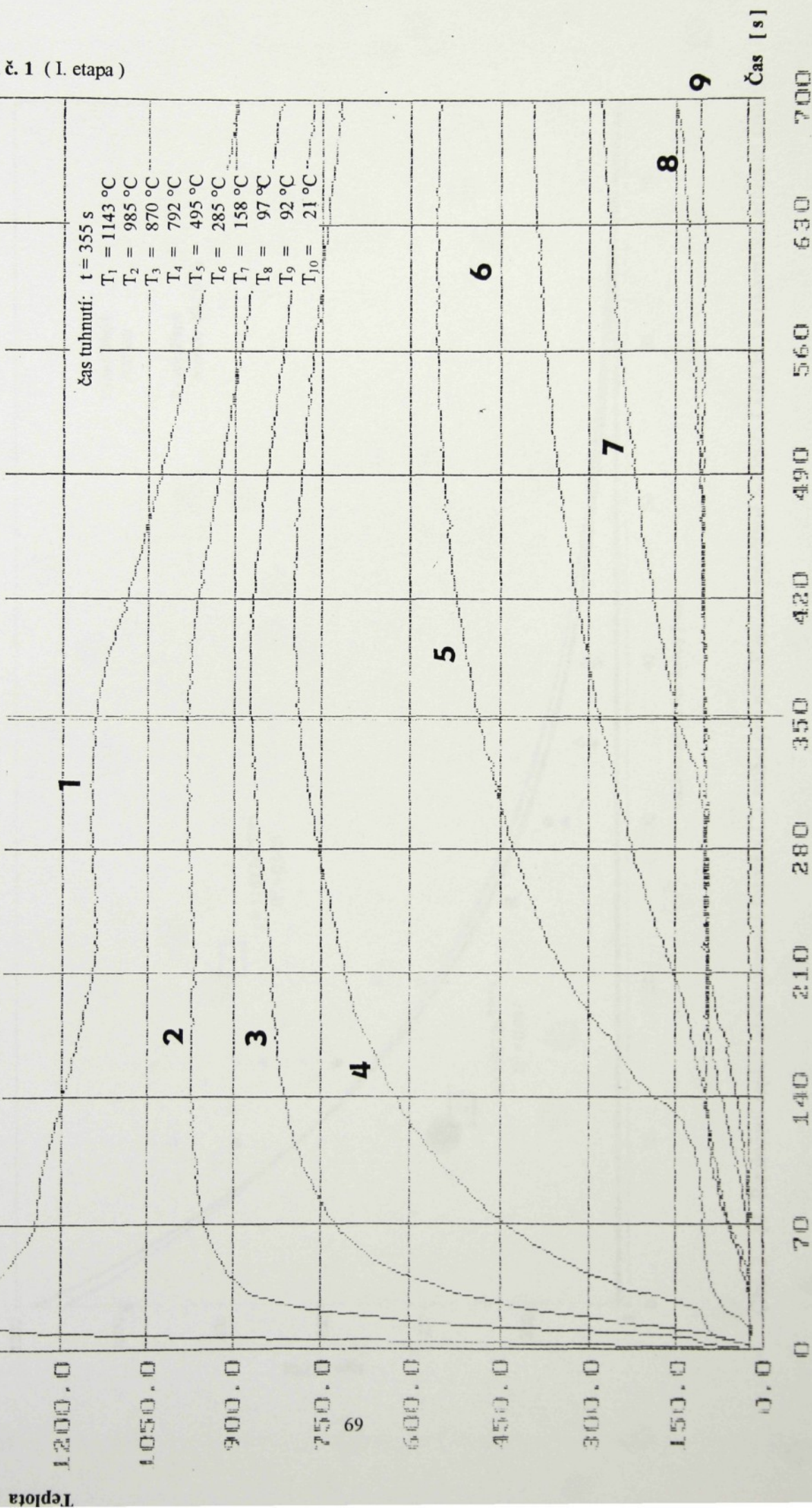
tepelná vodivost formy z CT směsi pro jednotlivé teploty:

TEPLOTA [°C]	původní hodnota λ	upravená hodnota λ
20	0,00733	0,00383
200	0,00640	0,00290
400	0,00586	0,00236
600	0,00590	0,00240
800	0,00640	0,00290
1000	0,00703	0,00793
1300	--	0,01800
1500	0,00700	0,01809

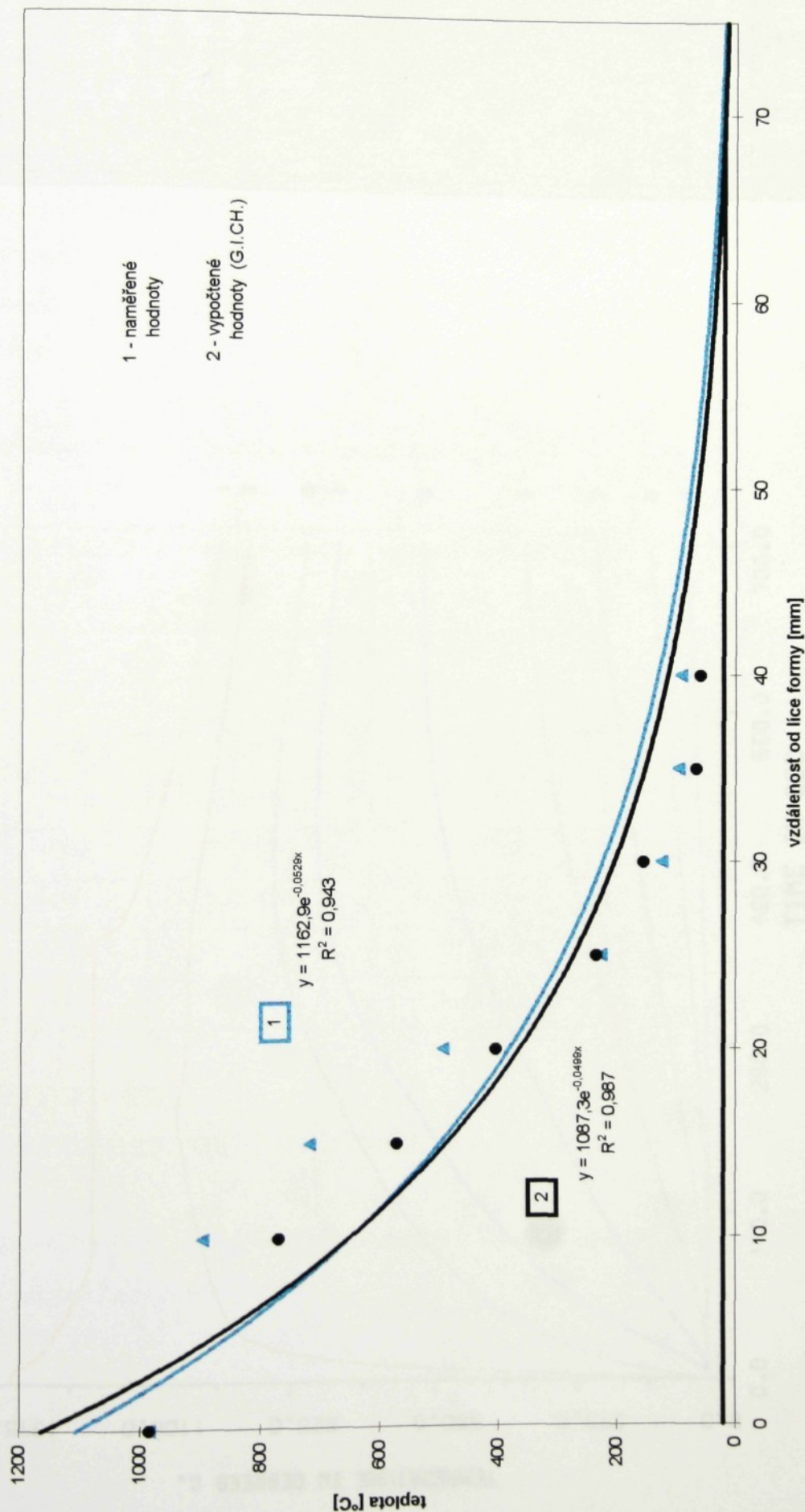
TEMPERATUR [GRAD C.]
WAERMELEITFAEHIGKEIT [W / (CM*GRAD C.)]

Ostatní tepelně-fyzikální veličiny potřebné k simulaci byly dle databanky programu SIMTEC použity beze změny.

Obr. 3-12 Časové závislosti teplot ve formě z CT směsi 170 x 220 x 200 mm v určitých vzdálenostech od jejího lce při odlévání odlitku Ø 40 x 200 mm z LLG.

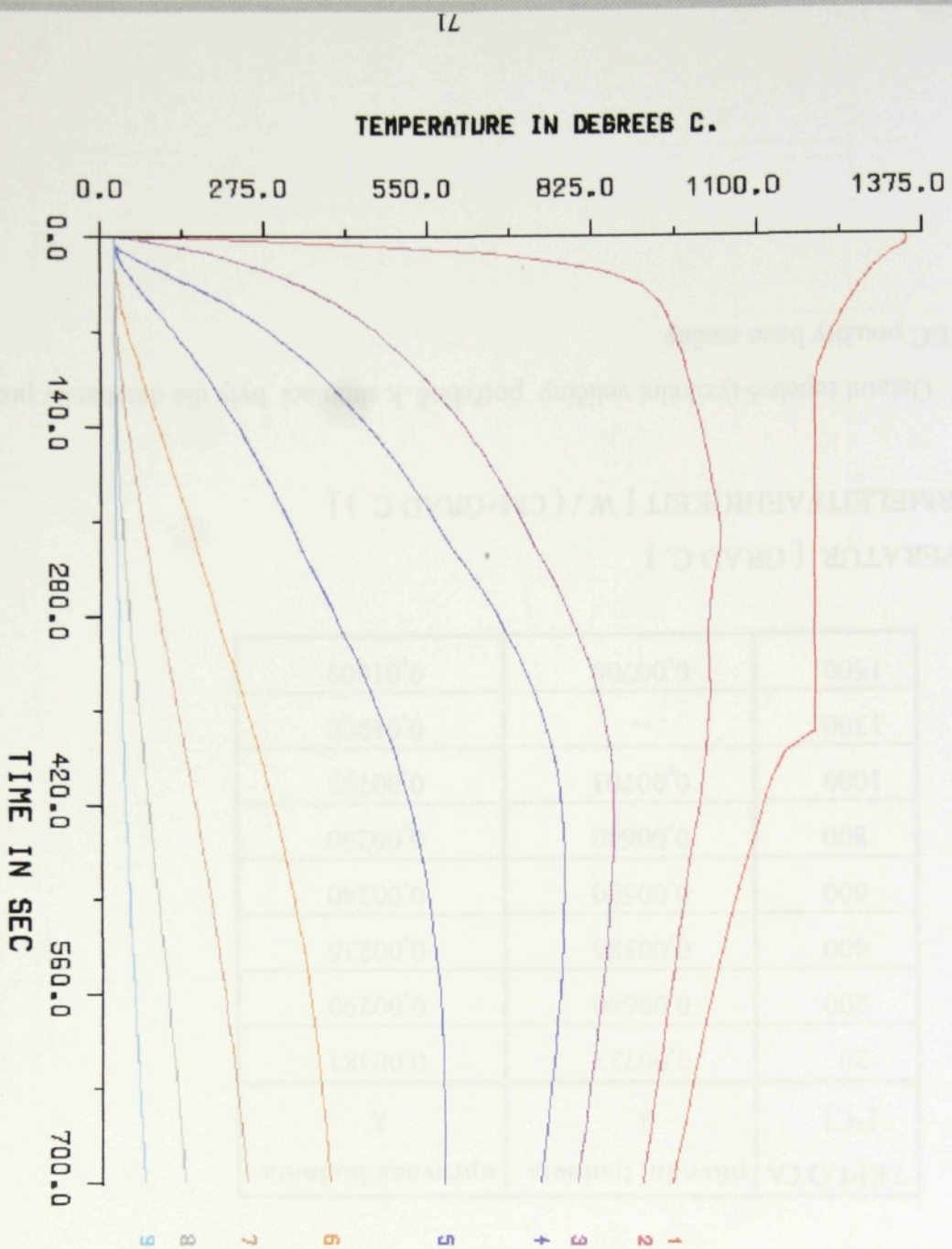


CT-směs (170x220x200mm)



Obr. 3 - 13 Rozložení teplot ve slévárenské formě z CT směsi pro naměřené a vypočtené hodnoty (GICH) v okamžiku ztuhnutí odlitku

Obr. 3 - 14 Namodelované časové závislosti teplot ve formě z CT směsi (program SIMTEC)



Bez-plneni.pr.j/F_ctpisek

Temperature - time / cooling curves



PARAM INFO
CO. OR FONT
PRINT HELP

END

PRINT

11-15 INFO

06-10 INFO

01-05 INFO

TIME CURV.

CALCULATE

3D-POINTS

2D POINTS

DRAW MENU

MĚŘENÍ č. 2 (I. etapa měření)

použitá forma: 170 x 220 x 200 mm

materiál formy: **CT směs**

odlévaný materiál: LLG

počáteční teplota formy: $T_F = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$

teplota likvidu: $T_L = 1250\text{ }^{\circ}\text{C}$

teplota solidu: $T_S = 1132\text{ }^{\circ}\text{C}$

latentní teplo: $950\text{ [J . cm}^{-3}\text{]}$

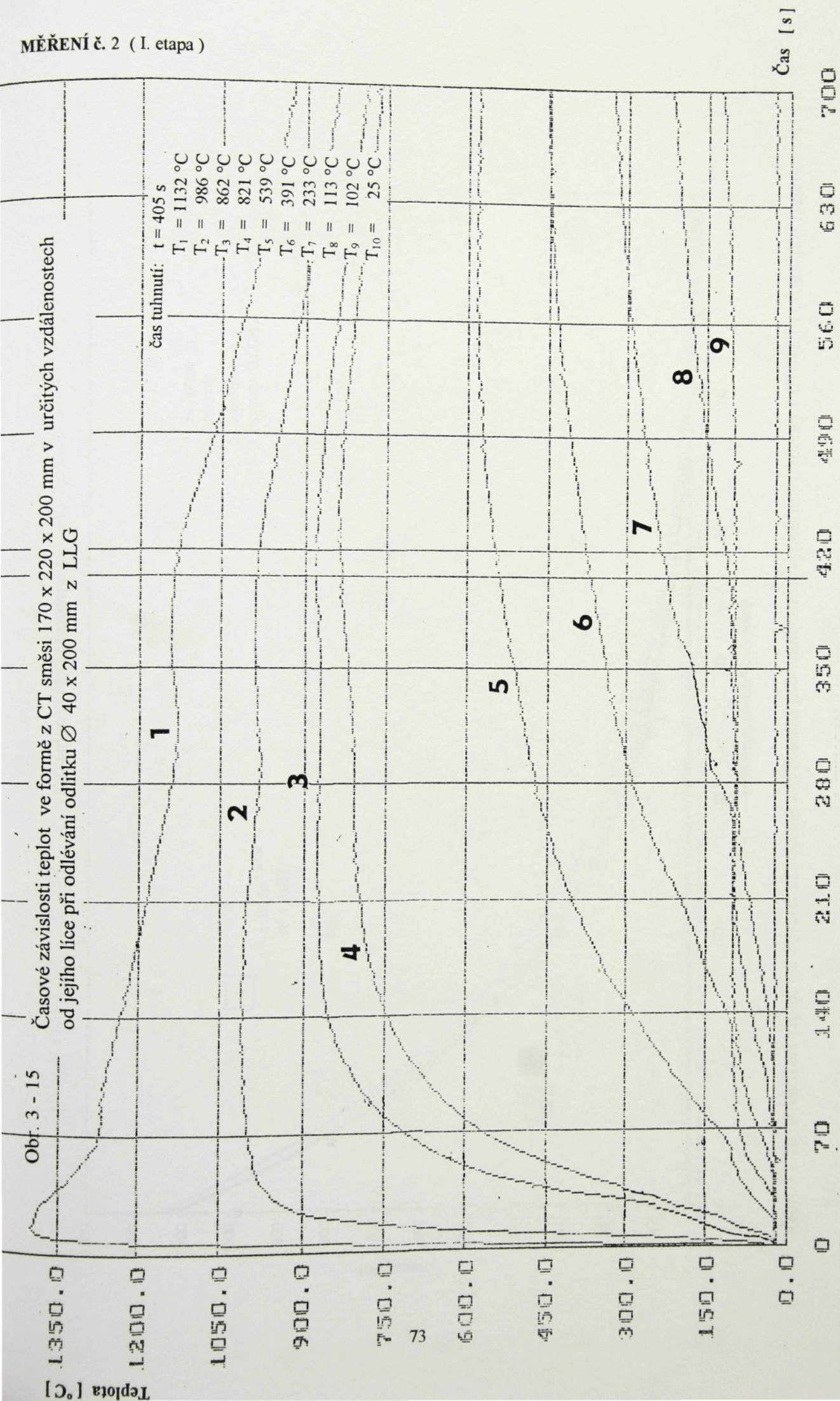
tepelná vodivost formy z CT směsi pro jednotlivé teploty:

TEPLOTA [$^{\circ}\text{C}$]	původní hodnota λ	upravená hodnota λ
20	0,00733	0,00383
200	0,00640	0,00290
400	0,00586	0,00236
600	0,00590	0,00240
800	0,00640	0,00290
1000	0,00703	0,00793
1300	--	0,01800
1500	0,00700	0,01809

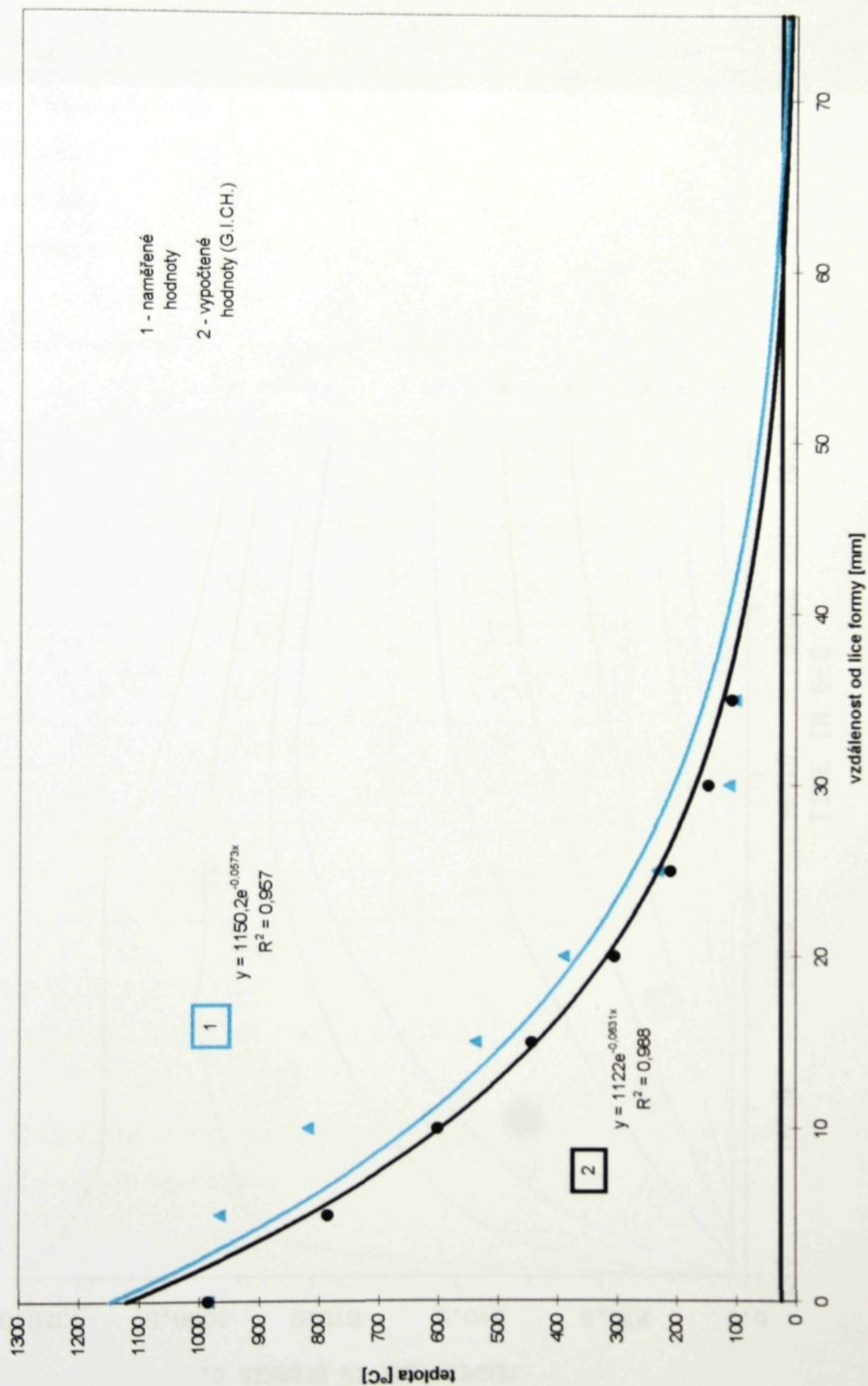
TEMPERATUR [GRAD C.]

WAERMELEITFAEHIGKEIT [W / (CM*GRAD C.)]

Ostatní tepelně-fyzikální veličiny potřebné k simulaci byly dle databanky programu SIMTEC použity beze změny.

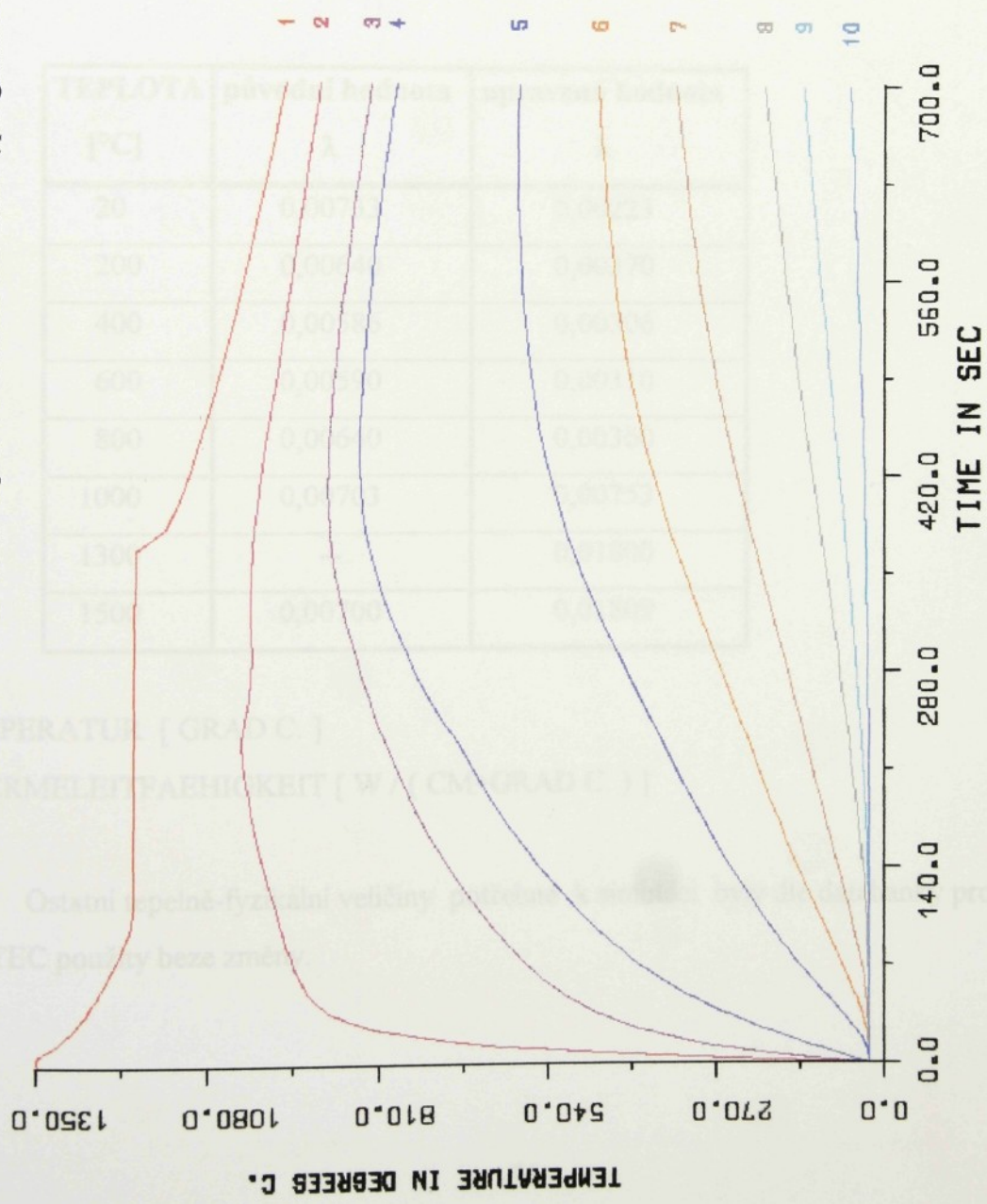


CT-směs (170x220x200mm)



Obr. 3 - 16 Rozložení teplot ve slévárenské formě z CT směsi pro naměřené a vypočtené hodnoty (GICH) v okamžiku ztuhnutí odlitku

Obr. 3 - 17 Namodelované časové závislosti teplot ve formě z CT směsi (program SIMTEC)



Bez_plneni.prj/F_ctpisek

Temperature - time / cooling curves

MĚŘENÍ č. 3 (I. etapa měření)

použitá forma: 170 x 220 x 200 mm

materiál formy: **JFS**

odlévaný materiál: LLG

počáteční teplota formy: $T_F = 21\text{ }^{\circ}\text{C}$

teplota likvidu: $T_L = 1280\text{ }^{\circ}\text{C}$

teplota solidu: $T_S = 1146\text{ }^{\circ}\text{C}$

latentní teplo: $1350\text{ [J . cm}^{-3}\text{]}$

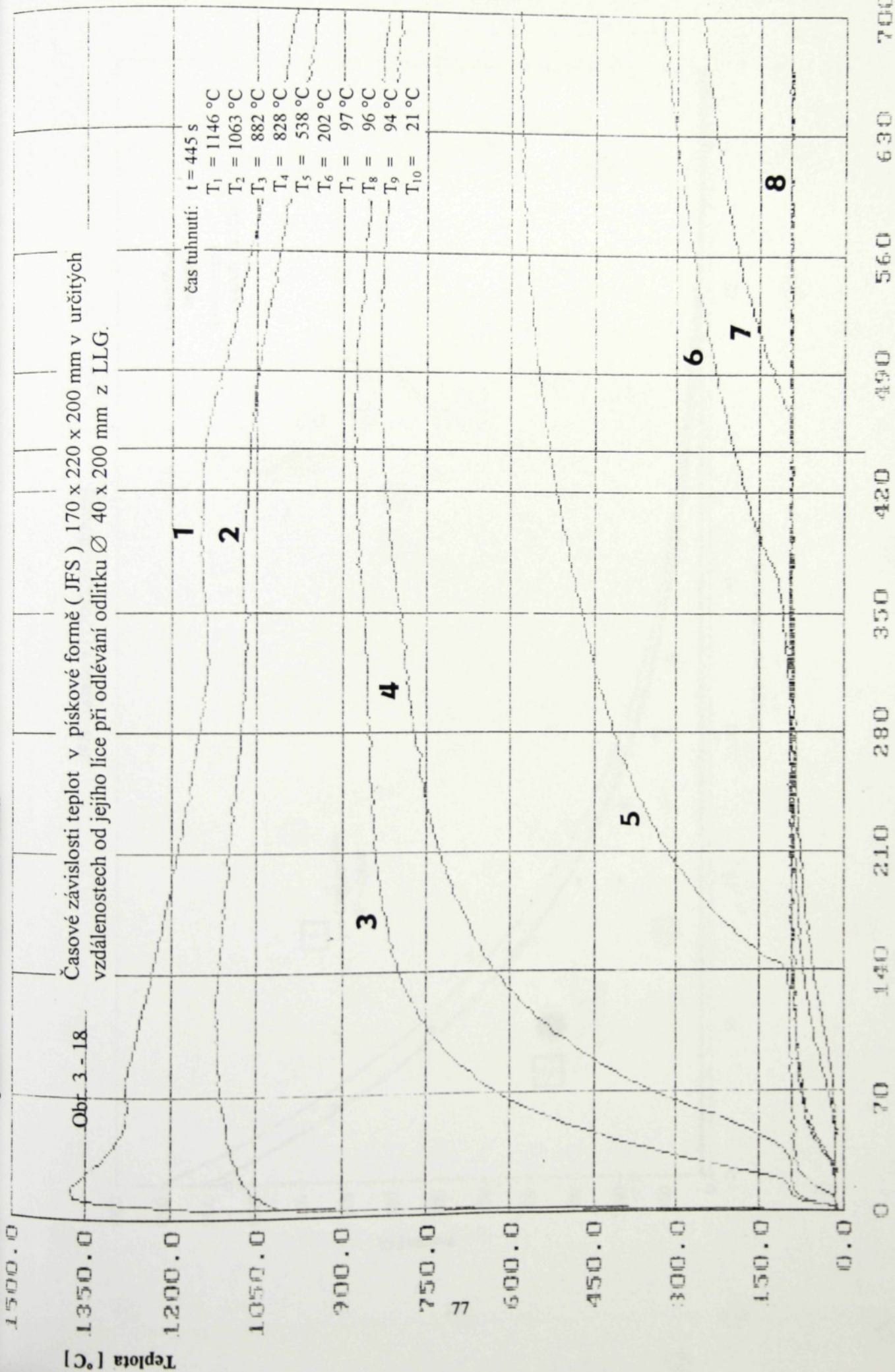
tepelná vodivost formy z JFS pro jednotlivé teploty:

TEPLOTA [$^{\circ}\text{C}$]	původní hodnota λ	upravená hodnota λ
20	0,00733	0,00223
200	0,00640	0,00370
400	0,00586	0,00306
600	0,00590	0,00310
800	0,00640	0,00360
1000	0,00703	0,00753
1300	--	0,01800
1500	0,00700	0,01809

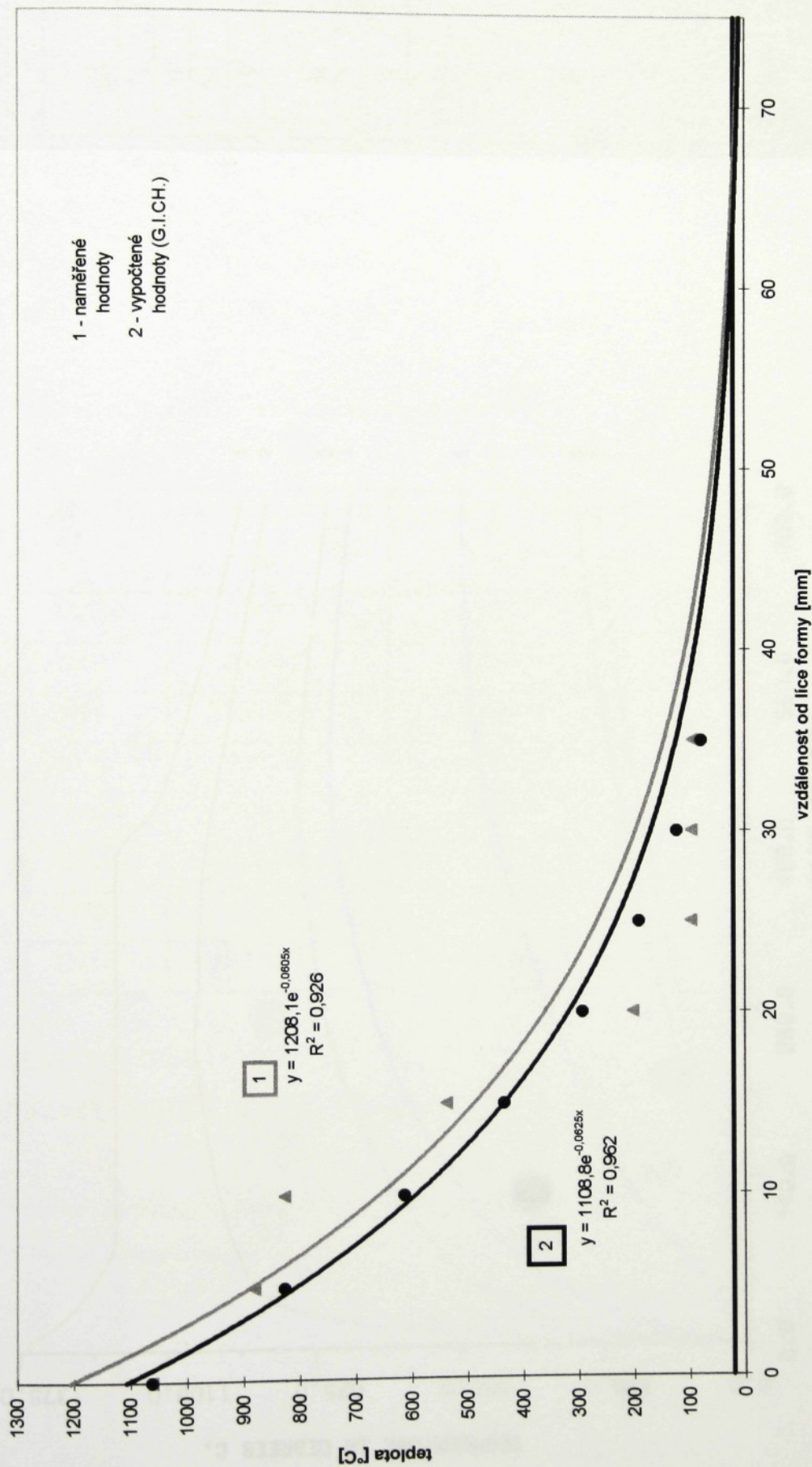
TEMPERATUR [GRAD C.]

WAERMELEITFAEHIGKEIT [W / (CM*GRAD C.)]

Ostatní tepelně-fyzikální veličiny potřebné k simulaci byly dle databanky programu SIMTEC použity beze změny.

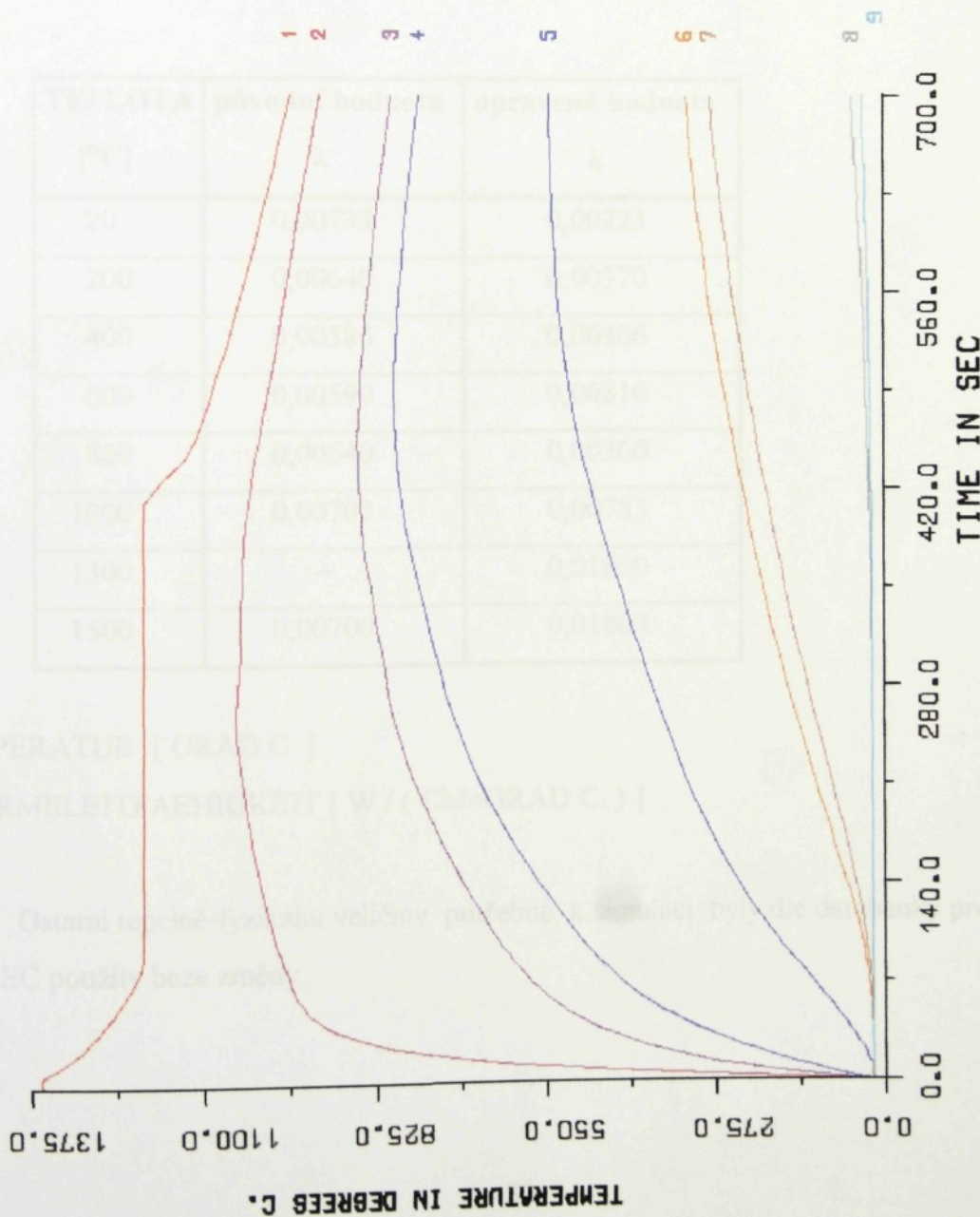


JFS-Ostašov (170x220x200mm)



Obr. 3 - 19 Rozložení teplot ve slévárenské formě z JFS pro naměřené a vypočtené hodnoty (GICH) v okamžiku ztuhnutí odlitku

Obr. 3 - 20 Namodelované časové závislosti teplot ve formě z JFS (program SIMTEC)



Bez_plneni1.pr.j/F_jfs

DRAW NEW

2D POINTS

3D-POINTS

CALCULATE

TIME CURV.

01-05 INF-0

06-10 INF-0

11-15 INF-0

PRINT

END

PARAM INFO

COLOR FONT

PRINT HELP



MĚŘENÍ č. 4 (I. etapa měření)

použitá forma: 170 x 220 x 200 mm

materiál formy: **JFS**

odlévaný materiál: LLG

počáteční teplota formy: $T_F = 21\text{ }^{\circ}\text{C}$

teplota likvidu: $T_L = 1280\text{ }^{\circ}\text{C}$

teplota solidu: $T_S = 1134\text{ }^{\circ}\text{C}$

latentní teplo: $1100\text{ [J . cm}^{-3}\text{]}$

tepelná vodivost formy z JFS pro jednotlivé teploty:

TEPLOTA [$^{\circ}\text{C}$]	původní hodnota λ	upravená hodnota λ
20	0,00733	0,00223
200	0,00640	0,00370
400	0,00586	0,00306
600	0,00590	0,00310
800	0,00640	0,00360
1000	0,00703	0,00753
1300	--	0,01800
1500	0,00700	0,01809

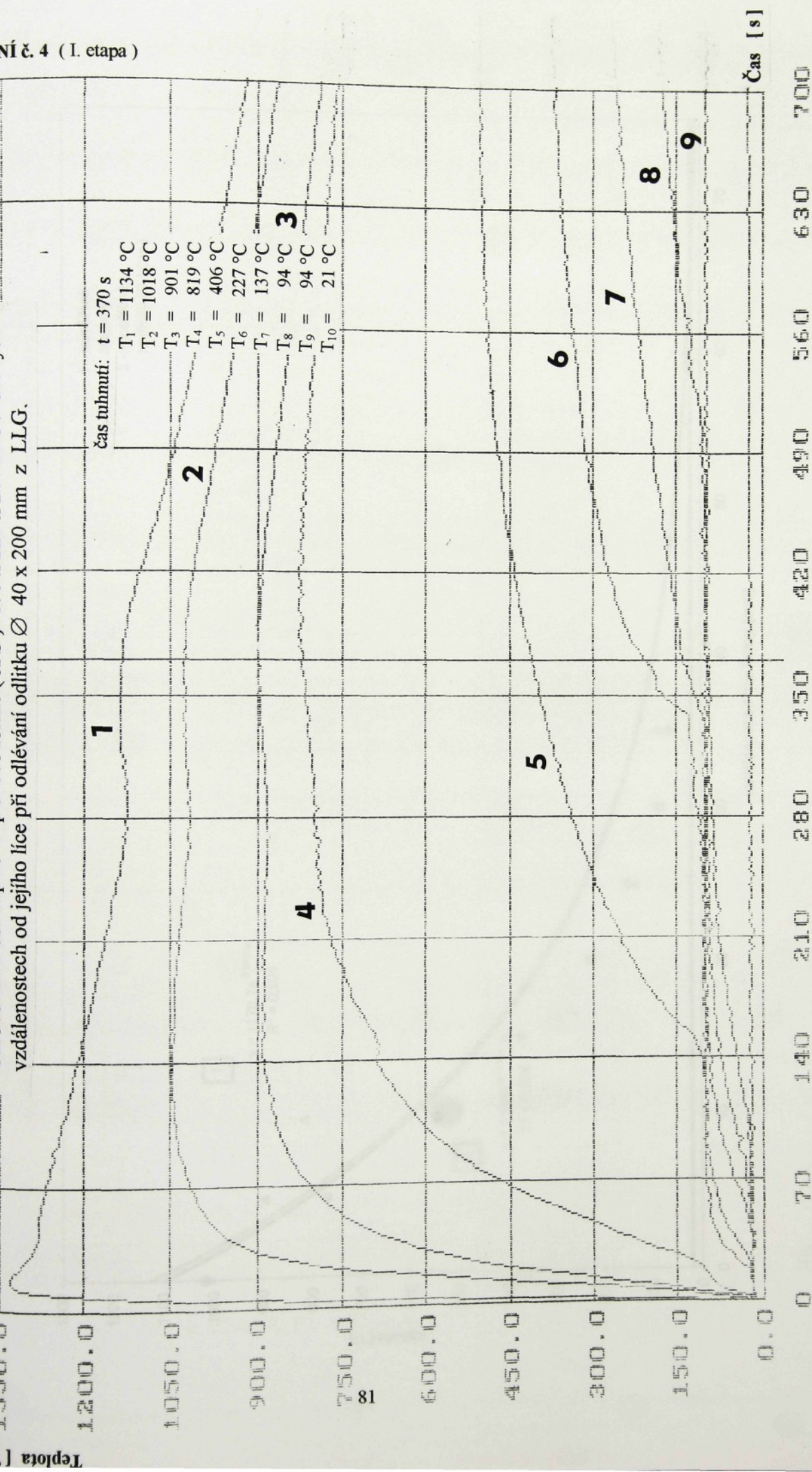
TEMPERATUR [GRAD C.]

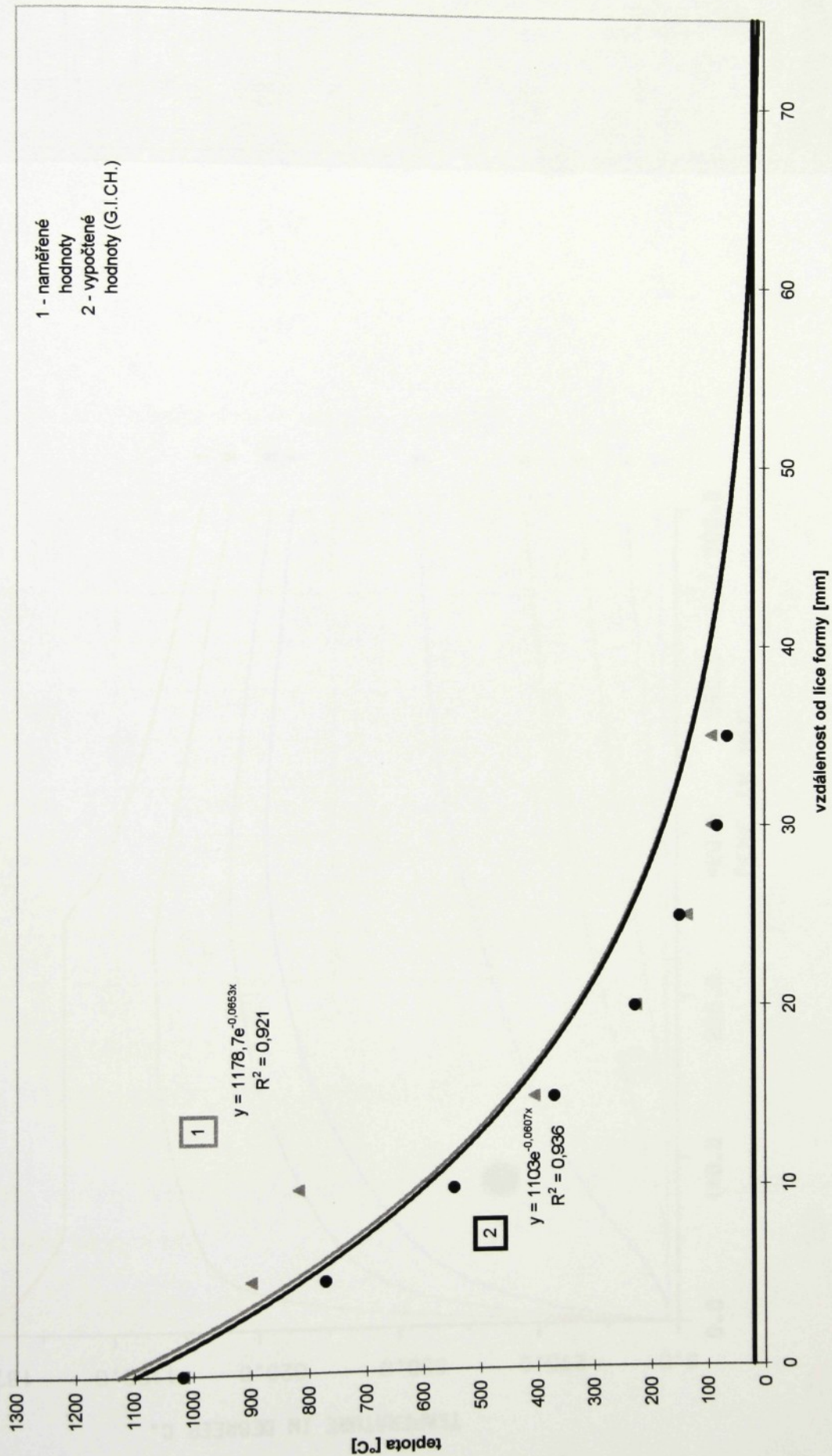
WAERMELEITFAEHIGKEIT [W / (CM*GRAD C.)]

Ostatní tepelně-fyzikální veličiny potřebné k simulaci byly dle databanky programu SIMTEC použity beze změny.

Obr. 3 - 21

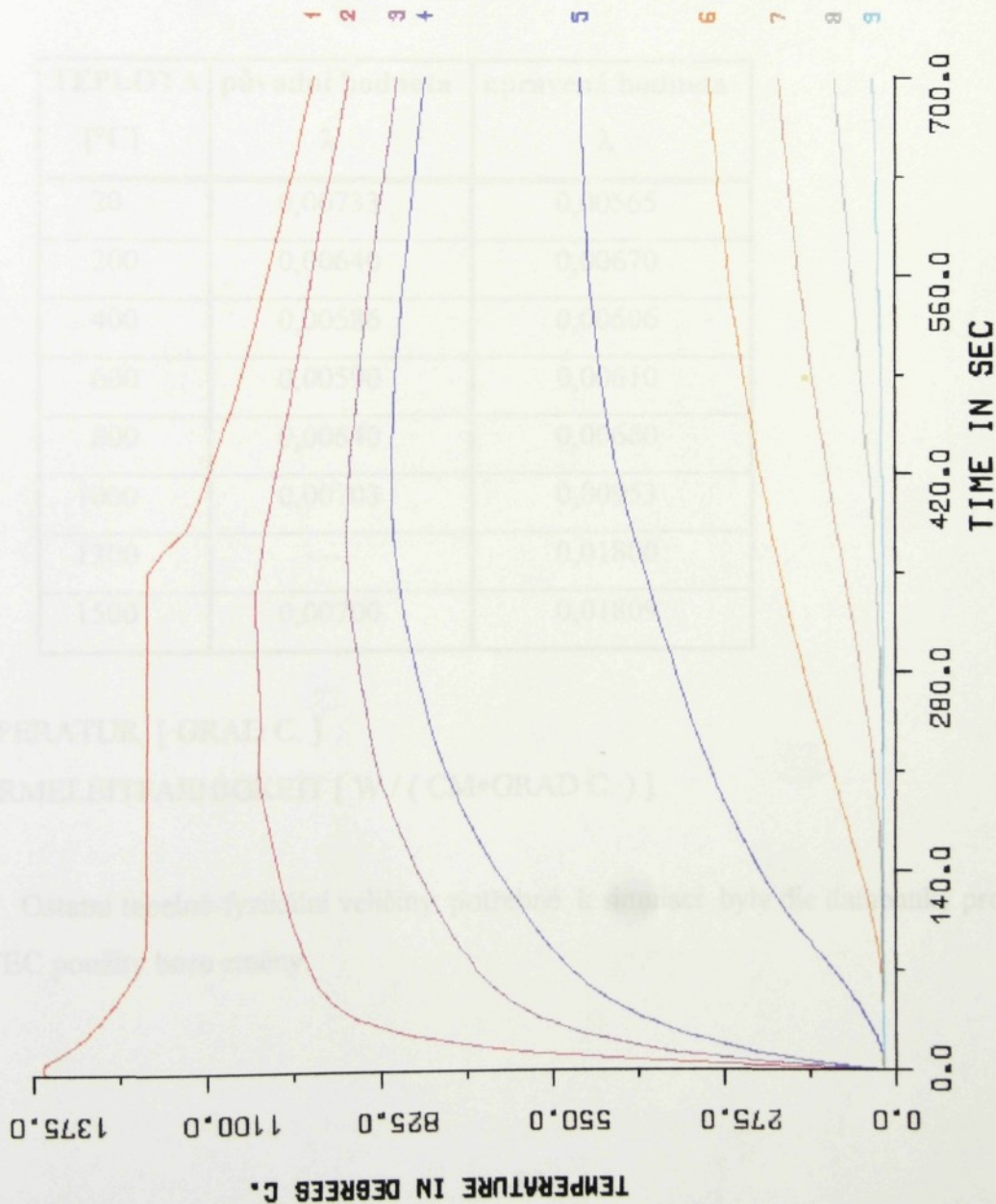
Časové závislosti teplot v pískové formě (JFS) 170 x 220 x 200 mm v určitých vzdálenostech od jejího líce při odlévání odlitku Ø 40 x 200 mm z LLG.





Obr. 3 - 22 Rozložení teplot ve slévárenské formě z JFS pro naměřené a vypočtené hodnoty (GICH) v okamžiku ztuhnutí odlitku

Obr. 3 - 23 Namodelované časové závislosti teplot ve formě z JFS (program SIMTEC)



Bez_plneni.pr j/F_jfs

Temperature - time / cooling curves

DRAW NEW

2D-POINTS

3D-POINTS

CALCULATE

TIME CURV.

01-05 INFO

06-10 INFO

11-15 INFO

PRINT

END

PARAM

INFO

COLOR

FONT

PRINT

HELP

MĚŘENÍ č. 1 (II. etapa měření)

použitá forma: 250 x 250 x 260 mm

materiál formy: **bentonit**

odlévaný materiál: LLG

počáteční teplota formy: $T_F = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$

teplota likvidu: $T_L = 1185\text{ }^{\circ}\text{C}$

teplota solidu: $T_S = 1141\text{ }^{\circ}\text{C}$

latentní teplo: $900\text{ [J . cm}^{-3}\text{]}$

tepelná vodivost formy z bentonitu pro jednotlivé teploty:

TEPLOTA [$^{\circ}\text{C}$]	původní hodnota λ	upravená hodnota λ
20	0,00733	0,00565
200	0,00640	0,00670
400	0,00586	0,00606
600	0,00590	0,00610
800	0,00640	0,00660
1000	0,00703	0,00953
1300	--	0,01800
1500	0,00700	0,01809

TEMPERATUR [GRAD C.]

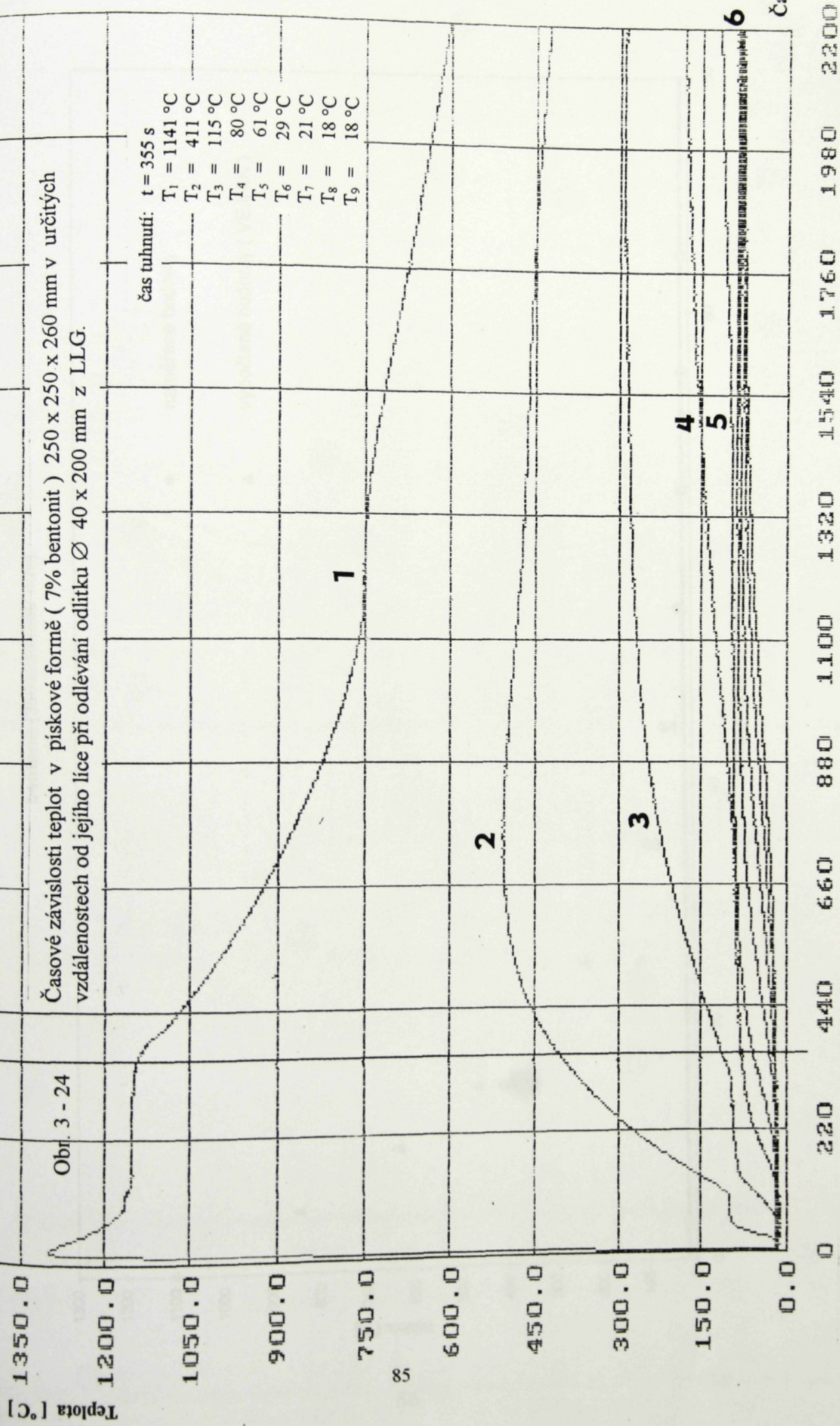
WAERMELEITFAEHIGKEIT [W / (CM*GRAD C.)]

Ostatní tepelně-fyzikální veličiny potřebné k simulaci byly dle databanky programu SIMTEC použity beze změny.

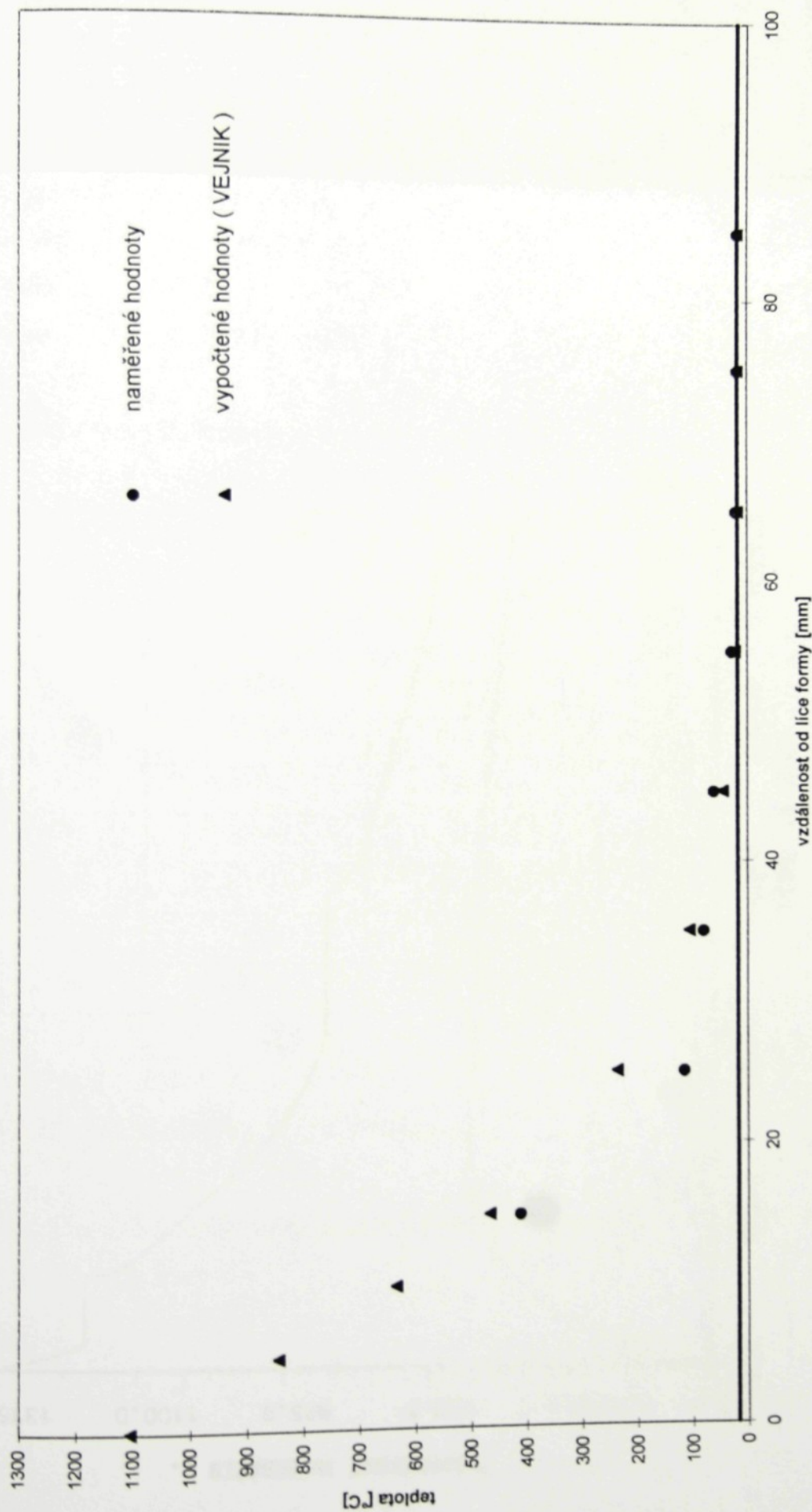
Obř. 3 - 24

Časové závislosti teplot v pískové formě (7% bentonit) 250 x 250 x 260 mm v určitých vzdálenostech od jejího lince při odlévání odlitku Ø 40 x 200 mm z LLG.

čas tuhnutí: t = 355 s
T₁ = 1141 °C
T₂ = 411 °C
T₃ = 115 °C
T₄ = 80 °C
T₅ = 61 °C
T₆ = 29 °C
T₇ = 21 °C
T₈ = 18 °C
T₉ = 18 °C

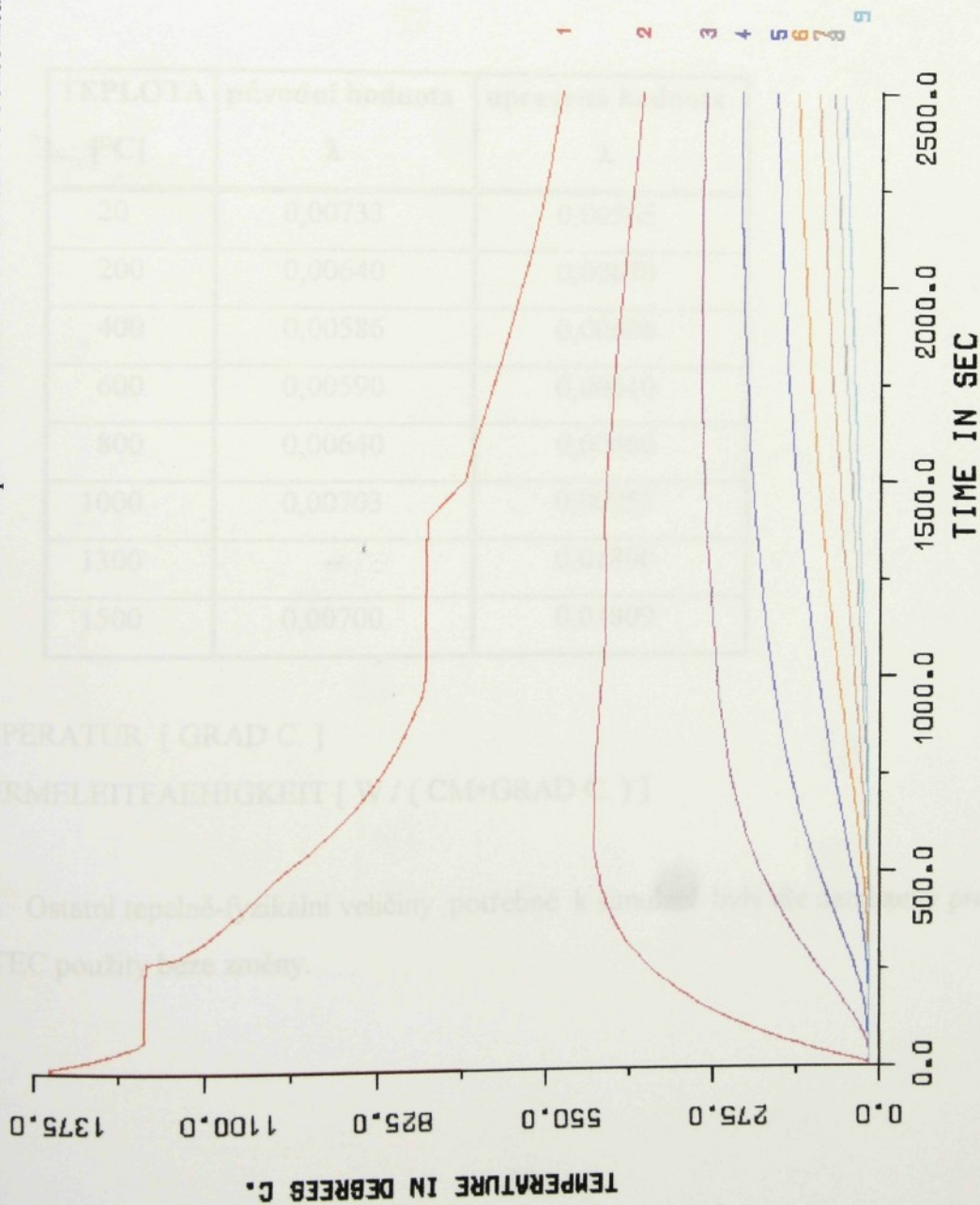


bentonit (250x250x260 mm)



Obr. 3 - 25 Rozložení teplot ve slévárenské formě z bentonitu pro naměřené a vypočtené hodnoty (dle VEJNÍKA) v okamžiku ztuhnutí odlitku

Obr. 3 - 26 Namodelované časové závislosti teplot ve formě ze směsi se 7% bentonitu (program SIMTEC)



Eut_s_plnenim.pr.j/F_bentonit

Temperature - time / cooling curves

MĚŘENÍ č. 2 (II. etapa měření)

použitá forma: 250 x 250 x 260 mm
materiál formy: **bentonit**
odlévaný materiál: LLG
počáteční teplota formy: $T_F = 14\text{ }^{\circ}\text{C}$
teplota likvidu: $T_L = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$
teplota solidu: $T_S = 1136\text{ }^{\circ}\text{C}$
latentní teplo: $750\text{ [J . cm}^{-3}\text{]}$

tepelná vodivost formy z bentonitu pro jednotlivé teploty:

TEPLOTA [$^{\circ}\text{C}$]	původní hodnota λ	upravená hodnota λ
20	0,00733	0,00565
200	0,00640	0,00670
400	0,00586	0,00606
600	0,00590	0,00610
800	0,00640	0,00660
1000	0,00703	0,00953
1300	--	0,01800
1500	0,00700	0,01809

TEMPERATUR [GRAD C.]

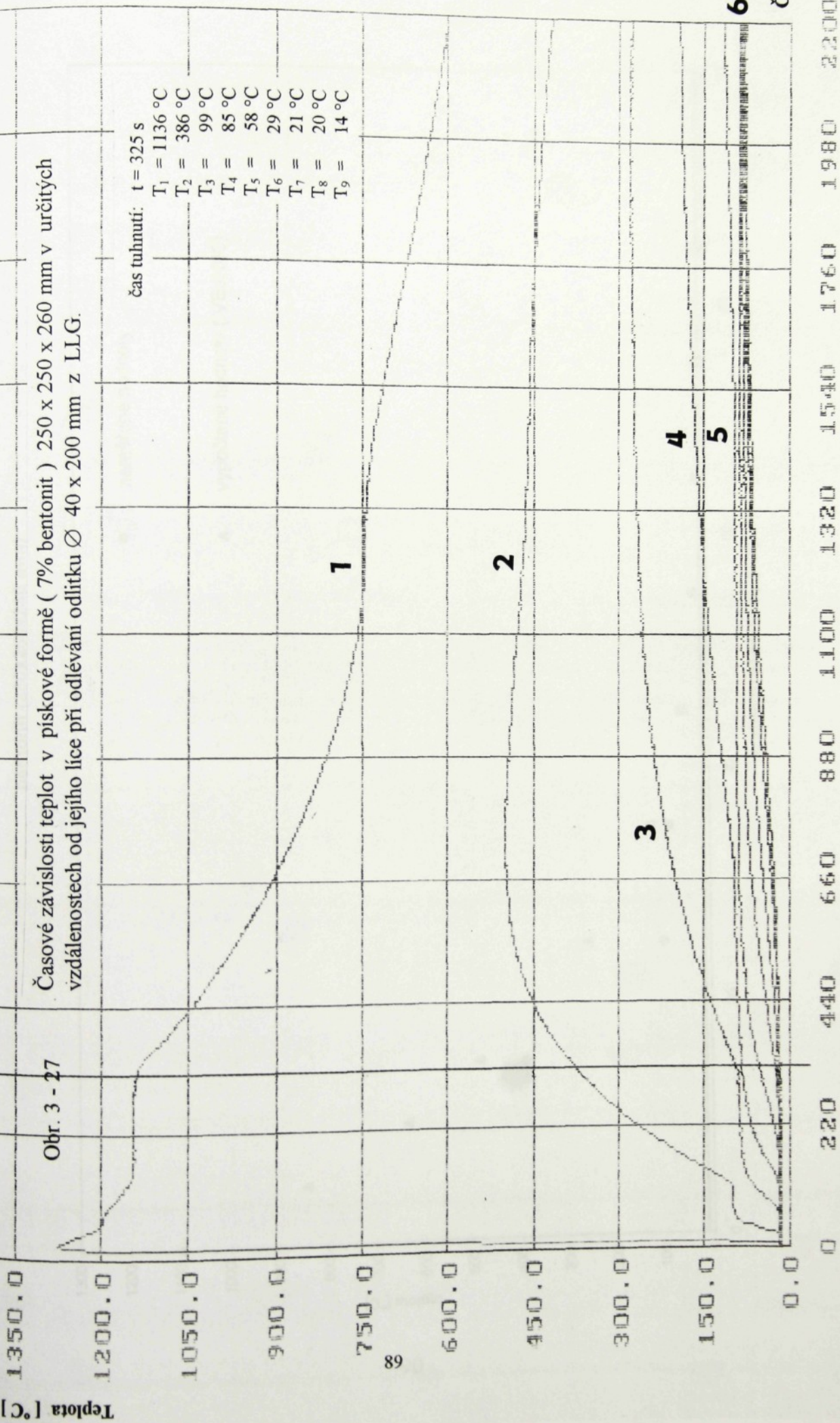
WAERMELEITFAEHIGKEIT [W / (CM*GRAD C.)]

Ostatní tepelně-fyzikální veličiny potřebné k simulaci byly dle databanky programu SIMTEC použity beze změny.

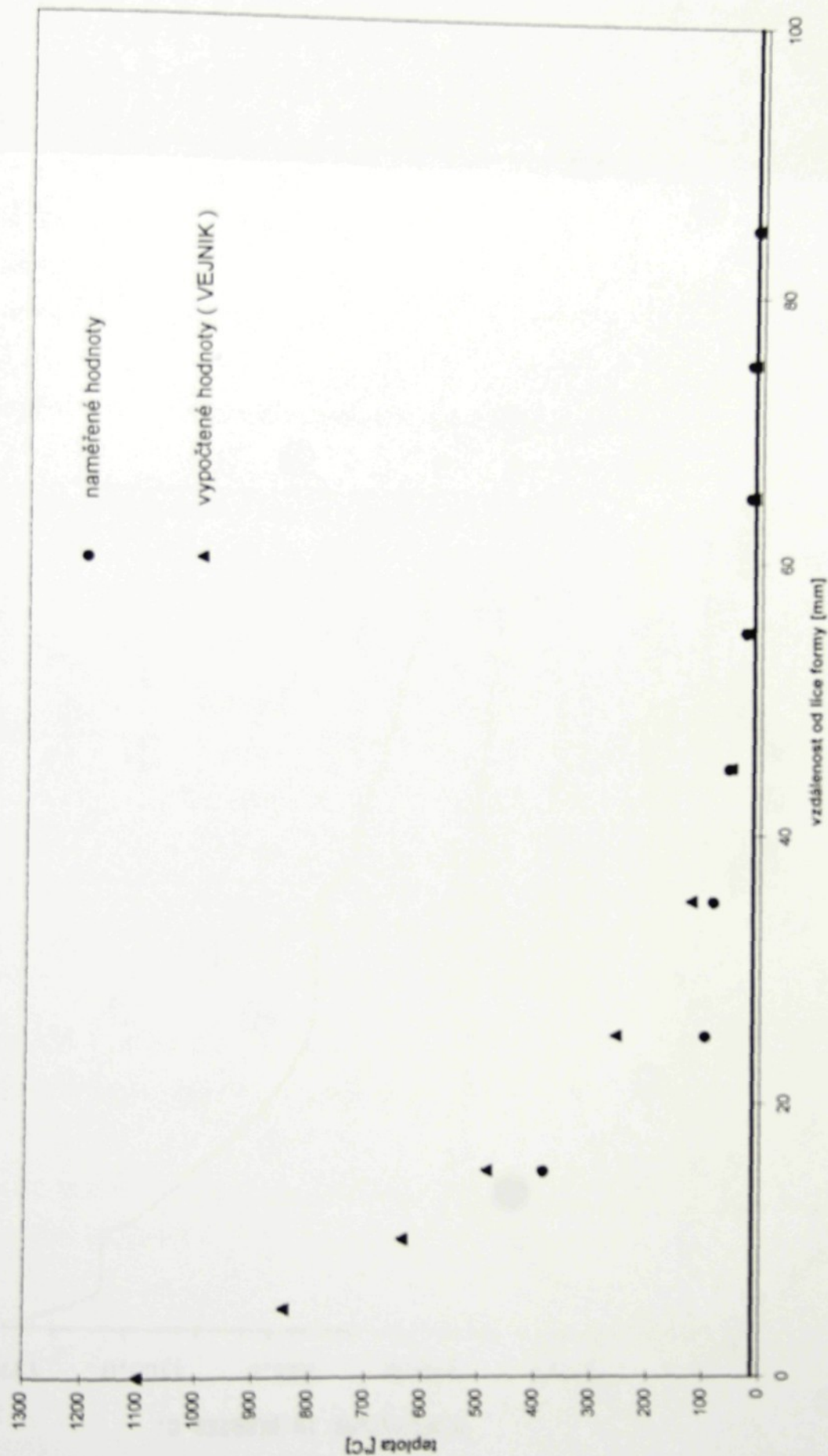
Obr. 3 - 27

Časové závislosti teplot v pískové formě (7% bentonit) 250 x 250 x 260 mm v určitých vzdálenostech od jejího líce při odlévání odlitku Ø 40 x 200 mm z LLG.

čas tuhnutí: $t = 325\text{ s}$
 $T_1 = 1136\text{ }^{\circ}\text{C}$
 $T_2 = 386\text{ }^{\circ}\text{C}$
 $T_3 = 99\text{ }^{\circ}\text{C}$
 $T_4 = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$
 $T_5 = 58\text{ }^{\circ}\text{C}$
 $T_6 = 29\text{ }^{\circ}\text{C}$
 $T_7 = 21\text{ }^{\circ}\text{C}$
 $T_8 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
 $T_9 = 14\text{ }^{\circ}\text{C}$

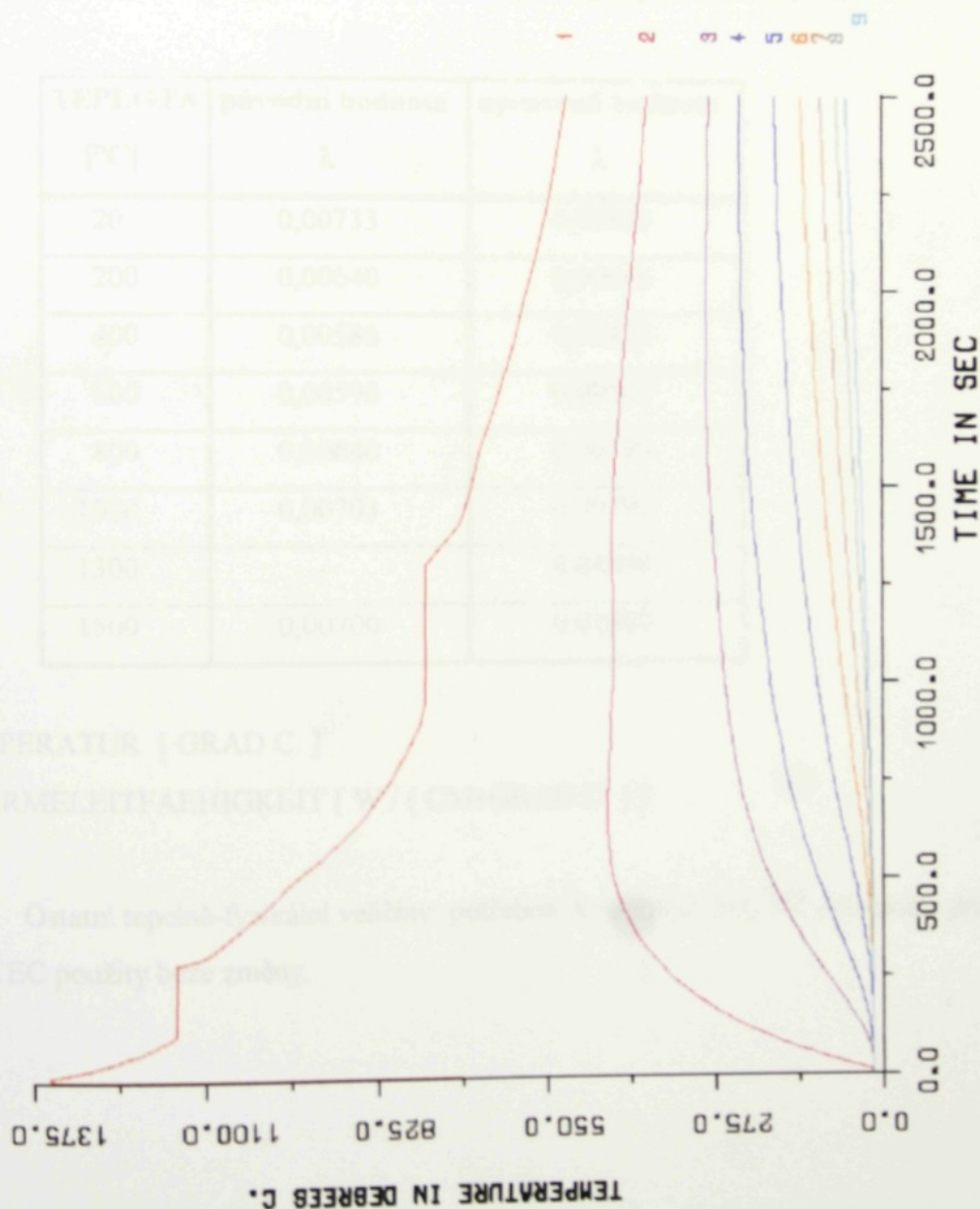


bentonit (250x250x260 mm)



Obr. 3 - 28 Rozložení teplot ve slévárenské formě z bentonitu pro naměřené a vypočtené hodnoty (dle VEJNÍKA) v okamžiku ztuhnutí odlitku

Obr. 3 - 29 Namodelované časové závislosti teplot ve formě ze směsi se 7% bentonitu (program SIMTEC)



Eut_s_plnenim.prj/F_bentonit

Temperature - time / cooling curves

MĚŘENÍ č. 3 (II. etapa měření)

- použitá forma: 250 x 250 x 260 mm
- materiál formy: **přírodní směr rájeckého písku**
- odlévaný materiál: LLG
- počáteční teplota formy: $T_F = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$
- teplota likvidu: $T_L = 1195\text{ }^{\circ}\text{C}$
- teplota solidu: $T_S = 1138\text{ }^{\circ}\text{C}$
- latentní teplo: $650\text{ [J . cm}^{-3}\text{]}$

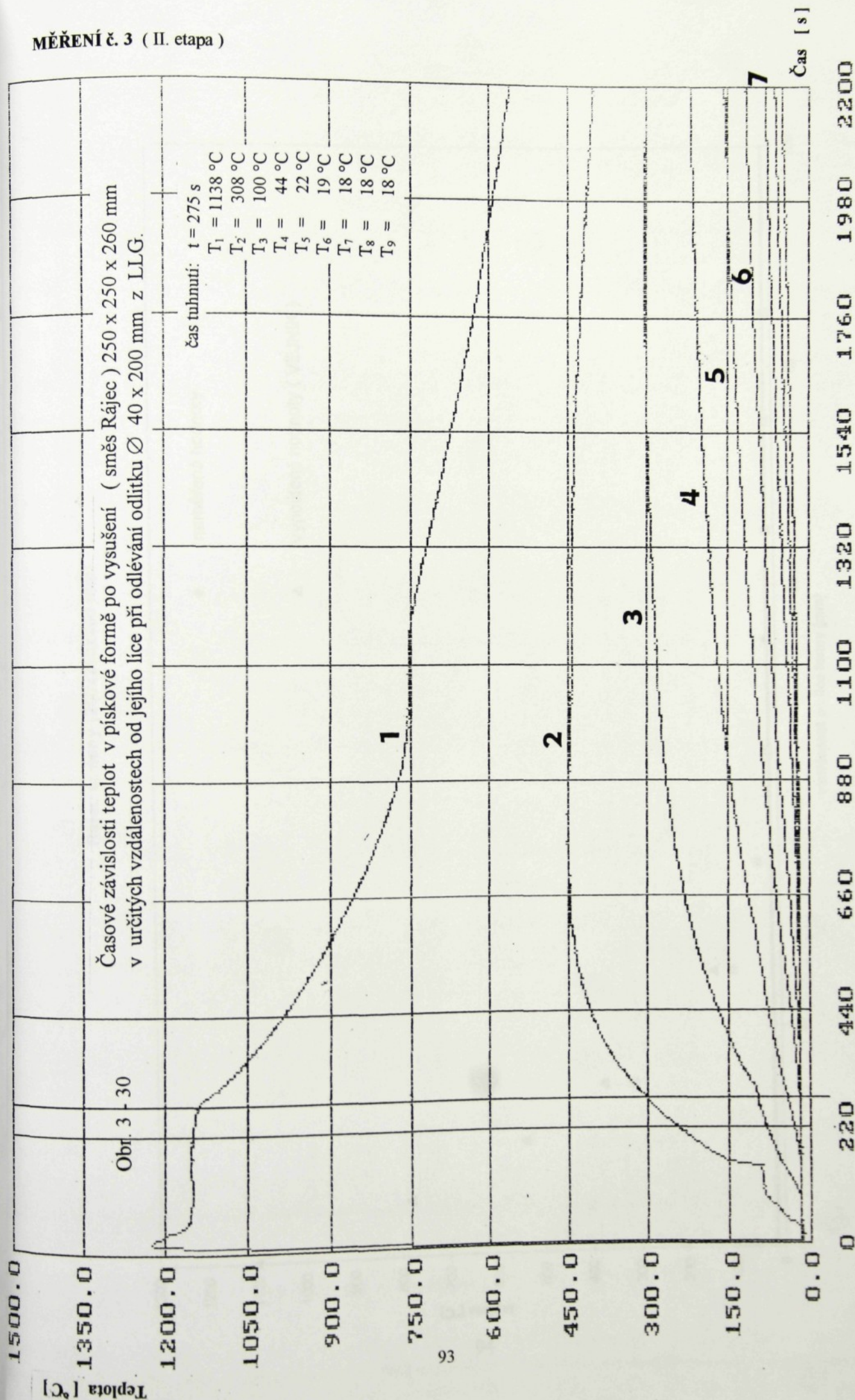
tepelná vodivost formy z přírodního rájeckého písku pro jednotlivé teploty:

TEPLOTA [°C]	původní hodnota λ	upravená hodnota λ
20	0,00733	0,00836
200	0,00640	0,00666
400	0,00586	0,00426
600	0,00590	0,00540
800	0,00640	0,00390
1000	0,00703	0,00790
1300	--	0,01800
1500	0,00700	0,01809

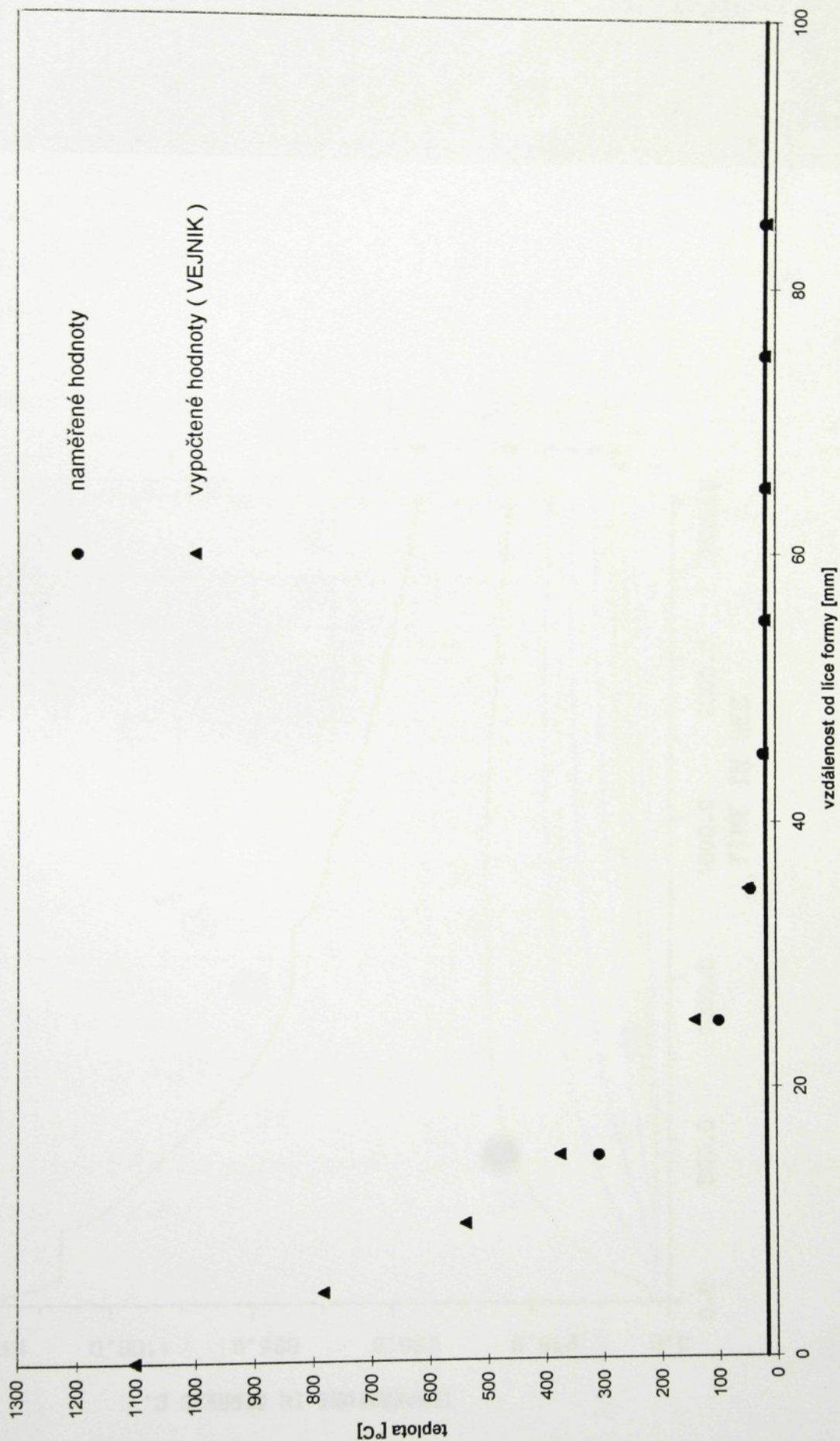
TEMPERATUR [GRAD C.]

WAERMELEITFAEHIGKEIT [W / (CM*GRAD C.)]

Ostatní tepelně-fyzikální veličiny potřebné k simulaci byly dle databanky programu SIMTEC použity beze změny.

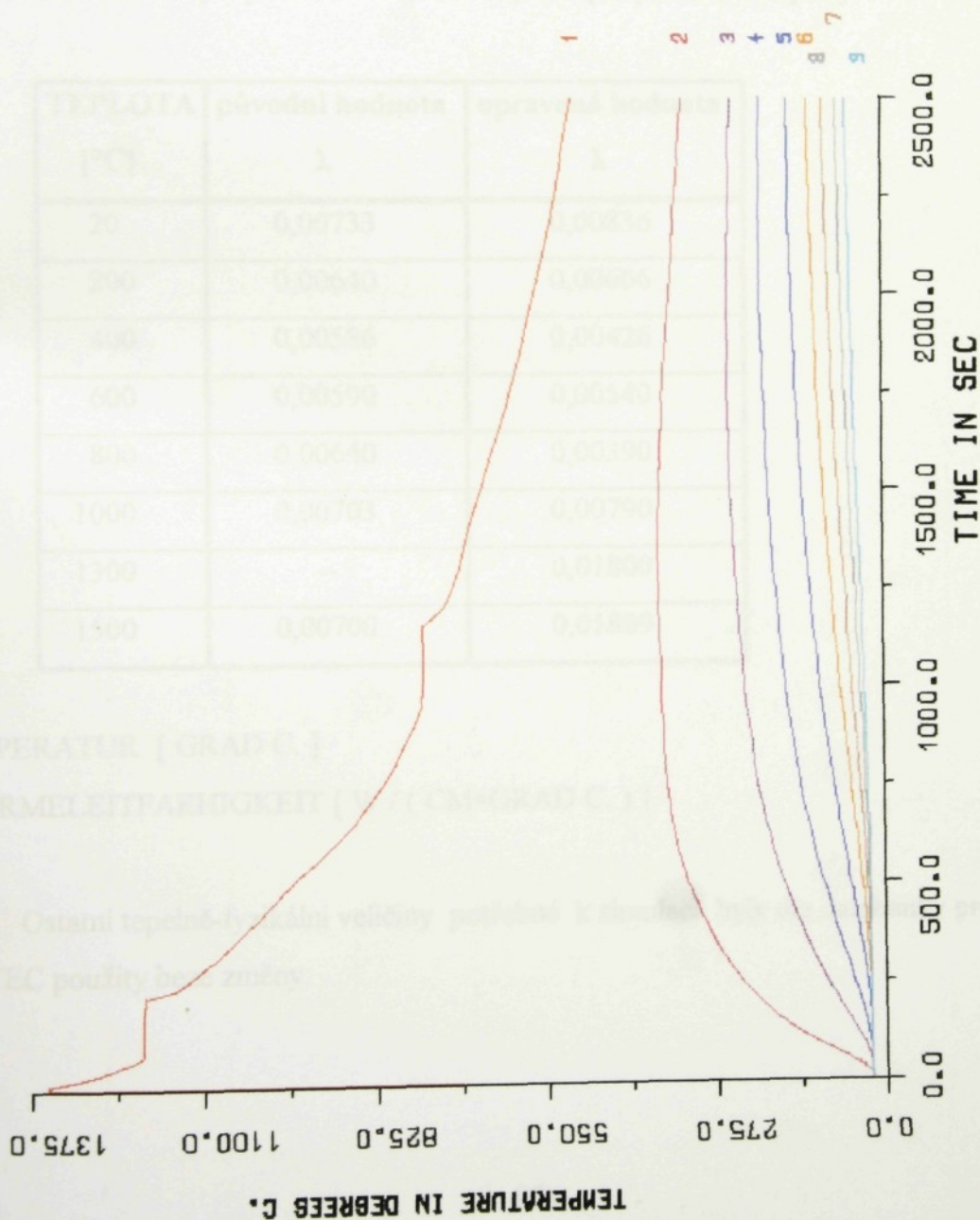


Rájec sušený (250x250x260 mm)



Obr. 3 - 31 Rozložení teplot ve slévárenské formě z rájeckého písku pro naměřené a vypočtené hodnoty (dle VEJNÍKA) v okamžiku ztuhnutí odlitku

Obr. 3 - 32 Namodelované časové závislosti teplot ve formě z rájeckého písku (program SIMTEC)



Eut_s_plnenim.prj/F_rajec

Temperature ~ time / cooling curves

MĚŘENÍ č. 4 (II. etapa měření)

použitá forma: 250 x 250 x 260 mm
materiál formy: **přírodní směr rájeckého písku**
odlévaný materiál: LLG
počáteční teplota formy: $T_F = 14\text{ }^{\circ}\text{C}$
teplota likvidu: $T_L = 1193\text{ }^{\circ}\text{C}$
teplota solidu: $T_S = 1139\text{ }^{\circ}\text{C}$
latentní teplo: $650\text{ [J . cm}^{-3}\text{]}$

tepelná vodivost formy z přírodního rájeckého písku pro jednotlivé teploty:

TEPLOTA [$^{\circ}\text{C}$]	původní hodnota λ	upravená hodnota λ
20	0,00733	0,00836
200	0,00640	0,00666
400	0,00586	0,00426
600	0,00590	0,00540
800	0,00640	0,00390
1000	0,00703	0,00790
1300	--	0,01800
1500	0,00700	0,01809

TEMPERATUR [GRAD C.]

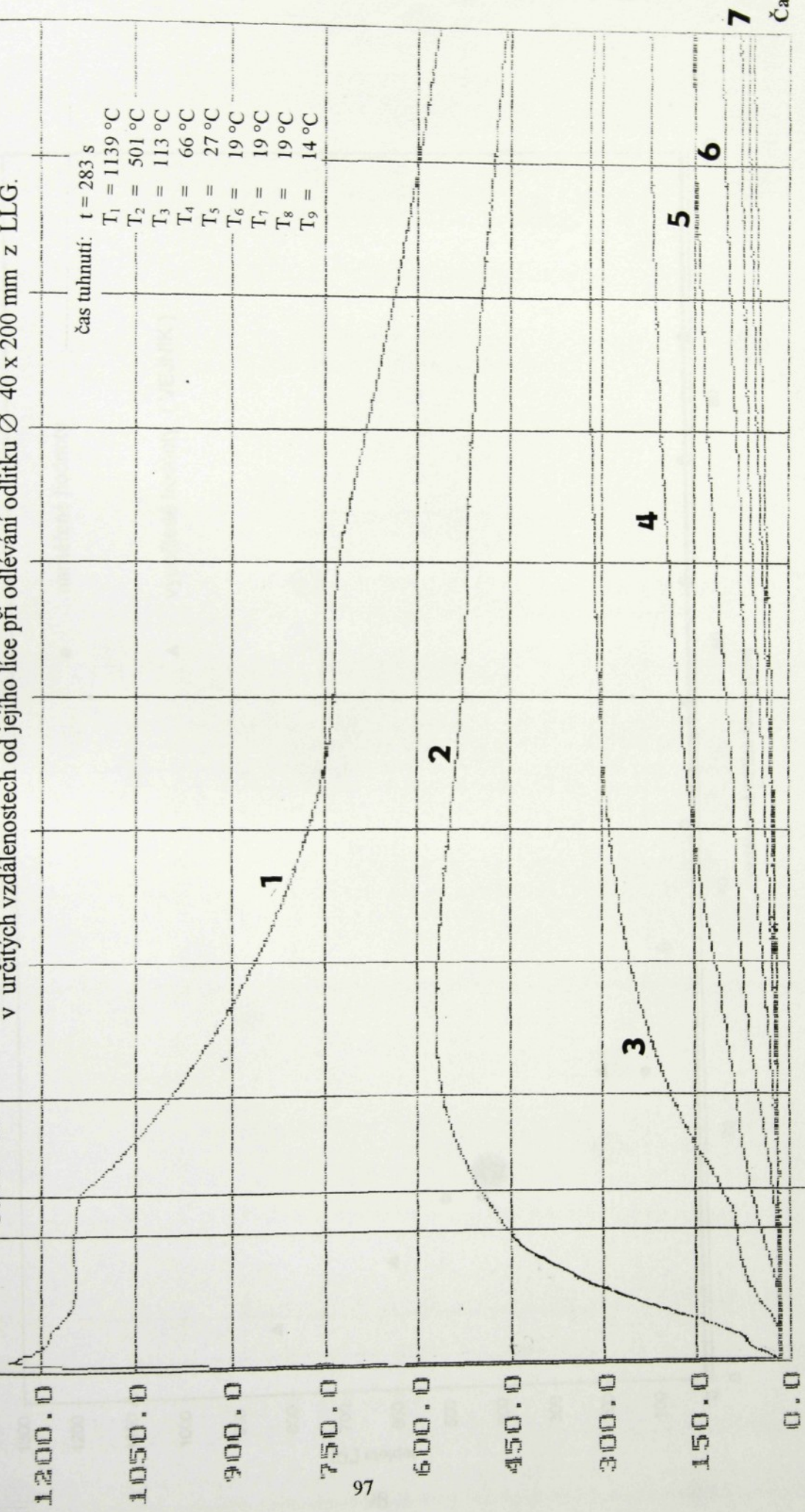
WAERMELEITFAEHIGKEIT [W / (CM*GRAD C.)]

Ostatní tepelně-fyzikální veličiny potřebné k simulaci byly dle databanky programu SIMTEC použity beze změny.

Teplota [°C]

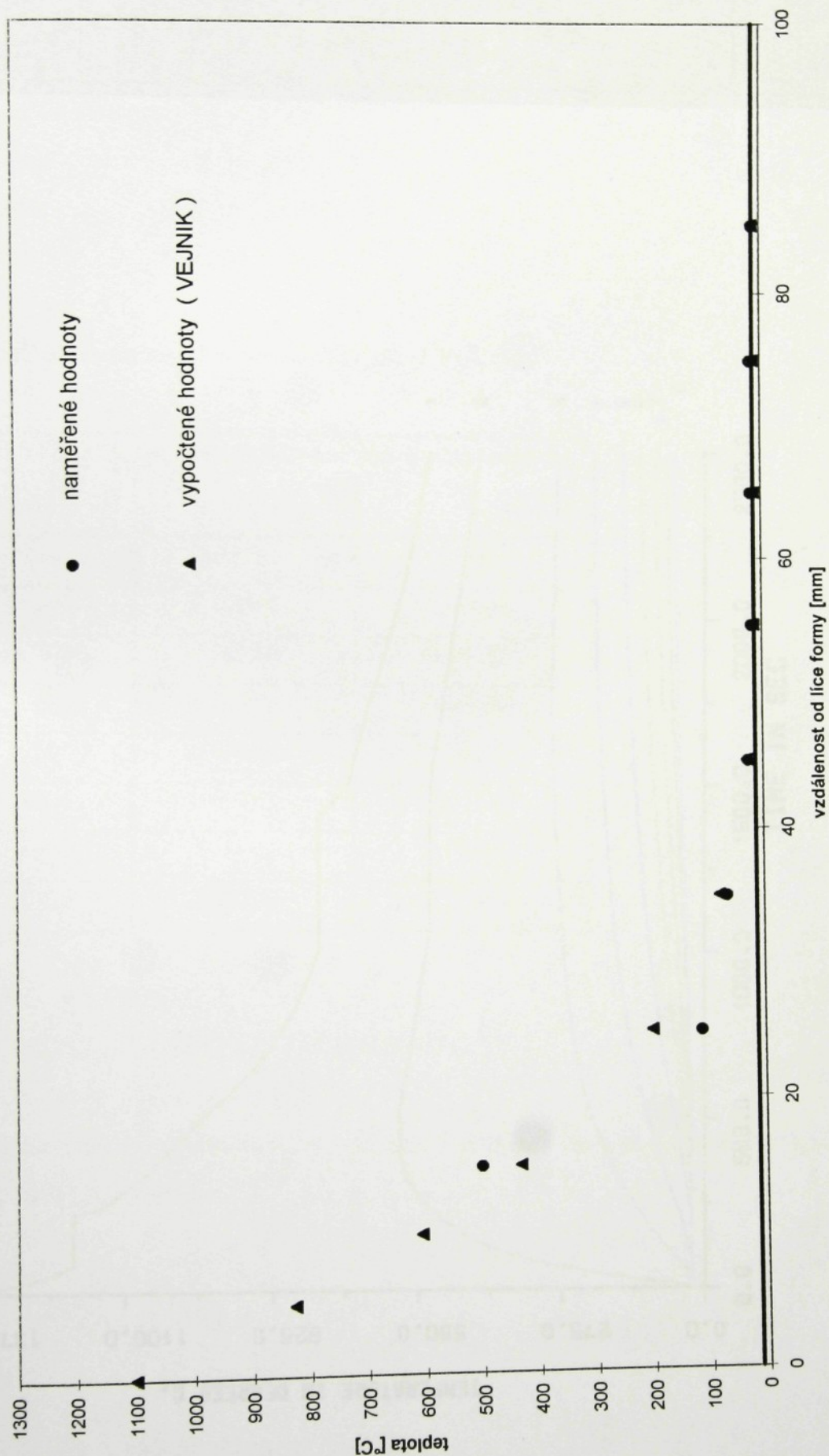
Obr. 3 - 30
Časové závislosti teplot v pískové formě po vysušení (směs Rájec) 250 x 250 x 260 mm
v určitých vzdálenostech od jejího líce při odlévání odlitku Ø 40 x 200 mm z LLG.

čas tuhnutí: $t = 283\text{ s}$
 $T_1 = 1139\text{ °C}$
 $T_2 = 501\text{ °C}$
 $T_3 = 113\text{ °C}$
 $T_4 = 66\text{ °C}$
 $T_5 = 27\text{ °C}$
 $T_6 = 19\text{ °C}$
 $T_7 = 19\text{ °C}$
 $T_8 = 19\text{ °C}$
 $T_9 = 14\text{ °C}$



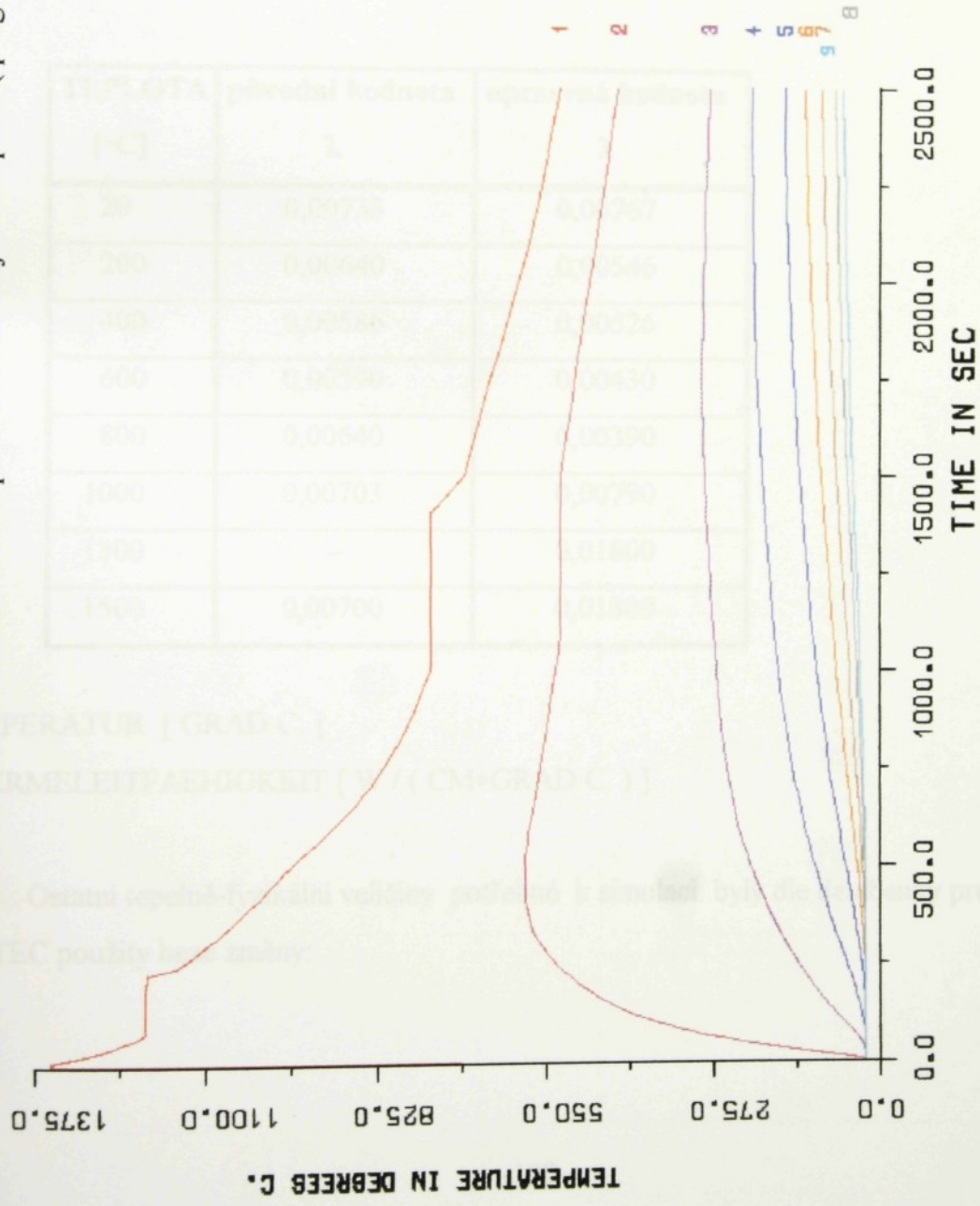
Čas [s]

Rájec sušený (250x250x260 mm)



Obr. 3 - 34 Rozložení teplot ve slévárenské formě z rájeckého písku pro naměřené a vypočtené hodnoty (dle VEJNÍKA) v okamžiku ztuhnutí odlitku

Obr. 3 - 35 Namodelované časové závislosti teplot ve formě z rájeckého písku (program SIMTEC)



Eut_s_plnenim.pr.j/F_rajec

Temperature - time / cooling curves

MĚŘENÍ č. 5 (II. etapa měření)

- použitá forma:

250 x 250 x 260 mm
- materiál formy:

CT směs
- odlévaný materiál:

LLG
- počáteční teplota formy:

$T_F = 16\text{ }^{\circ}\text{C}$
- teplota likvidu:

$T_L = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$
- teplota solidu:

$T_S = 1147\text{ }^{\circ}\text{C}$
- latentní teplo:

$650\text{ [J . cm}^{-3}\text{]}$

tepelná vodivost formy z CT směsi pro jednotlivé teploty:

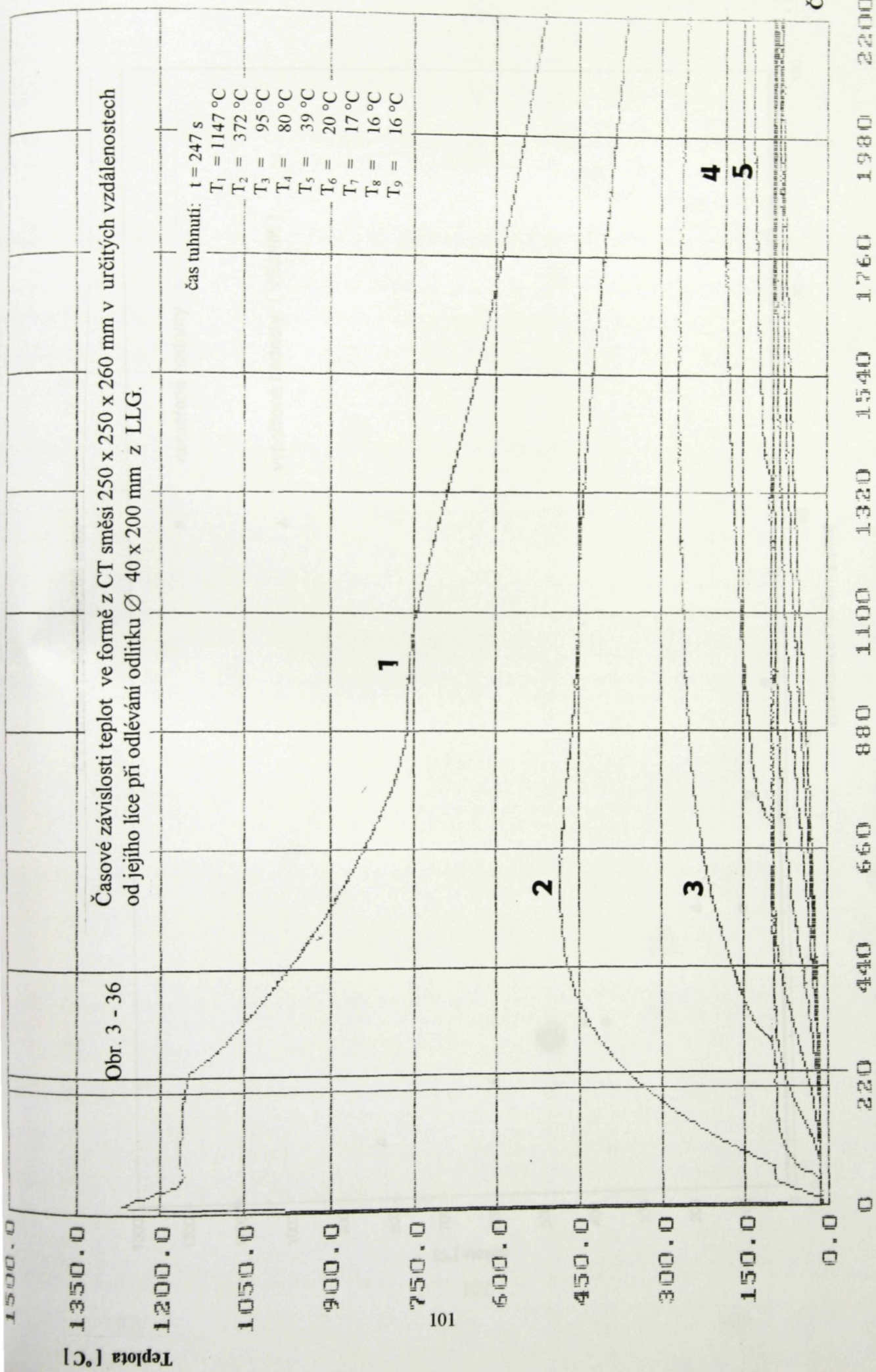
TEPLOTA [°C]	původní hodnota λ	upravená hodnota λ
20	0,00733	0,00767
200	0,00640	0,00546
400	0,00586	0,00526
600	0,00590	0,00430
800	0,00640	0,00390
1000	0,00703	0,00790
1300	--	0,01800
1500	0,00700	0,01809

TEMPERATUR [GRAD C.]
WAERMELEITFAEHIGKEIT [W / (CM*GRAD C.)]

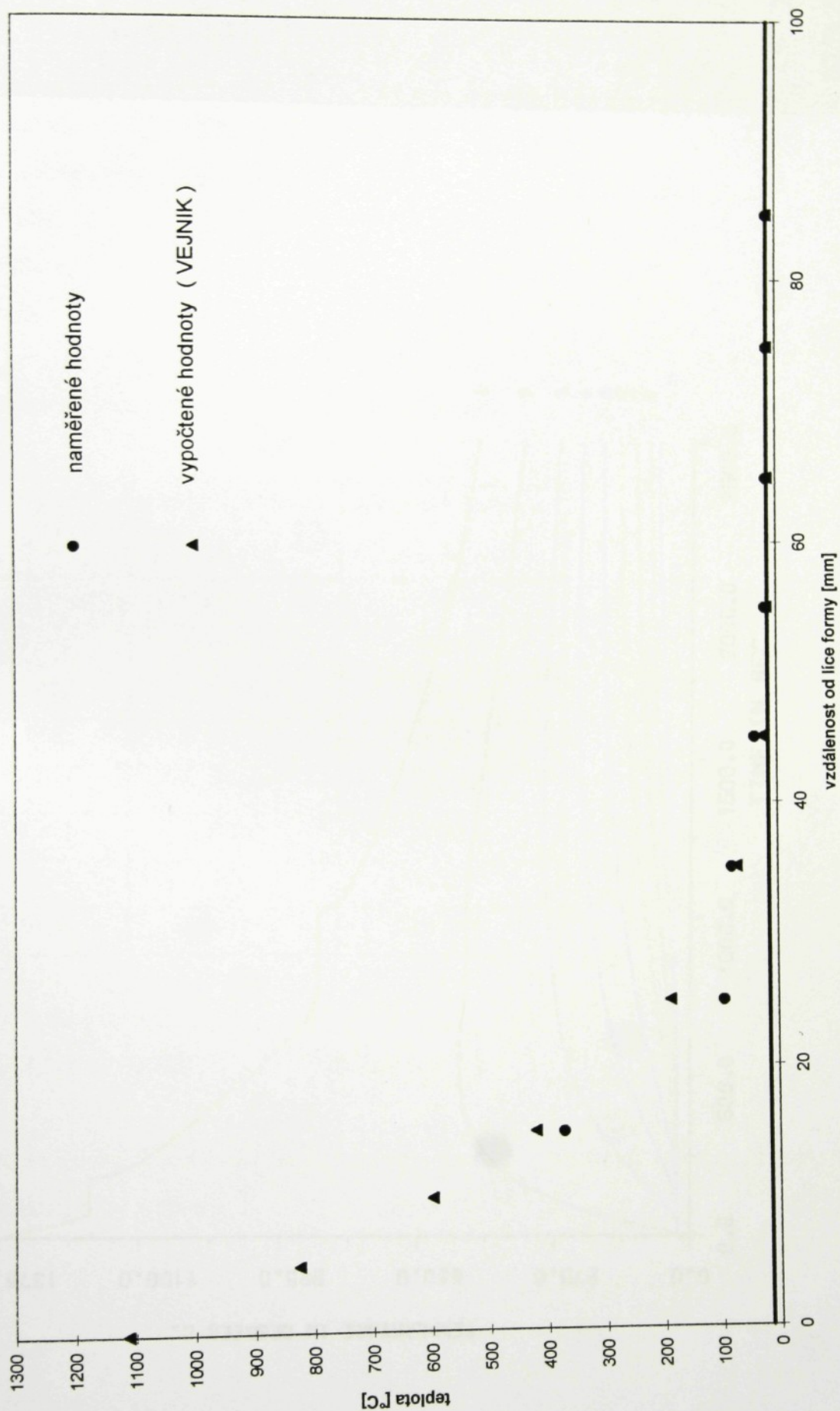
Ostatní tepelně-fyzikální veličiny potřebné k simulaci byly dle databanky programu SIMTEC použity beze změny.

Obr. 3 - 36
Časové závislosti teplot ve formě z CT směsi 250 x 250 x 260 mm v určitých vzdálenostech od jejího líce při odlévání odlitku Ø 40 x 200 mm z LLG.

čas tuhnutí: $t = 247$ s
 $T_1 = 1147$ °C
 $T_2 = 372$ °C
 $T_3 = 95$ °C
 $T_4 = 80$ °C
 $T_5 = 39$ °C
 $T_6 = 20$ °C
 $T_7 = 17$ °C
 $T_8 = 16$ °C
 $T_9 = 16$ °C

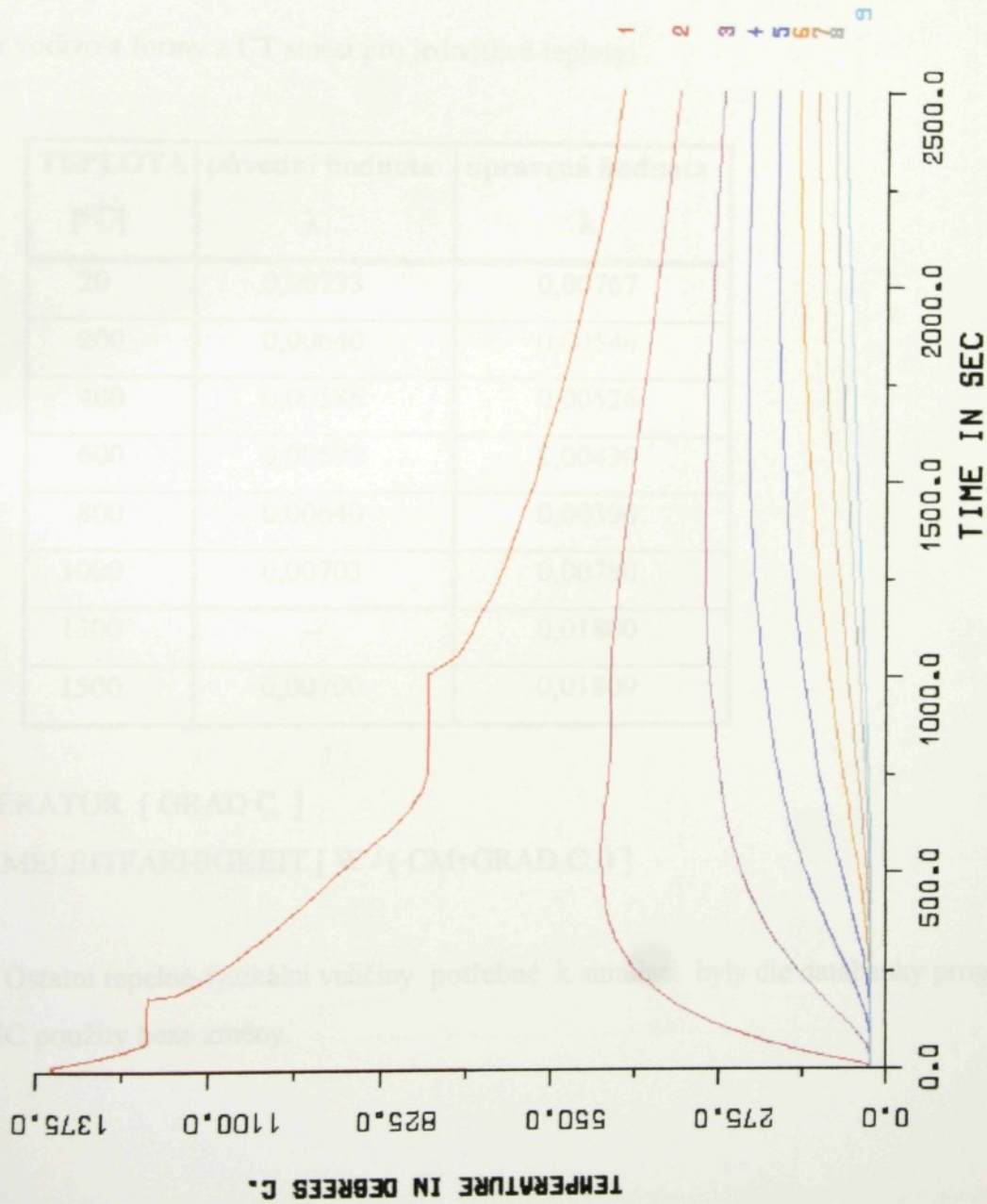


CT - směs (250x250x260 mm)



Obr. 3 - 37 Rozložení teplot ve slévárenské formě z CT směsi pro naměřené a vypočtené hodnoty (dle VEJNÍKA) v okamžiku ztuhnutí odlitku

Obr. 3 - 38 Namodelované časové závislosti teplot ve formě z CT směsi (program SIMTEC)



Eut_s_plnenim.pr.j/F_ctpisek

Temperature - time / cooling curves

MĚŘENÍ č. 6 (II. etapa měření)

použitá forma: 250 x 250 x 260 mm

materiál formy: **CT směs**

odlévaný materiál: LLG

počáteční teplota formy: $T_F = 16\text{ °C}$

teplota likvidu: $T_L = 1198\text{ °C}$

teplota solidu: $T_S = 1152\text{ °C}$

latentní teplo: $700\text{ [J . cm}^{-3}\text{]}$

tepelná vodivost formy z CT směsi pro jednotlivé teploty:

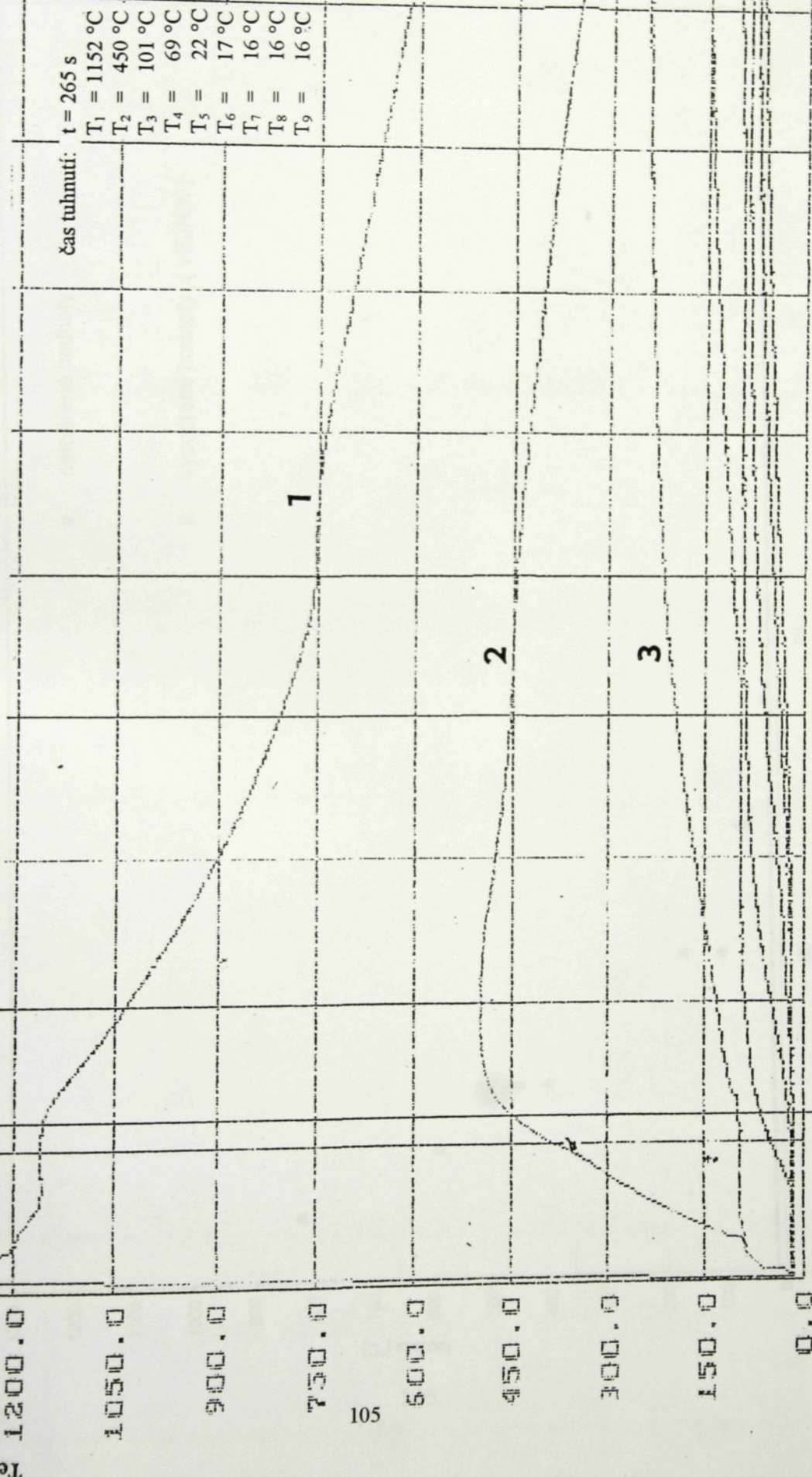
TEPLOTA [°C]	původní hodnota λ	upravená hodnota λ
20	0,00733	0,00767
200	0,00640	0,00546
400	0,00586	0,00526
600	0,00590	0,00430
800	0,00640	0,00390
1000	0,00703	0,00790
1300	--	0,01800
1500	0,00700	0,01809

TEMPERATUR [GRAD C.]

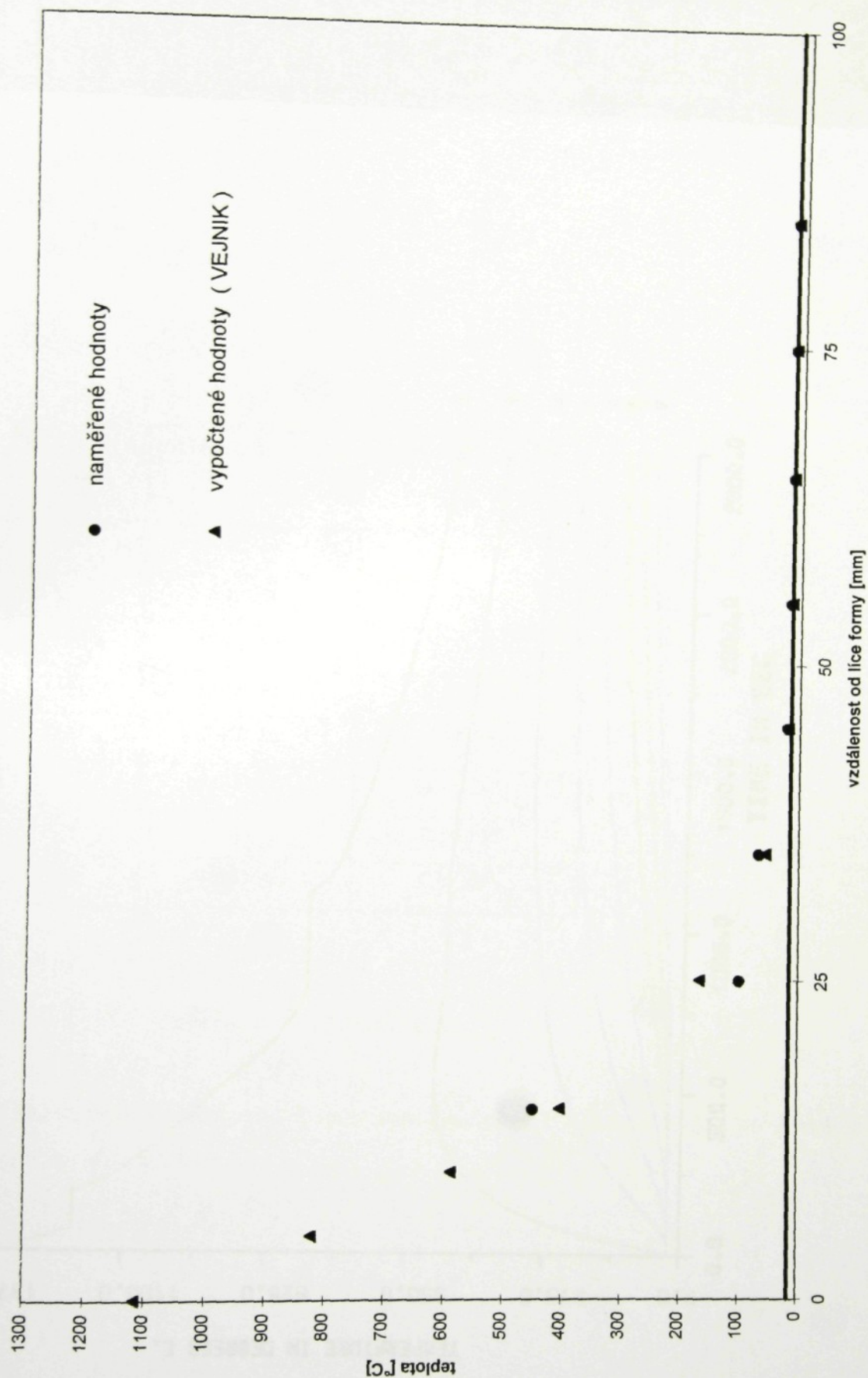
WAERMELEITFAEHIGKEIT [W / (CM*GRAD C.)]

Ostatní tepelně-fyzikální veličiny potřebné k simulaci byly dle databanky programu SIMTEC použity beze změny.

Obr. 3 - 39 Časové závislosti teplot ve formě z CT směsi 250 x 250 x 260 mm v určitých vzdálenostech od jejího líce při odlévání odlitku Ø 40 x 200 mm z LLG

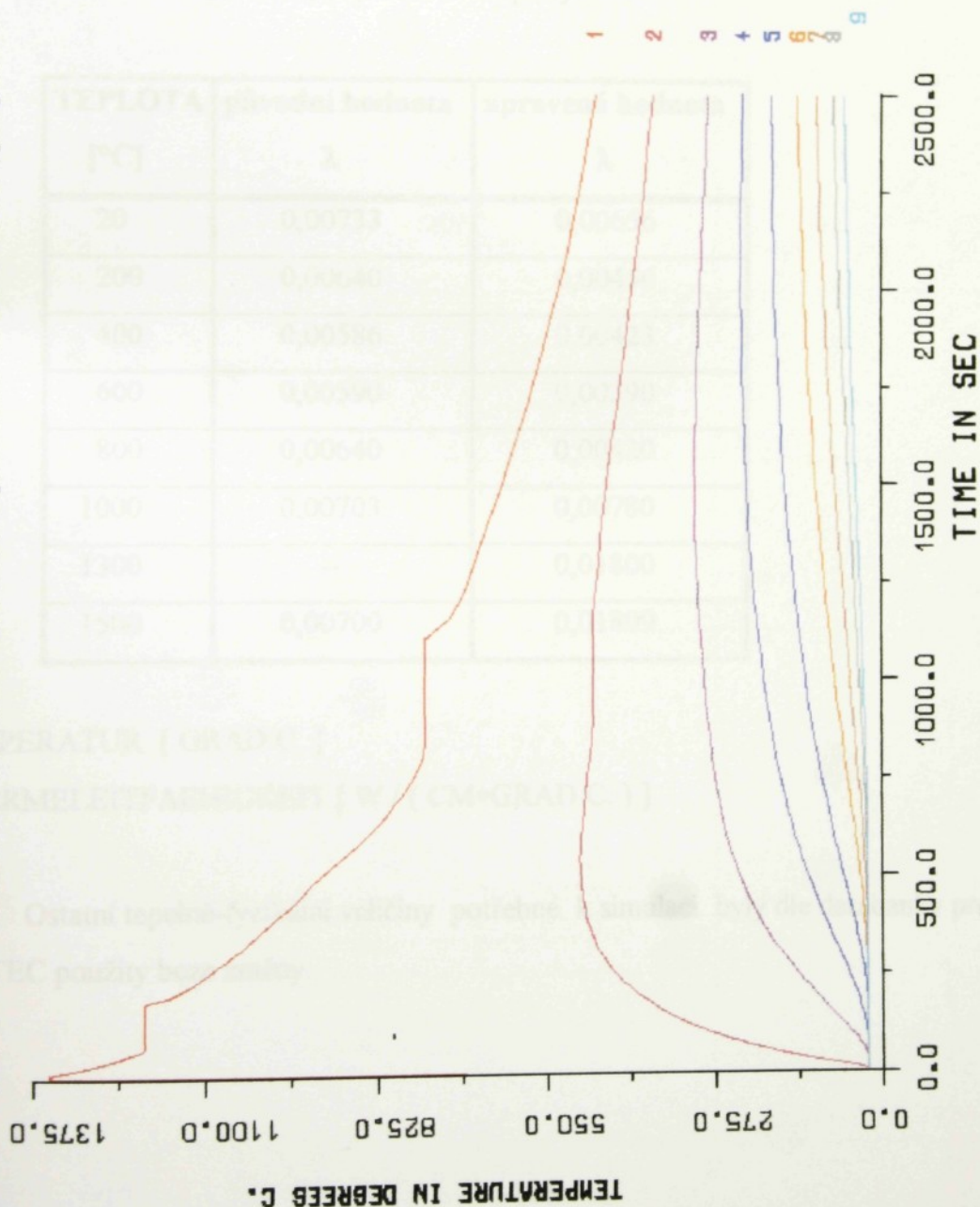


CT- směs (250x250x260 mm)



Obr. 3 - 40 Rozložení teplot ve slévárenské formě z CT směsi pro naměřené a vypočtené hodnoty (dle VEJNÍKA) v okamžiku ztuhnutí odlitku

Obr. 3 - 41 Namodelované časové závislosti teplot ve formě z CT směsi (program SIMTEC)



Eut_s_plnenim.prj/f_ctpisek

Temperature - time / cooling curves

MĚŘENÍ č. 7 (II. etapa měření)

použitá forma: 250 x 250 x 260 mm

materiál formy: **JFS**

odlévaný materiál: LLG

počáteční teplota formy: $T_F = 15\text{ °C}$

teplota likvidu: $T_L = 1180\text{ °C}$

teplota solidu: $T_S = 1146\text{ °C}$

latentní teplo: $650\text{ [J . cm}^{-3}\text{]}$

tepelná vodivost formy z JFS pro jednotlivé teploty:

TEPLOTA [°C]	původní hodnota λ	upravená hodnota λ
20	0,00733	0,00656
200	0,00640	0,00456
400	0,00586	0,00423
600	0,00590	0,00390
800	0,00640	0,00420
1000	0,00703	0,00780
1300	--	0,01800
1500	0,00700	0,01809

TEMPERATUR [GRAD C.]

WAERMELEITFAEHIGKEIT [W / (CM*GRAD C.)]

Ostatní tepelně-fyzikální veličiny potřebné k simulaci byly dle databanky programu SIMTEC použity beze změny.

Teplota [°C]

Časové závislosti teplot v pískové formě (JFS) 250 x 250 x 260 mm v určitých vzdálenostech od jejího líce při odlévání odlitku Ø 40 x 200 mm z LLG.

Obr. 3 - 42

čas tuhnutí: $t = 265$ s
 $T_1 = 1146$ °C
 $T_2 = 625$ °C
 $T_3 = 197$ °C
 $T_4 = 93$ °C
 $T_5 = 81$ °C
 $T_6 = 43$ °C
 $T_7 = 24$ °C
 $T_8 = 16$ °C
 $T_9 = 15$ °C

1

2

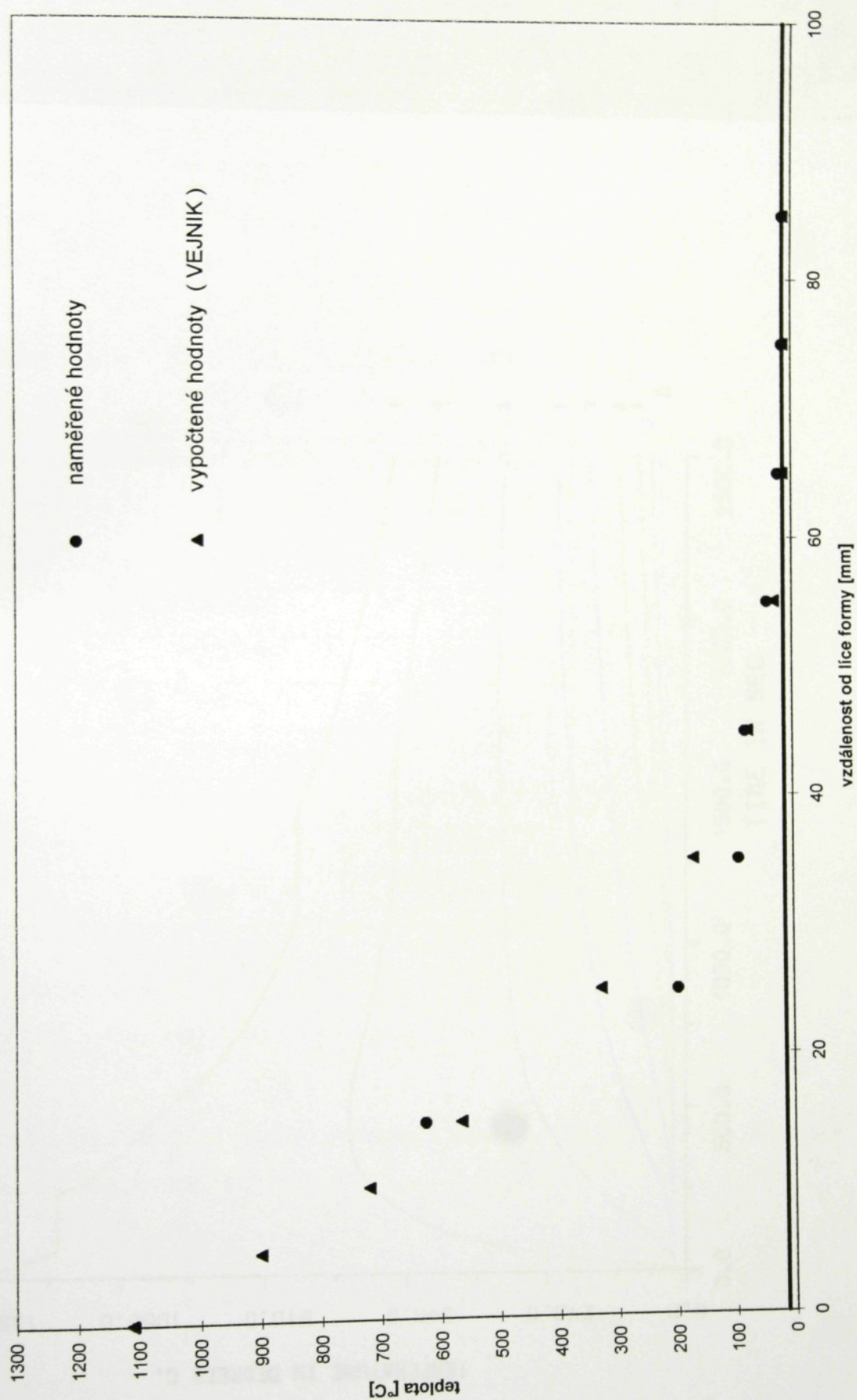
3

4

5

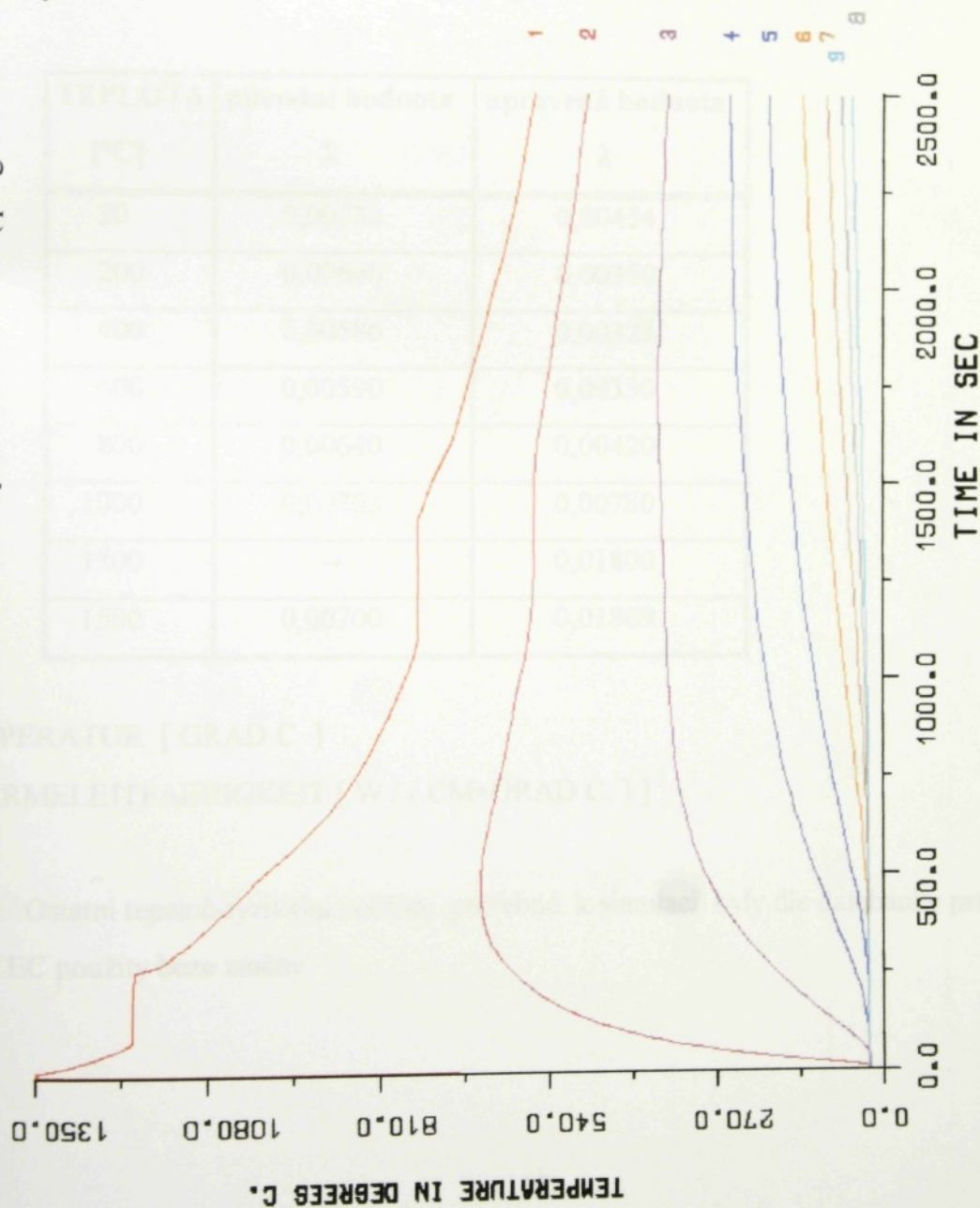
Čas [s]

0 220 440 660 880 1100 1320 1540 1760 1980 2200



Obr. 3 - 43 Rozložení teplot ve slévárenské formě z JFS pro naměřené a vypočtené hodnoty (dle VEJNÍKA) v okamžiku ztuhnutí odlitku

Obr. 3 - 44 Namodelované časové závislosti teplot ve formě z JFS (program SIMTEC)



Eut_s_plnenim.prj/F_jfs

Temperature - time / cooling curves

MĚŘENÍ č. 8 (II. etapa měření)

použitá forma: 250 x 250 x 260 mm

materiál formy: **JFS**

odlévaný materiál: LLG

počáteční teplota formy: $T_F = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

teplota likvidu: $T_L = 1205\text{ }^{\circ}\text{C}$

teplota solidu: $T_S = 1145\text{ }^{\circ}\text{C}$

latentní teplo: $700\text{ [J . cm}^{-3}\text{]}$

tepelná vodivost formy z JFS pro jednotlivé teploty:

TEPLOTA [$^{\circ}\text{C}$]	původní hodnota λ	upravená hodnota λ
20	0,00733	0,00454
200	0,00640	0,00350
400	0,00586	0,00323
600	0,00590	0,00350
800	0,00640	0,00420
1000	0,00703	0,00780
1300	--	0,01800
1500	0,00700	0,01809

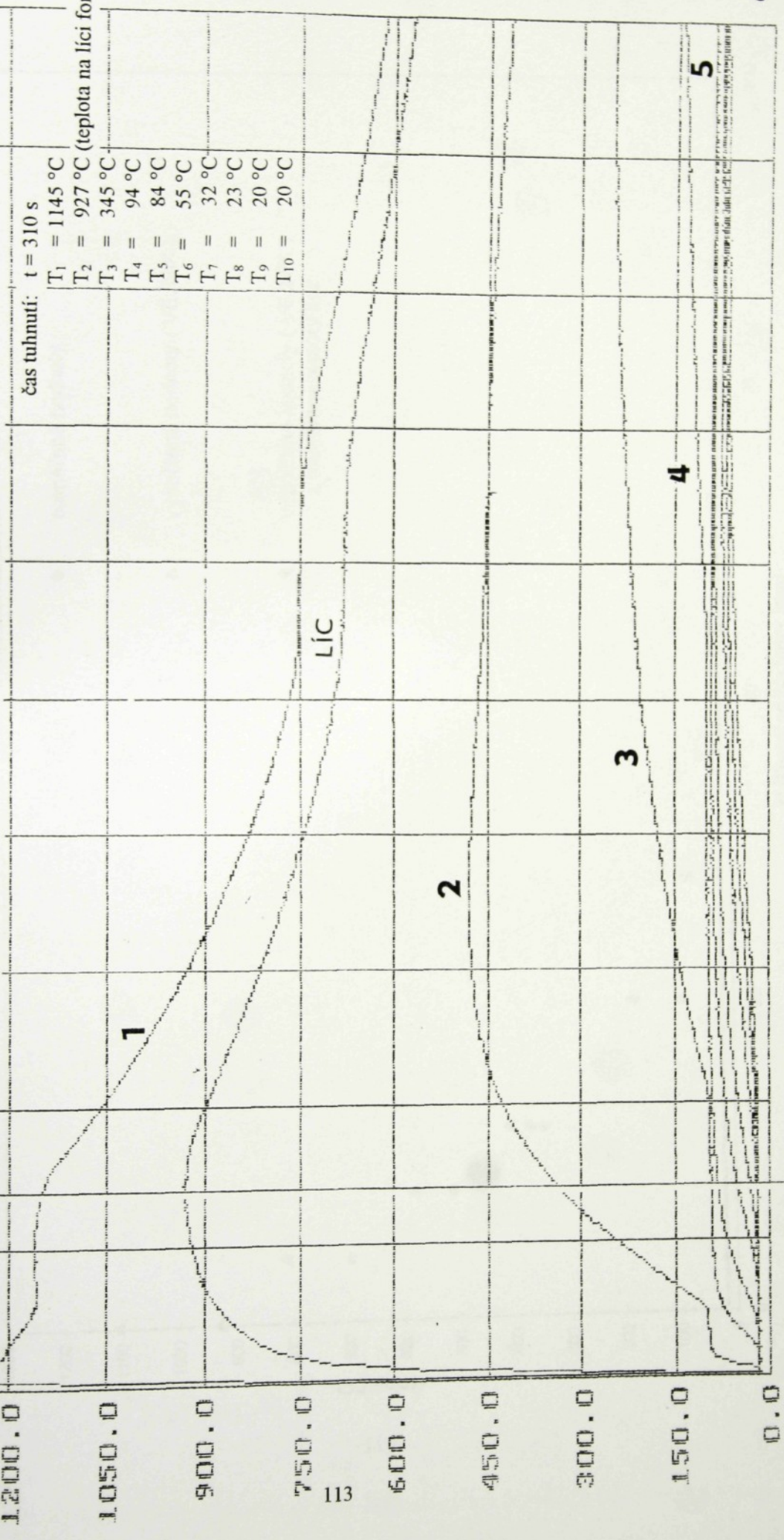
TEMPERATUR [GRAD C.]

WAERMELEITFAEHIGKEIT [W / (CM*GRAD C.)]

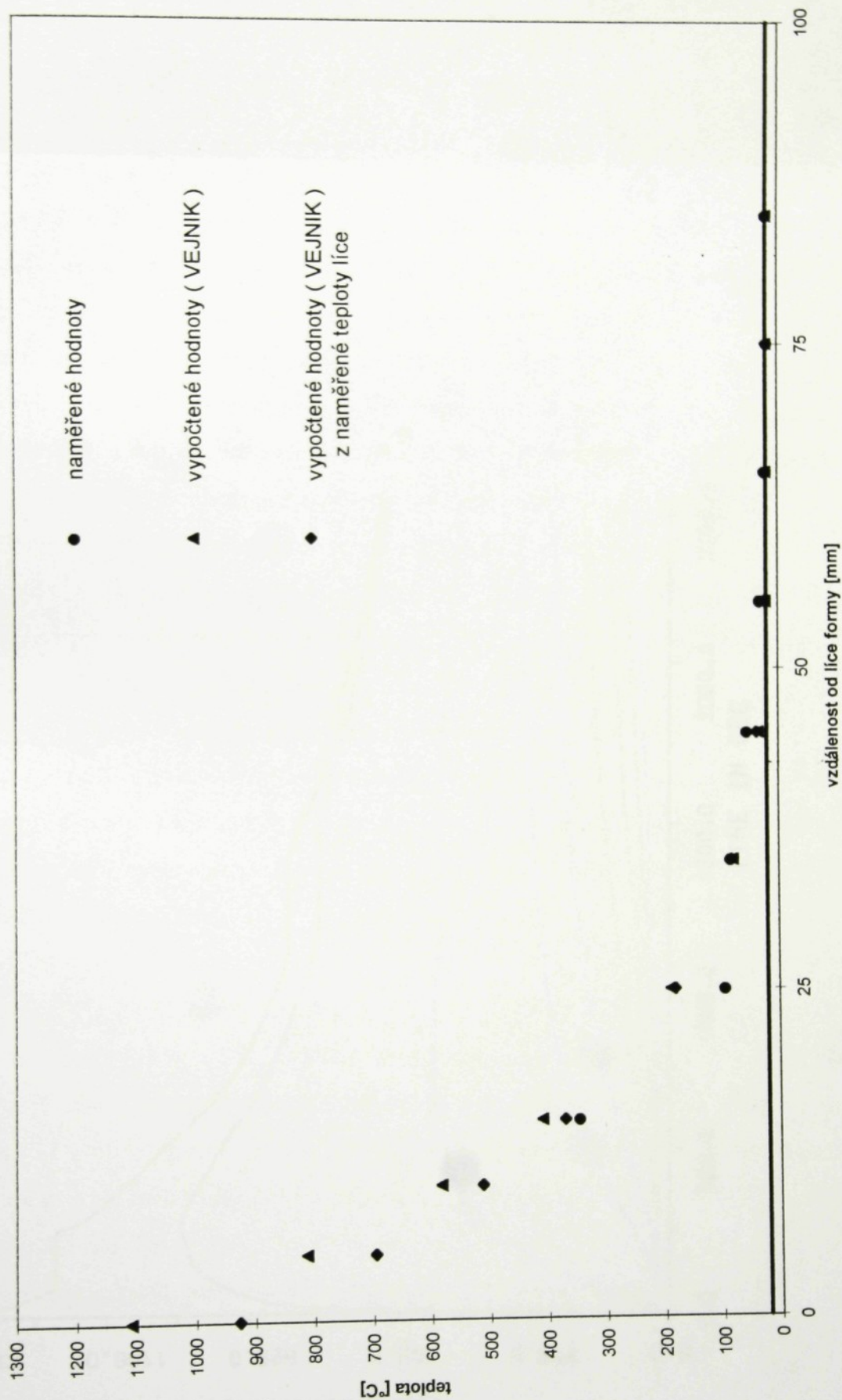
Ostatní tepelně-fyzikální veličiny potřebné k simulaci byly dle databanky programu

SIMTEC použity beze změny.

Obr. 3 - 45
Časové závislosti teplot v pískové formě (JFS) 250 x 250 x 260 mm v určitých vzdálenostech od jejího líce při odlévání odlitku Ø 40 x 200 mm z LLG.

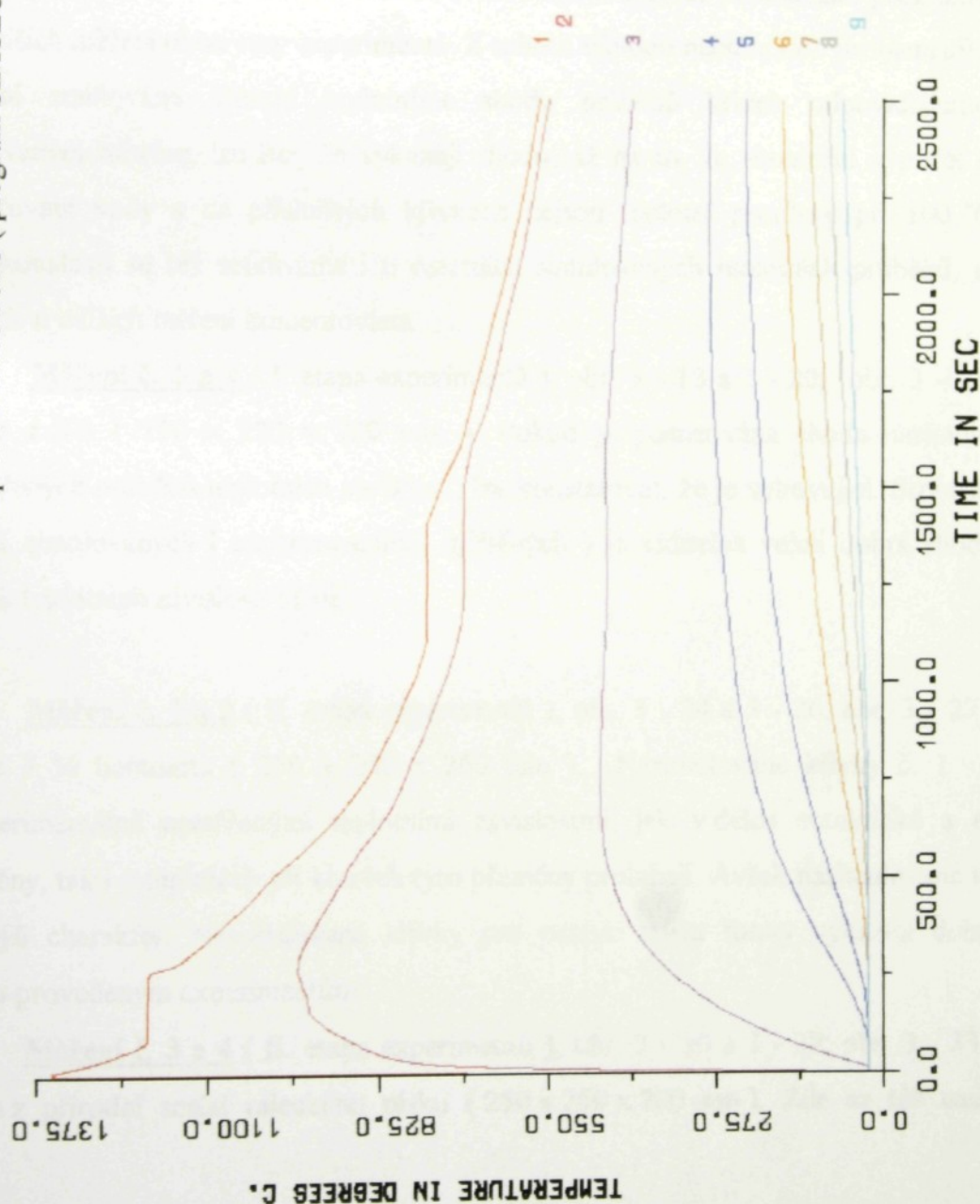


JFS (250x250x260 mm)



Obr. 3 - 46 Rozložení teplot ve slévárenské formě z JFS pro naměřené a vypočtené hodnoty (dle VEJNIKA) v okamžiku ztuhnutí odlitku

Obr. 3 - 47 Namodelované časové závislosti teplot ve formě z JFS (program SIMTEC)



Eut_s.plnenim.pr.j/F_jfs

Temperature - time / cooling curves

DRAW NEW

2D POINTS

3D-POINTS

CALCULATE

TIME CURV.

01-05 INFO

06-10 INFO

11-15 INFO

PRINT

END

PARAM INFO

COLOR FONT

PRINT HELP



3.5.1 Zhodnocení provedených simulací

Měření č. 1 a 2 (I. etapa experimentů), obr. 3 - 12 a 3 - 14; obr. 3 - 15 a 3 - 17, forma z CT směsi (170 x 220 x 200 mm). Z nasimulovaných průběhů teplot, lze při porovnání s experimentálním měřením říci, že na první pohled vykazují shodu základních tvarů křivek. Křivky č. 1 se v teplotních i časových parametrech shodují, jen nasimulované křivky nezahrnují plnění formy. Tyto simulované křivky nezachycují teplotu likvidu a při zadání intervalu teplot eutektické přeměny do simulačního výpočtu, dochází k tomu, že teplota krystalizace litiny je posouvána simulačním výpočtem k vyšším hodnotám, než byly zjištěny experimentem. Současně simulované křivky nevykazují plynulý přechod na konci eutektické přeměny do chladnutí odlitku. Podobně se tato nedokonalost simulačního programu projevuje i u dalších měření obou etap experimentů. Z tohoto důvodu nebude tato problematika u dalších měření zmiňována. Pokud hodnotíme shodu průběhů křivek odpovídajícím ostatním sledovaným místům, lze říci, že vykazují shodu, až na to, že simulační výpočet nezahrnuje vypařování vody a na příslušných křivkách nejsou teplotní prodlevy při 100 °C. S touto nedokonalostí se též setkáváme i u ostatních simulovaných teplotních průběhů, a proto již nebude u dalších měření komentována.

Měření č. 3 a 4 (I. etapa experimentů), obr. 3 - 18 a 3 - 20; obr. 3 - 21 a 3 - 23, forma z JFS (170 x 220 x 220 mm). Pokud je posuzována shoda nasimulovaných a naměřených průběhů teplotních závislostí, lze konstatovat, že je vyhovující. Srovnáním křivek č. 1 (simulovaných i experimentálně zjištěných) je viditelná velmi dobrá shoda průběhů křivek teplotních závislostí i časů.

Měření č. 1 a 2 (II. etapa experimentů), obr. 3 - 24 a 3 - 26; obr. 3 - 27 a 3 - 29, forma 7 % bentonitu (250 x 250 x 260 mm). Nasimulované křivky č. 1 se shodují s experimentálně naměřenými teplotními závislostmi, jak v délce eutektické a eutektoidní přeměny, tak i v teplotách při kterých tyto přeměny probíhají. Avšak nasimulované křivky mají strmější charakter. Nasimulované křivky pro ostatní místa formy vykazují dobrou shodu oproti provedeným experimentům.

Měření č. 3 a 4 (II. etapa experimentů), obr. 3 - 30 a 3 - 32; obr. 3 - 33 a 3 - 35, forma z přírodní směsi rájeckého písku (250 x 250 x 260 mm). Zde se též nasimulované

křivky č. 1 v základních rysech shodují s experimentálně naměřenými teplotními závislostmi. Též odpovídají délky eutektické a eutektoidní přeměny i teploty, při kterých tyto přeměny probíhají. Nasimulované křivky nevykazují tak strmý charakter, jako u křivek experimentálně naměřených. Nasimulované křivky pro ostatní místa formy mají dobrou shodu v porovnání s provedenými experimenty.

Měření č. 5 a 6 (II. etapa experimentů), obr. 3 - 36 a 3 - 38; obr. 3 - 39 a 3 - 41, forma z CT směsi (250 x 250 x 260 mm). Je možno komentovat i zde, že se nasimulované křivky č. 1 s experimentálně naměřenými teplotními závislostmi shodují. Opět odpovídají teploty eutektické a eutektoidní přeměny i jejich délky. Nasimulované křivky jsou strmějšího charakteru, jako křivky experimentálně stanovené. Též křivky nasimulované pro ostatní místa formy, mají dobrou shodu v porovnání s provedenými měřeními.

Měření č. 7 a 8 (II. etapa experimentů), obr. 3 - 42 a 3 - 44; obr. 3 - 45 a 3 - 47, forma z JFS (250 x 250 x 260 mm). U měření č. 8 byla simulována i teplota líce formy, která je v tomto případě označena proti experimentu jako křivka č. 2 (obr. 3 - 47). Tato simulovaná křivka vykazuje shodný průběh jako u křivky experimentálně naměřené, včetně časové prodlevy při teplotě 680 °C, která obráží skutečnost, že se uskutečňuje eutektoidní přeměna při chladnutí odlitku. Pokud hodnotíme křivky č. 1, pak lze konstatovat, že nasimulované křivky mají mírně strmější charakter, než křivky naměřených teplotních závislostí. Jinak lze z celkového pohledu na ostatní nasimulované křivky a křivky experimentálně naměřené, hovořit o velmi dobré shodě.

4. DISKUSE VÝSLEDKŮ

Výsledky obsažené v této diplomové práci přináší dílčí informace o možnostech sledování a výpočtech teplotních polí v pískových slévárenských formách.

Výzkum pískových forem je velmi náročný. Tato náročnost je dána tím, že písková forma představuje velmi složitý disperzní systém, který jako celek se zdá být kompaktní, avšak při makroskopickém, popř. mikroskopickém sledování lze pozorovat strukturu, která je na obr. 2 - 1. Struktura je tvořena zrny ostřiva, částicemi pojiva, vodou a vzduchovými póry. V tomto smyslu je nutno předpokládat i složité sdílení tepla se kterým také souvisí i sdílení hmoty. To je podstatnou odlišností od tepelných procesů probíhajících v kovových formách, kde je sdílení tepla uskutečňováno vedením, což velmi dobře popisuje Fourierova diferenciální rovnice (2.8). Její použití pro řešení sdílení tepla v pískových formách je výhodné do teplot 200 °C, kdy v pískové formě převládá sdílení tepla vedením. Při vyšších teplotách formy než je 200 °C se šíří teplo prouděním a od teplot nad 600 °C převládá radiace tepla. Intenzitu sdílení tepla vedením ovlivňuje v pískové formě tepelná vodivost skeletu, pojivo, voda, popř. i plyny. Nemalou měrou se podílí na přenosu tepla vedením i stupeň zhuštění směsi, resp. pórovitost směsi, kvalita a geometrie styku zrn přes mosty pojiva.

Přenos tepla prouděním je dán přirozenou a vynucenou konvekcí plynu, popř. vody. Při přirozené konvekci dochází k dvoustranné výměně částic média s rozdílnou hustotou. Vynucená konvekce je vyvolána rozdílným tlakem plynů v průřezu stěny formy. Tato výměna probíhá jen jednostranně. Částice média se přemísťují z míst o vyšším tlaku plynů do míst s nižším tlakem. Na proudění tepla formou má vliv velikost pórů a rozměrnost formy. Nemalý vliv má i konvekce vody a to jak ve formě páry, tak i ve formě kapaliny [10].

Přenos tepla sáláním (radiace) je dán geometrickými charakteristikami pórů, resp. částic, stupněm černosti povrchu částic a teplotou. Z tohoto vyplývá, že přidáním přísad, jako je kamenouhelná moučka, se zvýší účinnost přenosu tepla sáláním.

Je možno konstatovat, že však žádný z těchto přenosů tepla neprobíhá samostatně, a proto nelze jednoznačně určit množství jednotlivých podílů sdílení tepla.

Jak je z uvedeného zřejmé, je pro přesný výpočet teplotních polí v pískových formách nutné použít rovnici, která zahrnuje všechny vlivy jednotlivých druhů sdílení tepla.

Ve zjednodušenějším případě při řešení této problematiky lze využít alespoň rovnici (2.6), kterou uvádí LYKOV [17] a vedle sdílení tepla zahrnuje i sdílení hmoty. Řešení a numerické rozpracování této rovnice je velmi náročné, což je také spojeno se stanovením počátečních a okrajových podmínek, které popisují daný děj.

Z tohoto celkového pohledu na složitost přenosu tepla v pískových formách je nutno uvést, že všechny metody použité v této diplomové práci pro stanovení teplot v pískových formách jsou pouze informativní.

Z hlediska experimentálního, je nutné konstatovat, že použité měřicí a registrační zařízení pro sledování časových závislostí teplot je velmi výhodné a pracuje s potřebnou přesností.

Pokud se týká použité litiny, byla k dispozici na KSM TU. Rozbor chemického složení byl proveden na zařízení LECO ve Slévárně Liberec - Ostašov, protože zařízení k analýze chemického složení litin KSM nemá. Až zde se zjistilo, že litina vykazuje nižší obsah Mn a vyšší Si, jak je uvedeno v babulce č. 3 - 3.

Pokud hodnotíme jednotlivá experimentální měření I. etapy (formy z CT směsi a JFS o rozměrech 170 x 220 x 200 mm pro odlitek tvaru válce $\varnothing 40 \times 200$ mm), lze konstatovat, že obě měření na formách z CT směsi vykazují velmi podobné časové závislosti teplot (měření č. 1 a č. 2 - I. etapa). Určité odlišnosti lze spatřovat na křivkách č. 1, viz obr. 3 - 12 a 3 - 15 v teplotách krystalizace použité litiny. Pokud se týká teplot líce formy, křivky č. 2, jsou v okamžiku ztuhnutí odlitku téměř shodné. Z těchto závislostí je též zřejmé, že dochází k postupnému vypařování vody. U měření č. 1 lze pozorovat větší obsah vody ve formě, s tím je též spojena delší teplotní prodleva u křivky č. 4 a č. 5 (15 mm a 20 mm od líce formy) při teplotě 100 °C. Křivky č. 6 až 9 nevykazují příliš velké rozdíly teplot. V návaznosti na množství vody obsažené ve formovací směsi, lze předpokládat i odpovídající časy tuhnutí odlitků. Bylo potvrzeno, že s rostoucím množstvím vody se zvyšuje rychlost odvodu tepla z tuhnoucího odlitku, jak je patrné z obr. 3 - 12.

U experimentů s použitím forem z JFS, obr 3 - 18 a 3 - 21, lze spatřit výrazný rozdíl již u křivek č. 1, kdy litina použitá pro jednotlivé experimenty se lišila v teplotě liti. Vyšší přehřátí

litiny má vliv i na další teplotní průběhy ve slévárenské formě. To též ovlivnilo i teplotu na lici formy (křivka č. 2), která se liší o 45 °C. O tuto hodnotu teploty je vyšší i přehřátí taveniny. Opět určité odlišnosti lze spatřovat na křivkách č. 1, které udávají závislost teploty krystalizace použitých litin. Též rozdíly průběhů teplot jsou patrné z křivek č. 2, které odpovídají lici slévárenské formy. Velký rozdíl je zřejmý z obr. 3 - 18 (křivka č. 2), kdy naměřená teplota líc formy dosáhla teploty 1115 °C. Tato teplota na obr. 3 - 21 dosáhla pouze teploty 1050 °C. Průběhy křivek č. 3, 4, 5 se u obou měření odlišují, především vlivem přehřátí odlévané litiny. Jak je obecně známo, s rostoucím přehřátím odlévaného materiálu se prodlužuje doba tuhnutí odlitku. Z tohoto důvodu je u měření č. 3 , obr. 3 - 18, delší doba tuhnutí odlitku.

Pokud bychom porovnali naměřené závislosti u CT směsi a JFS se stejným přehřátím odlévané litiny, obr. 3 - 18 a 3 - 21, zjistíme, že doba tuhnutí odlitku ve formě z CT směsi je kratší cca o 40 s. CT směsi mají větší akumulární schopnost než syntetické bentonitové směsi - základní [4], což je v našem případě JFS.

Tyto uvedené formy neobsahovaly vtokovou soustavu a tavenina byla odlévána přímo do dutiny pro odlitek, což bylo pro experimenty málo vyhovující. Současně též rozmístění termočlánků do 40 mm od líc slévárenských forem bylo nevhodné pro určení prohřátí formy v okamžiku ztuhnutí odlitku (X_2) a stanovení stupně náhradní křivky (n). Z tohoto důvodu byla změněna velikost formy, byla navržena vtoková soustava a byla změněna hustota rozmístění termočlánků ve slévárenské formě i zlepšen způsob jejich zaformování. Experimenty prováděné s těmito formami jsou v této diplomové práci uváděny jako II. etapa měření.

Ve druhé etapě experimentů byly použity formy (250 x 250 x 260 mm pro odlitek tvaru $\varnothing$ 40 x 200 mm) z CT směsi, z JFS, ze směsi se 7 % bentonitu a ze směsi přírodního rájeckého písku. Současně je třeba také upozornit, že fotografické snímky forem na obr. 3 - 6 a 3 - 7 vykazují při jejich počítačové interpretaci shodnou barevnost obou formovacích směsí. Pokud dáme tyto směsi vedle sebe i pouhým okem lze sledovat nepatrnou odlišnost, kterou fotografický snímek nerozlišuje.

Pokud sledujeme experimenty s bentonitovými formami při odlévání litiny (měření č. 1 a 2 - II. etapa), obr. 3 - 24 a 3 - 27, lze konstatovat, že časové závislosti teplot pro obě

měření jsou velmi podobné. Z obr. 3 - 24 je zřejmé vyšší přehřátí odlévané litiny (křivka č. 1) a také delší čas tuhnutí odlitku. Teploty krystalizace odlévaných litin se liší cca o 5 °C. Opět je patrné z obou obrázků vypařování vody při teplotě 100 °C. Časy tuhnutí obou odlitků se díky přehřátí taveniny u měření č. 1 liší o 30 s.

U experimentů s formami z vysušené směsi rájeckého přírodního písku (měření č. 3 a 4 - II. etapa), obr. 3 - 30 a 3 - 33. Zde i přes intenzivní sušení po dobu 16 hod při teplotě 180 °C se ukázalo malé množství vody, jak jsou patrné teplotní prodlevy při teplotě 100 °C na křivkách č. 2 a 3 u obou experimentů. Přehřátí odlévané litiny je téměř podobné a činí 1215 °C. Též i doby tuhnutí odlitku jsou přibližně stejné, liší se jen o 8 s. Poměrně prudký nárůst teploty v časovém okamžiku 145 s lze spatřovat na křivce č. 2 (15 mm od líce), obr. 3 - 30, kdy došlo ke skokové změně teploty. Důvod této změny lze spatřovat ve vyčerpání vlhkosti v této vzdálenosti od líce slévárenské formy. Ostatní křivky č. 4, 5, 6, 7 jsou na obou měřeních též velmi podobné.

Pokud sledujeme časové závislosti teplot ve formách z CT směsi (měření č. 5 a 6 - II. etapa), obr. 3 - 36 a 3 - 39, měření též dosahují podobných výsledků. Též podobné jsou hodnoty přehřátí odlévané litiny (křivka č. 1), kterým odpovídají doby ztuhnutí odlitků ve formě, ty se liší pouze o 18 s. Z uvedených průběhů teplot je opět patrná prodleva související s vypařováním vody ve slévárenské formě při 100 °C. Jak je z obr. 3 - 39 patrné, křivka č. 2 má v čase ztuhnutí odlitku vyšší teplotu o 78 °C než stejná křivka na obr. 3 - 36. Tuto odchylku lze vysvětlit pouze, že během zaformování termočlásku došlo k jeho posunutí blíže k líci formy. Z tohoto důvodu je nutno upozornit na obtížnou zaformovatelnost jednotlivých termočlásků (dodržení správné vzdálenosti od líce) v porovnání s ustavením termočlásků v kovové formě. To je jeden z vlivů, kdy pro experimenty prováděné na stejné formě s relativně stejnými technologickými podmínkami (teplota lití, stejné složení směsi, vlhkost směsi, spěchovatelnost atd.), který způsobuje odlišné časové průběhy teplot.

Experimenty s formou z jednotné formovací směsi (měření č. 7 a 8) jsou uvedeny na obr. 3 - 42 a 3 - 45. Pro měření č. 8 byl zabudován i termočlánek na líc slévárenské formy.

Pokud hodnotíme získané průběhy teplot v závislosti na čase, pak lze konstatovat, že křivky č.1 mají podobné hodnoty přehřátí odlévané litiny cca 1250 °C. Křivka č. 2, obr. 3 - 42 dosahuje v okamžiku ztuhnutí odlitku teploty 625 °C. To lze vysvětlit na jedné straně vypařením vody ve vrstvě u lince formy a na druhé straně i nedokonalostí správného umístění zaformovaného termočlánku, jak je zřejmé z obr. 3 - 42. Naopak křivka č. 2 u měření č.8, obr. 3 - 45 dosahuje v okamžiku ztuhnutí odlitku pouze teploty 345 °C. Také poměrně velký rozdíl teplot (cca 103 °C) je patrný z porovnání křivek č. 3 u obou měření. Tyto teplotní rozdíly lze z teoretického hlediska špatně vysvětlit. Jsou pravděpodobně způsobeny nepřesným zabudováním termočlánků. Ostatní časové závislosti teplot v této formě se podstatně neliší.

Pokud sledujeme křivky tuhnutí a chladnutí litiny (křivka č. 1) u experimentů II. etapy, lze na těchto křivkách sledovat, jak eutektickou, tak eutektoidní přeměnu. Eutektická přeměna nevykazuje nápadné podchlazení a pro příslušné experimenty se teploty, při kterých probíhá pohybují od 1136 °C do 1152 °C. Teplota eutektoidní přeměny se pohybuje u jednotlivých měření od 725 °C do 753 °C. Hodnoty teplot eutektické a eutektoidní přeměny jsou závislé na chemickém složení odlévané litiny.

Dalším cílem po realizaci experimentů bylo stanovení odlišnosti naměřených a vypočítaných hodnot teplot ve slévárenských formách (na základě zjednodušeného výpočtu) v okamžiku ztuhnutí odlitku. K tomuto účelu byla pro I. etapu experimentů použita metoda GICH, která je založena na teorii vedení tepla. Výsledky získané výpočtem se značně odlišují od naměřených hodnot. Jistá podobnost teplot je v místech vzdálenějších od lince formy, viz tabulka č. 3 - 4, měření č. 2 a 4. Je nutno konstatovat, že teploty ve vzdálenosti 10 mm od lince formy jsou značně odlišné (až o 272 °C). Teploty stanovené výpočtem metodou GICH jsou závislé na teplotě rozhraní odlitek - forma, na počáteční teplotě formy, na tepelné vodivosti, měrné tepelné kapacitě a na hustotě slévárenské formovací směsi. Pro tyto výpočty byly použity hodnoty tepelně-fyzikálních veličin podle přílohy č. 1, 5, 6 a tabulky 3 - 1. Tyto použité tepelně-fyzikální veličiny jsou stanoveny pouze pro jednu teplotu (20 °C), avšak

jak je obecně známo, jsou závislé na teplotě. Tím lze vysvětlit větší rozdíly teplot mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami, zejména při vyšších teplotách (tj.v místech blíže k lici formy).

Současně byla v I.etapě experimentů na základě naměřených hodnot i stanovených výpočtem z GICH proložena náhradní křivka závislosti teplot na vzdálenosti od lince formy (obr. 3 -13, obr. 3 - 16, obr. 3 - 19 a obr. 3 - 22). Náhradní křivky poměrně objektivně sledovaly průběhy teplot ve stěně slévárenské formy. K tomu nejvíce přispělo, že se v této etapě měření podařilo zabudovat termočlánek na lici formy.

Ve II. etapě experimentů byl pro stanovení teplot ve formě použit vztah (2.11), který je odvozen z Vejníkovy metody měření teplotních polí. Ve II.etapě experimentů se nepodařilo zabudovat termočlánek na lici formy, proto nebyla naměřena tato teplota a proložení náhradní křivky závislosti teplot na vzdálenosti od lince formy bylo obtížnější. Naměřené a vypočítané teploty v okamžiku ztuhnutí odlitku, odpovídající jednotlivým místům formy, jsou pro II. etapu měření uvedeny na obr. 3 - 25, obr. 3 - 28, obr. 3 - 31, obr. 3 - 34, obr. 3 - 37, obr. 3 - 40, obr. 3 - 43 a obr. 3 - 46 (bez náhradních křivek). Vzhledem k tomu, že v této etapě experimentů byly termočlánky pravidelně rozmístěny po celé tloušťce stěny formy, nebylo obtížné stanovit prohřátí formy v okamžiku ztuhnutí odlitku.

Výpočet teplot podle vztahu (2.11) není přímo závislý na tepelně-fyzikálních veličinách pískových forem. Závisí na teplotě rozhraní odlitek - forma, počáteční teplotě formy, na prohřáté vrstvě pískové formy v okamžiku ztuhnutí odlitku, na vzdálenosti jednotlivých míst formy, pro která je počítána teplota a na stupni paraboly. Z toho vyplývá, že k výpočtu je třeba celá řada přesných hodnot (T_{ef} , n , X_2), které se obtížně stanovují. I z těchto výpočtů je patrné, že hodnoty naměřených a vypočtených teplot se ve vzdálenosti 15 mm od lince formy liší a ve vzdálenějších místech se rozdíly teplot snižují, jak je patrné z tabulky 3 - 5. K těmto odlišnostem přispívá stupeň paraboly, resp. efektivní teplota formy a velikost prohřátí formy v okamžiku ztuhnutí odlitku.

Na základě nedostatku dostupných dat tepelně-fyzikálních veličin pro materiály formovacích směsí použitých k výrobě forem v této diplomové práci, byly dodatečně

stanoveny i hodnoty tepelně-fyzikálních veličin podle metody Vejnika. Jako základní literární podklad pro porovnání stanovených veličin byla práce HAVLÍČKA [4], který udává hodnoty součinitele tepelné akumulace forem (b_F) z CT směsi 1510 [$W.s^{1/2}.m^{-2}.K^{-1}$] a ze syntetické bentonitové směsi - základní 1320 [$W.s^{1/2}.m^{-2}.K^{-1}$], při odlévání LLG, vypočítané metodou podle Halbarta. Pro porovnání byly spočítány metodou podle Vejnika hodnoty součinitelů tepelné akumulace jednotlivých forem za použití hodnoty efektivní teploty (T_{ef}); $T_{ef} = 0,97.T_{KR} - T_F$. Současně byly vypočteny i hodnoty dalších tepelně-fyzikálních veličin, jak je uvedeno v tabulce 3 - 8. Protože se vypočítané hodnoty b_F značně lišily od hodnot udávaných [4], bylo přistoupeno k výpočtům s pozměněnou hodnotou T_{ef} ; $T_{ef} = 0,85 . T_{KR} - T_F$. Tato efektivní teploty byla stanovena na základě měření č. 8 (II. etapa měření) porovnáním teploty krystalizace litiny a teploty líce v okamžiku ztuhnutí odlitku. Vypočítané hodnoty tepelně-fyzikálních veličin s touto T_{ef} , jsou uvedeny v tabulce 3 - 9. Tímto výpočtem se hodnoty b_F přiblížily hodnotám podle [4], přesto však vykazují nižší hodnoty. Hodnoty ostatních tepelně-fyzikálních veličin, např. tepelné vodivosti, nevykazují pro jednotlivé formovací směsi výrazné rozdíly, pohybují se od 0,93 do 1,6 [$W. m^{-1}.K^{-1}$]. Literárně udávané hodnoty činí např. pro CT směs 0,696 [$W. m^{-1}.K^{-1}$], viz příloha č. 6. Podobně je tomu s hodnotami měrných tepelných kapacit materiálu formy, které se pohybují dle přílohy č. 5 pro CT směs 1048 [$J.kg^{-1}.K^{-1}$]. Průměrná hodnota měrné tepelné kapacity zjištěná v této práci pro CT směs je 970 [$J.kg^{-1}.K^{-1}$].

Současně je nutné připomenout, že stanovení teploty rozhraní odlitek - forma (T_{PR}), ve velmi obtížné. Pojem „teplota rozhraní“ je relativní s ohledem na existenci vzduchové mezery, která je charakteristická pro tuhnutí odlitku v kovové formě. V souvislosti s teplotou rozhraní byl v I. etapě měření stanoven poměr T_{PR}/T_{KR} , který se u CT směsi pohybuje od 0,86 do 0,87 a u JFS od 0,90 do 0,93. Ve II. etapě experimentů, pro formu z JFS (měření č. 8), viz obr. 3 - 45, činí hodnota tohoto poměru teplot 0,80. Jak je z uvedených experimentů patrné, na tento poměr má pravděpodobně vliv teplota přehřátí odlévané litiny.

Pokud je možno se vyjádřit k provedenému modelování (simulaci) časových závislostí teplot ve slévárenských formách ze stejných formovacích materiálů, jako uskutečněná

experimentální měření, lze upozornit, že kvalita modelování pomocí programu SIMTEC, je ovlivněna řadou faktorů. Vliv na přesnost má zadání geometrie odlitku a formy, volba jejich materiálu včetně okolního prostředí, popř. dalších izolačních a pomocných materiálů. Též rozhodující je volba odpovídající simulační sítě a jejího vhodného rozdělení. Je důležité, aby simulační síť měla uzlové body v místech slévárenské formy, ve kterých je záměr sledovat a modelovat teplotu. Tato místa jsou důležitá pro simulační výpočet a odpovídají místům formy, kde byla sledována teplota při experimentálních měřeních. V dřívější verzi programu SIMTEC se tato místa pro simulační výpočet zadávala pomocí souřadnic, v tomto programu SIMTEC (verze ze 22.10.1997) se označují ručně (prostřednictvím příslušenství počítače), což způsobuje jisté nepřesnosti ve výpočtu. Tyto nepřesnosti se projevují nejvíce při simulaci teploty na lici slévárenské formy.

Je nutné konstatovat, že hlavním úkolem programu SIMTEC je modelování tuhnutí, popř. chladnutí odlitků ve slévárenských formách. I přes tuto informaci byla prováděna simulace za účelem sledování časových závislostí teplot ve slévárenských formách za podmínek, při kterých byla prováděna experimentální měření. Bylo sledováno tuhnutí a následné chladnutí odlitku z litiny. Současně bylo ověřováno, do jaké míry lze pomocí programu SIMTEC namodelovat uskutečněnou eutektickou a eutektoidní přeměnu a jak uvolňované teplo při tuhnutí a chladnutí odlitku ovlivňuje slévárenskou formu.

S ohledem na výše uvedené skutečnosti ohledně modelování, je nutno konstatovat, že prováděné simulační výpočty jsou pro program SIMTEC náročné. Tato náročnost souvisí především s dostupností potřebných materiálových dat, či příslušných hodnot tepelně-fyzikálních veličin. Jak mé zkušenosti se simulací ukázaly, je pro simulaci rozhodující tepelná vodivost materiálu formy (λ) a latentní krystalizační teplo (L_{KR}), popř. součinitel přestupu tepla (α). Současně je nutno upozornit, že tepelně-fyzikální veličiny jsou udávány v programu SIMTEC v jiných jednotkách, než v SI soustavě. Stávající databanka programu SIMTEC obsahuje relativně velké množství potřebných veličin, avšak pro úspěšnou simulaci, jsou některé nevyhovující. Z tohoto důvodu je nutné je upravit. Stanovení odpovídajících hodnot veličin potřebných k simulačnímu výpočtu je velmi časově náročné.

Též je třeba upozornit, že je velmi obtížné simulačním výpočtem docílit stejné hodnoty teploty eutektické a eutektoidní přeměny jako u experimentálně zjištěných časových závislostí teplot, podobně je tomu i s časy průběhů těchto přeměn a se sklonem jednotlivých křivek. Současně nelze nasimulovat ani teplotní prodlevy ve formě, které odpovídají vypařování vody (100 °C). To lze vysvětlit tím, že výpočty simulačního programu jsou založeny pouze na sdílení tepla vedením (jak je typické pro tepelné děje v odlitku) a nerespektují přenos vlhkosti, popř. jiných médií.

Prováděné simulační výpočty byly časově náročné. Tato náročnost spočívala v zadání geometrie odlitku a formy, i ve vlastních výpočtech, které vyžadovaly nalezení odpovídajících dat.

Závěrem lze konstatovat, že provedené simulační výpočty a z nich zobrazené časové závislosti teplot (viz obr. 3 - 14, 3 - 17, 3 - 20, 3 - 23, 3 - 26, 3 - 29, 3 - 32, 3 - 35, 3 - 38, 3 - 41, 3 - 44 a 3 - 47), jsou podobné časovým závislostem teplot získaným experimentálním měřením (viz obr. 3 - 12, 3 - 15, 3 - 18, 3 - 21, 3 - 24, 3 - 27, 3 - 30, 3 - 33, 3 - 36, 3 - 39, 3 - 42, 3 - 45).

Též je nutno konstatovat, že studium a výzkum problematiky sdílení tepla v pískových formách je náročné, vyžaduje nejen prostudování množství potřebné literatury, ale i manuální zručnost. Přesto řešení tohoto tématu bylo velmi zajímavé a také poučné.

5. ZÁVĚR

Tato diplomová práce řeší problematiku experimentálního sledování a následného modelování teplotních polí v soustavě odlitek LLG - písková forma z vybraných formovacích materiálů (CT směs, JFS, směs se 7 % bentonitu, přírodní směs rájeckého písku).

Práce je rozdělena do dvou základních částí - část rešeršní a část experimentální. V rešeršní části je proveden rozbor sledované problematiky se zaměřením na složité děje, které probíhají při tuhnutí odlitků v pískových formách, na matematicko-fyzikální rozbor teplotních polí a na tepelně-fyzikální veličiny materiálu odlitku a formy potřebné pro modelování časových závislostí teplot pomocí programu SIMTEC.

Hlavní - experimentální část této práce je věnována měření časových závislostí teplot v pískových slévárenských formách (170 x 220 x 200 mm - I. etapa experimentů a 250 x 250 x 260 mm - II. etapa experimentů) pro odlitek tvaru válce $\varnothing 40 \times 200$ mm z LLG. Následně byly provedeny pro jednotlivá měření výpočty teplot ve stěně slévárenské formy v okamžiku ztuhnutí odlitku metodou GICH a metodou podle Vejníka. Současně byly experimentálně naměřené časové závislosti teplot modelovány pomocí programu SIMTEC pro konkrétní podmínky lití. Tyto experimenty měly přispět k ověření vhodnosti a přesnosti použitého programu SIMTEC pro modelování teplotních polí v pískových slévárenských formách.

Z dílčích poznatků a naměřených výsledků lze uvést tyto závěry:

1. Použité měřicí zařízení i metodika jsou pro sledování časových závislostí v odlitku a pískových slévárenských formách vyhovující. Při odlévání do pískových slévárenských forem je nutné dodržet vždy stejné technologické zásady (vlhkost formy, časy lití atd.).
2. Určitý nedostatek lze spatřovat v přesnosti vymezení míst zabudování termočlánků, a to zejména na lici formy, což je velice důležité pro stanovení náhradní křivky, efektivní teploty formy (dle Vejníka) a tím i odpovídajícího prohřátí slévárenské formy v okamžiku ztuhnutí odlitku.
3. Metody výpočtů teplot v pískových slévárenských formách, které jsou založeny na Fourierově diferenciální rovnici, neobráží složité tepelné děje, které v těchto formách probíhají při tuhnutí a chladnutí odlitků. Z tohoto důvodu je třeba volit vztahy, které pro

výpočet uvažují složité tepelné děje probíhající v disperzních soustavách a vedle sdílení tepla vedením zahrnují i sdílení tepla prouděním a sáláním i přenos hmoty.

4. Vypočítané hodnoty tepelně-fyzikálních veličin (metodou dle Vejníka) jsou v souvislosti se simulací teplotních polí v pískových formách pouze orientační. Vypočítanou hodnotu tepelné vodivosti lze chápat jako střední hodnotu pro interval teplot od T_{PR} do T_F . Jak je obecně známo, tepelně-fyzikální veličiny materiálů jsou závislé na teplotě.
5. Simulační program SIMTEC je založen na Fourierově diferenciální rovnici sdílení tepla vedením a je určen především pro sledování tuhnutí a chladnutí odlitků ve slévárenských formách. Jeho uplatnění pro modelování teplotních polí v pískových slévárenských formách a nalezení shody s experimentem vyžaduje úpravu některých tepelně-fyzikálních veličin obsažených v databázi programu SIMTEC (tepelná vodivost materiálu formy, součinitel přestupu tepla mezi odlitkem a formou).
Současně výpočetním programem SIMTEC nelze namodelovat vypařování vlhkosti v pískových slévárenských formách.
6. Operace se simulačním programem SIMTEC jsou náročné a vyžadují nejen zvládnutí práce na počítačové stanici, ale také znalosti v oblasti slévárenské teorie i praxe.

Pro další výzkum doporučuji, i přes značnou složitost, zaměřit se na sledování teploty líce slévárenské formy i u obtížně formovatelných materiálů pískových slévárenských forem.

Ekonomické hodnocení této práce nebylo provedeno, neboť se jedná o prvotní výzkum v této oblasti.

6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ANISOVIČ, G. A.: Zatvěrděvanije otlivki. 1. vyd., Minsk 1979.
- [2] EXNER, J.: Metodika stanovení tepelně-fyzikálních vlastností formovacích a jadrových směsí. Slévárenství XXII, 1975, č. 9, s. 372.
- [3] GEDEONOVÁ, Z.: Určování součinitele tepelné akumulace pre niekteré formovacie zmesi v prevádzke zlievárne VSŽ, n.p., Košice. Slévárenství XXV, 1977, č. 2, s. 61.
- [4] HAVLÍČEK, F.: Kapitoly z teplofyziky odlitku a formy. [Skripta]. VŠB - HF Ostrava 1970.
- [5] HAVLÍČEK, F., ELBEL, T.: Matematické a experimentální stanovení součinitele tepelné akumulace b_F . In: Sborník vědeckých prací VŠB Ostrava 1968, s. 239.
- [6] HAVLÍČEK, F., ELBEL, T.: Studium tepelně fyzikálních vlastností formy. Slévárenství XVII, 1969, č. 9, s. 366.
- [7] HÝBLEROVÁ, M.: Stanovení tepelně - fyzikálních veličin CT - formovací směsí. [Bakalářská práce]. TU - FS Liberec 1996.
- [8] CHVORINOV, N.: Krystalizace a nestejnorodosti oceli. 1. vyd., Praha 1954.
- [9] JELÍNEK, P.: Slévárenské formovací směsí. I. část - Ostřiva. [Skripta]. VŠB Ostrava 1979.
- [10] JELÍNEK, P.: Tepelná vodivost formovacích směsí používaných při výrobě forem a jader masivních ocelových odlitků. Slévárenství XXX, 1982, č. 8, s. 325.
- [11] JELÍNEK, P.: Slévárenské formovací směsí. II. část - Pojivové soustavy formovacích směsí [Skripta]. VŠB - TU Ostrava 1996.
- [12] KAVIČKA, F., HLOUŠEK, J.: Příspěvek k numerickému řešení teplotního pole odlitku ozubeného kola. Strojírenství 32, 1982, č. 4, s. 220.
- [13] KAVIČKA, F., HLOUŠEK, J.: Porovnání termodynamických vlastností tří formovacích směsí výpočtem. Slévárenství XXVII, 1979, č. 8 s. 334.
- [14] KLEČKOVÁ, M., HAŠEK, P.: Stanovení součinitele teplotní vodivosti formovacích směsí daného chemického složení v závislosti na teplotě. Slévárenství XXXVIII, 1990 č. 10, s. 414.
- [15] KLEČKOVÁ, M.: Nestacionární pole a napjatost ve strojních součástech. 1. vyd., Praha 1979.

- [16] KUNEŠ, J.: Modelování tepelných procesů. 1. vyd., Praha 1989.
- [17] LYKOV, A.V.: Teorija teplopravodnosti. 1. vyd., Moskva 1967.
- [18] MICHEJEV, M.A.: Základy sdílení tepla. 1. vyd., Praha 1952.
- [19] MIKYŠKA, L.: Termoelektrické články. 1. vyd., Praha 1964.
- [20] RUSÍN, K.: Disperzní formovací materiály. [Skripta]. VUT Brno 1981.
- [21] RUSÍN, K.: Teorie slévárenských pochodů. [Skripta]. VUT Brno 1987.
- [22] STEIDL, H., NEUŽIL, L., FOŘT, I., VLČEK, J.: Úvod do proudění tekutin a sdílení tepla. 1. vyd., Praha 1975.
- [23] SLÉVÁRENSKÁ ROČENKA. ČSVTS Brno 1984, s.37.
- [24] TRUSKA, J.: Sledování teplotních polí v systému kokila - odlitek při odlévání vybraných slévárenských slitin. [Diplomová práce]. TU - FS Liberec, 1997.
- [25] VEJNÍK, A.I.: Teorija zatverdevanije otlivki. 1. vyd., Moskva 1960.
- [26] VEJNÍK, A.I.: Termodinamika litějnoj formy. 1. vyd., Moskva 1968.
- [27] VETIŠKA, A.: Teoretické základy slévárenské technologie. 1. vyd., Praha 1974.
- [28] VETIŠKA, A.: K problematice kalorimetrického zjišťování tepelně akumulčních vlastností formy. Slévárenství. XXII, 1974, č. 1, s. 13.
- [29] Firemní materiály RWP Aachen GmbH.
- [30] ŘEZNÍČEK, M.: Vlastnosti šedé litiny odlévané do pískových forem v závislosti na
- [31] VONDRÁK, V.: Metalugrie litin. [Skripta]. VŠB Ostrava 1978.
rychlosti ochlazování. Slévárenství XII, 1974, č. 10, s. 405.
- [32] GUSS Produkte '94 Konstruktionen nach Zeichnung oder Muster. Verlag Hoppenstedt GmbH Darmstadt, Berlin. April 1994.

Přehled publikací:

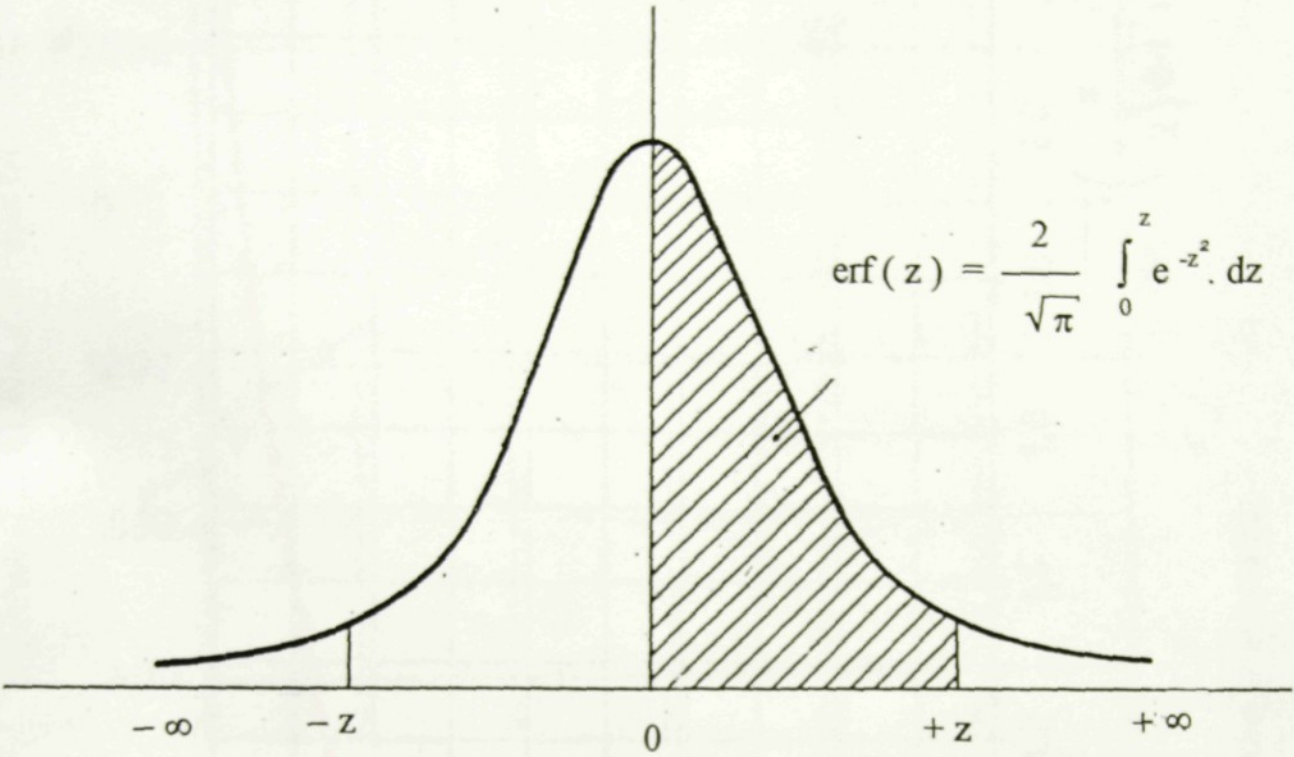
HÝBLEROVÁ, M.: Stanovení tepelně-fyzikálních veličin CT - formovacích směsí.
[Bakalářský projekt]. TU - FS, KSM Liberec 1996.

EXNER, J., NOVÁ, I., RUS, J., HÝBLEROVÁ, M.: Měření a simulování teplotních polí v pískových slévárenských formách. In: Sborník vědeckých prací z XI. z mezinárodního vědeckého symposia TU Liberec - TU Dresden. TU - FS Liberec, září 1997, s. 175.

NOVÁ, I., RUS, J., HÝBLEROVÁ, M.: Příspěvek k modelování teplotních polí v pískových slévárenských formách. In: Sborník z konference „Slévárny a jejich konkurenceschopnost „ Plzeň, červen 1998 s. 123.

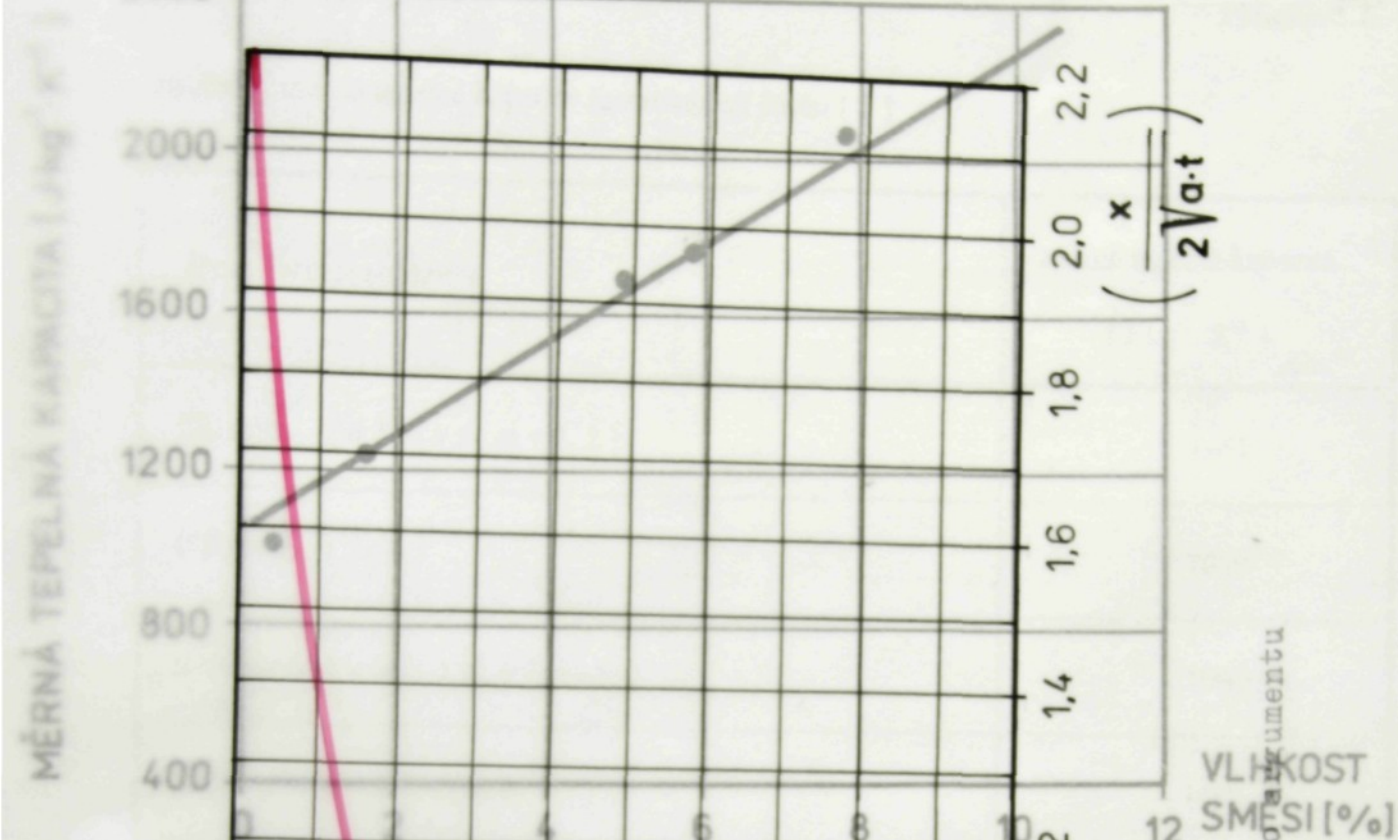
Hodnoty součinitele tepelné akumulace b_F podle HAVLÍČKA [4] a GEDEONOVÉ [3]

Formovací směs	Odléváný materiál	Modul odlitku [m]	Doba tuhnutí [s]	Hustota formy [kg.m ⁻³]	Tvar odlitku	Součinitel b_F [W. s ^{1/2} . m ⁻² K ⁻¹]
Syntetická bentonitová směs	litina	-	-	1700	-	1320
Syntet.bent. směs s 5% letku	litina	-	-	1500	-	1680
Bentonitová směs	ocel	0,020	766	-	deska	1325
Bentonitová směs	ocel	0,015	144	1500	válec	1474
Bentonitová směs	silumin	0,015	702	1550	válec	867
Bentonitová směs	silumin	0,020	1260	-	deska	1140
CT směs (SiO ₂)	ocel	0,020	691	-	deska	1335
CT směs (SiO ₂)	litina	-	-	1400	-	1510
CT směs (SiO ₂)	litina	-	-	1500	-	1670
CT směs	ocel	0,015	247	1400	válec	1620
Bentonitová směs	litina	0,015	438	-	deska	1375
						[3]
Bentonitová směs	silumin	0,015	696	-	deska	1375
						[3]
CT směs	litina	0,015	390	-	deska	1656
						[3]
CT směs	silumin	0,015	462	-	deska	1656
						[3]

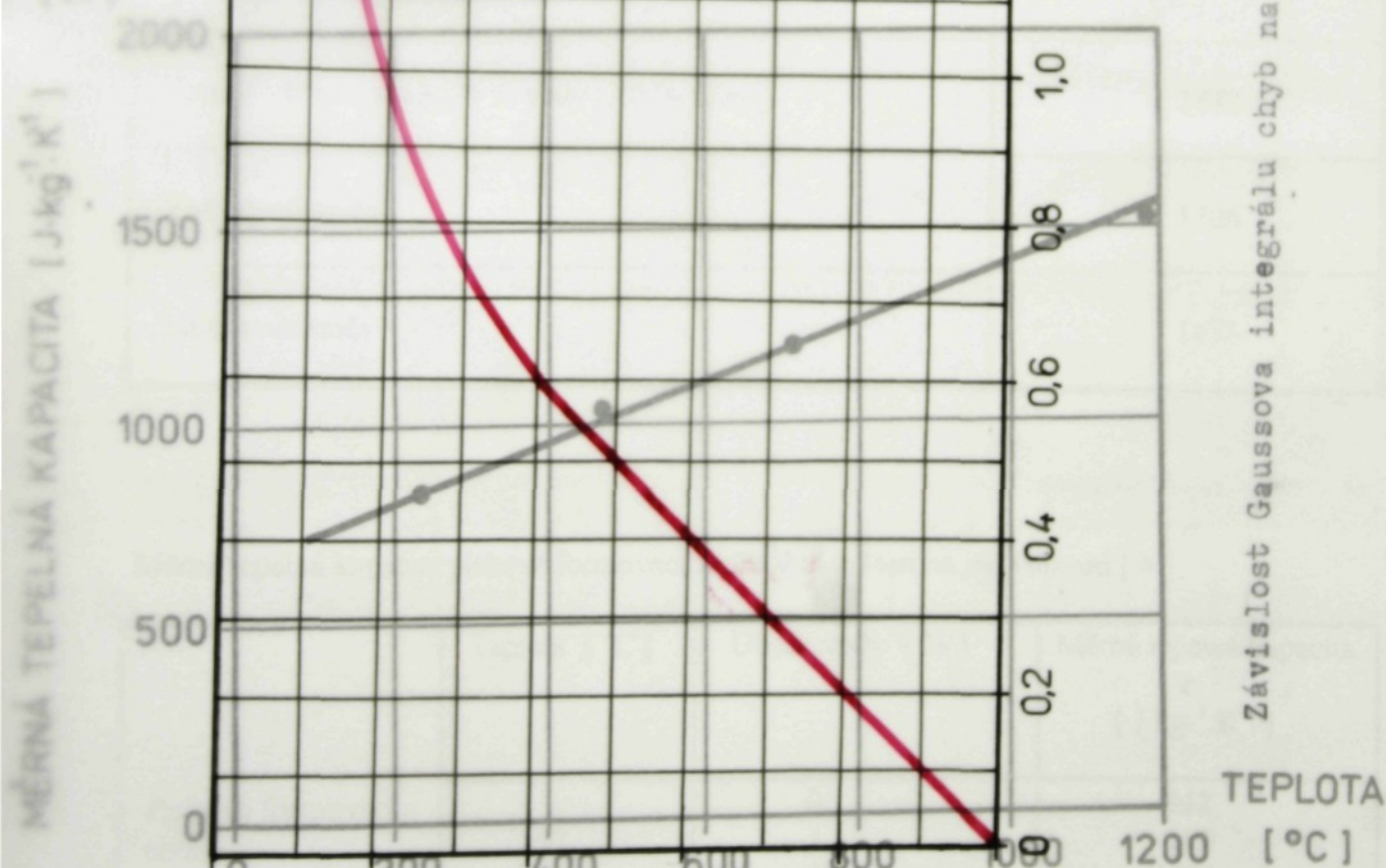


<i>z</i>	<i>erf z</i>	<i>z</i>	<i>erf z</i>	<i>z</i>	<i>erf z</i>	<i>z</i>	<i>erf z</i>	<i>z</i>	<i>erf z</i>
0,00	0,0000	0,50	0,5205	1,00	0,8427	1,50	0,9661	2,00	0,9953
0,05	0,0564	0,55	0,5633	1,05	0,8624	1,55	0,9716	2,05	0,9963
0,10	0,1125	0,60	0,6039	1,10	0,8802	1,60	0,9763	2,10	0,9970
0,15	0,1680	0,65	0,6420	1,15	0,8961	1,65	0,9804	2,15	0,9976
0,20	0,2227	0,70	0,6778	1,20	0,9103	1,70	0,9838	2,20	0,9981
0,25	0,2763	0,75	0,7112	1,25	0,9229	1,75	0,9867	2,25	0,9985
0,30	0,3286	0,80	0,7421	1,30	0,9340	1,80	0,9891	2,30	0,9989
0,35	0,3794	0,85	0,7707	1,35	0,9438	1,85	0,9911	2,35	0,9991
0,40	0,4284	0,90	0,7969	1,40	0,9523	1,90	0,9928	2,40	0,9993
0,45	0,4755	0,95	0,8209	1,45	0,9597	1,95	0,9942	2,45	0,9995
0,50	0,5205	1,00	0,8427	1,50	0,9661	2,00	0,9953	2,50	0,9996

<i>z</i>	<i>erf z</i>	<i>z</i>	<i>erf z</i>	<i>z</i>	<i>erf z</i>	<i>z</i>	<i>erf z</i>	<i>z</i>	<i>erf z</i>
2,60	0,99976	2,90	0,999959	3,20	0,9999940	3,50	0,99999926	3,80	0,999999922
2,70	0,99987	3,00	0,999978	3,30	0,9999969	3,60	0,99999963	3,90	0,999999965
2,80	0,999925	3,10	0,999988	3,40	0,9999985	3,70	0,99999982	4,00	0,999999985

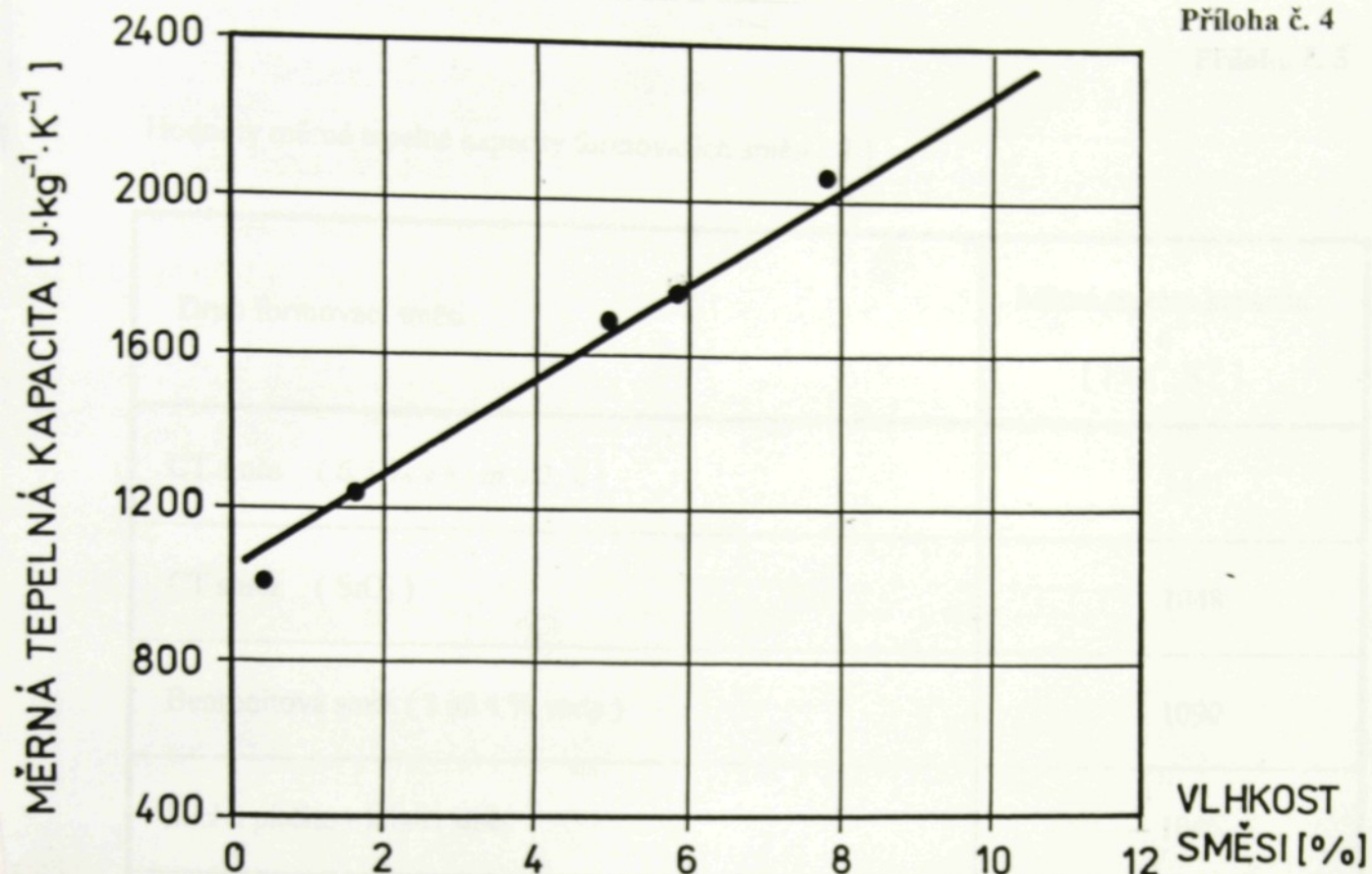


Závislost měrné tepelné kapacity pískové formovací směsi na její vlhkosti, podle RUSÍNA

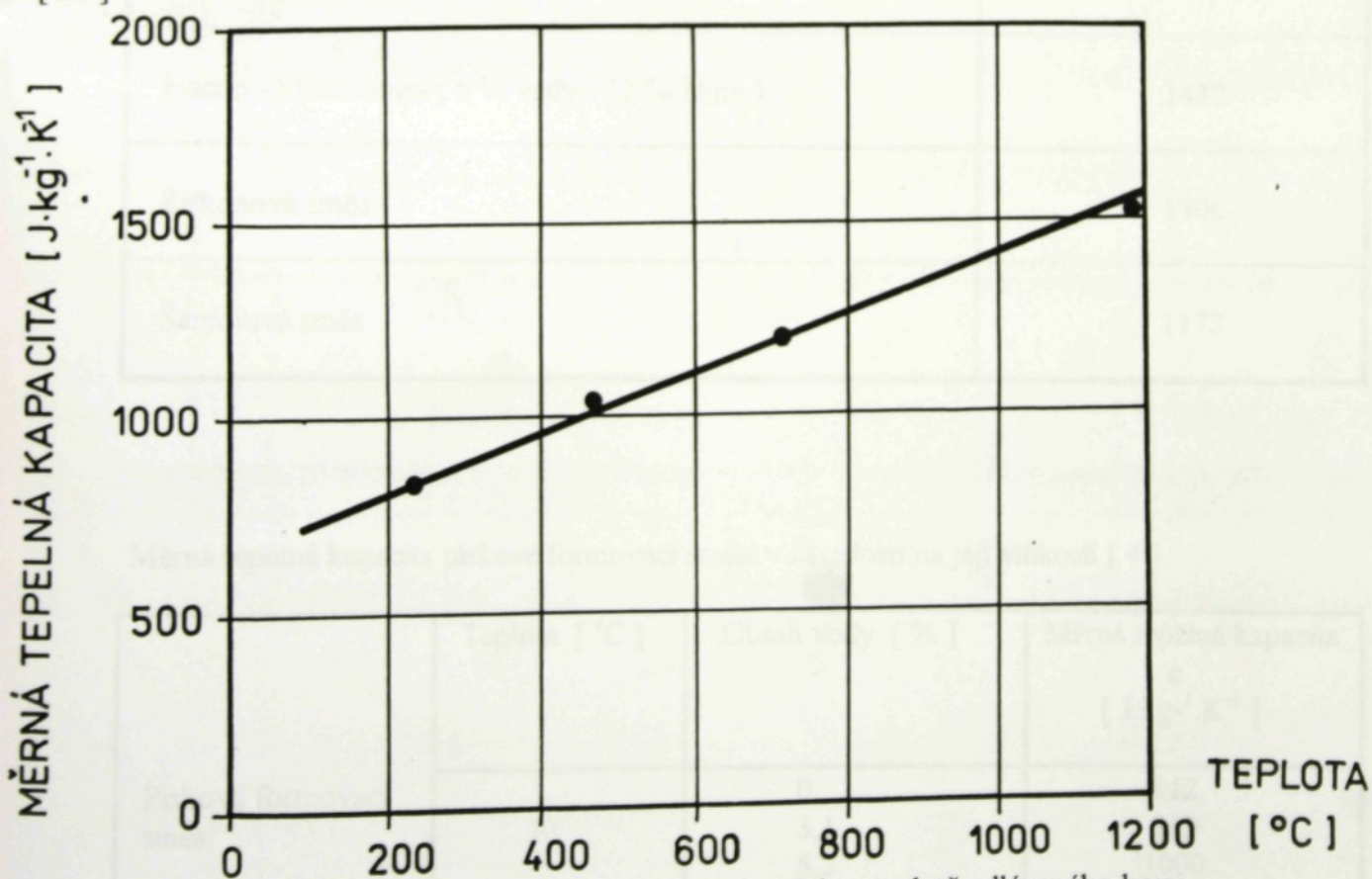


Závislost měrné tepelné kapacity vyčíslené bentonitové směsi na teplotě odlévaného kovu, podle RUSÍNA [21] ($\rho = 1600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $d_{50} = 0,25 \text{ mm}$)

Závislost Gaussova integrálu chyb na jeho argumentu



Závislost měrné tepelné kapacity pískové formovací směsi na její vlhkosti, podle RUSINA [21]



Závislost měrné tepelné kapacity vysušené bentonitové směsi na teplotě odlévaného kovu, podle RUSINA [21] ($\rho = 1600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $d_{50} = 0,25 \text{ mm}$)

Hodnoty měrné tepelné kapacity formovacích směsí [4]

Druh formovací směsi	Měrná tepelná kapacita c [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
CT směs (6,5 % v.s., m = 2, 2)	1461
CT směs (SiO ₂)	1048
Bentonitová směs (3 až 4 % vody)	1090
Suchá písčito - hlinitá směs	1046
Magnezito - hlinitá směs	1172
Písčito - hlinitá směs (6 % vody - 12 % hlíny)	1432
Zirkonová směs	1306
Šamotová směs	1173

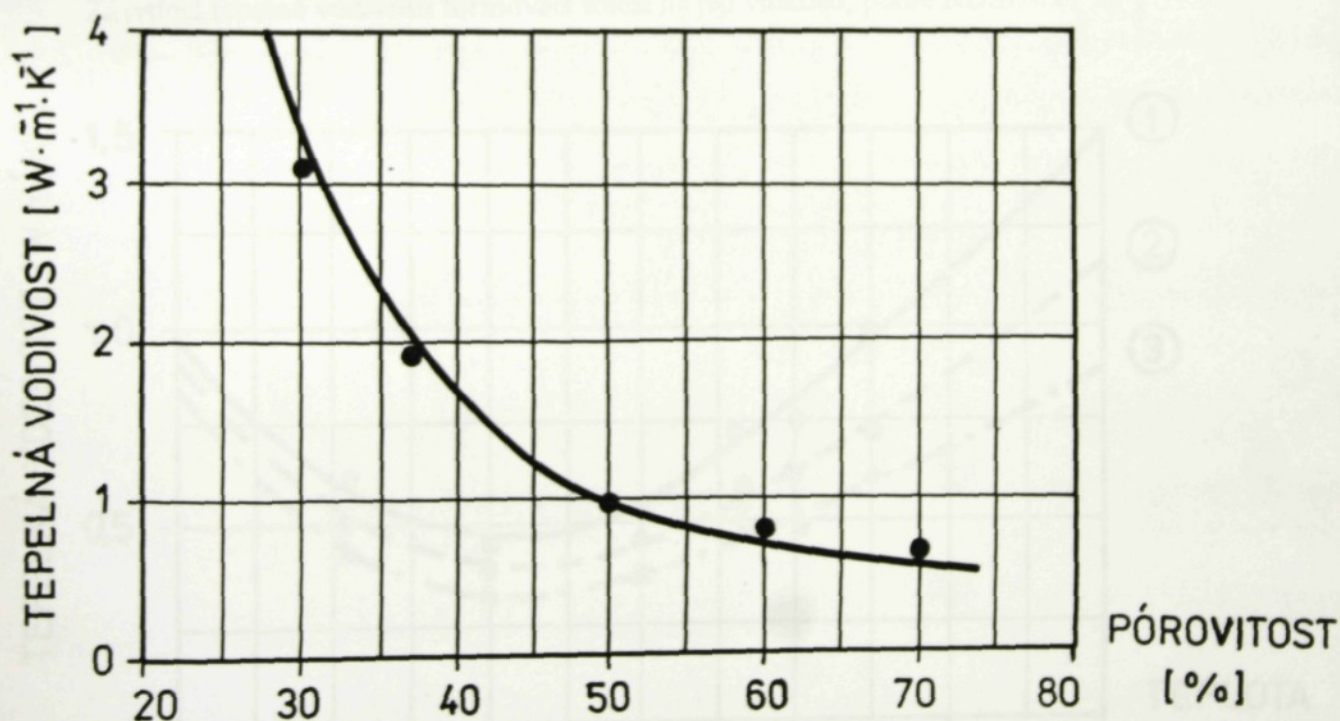
Měrná tepelná kapacita pískové formovací směsi v závislosti na její vlhkosti [4]

	Teplota [°C]	Obsah vody [%]	Měrná tepelná kapacita c [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
Písková formovací směs	50	0	842
		3,1	913
		5,2	1000
		9,7	1147
		15,0	1424

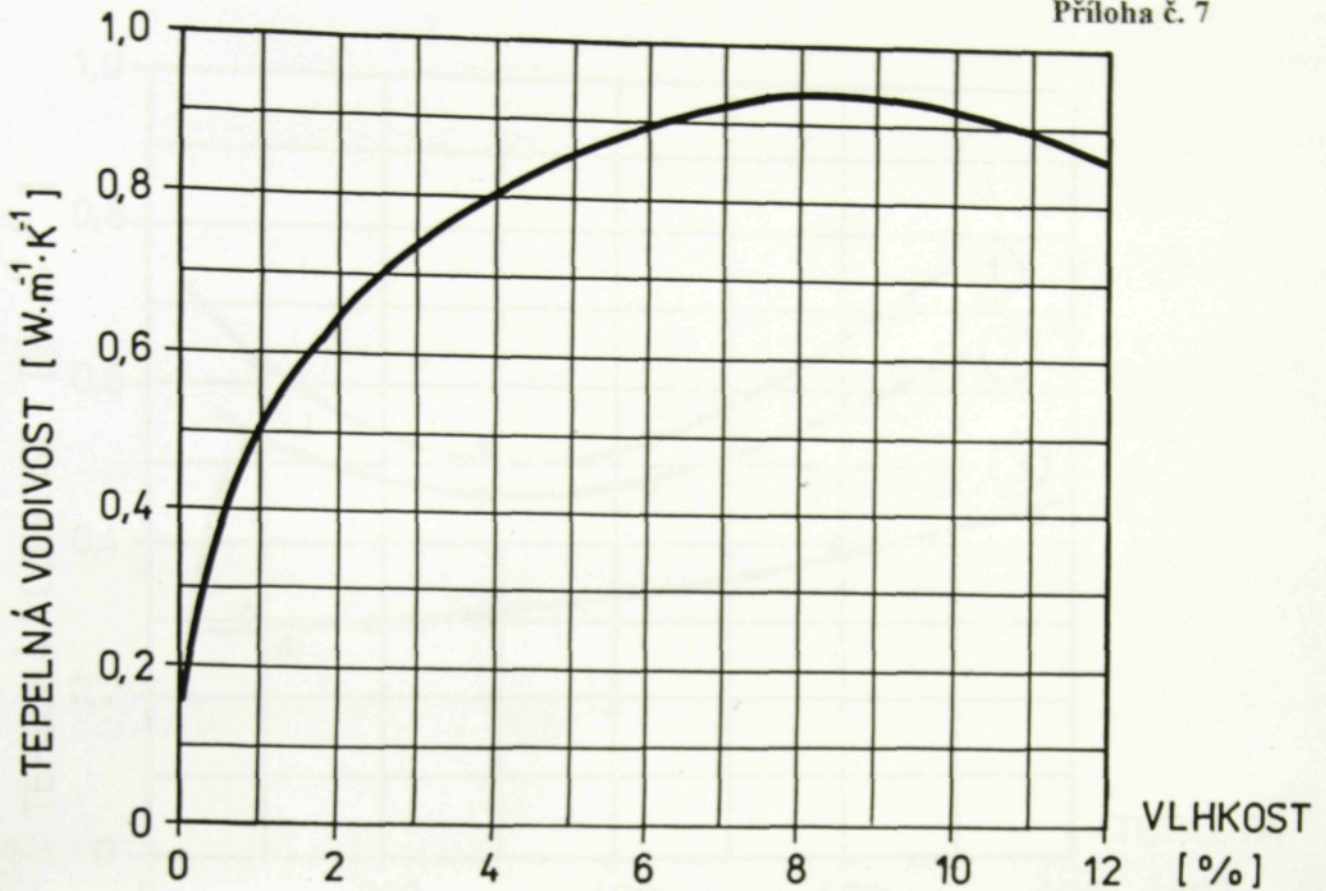
Hodnoty součinitele tepelné vodivosti CT směsi [4]

Odléváný kov	Teplota tuhnutí kovu [° C]	Součinitel tepelné vodivosti λ [W . m ⁻¹ . K ⁻¹]	
		směs I	směs II
LLG eutektická	1150	0,696	0,871
Čistý hliník	660	0,413	0,481
Ocel 1% C	T _L = 1480 T _S = 1350	0,800	1,063
Cín	419	0,378	0,424

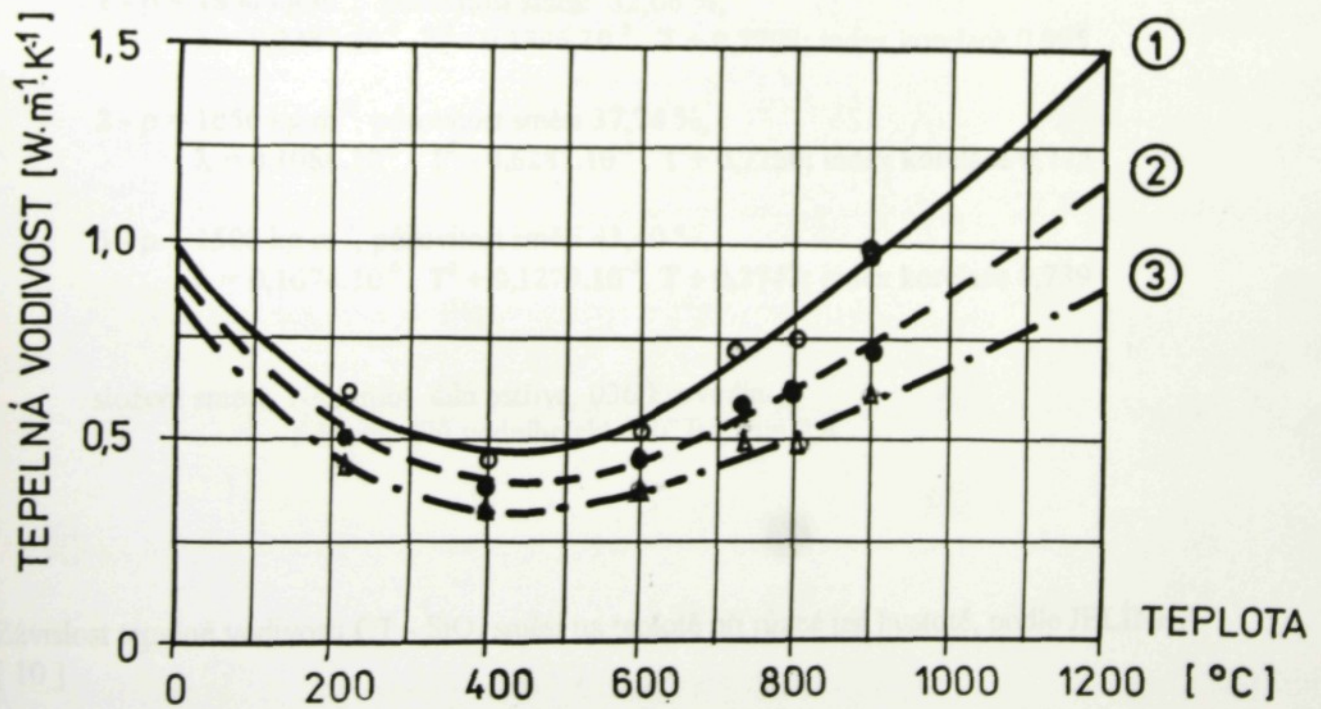
Poznámka: směs I - bez přísady sazí
směs II - s obsahem 1% sazí



Závislost tepelné vodivosti na pórovitosti směsi podle různých autorů, jak uvádí JELÍNEK [9]

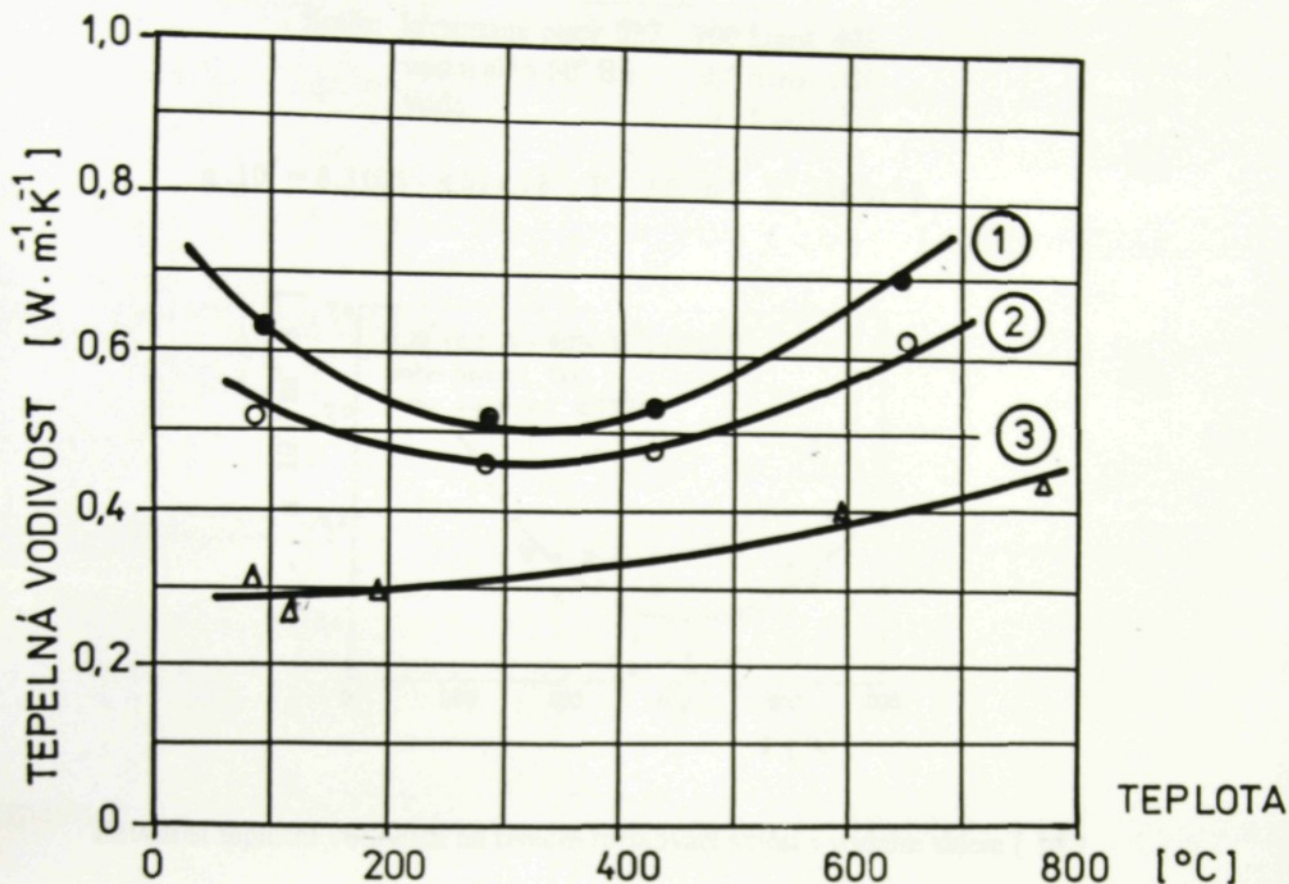


Závislost tepelné vodivosti formovací směsi na její vlhkosti, podle RUSÍNA [21]



1 - $d_{50} = 1$ až 1,5 mm; 2 - $d_{50} = 0,5$ až 1 mm; 3 - $d_{50} = 0,25$ až 0,5 mm

Závislost tepelné vodivosti vysušené bentonitové směsi na teplotě odlévaného kovu při různé zrnitosti použitého ostřiva, RUSÍN [21]



1 - $\rho = 1800 \text{ kg.m}^{-3}$, pórovitost směsi 32,08 %, $\lambda = 0,2387 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 0,1596 \cdot 10^{-2} \cdot T + 0,7799$; index korelace 0,995

2 - $\rho = 1650 \text{ kg.m}^{-3}$, pórovitost směsi 37,74 %, $\lambda = 0,1086 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 0,6287 \cdot 10^{-3} \cdot T + 0,7750$; index korelace 0,775

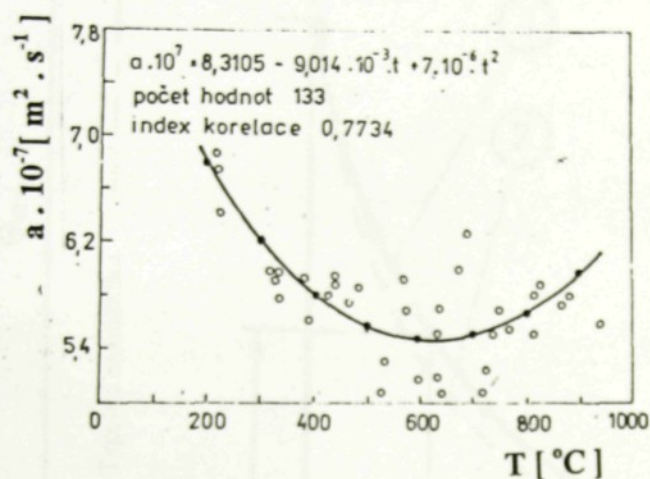
3 - $\rho = 1500 \text{ kg.m}^{-3}$, pórovitost směsi 43,40 %, $\lambda = 0,1674 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 0,1279 \cdot 10^{-3} \cdot T + 0,2742$; index korelace 0,739

složení směsi: 100 hmot. dílů ostřiva 036 Provodín
5 hmot. dílů vodního skla 50° Bé, $m = 2,4$

Závislost tepelné vodivosti CT - SiO₂ směsi na teplotě při různé její hustotě, podle JELÍNKA
[10]

Směs: křemenný písek 027 100 hmot. dílů
 vodní sklo 50° Bé 0,5 hmot. dílů
 voda 5 hmot. dílů

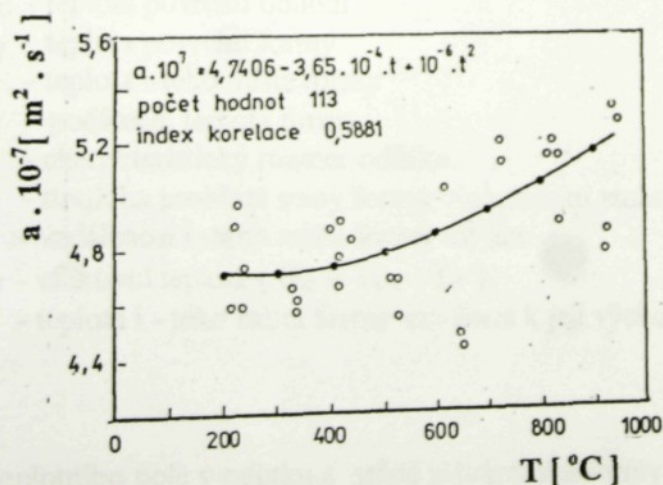
$$a \cdot 10^7 = 8,3105 - 9,014 \cdot 10^{-3} \cdot T + 7,0 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$$



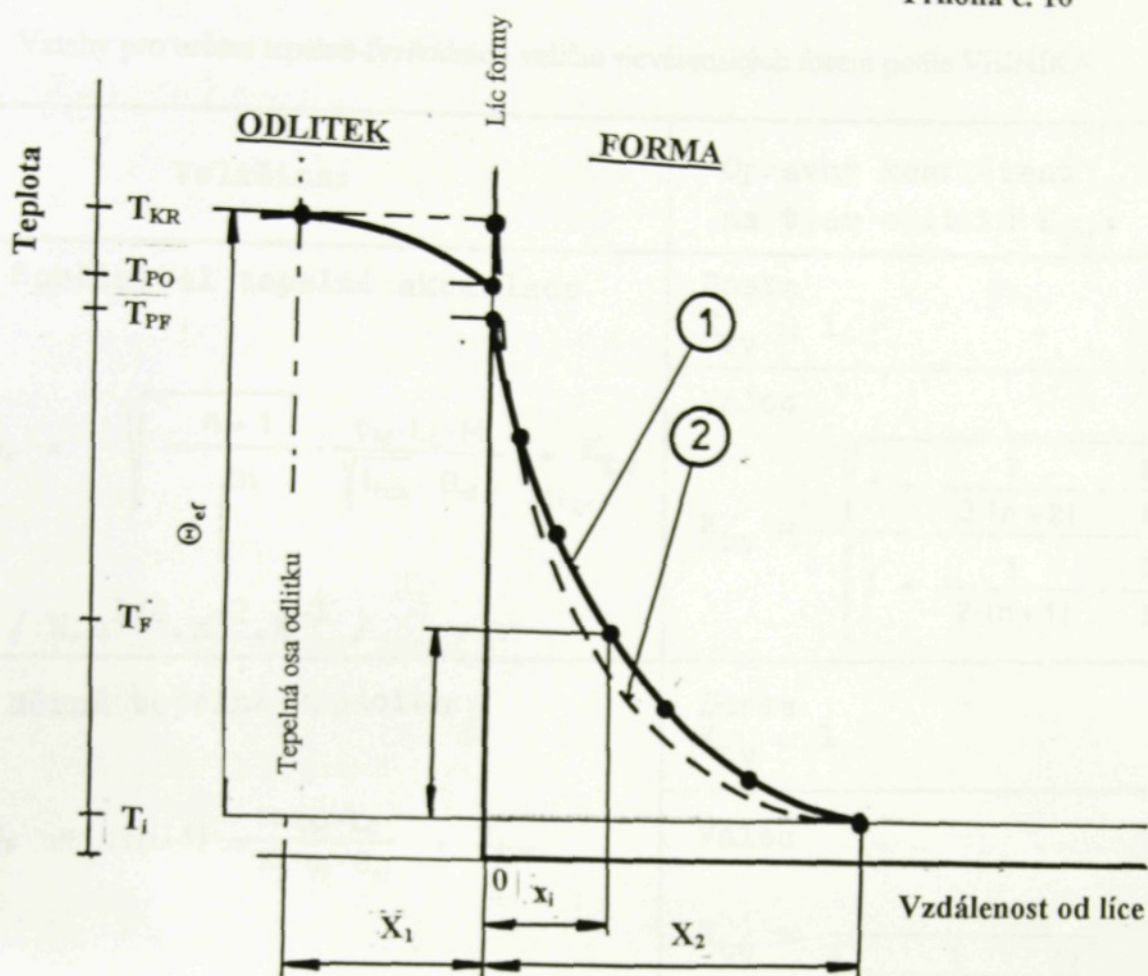
Závislost teplotní vodivosti na teplotě formovací směsi s vodním sklem [14]

Směs: křemenný písek 027 100 hmot. dílů
 bentonit 7 hmot. dílů
 voda 3,5 hmot. dílů

$$a \cdot 10^7 = 4,7406 - 3,65 \cdot 10^{-4} \cdot T + 1,0 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$$



Závislost teplotní vodivosti na teplotě formovací směsi s natrifikovaným bentonitem [14]



- 1 - teplotní pole ve stěně slévárenské formy v okamžiku ztuhnutí odlitku
(z hodnot naměřených)
- 2 - teplotní pole ve stěně slévárenské formy v okamžiku ztuhnutí odlitku
(z hodnot vypočítaných)

T_{KR} - teplota krystalizace odlévaného kovu

T_{PO} - teplota povrchu odlitku

T_{PF} - teplota povrchu formy

T_i - teplota i-tého místa formy

T_F - počáteční teplota formy

X_1 - charakteristický rozměr odlitku

X_2 - tloušťka prohřáté stěny formy v okamžiku ztuhnutí odlitku

x_i - vzdálenost i-tého místa formy od líce

Θ_{ef} - efektivní teplota ($\Theta_{ef} = T_{KR} - T_F$)

Θ_i - teplota i-tého místa formy vztažená k její výchozí teplotě ($\Theta_i = T_i - T_F$)

Schéma průběhu teplotního pole v odlitku a stěně slévárenské formy v okamžiku ztuhnutí odlitku, stanoveno metodou podle VEJNIKA [26]

Vztahy pro určení tepelně-fyzikálních veličin slévárenských forem podle VEJNIKA

Veličina:	Opravný koeficient na tvar odlitku K_{tv} :
Součinitel tepelné akumulace $b_F = \sqrt{\frac{n+1}{2n} \cdot \frac{\varrho_M \cdot L_c \cdot M}{t_{tuh} \cdot \theta_{ef}}} \cdot K_{tv}$ / $W \cdot s^{1/2} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ /	Deska $K_{tv} = 1$
	Válec $K_{tv} = \frac{\sqrt{1 + \frac{2}{3 \cdot (n+2)} \cdot \frac{X_2}{M}}}{\left[1 + \frac{1}{2 \cdot (n+1)} \cdot \frac{X_2}{M}\right]}$
Měrná tepelná kapacita $c_F = (n+1) \cdot \frac{M \cdot \varrho_M \cdot L_c}{X_2 \cdot \varrho_F \cdot \theta_{ef}} \cdot K_{tv}$ / $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ /	Deska $K_{tv} = 1$
	Válec $K_{tv} = \frac{1}{\left[1 + \frac{1}{2(n+2)} \cdot \frac{X_2}{M}\right]}$
Tepelná vodivost $\lambda_F = \frac{1}{2n} \cdot \frac{M \cdot X_2 \cdot \varrho_M \cdot L_c}{\theta_{ef} \cdot t_{tuh}} \cdot K_{tv}$ / $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ /	Deska $K_{tv} = 1$
	Válec $K_{tv} = \frac{\left[1 + \frac{2}{3(n+2)} \cdot \frac{X_2}{M}\right]}{\left[1 + \frac{1}{2(n+2)} \cdot \frac{X_2}{M}\right]}$
Teplotní vodivost $\alpha_F = \frac{X_2^2}{2n \cdot (n+1) \cdot t_{tuh}} \cdot K_{tv}$ / $m^2 \cdot s^{-1}$ /	Deska $K_{tv} = 1$
	Válec $K_{tv} = \left[1 + \frac{2}{3(n+2)} \cdot \frac{X_2}{M}\right]$

n - výsledný stupeň paraboly / 1 /,

M - modul odlitku / m /

ϱ_M - hustota taveniny / $kg \cdot m^{-3}$ /,

L_c - celkové krystalizační teplo odlitku / $J \cdot kg^{-1}$ /,

t_{tuh} - celkový čas tuhnutí odlitku / s /,

θ_{ef} - efektivní teplota / $^{\circ}C$ /,

X_2 - tloušťka prohráté vrstvy / m /

JEAN BAPTISTE JOSEPH FOURIER

21. 3. 1768 - 16. 5. 1830

Francouzský matematik a fyzik. Svou prací *Théorie analytique de la chaleur* (1822) vytvořil matematické základy teorie vedení tepla. Poprvé formuloval významnou vlastnost fyzikálních rovnic vedení tepla, jejich rozměrovou homogenost



JEAN BAPTISTE BIOT

21. 4. 1774 - 3. 2. 1862

Francouzský fyzik, který se v letech 1802 až 1804 zabýval analýzou vedení tepla a vlivem působení vnější konvekce na vedení.



ALEXEJ VASILJEVIČ LYKOV

20. 9. 1910 - 28. 6. 1974

Ruský fyzik, který v roce 1935 objevil termodifúzi vlhkosti v kapilárně porézním materiálu, nazývanou efektem Lykovovým. Vytvořil nový vědní obor zaměřený na řešení složitých úloh přenosu tepla a hmoty v kapilárně porézním materiálu a disperzním prostředí při působení fázových a chemických přeměn. Z řady monografií patří k nejvýraznějším *Teorija suški* (1951) a *Teorija teploprovodnosti* (1969).



Prohlášení k využívání výsledků DP:

Jsem si vědom(a) toho, že diplomová práce je majetkem školy a že s ní nemohu sám(a) bez svolení školy disponovat, a že diplomová práce může být zapůjčena či objednána (kopie) za účelem využití jejího obsahu.

Beru na vědomí, že po 5ti letech si mohu diplomovou práci vyžádat v Univerzitní knihovně TUL v Liberci, kde je uložena.

Jméno a příjmení (- rodné příjmení) : MICHAELA HÝBLEROVÁ

Adresa : Tisovecká 900, Kolín II., PSČ 280 00

Podpis

: 