



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TERMOFYZIKÁLNÍ PARAMETRY EXOTERMICKÝCH MATERIÁLŮ PRO OBKLADY NÁLITKŮ A JEJICH NÁVAZNOST NA SIMULAČNÍ PROGRAMY

THERMO-PHYSICAL PARAMETERS OF EXO-SLEEVES AND THEIR APPLICATION IN
SIMULATION PROGRAMMES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ROMAN ZAJÍČEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JAROMÍR ROUČKA, CSc.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2012/13

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Roman Zajíček

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Termofyzikální parametry exotermických materiálů pro obklady nálitků a jejich návaznost na simulační programy

v anglickém jazyce:

Thermo-physical parameters of exo-sleeves and their application in simulation programmes

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Charakteristika tepelně-fyzikálních parametrů exotermických směsí pro slévárenské účely, jejich vlivu na teplotní režim při tuhnutí odlitků. Aplikace těchto parametrů do výpočtu teplotních polí při numerické simulaci.

Cíle bakalářské práce:

Souhrn znalostí o termofyzikálních vlastnostech a chování exotermických hmot a ověření reálného vlivu těchto vlastností na tuhnutí kovu výpočty pomocí numerické simulace.

Seznam odborné literatury:

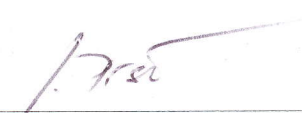
1. ROUČKA, J. Slévárenská technologie II. Skripta VUT. Brno: Ediční středisko VUT, 1990. ISBN 80-214-0156-7.
2. KRUTIŠ, V. Vliv tepelného ošetření nálitků na tuhnutí kovu. Disertační práce v oboru "Strojírenská technologie". Brno: VUT-FSI, Ústav materiálového inženýrství. 2003. 250 s
3. CAMPBELL, J. Castings. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006. 288 p. ISBN 0-7506-4790-6.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/13.

V Brně, dne 21.11.2012





prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

ABSTRAKT

Práce se zabývá použitím exotermických obkladů nálitků. V první kapitole je stručně popsáno jaké vady se mohou vyskytnout při tuhnutí. Dále jsou v práci uvedeny metody odstranění těchto vad, přičemž je podrobně popsána metoda použití nálitků s důrazem na exotermické obklady nálitků a termofyzikální parametry tyto obklady charakterizující. Dále práce popisuje vliv těchto parametrů na přesnost počítačových simulací. V závěrečné části práce je provedeno měření doby tuhnutí reálného odlitku, které je i odsimulováno v programu Quikcast.

Klíčová slova

nálitky, exotermické obklady, termofyzikální parametry, simulační programy, přenos tepla

ABSTRACT

Thesis discusses exothermic sleeves. The first chapter briefly described the defects can occur during solidification. Further, there are provided methods for removing these defects. The method is described in detail using risers with an emphasis on the exothermic sleeves and thermo-physical parameters characterizing these sleeves. It also describes the influence of these parameters on the accuracy of computer simulations. In the final part of the work is done measuring of the real casting, which is then simulated in the Quikcast.

Key words

risers, exothermic tiles, thermo-physical parameters, simulation software, heat transfer

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ZAJÍČEK, R. Termofyzikální parametry exotermických materiálů pro obklady nálitků a jejich návaznost na simulační programy. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 57 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Termofyzikální parametry exotermických materiálů pro obklady nálitků a jejich návaznost na simulační programy vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 23.5.2013

.....
Roman Zajíček

Poděkování

Děkuji tímto doc. Ing. Jaromíru Roučkovi, CSc za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Václavu Kaňovi, Ph.D. za pomoc při experimentálním měření V neposlední řadě chci poděkovat svojí rodině, která mě podporovala při studiu.

OBSAH

Abstrakt.....	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah.....	7
Úvod.....	9
1 Problémy při Tuhnutí kovu.....	10
1.1 Vznik vad způsobených smršťováním.....	10
1.2 Odstranění staženin.....	12
2 Nálitkování.....	13
2.1 Kritéria pro stanovení velikosti nálitků.....	13
2.2 Umístění nálitků.....	15
2.3 Využitelnost objemu nálitku[1].....	15
3 Přenos tepla v soustavě Kov-forma-okolí.....	17
3.1 Vedení tepla.....	17
3.2 Přestup tepla prouděním.....	19
3.3 Přenos tepla zářením.....	20
3.4 Parametry ovlivňující teplotní chování nálitků.....	21
3.4.1 Hustota (ρ).....	21
3.4.2 Tepelná vodivost (λ).....	22
3.4.3 Měrná tepelná kapacita (c).....	22
3.4.4 Teplotní vodivost (a).....	23
3.4.5 Součinitel přestupu tepla (α).....	23
3.5 Kombinovaný přenos tepla.....	24
4 Intenzifikace.....	26
4.1 Dolévání.....	26
4.2 Elektrický ohřev.....	26
4.3 Izolace hladiny.....	26
4.4 Izolační obklady.....	27
4.5 Exotermické obklady.....	28
4.5.1 Typy směsí.....	29
4.5.2 Složení exotermických směsí.....	30
4.5.3 Výhody při použití exotermických obkladů.....	31
5 Numerická simulace.....	34
5.1 Metody výpočtu.....	34
5.2 Termofyzikální data pro simulace.....	35
5.2.1 Citlivost doby tuhnutí na změnu termofyzikálních parametrů.....	36
6 Měření doby tuhnutí nálitků.....	40
6.1 Popis a cíle měření.....	40
6.2 Realizace.....	40
6.2.1 Parametry odlitku.....	40
6.2.2 Umístění teplotních čidel (termočlánků).....	41
6.2.3 Příprava formy.....	42
6.2.4 Odlítí forem.....	44
6.3 Vyhodnocení měření.....	46
6.3.1 Doba tuhnutí a faktor posunutí modulu.....	46
7 optimalizace simulace vzhledem k reálnému měření doby tuhnutí.....	48

7.1 Vstupní data simulace	48
7.2 Výsledky první simulace	50
7.2.1 Srovnání průběhů teplot simulace s měřením v daných bodech	50
7.3 Odladění křivky tuhnutí ve stěně exotermického obkladu.....	52
Závěr.....	55
Seznam použitých zdrojů	56
Seznam použitých zkratk a symbolů	57

ÚVOD

V současnosti je ve všech výrobních odvětvích kladen důraz na zvyšování kvality a snižování ceny výrobků. Slévárenství není výjimkou. Jedním ze způsobů jak toho docílit je použití exotermických nálitků na místo nálitků obyčejných. Ty při správném použití umožňují snížit náklady na výrobu a také zvýšit kvalitu výrobku. Při určení typu a velikosti exotermického obkladu nálitku jsou důležité zkušenosti technologa, kterému mohou být v dnešní době velmi nápomocny stále se zdokonalující simulační programy. Díky nim je s minimálními náklady a v krátkém časovém horizontu schopen předpovědět kritická místa odlitku, kde hrozí riziko vzniku vad.

Proto, aby simulace popisovala reálné chování kovu, je důležitá správná definice termofyzikálních vlastností materiálů v simulaci se vyskytujících. Zejména u exotermických směsí je často problém tyto vlastnosti, které jsou mimo jiné závislé na teplotě, definovat. Výrobci často shromažďují data o materiálech potřebná pro zajištění kvality výroby, avšak potřebná termofyzikální data pro simulaci nezjišťují. Dalším problémem je množství materiálů a jejich variabilita. To zvyšuje náklady slévárnám, které musí data pracně zjišťovat. Jedním z možných způsobů zjištění těchto dat je experimentálně simulační metoda, kdy se snažíme docílit shodných výsledků simulace s experimentem, a tak definovat termofyzikální data daných materiálů.

1 PROBLÉMY PŘI TUHNUTÍ KOVU

Při tuhnutí kovu dochází k přeměně tavení na tuhou fázi. Tato přeměna tedy probíhá mezi teplotou likvidu (T_L) a teplotou solidu (T_S). Podstatou tuhnutí je pokles teploty. U většiny kovů dochází při tuhnutí ke změně objemu jednotlivých komponent. Změna může být kladná (rozpínání) nebo záporná (smršťování). To znamená, že v případě záporné změny kov zmenšuje svůj objem oproti objemu taveniny. Při kladné změně je tomu naopak. Tabulka 1.1 ukazuje, jak se jednotlivé slévárenské slitiny liší. Je vidět, že u většiny kovů se projevuje záporná změna objemu. Toto lze vysvětlit pomocí různých teorií (teorie děrová, teorie rojů). Jde o to, že pokud kov ztuhne, uspořádá se do krystalické struktury a tím ubude volných prostor mezi krystalovými elementy. Takto se chovají čisté kovy. U technických slitin, jako je ocel a litiny, složených z několika komponent, které jsou častěji používané ve slévárenství, je proces dále ovlivněn vylučováním několik tuhých fází, avšak v drtivé většině se jedná o smršťování. Proto má význam zabývat se hlavně smršťováním.

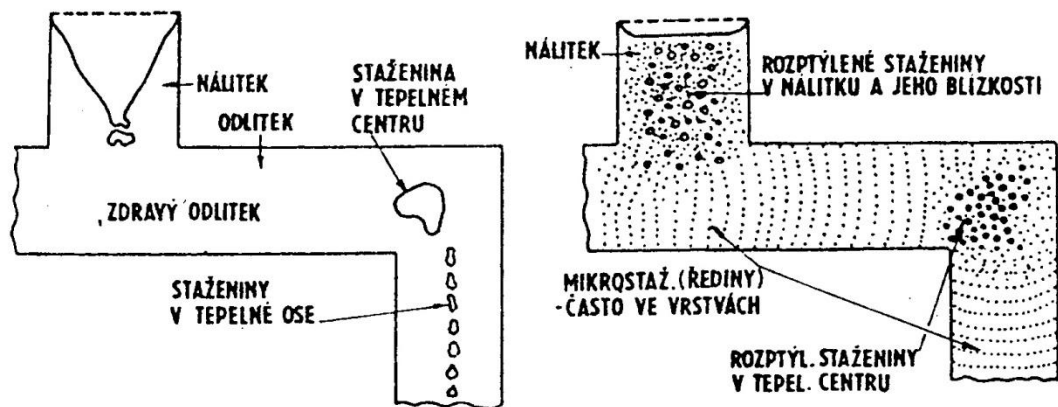
V důsledku smršťování dochází buď ke zmenšování celkových rozměrů odlitku anebo ke vzniku dutin a následnému rozvoji vnitřních pnutí. [1], [2]

<i>Metal</i>	<i>Crystal structure</i>	<i>Melting point C</i>	<i>Liquid density (kgm⁻³)</i>	<i>Solid density (kgm⁻³)</i>	<i>Volume change (%)</i>
Al	fcc	660	2368	2550	7.14
Au	fcc	1063	17 380	18 280	5.47
Co	fcc	1495	7750	8180	5.26
Cu	fcc	1083	7938	8382	5.30
Ni	fcc	1453	7790	8210	5.11
Pb	fcc	327	10 665	11 020	3.22
Fe	bcc	1536	7035	7265	3.16
Li	bcc	181	528	–	2.74
Na	bcc	97	927	–	2.6
K	bcc	64	827	–	2.54
Rb	bcc	303	11 200	–	2.2
Cd	bcp	321	7998	–	4.00
Mg	bcp	651	1590	1655	4.10
Zn	sep	420	6577	–	4.08
Ce	bcp	787	6668	6646	-0.33
In	tel	156	7017	–	1.98
Sn	tetrag	232	6986	7166	2.51
Bi	rbomb	271	10 034	9701	-3.32
Sb	rhomb	631	6493	6535	0.64
Si	diam	1410	2525	–	-2.9

Tab. 1.1 Doba tuhnutí různých kovů a jejich další vlastnosti [2]

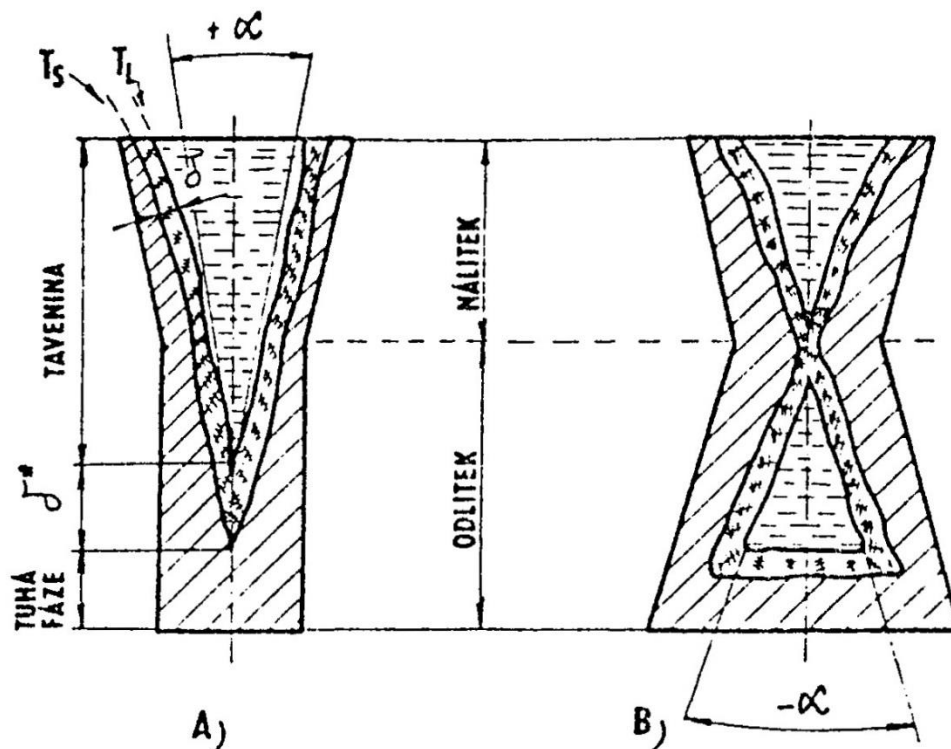
1.1 Vznik vad způsobených smršťováním

Příčinou vzniku některých vad v odlitku je u mnohých slévárenských slitin smršťování. Důsledkem tohoto procesu je vznik dutin v odlitku a to buďto vnějších nebo vnitřních. Tyto dutiny se nazývají staženiny. Dle způsobu jakým tuhnou, je můžeme rozdělit na soustředěné a rozptýlené (tzv. řediny nebo mikrostaženiny). Obrázek 1.1 ukazuje rozdíl mezi soustředěnou a rozptýlenou staženinou.



Obr. 1.1 Schématické zobrazení soustředěných a rozptýlených staženin [1]

Pro výskyt mikrostaženin jsou důležité dva faktory. Jsou to šířka dvoufázového pásma δ a stupeň usměrněnosti tuhnutí. Usměrněné tuhnutí znamená, že odlitek tuhne od nejvzdálenějších míst až do nálitku. Stupeň usměrnění se vyjadřuje pomocí úhlu α . Což je úhel který svírají postupující fronty krystalizace. Rozlišujeme kladně ($+\alpha$) a záporně ($-\alpha$) usměrněné tuhnutí. Přičemž u záporně usměrněného tuhnutí hrozí riziko vzniku staženin. Obrázek 1.2 schematicky ukazuje usměrněné tuhnutí a šířku mezifázového pásma δ . [1]



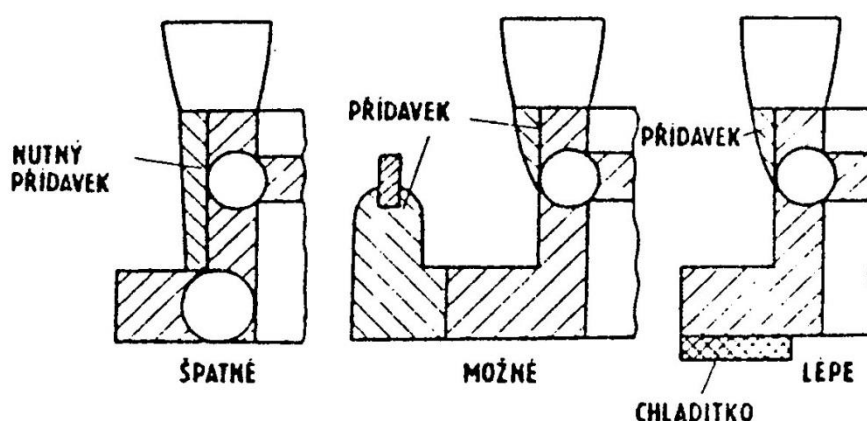
Obr. 1.2 Schématické zobrazení kladně a záporně usměrněného tuhnutí a šířky mezifázového rozhraní δ [1]

1.2 Odstranění staženin

„Odstranění nepříznivých důsledků výskytu tepelných uzlů v odlitku, tzn. Výskytu staženin, příp. ředin (mikrostaženin), které jsou samozřejmě slévárenskou vadou je jedním, z hlavních úkolů technologa v přípravě výroby.¹“ V podstatě se jedná to, jak docílit kladně usměrněného tuhnutí (+ α).

K odstranění vad je možno zvolit několik postupů:

- a) Změna konstrukce odlitku
 - b) Řízením rychlosti jakou se odlitek ochlazuje
 - c) Nálitkování
- a) Změnou konstrukce se rozumí zejména odstranění tepelných uzlů, ve kterých je riziko vzniku staženin zvýšené. Tepelným uzlem se označuje takové místo, kde je nahromaděno větší množství kovu oproti zbytku odlitku. Konkrétně se může jednat o místní zesílení stěn, spoje stěn nebo hrany odlitku. Změna konstrukce je nejlevnější způsob jakým je možno předejít vzniku staženin, avšak ne vždy je to možné. V tomto případě je nutná úzká spolupráce mezi konstruktérem a slévárenským technologem.
 - b) Kov můžeme ochlazovat buďto pomocí vnějších nebo vnitřních chladítek. Chladítkem se rozumí část ztuhlého kovu, který je v případě vnitřního chladítka vložen přímo do dutiny formy, kde je při lití tekutým kovem roztaven. Tímto se urychlí tuhnutí tepelného uzlu a dosílí se kladně usměrněného tuhnutí. Schéma na obrázku 1.3 ukazuje, kdy je výhodné užít chladítek.
 - c) Posledním a v praxi nejužívanějším způsobem je nálitkování. Tomuto způsobu odstranění staženin se obšírněji věnuje následující kapitola. [1]


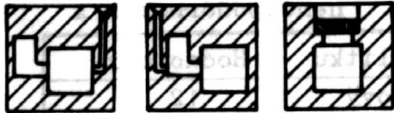

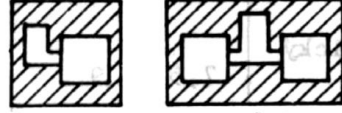



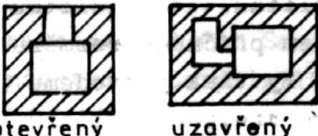


Obr. 1.3 Ukázka výhodného užití chladítek [1]

¹DVOŘÁČEK, Milan. Technologie II. 3. dopl. vyd. Brno :Akademické nakladatelství CERM,2004. s. 238. ISBN 80-214-2683-7

2 NÁLITKOVÁNÍ

Nálitky jsou v podstatě zásobník tekutého kovu, který doplňuje do odlitku. Umísťuje se nad tepelné uzly a tím zabraňuje tvorbě staženin. Existuje velké množství typů nálitků, které se mohou dělit podle mnoha znaků. Základní přehled je ukázán na Obrázku 2.1. [1]

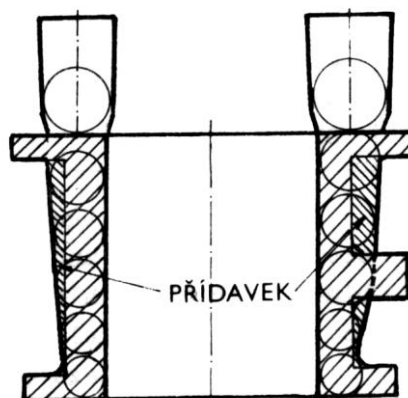
ZNAK	SCHEMATICKÝ OBRÁZEK	ZNAK	SCHEMATICKÝ OBRÁZEK
Tvar	 koule válec hranol ostatní	Poloha	 odlehlý přilehlý kombinace
Umístění	 čelní boční spodní	Uspořádání	 samostatný společný
Tepelný režim	 normální izolovaný exotermický	Způsob oddělení	 řezání urážení
Tlak	 podtlakový atmosferický přetlakový	Provedení	 otevřený uzavřený

Obr. 2.1 Schématický přehled typů nálitků [3]

2.1 Kritéria pro stanovení velikosti nálitků

Nálitky musí splňovat tři základní podmínky:

- Heuversova podmínka (metoda vepsaných koulí).** Princip říká, že každou kouli, kterou vepíšeme do tepelného uzlu odlitku musí být možno vytáhnout do nálitku viz Obrázek 2.2. [3]



Obr. 2.2 Schéma metody vepsaných koulí [3]

- b) **Podmínka objemové dostatečnosti (Metoda Ivanova a Příbyla).** Což znamená že, objem nálitku musí být dostatečně velký na to, aby dokázal do odlitku doplnit tekutý kov, který chybí v důsledku smršťování kovu při tuhnutí. Podmínka se dá také vyjádřit kvantitativně jako, objem nálitku musí být větší než objem staženiny vzniklé v odlitku:

$$V_{st} = \beta \cdot (V_o + V_n) \quad (2.1)$$

kde: β poměrné smrštění slitiny při tuhnutí [–]
 V_o objem odlitku nebo jeho nálitkové části [cm³]
 V_n objem nálitku [cm³]
 V_{st} objem staženiny vzniklé v odlitku [cm³]

$$x = \frac{V_n}{V_{st}} \quad (2.2)$$

kde: x koeficient nehospodárnosti nálitku

Na základě těchto vztahů byl pak odvozen výsledný vztah:

$$V_n = V_o \cdot \frac{\beta \cdot x}{1 - \beta \cdot x} \quad (2.3)$$

[3], [4]

- c) **Podmínka poměrů dob tuhnutí nálitku a odlitku (Metoda Chvorinova a Wlodawera).** Tato podmínka říká, že náletek musí tuhnout jako poslední:

$$\tau_n > \tau_o \quad (2.4)$$

kde: τ_n čas tuhnutí nálitku [s]
 τ_o čas tuhnutí odlitku [s]

Při užití Chvorinovova vztahu (2.1), který určuje dobu tuhnutí odlitku nebo nálitku:

$$\tau = \left(\frac{M}{k}\right)^2 [s] \quad (2.5)$$

$$M = \frac{V}{S} [cm] \quad (2.6)$$

kde: τ čas tuhnutí odlitku/nálitku [s]
 k materiálová konstanta tuhnutí [m · s⁻¹]
 M modul odlitku/nálitku [cm]
 V objem tělesa [cm³]
 S povrch ochlazovaného tělesa [cm²]

Ize podmínku přepsat do tvaru:

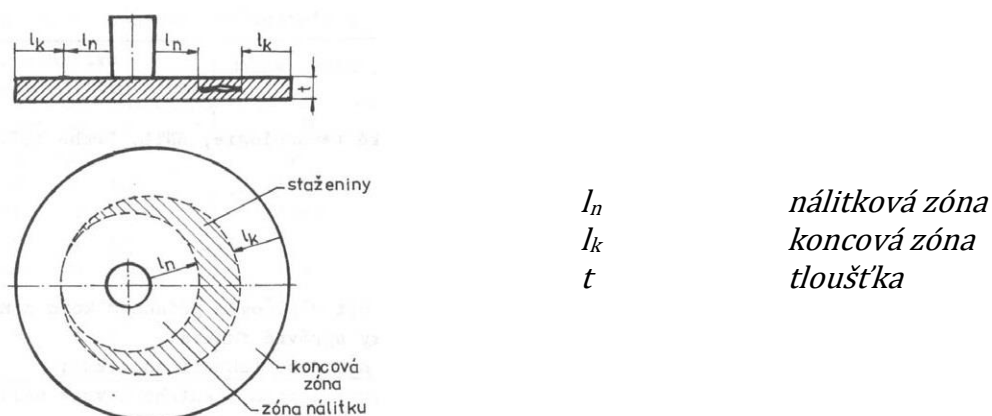
$$M_n > M_o \quad (2.7)$$

kde: M_n modul nálitku [cm]
 M_o modul odlitku [cm]

Pro správnou funkci nálitku musí být všechny tyto podmínky splněny. [3], [4]

2.2 Umístění nálitků

Pro zaručení správné funkce nálitku je také důležité jeho umístění na odlitku. Rozhodujícím kritériem je zde dosazovací schopnost neboli oblast působnosti nálitku. Ta závisí nejvíce na tvaru teplotního pole systému nálitek odlitek, kdy je důležité docílit usměrněného tuhnutí, v opačném případě hrozí vznik staženin. Další faktory ovlivňující dosazovací schopnost nálitku jsou druh a typ tuhnutí odlévaného kovu a dosazovací tlak. [4]



Obr. 2.3 Dosazovací schopnost nálitku [3]

2.3 Využitelnost objemu nálitku[1]

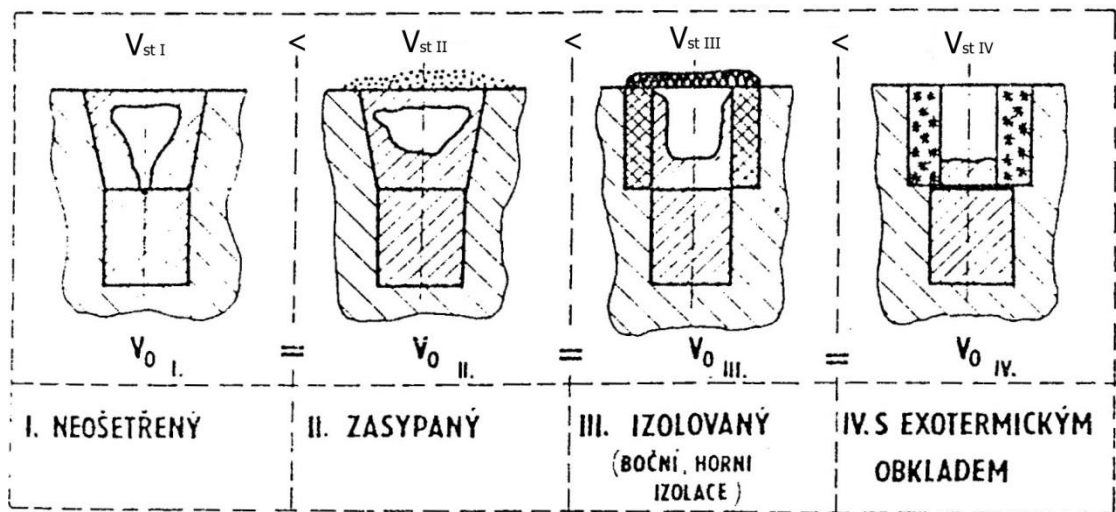
V průběhu tuhnutí, se kov přemísťuje z nálitku do odlitku. Proto po ztuhnutí odlitku včetně nálitku a licí soustavy, vznikne v nálitku staženina o objemu (V_{st}) a zůstane v něm zbytkový kov o objemu (V_{zb}), který odlitek nedokázal „vysát“. Pro velikost objemu nálitku (V_n) můžeme tedy psát:

$$V_n = V_{st} + V_{zb} \quad (2.8)$$

Dále pak využití kovu v nálitku je dáno vztahem:

$$\eta_N = \frac{V_{st}}{V_n} \cdot 100\% [\%] \quad (2.9)$$

Využitelnost závisí na konstrukci odlitku, typu a tvaru nálitku a geometrii staženiny. Přičemž geometrie staženiny hraje největší roli při docílení co nejvyššího využití kovu v nálitku. A ta je odvislá od konstrukce odlitku a zejména od konstrukce nálitku. Na obrázku 2.4 jsou ukázány různé konstrukce nálitků. [4]



Obr. 2.4 Schéma geometrie staženiny u různých typů nálitků [2]

3 PŘENOS TEPLA V SOUSTAVĚ KOV-FORMA-OKOLÍ

Pro prodloužení doby tuhnutí nálitku je důležité určit, jaké termofyzikální principy se podílejí na odvodu tepla. Následně pak zjistí, které termofyzikální parametry tyto principy nejvíce ovlivňují a nakonec se pokusit je optimalizovat. Největší vliv na dobu tuhnutí má odvod tepla z odlitku do slévárenské formy. Při užití otevřených nálitků se uplatňuje přímo i odvod tepla z odlitku do okolí. Budeme-li však uvažovat nálitky uzavřené, můžeme pro tepelnou bilanci mezi odlitkem a formou zjednodušeně psát:

$$Q_o = Q_f \quad (3.1)$$

kde: Q_o teplo uvolněné při tuhnutí odlitku [J]
 Q_f teplo které akumuluje forma [J]

Pro určení celkového množství odvedeného tepla z odlitku při tuhnutí (mezi teplotami T_s a T_l), můžeme použít kalorimetrickou rovnici.

$$Q_o = m_k \cdot c_l \cdot (T_l - T_s) \quad (3.2)$$

kde: m_k hmotnost kovu [kg]
 c_l měrná tepelná kapacita taveniny kovu [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]

Pro určení doby odvodu tepla z kovu je pro nás důležitá intenzita tepla předávaného v čase neboli tepelný tok, pro nějž obecně platí:

$$Q_o = \dot{Q} \cdot \tau_t \quad (3.3)$$

kde: \dot{Q} tepelný tok [W]
 τ_t doba tuhnutí [s]

Z pohledu termomechaniky se pro odvod tepla z kovu uplatňují 3 principy:

- vedení (kondukce)
- proudění (konvekce)
- sálání (radiace) [4], [5]

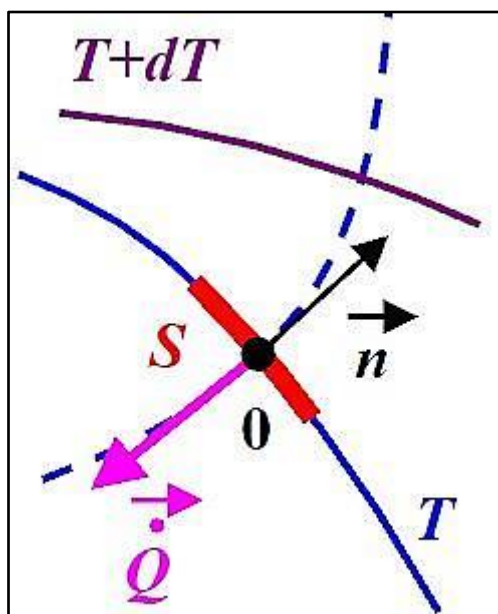
3.1 Vedení tepla

Kinetická energie pohybu částic v materiálu se předává pomocí srážek do sousedních molekul a tím je vedeno teplo. Tento princip dominuje zejména u pevných látek, ale i v kapalinách bez proudění. Tepelný tok je vyjádřen Fourierovým zákonem dle následující rovnice:

$$Q_o = -\lambda \cdot S \cdot grad T \quad (3.4)$$

$$\text{grad } T = \vec{n} \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \quad (3.5)$$

kde: λ součinitel teplotní vodivosti [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
 S izotermická plocha kolmá k tepelnému toku [m^2]
 \vec{n} jednotkový vektor normály izotermické plochy směřující do místa s většími teplotami [m] [5]



Obr. 3.1 Schéma tepelného toku vedením [5]

Pro třírozměrný kartézský souřadný systém pak platí Fourierova diferenciální rovnice vedení tepla, kterou lze použít jak pro pevnou látku, tak pro kapalinu:

$$\frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q}^* = c \cdot \rho \cdot \frac{dT}{d\tau} \quad (3.6)$$

kde: λ součinitel tepelné vodivosti [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
 c měrná tepelná kapacita [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
 ρ hustota [$kg \cdot m^{-3}$]
 T teplota [K]
 τ čas [s]
 \dot{Q}^* teplo uvolňované/pohlcované vnitřním kladným/záporným zdrojem tepla [$W \cdot m^{-3}$]

příčemž: $\lambda = f(x, y, z, T)$
 $c = f(x, y, z, T)$
 $\rho = f(x, y, z, T)$

[6]

V systému se někdy mohou vyskytnout zdroje tepla (\dot{Q}^*). Může se jednat o krystalizační teplo, vypařování vlhkosti apod.. Pokud jsou zdroje nevýznamné, není potřeba je zahrnout do diferenciálních rovnic. [4]

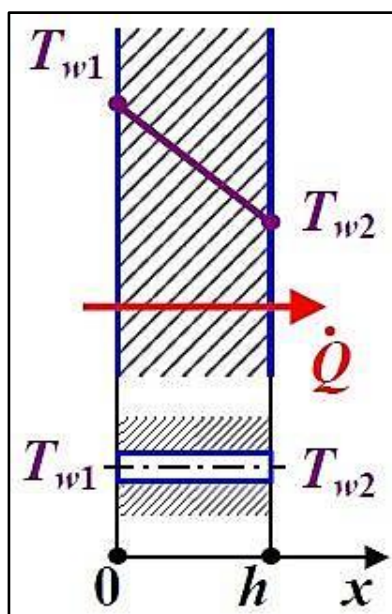
Řešením této diferenciální rovnice je možno zjistit teplotní profil (3.7) a tepelný tok (3.8) v jakémkoliv systému. Příkladem může být řešení rovnice pro vedení tepla v rovinné stěně:

$$T = T_{w1} + \frac{T_{w2} - T_{w1}}{h} \cdot x \quad (3.7)$$

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot S \cdot \frac{T_{w2} - T_{w1}}{h} \quad (3.8)$$

kde: T teplota závislá na poloze [K]
 $T_{w1,w2}$ teplota na okraji stěny(okrajové podmínky)[K]
 h šířka stěny [m]
 x souřadnice polohy [m]
 S plocha stěny [m²]

[6]



Obr. 3.2 Tepelný tok rovinnou stěnou [6]

3.2 Přestup tepla prouděním

Jedná se o přesun molekul látky v prostoru buďto nuceným nebo přirozením prouděním látky čímž je vedeno teplo. Přenos se uplatňuje zejména u kapalin. Pro řešení přenosu tepla v soustavě kov-forma bude nejdůležitější přestup tepla mezi roztaveným kovem a stěnou formy. Ten je dán Newtonovým zákonem:

$$\dot{Q} = \alpha \cdot S \cdot (T_k - T_f) \quad (3.9)$$

kde: α součinitel přestupu tepla [W · m⁻² · K⁻¹]
 S plocha stěny formy [m²]

T_k teplota kovu [K]
 T_f teplota vnitřní stěny formy [K]

Diferenciální rovnice popisující přestup tepla v kapalině musí zahrnovat kromě vedení tepla způsobené náhodnými srážkami molekul látky i přestup způsobený přesunem molekul v prostoru (prouděním). Musíme současně řešit několik diferenciálních rovnic. Jedná se o diferenciální rovnice energie (3.10), pohybové a kontinuity. Zápis je opět pro kartézský systém.

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + v_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3.10)$$

kde: $v_{x,y,z}$ složky rychlostí přemístování elementu [$m \cdot s^{-1}$]
 a součinitel teplotní vodivosti [$m^2 \cdot s^{-1}$]
 T teplota [K]
 τ čas [s]

V energetické rovnici (3.10) se vyskytují, kromě proměnné T , také proměnné složky rychlosti $v_{x,y,z}$. Ty jsou určeny rovnicemi pohybovými (Navier-Stokesovy). [4],[7]

3.3 Přenos tepla zářením

Každé těleso, které má teplotu větší než 0K vyzařuje fotony. Ty jsou nositeli energie včetně tepelné. Intenzitu vyzařované energie popisuje Stefan-Boltzmannův zákon:

$$E_0 = \sigma_0 \cdot T^4 \quad (3.11)$$

kde: E_0 vlastní zářivost černého tělesa [$W \cdot m^{-2}$]
 σ_0 Stefan – Boltzmannova konstanta [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$]
 T teplota [K]

Černé těleso je dokonalý zářič, což znamená, že při dané teplotě vyzáří největší množství energie ze všech možných těles. Zároveň dokonale pohlcuje záření všech vlnových délek, které na něj dopadá. Ve skutečnosti černé těleso neexistuje a zavádí se pojem šedé těleso. Tyto tělesa mají tepelný tok menší než černé těleso. To o kolik je tepelný tok menší, je vyjádřen pomocí poměrné pohltivosti (emisivity ε), která se přidá do rovnice Stefan-Boltzmannova zákona:

$$E_0 = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T^4 \quad (3.12)$$

Emisivita nabývá hodnot od 0 do 1 a pro jednotlivé materiály ji můžeme najít v tabulkách nebo ji můžeme změřit například pomocí pyrometru, pokud známe

teplotu měřeného vzorku. Emisivita závisí na typu materiálu, úpravě povrchu a směru vyzařování.

Tepelný tok zářením se dá tedy definovat ze Stefan-Boltzmannova zákona takto:

$$\dot{Q} = S \cdot \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T^4 \quad (3.13)$$

kde: \dot{Q} Tepelný tok [W]
 S volný povrch tělesa [S]

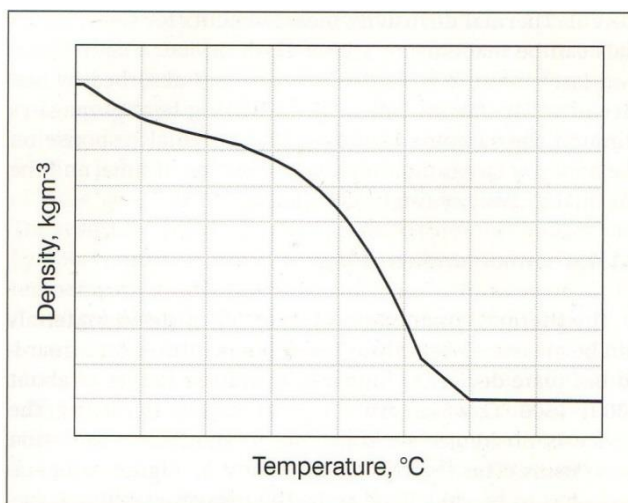
Jak je vidět tepelný tok závisí na čtvrté mocnině rozdílu teploty mezi povrchem tělesa a teplotou okolí. Proto by se neměl podceňovat a v případě nálitků s otevřenou hladinou by se nemělo zapomínat na izolační zásyp.[4], [8]

3.4 Parametry ovlivňující teplotní chování nálitků

Důležitými materiálovými charakteristikami popisující přenos, skladování a uvolňování tepla pro všechny materiály v systému odlitek-forma jsou hustota (ρ), tepelná vodivost (λ), měrná tepelná kapacita (c), teplotní vodivost (a) a součinitel přestupu tepla (α). Pro exotermické obklady je ještě důležité vyprodukované teplo (ΔH_{exo}). [9]

3.4.1 Hustota (ρ)

Je-li materiál zahříván, začíná se rozpínat a tím se snižuje jeho hustota. To znatelně přispívá ke změně termofyzikálních parametrů materiálu. Hustota je tedy funkcí teploty a u materiálů nálitků může být měřena dilatometrem. Graf 3.1 ukazuje trend závislosti hustoty na teplotě pro běžné materiály obkladů nálitků. [9]



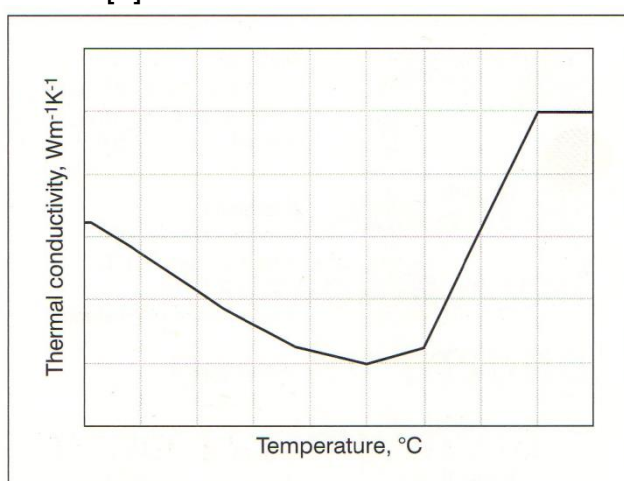
Graf 3.1 Typická křivka závislosti hustoty (ρ) na teplotě pro obkladové materiály nálitků [9]

3.4.2 Tepelná vodivost (λ)

Tepelná vodivost je vyjádřena pomocí součinitele úměrnosti λ . Ten vyjadřuje, kolik tepla za jednotku času projde jedním metrem látky a vytvoří rozdíl teploty 1K. Stanovení součinitele není triviální. Je totiž závislý na několika faktorech:

- chemickém složení
- fyzikálním stavu
- skupenství, struktuře látky
- teplotě

Pro výpočty při tuhnutí odlitku je důležité znát závislost součinitele tepelné vodivosti na teplotě. A to u všech materiálů vyskytujících se v systému odlitek-forma (odlévaným materiál v tuhém i v tekutém stavu, formovací směsi, obklady atd.). Graf 3.2 ukazuje trend závislosti tepelné vodivosti na teplotě pro běžné materiály nálitků. [3]



Graf 3.2 Typická křivka závislosti tepelné vodivosti (λ) na teplotě pro obkladové materiály nálitků [9]

3.4.3 Měrná tepelná kapacita (c)

Jedná se o fyzikální veličinu, která vyjadřuje jaké množství tepla je potřeba dodat 1 kilogramu látky, aby se ohřála o 1 Kelvin. Zjednodušeně se dá říci že, čím větší hodnoty měrná tepelná kapacita nabývá, tím se těleso otepluje pomaleji. Její definice vychází z kalorimetrické rovnice:

$$c = \frac{dQ}{dT \cdot m} \quad (3.14)$$

kde:

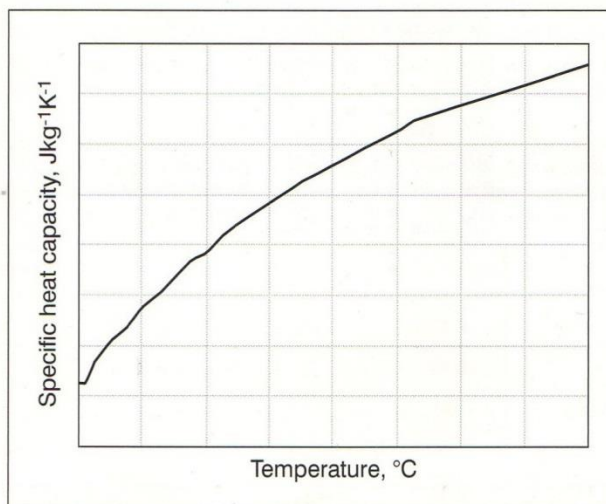
c	<i>měrná tepelná kapacita</i> [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
dQ	<i>diferenciál tepla</i> [J]
dT	<i>přírůstek teploty</i> [K]
m	<i>hmotnost</i> [kg]

Veličina je závislá na teplotě, graf 3.3 ukazuje trend závislosti měrné tepelné kapacity na teplotě pro běžné materiály nálitků. Obecně ji můžeme vyjádřit pomocí následující rovnice:

$$c = A + B \cdot T + C \cdot T^{-2} \quad (3.15)$$

kde: A, B, C konstanty
 T teplota [K]

[3]



Graf 3.3 Typická křivka závislosti měrné tepelné kapacity (c) na teplotě pro obkladové materiály nálitků [9]

3.4.4 Teplotní vodivost (a)

Teplotní vodivost udává míru toho jak je schopen materiál vést tepelnou energii ve vztahu k tomu jakou má schopnost energii akumulovat. Její změna je přímo úměrná změně součinitele tepelné vodivosti (λ) a nepřímo úměrná hustotě (ρ) a tepelné kapacitě (c) neboli schopnosti materiálu akumulovat tepelnou energii. Z toho vyplývá definice součinitele teplotní vodivosti (a):

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad (3.16)$$

Součinitel teplotní vodivosti udává jak rychle je materiál schopen vyrovnávat teplotní rozdíly. Čím vyšší hodnoty součinitele tím materiál rychleji vyrovnává teplotní rozdíly.[4],[9]

3.4.5 Součinitel přestupu tepla (α)

Součinitel přestupu tepla α udává intenzitu přestupu tepla mezi teplejší a chladnější látkou. Je důležitý při určování přestupu tepla mezi taveninou a stěnou formy. Jeho určení však není triviální, závisí na mnoha faktorech:

- vlastnostech tekutiny (hustota, dynamická viskozita, atd.)
- tvaru obtékaného povrchu
- rychlosti proudění

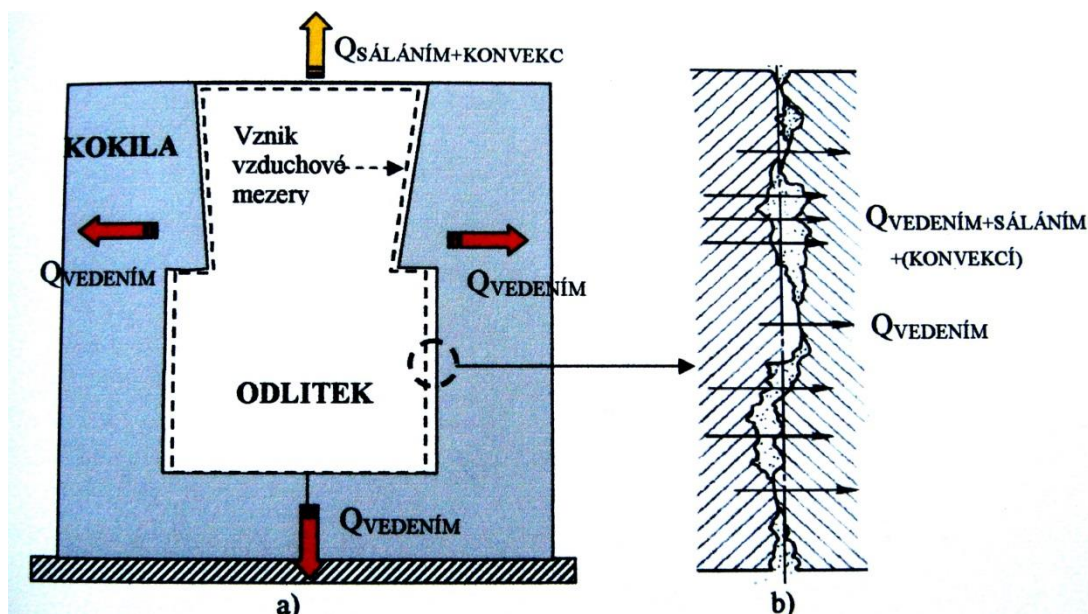
Součinitel lze určit různými způsoby:

- z tvaru teplotního profilu v mezní vrstvě (vrstva vznikající těsně podél povrchu)
- pomocí teorie podobnosti
- výpočtem z diferenciálních rovnic
- experimentálně

V praxi se nejčastěji součinitel určuje z kritériálních rovnic, které jsou empiricky stanovené na základě teorie podobnosti, pro různé tvary stěn a typy proudění kapalin.[4],[7]

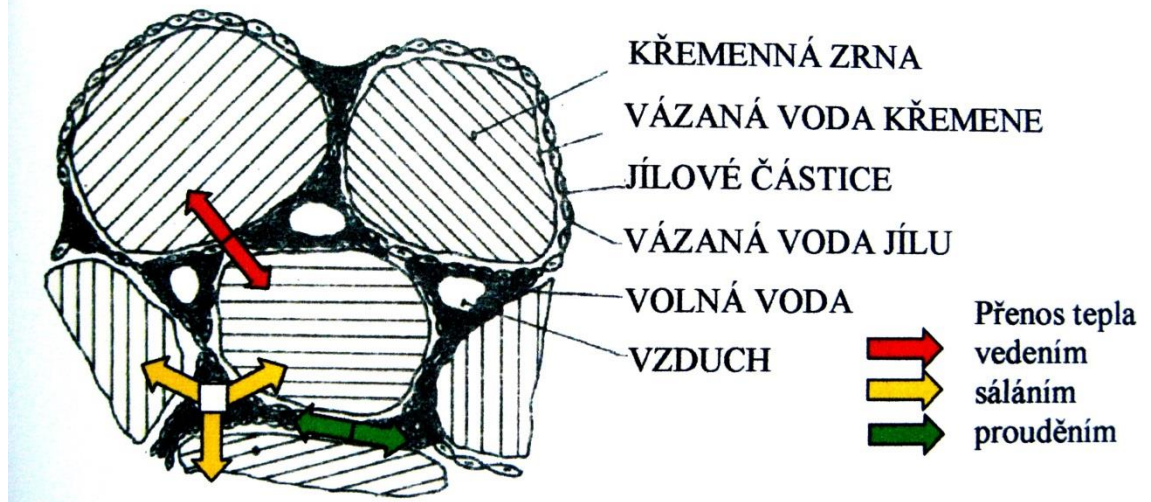
3.5 Kombinovaný přenos tepla

V praxi se jednotlivé základní typy přenosu tepla vyskytují jen ojedinele. Většinou se jedná kombinaci vedením a konvekcí nebo sáláním a konvekcí. Může dojít i ke kombinaci všech tří přenosů na jednou. Praktický příklad kombinace vedení tepla ukazuje sdílení tepla v kovové slévárenské formě schematicky znázorněno na obrázku 3.3. Zde je dominantní přenos tepla vedením, avšak po ztuhnutí okrajů odlitku často vzniká nedokonalý styk mezi odlitkem a stěnou formy. Zde se uplatňuje sálání i konvekce. Při užití otevřených náliček se uplatňuje odvod tepla sáláním a konvekcí přímo do okolního prostředí.



Obr. 3.3 Sdílení tepla v kovové formě: a) zjednodušené schéma, b) sdílení tepla v mezeře [4]

Dalším důležitým systémem, kde se vyskytuje kombinace více druhů přenosu je písková forma. Oproti formě kovové, kde se jedná v podstatě o homogenní materiál, je písková forma nehomogenní. Mezi zrny písku se může, jak ukazuje obrázek 3.4, vyskytovat vzduch, voda a pojivo.



Obr. 3.4 Sdílení tepla v pískové formě s křemenným ostřivem a jílovým pojivem [4]

V pískové formě tedy probíhá sdílení tepla formou:

- Vedením tepla, které je dominantní při teplotě do 300°C
- Prouděním plynů a vody při teplotě od 300°C do 600°C
- Sáláním v mezeře mezi zrny ostřiva při teplotě od 600°C

[4]

4 INTENZIFIKACE

Pojmem intenzifikace se myslí prodloužení doby tuhnutí nálitku. To nám následně dovoluje zmenšit jeho rozměry (objem V_n) při zachování jeho funkčnosti. Tímto procesem tedy zvyšujeme využitelnost objemu nálitku, jak je patrné z rovnice 2.9. Ta je jedním z faktorů zásadně ovlivňujících využitelnost tekutého kovu, což je poměr hrubé hmotnosti odlitku (Hmotnost odlitku **bez** vtokové soustavy, technologických přísad a **nálitků**) k hmotnosti odlévaného tekutého kovu. Natavení kovu je finančně náročné, a proto má velký význam zabývat se snížením velikosti nálitku, při zachování jeho funkčnosti. [4]

4.1 Dolévání

Jedná se o jeden z nejjednodušších a nenákladných způsobů prodloužení doby tuhnutí nálitku. Principem je, jak již název napovídá, dolévání tekutého kovu do již odlité formy. Dolévá se do nálitku a tím se doplňuje tekutý kov, který je vysáván odlitkem. Náletek tedy musí být otevřený. Tento postup umožňuje volit menší nálitky, než by odpovídaly výpočtu. Nejčastěji se dolévá jednou, ale není vyloučeno i vícenásobné dolévání pro větší odlitky. Pro složitější odlitky je vhodné vytvořit tzv. dolévací plán. [4]

4.2 Elektrický ohřev

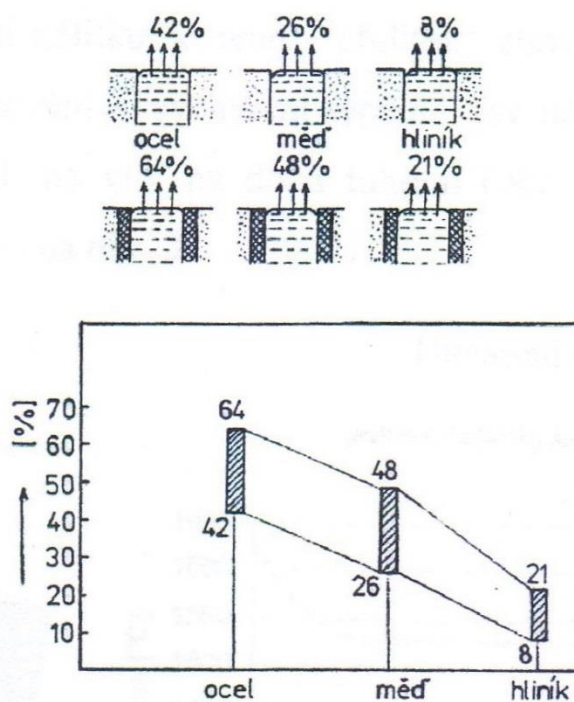
Zřídka užívaným způsobem intenzifikace je elektrický ohřev nálitku. Princip je z názvu zřejmý. Docílí se s ním vysokého využití kovu, přičemž uvolněný prostor po smrštění má tvar válce. Používá se hlavně u velkoobjemových odlitků, za použití jednoho nálitku. Není vhodný pro větší počet nálitků. [4]

4.3 Izolace hladiny

Izolace hladiny nálitku má velký význam, který je často opomíjen. Tepelné ztráty u neizolované hladiny jsou způsobeny sáláním a jsou popsány pomocí rovnice (3.13). Z rovnice plyne, že zejména u kovů s vysokou hodnotou tavení např. ocel jsou ztráty významné a mnohdy i převažují nad ostatními. Obrázek 4.1 ukazuje tepelné ztráty nálitků bez izolace hladiny u některých materiálů. Je zde i ukázáno srovnání nálitků bez a s izolačním obkladem, kde se ztráty ještě zvyšují.

Pro zabránění odvodu tepla sáláním se používají jak izolační směsi tak i směsi exotermicko-izolační, které do nálitku dodávají i přídatné teplo viz dále a po vyhoření následně jejich „popel“ izoluje. Směsi mohou mít jak charakter práškový (v tomto případě mluvíme o zásypech), tak charakter pevný, kdy se jsou slisovány do určitých tvarů např. exotermické tablety.

Aplikaci izolace je vhodné aplikovat ihned jak je to možné. Tablety se zakládají do nálitku ještě před zahájením samotného lití. V případě zásypu při spodního lití jakmile se v nálitku objeví hladina kovu. Tímto se docílí co nejmenší tepelných ztrát. Při použití zásypů je důležité, aby byl rovnoměrně rozprostřen po hladině kovu. Jeho množství závisí na velikosti otevřené plochy nálitku a na jeho objemu. Toto množství je možno vyhledat v katalogových listech, které dodávají výrobci. [4], [10]



Obr. 4.1 Ztráty tepla sáláním z otevřených nálitků [4]



Obr. 4.2 Izolační tablety [10]

4.4 Izolační obklady

Principem izolace je snížení odvodu tepla z nálitku jeho stěnami. Může být použita jak u nálitků uzavřených, tak u nálitků otevřených, zde je však nutno brát zřetel na izolaci hladiny. Jak ukazuje obrázek 4.1 izolace otevřených nálitků bez izolace hladiny je jen málo efektivní. Tepelně izolační vlastnosti nálitku jsou určeny zejména jeho součinitelem tepelné akumulace a tloušťkou izolační stěny. Menší hodnoty součinitele tepelné akumulace znamenají lepší izolační vlastnosti. Materiály užívané pro izolace se dají rozdělit na dva základní typy podle jejich struktury:

- a) Ze žárovzdorných vláken

Materiál je nataven v peci a následně rotačně rozvlákněn.

- b) Porézní strukturou

Existuje několik způsobů jak vytvořit porézní materiál. Jedná se o **vytváření pěny**, která je následně smíchána s jemnými částmi

keramiky, **vypalování speciálních přídavných látek** např. dřevo, polystyren, korek atd. a **chemické vylučování plynů**. [4]

4.5 Exotermické obklady

Název exotermické obklady vychází z chemie, kde jsou rozlišovány exotermické a endotermické reakce látek. Přičemž exotermická reakce je taková, při které slučováním reaktantů se uvolňuje energie a to tepelná popřípadě světelná. Typickým příkladem je hoření. Endotermická reakce je k exotermické reakci protikladem. Exotermické obklady tedy vyvíjejí teplo. Celkové teplo, které je potřeba odvést z nálitku Q_c se skládá z tepla vyvinuté kovem Q_1 a tepla vyvinuté obkladem Q_2 .

$$Q_c = Q_1 + Q_2 \text{ [J]} \quad (3.1)$$

Přičemž teplo dodané obkladem závisí na jeho chemickém složení a množství jednotlivých komponent. Zjednodušeně vyvinuté teplo v obkladu můžeme vyjádřit pomocí množství hliníku ve směsi.

$$Q_1 = \frac{m \cdot c_{Al}}{M_{Al}} \cdot q_r \text{ [J]} \quad (3.2)$$

Kde: m množství exosměsi v obkladu [kg]
 c_{Al} koncentrace hliníku v exosměsi [%]
 M_{Al} relativní atomová hmotnost hliníku [–]
 q_r reakční teplo uvolněné reakcí 1 molu hliníku [$J \cdot mol^{-1}$]

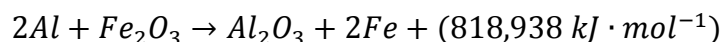
Je vidět, že stěna formy musí odvést větší množství tepla, než je tomu při užití nálitku bez exotermického obkladu, což se značně projevuje na rychlosti poklesu teploty nálitku a tedy i na jeho době tuhnutí.

Při odlití projde obklad několika fázemi. Nejprve se chová jako standartní formovací směs a odvádí z nálitku teplo. Tento proces trvá do té doby, než dojde k zapálení směsi a v obkladu se začne vyvíjet teplo. K zapálení dochází až po dosažení určité zápalné teploty, kterou má každá směs jinou a závisí především na jejich chemickém složení. Zde mohou nastat dva případy. Pokud je teplota vyvinutá obkladem vyšší než teplota kovu v nálitku, začne se nálitok ohřívat. Druhým případem je, že teplota v obkladu je nižší než teplota kovu. Zde dochází ke snížení teplotního gradientu. Teplo je nadále odváděno z nálitku avšak s nižší intenzitou než u nálitku bez obkladu. Ve třetí finální fázi dojde k úplnému vyhoření exotermické směsi. Zde intenzita ochlazování nálitku závisí na tepelně-izolačních vlastnostech vyhořelé směsi. V tomto dochází ke značným rozdílům u jednotlivých směsí. U některých typů je kladen nejvyšší důraz na mohutnost reakce, neboli na množství tepla, které obklad vyvine, jiné jsou navrženy tak, aby po vyhoření sloužili nadále jako izolant a to i za podmínek, že jejich vývin tepla nebude tak výrazný. [4]

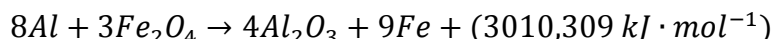
4.5.1 Typy směsí

Termitové směsi

První exotermickou směs vyvinul a patentoval v roce 1902 Th. Goldschmid. Jednalo se o termitovou směs, která byla určena pro svařování a ohřev nálitků. Směs se skládala z hliníkového prášku a oxidu železitého. Hoření této směsi probíhá dle chemické reakce:



nebo



Průběh reakce je velmi rychlý a produkty dosahují po skončení reakce teplot až 2000°C. Pro zpomalení reakce se do směsi přidávají žáruvzdorné materiály. Hliník, jak je zřejmé z rovnic, je oxidován oxidem železitým, takže není nutný přístup vzdušného kyslíku.

U této Metody se však projevuje několik nevýhod:

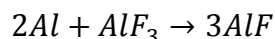
- potřeba vysoké teploty pro zapálení směsi
- reakcí vzniká železo, které má velkou tepelnou vodivost a tudíž rychle odvádí teplo z nálitku
- vznikající železo se mísí s taveninou a způsobuje následně špatné čištění odlitku

Jako zdroj kyslíku mohou být použity i jiné sloučeniny. Většinou se jedná o dusičnany ($NaNO_3$, KNO_3 , $Ba(NO_3)_2$). Ty reagují i při nižší teplotě (300°C).

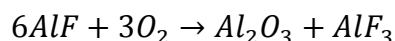
Snahy o další vylepšení těchto směsí vedly v roce 1949 v Anglii k objevu firmy Foseco. Bylo zjištěno, že přidáním katalyzátoru, malého množství fluoridu barnatého, začne hliník hořet i při nízkých teplotách kolem 350°C. Také touto reakcí vzniká větší množství tepla, protože nedochází k endotermické reakci rozkladu oxidu železitého. Jednalo se o významný objev, který výrazně zlepšoval vlastnosti termitových směsí. Pro oxidaci hliníku mohou být použity i jiné fluoridy popřípadě chloridy, které mají obdobný účinek. Jsou to např.: NaF , CaF_2 , Kryolit Na_3AlF_6 , $NaCl$.

U těchto termitových směsí s katalyzátorem probíhá reakce ve dvou stupních:

1. Nejprve dochází k rozkladu fluoridů hliníkem, oxidaci příslušného kovu a hliníku za vzniku tepla.



2. Při dosažení teploty vyšší než 800°C, vysoce reaktivní plyn AlF začíná reagovat s kyslíkem ve vzduchu.



Jejich použití přináší četné výhody:

- uvolnění vyššího množství tepla (nedochází k endotermické reakci rozkladu Fe_2O_3) a to při zachování množství hliníku téměř dvojnásobně
- lepší izolační vlastnosti po vyhoření
- v průběhu i po skončení reakce zachovávají tvar směsi

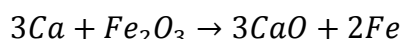
- dle složení směsi lze řídit teploty reakcí zhruba od 350°C do více než 1150°C

Typ křemíkový

Základním redukujícím činidlem je zde křemík. Chemická reakce probíhá dle následující rovnice:



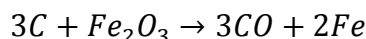
Křemík je do směsi přidáván buď ve formě FeSi 75 nebo FeSiCa. Pokud je ve směsi obsažen vápník probíhá další reakce:



Křemík se v průběhu tuhnutí může dostat do vrchních vrstev odlitku. To způsobí jejich nalegování křemíkem a teplota tuhnutí se snižuje asi o 50°C. Což tedy prodlužuje dobu tuhnutí.

Typ uhlíkový

Základním redukujícím činidlem je zde uhlík. Chemická Reakce probíhá dle následující rovnice:



Působení uhlíku je obdobné jako u křemíku. Dochází opět k nalegování horní vrstvi a snižuje se teplota tuhnutí. [4]

4.5.2 Složení exotermických směsí

Složení exotermických směsí bývá obsáhlé. Většinou se jedná o 10 – 15 komponent. Přesné složení je většinou tajeno a produkty jsou uváděny na trh pod obchodními názvy, přičemž základní vlastnosti a vhodnost použití uvádí výrobce ve svých katalozích. Všechny směsi však obsahují:

- **Plniva:**
Netečný materiál, který prodlužuje dobu hoření a zlepšuje izolační vlastnosti směsi po vyhoření. Jedná se o Křemičitý pásek, šamot pálené jíly, které jsou určeny pro formovací směsi. A Al_2O_3 , SiO_2 nebo křemelina pro zasypy hladin.
- **Pojiva:**
Ta mohou být **pevná** (sulfidový louh, dextrin), které se za přítomnosti vody dávkují přímo do exotermické směsi nebo **tekutá** (sodné vodní sklo, fenol formaldehydová pryskyřice).
- **Katalyzátory:**
Podporují hoření. Jedná se o **fluoridové** a **chloridové** soli (NaF , CaF_2 , Na_2SiF_6 , $NaCl$)

- **Okysličovadla:**

Jedná se o **oxidy kovů** (Fe_2O_3, MnO_2), které uvolňují kyslík za vyšších teplot a **dusičnany alkalických kovů** ($KNO_3, Ba(NO_3)_2$), které uvolňují kyslík už při teplotě nad 290°C.

- **Palivo:**

U **křemíkových** typů to je to FeSi 75 nebo FeSiCa a u **uhlíkových** se jedná o dřevěné uhlí nebo mletý hliník. [4]

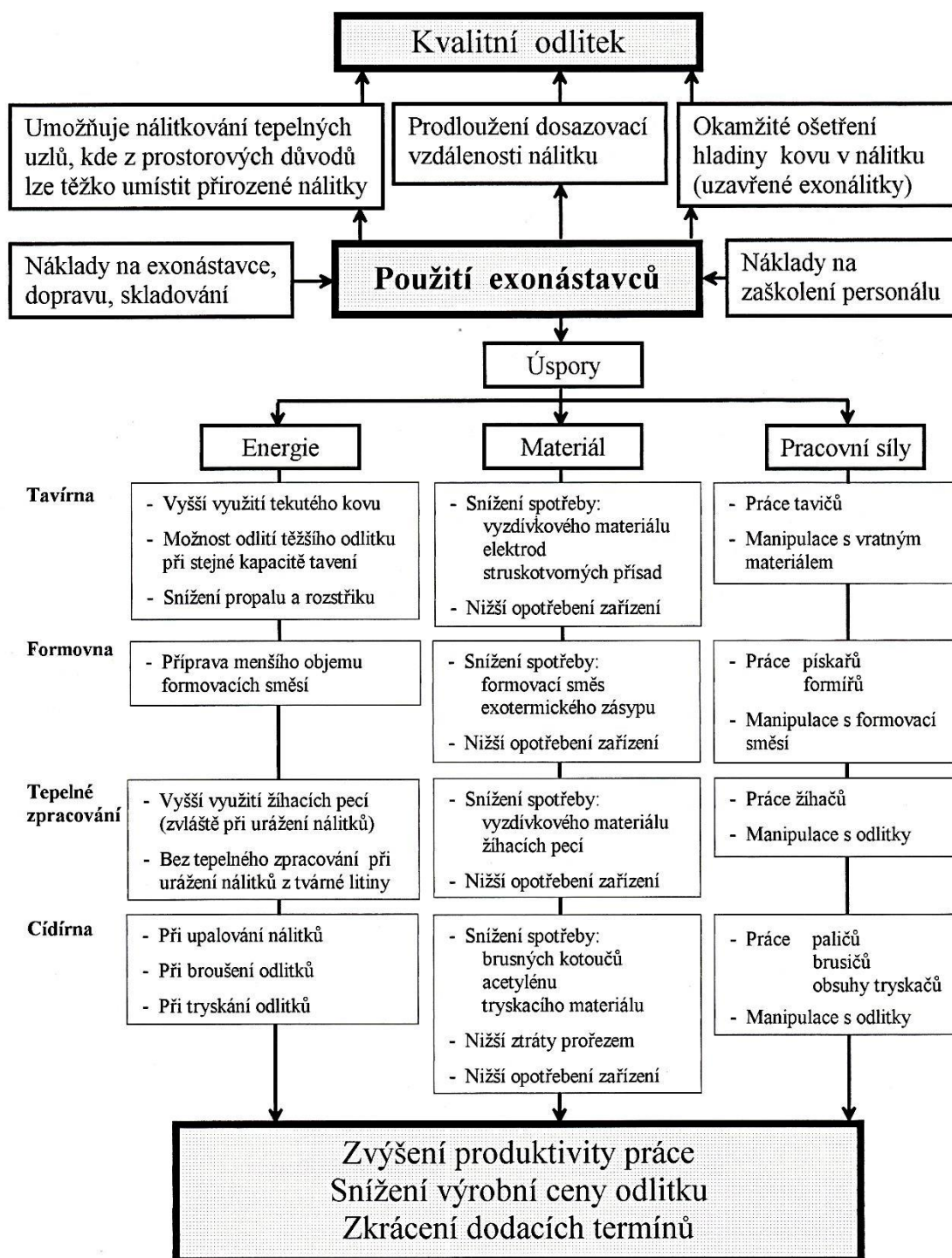
Následující tabulka ukazuje příklad složení některých typů exotermických směsí:

Exozotypy/složení	CH 1	Ferro 2	Feedex 3 KCA	Feedex 3 HN
Al-kov [hm. %]	18-23	18-23	16-20	22-25
Al ₂ O ₃ [hm. %]	27-32	27-32	7-11	15-20
SiO ₂ [hm. %]	5-10	18-22	35-40	30-35
Fe ₂ O ₃ [hm. %]	14-18	5-10	8-10	12-15
Na ₂ O+K ₂ O [hm. %]	4-6	3-5	4-6	2-4
CaO+MgO [hm. %]	3-5	2-5	1-3	1-2
NO ₃ [hm. %]	0-1	3-5	7-9	8-10
F [hm. %]	4-5	1-2	2-4	2-4
C [hm. %]	5-7	-	-	-
Cl [hm. %]	4-6	1-2	2-4	0-1
Zápalná teplota [°C]	>600	>600	<600	<600

Tab. 4.1 Příklad složení exotermických směsí [11]

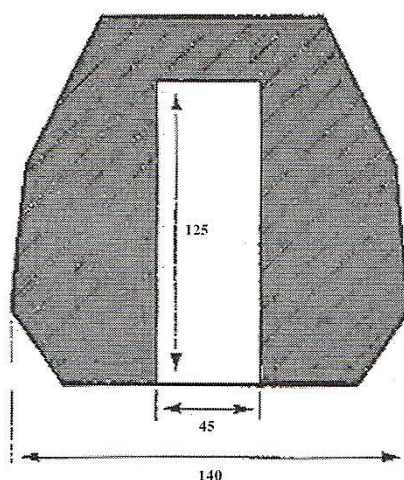
4.5.3 Výhody při použití exotermických obkladů

Jedním z hlavních faktorů, které vypovídajícím o tom na jaké je slévárna úrovni, je procento využití tekutého kovu. Správným použitím exotermických obkladů a tím i zmenšení velikosti náliček lze toto procento zvýšit. S menší velikostí náliček úzce souvisí, jak znázorňuje Obrázek 4.3, úspory ve formě energie, materiálu tak i pracovní síly. Ukazuje se, jak je podrobně rozebráno v [4], že i při vyšších pořizovacích nákladech na exotermický obal, je možno docílit významného snížení celkových nákladů.[4]



Obr. 4.3 Možnosti úspor ve slévárně při použití exotermických obkladů [12]

Poměrně novým trendem je používání mininálitků u nichž je snaha o co největší využití kovu v něm a to teoreticky až 100%. Je to v podstatě nálitky obalené silnou vrstvou speciálního exotermického materiálu, který má teplo hoření nad 1600°C. Tloušťka vrstvy, jak ukazuje obrázek 4.4, dosahuje až průměru samotného nálitku. To zaručuje dostatečně dlouhou dobu hoření.

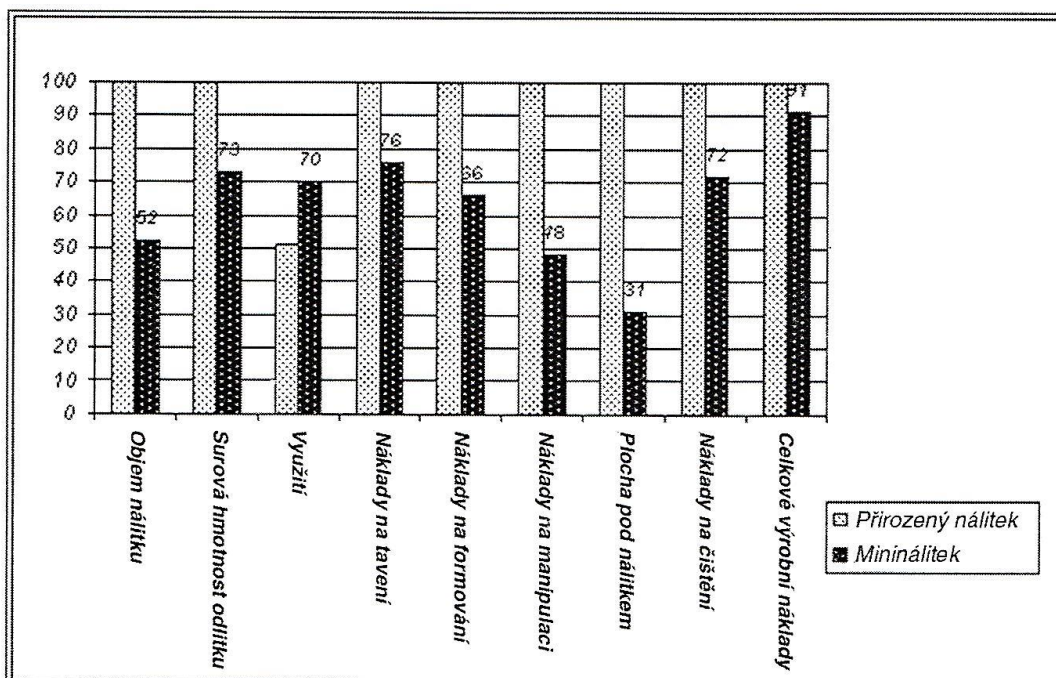


Obr. 4.4 schéma mininálitku [13]

Mezi výhody těchto nálitků patří:

- snížení tlaku ve formě a tím snížení rizika namožení formy
- schopnost ohřátí kovu v nálitku a tím zvýšení dosazování
- malé zbytky po nálitku a tím snížení nákladů na čištění

Příkladem toho kolik procent nákladů lze ušetřit užitím mininálitků je ukázáno v práci [13]. Zde se uvádí, že při výrobě hnací řemenice ušetřili 9% nákladů. Následující graf ukazuje vyhodnocení nákladů oproti technologii používající přirozené nálitky. [13]



Graf 4.1 Porovnání nákladů při užití mininálitku a přirozeného nálitku [13]

5 NUMERICKÁ SIMULACE

V dnešní době je simulace slévárenských procesů často využívána při návrhu designu a metodice výroby odlitku.[9] Simulační programy jsou dnes hojně využívány mnoha slévárnami. Cílem simulace je matematické modelování zadaných slévárenských procesů:

- plnění dutiny formy
- tuhnutí a chladnutí kovu s následnou predikcí vad
- výpočty pnutí
- výpočet mikrostruktury
-

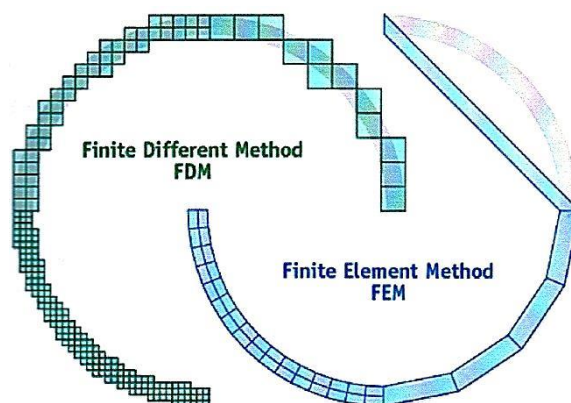
Řešení každého výpočtu lze rozdělit do tří částí:

- pre-processing – příprava geometrie a zadání okrajových podmínek pro výpočet
- processing – výpočet
- post-processing – zobrazení a vyhodnocení výsledků

Pro výpočet nejdříve technolog navrhne na základě svých zkušeností nebo výpočtů vhodnou technologii, geometrii odlitku, velikost nálitků, vtokové soustavy atd.. Po nadefinování vstupních okrajových podmínek, lze přistoupit k samotnému výpočtu. Nakonec je provedeno vyhodnocení výsledků. Pokud je výsledek nevyhovující, vrací se technolog k prvnímu kroku a celý proces se opakuje. [4]

5.1 Metody výpočtu

Základem pro výpočet ve vědeckotechnické praxi je řešení diferenciální rovnice. Některé rovnice důležité pro slévárenské výpočty jsou uvedeny v kapitole 3. Řešení rovnic bylo dříve prováděno pomocí analytických metod, které však musí uvažovat při výpočtu určitých zjednodušených předpokladů a jednoduchých geometrických tvarů. Jinak by řešení nebylo prakticky proveditelné. To může vést k značné nepřesnosti výsledků. S rozvojem výpočetní techniky se proto začínají využívat numerické simulace. Pomocí ní lze řešit jakýkoliv geometrický tvar při užití běžných okrajových podmínek vyskytujících se v praxi. Základním rozdílem mezi těmito metodami je že analytickým řešením dostáváme spojitou informaci a při numerickém řešení informaci nespojitou (diskrétní). Tato diskretizace umožňuje nahradit diferenciální rovnici, která většinou není exaktně řešitelná jednoduchými algebraickými rovnicemi. Mezi nejpoužívanější metody řešení ve slévárenství patří metoda konečných diferencí (FDM) a metoda konečných prvků (FEM). Výrobci simulačních programů se přou, která metoda je vhodnější. Obecně platí, že FDM se vyznačuje snadnou diskretizací, což urychluje přípravu výpočtu i výpočet. Avšak při složitých modelech dochází k deformaci oblých nebo zkosených tvarů a není dosaženo tak přesných výsledků jako pomocí FEM. Následně je tedy nutno zjemnit síť což vede opět k prodloužení času výpočtu.

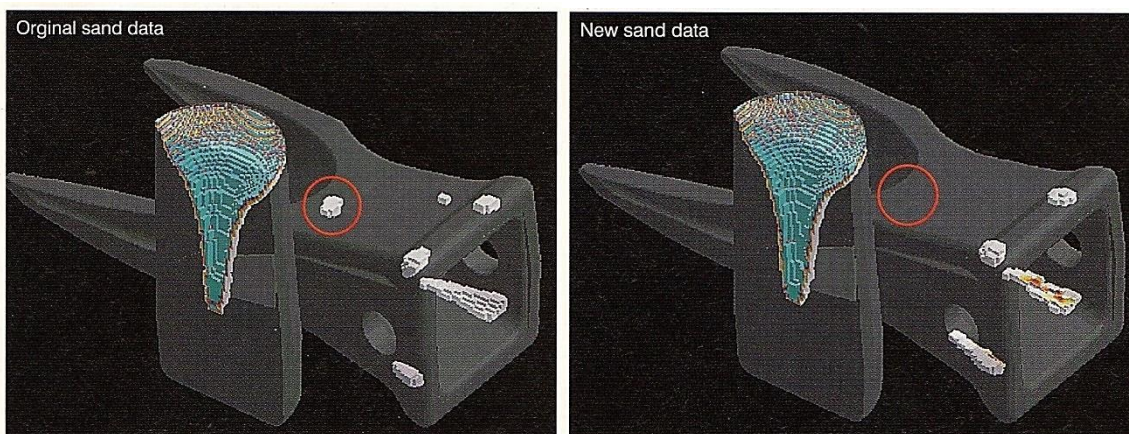


Obr. 5.1 Porovnání síťování metod FDM a FEM [4]

Jakmile máme nachystanu geometrii (diskreditovanou), je potřeba definovat okrajové a počáteční podmínky. Počáteční podmínky zahrnují vlastnosti použitých materiálů a jejich počáteční teploty. Okrajové podmínky zahrnují přestup tepla v soustavě kov-forma-okolí. [4]

5.2 Termofyzikální data pro simulace

Jelikož, se požadavky na design a kvalitu odlitku stále zvyšují, je potřeba zvyšovat i přesnost simulace. Pro přesnost simulace jsou zásadní termofyzikální vlastnosti materiálů (popsány ve 3. kapitole). Příkladem toho, jak jsou důležité, může být obrázek 5.2, kde zpřesněním termofyzikálních dat bylo docíleno rozdílných výsledků simulace, zpřesněná simulace byla potvrzena reálným odlitkem.



Obr. 5.2 Závislost předpovědi porozity na přesnosti termofyzikálních parametrů písku formy. Pravý obrázek byl potvrzen skutečným odlitkem. [9]

Běžný výrobce obkladů shromažďuje mnoho dat pro to, aby zajistil kvalitu výroby. Avšak pro určování významných a přesných termofyzikálních vlastností těchto materiálů, musí investovat další prostředky do laboratorního vybavení a kvalifikovaného personálu. Rozdíly v přesnosti při zjišťování těchto vlastností ve slévárně a laboratoři mohou být velmi rozdílné. [9]

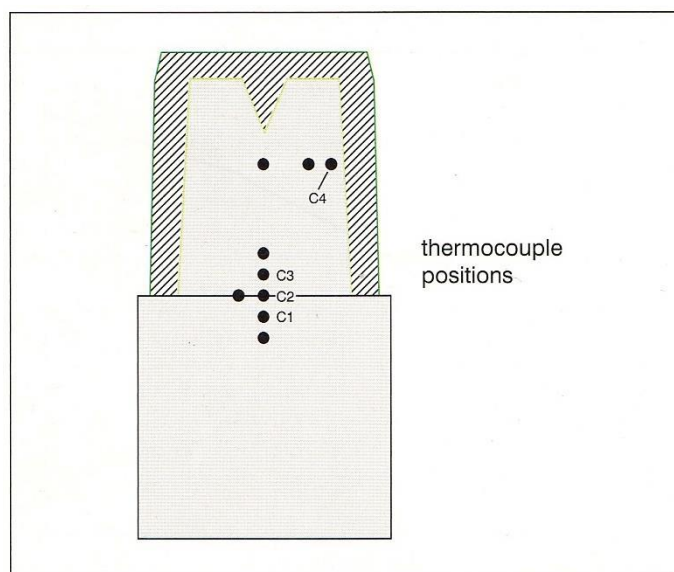
Data lze také získat v literatuře, kde jsou však většinou uváděny pro čisté prvky nebo základní materiály. Dalším způsobem jak data získat je pomocí specializovaného softwaru. A v neposlední řadě pomocí měření. Měřením dat

se zabývá od 40. let řada institucí. U slévárenských materiálů se dá říci, že je situace uspokojivá. To už ovšem neplatí pro materiály formovacích směsí. Hlavní příčinou je jejich velké množství a variabilita (chemické složení, zhuštění, vlhkost atd.). Vůbec nejhorší situace je u exotermických směsí, kde je potřeba také měřit vývin tepla exotermickou reakcí a rozdílnost mezi vlastnostmi před a po vyhoření. [4]

5.2.1 Citlivost doby tuhnutí na změnu termofyzikálních parametrů

Změna hodnoty jednotlivých termofyzikálních parametrů má různý stupeň vlivu na dobu tuhnutí. V práci [14] je ukázáno, že při odlévání oceli do pískové formy má největší vliv na dobu tuhnutí změna tepelné vodivosti (λ) (formovací směsi i materiálu odlitku), oproti tepelné kapacitě (c) a hustotě (ρ). Při zvýšení hustoty nebo tepelné kapacity o 50% oproti nominální hodnotě došlo ke snížení doby tuhnutí o 19%. Při stejném procentuálním zvýšení tepelné vodivosti došlo k redukci doby tuhnutí o 28%. Tyto výsledky nemohou být samozřejmě generalizovány, protože byly zjištěny pro konkrétní měření, avšak naznačují velikost vlivu jednotlivých parametrů.

Je zřejmé, že při změnách těchto parametrů pouze v obkladu nálitku dostaneme menší citlivost na dobu tuhnutí celého odlitku, avšak lokální vliv bude významný. V práci [9] byly tyto změny měřeny. Byl vytvořen jednoduchý vzorek ve tvaru kostky s nálitkem, do kterého byly umístěny termočlánky (měřící body), jak ukazuje Obrázek 5.3.



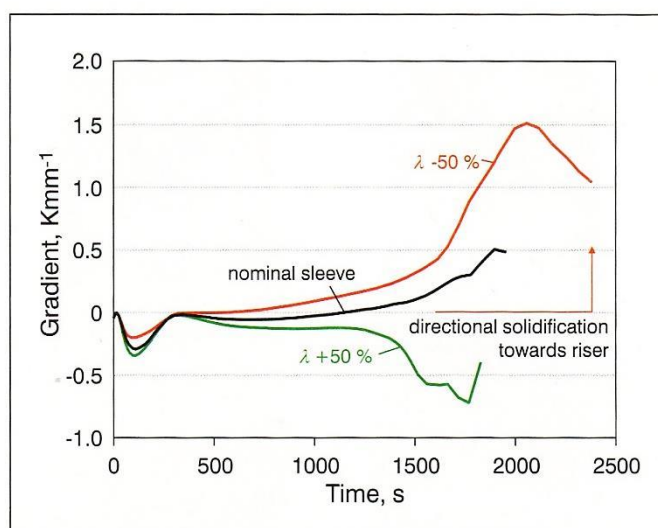
Obr. 5.3 Schéma umístění termočlánků [9]

Následně pak byly provedeny simulace, při kterých byly měněny parametry v rozmezí $\pm 50\%$ od nominální hodnoty. Výsledky jsou shrnuty v následující tabulce 5.1 a ukazují, že nejvíce jsou změnou ovlivněny body vyskytující se nejbližší ke stěně nálitku.

Sleeve properties	Riser neck solidification time, s						Sleeve interface	
	C1, s	±%	C2, s	±%	C3, s	±%	C4, s	±%
nominal	1920		1942		1951		1738	
λ : -50 %	2059	6.77	2135	9.05	2205	11.53	2333	25.48
λ : +50 %	1779	-7.94	1768	-9.83	1727	-12.97	1337	-30.03
ρ or c_p : -50 %	1951	1.57	1962	1.03	1977	1.30	1800	3.41
ρ or c_p : +50 %	1888	-1.69	1901	-2.16	1900	-2.69	1662	-4.61

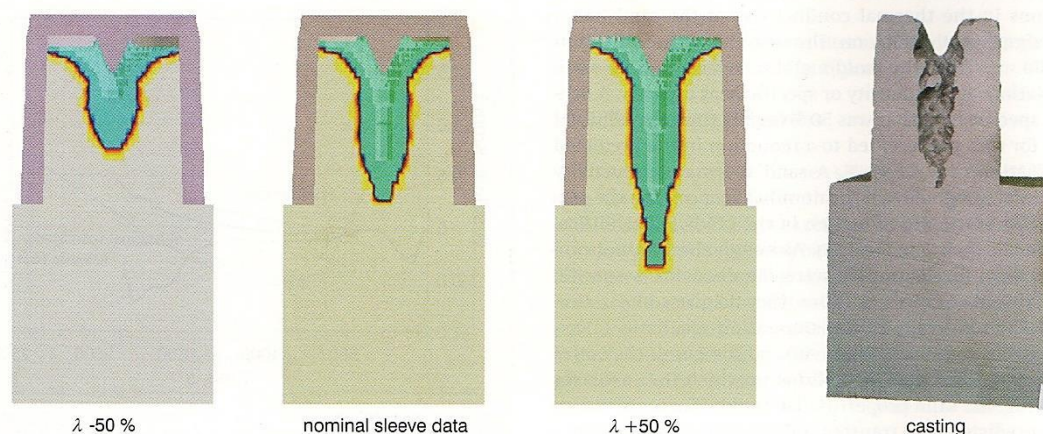
Tab. 5.1 Doba tuhnutí v závislosti na změně velikosti parametrů a poloze [9]

Dále lze z tabulky vyčíst, že opět největší vliv na dobu tuhnutí má změna velikosti tepelné vodivosti obkladu. Proto již dále bylo počítáno pouze se změnou tepelné vodivosti. Pro hlubší porozumění tuhnutí kovu v nálitku byl vytvořen graf závislosti vertikálního gradientu teploty mezi body C2 a C1 na čase, při různých hodnotách tepelné vodivosti. Kladná hodnota gradientu říká, že kov tuhne směrem k nálitku a tudíž je zajištěno usměrněné tuhnutí. Jak je vidět z grafu 5.1 při hodnotě $+50\% \lambda$ nabývá gradient záporné hodnoty a hrozí zde vznik porozity.



Graf 5.1 Efekt tepelné vodivosti nálitku na vertikální gradient teploty mezi body C2 a C1 [9]

Tyto výsledky potvrzuje vizualizace staženiny na obrázku 5.4. Praktické důsledky plynoucí z nepřesného určení tepelné vodivosti jsou, že při příliš nízké hodnotě jsou výsledky příliš optimistické a vedou k použití příliš malých nálitků, které jsou nedostačující. A naopak při hodnotě vysoké dochází ke zbytečnému předdimenzování a zvyšování nákladů.



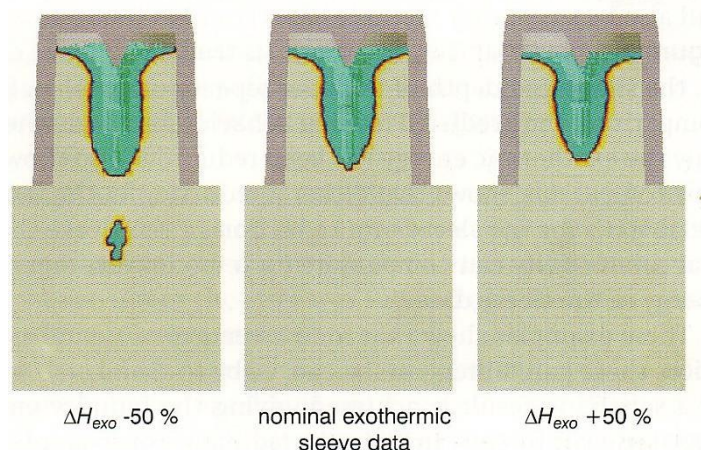
Obr. 5.4 Velikost staženiny v závislosti na změně tepelné vodivosti (λ) [9]

Další vlastnosti nálitků, u kterých je potřeba prověřit jejich vliv na dobu tuhnutí jsou součinitel přestupu tepla (α) a vyprodukované teplo exotermickým obkladem (ΔH_{exo}). V práci [9] byly provedeny obdobné simulace jako v předchozím případě, přičemž byly měněny nominální hodnoty těchto dvou parametrů v rozmezí $\pm 50\%$. Výsledky jsou shrnuty v tabulce 5.2.

Sleeve properties	Riser neck solidification time, s						Sleeve interface	
	C1, s	$\pm\%$	C2, s	$\pm\%$	C3, s	$\pm\%$	C4, s	$\pm\%$
nominal	2456		2484		2503		2152	
HTC: -50 %	2450	-0.24	2477	-0.28	2492	-0.44	2123	-1.35
HTC: +50 %	2468	0.49	2500	0.64	2525	0.88	2216	2.97
ΔH_{exo} : -50 %	2539	-4.32	2356	-5.2	2355	-5.91	1840	-14.50
ΔH_{exo} : +50 %	2406	3.38	2581	3.90	2615	4.47	2359	9.62

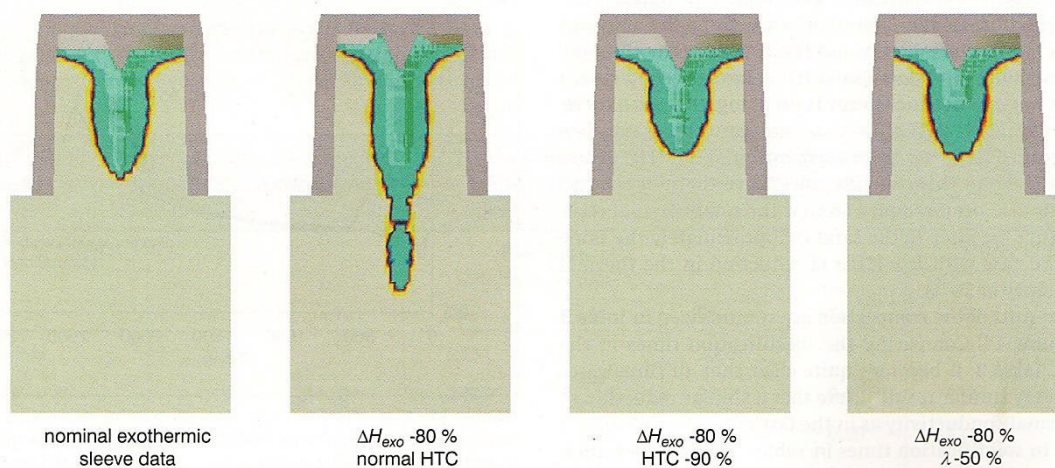
Tab. 5.2 Doba tuhnutí v závislosti na změně velikosti parametrů a poloze [9]

Z nich vyplývá, že změna součinitele přestupu tepla kov/stěna nálitku nebo stěna nálitku/forma má minimální vliv na dobu tuhnutí kovu v nálitku. Zato změna velikosti vyprodukovaného tepla exotermickým obkladem je významná. To potvrzuje i obrázek 5.5, kde je vyobrazena velikost stažení v závislosti na hodnotě $\pm 50\% \Delta H_{\text{exo}}$.



Obr. 5.5 Velikost staženiny v závislosti na změně velikosti vyprodukovaného tepla exotermickým obkladem (ΔH_{exo}) [9]

Další měření, která zde byla provedena, ukazují, že záměnou dvou různých parametrů, lze docílit podobných výsledků. To je ukázáno na obrázku 5.6, kde pokles hodnoty ΔH_{exo} může být vykompenzován 50% poklesem λ a nebo 90% poklesem α . To může vést k nesprávnému určení hodnot parametrů, při docílení uspokojivých výsledků. Avšak při odlévání při jiné geometrii odlitku, již může docházet k nepřesným či chybným výsledkům. Přesné určení parametrů, je tedy zásadní, pro zajištění realistické předpovědi pomocí simulace.[9]



Obr. 5.6 Velikost staženiny v závislosti na změně velikosti v závislosti na změně různých parametrů [9]

6 MĚŘENÍ DOBY TUHNUTÍ NÁLITKŮ

6.1 Popis a cíle měření

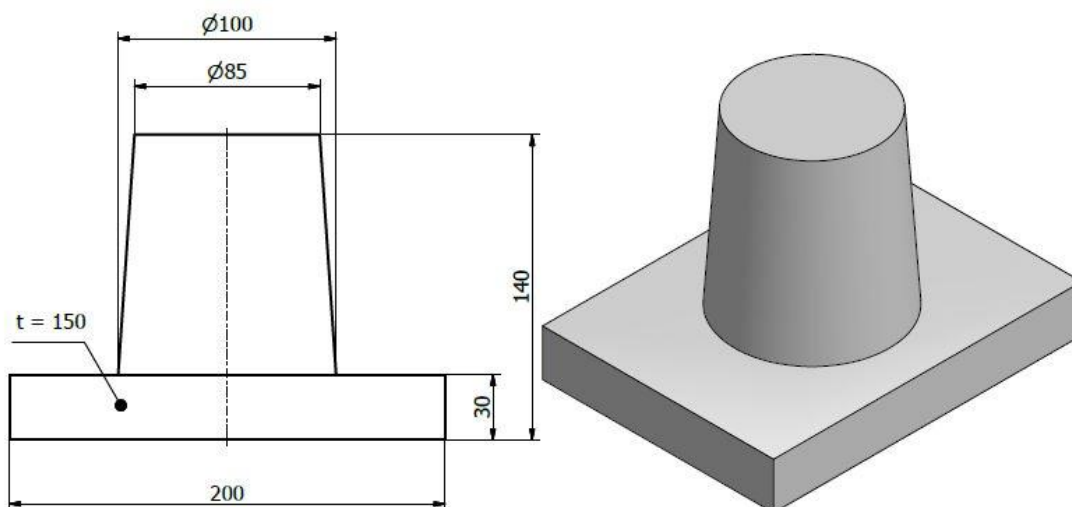
Cílem měření bylo zjistit, jak ovlivní dobu tuhnutí kovu v nálitku exotermický obklad. Data získaná díky tomuto měření následně poslouží, jako podklad pro numerickou simulaci. Tímto se pro budoucnost jasně definují termofyzikální vlastnosti určené exotermické směsi a při tvorbě složitějších odlitek se díky přesnější simulaci předejde vzniku vad.

Za účelem měření byly vytvořeny dvě formy totožných rozměrů. Jedna forma je opatřena nálitkem s exotermickým obkladem a druhá má náлитеk obyčejný. Do obou forem byly umístěny termočlánky, pomocí kterých byla naměřena závislost teploty na čase.

6.2 Realizace

6.2.1 Parametry odlitku

Pro měření byl navržen jednoduchý odlitek, který má tvar desky. Na prostředek desky je pak umístěn náлитеk mírně kuželového tvaru. Rozměry jsou uvedeny na obrázku 6.1a parametry v tabulce 6.1. Kvůli zjednodušení výroby modelu se geometrie obyčejného nálitku mírně odlišuje od geometrie nálitku s exotermickým obkladem, jak je patrné z geometrických schémat.

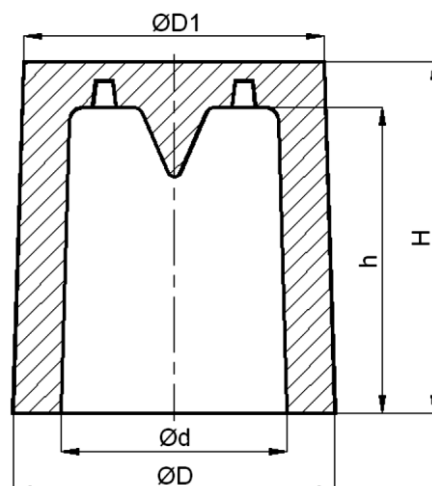


Obr. 6.1 Geometrie odlitku

	Odlitek (deska)	Náлитеk
Hmotnost [kg]	6,53	5,37
Objem [dm ³]	0,90	0,74
Modul [cm]	1,38	1,96

Tab. 6.1 Parametry odlitku

Parametry použitého exotermického nástavce pro druhou formu jsou na obrázku 6.2 a v tabulce 6.2. Jednalo se obklad firmy HA Kovochem z materiálu Feral L s označením EKM 100/130 W.



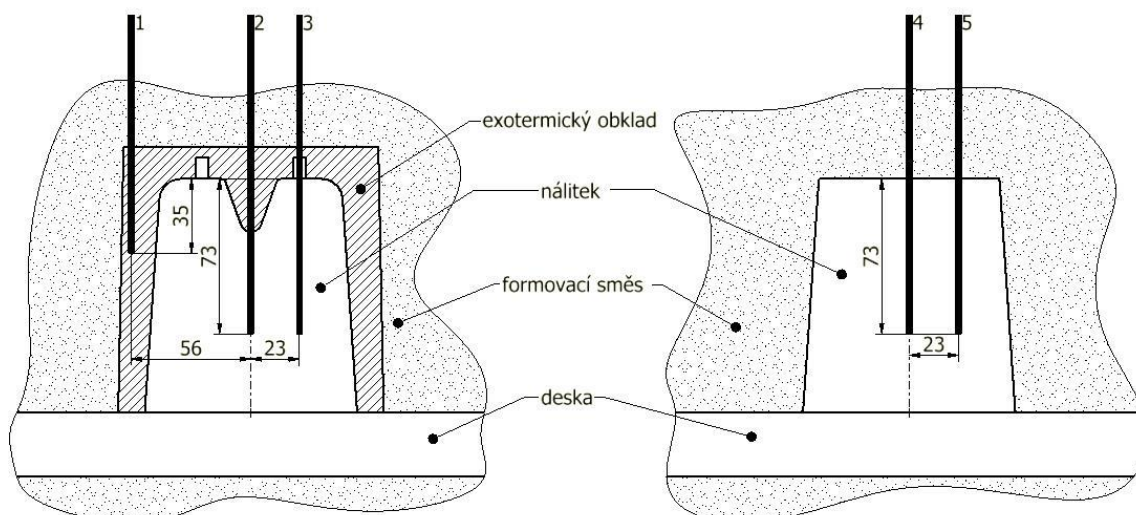
Obr. 6.2 Schéma exotermického obkladu [10]

D [mm]	H [mm]	D1 [mm]	d [mm]	h [mm]	Modul [cm]	Objem [dm ³]	Hmotnost [kg]
127,5	133	119,5	97	118	2,8	0,8	0,9

Tab. 6.2 Parametry exotermického nástavce [10]

6.2.2 Umístění teplotních čidel (termočlánků)

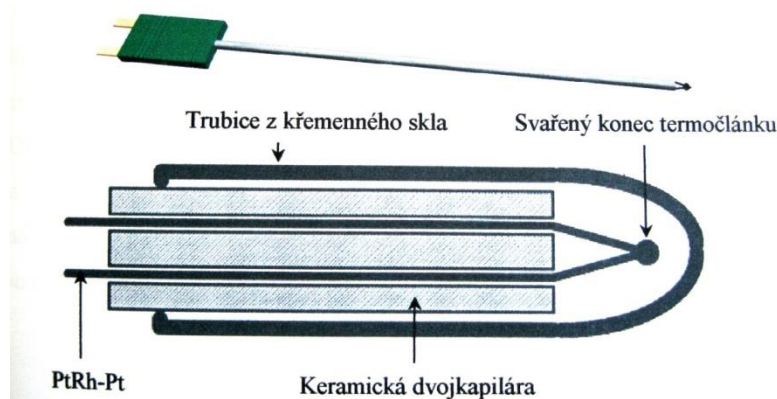
Pro měření teplot bylo použito pěti termočlánků typu S(PtRH10-Pt). Byly rozmístěny podle schématu na obrázku 6.3.



Obr. 6.3 Schéma zapojení termočlánků v nálitku s exotermickým obkladem (nalevo) a nálitku obyčejného (napravo)

termočlánek číslo 1 byly umístěn do stěny formy obsahující exotermický obklad, aby se zjistilo, jaký bude průběh teploty ve stěně obkladu, termočlánky číslo 2-5 byly vloženy přímo do prostoru nálitku. Všechny termočlánky byly vloženy do skleněných trubiček z křemenného skla. Ty sloužily pro jejich

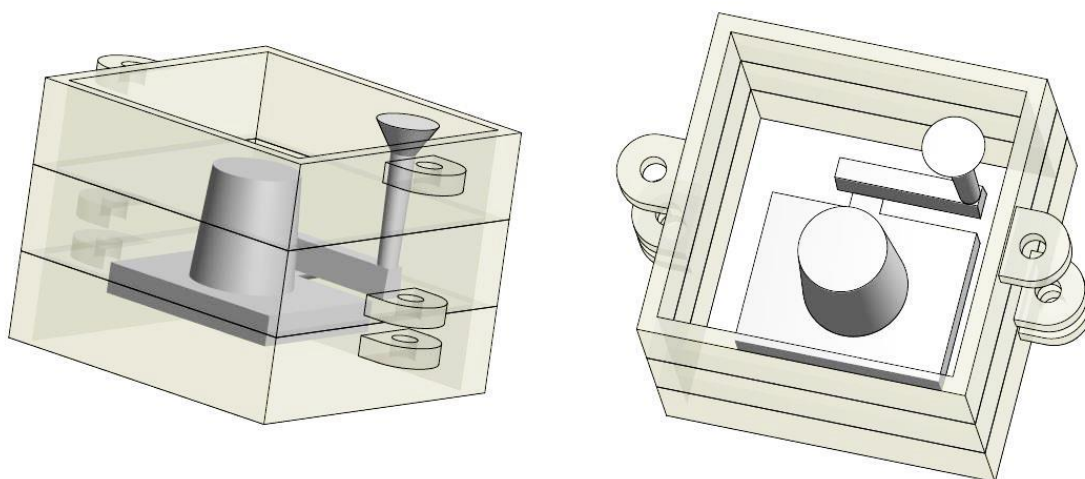
ochranu a opětovné použití. S výjimkou termočlánku číslo 1, který byl vložen do trubičky o průměru 6 mm, měly trubičky průměr 8 mm. Proto musíme při vyhodnocování dat počítat s určitou zpožděnou odezvou termočlánků.



Obr. 6.4 Uložení termočlánku ve skleněné trubicí[4]

6.2.3 Příprava formy

Každý odlitek byl samostatně umístěn do rámu se svou vlastní vtokovou soustavou dle obrázku 6.4. Jednalo se o dvoudílnou formu o vnitřních rozměrech 295x295x85. Nálitek byl konstruován jako uzavřený. Zaformování modelů probíhalo do bentonitové směsi na syrovo za pomoci ruční pěchovačky.



Obr. 6.5 Umístění odlitku s vtokovou soustavou v rámu

Zhotovení formy s obyčejným nálitkem:

Nejprve byla zhotovena spodní část formy s odlitkem desky. Pro vytvoření dutiny byla použita jednoduchá dřevěná modelovací deska s úkosem pro snadnější vyjmutí z formy a o rozměrech 200x150x30 mm. Dále byla vytvořena horní část formy. Zde byl umístěn nálipek a vtoková soustava, která se skládala ze struskováku a vtokového kužele. Po zaformování byly vyjmuty modely a pomocí lancetky byl zhotoven licí zářez vedoucí od struskováku k desce odlitku a rozšířen licí kužel, pro snadnější odlití. Nakonec byly pomocí

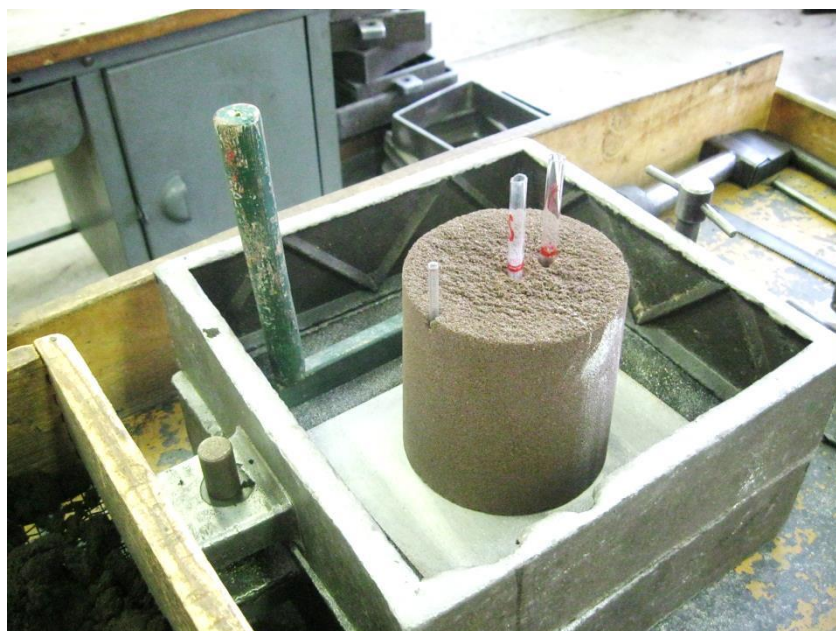
ruční vrtačky vyvrtány otvory dle schématu na obrázku 6.3 pro umístění skleněných trubiček pro termočlánky.



Obr. 6.6 Výroba formy. Spodní část (vlevo) a horní část (vpravo)

Tvorba formy s nálitkem s exotermickým obkladem:

Dolní polovina formy byla realizována stejným způsobem jako forma první. Při zhotovení druhé části bylo potřeba zaformovat exotermický obklad. V exotermickém obkladu byly již předvrtané otvory pro termočlánky dle schématu na obrázku 6.3, do kterých byly vloženy skleněné trubičky, což působilo mírné obtíže při formování a bylo potřeba dbát zvýšené opatrnosti, aby se nerozbily. Po zaformování byly vyjmuty modely a opět vytvořeny pomocí lancetky licí drážka a rozšířen licí kužel.



Obr. 6.7 Rozmístění modelů vtokové soustavy a exotermického obkladu v horní části formy před zaformováním

6.2.4 Odlití forem

Hotové formy byly přeneseny na licí pole do školní slévárny. Formy byly usazeny do pískového lože dle obrázku 6.8, které je stabilizovalo a také zamezuje prolomení formy pod vahou kovu. Dále byly zatíženy litinovými bloky, aby nedošlo při lití k rozevření forem tlakem litého kovu.



Obr. 6.8 Umístění forem na licím poli

Do skleněných trubiček, které byly umístěny dle schématu na obrázku 6.3, byly vloženy termočlánky typu S(PtRh10-Pt). Termočlánky byly napojeny na kompenzační vedení, které bylo připojeno na AD převodník OMB-DAQ-55 s rozšiřujícím modulem OMB-PDQ2 a dále do počítače viz. Obrázek 6.9, kde byl signál zpracováván a zaznamenáván.



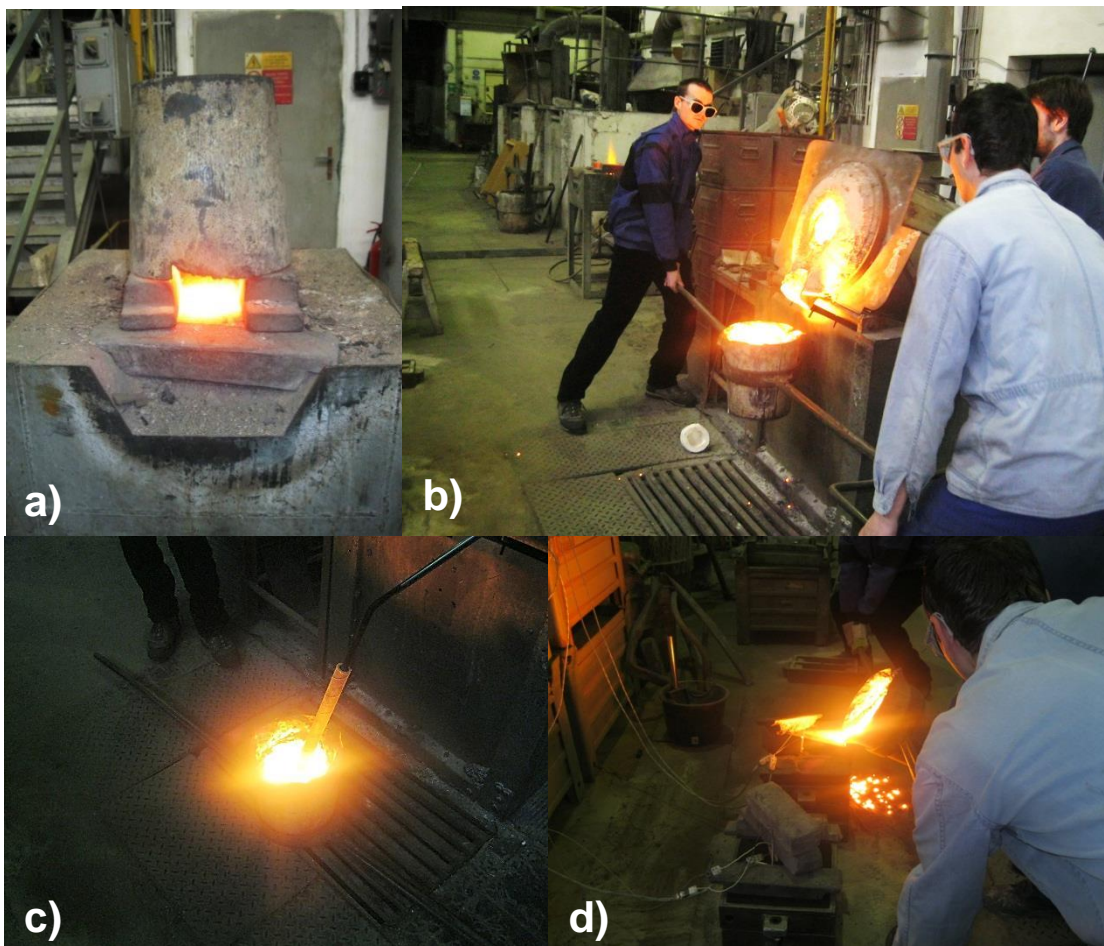
Obr. 6.9 AD převodník zapojený do PC

Pro samotné odlití byla použita litina s lupínkovým grafitem o chemickém složení dle tabulky 6.3. Pro odlití dvou forem bylo spočítáno a následně nataveno 26 kg kovu. Jako vsázka byly použity staré trhací tyče a dva litinové bloky. Natavení probíhalo v elektrické indukční peci o maximálním obsahu 40kg.

Prvek	C	Si	Mn	S	P	Cr	Cu
Množství [%]	3,22	2,15	0,48	0,019	0,037	0,02	0,1

Tab. 6.3 Chemické složení odlévané litiny

Samotné odlití bylo provedeno pomocí ruční pánve a doby lití byla přibližně 15s. Licí teplota byla přibližně 1350 °C. Nejprve byla odlita forma bez obkladu a následně forma s exotermickým obkladem.



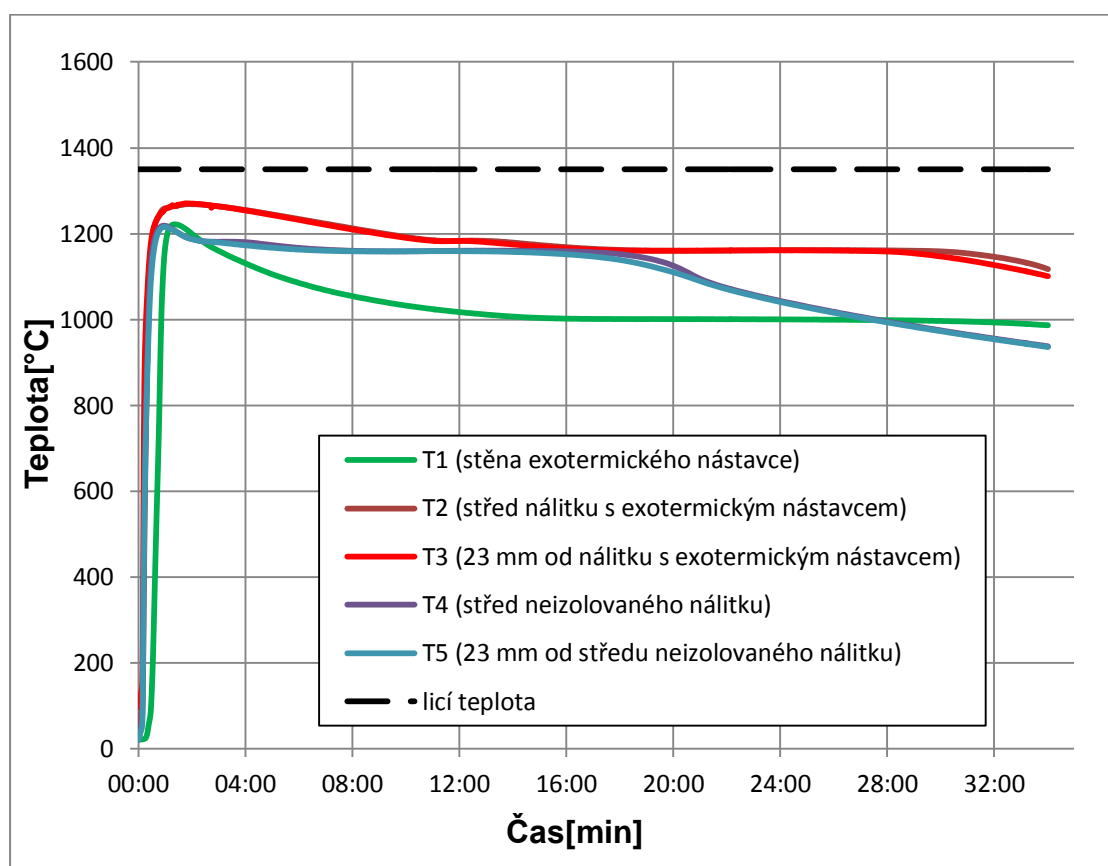
Obr. 6.10 Průběh experimentu: a) předehřev kelímku pro lití, b) vylévání kovu z pece c) měření teploty lití, d) samotné odlití forem



Obr. 6.11 Výsledné odlitky: s exotermickým obkladem (nalevo) a obyčejný (napravo)

6.3 Vyhodnocení měření

Zpracování dat bylo provedeno pomocí programu DaqView 7.0, který zaznamenával teploty po jedné sekundě a následně je ukládal do textového souboru. Vyhodnocení bylo pak realizováno pomocí programu Excel. Data byla nejprve srovnána tak, aby byl začátek lití obou forem ve stejný okamžik. Dále byly všechny hodnoty zaneseny do grafu 6.1 pro jejich srovnání.

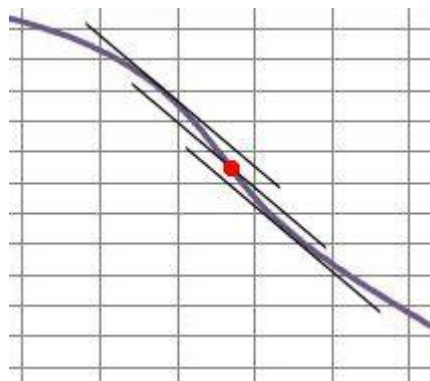


Graf 6.1 Průběh teplot v určených místech měřených termočláanky

Z grafu 6.1 lze okamžitě vyčíst, že teplota v nálitku oproti lici teplotě poklesla o asi o 130°C v případě obyčejného nálitku. To je způsobeno poměrně dlouhou dobou lití a také odvodem tepla do stěn formy. U nálitku s exotermickým obkladem, již tak výrazný pokles nepozorujeme (cca 80°C), zde již byl zapálen obklad, což zmenšilo velikost teplotního gradientu a snížilo teplené ztráty.

6.3.1 Doba tuhnutí a faktor posunutí modulu

Doba tuhnutí byla určena, jako časový interval od počátku lití po konec eutektické přeměny, kdy za konec přeměny je považován inflexní bod za samotnou eutektickou přeměnou. Inflexní bod byl určen z grafu, pomocí geometrické metody tečen znázorněné na obrázku 6.11 hledaný inflexní bod je znázorněn červeně.



Obr. 6.12 Určení inflexního bodu pomocí metody tečen

Vzhledem k nepřesnosti metody a vzhledem k tomu že jsou křivky naměřené ve středu nálitku téměř totožné s křivkami naměřenými 23 mm od středu, byly doby tuhnutí určeny pouze pro střed nálitku. Metodou byla i odhadnuta teplota solidu na 1100°C. Z dob tuhnutí byl pak následně vypočten faktor posunutí modulu (f_{exo}), který je určen z doby tuhnutí (τ_{exo}) exotermicky obloženého nálitku vůči době tuhnutí (τ_{ob}) nálitku obyčejnému dle následujícího vzorce:

$$f_{exo} = \sqrt{\frac{\tau_{exo}}{\tau_{ob}}} \quad (6.1)$$

Doby tuhnutí a faktory posunutí modulu jsou pak shrnuty v následující tabulce 6.4.

	obyčejný nálitok	nálitok s exotermickým obkladem
doba tuhnutí [s]	1240	2070
posun modulu [-]	1	1,29

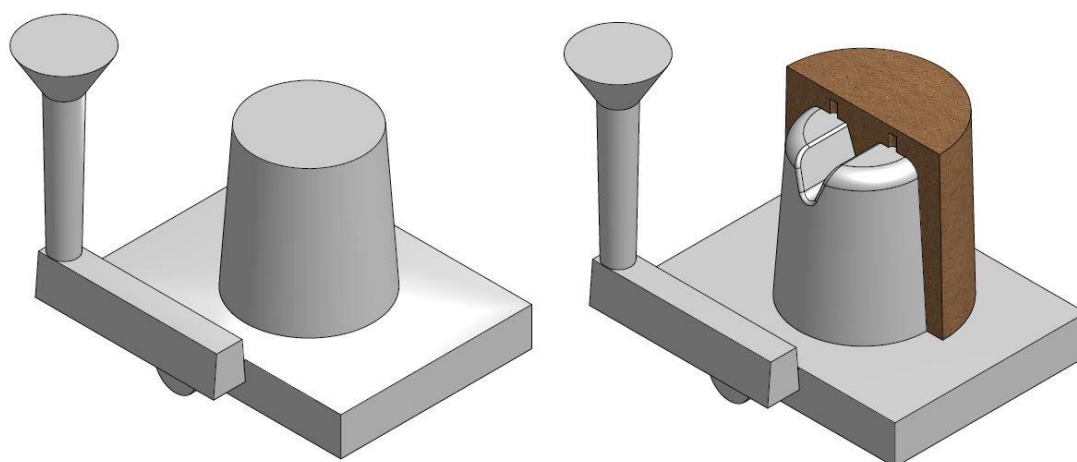
Tab. 6.4 Doba tuhnutí a posuv modulu

7 OPTIMALIZACE SIMULACE VZHLEDEM K REÁLNÉMU MĚŘENÍ DOBY TUHNUTÍ

Na základě měření byly provedeny simulace. Byly simulovány obě formy z předchozího měření. Cílem simulací bylo se co nejvíce se přiblížit reálnému průběhu tuhnutí kovu v nálitku.

7.1 Vstupní data simulace

Vstupní data byla volena tak, aby odpovídala co nejvíce realitě. Pro simulaci byl využit program Quickcast, který je založena na výpočtové metodě konečných diferencí. Geometrie odlitku, nálitku i vtokové soustavy byla totožná, jako při měření a modely byly vytvořeny v programu Autodesk Inventor viz. obrázek 7.1.

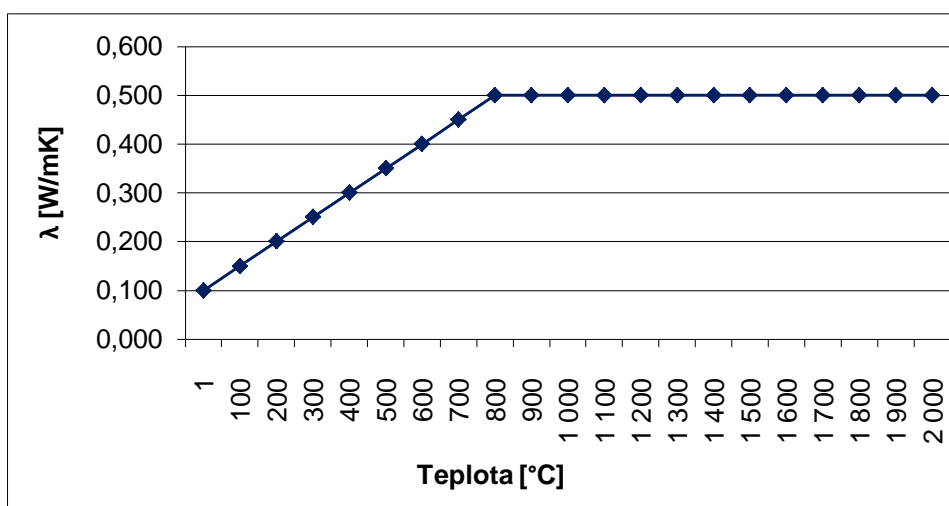


Obr. 7.1 Geometrie pro simulaci

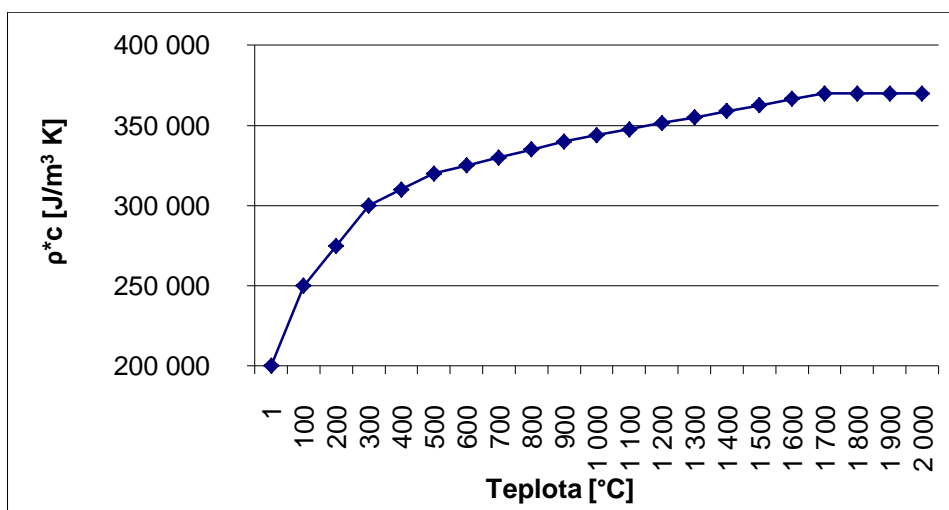
Pro definici termofyzikálních dat materiálu v simulované soustavě byla využita databáze programu. Jako formovací směs byl zvolen materiál s označením GREEN_SAND. Jako materiál odlitku litina s označením GG_25, která byla následně upravena, tak aby její chemické složení odpovídalo litině použité při experimentu viz tabulka 6.3. Pro definici exotermické směsi byla použita data získaná od výrobce obkladu HA Kovochem viz následující tabulka a grafy.

Zápalná teplota [°C]	550
Doba hoření [s]	1 000
Rychlost hoření [mm/s]	0,132
Vyprodukované teplo [J/kg]	3 000 000

Tab. 7.1 Definice exotermické reakce použitého obkladu



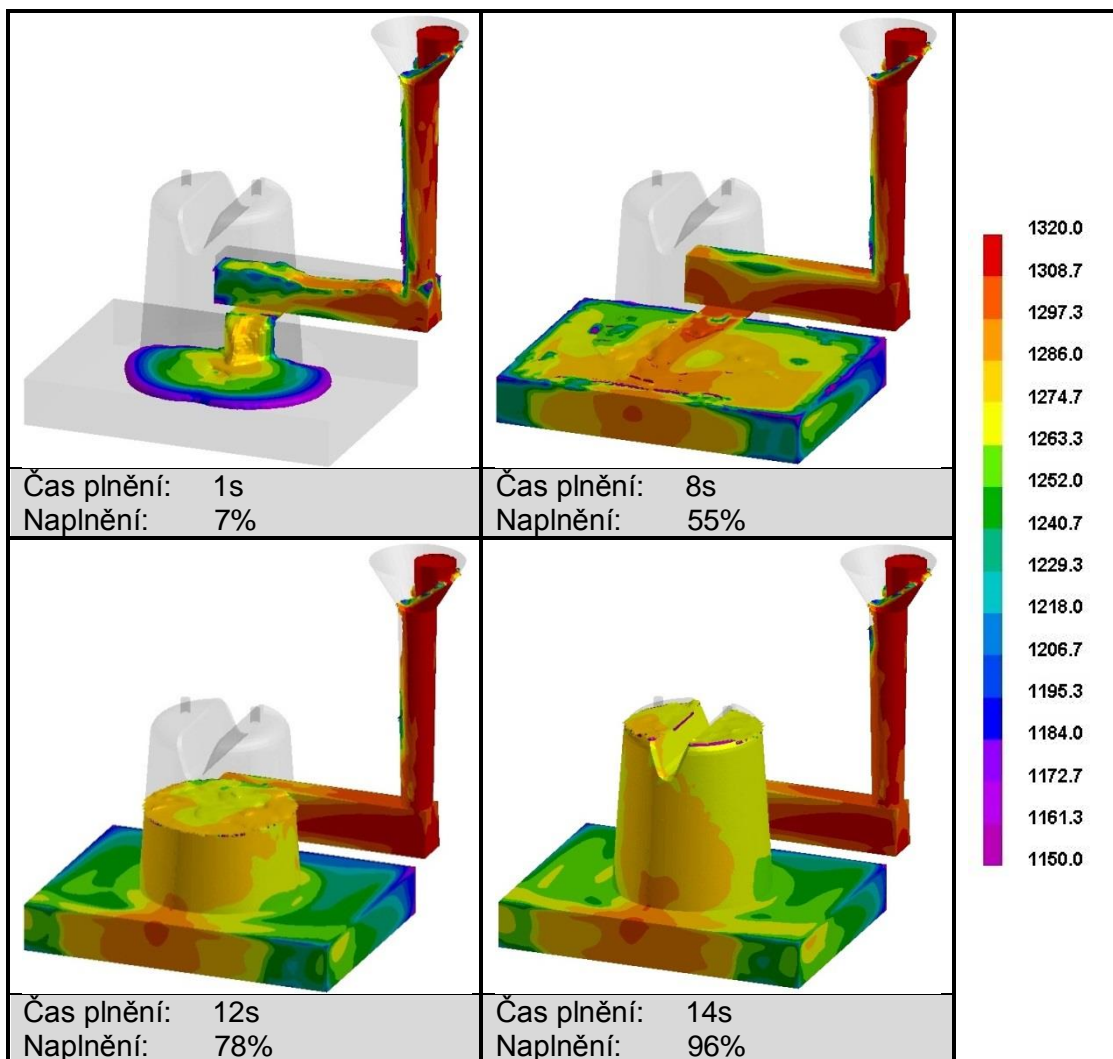
Graf 7.1 Tepelná vodivost v závislosti na teplotě použitého exotermického obkladu



Graf 7.2 Závislost hustoty a měrné tepelné kapacity na teplotě použitého exotermického obkladu

7.2 Výsledky první simulace

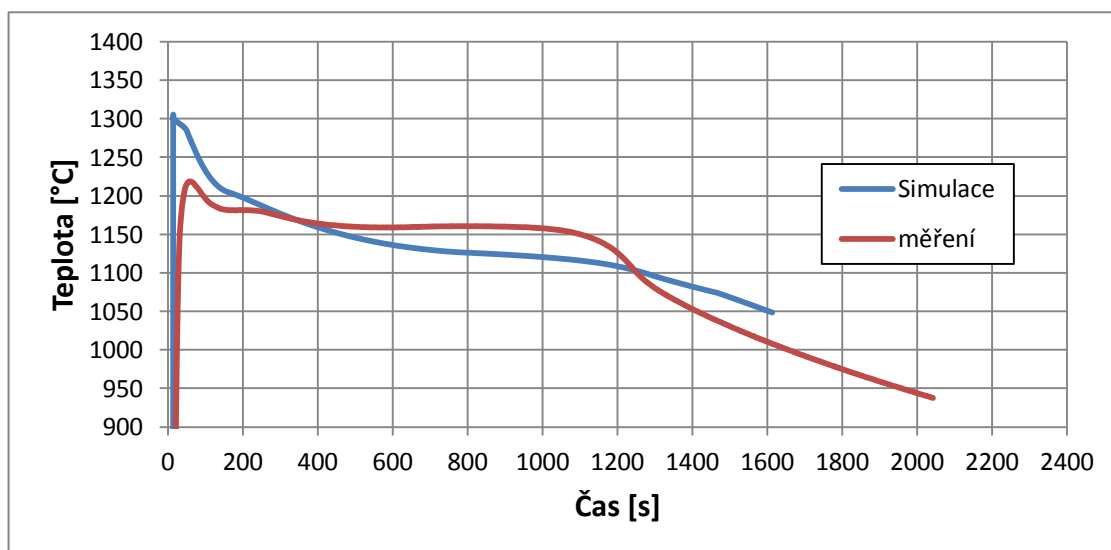
Proudění kovu při plnění formy je znázorněno na obrázku 7.2.



Obr. 7.2 Plnění formy

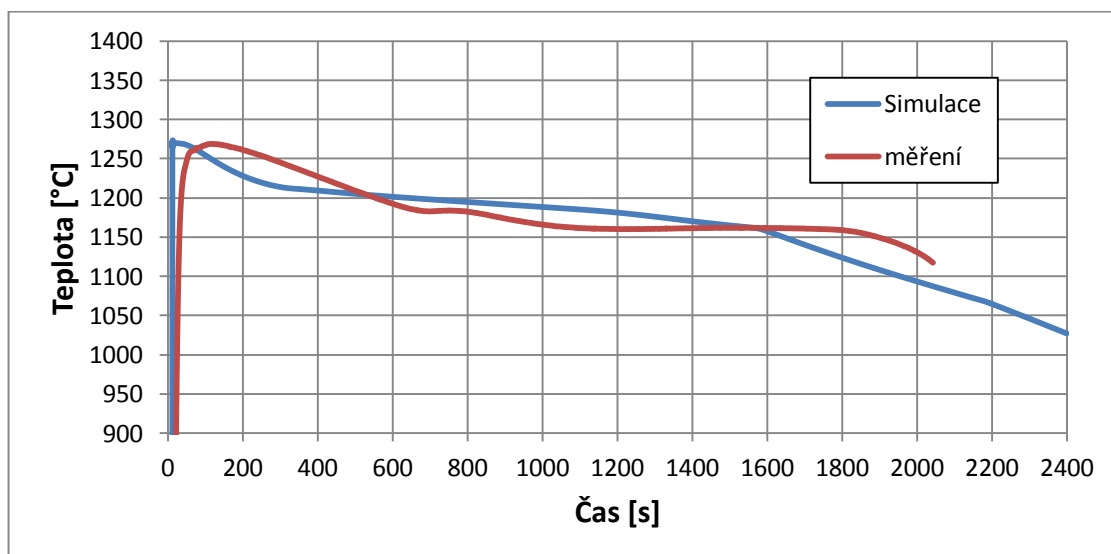
7.2.1 Srovnání průběhů teplot simulace s měřením v daných bodech

Aby bylo možno srovnat teploty, byly při simulaci nadefinovány „fiktivní“ termočlánky ve stejných místech jako při experimentu viz obrázek 6.3. Vzhledem k tomu, že průběhy teplot naměřené ve středu nálitku a naměřené ve vzdálenosti 23 mm od středu jsou téměř identické, byly porovnávány pouze průběhy naměřené ve středu nálitku. Dále byl srovnán průběh teploty v exotermickém obkladu. Porovnané průběhy teplot jsou znázorněny v následujících grafech.

Srovnání průběhů teplot simulace a měření ve středu obyčejného nálitku:

Graf 7.3 Srovnání průběhů teplot simulace a měření ve středu obyčejného nálitku

Graf ukazuje, že křivky se příliš neshodují. U křivky tuhnutí získané pomocí měření, můžeme pozorovat výraznější pokles teploty po odlití a to až o 150°C. U křivky získané ze simulace je tento pokles třikrát menší a to pouze 50°C. Dále měřená křivka ukazuje pozvolnější náběh maximální teploty, to je však způsobeno uložením termočládku ve skleněné trubičce. Křivky však celkově vykazují obdobný trend.

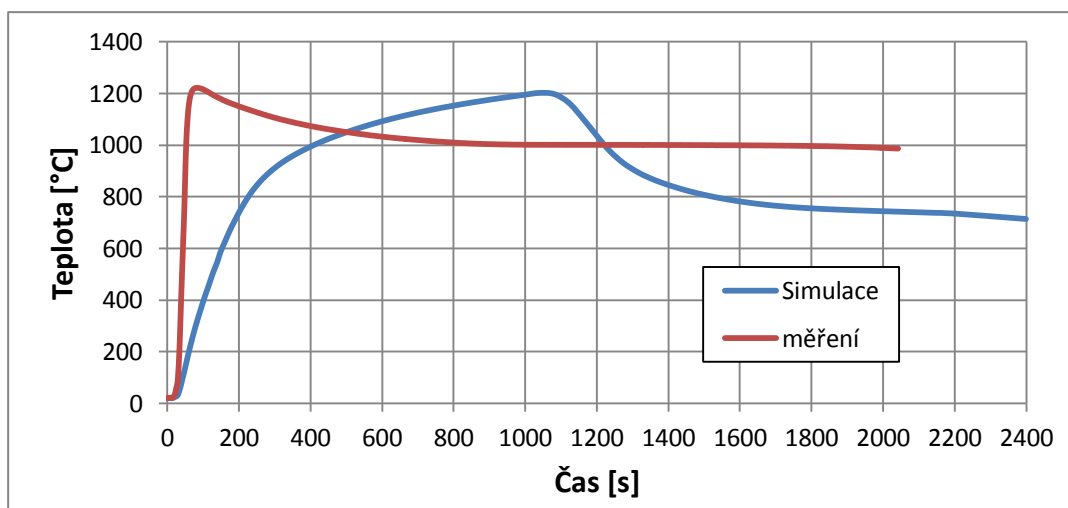
Srovnání průběhů teplot simulace a měření ve středu exotermického nálitku:

Graf 7.4 Srovnání průběhů teplot simulace a měření ve středu exotermického nálitku

Z grafu již lze na první pohled vidět, že bylo docíleno větší shody křivek nežli v předchozím případě. Dosažené maximální teploty ihned po odlití jsou téměř

stejně. Opět můžeme pozorovat zpoždění náběhu teploty u křivky získané měřením, což je způsobeno taktéž uložením termočládku ve skleněné trubičce. Křivky opět vykazují obdobný trend. Celkově bylo docíleno lepší shody nežli v případě obyčejného nálitku, což bude díky poměrně přesným datům exotermického obkladu získaných od výrobce.

Srovnání průběhů teplot simulace a měření ve stěně exotermického obkladu:



Graf 7.5 Srovnání průběhů teplot simulace a měření ve stěně exotermického obkladu

U posledního srovnání bylo docíleno nejmenší shody průběhu křivek. Pouze maximální dosažené teploty jsou téměř stejné.

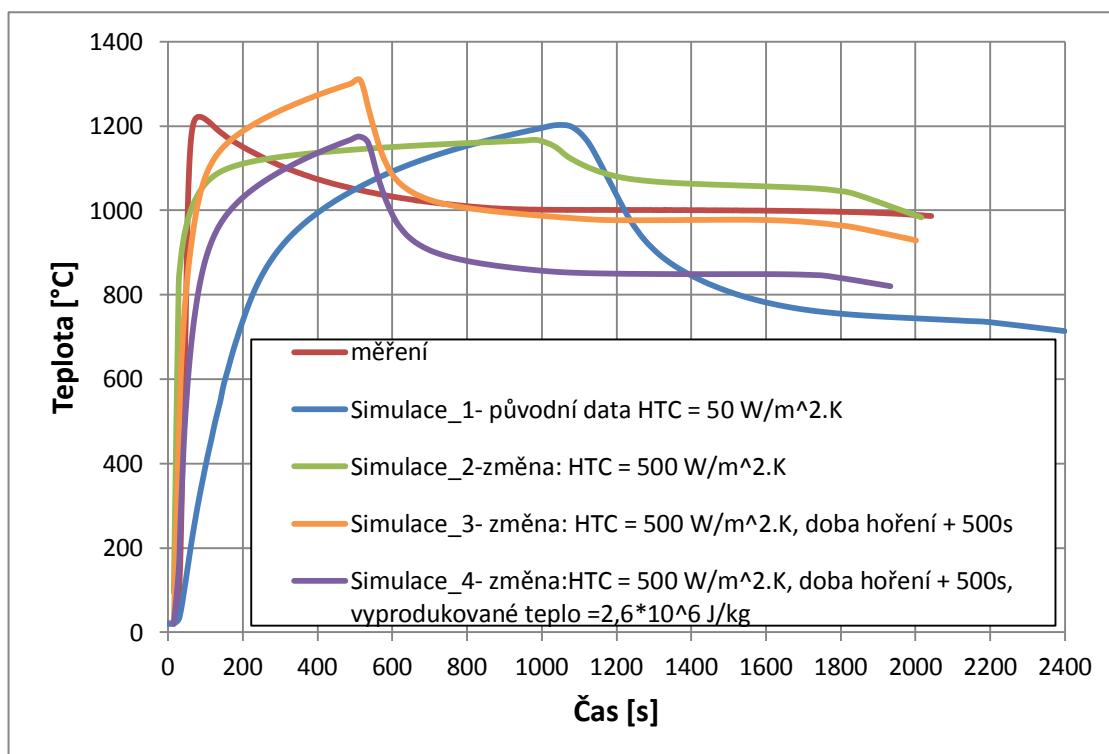
Hlavní důvodem rozdílů v průbězích teplot je nesprávná definice velikosti jednotlivých termofyzikálních dat. Pro simulace byla použita obecná data z databáze programu nebo od výrobce, která byla naměřena za určitých specifických podmínek, které se nemusí úplně shodovat s podmínkami, které byly při experimentu. Zejména se jedná o vlastnosti formovací směsi, která může být rozdílně upěchovaná, může mít rozdílnou vlhkost nebo i složení. Materiály odlitku mohou vykazovat různé kvalitativní rozdíly, což má vliv na precipitaci. Průběh hoření exotermického obkladu bylo definováno pouze pomocí 4 parametrů uvedených v tabulce 7.1. Pro přesnější popis by bylo potřeba provést termickou analýzu.

Další důvody, proč se křivky neshodují, můžeme hledat na straně experimentu. Jak již bylo zmíněno, termočládky byly uloženy do skleněných trubiček, které způsobovaly zpožděnou reakci na změnu teploty. Při odlévání dvou forem za sebou patrně došlo k poklesu licí teploty. Také by bylo potřeba provést více měření, aby byla eliminována náhodná chyba.

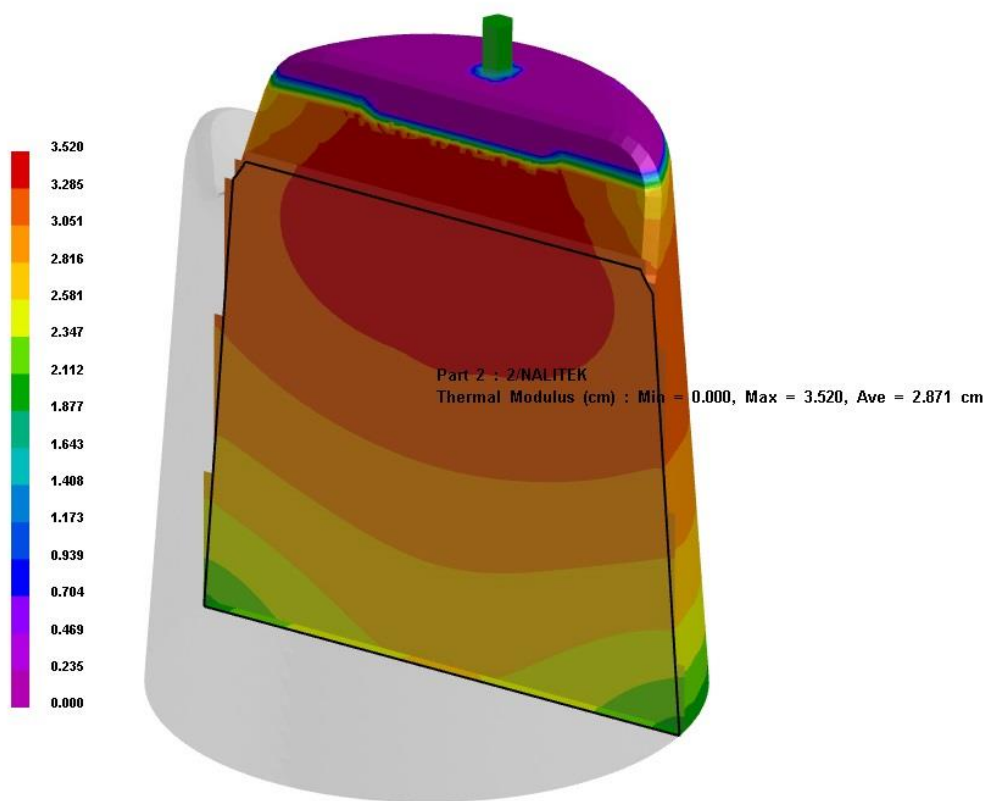
7.3 Odladění křivky tuhnutí ve stěně exotermického obkladu

V následující části byla kalibrována křivka průběhu teplot ve stěně exotermického obkladu. Kalibrace je znázorněna v grafu 7.6. Byla měněna α (HTC) mezi kovem a exotermickým obkladem, doba hoření a vyprodukované teplo. I po kalibraci nebylo dosaženo úplně stejných trendů křivek, což je velmi

složitě a časově náročně. Dá se říci, že nejvíce se k měřené křivce blíží křivka získaná ze simulace_4.



Graf 7.6 kalibrace průběhu teplot ve stěně exotermického obkladu



Obr. 7.3 Průměrná hodnota modulu nálitku

Nakonec však není úplně důležité, aby si křivky odpovídaly, ale aby byl správný výsledný modul nálitku. Na obrázku 7.3 je pomocí simulace_4 vypočtená průměrná hodnota modulu 2,87 cm, což téměř odpovídá hodnotě udávané výrobcem 2,8 cm viz tabulka 6.2.

Závěrem se dá říci, že termofyzikální data by se dala v omezené míře použít i pro simulaci složitějších odlitků. Avšak nelze se na ně úplně spolehnout. Pro zpřesnění by bylo potřeba provést jejich další optimalizace. Dále by bylo přínosné srovnání geometrie staženiny reálného odlitku se staženinou odsimulovanou. Na další optimalizace však již nevyšel čas.

ZÁVĚR

Bakalářská práce se snaží o shrnutí znalostí o termofyzikálních vlastnostech a chování exotermických obkladových hmot nálitků s následným ověřením reálného vlivu těchto vlastností na tuhnutí kovu výpočty pomocí numerické simulace.

V oblasti slévárenských slitin se dá říci, že znalost termofyzikálních dat je na dobré úrovni. Horší situace však panuje na poli formovacích materiálů. Tyto materiály se vyznačují velkou variabilitou vlastností. Což může být vliv chemického složení, zhuštění směsi nebo vlhkost směsi. To je příčinou nedostatečné znalosti termofyzikálních vlastností u těchto materiálů. Ještě horší situace je u materiálů exotermických, kde je potřeba navíc definovat vývin tepla při exotermické reakci.

Termofyzikální parametry mají zásadní vliv na správnost počítačových simulací tuhnutí kovu ve formě. Mezi základní parametry patří tepelná vodivost (λ), hustota (ρ), měrná tepelná kapacita (c) a součinitel přestupu tepla (α). Všechny uvedené parametry jsou funkcí teploty. U exotermických směsí se dále definuje vyprodukované teplo (ΔH_{exo}). Ze simulací popsaných v 5. kapitole vyplývá, že doba tuhnutí kovu v nálitku je nejvíce citlivá na změnu velikosti tepelné vodivosti. Při použití exotermického obkladu je pak doba tuhnutí dále nezanedbatelně citlivá na vyprodukované teplo tímto obkladem.

Z měření, kde byly srovnávány 2 geometricky totožné odlitky, z nichž jeden měl nálitek obyčejný vytvořený z obyčejné formovací směsi a druhý měl nálitek obložený exotermickým obkladem, vyplývá, že doba tuhnutí ve středu nálitku při použití exotermického obkladu byla prodloužena téměř dvojnásobně. A byl docílen posun modulu 1,29. Následné srovnání naměřených průběhů teplot s průběhy teplot získanými pomocí numerické nevykazuje příliš velkou shodu. Je to hlavně způsobeno nesprávnou definicí velikosti jednotlivých termofyzikálních parametrů. Ty byly definovány pouze přibližně pomocí databáze simulačního programu. Pro definici exotermického obkladu byla použita data dodaná výrobcem. Pro lepší shodu simulace s měřením by bylo potřeba data odladit například pomocí inverzní metody. To je však velmi pracné a časově náročné.

Do budoucna, je tedy potřeba dále zpřesňovat termofyzikálních data jednotlivých materiálů, zejména pak materiálů izolačních a exotermických.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. DVOŘÁČEK, Milan. Technologie II. 3. dopl. vyd. Brno :Akademické nakladatelství CERM, 2004. s. 238. ISBN 80-214-2683-7
2. CAMPBELL, J. Castings. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006. s. 288. ISBN 0-7506-4790-6.
3. Návrh odlitek a vtokové soustavy – Nálitky [online]. [vid. 2013-03-16]
Dostupné z: http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TE1/cvic_odlitek.pdf
4. KRUTIŠ, V. Vliv tepelného ošetření nálitků na tuhnutí kovu. Disertační práce v oboru "Strojírenská technologie". Brno: VUT-FSI, Ústav materiálového inženýrství. 2003. S. 187
5. PAVELEK, Milan, Základy přenosu tepla. Přednášky z předmětu termomechanika [online]. [vid. 2013-04-10]
Dostupné z: http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/termo/15_Prenos.pdf
6. PAVELEK, Milan, Přenos tepla vedením (kondukcí). Přednášky z předmětu termomechanika [online]. [vid. 2013-04-10]
Dostupné z: http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/termo/16_Vedeni.pdf
7. PAVELEK, Milan, Přenos tepla konvekcí (prouděním). Přednášky z předmětu termomechanika [online]. [vid. 2013-04-10]
Dostupné z: http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/termo/17_Konvekce.pdf
8. PAVELEK, Milan, Přenos tepla zářením (radiací). Přednášky z předmětu termomechanika [online]. [vid. 2013-04-10]
Dostupné z: http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/termo/19_Zareni.pdf
9. ANTHONY, C. aj. Advanced thermo-physocal data for simulation – the importance of accurate sleeve properties. Giessereiforschung, 2007, č. 1, s. 34-43.
10. HA Kovochem [online]. [vid. 2013-05-11]
Dostupné z: <http://www.hakovochem.cz/index.php?id=20>
11. Firemní materiál. FOSECO
12. Katalog. KVARTEX. 1996
13. REHSE, H., ZEMÁNEK, R. Praktické zkušenosti s používáním mininálitků a nové trendy v této oblasti. Slévárenství, 2003, č. 7, s. 276-282.
14. OVERFELT, T.: Sensitivity of steel plate solidification model to uncertainties in thermophysical properties, modeling of casting, welding and advanced solidification processes VI. 1993, s. 663-670

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
δ	mm	šířka dvoufázového pásma
α	°	úhel stupně usměrnění
V	m^3	objem
β	-	poměrné smrštění
x	-	koeficient nehospodárnosti
τ	s	čas tuhnutí
M	cm	modul odlitku/nálitku
k	m/s	materiálová konstanta tuhnutí
S	m^2	povrch
η	-	účinnost
Q	J	teplo
m	kg	hmotnost
c	J/kg.K	měrná tepelná kapacita
T	°C	teplota
\dot{Q}	W	tepelný tok
λ	W/m.K	součinitel tepelné vodivosti
\vec{n}	m	normálový vektor
ρ	kg/m^3	hustota
\dot{Q}^*	W/m^3	vnitřní zdroj tepla
h	m	šířka stěny
α (HTC)	$W/m^2.K$	součinitel přestupu tepla
v	m/s	rychlost
σ	$W/m^2.K^4$	Stefan-Boltzmannova konstanta
ϵ	-	emisivita
a	m^2/s	součinitel teplotní vodivosti
ΔH_{exo}	J/kg	vyprodukované teplo exotermickým obkladem
M_{AL}	-	relativní atomová hmotnost hliníku
q_r	J/mol	reakční teplo
f	-	faktor posunutí modulu