

VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ V LIBERCI
nositelka Řádu práce

Fakulta strojního inženýrství
Katedra technologie a nauky o materiálu

Ing. Zdeněk H o l u b e c , CSc

TEPELNÉ NAMÁHÁNÍ KOVOVÝCH SLÉVÁRENSKÝCH FOREM

Habilitační práce

Práce byla vypracována na katedře technologie
a nauky o materiálu

Vedoucí katedry: Doc. Ing. Václav Chaloupecký, CSc

Liberec - červen 1979

OBSAH

Použité označení veličin a jejich fyzikální rozměry.....	5
ÚVOD.....	7
1. CHARAKTERISTIKA KOVOVÝCH SLÉVÁRENSKÝCH FOREM A JEJICH PROVOZU.....	10
1.1 Materiálové a konstrukční parametry kovových slévárenských forem.....	11
1.2 Provoz kovových forem.....	17
1.3 Namáhání kovových forem při jejich provozu.....	19
2. TEPELNÉ NAMÁHÁNÍ KOVOVÝCH FOREM.....	23
2.1 Podmínky a důsledky tepelného namáhání.....	23
2.2 Tepelné děje v kovových slévárenských formách při tuhnutí a chladnutí odlitků.....	24
2.2.1 Průběh tepelných dějů v kovové formě při jednorázovém odlití.....	25
2.2.2 Průběh tepelných dějů při opakovaném odlívání.....	28
2.3 Metody řešení teplotních polí kovových slévárenských forem.....	28
2.3.1 Základní zákonitosti a jejich rozbor.....	28
2.3.2 Řešení teplotních polí kovových forem na samočinném počítači.....	32
2.3.3 Pokusné měření teplotního pole kovových forem.....	36

2.4	Teplotní napětí a deformace v kovových slévárenských formách.....	37
2.4.1	Základní podmínky vzniku a určování teplotních napětí a deformací těles.....	37
2.4.2	Početní řešení teplotních napětí a deformací kovových forem na samočinném počítači.....	48
2.4.3	Pokusné měření rozměrových a tvarových změn kovových forem.....	49
2.5	Příklady průběhů teplotních polí, teplotních napětí a deformací kovových forem.....	53
3.	DŮSLEDKY TEPELNÉHO NAMÁHÁNÍ NA PROVOZ A ŽIVOTNOST KOVOVÝCH FOREM.....	69
3.1	Podstata a mechanismus opotřebení kovových forem.....	69
3.2	Některé materiálové, konstrukční a technologické vlivy na životnost kovových forem.....	77
3.2.1	Vliv vlastností materiálu formy.....	77
3.2.2	Vliv konstrukce formy.....	80
3.2.3	Vliv technologických podmínek.....	81

4.	DÍLČÍ ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ KE SNÍŽENÍ TEPELNÉHO NAMÁHÁNÍ KOVOVÝCH FOREM.....	83
5.	ZÁVĚR.....	86
6.	SEZNAM LITERATURY.....	89

Použitá označení veličin a jejich fyzikální rozměry

T	- teplota	$K, ^\circ C$
T_{okoli}	- teplota okolního prostředí	$K, ^\circ C$
$T_{poč}$	- počáteční teplota tělesa	$K, ^\circ C$
T_{tuh}	- teplota tuhnutí odlitku	$K, ^\circ C$
T_k	- teplota povrchu rozhraní (styku) soustavy odlitek - forma	$K, ^\circ C$
T_{ko}	- střední kalorimetrická teplota soustavy	$K, ^\circ C$
T_{prac}	- pracovní teplota formy	$K, ^\circ C$
ΔT	- teplotní rozdíl	$K, ^\circ C$
t	- čas	s
t_c	- doba pracovního cyklu formy	s
Q	- množství tepla	J
λ	- součinitel tepelné vodivosti	$W/m \cdot K$
c	- měrné teplo	$J/kg \cdot K$
ρ	- měrná hmotnost (hustota)	kg/m^3
a	- součinitel teplotní vodivosti	m^2/s
b	- součinitel tepelné akumulace $b = \sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho}$	$W \cdot s^{1/2}/m^2 \cdot K$
L_{tuh}	- latentní teplo tuhnutí	J/kg
α	- součinitel přestupu tepla	$W/m^2 \cdot K$
R	- měrný tepelný odpor	$m^2 \cdot K/W$
$E_{sál}$	- poměrná sálavost tělesa	
α_t	- teplotní součinitel délkové roztlačnosti	$1/K$
σ	- normálové napětí	MPa
σ_t	- teplotní napětí	MPa
ϵ	- poměrné predloužení	

E	- modul pružnosti v tahu	MPa
G	- modul pružnosti ve smyku	MPa
ν	- Poissonovo číslo	
x, y, z	- souřadnice	
l	- délka tělesa	m
Δl	- rozdíl délek (dilatace)	m
L_1, L_2	- délka, šířka desky	m
χ	- charakteristický rozměr (tloušťka)	m
w	- průhyb tělesa (desky)	m

$$Fo = \frac{a \cdot t}{\chi^2} \quad - \text{Fourierovo číslo}$$

Indexy u jednotlivých použitých veličin

0	- okolní prostředí
1	- vlastnost nebo stav odlitku
2	- vlastnost nebo stav formy
mez	- vlastnost nebo stav rozhraní mezi odlitkem a formou
I	- vlastnost nebo stav líce formy
II	- vlastnost nebo stav vnějšího povrchu formy

Poznámka:

Označení některých veličin použitých při početním řešení teplotních polí a teplotních napětí je uvedeno zvlášť na str. 34.

ÚVOD

Pro další rozvoj materiálně technické základny rozvinuté socialistické společnosti v Československu byl na XV. sjezdu KSČ vytyčen mimo jiné úkol zajistit maximální efektivnost a hospodárnost veškeré činnosti. Jeho splnění se musí promítnout na jedné straně ve snížení nákladů na materiál, energii i lidskou práci, na druhé straně ve zvýšení kvality každého výrobku.

Pro slévárnictví, jakožto důležitou součást celé strojírenské výroby, to znamená dále se orientovat na výrobu odlitků s vyšší rozměrovou a tvarevou přesností produktivnějšími a hospodárnějšími technologickými postupy. Významnou úlohu v tom musí sehrát i vědecko výzkumná základna. Jejím úkolem je jednak trvalé upřesňování a rozšiřování dosavadních poznatků o mechanismu utváření požadovaných vlastností, tvaru a rozměrů odlitků, ale též objevování nových metod a postupů, jimiž je možno těchto vlastností u odlitků dosáhnout.

Na katedře technologie a nauky o materiálu Vysoké školy strojní a textilní v Liberci se již řadu let pracuje na řešení některých otázek týkajících se výroby tzv. přesných odlitků. Mezi nimi je věnována pozornost též problematice výroby odlitků v kovových formách, ať už gravitačním, tlakovým nebo odstředivým litem. Výzkumné práce jsou zaměřeny zejména na studium tepelně fyzikálních parametrů přenosu tepla v soustavě odlitek - kovová forma při tuhnutí a chladnutí odlitku. Jejich cílem je přispět k objasnění vlivu podmínek a vlastního průběhu sdílení tepla mezi odlitkem a formou na chování kovové formy při jejím provozu, na podmínky tepelného namáhání, vzniku teplotních napětí a deformací, na životnost kovových forem.

Toto zaměření je v souladu i s potřebami praxe odlévání do kovových forem a to především z hlediska možností zvýšení produktivity práce, snížení nákladů při výrobě odlitků, zvýšení jejich kvality a zvýšení životnosti forem. Řada výsledků naší práce je zpracována ve vědecko výzkumných zprávách, kandidátských dizertačních a diplomových pracích, jejichž přehled je uveden v seznamu literatury.

Předložená habilitační práce se zaměřuje na shrnutí některých poznatků týkajících se tepelného namáhání kovových slévárenských forem a jeho důsledků na jejich chování a provoz při výrobě odlitků. Při jejím zpracování jsou si stanovil tyto dílčí cíle:

1. provést rozbor podmínek vzniku tepelného namáhání kovových slévárenských forem při tuhnutí a chlazení odlitků;
2. podat přehled o způsobech řešení tepelných dějů v kovových formách včetně určování intenzity tepelného namáhání; přitom se zvlášť zaměřit na metody rozpracované a ověřené na našem pracovišti;
3. provést rozbor vlivu tepelného namáhání na poškození kovových forem při jejich provozu;
4. shrnout některá doporučení materiálového, konstrukčního a technologického charakteru, jež mohou vést ke snížení důsledků tepelného namáhání a tím i ke zvýšení životnosti kovových slévárenských forem.

Tyto dílčí problémy jsou postupně rozpracovány v jednotlivých kapitolách předložené práce. Při jejich zpracování jsem vycházel jednak ze zkušeností a výsledků desavádních prací provedených na katedře včetně výsledků vlastních měření, dále ze

studia různých literárních podkladů a z poznatků získaných od pracovníků z praxe.

Vlastní zprávu jsem se snažil zpracovat i s přihlédnutím k možnosti využití poznatků ve výuce předmětu "Slévárenství" ve specializaci strojírenská technologie i možnosti jejich popularizace mezi širší odbornou veřejností. Uvedené poznatky mohou posloužit nejen při navrhování kovových slévárenských forem a při stanovení optimálních technologických podmínek jejich provozu, ale i při řešení obdobných problémů u forem pro výrobky z plastů, u sklářských forem a pod.

1. CHARAKTERISTIKA KOVOVÝCH SLÉVÁRENSKÝCH FORM /1 až 12/

Kovové slévárenské formy patří do skupiny t. zv. trvalých forem, neboť mohou být použity pro větší počet odlití. Lze v nich vyrábět odlitky opakovaně ve velkých seriích. Jejich použití rozšířilo možnosti plnění slévárenských forem - vedle gravitačního (kokilového) lití umožnilo plnění zvýšenými tlaky - t. zv. tlakovým litím a odstředivým litím.

U kokilového lití se forma plní roztaveným kovem pouze působením gravitační nebo tíhové síly.

U tlakového lití se při plnění formy působí na taveninu zvýšeným tlakem (v rozmezí $0,5 \cdot 10^2$ až $5 \cdot 10^2$ kPa u nízkotlakového lití, v rozmezí $20 \cdot 10^2$ až $6000 \cdot 10^2$ kPa u lití pod tlakem).

U odstředivého lití je zvýšený tlak na taveninu vyvolán odstředivou silou při rotaci formy.

Všechny uvedené způsoby se doplňují, každý z nich má svoji oblast použití. Jejich společné přednosti oproti výrobě odlitků v netrvalých formách jsou především: vyšší rozměrová a tvarová přesnost, vyšší kvalita povrchu i výhodnější mechanické vlastnosti odlitků, vyšší produktivita práce, nižší výrobní náklady, možnost mechanizace a automatizace výrobních pochodů a v neposlední řadě i zlepšení pracovních podmínek slévárenského provozu.

Větší produktivita práce je nepochybně dosahována tlakovým litím, avšak podstatně vyšší pořizovací náklady potřebného zařízení i forem vyžadují velkou seriovost odlitků. Kokilové lití je naproti tomu vhodné pro malé a střední serie a pro takové odlitky, jejich konstrukční uspořádání výrobu tlakovým litím neumožňuje.

1.1. Materiálové a konstrukční parametry kovových slévárenských forem

Lití do kovových forem se liší od odlévání do pískových forem vedle možnosti opakovaného odlévání především z hlediska tepelně fyzikálního tím, že kovové formy vykazují v důsledku vysokých hodnot tepelně fyzikálních vlastností (λ, c, ρ, b) podstatně větší ochlazovací účinek na taveninu. Doba tuhnutí odlitku se tedy oproti odlévání do pískové formy zkracuje, dochází i ke změně podmínek krystalizace. V tabulce 1.1 jsou uvedeny hodnoty tepelně fyzikálních vlastností některých materiálů forem (včetně forem netrvalých), což umožňuje porovnat ochlazovací schopnost forem z různých materiálů.

Při odlévání do kovových forem dochází k velkému přechlazení taveniny a tím ke vzniku velkého počtu zárodků kritické velikosti. Výsledná struktura odlitků litých do kokil je tedy jemnozrnější, hodnoty mechanických vlastností takových odlitků jsou vyšší. Tento příznivý vliv zvýšené rychlosti ochlazování se projevuje u většiny materiálů odlitků (slitiny Al, slitiny Cu a uhlíkové oceli). Vedle toho se u některých odlévaných materiálů zabrání rychlým ochlazováním vytvoření stabilní struktury, zejména v povrchových vrstvách a tenkých průřezích odlitků. Tak na př. u šedé litiny dochází k vyloučení cementitu, ke vzniku t. zv. bílého lomu, což je jev nepříznivý a nežádoucí.

Lití do kovových forem se používá k výrobě odlitků z neželezných kovů i ze slitin železa a to o hmotnosti od několika gramů až do desítek tun. Z hlediska ekonomického je nejúčelnější používat kokilového lití v seriové a hromadné výrobě odlitků.

Vlastní konstrukce kovových forem do značné míry ovlivňuje jejich ekonomický provoz i kvalitu vyráběných odlitků. Konstrukce

Materiál formy	Teplotná vodivost λ [W/m.K]	Měrné teplo c [kJ/kg.K]	Hustota ρ [kg/m ³]	Tepelná akumulace b [W.s ^{1/2} /m ² .K]	Teplotní roztlačnost α_t [1/K]	Poznámka
písková forma syrová	0,59	0,92	1 550	915	8.10 ⁻⁶	všechny uvedené hodnoty závisí na teplotě; proto se hodnoty uvedené v různých tabulkách značně liší
	0,38	0,80	1 500	670	8.10 ⁻⁶	
litina (3% C)	49	0,55	7 200	14 000	10,4 . 10 ⁻⁶	
	45	0,46	7 450	12 500	11,4 . 10 ⁻⁶	
ocel (0,25% C)						
měď	395	0,39	8 920	37 000	16,4 . 10 ⁻⁶	
hliník	226	0,96	2 700	24 000	24.10 ⁻⁶	

kokil jsou velmi různorodé, právě v důsledku různorodosti rozměrů i tvarů v nich vyráběných odlitků.

Nejčastěji se kovové slévárenské formy (kokily) navrhují jako dělené, a to s vodorovnou dělicí rovinou nebo se svislou dělicí rovinou. Volba dělicí roviny závisí na tvaru, rozměrech a hmotnosti odlitku; při tom je však třeba brát v úvahu i možnosti mechanizace celého pochodu výroby odlitku, jednoduchost a bezpečnost obsluhy stroje, možnost rychlého vyhození odlitku z kokily i co nejmenší počet jader.

Důležitým krokem při konstrukci je také volba polohy odlitku v kokile. Musí zajistit pokud možno klidný pohyb taveniny ve vtokové soustavě i v dutině formy, odstranění plynů a vzduchu při plnění formy i požadovaný tepelný režim soustavy odlitek - forma. V jedné kokile může být odléván jeden odlitek i několik odlitků, podle toho, jaké jsou jejich rozměry a tvar.

Hlavní zásady, které je nutno brát při konstrukci kokil v úvahu, je možno shrnout do těchto bodů /7/:

- a) volit minimální počet dělicích rovin;
- b) volit optimální tloušťku stěn kokily;
- c) volit vhodný způsob ochlazování kokily.

Dále je třeba navrhnout:

- a) opatření k zamezení deformací kokil;
- b) způsob upnutí a snímání kokily se stroje;
- c) způsob sesazení jednotlivých dílů kokily;
- d) způsob odvodu plynů z dutiny formy;
- e) mechanismus vyhazování odlitků;
- f) optimální konstrukci jader ve formě (a jejich upevnění);
- g) mechanismy a zařízení pro vyjímání jader.

Všechny uvedené zásady byly v praxi kokilového lití ve větší nebo menší míře rozpracovány, ověřeny a realizovány. Pro další

užití jsou pak formou technologických návodů a konstrukčních doporučení uváděny v odborné literatuře týkající se kokilového lití (na př. /6-10/ a j.).

K základním požadavkům na materiál kokil patří /6-9/, /12/, 13/:

- . dostatečná pevnost a tvrdost, zejména při vyšších teplotách;
- . vysoké hodnoty plastických vlastností;
- . nízká tepelná roztažnost;
- . vysoká tepelná vodivost;
- . maximální odolnost proti následkům objemových změn způsobených změnami teploty;
- . dobrá zpracovatelnost;
- . snadná dostupnost a nízká cena.

Splnit přesně všechny tyto základní požadavky prakticky nelze. Proto musí při výběru materiálu kokil jít vždy o soustavu kompromisů podle určení pro jednotlivé druhy kokil.

Jako materiály kokil se používají:

Šedá litina

Je nejrozšířenějším materiálem na výrobu kokil a jejich částí. Je snadno dostupná a dobře zpracovatelná. Má mít strukturu perliticko-feritickou (s max. 5 - 10 % feritu), případně perlitickou. Ve struktuře nemá být volný cementit, grafit má být vyloučen v jemných útvarech. Takovouto strukturu je možno dosáhnout při chemickém složení, jež je pro různé případy doporučováno různými autory a je uvedeno v tabulce č. 1.2. Zvlášť významný je pak požadavek co nejnížšího obsahu fosforu a síry. Zlepšení kvality běžné litiny je možno dosáhnout některými postupy vedoucími ke zlepšení jejích vlastností, především očkovaním a legováním. Z legujících prvků se nejčastěji používají Ni, Cr, dále i Sn, Cu. Při volbě legování je nutno mít na zřeteli, že přísadové prvky

Obsah prvků v %						Použití kokily	Pramen
C	Si	Mn	P	S	Ostatní		
- 3,7	1,8 - 2,2	0,8 - 1,1	0,1 - 0,2	0,05 - 0,1		pro drobné litinové odlitky	/7/
- 3,6	2,0 - 2,5	0,6 - 0,7	0,1 - 0,2	0,1	0,1 Ni 0,4 Cr	pro malé a střední litinové odlitky	
- 3,7	1,8 - 2,8	0,6 - 0,7	0,1 - 0,2	0,12	0,1 Ni 0,4 Cr	pro drobné ocelové odlitky	
- 3,6	1,6 - 2,2	0,4 - 0,6	0,1 - 0,2	0,06 - 0,1	0,1 Ni 0,4 Cr	pro odlitky ze slitin mědi a hliníku jedn. tvarů	
- 3,6	1,7 - 2,5	1,0 - 1,1	0,1 - 0,2	0,07 - 0,1	1,0 Cu 0,5-0,6 Cr	pro složitě odlitky ze slitin mědi a hliníku	
1 - 3,4	1,4 - 1,7	0,8 - 1,2	0,25	0,12	0,35 Ni 0,1-0,2 Cr	pro zvlášť složitě odlitky ze slitin mědi a hliníku	
4 - 3,6	1,4 - 1,7	0,8 - 1,0	0,15	0,10		pro odlévání tvrzených litinových válců	
0 - 3,6	1,5 - 2,5	0,5 - 1,0	0,08 - 0,15	0,05 - 0,1	do 1,0	základní chemické složení při C:Si = 1,6 - 2,0	/13/
1 - 3,5	1,7 - 2,2	0,5 - 0,9	0,2	0,1		obvyklé chemické složení	/10/

pravidla současně zvyšují sklon litiny k tvorbě zákalů, která v případě kovové formy byla velmi nepříznivá.

tvárná litina

tvárná litina má vedle vysoké pevnosti v tahu i výbornou žírnězdornost, plynoucí z rozdělení a tvaru grafitu. Naopak její nevýhodou je podstatně nižší tepelná i teplotní vodivost (o 60 - 80 % nižší než u šedé litiny /12/). Také její větší sklon k deformacím je nepříznivý. Kokily z tvárné litiny mají asi o 30 % větší životnost, jsou však dražší.

Ocele uhlíkové i legované

Ocel se používá pro výrobu značně namáhaných částí kokil. Má vyšší hodnoty mechanických vlastností i za vyšších teplot, avšak hůře se odlévá a obrábí a má také větší trvalé deformace. Ocelové kokily jsou velmi vhodné při použití intenzivního komorového způsobu chlazení vodou. Ocelové kokily jsou úspěšně používány v SSSR /14/, /72/, u nás brání dosud jejich většímu rozšíření jak zvýšená pracnost při výrobě, tak podstatně větší deformace při ohřevu /12/. Z legovaných ocelí se používají nejčastěji ocele legované Cr, Ni a Mo.

Technická měď

Měď je pro svou vysokou tepelnou vodivost, plastičnost a vysoké protikorozi vlastnosti nejlepším materiálem pro výrobu kokil. Životnost forem z mědi je největší. Jejím zavádění však brání vysoká cena a nedostupnost.

Hliník a jeho slitiny

Hliník a jeho slitiny mají vysokou tepelnou vodivost, což napomáhá rychlému vyrovnávání teplot ve stěně formy i rychlejšímu ochlazování odlitku. Výroba kokil je snadnější, neboť je možno použít pro odlévání na lito na matečný model. V některých zahraničních zemích se používá i v SSSR /24/, /25/, /79/, se

oslední době rozšířilo použití kokil z hliníkových slitin nejen pro výrobu odlitků ze slitin hliníku, ale i z litiny a oceli. Ochrana materiálu kokily před stykem s roztaveným kovem se na i kokily vytvoří anodickou oxidací ochranná izolační vrstva Al_2O_3 o tloušťce až 0,3 mm. Životnost těchto kokil je však ve srovnání s ostatními materiály poměrně nízká. Další nevýhodou je také vyšší součinitel teplotní roztažnosti α_t hliníku a jeho slitin.

Na základě uvedeného stručného přehledu i z hodnocení zkušeností pracovníků z různých sléváren kokilového lití je možno dojít k závěru, že v současných podmínkách je zatím stále nejvýhodnějším materiálem pro kokily běžná šedá litina s nízkým obsahem P a S. Ostatní materiály, jako ocel, tvárná a legovaná litina a hliníko-slitiny, mohou nalézt své uplatnění v některých speciálních případech.

2. Provoz kovových forem

Odlišnosti provozu kovových forem oproti formám z pískových směsí (netrvalým) vyplývají z možnosti opakovaného odlévání v praxi delných časových cyklech. Nejvíce se to projevuje v odlišnosti tepelného režimu kovové a pískové formy při tuhnutí a chladnutí odlitku.

Zatím co při odlévání do pískové formy jsou počáteční podmínky (počáteční teplota formy je rovna teplotě okolí) pro každé odlití prakticky stejné, dochází u kovové formy po určitou dobu ke změně počáteční teploty (ke zvyšování) před každým dalším odlitím. Teprve po několika odlitích se ustavuje periodicky se opakující tepelný režim, který odpovídá ustálenému provozu kovové formy. Schematicky jsou tyto podmínky znázorněny na obr. 1.1. Zajištění stejných podmínek pro tuhnutí a chladnutí každého

T

- 18 -

ΔT_c

$T_2 \text{ poč}_4 = T_2 \text{ pracovní}$

2poč₁

t_1

t_2

t_3

$t_4 = t_c$

t_c

t

Neustálený provoz kovové formy

Ustálený provoz kovové formy

odlitku musí být kovová forma prohřáta na takovou teplotu - tzv. pracovní teplotu -, která odpovídá ustálené tepelné rovnováze mezi odlitkem, formou a okolím formy. Tato teplota se při pravidelném odlévání mění poměrně málo.

Na obr. 1.2 jsou schematicky znázorněny změny teploty kokily předehřáté na pracovní teplotu během jednotlivých pracovních cyklů. Optimální provoz, při kterém počáteční teplota formy T_2 po před každým odlitím zůstává konstantní, je znázorněn na obr. 1.2a. Teplota kokily se v průběhu každého cyklu mění o ΔT_c . Na obr. 1.2b je znázorněn případ, kdy nastavený lící cyklus nezajistí udržení počáteční - pracovní teploty kokily, dochází k jejímu poklesu a po určitém počtu cyklů je nutno kokilu znovu předehřát. Naopak v případě na obr. 1.2c se teplota kokily při provozu ještě dále zvyšuje. Oba tyto případy jsou pro správný a hospodárný provoz kovových forem nevhodné.

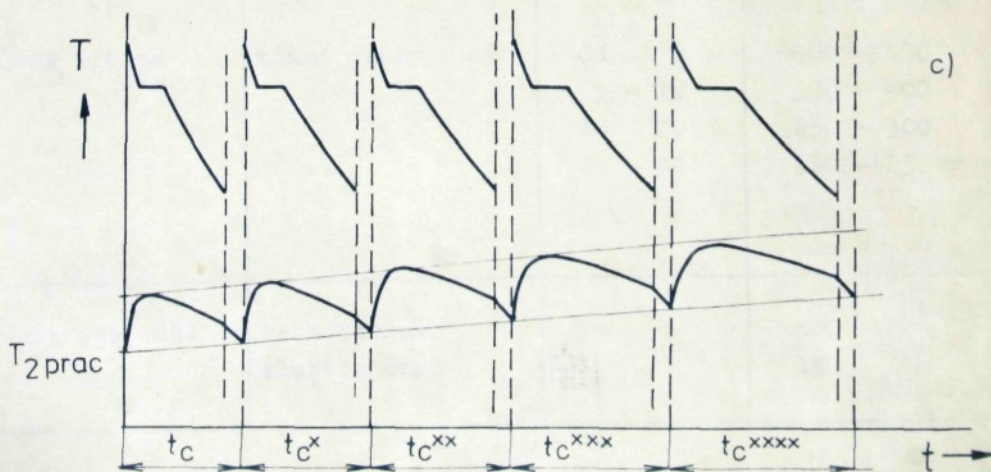
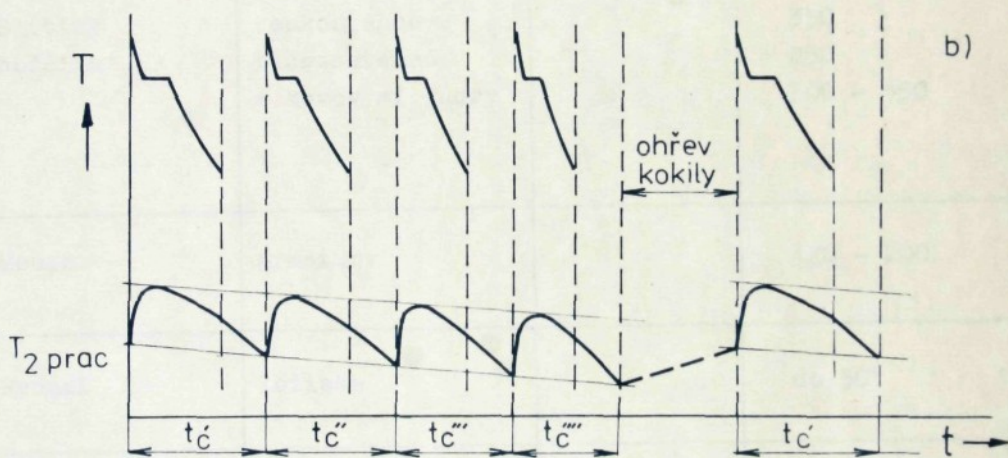
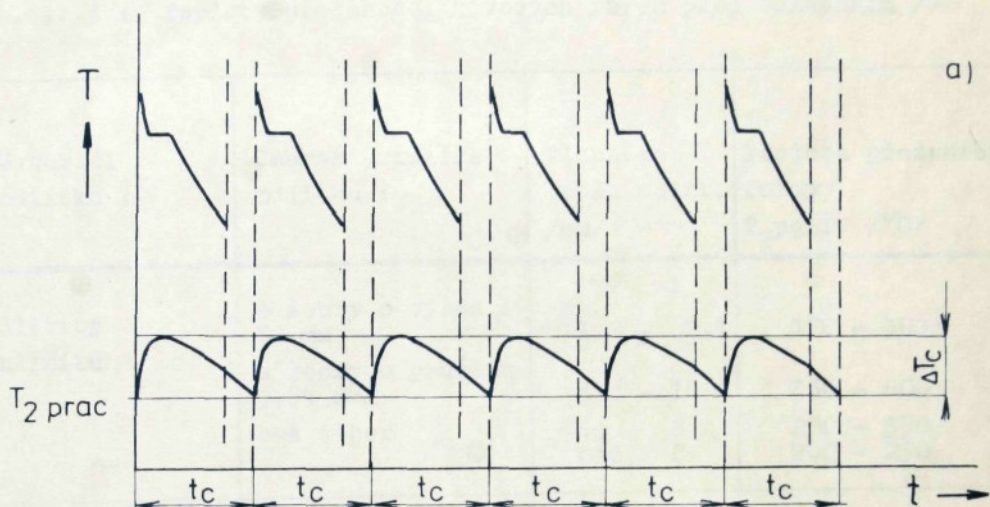
Doporučované teploty předehřátí kokily před odléváním odlitků z některých materiálů jsou uvedeny v tabulce č. 1.3.

1.3. Namáhání kovových forem při jejich provozu

Namáhání kovových forem při odlévání, tlučení, chlazení odlitků je možno - stejně jako u netrvalých forem - rozdělit na

- namáhání mechanické,
- namáhání tepelné,
- namáhání chemické.

Namáhání mechanické je vyvoláno statickým a dynamickým tlakem taveniny na líc formy, třením proudu taveniny o stěny formy při tečení, silami vznikajícími při brzděném smršťování odlitku v tuhém stavu a třením odlitku při jeho vyhazování z formy. Uskutečňuje se v převážné míře jako namáhání tlakové a s ohledem na vysoké hodnoty mechanických vlastností materiálů kovových



Tab. 1. 3 : Teploty předehřátí kovových forem před odléváním /7/

Materiál odlitku :	Charakteristika odlitku :	Tloušťka stěn odlit. /mm/	Teplota předehřátí formy T ₂ poč. /°C/
Slitiny hliníku	s žebry o výšce 80 mm	1,6 - 2,1	470 - 490
	s žebry o průřezu 3,54 mm ²	5 - 10	350 - 400
	bez žeber	do 8	250 - 350
		nad 8	200 - 250
Slitiny hořčíku	tenkostěnné tlustostěnné s kovovými jádry		350 250 300 - 450
Mosaz	armatury		120 - 200
Bronzí	ložiska		do 50
Šedá litina	různé druhy	do 5 5 - 10 10 - 20 20 - 40	400 - 450 300 - 400 250 - 300 150 - 250
Uhlíková ocel	tenkostěnné tlustostěnné		300 150

forem se důsledky jeho samotného nějak zvlášť nepříznivě neproje-
vují. Pouze u forem pro tlakové lití a pro lití odstředivé, kde
plnicí tlaky jsou vyšší než u lití gravitačního, je třeba toto
namáhání brát v úvahu.

Namáhání tepelné je vyvoláno jednak ohřátím líce formy na
značně vysokou teplotu

$$T_k = (0,6 \div 0,7) T_{tuh} \quad (1.1)$$

a dále nerovnoměrným rozdělením teploty ve stěně formy

$$T = f(x, y, z, t) \quad (1.2)$$

Nerovnoměrné rozdělení teplot ve stěně slévárenské formy způso-
buje také nerovnoměrné tepelné dilatace a tím i vznik deformací
formy a t. zv. teplotních napětí v jednotlivých jejích částech.
Právě tento druh namáhání nejvíce ovlivňuje chování kovových fo-
rem při provozu a je hlavní příčinou jejich opotřebení a vyřazení
z provozu.

Namáhání chemické je vyvoláno chemickým působením taveniny
kovu na materiál formy. Chemicky aktivní taveniny nebo jejich
složky reagují s materiálem formy, dochází k vzájemnému rozpouště-
ní, eventuálně ke vzniku chemických sloučenin v povrchové vrstvě
na líci formy. Tento druh namáhání se dá značně snížit použitím
vhodného materiálu formy a nátěrem líce formy.

Při komplexním studiu namáhání kovových forem při lití, tuh-
nutí a chlazení odlitku je nutno mít na zřeteli, že všechny druhy
namáhání působí současně. Svými účinky se vzájemně ovlivňují a
jsou dále ještě komplikovány materiálovými a konstrukčními para-
metry samotné formy, její dutiny i parametry technologického
postupu. Vzhledem k tomu, že z uvedených druhů namáhání se nejvý-
razněji uplatňuje namáhání tepelné, je další část práce věnována

2. TEPELNÉ NAMÁHÁNÍ KOVOVÝCH FOREM

2.1. Podmínky a důsledky tepelného namáhání

Ze stručného rozboru podmínek provozu kovových slévárenských forem uvedeného v předcházející kapitole, vyplývá velký vliv tepelného namáhání. V procesu sdílení tepla mezi odlitkem a slévárenskou formou dochází v závislosti na intenzitě pochodu k více či méně nerovnoměrnému rozdělení teplot ve formě v každém časovém okamžiku. V důsledku toho také změna rozměrů formy (roztahování při zvyšování teploty) není v celém jejím objemu stejná a je příčinou vzniku t. zv. teplotních napětí ve formě.

Určování teplotních napětí a deformací vznikajících ve slévárenských, především kovových formách při ochlazování odlitků, má velký praktický význam. Je jimi ovlivněna nejen rozměrová a tvarová přesnost vyráběných odlitků, ale především podmínky jejich vlastního provozu a životnost samotných forem. Určení velikosti těchto teplotních napětí i deformací v závislosti na velikosti, geometrickém tvaru a konstrukčním uspořádání kovových forem a na technologických podmínkách pochodu slouží ke stanovení co nejúplnějších podkladů pro takové konstrukce forem, které by zaručovaly v konkrétních podmínkách minimální důsledky tepelného namáhání a tedy maximální jejich životnost.

Celou problematiku řešení těchto jevů je možno rozdělit do dvou fází:

1. řešení tepelných dějů, tj. sdílení tepla mezi odlitkem a kovovou formou s cílem stanovit teplotní pole formy;
2. řešení úlohy tepelné napjatosti tělesa (kovové formy) pro konkrétní tvar s cílem stanovit velikost a časový průběh teplotních napětí i velikost deformací.

2.2. Tepelné děje v kovové formě při tuhnutí a chladnutí odlitku

Sdílení tepla mezi odlitkem a jakoukoli slévárenskou formou - tedy i kovovou - probíhá již od okamžiku prvního styku taveniny se stěnami formy. V důsledku toho se teplota formy zvyšuje, teplota kovu naopak klesá, přičemž za určitou dobu dochází k tuhnutí taveniny, tj. ke vzniku vrstvy ztuhlého kovu u stěny formy. Intenzita odvodu tepla z odlitku závisí na tepelně fyzikálních vlastnostech materiálu odlitku a formy (λ, c, ρ, a, b).

Při přesném studiu procesu sdílení tepla v soustavě odlitek - forma je třeba brát v úvahu všechny faktory, které se při tom uplatňují. Jsou to především hydrodynamické podmínky tečení taveniny v kanálech i dutině formy, uvolňování skupenského tepla krystalizačního, zvláštnosti mechanismu tuhnutí slitiny, geometrické a fyzikální vlastnosti odlitku a formy, vlastnosti mezery na rozhraní odlitku a formy, závislost většiny těchto činitelů na teplotě a pod. Takovéto řešení, ať analytické nebo experimentální, je však velmi obtížné a složité, v některých případech i nemožné. Proto se obvykle při řešení konkrétních úloh uvedený okruh podmínek podstatně zúžuje, resp. zavádějí různé zjednodušující předpoklady, které celé řešení značně usnadňují.

Zvláštnosti řešení tepelných dějů v kovových formách vyplývají z toho, že v těchto formách je možno provést větší počet odlití, obvykle v pravidelných cyklech. Průběh sdílení tepla mezi odlitkem a formou (kovovou) můžeme pro usnadnění studia rozdělit na dva charakteristické případy:

1. případ jednorázového odlití, tj. v podstatě první odlití do chladné nebo mírně předeřháté formy; šíření tepla ve formě je děj nestacionární;
2. případ opakovaného odlévání, nejčastěji v pravidelných

časových intervalech; nastává po prohřátí formy, kdy dochází k tepelné rovnováze mezi odlévaným kovem, formou a okolím formy; šíření tepla ve formě se blíží podmínkám pro stacionární děj.

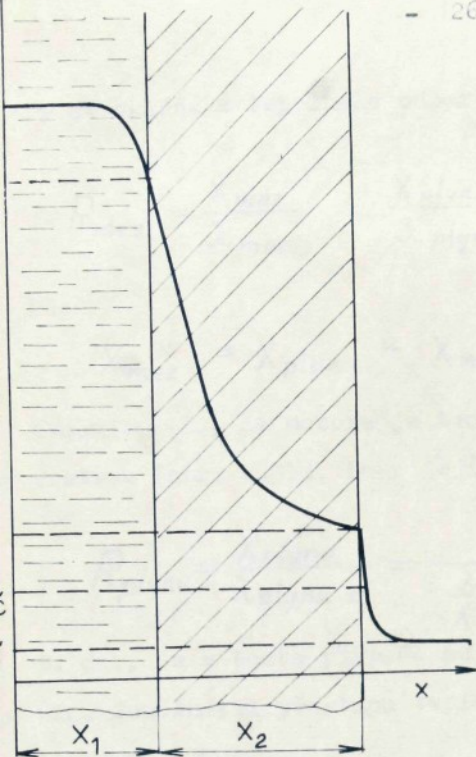
2.2.1. Průběh tepelných dějů v kovové formě při jednorázovém liti

Odlijeme-li roztavený kov do kovové formy s konstantní počáteční teplotou T_2 poč, dochází k prohřívání formy od líce směrem k vnějšímu povrchu. Změna rozdělení teplot ve stěně kokily s časem je velmi rychlá (v důsledku vysokých hodnot λ_2, c_2, ρ_2 a tím i b_2), což má za následek rychlé ochlazování odlitku i rychlé prohřátí stěny formy a změnu teploty jejího vnějšího povrchu.

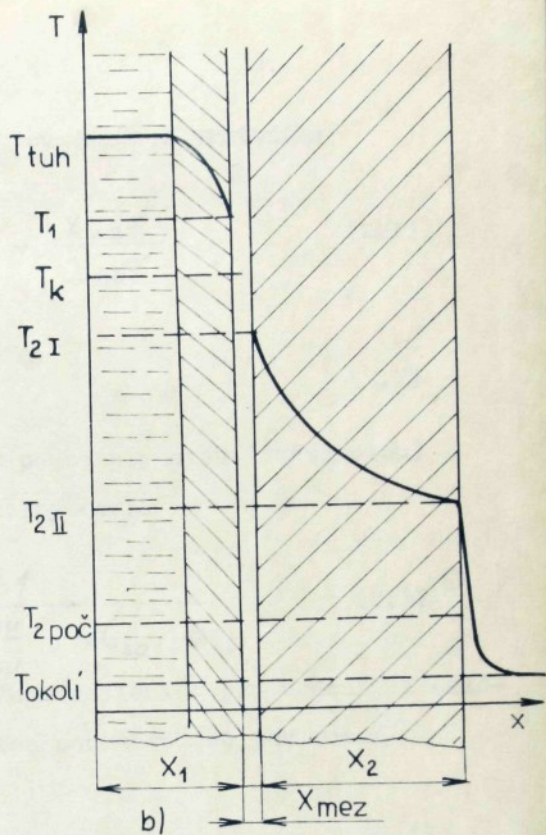
Velmi výrazný vliv na intenzitu sdílení tepla mají poměry na rozhraní mezi kovem odlitku a formou. V prvních okamžicích styku taveniny s formou můžeme předpokládat ideální styk, jak je patrné z obr. 2.1. Po vytvoření tuhé vrstvy odlitku dochází v důsledku jejího smršťování a na druhé straně i v důsledku deformací a roztahování kokily ke vzniku mezery mezi odlitkem a formou (obr. 2.2). Podmínky sdílení tepla se tím podstatně mění, jsou ovlivňovány tepelným odporem na rozhraní odlitek - forma. Vliv vzduchové (resp. plynové) mezery mezi odlitkem a formou je možno dále spojit i s vlivem vrstvy nátěru, který se ve většině případů nanáší na pracovní povrch (líc) kovové formy.

Všechny tyto okolnosti a jejich vliv na přenos tepla velmi podrobně rozebral VEJNÍK v pracích /22 - 24/. Při svých řešeních vychází z toho, že mezeru mezi odlitkem a formou považuje za plochou stěnu složenou z několika vrstev, jejíž vliv na sdílení tepla charakterizuje velikostí celkového tepelného odporu.

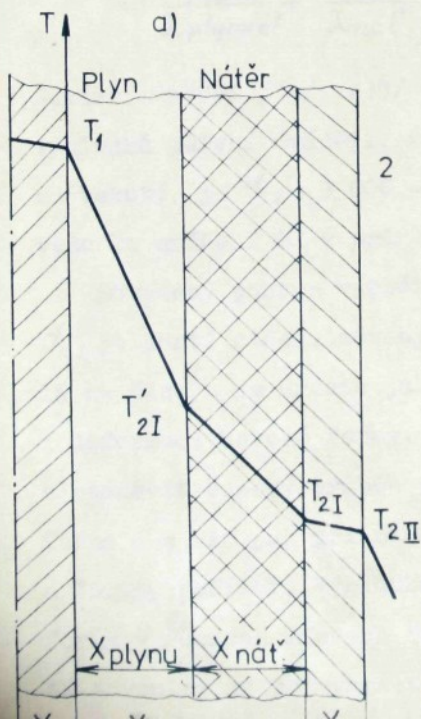
Na obr. 2.3 je příklad mezery mezi odlitkem a formou složé-



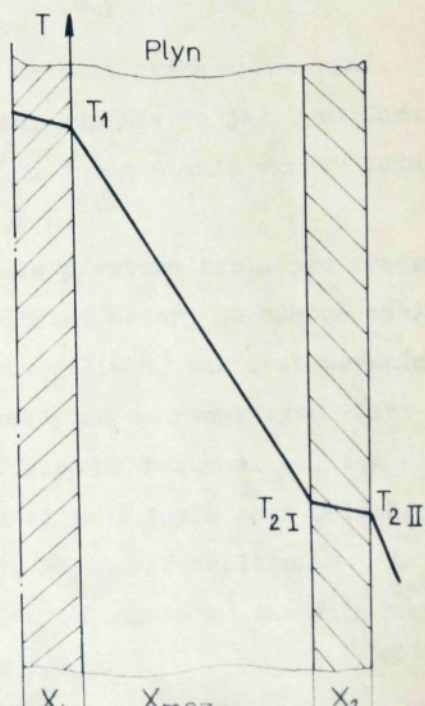
Obr. 2.1



Obr. 2.2



Obr. 2.3



ry se skládá z tepelného odporu v obou dílčích vrstvách:

$$R_{mez} = \frac{X_{mez}}{\lambda_{mez}} = \frac{X_{plynu}}{\lambda_{plynu}} + \frac{X_{nát}}{\lambda_{nát}} \quad (2.1)$$

kde

$$X_{mez} = X_{plynu} + X_{nát} \quad (2.2)$$

Uvažujeme-li, že mezeru je tvořena pouze plynovou (vzduchovou) vrstvou (obr. 2.3b), bude její tepelný odpor

$$R_{plynu} = \frac{X_{plynu}}{\lambda_{plynu ef}} = \frac{1}{\frac{\lambda_{plynu}}{X_{plynu}} + \alpha_{sál}} \quad (2.3)$$

t. zn., že v tomto případě se uvažuje sdílení tepla vedením i sáláním. Součinitel přestupu tepla celou soustavou se pak rovná

$$\alpha_1 = \frac{1}{\frac{X_{plynu}}{\lambda_{plynu ef}} + \frac{X_{nát}}{\lambda_{nát}} + \frac{X_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_3}} \quad (2.4)$$

Někteří autoři [24], [39] na základě matematického zpracování výsledků měření uvádějí, že pro případ, kdy kov je ještě ve formě tekutý, je $\alpha_1 = 3\,000 - 5\,000 \text{ W/m}^2\text{K}$. Vznik ztuhlé vrstvy kovu vede ke snížení α_1 v průměru o 40 - 50 %.

Uvedený postup výpočtu součinitele přestupu tepla pro mezeru α_1 je dosti zidealizovaný, neboť velikost mezery je značně závislá na čase a je určena jak smršťováním odlitku, tak roztahováním a deformací kovové formy. Je proto nezbytné zahrnout tyto vlivy a stanovit časový průběh tepelného odporu na rozhraní odlitek - forma a s ním pak při řešení procesu sdílení tepla mezi odlitkem a formou počítat. Výsledkem řešení je stanovení teplotního pole formy v různých místech formy i v různých časech od okamžiku nalití taveniny až po vyhození odlitku z formy.

2.2.2. Průběh tepelných dějů při opakovaném odlévání

Jak již bylo uvedeno, ustavuje se při opakovaném odlévání kovu do kovové formy periodicky se opakující tepelný režim. Předpokladem pro to je prohrátí formy na takovou pracovní teplotu, která odpovídá ustálené tepelné rovnováze mezi odlitkem, formou a okolím formy. Tato teplota se při provozu - za předpokladu dodržení pracovního cyklu - mění poměrně málo.

Vlastní řešení procesu sdílení tepla je obdobné jako řešení při jednorázovém odlití. Počáteční rozdělení teploty ve formě při takovém režimu je možno určit analyticky nebo pokusně pro konec počátečního stadia a vyjádřit je v podobě funkční závislosti

$$T_2 \text{ poč} = f(x, y, z) \quad (2.5)$$

popisující teplotní pole formy v okamžiku $t = 0$. Také zde se musí při výpočtu brát v úvahu tepelný odpor rozhraní odlitek - forma.

2.3. Metody řešení teplotních polí kovových slévárenských forem

2.3.1. Základní zákonitosti a jejich rozbor

Kovové slévárenské formy je možno - na rozdíl od jiných druhů slévárenských forem (pískových, skořepinových) - považovat za homogenní tuhá tělesa. Z hlediska studia tepelných dějů, k nimž dochází při tuhnutí a chladnutí odlitku, to znamená, že sdílení tepla v takových tělesech se uskutečňuje pouze vedením. Rozdělení teplot v každém bodě tělesa i v každém čase lze v nejobecnějším případě určit řešením Fourierovy diferenciální rovnice vedení tepla ve tvaru

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_z = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

kde Q_z je teplo uvolněné z vnitřního zdroje;
 λ, c, ρ - tepelně fyzikální vlastnosti tělesa, jež
 mohou být obecně funkcí

$$\lambda = \lambda(x, y, z, t)$$

$$c = c(x, y, z, t)$$

$$\rho = \rho(x, y, z, t)$$

Pro izotropní tuhé těleso a pro případ, kdy $Q_z = 0$, přechází rovnice (2.6) na tvar

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] = a \nabla^2 T \quad (2.7)$$

kde a je součinitel teplotní vodivosti

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$$

Laplaceův diferenciální operátor $\nabla^2 T$ má ve smyslu rovnice (2.7)

zeela jednoznačný fyzikální význam (pro $a = \text{konst.} > 0$):

pro $\nabla^2 T > 0$ bude $\frac{\partial T}{\partial t} > 0$ ohřev tělesa;

pro $\nabla^2 T < 0$ bude $\frac{\partial T}{\partial t} < 0$ ochlazování tělesa;

pro $\nabla^2 T = 0$ bude $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ stacionární děj.

V případě, že teplota v tělese se mění pouze v jednom směru (např. ve směru osy x - což se často pro zjednodušení výpočtů uvažuje), zjednoduší se rovnice (2.7) na tvar

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2.8)$$

Rovnice vedení tepla (2.7), resp. (2.8), popisuje obecně teplotní pole uvnitř tělesa (v našem případě uvnitř kovové formy), čímž však není toto teplotní pole pro konkrétní děj ještě konkrétní.

ně definováno. Pro úplnost formulace úlohy vedení tepla v tuhém tělese je třeba brát v úvahu:

- a) geometrické vlastnosti tělesa;
- b) fyzikální vlastnosti tělesa;
- c) počáteční podmínky děje;
- d) okrajové podmínky.

Podrobně jsou jednotlivé podmínky v obecné podobě rozebrány ve speciální literatuře týkající se sdílení tepla, např. /33 - 37/.

Pro případ řešení teplotních polí kovových slévárenských forem se tyto podmínky uvažují takto:

Geometrické vlastnosti

Kovové formy se rozdělují do tří základních skupin podle převládající příbuznosti k některému ze základních geometrických tvarů (deska, válec, koule), pro něž lze řešení rovnice (2.7) provést snadněji. Je možno konstatovat, že převládající počet kovových slévárenských forem má tvar blízký tvaru desky.

Fyzikální vlastnosti tělesa

Kovové slévárenské formy jsou považovány za izotropní tuhá tělesa, tudíž jejich tepelně fyzikální vlastnosti jsou ve všech místech prakticky stejné. Velmi významná je však změna těchto vlastností s teplotou, což je nutno pro získání přesných výsledků uvažovat.

Počáteční podmínky děje

Udávají rozdělení teploty v tělese v okamžiku $t = 0$; u kovových slévárenských forem jsou nejčastěji formulovány

$$T_0 = T_{2\text{poč}} = \text{konst} \quad (2.9)$$

to znamená, že před začátkem sdílení tepla mezi odlitkem a formou je forma rovnoměrně ohřata na teplotu $T_{2\text{poč}}$ (na teplotu okolního prostředí nebo i vyšší).

Okrajové podmínky

Definují podmínky sdílení tepla na povrchu tělesa, tj. podmínky vzájemného působení tělesa s okolním prostředím. Při sdílení tepla mezi odlitkem a formou přicházejí v úvahu především okrajové podmínky 4. druhu (dokonalý styk odlitku a formy - poněkud zidealizovaný případ do okamžiku vzniku mezery mezi odlitkem a formou) a 3. druhu (konvekce na povrchu formy - od okamžiku vzniku mezery mezi odlitkem a formou).

Uvedené okrajové podmínky jsou při řešení uvažovány v dosti zidealizované formě. Ve skutečnosti budou mnohem komplikovanější, což vyplývá z toho, že

- a) styk odlitku a formy (k okrajové podmínce 4. druhu) se uskutečňuje přes povrchové mikronerovnosti formy, které povrch odlitku podle slévárenských vlastností kovu lépe nebo hůře kopíruje. Dokonalost styku bude dále záviset na čistotě kovu odlitku, na metalostatickém tlaku, na deformaci formy atd.
- b) sdílení tepla z odlitku do formy po vytvoření mezery (okrajová podmínka 3. druhu) se uplatňuje vedením, prouděním a při větších teplotních rozdílech povrchů odlitku a formy i sáláním. Proto je nutno brát v úvahu celkový tepelný odpor mezery.

Vlastní stanovení teplotního pole kovové slévárenské formy, tj. řešení diferenciální rovnice vedení tepla (2.7), je možné provést různými metodami. Tyto metody lze rozdělit na př. podle /35/, /54/ na

1) metody analytické

- a) metoda rozdělení proměnných;
- b) metoda Laplaceovy transformace;
- c) metoda konformního zobrazení;
- d) přibližné analytické metody atd.

- 2) metody numerické
- 3) metody analogové
- 4) metody pokusného měření teplot, příp. jiné pokusné metody.

Jednotlivé metody jsou podrobněji popisovány, rozpracovány a na konkrétní případy řešení teplotních polí odlitků i slévárenských forem aplikovány v celé řadě prací různých autorů. Přehled některých z nich je uveden v pracích /85/, /89 - 92/.

- Na našem pracovišti jsme se při řešení tepelných dějů v kovových slévárenských formách dlouhodobě zaměřili na dvě metody a to
- a) na numerické řešení parciální diferenciální rovnice vedení tepla v kovové formě s pomocí samočinného počítače;
 - b) na pokusné měření teplotního pole odlitku a kovové formy pomocí termočlánků.

Uvedu proto v další části zprávy podrobnější postup pouze u těchto dvou metod.

2.3.2. Řešení teplotních polí kovových forem na samočinném počítači

Numerické řešení parciální diferenciální rovnice vedení tepla s využitím samočinného počítače je jednou z možných a vhodných metod určování teplotních polí kovových slévárenských forem. Řešení je možno provést pro tepelné děje, které probíhají ve složité soustavě odlitek - rozhraní - kovová forma - okolí formy. Přitom pod pojmem rozhraní je uvažována složená vrstva (plyn + nátěr) charakterizovaná určitým časově proměnným tepelným odporem.

Řešení uvedené soustavy v plné obecnosti je velmi rozsáhlé a složité. Proto byly zavedeny určité zjednodušující předpoklady, které umožnily zpracování matematického modelu popisujícího děje v uvažované soustavě a jeho postupné upřesňování.

• Fyzikální model sledované soustavy je znázorněn na obr. 2.4.

Při jeho realizaci jsou uvažovány tyto zjednodušující předpoklady:

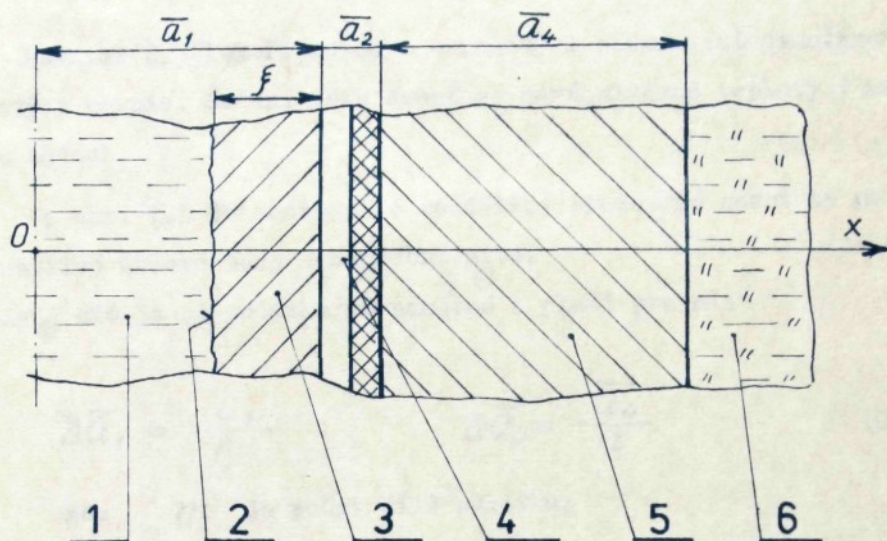
- 1) jednotlivé části soustavy jsou rovinné desky;
- 2) teplo v soustavě se šíří pouze jedním směrem - ve směru tloušťky (prostorově jednorozměrný model);
- 3) přenos tepla mezi jednotlivými částmi soustavy se uskutečňuje beze ztrát;
- 4) ochlazování odlitku probíhá ve třech stadiích
 - ochlazování přehřáté taveniny;
 - tuhnutí taveniny;
 - ochlazování tuhého kovu odlitku;
 uvedená stadia se mohou vzájemně překrývat;
- 5) tuhnutí taveniny probíhá při konstantní teplotě T_{tuh} ;
- 6) zaplnění formy taveninou se uskutečňuje najednou v nulovém čase;
- 7) forma je v okamžiku $t = 0$ rovnoměrně prohřátá na teplotu T_2 poč;
- 8) celá soustava je souměrná kolem osy jdoucí středem odlitku;
- 9) tepelné fyzikální vlastnosti jsou pro materiál odlitku i formy udány jako konstanty, nebo je udána jejich závislost na teplotě.

Matematický model řešení pochoďu ochlazování odlitku vychází z parciální diferenciální rovnice vedení tepla v kapalně i tuhé fázi ve tvaru

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (2.10)$$

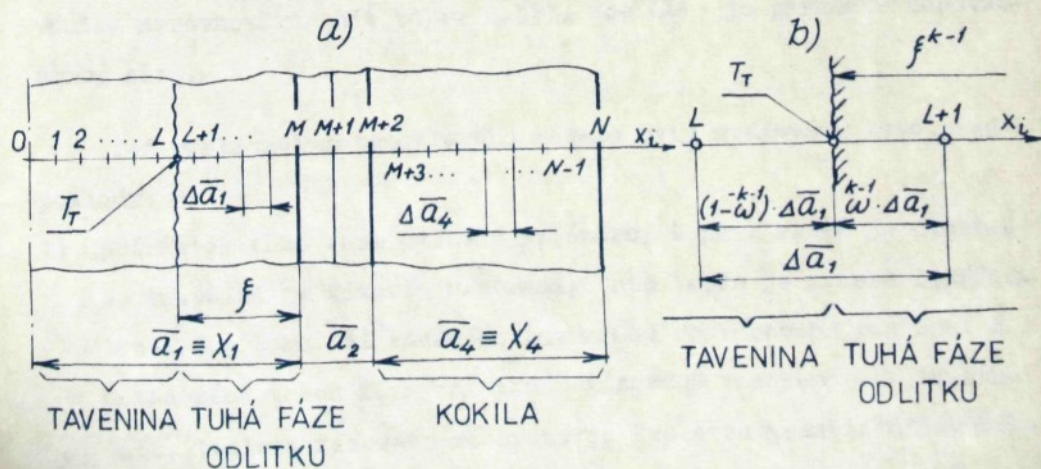
s příslušnými okrajovými a počátečními podmínkami. Řešení této rovnice je prováděno metodou sítí s použitím implicitní formule, tj. diferenciální rovnice se nahrazuje rovnicí diferenční ve tvaru

$$\frac{\rho_i^{k-1} \cdot c_i^{k-1}}{\Delta t} (T_i^k - T_i^{k-1}) = \frac{1}{\Delta \bar{a}^2} \left[\lambda_{i-\frac{1}{2}}^{k-1} \cdot T_{i-1}^k - (\lambda_{i-\frac{1}{2}}^{k-1} + \lambda_{i+\frac{1}{2}}^{k-1}) \cdot T_i^k + \lambda_{i+\frac{1}{2}} \cdot T_{i+1}^k \right] \quad (2.11)$$



Obr. 2.4

1. tavenina - popsána : $\rho_{1e}, c_{1e}, \lambda_{1e}, \bar{a}_1 - f, L_{tuh}, T_{1e}$
2. fázové rozhraní - popsáno : T_{tuh}, f
3. tuhá fáze odlitku - popsána : $\rho_{1s}, c_{1s}, \lambda_{1s}, E_{sál_1}, T_{1s}, f$
4. tepelný odpor (plyn + nátěr) - popsán : $\lambda_2, \alpha_{2p}, \alpha_{2R}, \bar{a}_2, T_2$
5. forma - popsána : $\bar{a}_4, \rho_4, c_4, \lambda_4, E_{sál_4}, T_4$
6. okolní prostředí - popsáno : $T_{okoli}, \alpha_{5p}, \alpha_{5R}$



Obr. 2.5

Rovnice (2.11) tvoří spolu s okrajovými podmínkami soustavu síťových rovnic. Řešení této soustavy dává hledané teploty v uzlových bodech.

Na obr. 2.5 je znázorněno rozdělení studované soustavy na jednotlivé uzlové body a označení sítě.

Zvolená síť je na počátku rovnoměrná a platí pro ni:

1)

$$\Delta \bar{a}_1 = \frac{\bar{a}_1}{m} \quad ; \quad \Delta \bar{a}_4 = \frac{\bar{a}_4}{n} \quad (2.12)$$

kde m je počet dílů odlitku;

n počet dílů kokily.

2) Celkový čas

$$t_k = k \cdot \Delta t \quad (2.13)$$

kde k je index diskretního časového kroku;

Δt krok času.

Při sestavování diferenční rovnice pro uzlové body před fázovým rozhraním je nutno brát v úvahu, že vzdálenost fázového rozhraní od okolních uzlových bodů se mění s tuhnutím tekuté fáze. Tím vzniká nerovnoměrná síť (obr. 2.5b). Zde $\bar{\omega}^{k-1}$ je parametr nerovnoměrné sítě.

Při realizaci matematického modelu byly uvažovány tyto předpoklady:

- 1) přírůstek tuhé fáze odlitku je úměrný teplu, které je odebíráno tavenině na fázovém rozhraní; toto teplo je určeno rozdílem tepelného toku při váděného taveninou do fázového rozhraní a odváděného tuhrou fází odlitku z fázového rozhraní za jednotku času; teplota fázového rozhraní je teplotou tuhnutí odlévaného kovu;

2) rozhraní mezi odlitkem a formou je charakterizováno tepelným odporem, který je možno do výpočtu zahrnout buď jako konstantní hodnotu nebo jako funkční závislost; v našem případě jsme nejčastěji uvažovali vliv průhybu kovové formy (viz. dále) na změnu tloušťky $\bar{a}_2$. Tepelný odpor počítaný z proměnné hodnoty $\bar{a}_2$ je dán vztahem

$$R_2 = \frac{1}{\frac{\lambda_2}{\bar{a}_2} + \alpha_{2Prout} + \alpha_{2Rad}} \quad (2.14)$$

Vliv tepelného odporu je možno měnit jednoduchým zásahem do matematického modelu (programu).

Teoretická příprava celého řešení spočívá ve vytvoření soustav lineárních rovnic pro jednotlivé oblasti celé sledované soustavy. Jejich řešení se provede pomocí známého algoritmu a tím se získá teplotní pole. Tato příprava vyústila ve vypracování programu v jazyce Fortran, který umožňuje provádět výpočty teplotních polí a dále i teplotních napětí a průhybů, jak bude uvedeno v další kapitole. Veličiny používané v programu jsou zadávány pomocí vstupních dat, které jsou voleny podle odlévaného kovu, materiálu formy a dalších parametrů technologického procesu. Některé výsledky provedených výpočtů budou uvedeny v další části zprávy.

2.3.3. Pokusné měření teplotního pole kovových forem

K přímému stanovení průběhu teplot v různých místech kovových forem při ochlazování odlitků je používáno termočlánků Fe - Ko (dráty originál Degussa s atestem) nejčastěji $\varnothing 0,5\text{mm}$. Termočlánky jsou chráněny keramickou dvoukapilárou $\varnothing 3\text{mm}$ a po vložení do otvorů vyvrtaných ve formě do různé hloubky je jejich spoj přivařen kondenzovanou jiskrou k formě.

Pro měření teploty v odlitku jsou používány při odlévání hliníku a jeho slitin termočlánky Fe - Ko ($\varnothing$ 0,5 mm), při odlévání litiny termočlánky Pt - PtRh ($\varnothing$ 0,3 mm). V obou případech jsou umístěny v tenké, ne zcela zatavené, křemenné trubici tak, aby spoj termočlánku snímal přímo teplotu taveniny.

Napětí termočlánků je měřeno a registrováno kompenzačními elektronickými zapisovači - bodovými ev. liniiovými - a ze záznamu zapisovačů jsou pak pomocí tabulek nebo cejchovnic křivek vyhodnocovány skutečné teploty.

Podrobněji je metodika měření (a všechny speciální úpravy termočlánků) popsána v /91/ a v některých dalších našich pracích. Některé výsledky provedených měření budou také uvedeny v další části této práce.

2.4. Teplotní napětí a deformace v kovových slévárenských formách

2.4.1. Základní podmínky vzniku a určování teplotních napětí a deformací těles

Je všeobecně známo, že při změně teploty dochází u tuhých těles ke změně (zvětšování nebo zmenšování) jejich rozměrů. Při změně teploty tělesa z $T_{poč}$ na T se změní původní délka tělesa $l_{poč}$ o

$$\Delta l = \alpha_t \cdot l_{poč} \cdot (T - T_{poč}) = \alpha_t \cdot l_{poč} \cdot \Delta T \quad (2.15)$$

Poměrné prodloužení je

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_{poč}} = \alpha_t \cdot \Delta T \quad (2.16)$$

kde α_t je tzv. teplotní součinitel délkové roztlačnosti.

V případě, že všechny části tělesa se mohou roztahovat nebo smršťovat volně, pak změna teploty nevyvolá vznik napětí v tělese.

Ve skutečnosti však homogenní těleso se nemůže obvykle roztahovat nebo smršťovat naprosto volně a rovnoměrně a proto v něm vznikají napětí. Také vnější upevnění tělesa, bránící jeho roztahování nebo smršťování, vyvolá vznik napětí. Všechna tato napětí se nazývají teplotní.

Základní podmínky určující velikost teplotních napětí v tělese lze stanovit ze vztahu

$$\sigma_t = \frac{E \cdot \alpha_t \cdot \Delta T \cdot S}{1 - \nu} \quad (2.17)$$

kde S je součinitel zahrnující vliv tvaru tělesa.

Ostatní veličiny vyjadřující fyzikální vlastnosti materiálu tělesa a podmínky jeho ohřevu nebo ochlazování budou rozvedeny dále.

Jak je ze vzorce (2.17) zřejmé, závisí velikost vznikajících teplotních napětí na

- hodnotě součinitele teplotní roztažnosti α_t ;
- hodnotě modulu pružnosti v tahu E ;
- na teplotním rozdílu ΔT , jenž je ovlivněn tepelnou (λ), resp. teplotní (α) vodivostí.

Podrobnějším rozбором deformace v každém bodě ohřívaného tělesa zjistíme, že její celková hodnota se skládá ze dvou složek:

První složku tvoří rovnoměrné roztážení úměrné zvýšení teploty. Protože však pro izotropní tělesa je toto roztážení stejné ve všech směrech, pak v takovém případě vznikají deformace pouze ve směru normálním, zatímco ve směru tečném jsou deformace nulové (nedochází k posuvům). Velikost normální deformace je pak v podstatě určena vztahem (2.16).

Druhou složku celkové deformace tvoří deformace potřebné k zachování homogeneity tělesa a dále deformace vznikající

působením vnějších sil. Tyto deformace jsou vázány s napětími prostřednictvím Hookova zákona izotermické obecné teorie pružnosti.

Celkové deformace se rovnají součtu obou složek a jsou tedy v libovolné ortogonální soustavě souřadnic x, y, z vázány s napětími a teplotou závislostmi

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} \cdot [\tilde{\sigma}_x - \nu \cdot (\tilde{\sigma}_y + \tilde{\sigma}_z)] + \alpha_t \cdot T \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} \cdot [\tilde{\sigma}_y - \nu \cdot (\tilde{\sigma}_x + \tilde{\sigma}_z)] + \alpha_t \cdot T \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} \cdot [\tilde{\sigma}_z - \nu \cdot (\tilde{\sigma}_x + \tilde{\sigma}_y)] + \alpha_t \cdot T \\ \mu_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{G}, \quad \mu_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}, \quad \mu_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G} \end{aligned} \right\} \quad (2.18)$$

Teoretická závislost mezi moduly pružnosti E a G a Poissonovým číslem ν je dána vztahem

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2.19)$$

Závislosti mezi napětími a deformacemi popisují matematicky chování studovaného tělesa; v dalším je však třeba vzít v úvahu požadavky mechaniky a geometrie. Zákony mechaniky se zavádějí pomocí rovnic rovnováhy vnějších a vnitřních sil. Geometrická spojitost se zajišťuje pomocí vztahů udávajících souvislost mezi přetvořením a posuvem, tzv. rovnic kompatibility přetvoření. Podrobný rozbor všech těchto podmínek byl zpracován na základě studia speciální literatury (např. /53 až 58/) a je uveden v práci /91/.

Nejobecnější případ úlohy tepelné napjatosti těles v sobě zahrnuje jak vliv nerovnoměrného rozdělení teploty v tělese, tak vliv působení vnějších sil na těleso. Při řešení konkrétních případů je možno takovou úlohu rozdělit na dvě dílčí úlohy, jimiž se určí

- 1) napětí vyvolaná pouze nerovnoměrným rozdělením teploty;
- 2) napětí vyvolaná pouze působením vnějších sil.

Výsledná napětí jsou pak dána součtem těchto napětí dílčích (zákon superposice). Hlavní výhoda takového postupu spočívá v tom, že k řešení druhé dílčí úlohy je možno využít všech metod, které v teorii pružnosti a pevnosti již existují.

Přesto však je třeba uvést, že úlohy tepelné napjatosti jsou ve většině případů příliš složité a jejich obecné řešení je prakticky nemožné. V literatuře jsou obvykle zpracována řešení dílčích úloh pro konkrétní podmínky ohřevu a pro jednoduché tvary těles, jež mohou být s větší či menší přesností aplikována na obecnější případy. Tak tomu je i v našem případě řešení tepelné napjatosti kovových slévárenských forem.

Kovové slévárenské formy mají obecně nejružnější tvar, což značně ztěžuje studium jednotlivých konkrétních případů. Podrobnějším rozbořením však lze zjistit, že tyto obecné tvary mohou být dosaženy kombinací tří základních jednoduchých tvarů - plochého (deskového), válcového a kulového /25/. Jakoukoliv kovovou formu je možno zařadit do některé z těchto tří tvarových tříd podle toho, který z tvarů v ní převládá. Nejvíce prakticky používaných forem je možno zařadit do třídy plochých (deskových) těles a do třídy těles válcových.

Z hlediska teoretického řešení úlohy tepelné napjatosti jsou nejjednodušší případy plochých (deskových) kokil. Obvykle se plochá kokila studuje jako deska tloušťky X_2 a libovolného půdorysného

tvaru, bez vnějšího zatížení a s teplotou $T_2 = f(x, t)$ měnící se pouze ve směru osy x , tj. tloušťky (tzv. jednorozměrná úloha).

Při řešení se zavádějí ještě další zjednodušující předpoklady:

- a) deformace (průhyby) desky jsou malé;
- b) teplotní pole není ovlivněno deformací desky;
- c) průřezy desky kolmé ke střední rovině před ohřevem zůstávají v oblasti pružných deformací.

Výsledkem řešení, jež je podrobněji uvedeno v /91/, je vztah pro výpočet teplotního napětí vznikajícího v desce při uvedených podmínkách. Za předpokladu, že počátek souřadnic je v rovině totožné s ohříváním povrchem (lícem) desky (obr. 2.6), má vzorec pro výpočet celkového teplotního napětí tvar

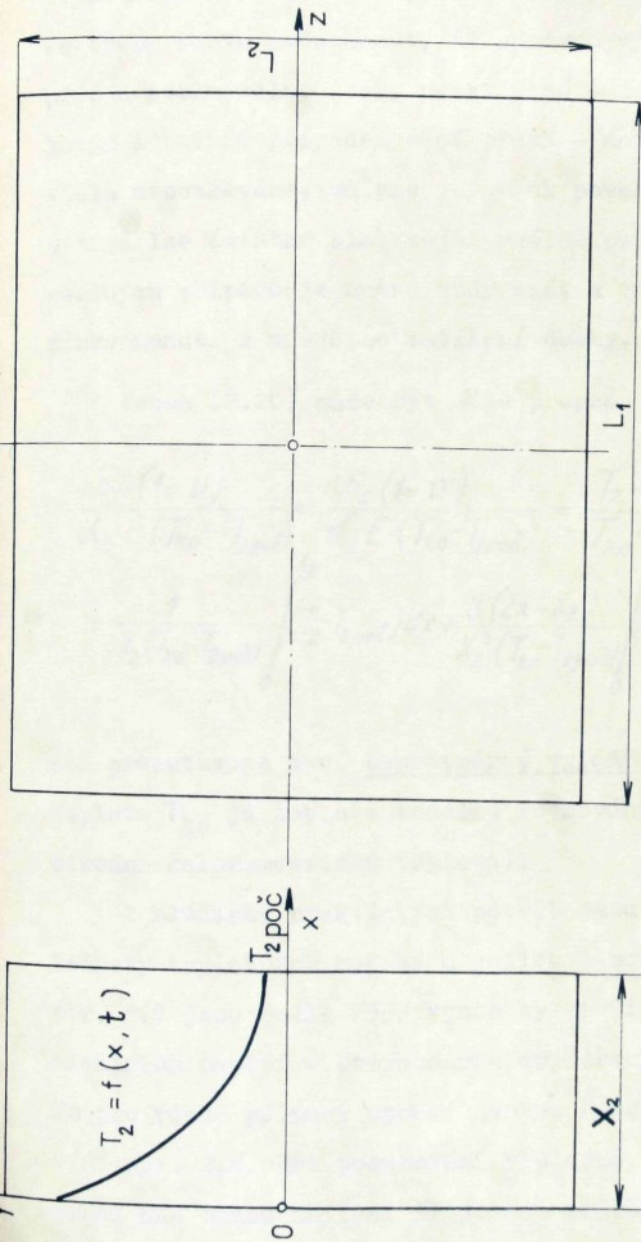
$$\begin{aligned} \sigma_y = \sigma_z = & -\frac{\alpha_t E}{1-\nu} \left[(T_2 - T_{2poc}) + \frac{1}{X_2} \int_0^{X_2} (T_2 - T_{2poc}) dx + \right. \\ & \left. + \frac{3(2x - X_2)}{X_2^3} \int_0^{X_2} (2x - X_2) \cdot (T_2 - T_{2poc}) dx \right] \end{aligned} \quad (2.20)$$

Výsledné teplotní napětí je v každém bodě i v každém okamžiku dáno součtem tří složek - tlakové, tahové a ohybové - jak je schematicky znázorněno na obr. 2.6:

$$\sigma_y = \sigma_z = \sigma_{tl} + \sigma_{ta} + \sigma_{oh} \quad (2.20a)$$

Průhyb tahové volné desky můžeme vypočítat podle

$$w(y, z) = -\frac{3\alpha_t}{4X_2^3} \cdot (L_1^2 - L_2^2 - 4y^2 - 4z^2) \int_0^{X_2} (2x - X_2) (T_2 - T_{2poc}) dx \quad (2.21)$$



$$\sigma_{tl} = -\frac{\alpha_t \cdot E}{1 - \gamma} \cdot (T_2 - T_2 \text{ poč})$$

$$\sigma_{ta} = \frac{\alpha_t \cdot E}{1 - \gamma} \cdot \frac{1}{X_2} \cdot \int_0^{X_2} (T_2 - T_2 \text{ poč}) dx$$

$$\sigma_o = \frac{\alpha_t \cdot E}{1 - \gamma} \cdot \frac{3(2x - X_2)}{X_2^3} \cdot \int_0^{X_2} (2x - X_2)(T_2 - T_2 \text{ poč}) dx$$

Vztahy (2.20) a (2.21) se používají při praktickém určování teplotních napětí a průhybů v deskách ohříváných různými způsoby. Je třeba znovu podotknout, že správné výsledky dávají pouze pro případ zcela volné desky nezatížené žádnými vnějšími silami. S takovým ideálním případem se v praxi - ani slévárenské - však zpravidla nesetkáváme; můžeme jej však považovat za jakýsi model, s nímž lze ostatní složitější reálné případy srovnávat. U těchto reálných případů je nutno vždy znát a brát v úvahu konkrétní podmínky upnutí i vnějšího zatížení desky.

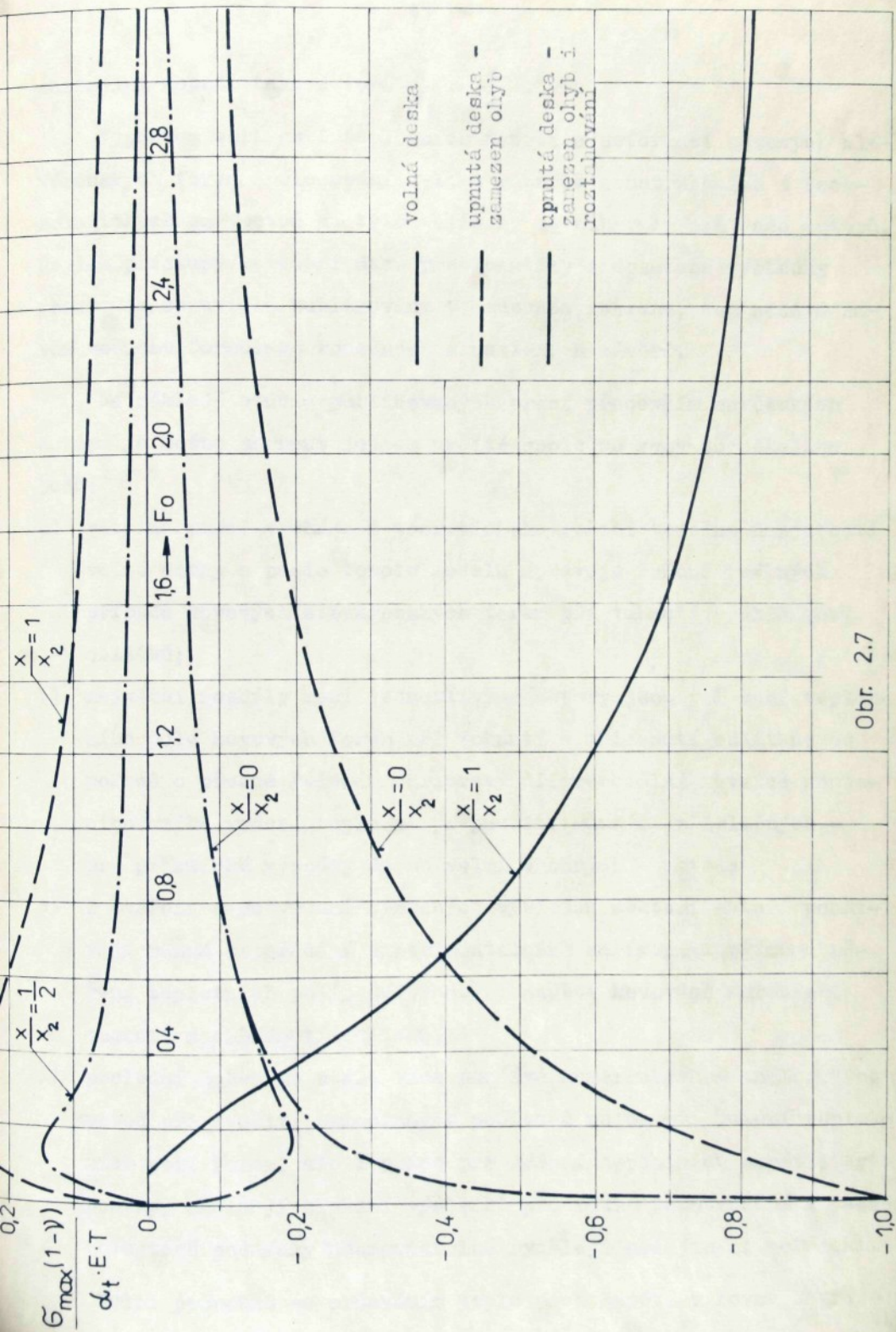
Vztah (2.20) může být dále přepsán do tvaru

$$\frac{\tilde{\sigma}_y (1-\nu)}{\alpha_t \cdot E (\bar{T}_{ko} - \bar{T}_{2poč})} = \frac{\tilde{\sigma}_z (1-\nu)}{\alpha_t \cdot E (\bar{T}_{ko} - \bar{T}_{2poč})} = \frac{\bar{T}_2 - \bar{T}_{2poč}}{\bar{T}_{ko} - \bar{T}_{2poč}} + \quad (2.22)$$

$$+ \frac{1}{\chi_2 (\bar{T}_{ko} - \bar{T}_{2poč})} \int_0^{\chi_2} (\bar{T}_2 - \bar{T}_{2poč}) dx + \frac{3(2x - \chi_2)}{\chi_2^3 (\bar{T}_{ko} - \bar{T}_{2poč})} \int_0^{\chi_2} (2x - \chi_2) (\bar{T}_2 - \bar{T}_{2poč}) dx$$

což představuje tzv. bezrozměrné vyjádření teplotního napětí. Teplota $\bar{T}_{ko}$ je teplota tepelné rovnováhy soustavy (např. tzv. střední kalorimetrická teplota).

Z hlediska praktických potřeb jsou nejvýznamnější maximální hodnoty teplotních napětí a jejich časové i místní rozložení. Na obr. 2.7 jsou podle /53/ vyneseny graficky závislosti těchto maximálních napětí v bezrozměrně vyjádřených hodnotách na hodnotě F_0 pro různé případy upnutí desky. Rozdělení teploty v desce odpovídá obr. 2.6. Při posuzování výsledků obsažených v předložené práci nás budou zajímat především průběhy pro volnou desku. Jak je z obr. 2.7 patrné, dosahují napětí maximálních hodnot na ohřívaném povrchu (líci) desky ($\frac{x}{\chi_2} = 0$) a dále i na vnějším povrchu ($\frac{x}{\chi_2} = 1$). Naproti tomu přibližně v polovině tloušťky desky jsou



Obr. 2.7

maximální napětí tahová (pro $\frac{x}{X_2} = \frac{1}{2}$).

Výpočtem velikostí teplotních napětí a deformací kovových slévárenských forem a sledováním vlivu různých konstrukčních i technologických parametrů na tyto veličiny se zabývala již řada autorů. Jejich přístupy k řešení dané problematiky i dosažené výsledky jsou však zpravidla publikovány v omezeném rozsahu, což nedává zatím možnost formulace konečných a ucelených závěrů.

Na základě studia publikovaných prací především sovětských autorů je možno shrnout jejich určité společné rysy do několika bodů:

- a) většina prací vychází z teoretického řešení tepelné napjatosti volné desky a podle tohoto modelu upravuje řešení reálných případů kovových slévárenských forem při tuhnutí a chladnutí odlitků;
- b) největší rozdíly mezi jednotlivými autory jsou v řešení teplotního pole kovových forem při tuhnutí a chladnutí odlitků; od pokusů o přesné řešení Fourierovy diferenciální rovnice nestacionárního vedení tepla až po použití různých přibližných - pro praktické výpočty často velmi vhodných - metod;
- c) k ověření a potvrzení získaných výsledků někteří autoři používají různá uspořádání experimentálních zařízení k přímému měření teplotních polí, deformací i napětí kovových forem při tuhnutí a chladnutí odlitků;
- d) poslední dobou se stále více používá numerických a analogových metod při využití samočinných počítačů nejen při řešení teplotních polí forem, ale i přímo pro určení teplotních napětí; tyto postupy umožňují získání výsledků pro různé konstrukční i technologické podmínky nesrovnatelně rychleji než jinými metodami.

Velmi podrobně se určováním teplotních napětí v kovových for-

nách zabývali např. KOCJUBINSKIJ /62/, SEREBRO /72 - 74/, BUTKEVIČJUS /64/, KAROSAS /65/, ROTEMBERG a CHRAMČENKOV /66/, SOKOLOV a KRESČENSKIJ /67/ a další. Charakteristiky postupu řešení, která jednotliví autoři použili, jsou uvedeny v práci /91/.

Pro ilustraci i možnost srovnání výsledků našich měření a výpočtů jsou v tab. č. 2.1 uvedeny výsledky výpočtů maximálních teplotních napětí, které prováděl GORJUNOV /21/ pro deskovitou vložku z oceli GOST 3Ch2V8F (odpovídá přibližně ČSN 19 721) formy pro tlakové lití při odlévání různých kovů a při různých technologických podmínkách. Z tabulky je patrné, že na lici formy vznikají velmi vysoká tlaková teplotní napětí dokonce už při odlévání zinku a jeho slitin.

Správnost výpočtů teplotních napětí a deformací kovových forem při tuhnutí a chladnutí odlitků prováděných některou z výpočtových metod je zpravidla ověřována porovnáním výsledků s hodnotami získanými přímým měřením uvedených veličin na studované formě. Tato měření je možno rozdělit na dvě skupiny:

- 1) měření celkových napětí na zvolených částech formy, nejčastěji pomocí tenzometrů při současném proměřování teplotního pole formy;
- 2) měření rozměrových a tvarových změn (deformací) forem při tuhnutí a chladnutí odlitků pomocí speciálně upravených snímačů opět při současném proměřování teplotního pole formy; takto získané údaje se využívají pro nepřímé určování napětí výpočtem.

Na našem pracovišti jsou již po několik let prováděna řešení napěťových polí kovových slévarenských forem v úzké návaznosti na určování teplotních polí. Postupně jsme přitom propracovali a ověřili tyto základní postupy:

Tab. 2.1 : Vypočtené hodnoty maximálních teplotních napětí v ocelové deskové formě při odlévání různých kovů /21/

Materiál odlitku	Přehřátí taveniny $\Delta T_{pr} = T_{liq} - T_t$	Teplotní napětí σ_t [MPa] při teplotě přehřátí formy ve $^{\circ}\text{C}$		
		20	200	400
Olovo	0	-378	-71	0
	100	-506	-286	-15
	200	-646	-393	-54
Zinek	0	-720	-393	-30
	100	-860	-541	-174
	200	-1020	-680	-360
Hořčík	0	-1120	-810	-443
	100	-1270	-985	-572
	200	-1400	-1055	-694
Hliník	0	-1190	-852	-482
	100	-1250	-936	-572
	200	-1490	-1140	-753
Měď	0	-2360	-1985	-1535
	100	-2480	-2100	-1620
	200	-2740	-2340	-1875
Železo	0	-2560	-2250	-1920
	100	-2640	-2340	-1875
	200	-2720	-2400	-2150

- a) početní řešení teplotních napětí a deformací forem s využitím vztahů tepelné napjatosti desek (2.20) a (2.21) na základě pokusně naměřených teplotních polí forem;
- b) početní řešení teplotních napětí a deformací forem na základě početně stanovených teplotních polí forem a provedení těchto výpočtů na samočinném počítači;
- c) pokusné měření rozměrových a tvarových změn (deformací) forem při ochlazování odlitku při současném proměřování teplotního pole na zvlášť sestaveném měřicím zařízení; takto naměřené údaje jsou využívány pro nepřímé určování teplotních napětí výpočtem.

Podrobně jsou uvedené postupy popsány v našich pracích /91/, /92/ a na řadě případů ověřovány v pracích /96 - 110/. Omezím se proto dále na stručnou charakteristiku pouze posledních dvou postupů.

2.4.2. Početní řešení teplotních napětí a deformací kovových forem na samočinném počítači

Tento postup je prováděn v úzké návaznosti na řešení teplotních polí kovových forem na počítači, popsány v kap. 2.3.2, při využití vztahů pro určení teplotních napětí a průhybu desky. Tyto vztahy mají po úpravě pro uvažovaný fyzikální model soustavy odlitek - rozhraní - kovová forma - okolí formy (obr. 2.4) tvar:

Pro celkové teplotní napětí v kovové formě:

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_t = & -\frac{\alpha_{t_4} \cdot E_4}{1 - \nu_4} \cdot \left[T(x_4) - T(x_4 = \bar{a}_4) \right] + \\ & + \frac{\alpha_{t_4} \cdot E_4}{(1 - \nu_4) \cdot \bar{a}_4} \cdot \int_0^{\bar{a}_4} \left[T(x_4) - T(x_4 = \bar{a}_4) \right] dx_4 + \\ & + \frac{\alpha_{t_4} \cdot E_4}{1 - \nu_4} \cdot \frac{3(2x_4 - \bar{a}_4)}{\bar{a}_4^3} \cdot \int_0^{\bar{a}_4} (2x_4 - \bar{a}_4) \left[T(x_4) - T(x_4 = \bar{a}_4) \right] dx_4 \end{aligned} \quad (2.23)$$

Pro průhyb formy:

$$W = - \frac{3\alpha_{t4}}{4\bar{a}_4^3} \cdot (A^2 + B^2) \int_0^{\bar{a}_4} (2x_4 - \bar{a}_4) [T(x_4) - T(x_4 = \bar{a}_4)] dx_4 \quad (2.24)$$

kde $A = \sqrt{L_1^2 - 4z^2}$, $B = \sqrt{L_2^2 - 4y^2}$
 y, z souřadnice bodu, ve kterém určujeme průhyb.

Pro průhyb formy uprostřed

$$W^0 = - \frac{3\alpha_{t4}}{4\bar{a}_4^3} \cdot (L_1^2 + L_2^2) \int_0^{\bar{a}_4} (2x_4 - \bar{a}_4) [T(x_4) - T(x_4 = \bar{a}_4)] dx_4 \quad (2.25)$$

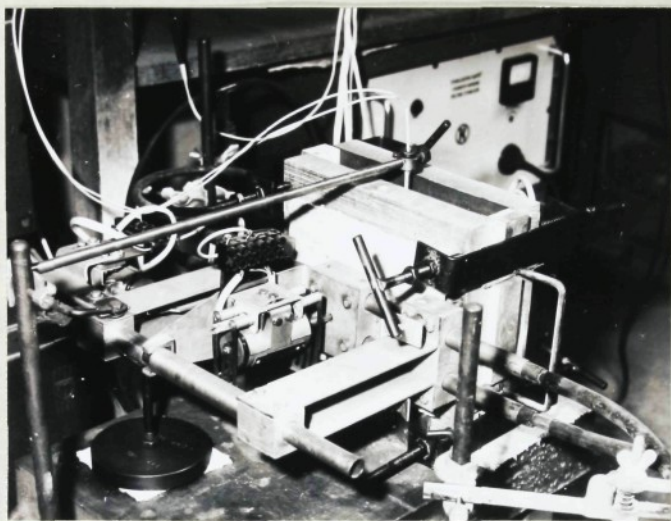
Zpracovaný program umožňuje počítat jednotlivé veličiny pro řadu variant soustavy odlitek - kovová forma. Některé příklady provedených výpočtů budou uvedeny dále.

2.4.3. Pokusné měření rozměrových a tvarových změn kovových forem

Pro pokusné měření rozměrových a tvarových změn kovových forem při ochlazování odlitku bylo použito zvlášť sestavené měřicí zařízení, jenž umožňovalo

- měření teplotního pole formy pomocí termočlánků Fe - Ko Ø 0,5 mm umístěných ve stěně desky v různých vzdálenostech od líce;
- měření průhybu deskové formy uprostřed pomocí indukčního snímače;
- měření dilatace středního vlákna na vnějším povrchu formy pomocí indukčního snímače.

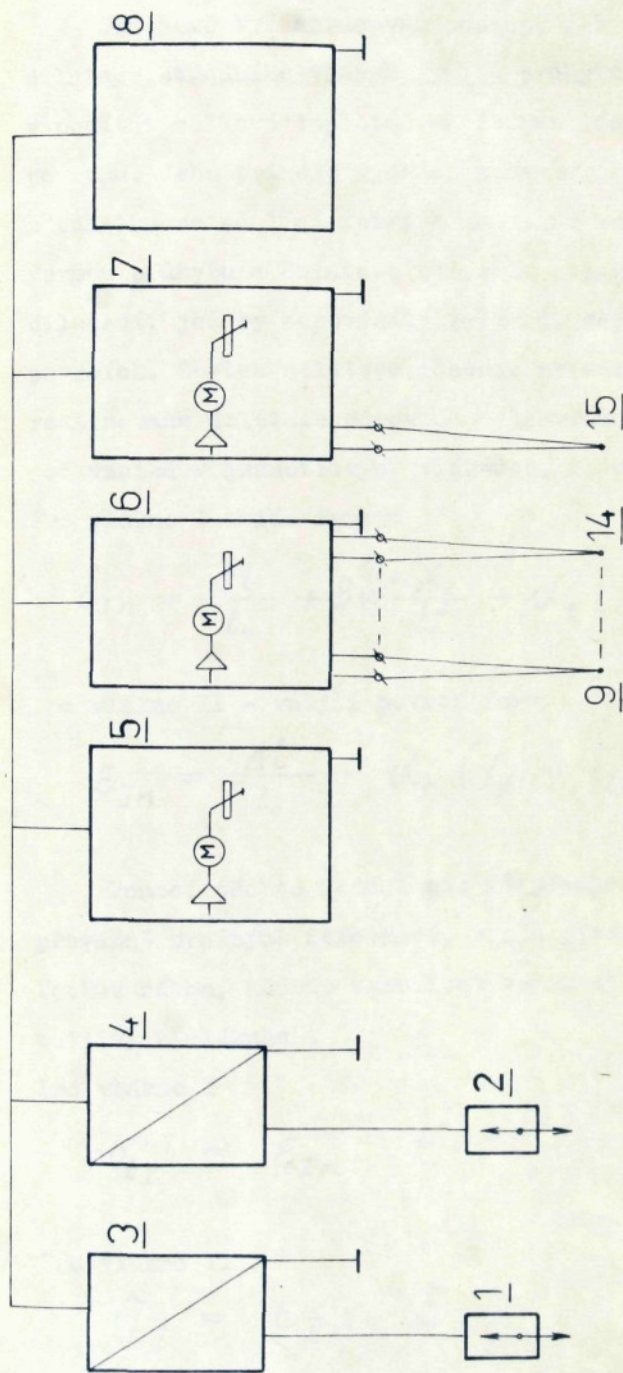
Na obr. 2.8 a 2.9 jsou zachyceny detaily i celkové uspořádání jedné z variant tohoto měřicího zařízení, jeho celkové blokové schéma je na obr. 2.10.



Obr. 2.8



Obr. 2.9



Legend :

- 1 - indukční vysílač 99 424 - průhyb
- 2 - indukční vysílač 99 424 - dilatace
- 3 - převodník 90 124 - průhyb
- 4 - převodník 90 124 - dilatace
- 5 - kompenzační zapisovač MK 3301-8.00
- 6 - kompenzační zapisovač EPP-09 M3
- 7 - kompenzační zapisovač EkBT - 1eN

- 8 - stabilizátor napětí ST 5000.1
- 9-14 - termočlánek Fe-Ko
- 15 - termočlánek Fe-Ko (Pt-PtRh)

Současně byl zpracován postup, jak z naměřených hodnot teplot, dilatace středního vlákna Δl a průhybu uprostřed formy W^0 vypočítat celkové teplotní napětí na lici formy a na jejím vnějším povrchu. Jeho princip vychází z úvahy, že při ohřevu kokily teplem z odlitku se na lici formy a na jejím vnějším povrchu realizuje formou průhybu a dilatace středního vlákna pouze část teplotních dilatací, jež by odpovídaly průběhům teplot na obou sledovaných površích. Zbytek dilatace zůstane nerealizován. Velikost této nerealizované dilatace odpovídá celkovému teplotnímu napětí $\tilde{\sigma}_t$, jež vzniká v jednotlivých vláknech, a je možno ji určit ze vztahů: Pro vlákno I - líc formy:

$$\varepsilon_{In} = \frac{\Delta l}{l_0} + 8W^0 \frac{X_2}{l_0^2} - \alpha_t (T_I - T_{2poč}) \quad (2.26)$$

Pro vlákno II - vnější povrch formy:

$$\varepsilon_{II n} = \frac{\Delta l}{l_0} - \alpha_t (T_{II} - T_{2poč}) \quad (2.27)$$

Pomocí těchto hodnot pak za předpokladu, že se jedná o oblast převážně pružných deformací, v níž platí (s určitou přibližností) Hookův zákon, můžeme vypočítat velikost teplotních napětí v jednotlivých vláknech.

Pro vlákno I :

$$\tilde{\sigma}_{tI} = \varepsilon_{In} \cdot E \quad (2.28)$$

Pro vlákno II :

$$\tilde{\sigma}_{tII} = \varepsilon_{II n} \cdot E \quad (2.29)$$

Uvedeným postupem lze počítat hodnoty teplotních napětí

v různých časových okamžicích a získané hodnoty znázornit graficky. Postup byl použit při proměřování různých typů kovových forem při odlévání odlitků různé tloušťky a z různého materiálu. Podrobné výsledky těchto výzkumů jsou uvedeny v pracích /91/, /92/, /96 - 100/, /103/, /109/.

2.5. Příklady průběhů teplotních polí, teplotních napětí a průhybů kovových slévárenských forem

V této kapitole bych chtěl alespoň na několika ukázkách vybraných z velkého počtu provedených měření a výpočtů demonstrovat charakteristické průběhy teplot, teplotních napětí a průhybů kovových forem. Přehled podmínek, za nichž byly průběhy znázorněné na obr. 2.11 až 2.22 získány, udává tabulka č. 2.2.

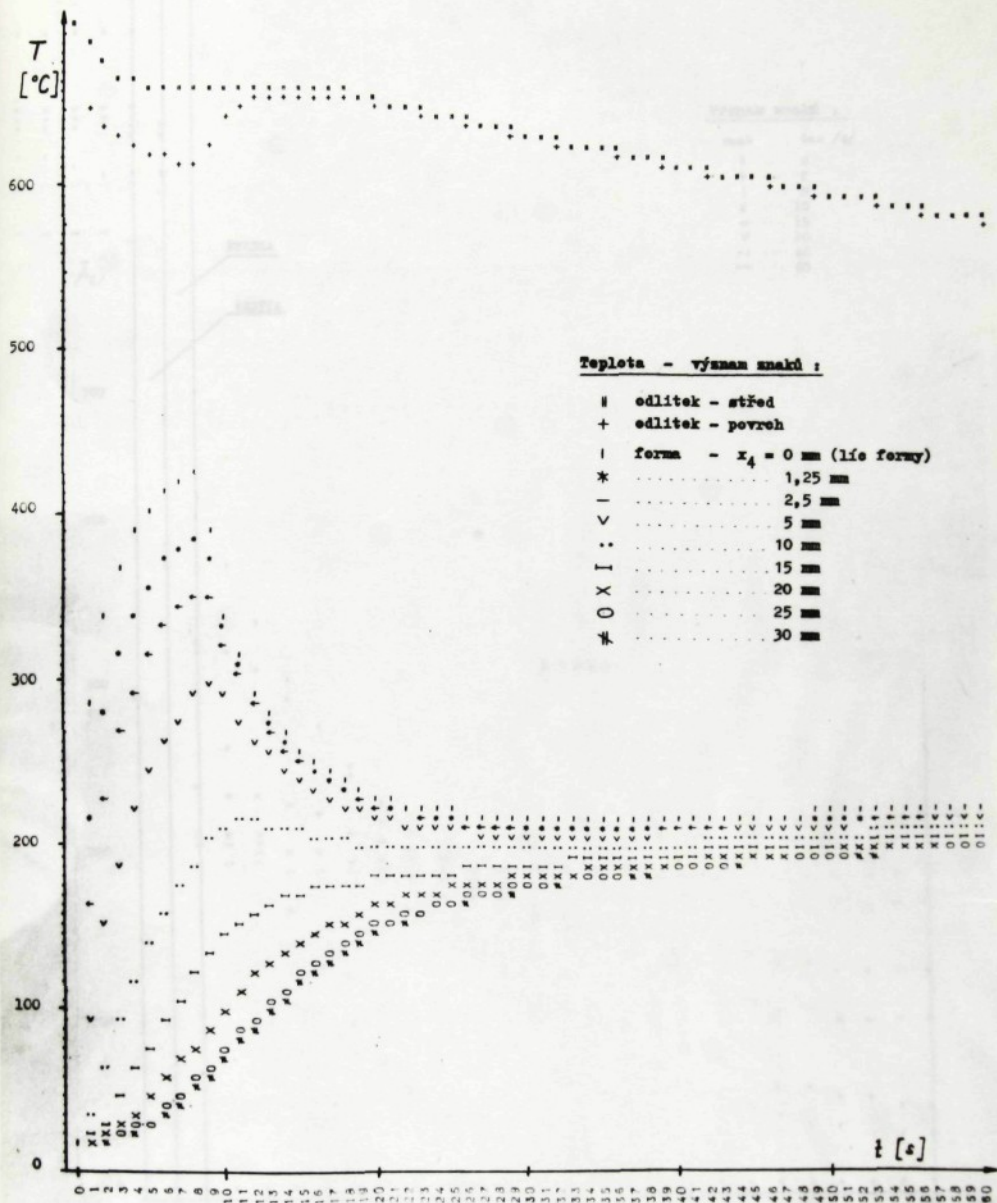
Příklady byly vybrány tak, aby na nich bylo možno sledovat typické průběhy uvedených veličin a také porovnávat výsledky získané vyhodnocením pokusných měření s výsledky získanými početním řešením pro stejný materiál, tloušťku a počáteční teplotu deskové formy. Jako materiál deskové formy byla použita šedá litina ČSN 42 2425, odlitek byl odléván jednak z čistého hliníku a dále ze šedé litiny ČSN 42 2425.

Uvedené výsledky byly získány pro nepředehřátou formu, což odpovídá podmínkám jednorázového odlití, popsány v kapitole 2.2.1, přičemž forma byla považována za volnou desku.

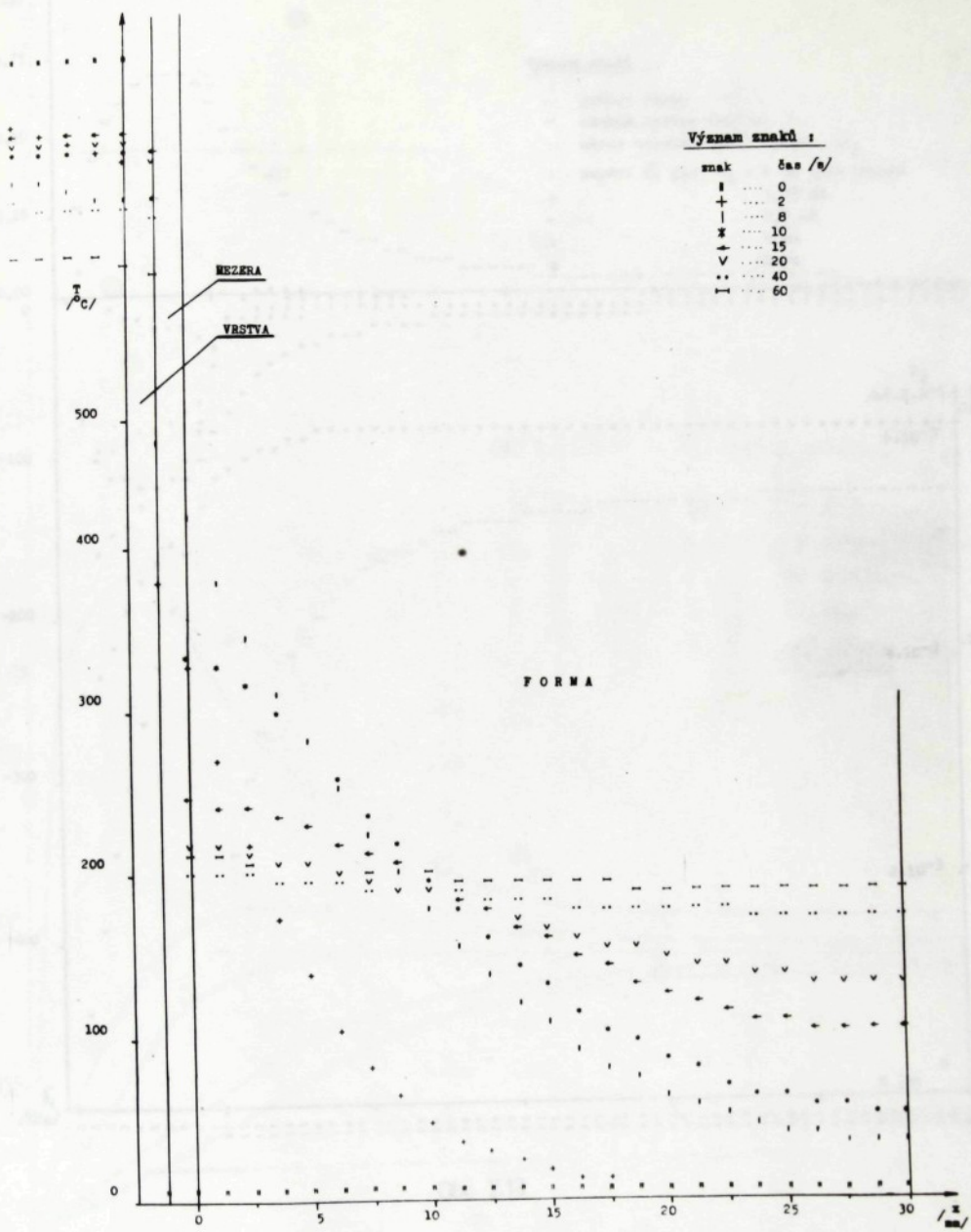
Teplotní napětí byla počítána postupy a), b), c) (viz str.48), což je v grafech u jednotlivých průběhů uvedeno (kromě průběhů získaných početním řešením na počítači). Početní řešení na počítači umožňuje získat průběhy teplotních napětí nejen na lici a na vnějším povrchu formy, ale i v různých místech ve směru tloušťky.

Tabulka č. 2.2: Přehled podmínek měření a výpočtů teplotních polí a napětí kovových forem
(k obrázkům č. 2.11 až 2.22)

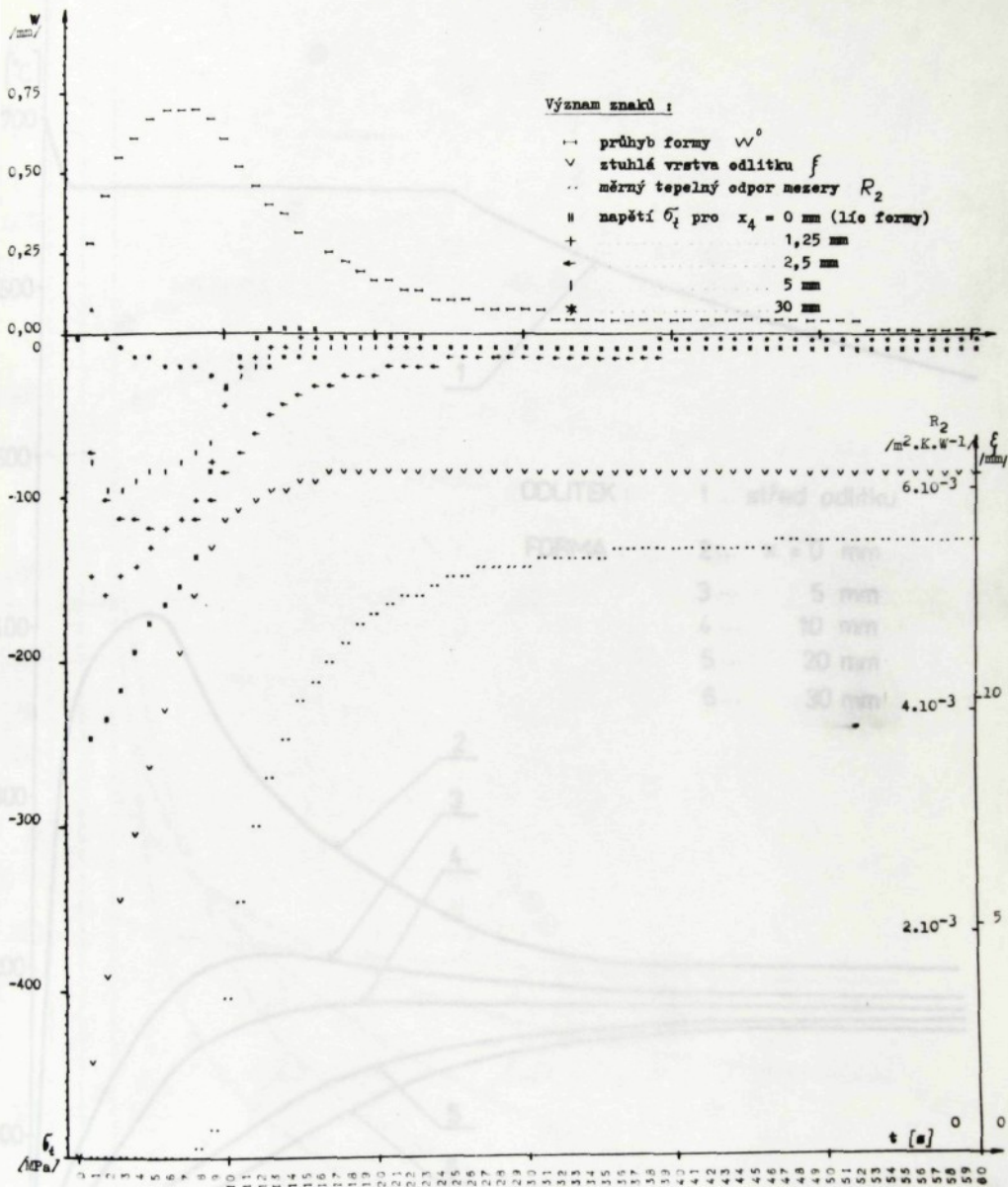
F O R M A				O D L I T E K			Zpracované výsledky		Stanovené
Materiál	Floušťka /mm/	Počáteční teplota	Materiál	Floušťka /mm/	Licí teplota	Číslo obrázku	Obsah obrázku	Početně	Pokusně
Šedá litina ČSN 42 2425	30	20 °C	Al 99,5 ČSN 42 4106	30	710 °C	2.11	- Průběh teplot v odlitku a ve formě s časem	Početně	Pokusně
						2.12	- Průběh teplot ve stěně formy		
						2.13	- Průběh průhybu a teplotních napětí formy s časem		
	35	50 °C	šedá litina ČSN 42 2425	30 nátěr	1250 °C	2.14	- Průběh teplot v odlitku a ve formě s časem	Početně	Pokusně
						2.15	- Průběh teplot ve stěně formy		
						2.16	- Průběh průhybu, dilatace a napětí formy s časem		
						2.17	- Průběh napětí ve stěně formy		
	35	50 °C	šedá litina ČSN 42 2425	30 nátěr	1250 °C	2.18	- Průběh teplot v odlitku a ve formě s časem	Početně	Pokusně
						2.19	- Průběh průhybu a napětí ve formě s časem		
						2.20	- Průběh napětí ve stěně formy		
		50 °C	šedá litina ČSN 42 2425	30 nátěr	1250 °C	2.21	- Průběh teplot v odlitku a ve formě s časem	Početně	Pokusně
						2.22	- Průběh průhybu, dilatace a teplotních napětí ve formě s časem		



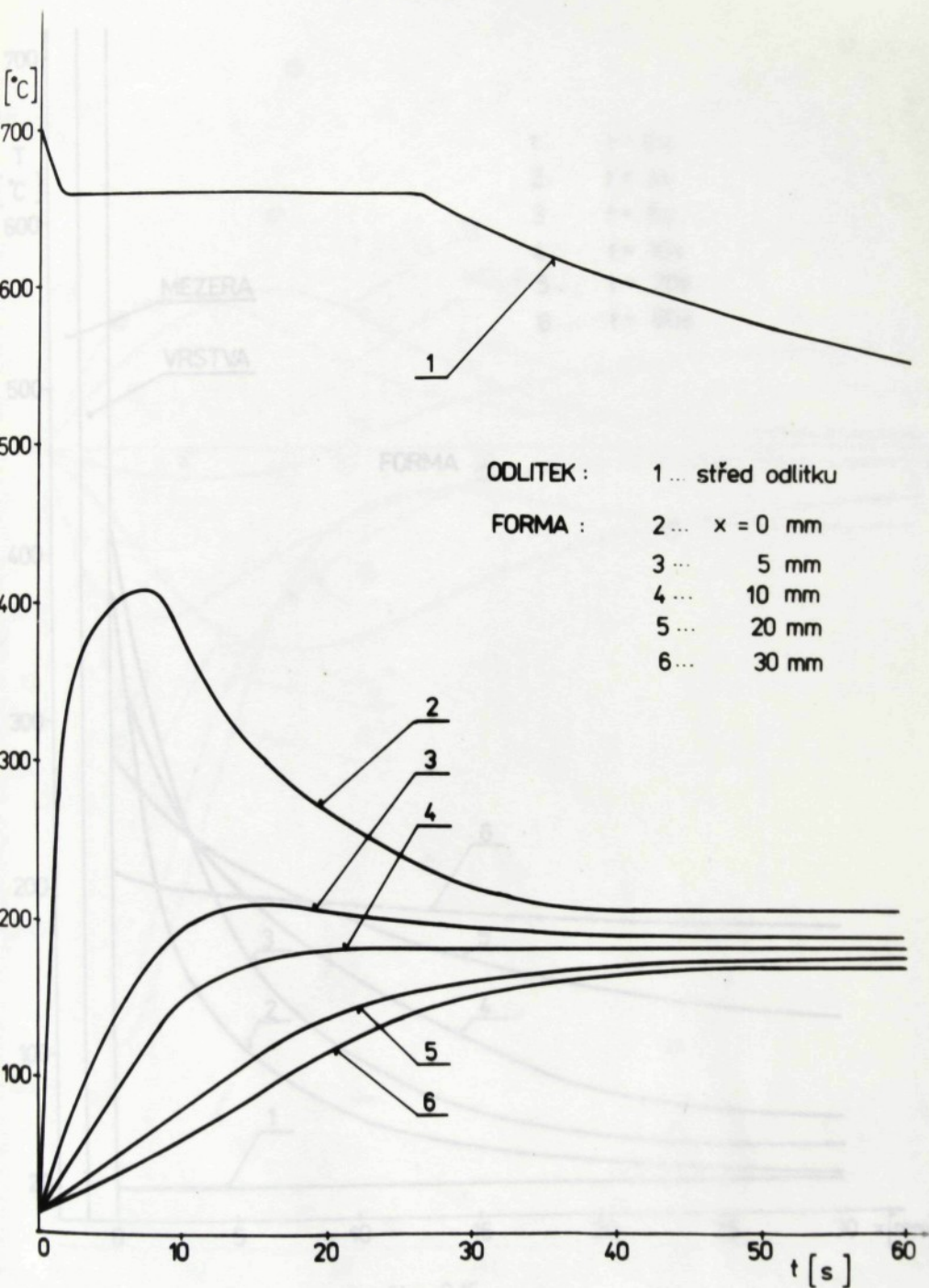
Obr. 2.11



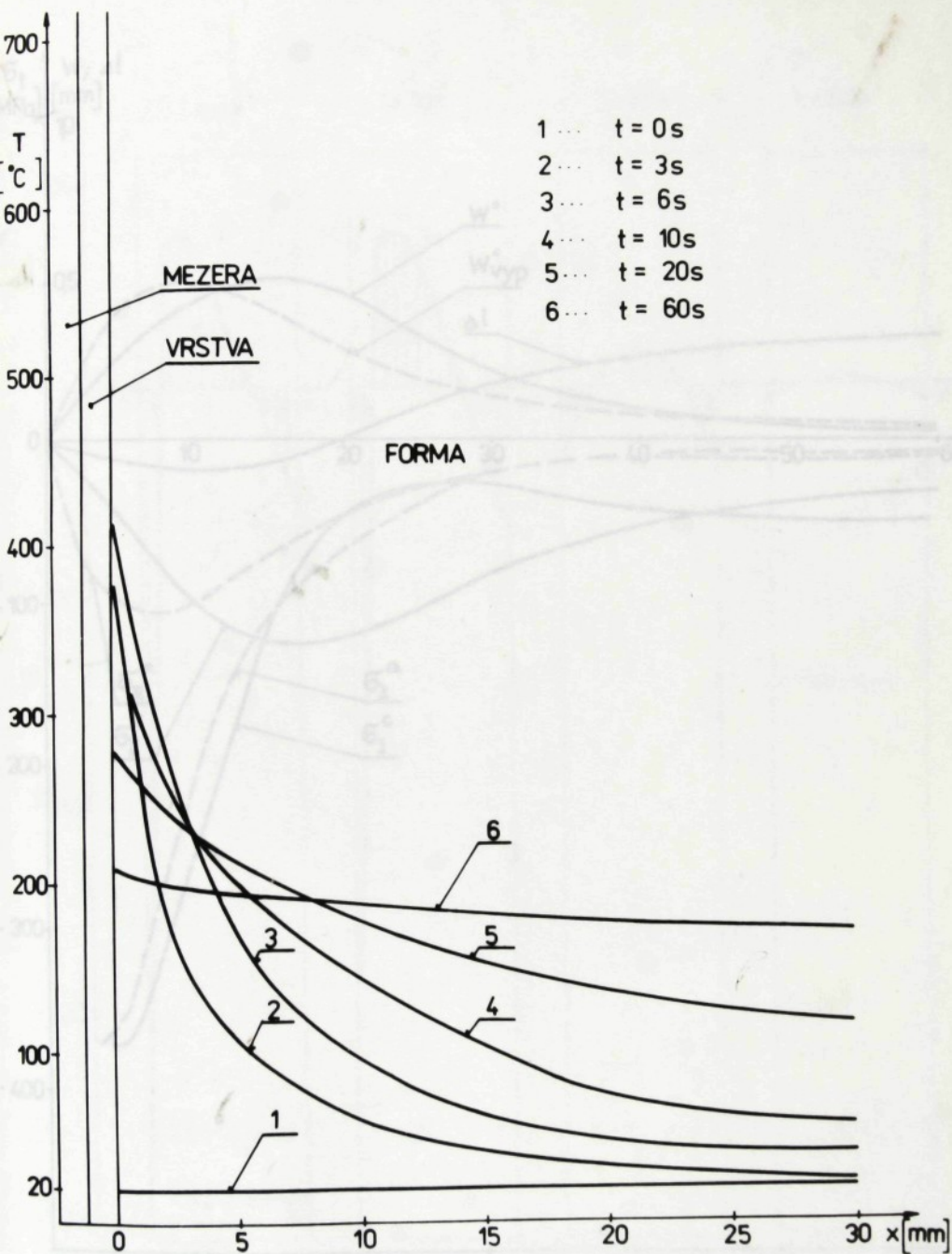
Obr. 2.12



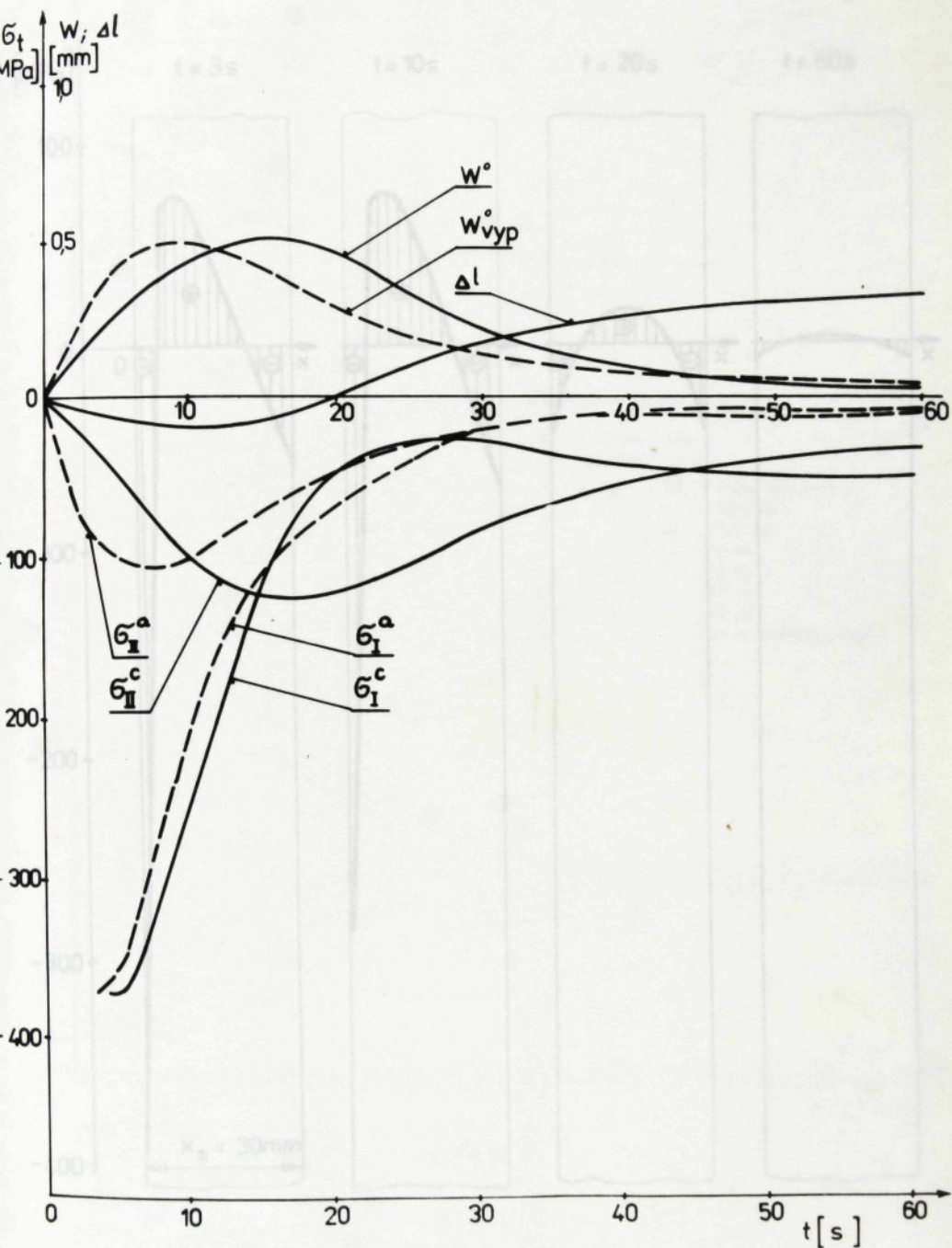
Obr. 2.13



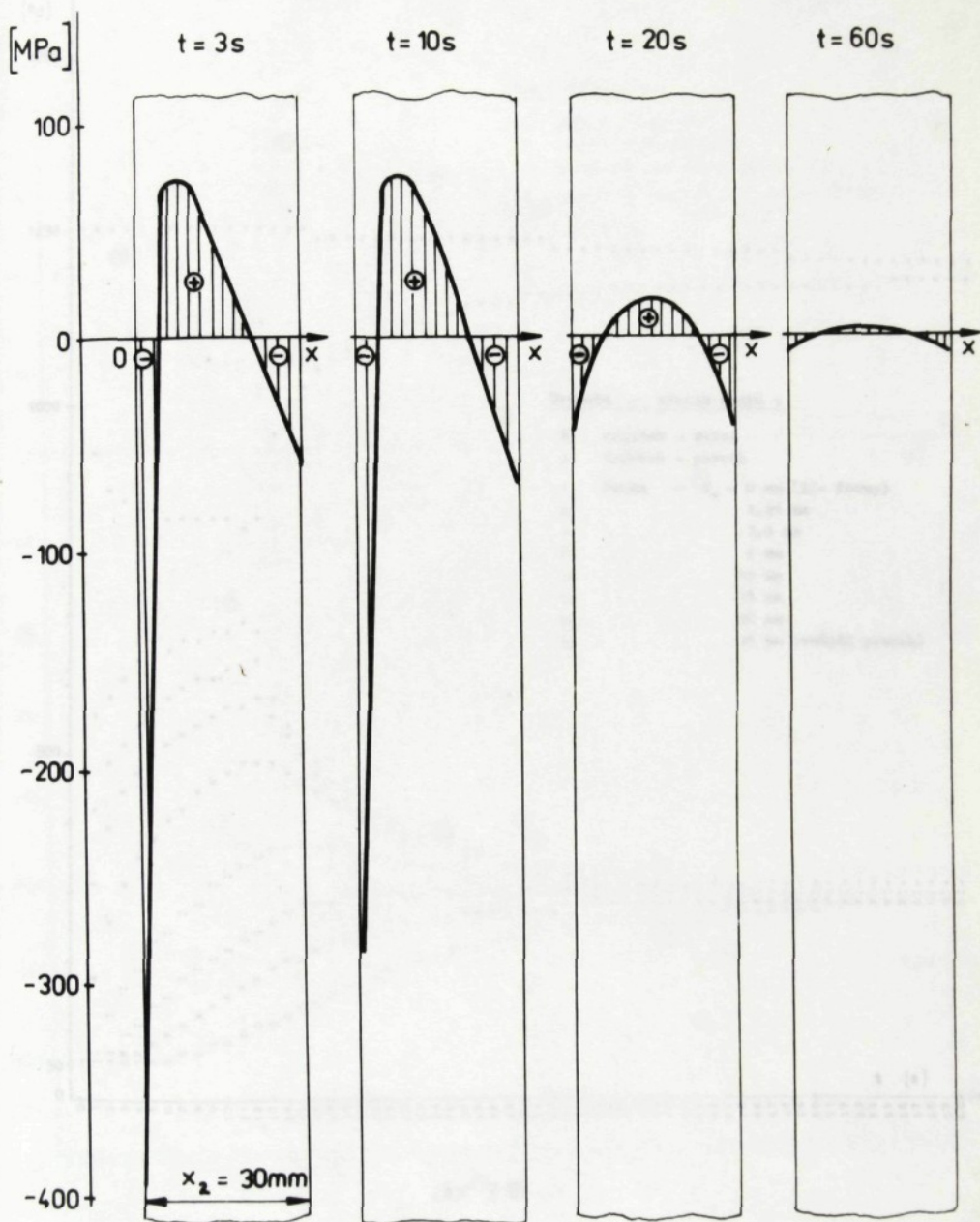
Obr. 2.14



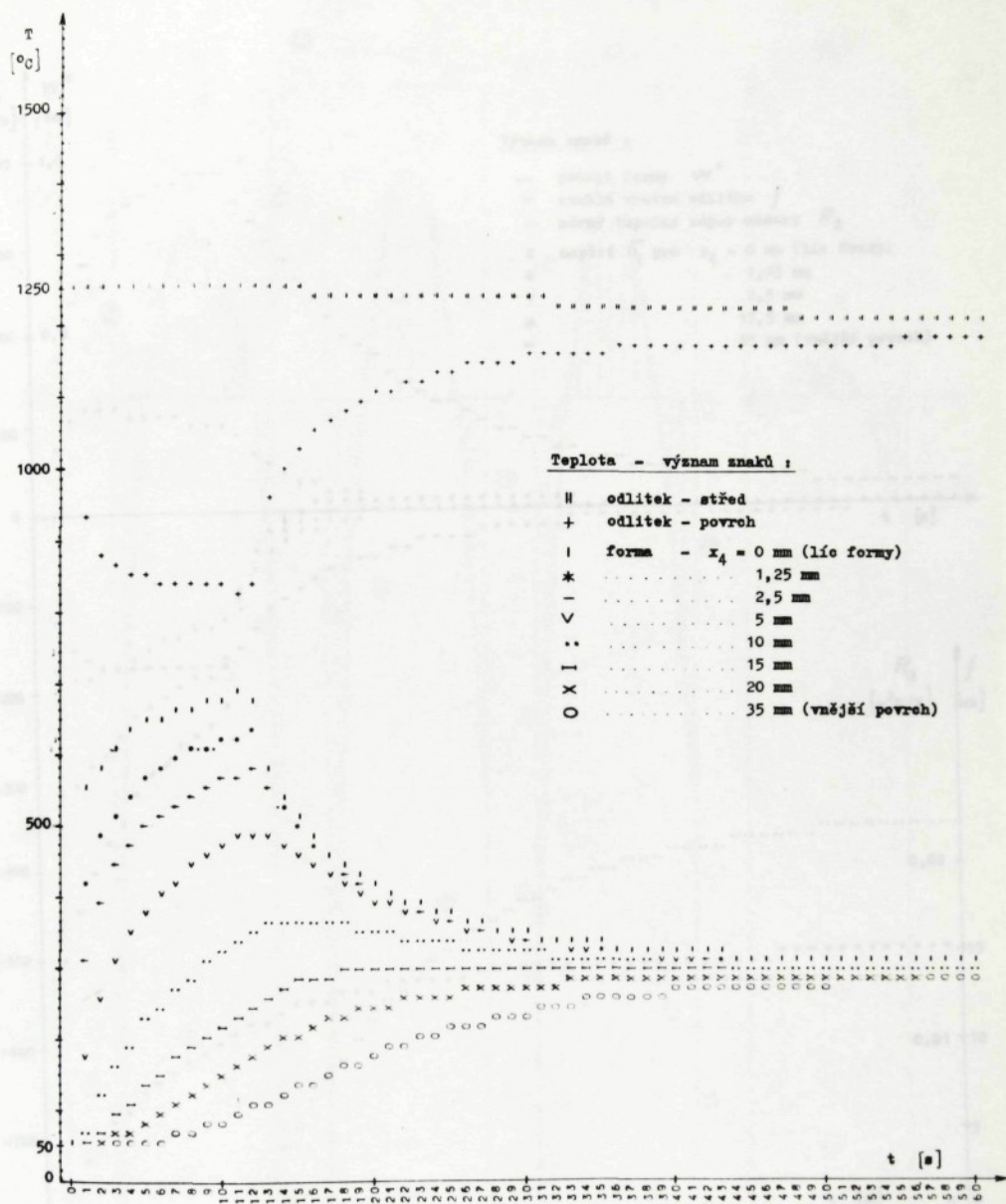
Obr. 2.15



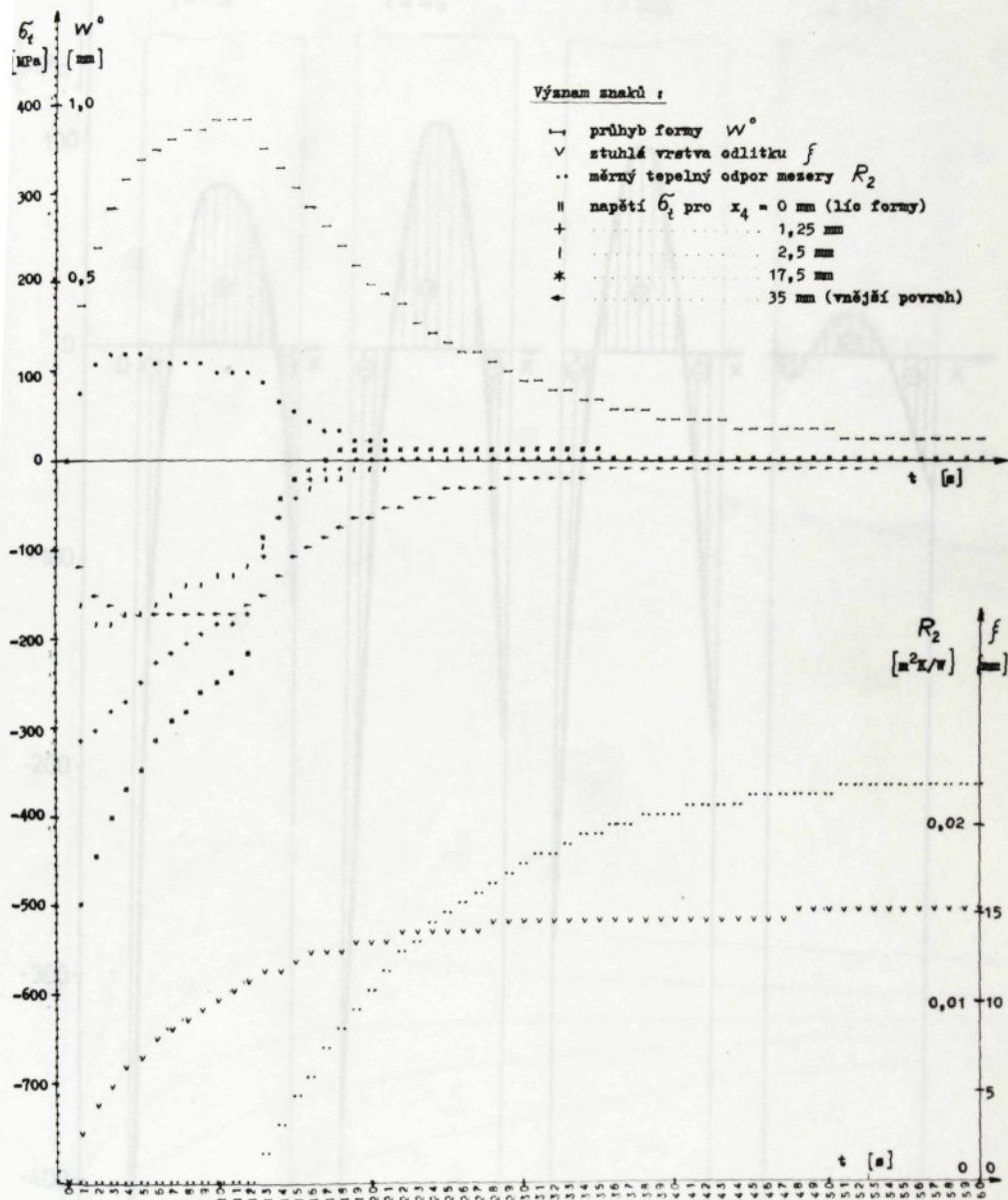
Obr. 2.16



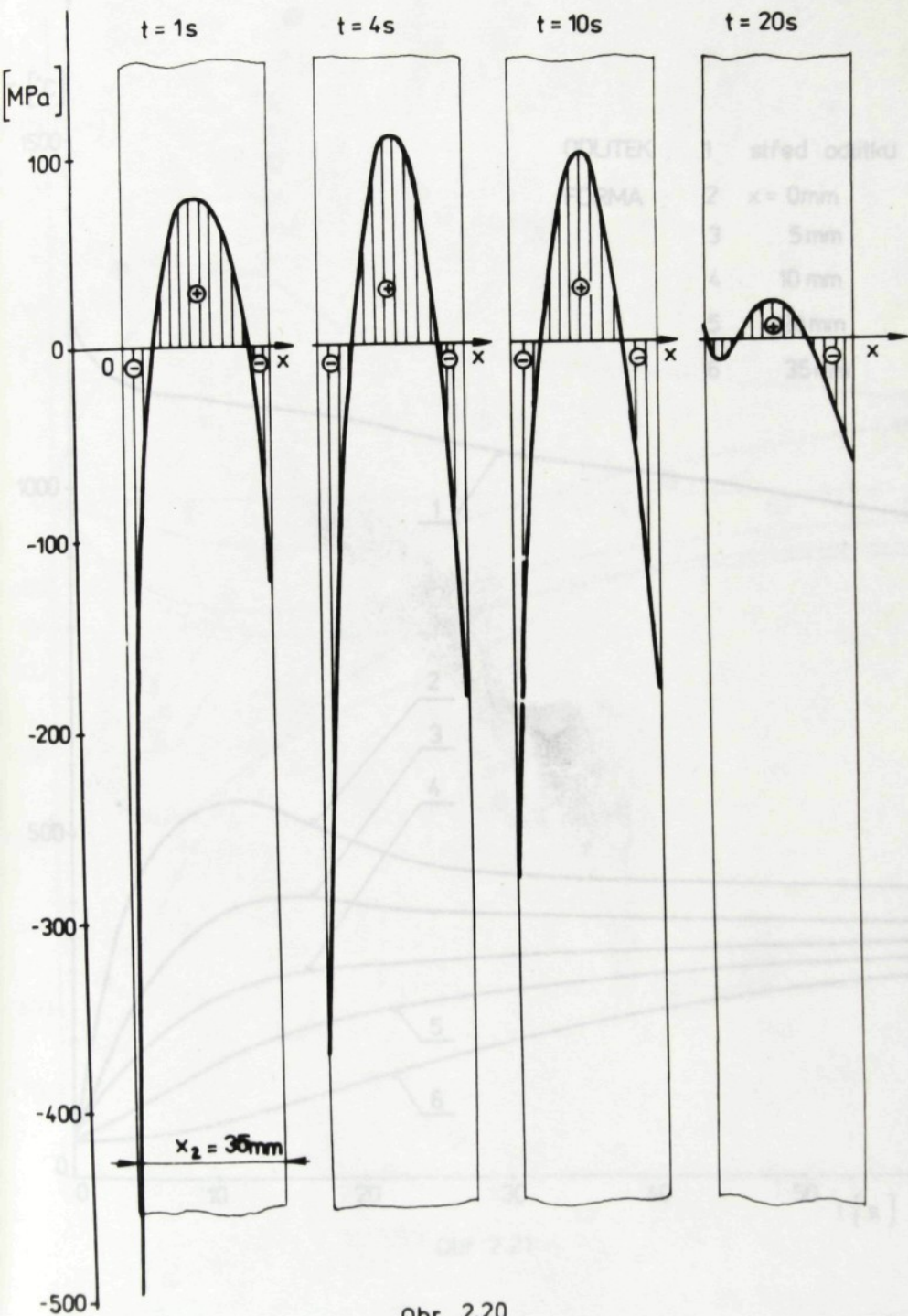
Obr. 2.17



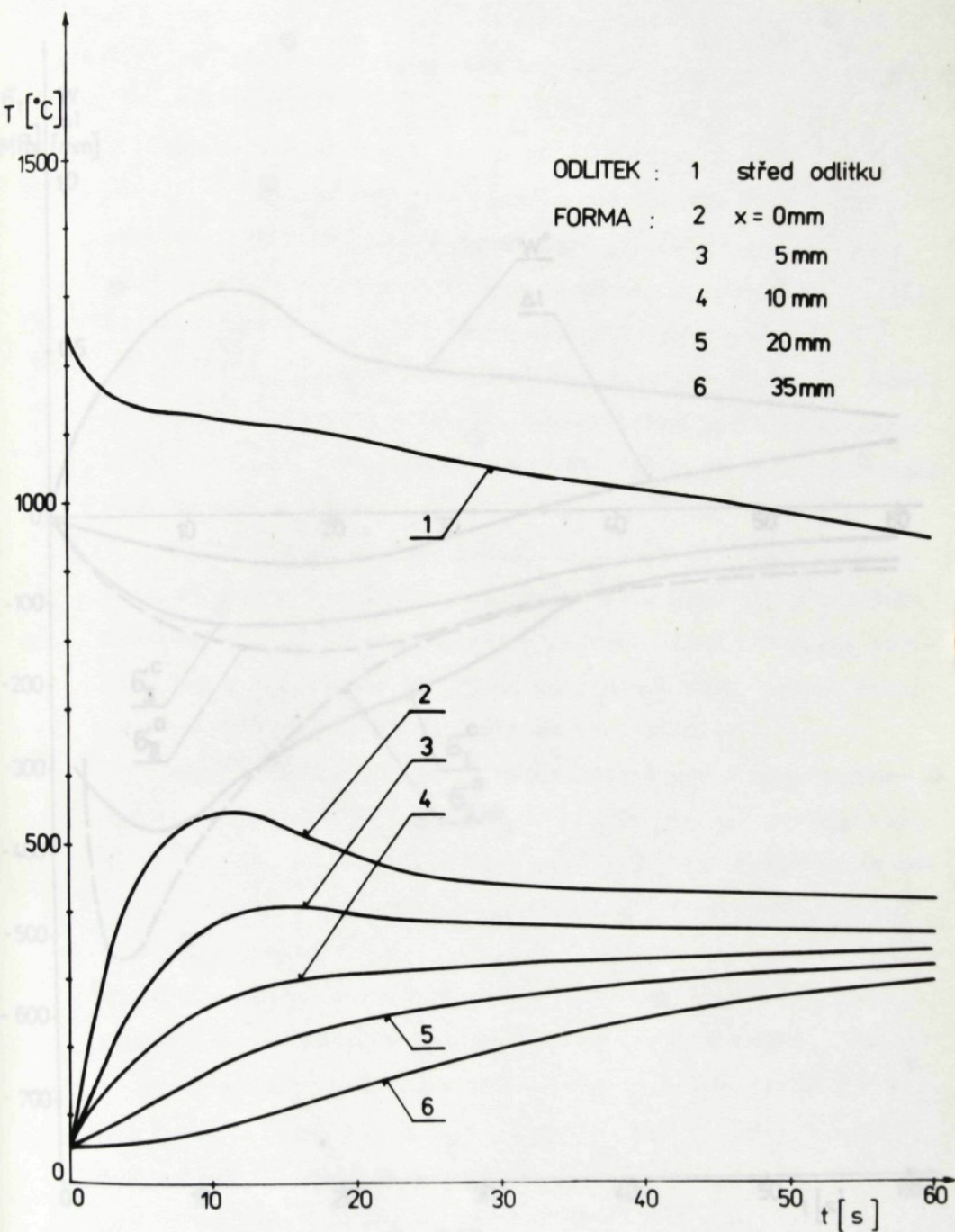
Obr. 2.18



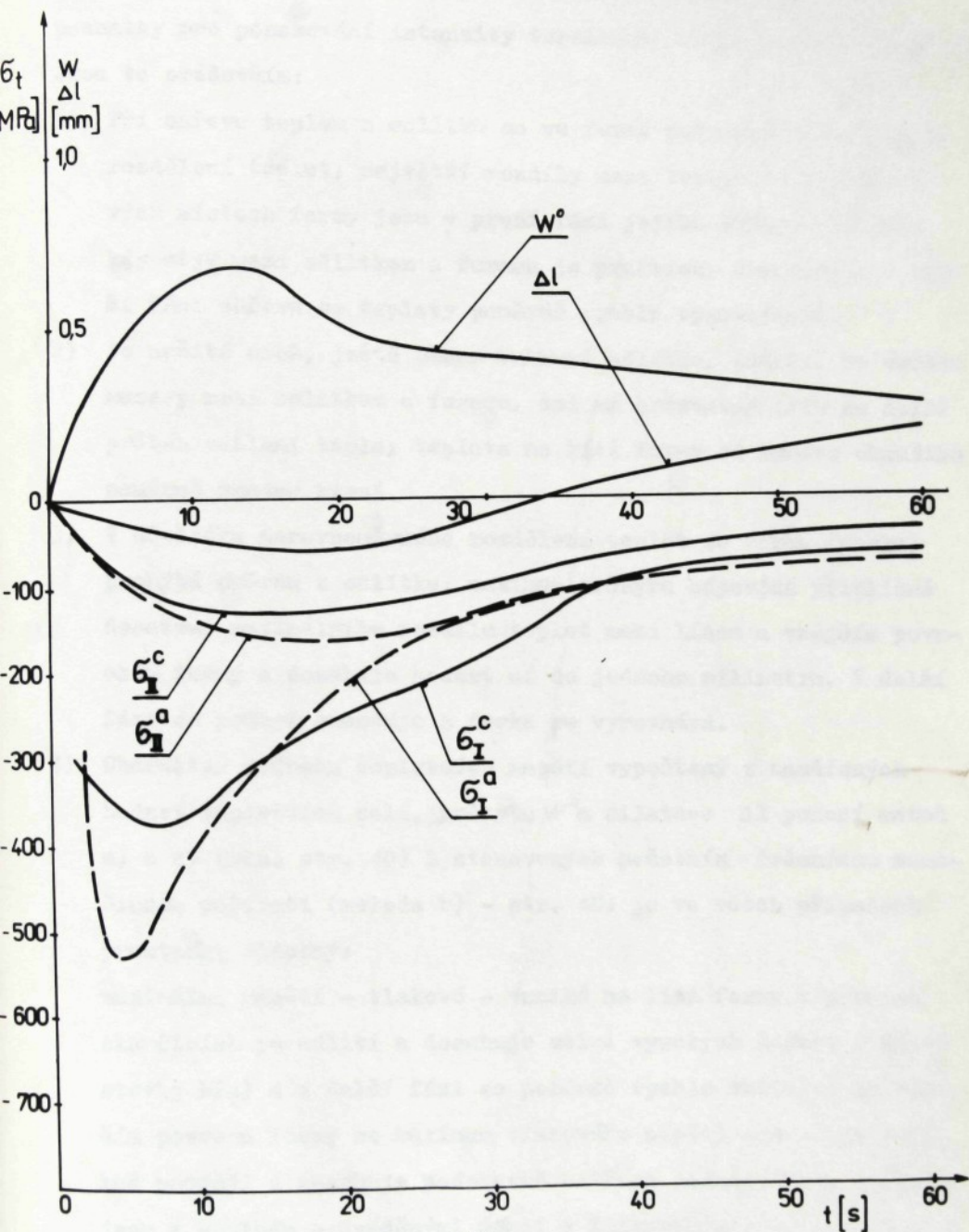
Obr. 2.19



Obr. 2.20



Obr 2.21



Obr. 2.22

Z předložených diagramů je možno vyčíst některé důležité poznatky pro posuzování intenzity tepelného namáhání kovových forem. Jsou to především:

- 1) Při ohřevu teplem z odlitku se ve formě ustavuje nerovnoměrné rozdělení teplot; největší rozdíly mezi teplotami v jednotlivých místech formy jsou v první fázi jejího ohřevu (po dobu, kdy styk mezi odlitkem a formou je prakticky dokonalý), v další fázi ohřevu se teploty poměrně rychle vyrovnávají.
- 2) Po určité době, ještě během tuhnutí odlitku, dochází ke vzniku mezery mezi odlitkem a formou, což má podstatný vliv na další průběh sdílení tepla; teplota na lici formy od tohoto okamžiku poměrně prudce klesá.
- 3) V důsledku nerovnoměrného rozdělení teplot se forma (deska) prohýbá směrem k odlitku; maximum průhybu odpovídá přibližně dosažení maximálního rozdílu teplot mezi lícem a vnějším povrchem formy a dosahuje hodnot až do jednoho milimetru. V další fázi se průhyb zmenšuje a deska se vyrovnává.
- 4) Charakter průběhu teplotních napětí vypočtený z naměřených hodnot teplotních polí, průhybu W^0 a dilatace Δl pomocí metod a) a c) (viz. str. 48) i stanovených početním řešením na samočinném počítači (metoda b) - str. 48) je ve všech případech prakticky obdobný:
maximální napětí - tlakové - vzniká na lici formy v prvních okamžicích po odlití a dosahuje velmi vysokých hodnot (řádově stovky MPa) a v další fázi se poměrně rychle snižuje; na vnějším povrchu formy se maximum tlakového napětí dostavuje poněkud později a dosahuje podstatně nižších hodnot. Tato zjištění jsou v souladu s uváděnými údaji v literatuře a citovanými v této práci na obr. 2.7 a v tabulce 2.1.
- 5) Z obr. 2.17 a 2.20 vyplývá, že velikost i znaménko celkového

teplotního napětí se mění i ve směru tloušťky formy (desky); zatím co na lici i na vnějším povrchu vzniká především napětí tlakové, je ve střední části desky napětí tahové; s postupným prohříváním desky se hodnoty obou druhů napětí snižují.

- 6) Velikost mezery vznikající mezi odlitkem a formou, jež má významný vliv na proces sdílení tepla a lze ji charakterizovat hodnotou celkového tepelného odporu R , je určena rozdílem mezi průběhem smršťování odlitku a průběhem průhybu formy. Její hodnota se mění nejenom s časem, ale je rozdílná i v různých místech v rovině rozhraní formy a odlitku. Stanovení velikosti mezery je důležitým krokem při určování jejího vlivu na pochod sdílení tepla mezi odlitkem a formou. Řešení této otázky jsme také věnovali pozornost a některé výsledky jsou uvedeny v pracích /100/, /105/, /106/.
- 7) Určité rozdíly mezi hodnotami teplotních napětí stanovenými početně a z naměřených hodnot rozměrových a tvarových změn forem (tedy pokusně) souvisejí se skutečností, že v praktických případech lze velmi obtížně realizovat případ dokonale volné desky (formy). Vliv chladnějších okrajů formy, ev. jejich zesílení a vystužení se projeví ve snížení možnosti deformací formy a tedy ve zvýšení hodnot teplotních napětí. Tyto případy lze řešit početně tím, že v závislosti na druhu a intenzitě "upnutí" desky (formy) snižujeme vliv druhého a třetího členu v rovnici (2.20).

Uvedené poznatky je tedy možno využít při posuzování velikosti tepelného namáhání a zejména jeho vlivu na opotřebení a tím i životnost kovových slévárenských forem při jejich provozu. Některé rozborů a úvahy v tomto směru budou předmětem obsahu v další kapitole.

3. DŮSLEDKY TEPELNÉHO NAMÁHÁNÍ PRO PROVOZ A ŽIVOTNOST KOVOVÝCH FOREM

3.1. Podstata a mechanismus opotřebení kovových forem

Z rozboru a některých výsledků uvedených v předcházející kapitole je patrné, že kovové slévárenské formy pracují v podmínkách

- a) zvýšené teploty;
- b) nerovnoměrného rozdělení teploty;
- c) existence a nerovnoměrného rozdělení teplotních napětí.

Tyto podmínky se navíc mění v průběhu litého cyklu a opakují při opakujících se litéch cyklech. Z toho vyplývá, že materiál forem je namáhán na tepelnou únavu.

Při řešení problematiky tepelné únavy materiálu se uplatňují jak cykly napětí, tak teplotní cykly, které významně ovlivňují chování materiálu. Bereme-li v úvahu tyto činitele, můžeme řešení problematiky tepelné únavy rozdělit obecně na určité dílčí úlohy /53/, charakterizované těmito podmínkami:

1. Zvýšená a rovnoměrně rozdělená teplota v tělese, souměrně střídavé namáhání od vnějšího zatížení ($\bar{\sigma}_m = 0$); tento případ je podobný únavovému namáhání při normální teplotě.
2. Zvýšená a rovnoměrně rozdělená teplota v tělese, pulsující namáhání od vnějšího zatížení ($\bar{\sigma}_m > \bar{\sigma}_a$).
3. Zvýšená a měnící se rovnoměrně rozdělená teplota v tělese, pulsující namáhání od vnějšího zatížení.
4. Zvýšená a měnící se nerovnoměrně rozdělená teplota v tělese, teplotní napětí.

5. Zvýšená a měnící se nerovnoměrně rozdělená teplota v tělese, teplotní napětí, stálé nebo měnící se napětí od vnějšího zatížení.

Podmínky tepelného namáhání kovových slévárenských forem, tak jak byly popsány, je možné porovnat s posledními dvěma případy, přičemž podmínky případu 4. platí pro gravitační lití, podmínky případu 5. pro tlakové a odstředivé lití.

Účinek tepelné únavy u kovových forem dále zesiluje tepelný ráz, k němuž v každém cyklu dochází. Naměřené i vypočtené průběhy teplot v jednotlivých místech formy při ochlazování odlitku ukazují, že ohřev formy, zejména na lici, se uskutečňuje poměrně velkou rychlostí. Tomu odpovídá i velká rychlost nárůstu teplotních napětí. V takových podmínkách se pak některé materiály chovají jinak, než při pomalu se zvyšujících teplotních napětích nebo napětích vyvolaných vnějším statickým zatížením. I s tímto jevem je proto třeba počítat při rozboru příčin opotřebení kovových forem.

S ohledem na důsledky tepelného namáhání a mechanismus opotřebení si můžeme každý pracovní cyklus kovové slévárenské formy rozdělit na tři stadia:

1. stadium - od okamžiku styku taveniny s lícem formy až do okamžiku poklesu teploty na lici formy. Během této doby (řádově sekundy) se líc formy ohřeje až na teplotu (0,6 - 0,7) teploty lici. Teplota formy na vnějším povrchu se zvýší jen velmi málo oproti teplotě počáteční. Ohřátá vrstva na lici formy však nemůže volně dilatovat, neboť jí v tom brání zbývající tlustší vrstva stěny formy s nižší teplotou. Proto vzniká

na lici formy maximální tlakové napětí (řádově stovky MPa), jenž může překročit mez pružnosti, mez kluzu či dokonce mez pevnosti a to při teplotách mnohem vyšších než jsou teploty normální. Ve středních partiích formy (a za určitých podmínek i na vnějším povrchu) vzniká také poměrně vysoké napětí tahové.

Důsledky takovýchto napěťových poměrů se projeví plastickou deformací (stlačením) materiálu formy v tenké vrstvě na lici formy.

2. stadium - od okamžiku poklesu teploty na lici formy až do okamžiku vyhození odlitku z formy.

Teplota na lici a v jeho blízkosti se snižuje jednak v důsledku vzniku mezery mezi odlitkem a formou a také díky vysoké tepelné vodivosti materiálu formy. Teplota vnějšího povrchu se naproti tomu stále zvyšuje a tím se snižuje teplotní spád ve formě. Velikosti tlakových i tahových napětí ve stěně formy se snižují, forma se blíží stavu bez tepelné napjatosti, ovšem při podstatně vyšší teplotě než byla před odléváním.

3. stadium - od okamžiku vyhození odlitku až do nového odlití.

Líc formy i vnější povrch se ochlazuje, ochlazování líce formy je navíc zesilováno ofukováním, ev. nástřikem isolačního nebo mazacího prostředku. Teplota ve stěně formy je vyšší než na lici a na vnějším povrchu. Tato teplejší střední vrstva brání volnému smršťování obou povrchových vrstev a proto v nich vznikají napětí tahová. Tato tahová napětí na lici

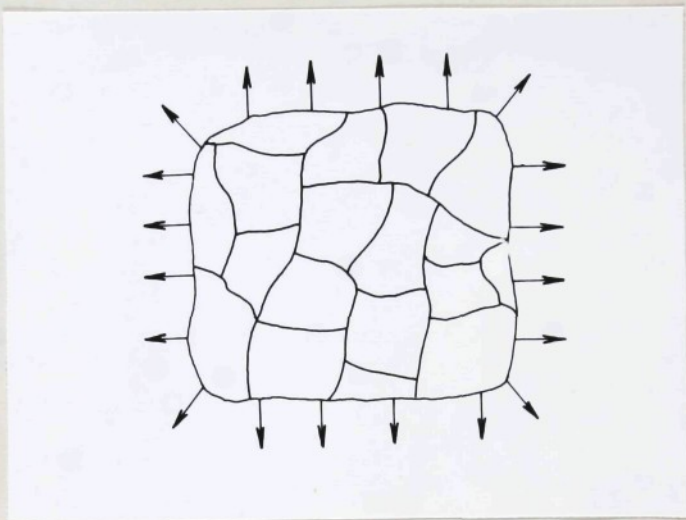
formy jsou tím větší, čím větší byla plastická deformace této vrstvy v 1. stadiu pracovního cyklu. Převýší-li okamžitá hodnota tahového napětí okamžitou pevnost materiálu v pracovní (lícení) vrstvě, vznikají drobné praskliny. Tyto praskliny se vytvářejí současně ve větším počtu ve zcela nahodilém směru, který vyplývá ze všesměrného tahového namáhání této vrstvy /60/.

Tyto praskliny se v dalších tepelných cyklech postupně rozšiřují a nové se zpravidla již netvoří. Povrch kokily v čelním pohledu je rozpraskaný (připomíná popraskané suché bláto). Je to t. zv. mapování (obr. 3.1 a, b).

K porušení líce formy může dojít až po několika tepelných cyklech (tj. po několika odlití). Jakost líce formy se od tohoto okamžiku velmi rychle zhoršuje, k čemuž napomáhá i vytrhávání částeczek materiálu formy při vyhazování odlitků. Spolu s tím se zhoršuje i kvalita povrchu odlitků. Dosáhne-li nepřípustné hodnoty, je nutno formu z provozu vyřadit, čímž končí její životnost.

Vedle těchto popsaných jevů se můžeme při provozu kovových forem setkat i s dalším nepříznivým problémem. V důsledku teplotních deformací (průhybu) vzniká v dělicí rovině formy mezera, jež může způsobit vytékání taveniny z formy, změnu rozměrů odlitku i zhoršení podmínek provozu a obsluhy kokily. Schematické znázornění vzniku mezery o celkové šířce $2\bar{w}$ je patrné z obr. 3.2. Její velikost je ovlivněna především celkovou teplotní deformací formy, jež závisí na tuhosti konstrukce a velikosti síly použité k sevření obou polovin formy.

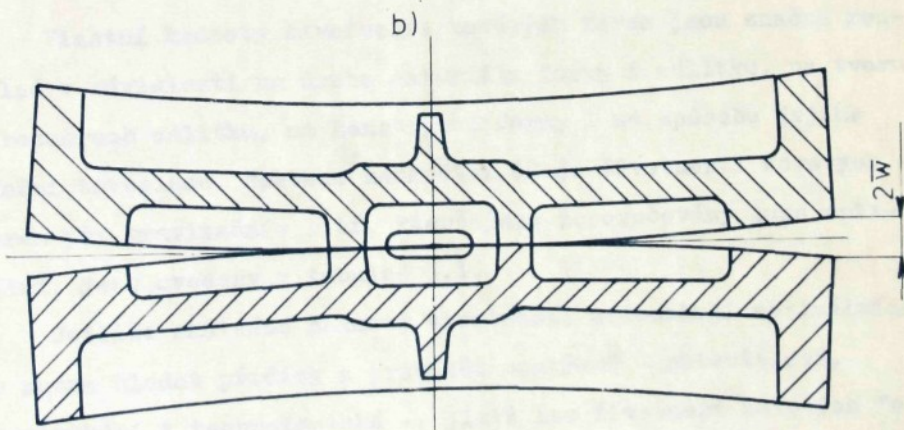
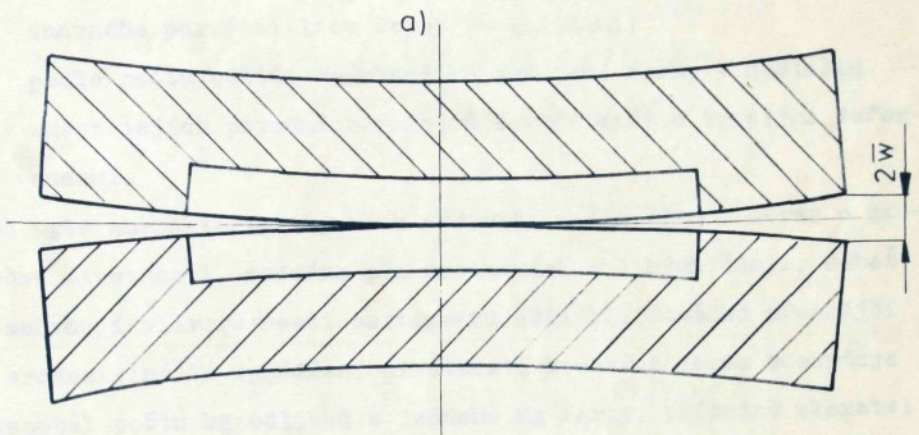
a)



b)



Obr. 3.1



Způsob vyjadřování životnosti kovových forem není dosud jednotný. Často se hodnotí podle dvou základních charakteristik:

- a) podle počtu odlití do okamžiku vyřazení formy v důsledku značného porušení líce formy prasklinami;
- b) podle počtu odlití do okamžiku vyřazení formy v důsledku změny jejích původních rozměrů opotřebením a trvalými deformacemi.

Obě tyto charakteristiky však nedávají zcela přesný obraz o skutečné životnosti, zejména při srovnávání s jinými údaji, neboť nezahrnují vliv různosti sortimentu odlitků. Poněkud přesnější a srovnatelnější vyjádření životnosti kovových forem poskytuje ukazatel počtu kg odlitků z jednoho kg formy, případně ukazatel spotřeby kovových forem na jednu tunu odlitků /13/. Tyto údaje se čerpají přímo z provozního sledování konkrétních forem při výrobě konkrétních odlitků.

Vlastní hodnoty životnosti kovových forem jsou značně rozdílné v závislosti na druhu materiálu formy i odlitku, na tvaru i rozměrech odlitku, na konstrukci formy i na způsobu jejího plnění taveninou. Některé konkrétní údaje životnosti kovových forem při gravitačním lití, které jsou doporučovány jako optimální, jsou uvedeny v tabulce 3.1.

Je-li skutečné hodnoty životnosti nedosahují optimálních, je nutno hledat příčiny a provádět opatření - materiállová, konstrukční i technologická -, jimiž lze životnost kovových forem při jejich provozu zvýšit.

3.2. Některé materiállové, konstrukční a technologické vlivy na životnost kovových forem

Obecně platný mechanismus opotřebením kovových forem vlivem tepelného namáhání, popsany v předcházející kapitole, se

Tab. 3.1 Životnost kovových forem při gravitačním lití /7/

materiál odlité	Materiál formy	Druh odlité	Životnost formy - počet odlití
šedá litina	Šedá litina	malé střední velké zvlášť velké (5-6t)	1000 - 8000 1000 - 3000 200 - 1000 100 - 500
	Ocel	velké zvlášť velké	400 - 1000 100 - 400
	Slitiny hliníku	malé střední	500 - 3000 400 - 2000
	Slitiny mědi	malé střední	3000 - 10000 3000 - 8000
	Tvárná litina	malé střední velké	1500 - 10000 1500 - 5000 500 - 1500
Tvárná litina	Ocel (vodní chlazení)	malé střední	5000 - 15000 5000 - 10000
Ocel	Šedá litina	malé střední velké zvlášť velké	400 - 600 100 - 300 50 - 100 10 - 50
Slitiny hliníku hořčíku zinku	Šedá litina nebo legovaná ocel	malé střední velké	statisíce desetitisíce několik tisíc
Slitiny mědi	Šedá litina	malé střední	1000 - 10000 1000 - 8000
	Ocel	malé střední	500 - 3000 500 - 15000

v konkrétních případech uplatňuje s rozdílnými účinky podle druhu materiálu forem, jejich konstrukce a podmínek jejich provozu.

3.2.1. Vliv vlastností materiálu formy

Jak již bylo uvedeno při rozboru rovnice (2.17), jsou pro velikost teplotního napětí, vznikajícího v tělese, rozhodující tepelně fyzikální a mechanické vlastnosti materiálu a to

- součinitel teplotní roztažnosti α_t ,
- součinitel tepelné vodivosti λ ,
- součinitel teplotní vodivosti a ,
- modul pružnosti E .

Jejich vliv je možno obecně charakterizovat závislostí

$$\sigma_t = f\left(\alpha_t, \frac{1}{\lambda}, \frac{1}{a}, E\right) \quad (3.1)$$

Z ní vyplývá, že z hlediska snížení teplotních napětí v dané formě je třeba volit materiál s nízkými hodnotami α_t , E a s vysokými hodnotami λ , resp. a .

Na druhé straně jsou z hlediska odolnosti proti teplotnímu napětí důležité hodnoty pevnostních vlastností, především pevnosti v tahu a meze únavy, obojí za vyšších teplot. Pro volbu materiálu formy to znamená, aby tyto hodnoty byly co největší.

Snadno však zjistíme, že požadavek maximální pevnosti a minimálního modulu pružnosti E je protichůdný. Tuto skutečnost je možno dokumentovat na údajích některých vlastností u litiny, která je nejrozšířenějším materiálem na formy pro gravitační lití (kokily). V tabulce 3.2 jsou uvedeny vlastnosti tří druhů litin: šedé litiny s lupínkovým, zrnitým a červíkovitým (vermikulárním) grafitem podle /84/. Dominující vliv na pevnostní vlastnosti, modul pruž-

Tab. 3.2 Vlastnosti litin s různým tvarem vyloučeného grafitu /84/

Vlastnost	Litina s lupínkovým grafitem	Litina se zrnitým grafitem (tvárná litina)	Litina s červíkovitým (vermikulárním) grafitem
Pevnost v tahu /MPa/	100 - 400	400 - 800	300
$\sigma_{0,2}$ /MPa/	-	250 - 500	230
Pevnost v tlaku /MPa/	500 - 1400	600 - 1200	není určena
Tažnost %/	max 1,5	12 - 2	2,0
Tvrdost /HB/	140 - 300	120 - 360	max 160
Mez únavy v ohybu /MPa/	40 - 200	200 - 400	200
Modul pružnosti E /MPa/	$80 \cdot 10^3 - 155 \cdot 10^3$	$160 \cdot 10^3 - 185 \cdot 10^3$	$140 \cdot 10^3 - 160 \cdot 10^3$
Tepelná vodivost λ /W/m.K/ (20 - 100 °C)	50 - 67	25 - 42	42 - 50
Tepelná roztažnost α_t / 10^{-6} /K/	$9 \cdot 10^{-6} - 12 \cdot 10^{-6}$	$11 \cdot 10^{-6} - 13 \cdot 10^{-6}$	$12 \cdot 10^{-6} - 13 \cdot 10^{-6}$

nosti E a tepelnou vodivost má u šedé litiny množství a tvar vyloučeného grafitu.

U šedé litiny perlitické s lupínkovým grafitem je to obsah uhlíku, který určuje hodnoty pevnosti, modulu pružnosti a tepelné vodivosti. S rostoucím obsahem uhlíku pevnost i modul pružnosti klesá, tepelná vodivost stoupá, což se příznivě projevuje na snížení teplotních napětí, zejména při vyšších rychlostech ohřevu.

U tvárné litiny (se zrnitým grafitem) nemá obsah uhlíku takový vliv na pevnost a modul pružnosti jako u litiny s lupínkovým grafitem. Daleko více se zde uplatňuje vliv základní kovové hmoty. Vzhledem k vyšším hodnotám modulu pružnosti dosahuje za jinak stejných podmínek teplotní napětí u tohoto materiálu vyšších hodnot. Litinu s červíkovitým (vermikulárním) grafitem je možno zařadit mezi oba tyto případy.

Vedle hodnot teplotních napětí má na podmínky namáhání materiálu forem vliv i výše teploty, jež se v jednotlivých místech při každém cyklu ustaví. Podle nejvyšší dosažené teploty u litinových forem je možno rozlišit tři oblasti namáhání /84/:

- I. oblast - její horní hranice leží podle chemického složení litiny a doby setrvání na nejvyšší teplotě v rozmezí 450 - 500 °C; materiál je namáhán pouze teplotním napětím a to ještě v oblasti převážně pružných deformací.
- II. oblast - její horní hranicí je přeměna feritu v austenit, která je podle obsahu křemíku od 750 °C (při 1,5 % Si) do 900 °C (při 6 % Si); k namáhání materiálu teplotním napětím zde přistupuje vnější a zejména vnitřní oxidace ("růst" litiny) a rozpad perlitu.

III. oblast - nad teplotami přeměny; při překročení těchto teplot se část feritu ev. perlitu přemění na austenit, ze kterého se může zpětně podle rychlosti ochlazování tvořit ferit, perlit, bainit nebo dokonce martenzit; tyto přeměny jsou spojeny se silnými napětovými stavy, které urychlují zvláště průběh oxidačních pochodů a tím i porušení materiálu.

Také tyto skutečnosti je nutno brát v úvahu při posuzování vhodnosti materiálu pro použití na kovové slévárenské formy. Podobné rozbory, jako pro litinu, lze provést i pro jiné materiály. Potřebné podklady a výsledky se dají získat vhodnými laboratorními i provozními zkouškami, z nichž některé jsou popsány v /16/, /19/, /21/, /84/.

3.2.2. Vliv konstrukce formy

Všechny dosud provedené rozbory a také uvedené výsledky byly získány pro nejjednodušší případ kovové formy deskového tvaru za podmínek blízkých se podmínkám volné desky. Skutečná konstrukce forem je však složitější a pro případ deskové formy se více uplatňují podmínky upnuté desky. Upnutí desky je možno rozdělit na tři případy:

1. upnutí desky vylučující ohyb;
2. upnutí desky vylučující roztahování;
3. upnutí desky vylučující ohyb i roztahování.

Zamezení ohybu (průhybu) desky se docílí vyztužením žebry, která navíc mohou zlepšovat i podmínky sdílení tepla z vnějšího povrchu, dále pak i zvětšením tloušťky formy.

Zamezení roztahování desky se docílí zesílením okrajů, tzv. "orámováním" /25/. Ve většině případů plní tuto funkci chladněj-

ší části na obvodu formy (při větším poměru celkové plochy dělicí roviny formy ku ploše průmětu odlitku do ní).

Uvedenými opatřeními se zvyšuje tuhost kovové formy a snižují velikosti teplotních deformací. Naproti tomu hodnoty teplotních napětí se zvyšují. K jejich výpočtu lze v zásadě použít vzorce (2.20) s tím, že podle podmínek upnutí se sníží nebo zcela vyloučí vliv druhého, resp. třetího, resp. obou těchto členů ve vzorci. Spolu se zvýšením hodnot teplotních napětí se změní i jejich časový průběh a rozdělení ve stěně deskové formy. Pro případ upnutí desky, vylučující ohyb i roztahování, budou teplotní napětí největší a v celé stěně formy tlaková, jak je patrné ze vzorce (2.20) a z obrázků č. 2.6 a 2.7. Některé z těchto případů jsme prověřovali v pracích /109/, /110/.

Podobně bude třeba rozpracovat řešení pro případ forem válcového tvaru a forem složených tvarů; toto bude úkolem dalších prací.

3.2.3. Vliv technologických podmínek

Technologické podmínky odlévání do kovových forem mají značný vliv na průběh tepelných dějů v těchto formách a tím i na velikost jejich tepelného namáhání. K těmto podmínkám patří zejména: lící teplota taveniny, teplota předeřtátí formy (pracovní teplota), teplota vyhození odlitku z formy, tepelně izolační vrstva na lící formy, intenzita chlazení kovové formy. K nim se mohou přiřadit podmínky určující velikost vnějšího namáhání formy: plnicí tlak taveniny, uzavírací síla formy, síla potřebná k vyhození odlitku.

V našich pracích jsme sledovali zatím vliv tepelně izolační

vrstvy na lici formy a vliv teploty předeřtátí formy na teplotní pole, napětí a deformace formy. Jednoznačně lze na výsledcích pokusů i výpočtů ukázat příznivý vliv obou těchto podmínek na snížení intenzity tepelného namáhání forem.

Vyšší teplota předeřtátí formy vede ke snížení teplotních rozdílů na lici a na vnějším povrchu formy (což je příznivé), na druhé straně však při tom dochází ke zvýšení maximální teploty formy, což zvyšuje nebezpečí vzniku již popsaných pochodů oxidace, změn struktury a pod. Z toho vyplývá důležitost volby optimální teploty formy a její udržování během provozu.

Tepelně izolační vrstva na lici formy (nástřik, nátěr, vložka a pod.) významně snižuje maximální teploty na lici formy a též teplotní rozdíly ve stěně formy. Možnost změny tloušťky této vrstvy i výběru materiálu s různým součinitelem tepelné vodivosti umožňuje najít pro daný konkrétní případ odlitku a kovové formy optimální podmínky. Z našich výpočtů vyplývá, že např. při použití tepelně izolační vložky tloušťky 6 mm z pryskyřičné směsi při odlévání litinového odlitku v litinové formě se sníží maximální hodnota tlakového teplotního napětí na lici formy oproti hodnotám pro formu bez vložky až 50 krát.

Uvedené i další vlivy na velikost a průběh tepelného namáhání, na opotřebení a tím i na životnost kovových slévarenských forem nejsou zdaleka ještě úplně prozkoumány. Bude předmětem dalších prací postupně tyto poznatky rozšiřovat a upřesňovat. Celá řada z nich je již v praxi odlévání do kovových forem využívána.

4. DÍLČÍ ZÁVĚRY A DOPORUČENÍ KE SNÍŽENÍ TEPELNÉHO NAMÁHÁNÍ KOVOVÝCH FOREM

V předcházejících kapitolách bylo uvedeno, v jakém rozsahu se tepelné namáhání u kovových slévárenských forem uplatňuje i v čem spočívají jeho nepříznivé důsledky pro životnost kovových forem. Jednoznačně je možno konstatovat, že tento druh namáhání nelze při provozu kovových forem zcela vyloučit. Existují však možnosti a konkrétní způsoby vedoucí ke snížení tepelného namáhání, zvýšení životnosti forem a tím i ekonomických ukazatelů jejich použití při výrobě tvarových odlitků.

Některé dílčí závěry a doporučení v tomto směru, jež byly získány jednak na základě vyhodnocení našich měření a výpočtů, jednak na základě rozboru v praxi používaných postupů i poznatků získaných z příslušné literatury (např. /6 - 13/, /17/, /72/, /81/, /82/ atd.), lze shrnout do těchto bodů:

1. Na kovové formy se doporučuje použít materiál s vyšší tepelnou vodivostí a nižší tepelnou roztažností (λ větší, α_t menší). V takových formách dochází k rychlejšímu vyrovnání teplot ve stěně a k menším rozdílům v dilatacích jednotlivých vrstev. Prakticky to znamená např. použití šedé litiny s vyšším obsahem uhlíku, použití hliníku a jeho slitin a pod.
2. Snížení tloušťky stěny formy napomáhá rychlejšímu vyrovnání teplot ve stěně; toto opatření se však může projevit ve zvýšení deformace formy.
3. Nejmenší tepelné namáhání vzniká u takových konstrukcí forem, které se blíží volné deskové formě. Tyto formy však vykazují největší deformace. Jakékoliv konstrukční úpravy sloužící

k vystužení forem, např. zesílené okraje, výztužná žebra, ale i nadměrná tloušťka stěny, vedou ke zvýšení tepelného namáhání.

4. Odolnost proti důsledkům tepelného namáhání je možno také zvýšit zajištěním vyšší kvality povrchu líce formy při zhotovení dutiny obráběním, ev. zpevněním nebo tepelným či chemicko tepelným zpracováním. Velmi příznivé vlastnosti má lící kůra na lici formy při zhotovení dutiny předléváním.
5. Použití tepelně izolačních nástřiků, nátěrů ev. vložek na lici formy se projeví ve snížení maximální teploty povrchové vrstvy na lici formy a to tím více, čím je hodnota tepelné vodivosti vrstvy menší a tloušťka vrstvy větší. V této souvislosti je třeba upozornit na možnosti zvýšení účinnosti tohoto opatření např. profukováním vložky vzduchem /78/ nebo umělým vytvořením vzduchové mezery mezi odlitkem a formou /79/.
6. Předehřátí formy na tzv. pracovní teplotu způsobuje sice určité zvýšení maximální teploty v povrchových vrstvách na lici formy, avšak rozdíl těchto teplot a teplot na vnějším povrchu se podstatně snižuje. Teoretické rozborů i praktické zkušenosti ukazují na škodlivost ohřevu kovové formy opakovaným odléváním při neustáleném provozu formy, neboť v těchto podmínkách je tepelné namáhání značně vysoké. Na druhé straně předehřev na příliš vysokou teplotu má za následek snížení hodnot mechanických vlastností materiálu formy a rychlejší jeho oxidaci. Udržení optimální pracovní teploty a tím i optimálního podílu tepelného namáhání je podmíněno dodržením stanoveného liciho cyklu.

7. Snížení lící teploty taveniny vede ke snížení teplot povrchové vrstvy na lici formy i rychlosti jejich zvyšování. Pro daný materiál to znamená volit takovou lící teplotu, která ještě zabezpečí dokonalé vyplnění dutiny formy.
8. Dřívější vyhození odlitku z formy (tj. při vyšší teplotě odlitku) znamená snížení množství sdíleného tepla a tím i snížení teplot ve formě. Toto opatření však není příliš účinné, neboť teplota při níž je odlitek z formy vyhazován, nemůže být s ohledem na mechanické vlastnosti odlitku libovolně vysoká.

Uvedená doporučení nelze samozřejmě považovat za zcela vyčerpávající. Výzkum i praxe hledají stále nové možnosti jak ve směru získávání dalších poznatků o chování kovových forem při jejich provozu, tak při rozšiřování oblasti použití technologie odlévání do kovových forem.

5. ZÁVĚR

Předložená práce je dalším z dílčích příspěvků našeho pracoviště k řešení velmi složité a rozsáhlé problematiky týkající se výroby odlitků v kovových slévárenských formách. Při jejím zpracování jsem se snažil naplnit vytyčené cíle a její přínos pro rozšíření poznatků o kovových formách lze spatřovat v tom, že

1. byl zpracován teoretický rozbor podmínek vzniku tepelného namáhání kovových slévárenských forem při tuhnutí a chladnutí odlitků;
2. byly shrnuty možnosti posuzování intenzity tepelného namáhání kovových forem při jejich provozu a ověřeny některé konkrétní postupy pro stanovení teplotního pole kovové formy, rozměrových a tvarových změn forem a teplotních napětí pro některé materiálové, konstrukční a technologické podmínky;
3. byl zpracován určitý přehled o důsledcích tepelného namáhání na opotřebení a poškození kovových slévárenských forem a tím i na jejich životnost včetně některých dílčích závěrů a doporučení materiálového, konstrukčního a technologického charakteru pro zvýšení životnosti forem.

Při třídění a zpracování podkladů, výsledků měření a výpočtů i sestavování vlastní práce jsem měl možnost kriticky zhodnotit náš dosavadní postup řešení, nedostatky a nepřesnosti, jichž jsme se v našich pracích dopustili a stanovit si směry, ve kterých by měly být zaměřeny naše další práce.

Při řešení uvedené problematiky v příštím období bychom se chtěli věnovat

1. dalšímu zpracování početního řešení tepelných dějů a tepelné napjatosti v kovových formách, rozšíření a zpřesnění matematic-

- kého modelu a provedení výpočtů pro další konkrétní případy;
2. provedení pokusných měření pro možnost získání přímých hodnot teplot a deformací forem a porovnání výpočtových hodnot s těmito údaji;
 3. provedení některých zkoušek k ověření vlastností studovaných materiálů, zejména jejich chování v podmínkách tepelné únavy a dále k upřesnění vstupních podkladů pro prováděné výpočty.

Předpokládáme, že stejně jako v minulých letech, bude možno některé dílčí úkoly rozpracovat jako témata diplomových prací a využít je i v pedagogickém a politickovýchovném procesu na naší vysoké škole.

Jsem si plně vědom, že nemenší úsilí, které je třeba vynaložit k získání nových poznatků, musíme věnovat i jejich postupnému rozšíření a ověření v praxi. Některé možnosti v tomto směru nám poskytuje spolupráce katedry technologie a nauky o materiálu se slévárnami kokilového lití K.p. Elitex Jablonec nad Nisou, n.p. Metaz Trmice n/L, n.p. MEZ Mohelnice, se slévárnou tlakového lití AZNP Mladá Boleslav i slévárnou odstředivého lití n.p. Agrostroj Jičín. Budeme dále usilovat i o výměnu poznatků v tomto směru i z jiných pracovišť, kde se zabývají problematikou kovových forem, např. pro výrobky z plastů, pro lisování skla a pod.

Poděkování

Považuji za svou povinnost poděkovat Komunistické straně Československa a celé naší socialistické společnosti za podmínky, které vytváří nám, vysokoškolským učitelům, pro práci při výchově nové socialistické inteligence i pro náš politický a odborný růst.

Děkuji touto cestou základní organizaci KSČ a vedení Vysoké školy strojní a textilní v Liberci, jmenovitě pak rektorovi školy s. akademiku Jovanu Čirličovi a děkanovi strojní fakulty s. Doc. RNDr Bohuslavu Střížovi, CSc, za všestrannou podporu a pomoc v mé pedagogické, politickovýchovné a vědeckovýzkumné práci.

Děkuji též vedoucímu katedry technologie a nauky o materiálu s. Doc. Ing. Václavu Chaloupeckému, CSc a celému kolektivu spolupracovníků na katedře za vytvoření podmínek a konkrétní všestrannou a účinnou pomoc při zpracování této habilitační práce.

V nemenší míře patří můj dík i manželce a dceři za trpělivost, pochopení a podporu v mé práci, manželce pak ještě za obětavou pomoc při psaní práce.

Holubec Jaroslav

V Liberci dne 18. června 1979

6. SEZNAM LITERATURY

- / 1/ VETIŠKA, A. a kol. : Teoretické základy slévárenské technologie.
SNTL, Praha 1972.
- / 2/ PÍŠEK, F., JENÍČEK, L., RYŠ, P. : Nauka o materiálu.
ČSAV, Praha 1966.
- / 3/ MYSLIVEC, T. : Fyzikálně chemické základy ocelářství.
SNTL, Praha 1971.
- / 4/ CHVORINOV, N. : Krystalizace a nestejnorodost oceli.
NČSAV, Praha 1954.
- / 5/ PŘIBYL, J. : Tuhnutí a nálitkování odlitků.
SNTL, Praha 1954.
- / 6/ VESELÝ, F. : Kokilové lití.
SNTL, Praha 1961.
- / 7/ DUBININ, N. P. : Kokilnoje lití.
Mašinostrojenije, Moskva 1967.
- / 8/ PETRIČENKO, A. M. : Teorie i tehnologija kokilnovo lití.
Těchnika, Kijev 1967.
- / 9/ BRUNHUBER, E. : Leichtmetall- und Schwemetall-Kokillenguss.
Berlin 1966.
- /10/ Kolektiv : Výroba odlitků ze slitin železa a barevných kovů do kovových forem.
Sborník DNT, Ústí n/Orlicí 1971.
- /11/ ŠUSTEK, A. : Stav a výhled odlévání slitin železa do kovových forem v ČSSR.
Sborník DNT, Ústí n/Orlicí, 1971.
- /12/ ČALKOVSKÝ, M. : Materiál kovových forem.
Sborník DNT, Ústí n/Orlicí 1971.
- /13/ ŘEZNÍČEK, M. : Vliv materiálu na životnost kovových forem.
Sborník DNT, Ústí n/Orlicí 1971.
- /14/ SMOLENSKIJ, S. I. a druzí : Stalnyje metalličeskije formy dlja krupnych stalnych otlivok.
Litějnoje proizvodstvo 1959, č. 3, str. 23 - 26.
- /15/ GUSEV, V. V. : Sravnitel'naja charakteristika materialov dlja kokilej.
Litějnoje proizvodstvo 1959, č. 3, str. 26 - 29.
- /16/ GORBULSKIJ, G. F. a druzí : Metod ispitaniij termičeskoj stojkosti materialov dlja metalličeskich form.
Litějnoje proizvodstvo 1964, č. 4, str. 27 - 28.

- /17/ BOGDANOV, G. N. a druží : Povyšeniye stojkosti čugunnych kokilej.
Litějnoje proizvodstvo 1964,
č. 12, str. 24 - 26.
- /18/ NEUMARK, B. E. a druží : Teplofizičeskiye svojstva čugunov.
Litějnoje proizvodstvo 1967, č. 9,
str. 33 - 35.
- /19/ ŠUSTEK, A. : Untersuchungen an Werkstoffen für metallische Dauerformen.
Sb. : "Kokillenguss für Eisenmetalle"
Leipzig 1961.
- /20/ KOCJUBINSKIJ, O. J. : Plastičnost čuguna pri povyšennych tēperaturach.
Litějnoje proizvodstvo 1958, č. 8,
str. 15 - 16.
- /21/ GORJUNOV, I. I. : Press-formy dlja litja pod dovlenijem spravočnoje posobiye.
Mašinostrojenije, Leningrad 1973.
- /22/ VEJNIK, A. I. : Těplovyye osnovy tēorii litja.
Mašgiz, Moskva 1953.
- /23/ VEJNIK, A. I. : Tēoriya zatvėrděvaniya otlivki.
Mašinostrojenije, Moskva 1960.
- /24/ VEJNIK, A. I. : Rasčot otlivki.
Mašinostrojenije, Moskva 1964.
- /25/ VEJNIK, A. I. : Těrmodinamika litějnoj formy.
Mašinostrojenije, Moskva 1968.
- /26/ VEJNIK, A. I. : Kokil.
Nauka i tēchnika, Minsk 1972.
- /27/ VEJNIK, A. I. : Tēchničeskaja tērmodinamika i osnovy tēlopěredači.
Metalurgizdat, Moskva 1956.
- /28/ VEJNIK, A. I. : Približennyy rasčot processov tēloprovodnosti.
Gosenergoizdat, Moskva 1959.
- /29/ VEJNIK, A. I. : Tēoriya osobnykh vidov litja.
Mašgiz, Moskva 1958.
- /30/ Kolektiv : Problemy tēploobmēna pri litje.
Sbornik pod red. A. I. Vejnika.
Redakčnī rada BPI, Minsk 1960.
- /31/ Kolektiv : Těplofizika v litějnom proizvodstva.
Sbornik pod red. A. I. Vejnika.
Nauka i tēchnika, Minsk 1967.
- /32/ Kolektiv : Ochlažděniye otlivki.
Sbornik pod red. A. I. Vejnika.
Nauka i tēchnika, Minsk 1969.
- /33/ MICHEJEV, A. M. : Základy sdilenī tepla.
SNTL, Praha 1953.

- /34/ ŠORIN, S. N. : Sdílení tepla.
SNTL, Praha 1968.
- /35/ LYKOV, A.V. : Těplomassoobměn.
Spravočnik. Energija, Moskva 1972.
- /36/ BÍLEK, J. : Teplotní pole a jejich řešení.
Tepelná napjatost - učební texty,
ČSAV, Praha 1966.
- /37/ PĚCHOVIČ, A. I., ŽIDKUN, V. M. : Rasčoty teplových
režimov tvjordych těl.
Energija, Leningrad 1968.
- /38/ KAVIČKA, F., ŠIMONÍK, S. : Shrnutí pramenů pro řešení
teplotního pole odlitku a formy při
tuhnutí.
Slévárenství 1970, č. 3 - 4,
str. 157 - 160.
- /39/ BONDAREV, V. A. : Těploobměn v processach zatvėrděvani-
ja metallov.
Zpráva BPT, Minsk 1971.
- /40/ GIRŠOVIČ, N. G., NECHENDZI, J. A. : Analitičeskoje re-
šenje prostějšich zadač o zatvėrdě-
vaniji otlivok raznoj konfiguraciji.
Litějnoje proizvodstvo, 1956, č. 3,
4, 6 a 12.
- /41/ KOCJUBINSKIJ, O. J. : Itogi i zadači rozvitija teorii
teplových processov litja.
Litějnoje proizvodstvo, 1967, č. 10,
str. 3 - 6.
- /42/ KUDRIN, N. A., Bidulja, P. N. : Těplovoje vzaimoděj-
stviye otlivki i metalličeskoj formy.
Litějnoje proizvodstvo, 1965, č. 12,
str. 25 - 29.
- /43/ BABUŠKA, I. a druží : Numerické řešení diferenciálních
rovníc.
SNTL Praha 1964.
- /44/ ŽMAKIN, N. P. : Temperaturnoje pole stěnki kokilja
pri zatvėrděvaniji otlivki.
Sb. Ochlažděniye otlivky, Nauka i
těchnika, Minsk 1969.
- /45/ VETIŠKA, A. a druží : Stanovení teplotního pole odlitku
litého do kokily analogovou metodou.
Slévárenství 1972, č. 12, str. 518 -
522.
- /46/ KAVIČKA, F., ŠIMONÍK, S. : Analogový počítač pro řešení
dvourozměrných teplotních polí ve slé-
várenství a jeho použití.
Slévárenství 1971, č. 3 - 4, str. 108 -
112.
- /47/ SMOLJAKOV, A. N. : Izmereniye tēperatur litějnoj formy.
Litějnoje proizvodstvo 1971, č. 2,
str. 17.

- /48/ GORBULSKIJ, G. F. : O tēperature pověrchnostnych slojev metalličeskoj formy.
Litěžnoje proizvodstvo 1964, č. 9,
- /49/ VLASEVNINA, L. K., GINI, E. Č. : Izmerenije tēperatury pověrchnosti metalličeskoj formy.
Litěžnoje proizvodstvo 1967, č. 8, str. 19 - 20.
- /50/ MIKYŠKA, L. : Termoelektrické články.
SNTL, Praha 1964.
- /51/ PARISIEN, J. : Temperaturgleichgewicht der metallischen Dauerformen in der Giesserei.
Giessereitechnik, XXI/1970, č. 4, str. 129 - 134.
- /52/ ULMER, G. : Einstellung der thermischen Gleichgewichte und Regelung der Kühlkreisläufe.
Giesserei, 1970, č. 20, str. 643 - 646.
- /53/ GATEWOOD, B. E. : Thermal Stresses. - 1957.
Ruský překlad: Temperaturnyje naprjaženija.
Moskva 1959.
- /54/ BOLEY, B. A., WEINER, J. H. : Theory of Thermal Stresses. 1960.
Ruský překlad : Těorija tēperaturnych naprjaženij. Moskva 1964.
- /55/ TYLKIN, M. A., JALVOJ, N. I., POLUCHIN, P. I. : Tēperatury i naprjaženija v dětaljach metallurgičeskovo oborudovanija.
Vyššaja škola, Moskva 1970.
- /56/ TIMOSHENKO, S., WOINOWSKY, KRIEGER, S. : Theory of Plates and Shells - 1959.
Ruský překlad : Plastinki i oboločki.
Nauka, Moskva 1966.
- /57/ JANATKA, J. : Základy termoelasticity - Tepelná napjatost - učební texty
ČSAV Praha 1966.
- /58/ Kolektiv : Tepelná napjatost.
Učební texty pro postgraduální kurz,
ČSAV - Ústav termomechaniky, Praha 1966.
- /59/ PŘIBYL, J. : Vnitřní pnutí v odlitcích.
Učební text, VŠB Ostrava, 1970.
- /60/ PŘIBYL, J. : Pnutí v odlitcích.
SNTL, Praha 1973.
- /61/ ČECH, J., VETIŠKA, A. : Možnosti měření vnitřního pnutí na odlitcích ze šedé litiny.
Slévárenství 1973, č. 10, str. 411 až 414.
- /62/ KOCJUBINSKIJ, O. J. : Koroblenije čugunnych otlivok ot ostatočnyh naprjaženij.
Mašinostrojenije, Moskva 1965.

- /63/ KOCJUBINSKIJ , O. J. : Temperaturnyje naprjaženija v ploskich metalličeskich formach. Litějnoje proizvodstvo, 1959, č. 3, str. 30 - 34.
- /64/ BUTKEVIČJUS, N. A. : Zavisimost' temperaturnych naprjaženij ot uslovij teploobměna i zakreplenija kokilja. Sb. Priloženija teplofiziki v litějnom proizvodstve, Minsk 1966.
- /65/ KAROSAS, S. I. : Issledovanije temperaturnych naprjaženij i deformacij v ploskich kokiljach. Sb. Priloženija teplofiziki v litějnom proizvodstve, Minsk 1966.
- /66/ ROTENBERGR, V. E., CHRAMČENKOV, A. J. : Uprugoplastičeskije deformaciji ploskovo kokilja pri učotě izmėnėnij svojstv materiála s temperaturoj. Sb. Priloženija teplofiziki v litějnom proizvodstve, Minsk 1966.
- /67/ SOKOLOV, E. A., KREŠČENSKIJ, P. I. : Pričiny rozrušenija čugunnych kokilej. Sbornik : Těchnologija izgotovlenija zagotovok v mašinostrojeniji. Mašinostrojenje, Moskva 1971.
- /68/ BURAKOV, C. L., CHOMJAK, J. M. : Analitičeskij metod opredėlenija usilija sžetija kokilej v period zalivki. IVUZ - Mašinostrojenje 1969, č. 9, str. 169 - 173.
- /69/ KLABOCH, L. : Měření tepelných napětí odporovými tenzometry. Tepelná napjatost - učební texty - ČSAV, Praha 1966.
- /70/ KURANOV, V. N., GINI, E. Č. : K voprosu ob izměreniji tēperaturnych deformacij v litějnych metalličeskich formach s pomoščju vysokotēperaturnych tenzometrov soprotivlenija. IVUZ - Mašinostrojenje 1971 č. 4, str. 156 - 159.
- /71/ PŘIBYL, J., HAVLÍČEK, F. : Mass - und Formänderungen der Metallformen - 30. Internationaler Giessereikongress, Praha 1963.
- /72/ SEREBRO, V. S. : Issledovanije temperaturnych polej i stojkosti kokilej. Kandidátská disertační práce - BPI, Minsk 1965.
- /73/ SEREBRO, V. S. : Eksperimentalnoje issledovanije tēperaturnych polej i deformacij ploskich stalnych kokilej. Sb. Těploobměn mēždu otlivkoj i formoj, Minsk 1967.

- /74/ SEREBRO, V. S. : Ob obrazovaniji zazora mēždu otlivkoj i metalličeskoj formoj.
Litějnoje proizvodstvo 1965, č. 11,
str. 35 - 36.
- /75/ AJZENŠTEJN, J. B. a druží : Izměrenije deformacij kokilej.
Litějnoje proizvodstvo 1968, č. 4, str.
19 - 20.
- /76/ GOLOFAJEV, A. N., NEMIROVSKIJ, R. G. : Issledovanije de-
formacij ploskich kokilej.
Litějnoje proizvodstvo 1977, č. 10,
str. 22 - 23.
- /77/ SNĚZNOJ, P. L., SEREBRO, V. S. : Rozvitije litja v obli-
covannyje kokili.
Litějnoje proizvodstvo 1977, č. 11,
str. 28 - 30.
- /78/ MARJANSKIJ, A. V., SEREBRO, V. S. : Ochložděnije otlivki
v oblicovannom kokile pri vynužděnnoj
filtracii vozducha čerez oblicovku.
Litějnoje proizvodstvo 1978, č. 2,
str. 6 - 8.
- /79/ ANISOVIČ, G. A., ALEKSEJEV, V. S., KRUTOVA J. N. :
Zatvėrděvanije otlivki s iskustennym
vozdušnym zazorom.
Litějnoje proizvodstvo 1978, č. 5.
str. 27 - 28.
- /80/ KIRIJA, G. Š., COČENKO, A. V. : Issledovanije litějnych
deformacij v stěnkach izložnic dlja ko-
lesnych slitkov.
Litějnoje proizvodstvo 1978, č. 7. str.
32 - 33.
- /81/ ABRAMOV, V. V. a další : O povyšěnii stojkosti izložnic.
Litějnoje proizvodstvo 1978, č. 8,
str. 31 - 32.
- /82/ VELIČKA, B., KŘIBÍK, V. : Ověření účinnosti keramické
ochrany kokil v ocelárně NHKG.
Slévárenství 1978, č. 5, str. 180 - 182.
- /83/ ŠTĚPÁN, P. : Empirické vztahy pro stanovení velikosti
základních konstrukčních prvků ocelářských
kokil, ověřené v NHKG.
Slévárenství 1977, č. 2, str. 64 - 65.
- /84/ ROHRIG, K. : Temperaturwechselhalten von Gusseinwerk-
stoffen.
Giesserei - Praxis 1978, č. 23- 24, str.
375 - 392.
- /85/ Kolektiv : Studium charakteru a podmínek tuhnutí
a ochladnutí odlitků a typických keramických
skořepinových soustav.
Závěrečná zpráva dílcího státního úkolu
F-6-11-36/2, VŠST Liberec 1970.

- /86/ ODSTRČIL, B., HOLUBEC, Z. : Vývoj metodiky měření a zjištění deformací a teplotního pole vyhříváných kovových jaderníků.
Závěrečná zpráva úkolu č. 68085/519,
VŠST Liberec 1969.
- /87/ ODSTRČIL, B., HOLUBEC, Z. : Studium teplotního pole a vzniku deformací horkých kovových jaderníků.
Slévárenství, 1970, č. 6, str. 233 - 238.
- /88/ HOLUBEC, Z. : Cestovní zpráva ze studijního pobytu na BPI v Minsku v SSSR.
VŠST Liberec 1972.
- /89/ HOLUBEC, Z. : Studium tepelně-fyzikálních parametrů přenosu tepla a hmoty při tuhnutí a chladnutí odlitků ve slévárenské formě.
Písemný referát k asp. minimu.
VŠST Liberec, 1973.
- /90/ ODSTRČIL, B., HOLUBEC, Z. : Studium tepelně-fyzikálních parametrů přenosu tepla při tuhnutí a chladnutí odlitků v kovových formách.
Dílčí zpráva etapy B2 úkolu P15-124-008-21/2, VŠST Liberec, 1973.
- /91/ HOLUBEC, Z. : Měření teplotních deformací a napětí kovových slévárenských forem.
Kandidátská disertační práce, VŠST Liberec, 1975.
- /92/ CHALOUPECKÝ, V., HOLUBEC, Z. : Výzkum teplotních polí, deformací a napětí kovových slévárenských forem při gravitačním liti.
Dílčí závěrečná zpráva etapy B2 úkolu P 15-124-008-21/2, VŠST Liberec, 1975.
- /93/ HANOUSEK, M. : Studium a měření deformací horkých kovových jaderníků.
DP VŠST Liberec /ved. DP Prof. Odstrčil, konzultant Ing. Z. Holubec/, 1969.
- /94/ HOLATA, V. : Studium a měření deformací horkých kovových jaderníků.
DP VŠST /ved. DP Prof. Odstrčil, konzultant Ing. Holubec/ Liberec, 1969.
- /95/ PAVOVIČ, P. : Studium a měření deformací a teplotního pole horkých kovových jaderníků.
DP VŠST Liberec /ved. DP Prof. Odstrčil, konzultant Ing. Holubec/, 1970.
- /96/ VODIČKA, M. : Studium tepelných poměrů a deformací forem při tuhnutí a chladnutí odlitků při gravitačním liti do kovových forem.
DP VŠST Liberec /ved. DP Prof. Odstrčil, Konzultant Ing. Holubec/, 1971

- /97/ SCHUSTER, V. : Studium tepelných poměrů a deformací forem při tuhnutí a chladnutí odlitků v kovových formách při gravitačním liti. DP VŠST Liberec /ved. DP Prof. Odstrčil, konzultant Ing. Holubec/, 1972.
- /98/ CHOCHOLA, K. : Teplotní pole a deformace kovových forem při tuhnutí a chladnutí odlitků. DP VŠST Liberec /ved. DP Prof. Odstrčil, konzultant Ing. Holubec/, 1973.
- /99/ KŘIVANEC, J. : Teplotní pole a deformace kovových forem při tuhnutí a chladnutí odlitků. DP VŠST Liberec /ved. DP Doc. Chaloupecký, konzultant Ing. Holubec/, 1974.
- /100/ PODROUŽEK, A. : Výzkum teplotních polí a teplotních napětí a deformací kovových slévárenských forem. DP VŠST Liberec /ved. DP Doc. Chaloupecký, konzultant Ing. Holubec/, 1975.
- /101/ ŠOUN, J. : Teplotní pole a deformace kovových forem při tuhnutí a chladnutí odlitků. Referát pro fakultní kolo SVOC - VŠST Liberec, 1975.
- /102/ KULICH, J. : Řešení teplotního pole slévárenských kovových forem při ochlazování odlitků na samočinném počítači. Referát pro fakultní kolo SVOC - VŠST Liberec, 1975.
- /103/ ŠOUN, J. : Měření teplotního pole a deformací kovových slévárenských forem. DP VŠST Liberec /ved. DP Doc. Chaloupecký, konzultant Ing. Holubec/, 1975.
- /104/ KULICH, J. : Výzkum teplotních polí a teplotních napětí kovových slévárenských forem. DP VŠST Liberec /ved. DP Doc. Chaloupecký, konzultanti Ing. Holubec a Ing. Modrlák/, 1975.
- /105/ FIŠERA, B. : Měření teplotních deformací kovových slévárenských forem. DP VŠST Liberec /ved. DP Doc. Chaloupecký, Konzultant Ing. Holubec/, 1976.
- /106/ VARCL, J. : Měření teplotních deformací kovových slévárenských forem. DP VŠST Liberec /ved. DP Ing. Holubec, konzultant Ing. Simon/, 1977.
- /107/ ŘEHÁK, K. : Studium teplotních polí kovových slévárenských forem. DP VŠST Liberec /ved. DP Ing. Holubec, konzultant Ing. Kulich/, 1977.

- /108/ VAJCHA, V. : Studium teplotních a napěťových polí kovových forem při liti.
DP VŠST Liberec /ved. DP Ing. Holubec,
Konzultant Ing. Kulich/, 1978.
- /109/ SVAČINA, J. : Studium teplotních a napěťových polí kovových forem při odstředivém liti.
DP VŠST Liberec /ved. DP Ing. Holubec,
konzultant Ing. Simon/, 1978.
- /110/ ADÁMEK, J. : Studium teplotních a napěťových polí kovových slévárenských forem.
DP VŠST Liberec /ved. DP Ing. Holubec,
konzultant Ing. Kulich/, 1979.