



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VLIV EXOTERMICKÝCH OBKLADŮ NA TUHNUTÍ SLITIN HLINÍKU

INFLUENCE OF EXOTHERMIC SLEAVES ON SOLIDIFICATION OF ALUMINIUM ALLOYS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ROMAN ZAJÍČEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JAROMÍR ROUČKA, CSc.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Roman Zajíček

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Slévárenská technologie (2301T014)**

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 diplomové práce:

Vliv exotermických obkladů na tuhnutí slitin hliníku

v anglickém jazyce:

Influence of exothermic sleeves on solidification of aluminium alloys

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Na zkušebních odlitcích experimentálně ověřit vliv exotermických obkladů nálitků na časový průběh exotermické reakce, na tepelné poměry v nálitku a na dobu tuhnutí.

Cíle diplomové práce:

Vyhodnocení teplotních polí v nálitcích a vlivu exotermického nálitku na prodloužení doby tuhnutí. Implementace výsledků do numerické simulace.

Seznam odborné literatury:

1. CAMPBELL, J. Castings. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006, ISBN 0-7506-4790-6.
2. Krutiš, V. Vliv tepelného ošetření nálitků na tuhnutí kovu. Disertační práce v oboru "Strojírenská technologie". Brno: VUT-FSI, Ústav strojírenské technologie. 2003.
3. SW ProCast, fy. MecasEsi Plzeň.
4. Aluminium Casting Technology Handbook. Edited by DL Zalensas, 2th ed. Des Plaines: AFS, 1993. ISBN 0-87433-157-9.
5. HASSE, S. Guss- und Gefuegefehler. Berlin: Schiele-Schoen, 1999. ISBN 3-7949-0639-X.

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

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/2016.

V Brně, dne

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá vlivem exotermických obkladů nálitků na tuhnutí hliníkových slitin. Práce je rozdělena do tří částí. První teoretická část popisuje odlišnosti slévárenských slitin hliníku oproti slévárenským slitinám jiného základního kovu, zejména slitin železa. Dále popisuje metodiku navrhování velikosti nálitků, složení exotermických směsí a nakonec dává přehled o simulačních programech na trhu, jejich uplatnění ve slévárenské praxi a stručně vysvětluje definici materiálů v simulačním programu ProCAST. Druhá část práce popisuje experimentální měření doby tuhnutí hliníkové slitiny AlSi7Mg0,3 v pískové formě s nálitkem opatřeným exotermickým obkladem. Závěrečná část popisuje simulaci tohoto experimentálního měření. Dále se pomocí simulací snaží najít obecné principy, které mají vliv na posuv modulu nálitku opatřeného exotermickým obkladem.

Klíčová slova

Exotermické obklady nálitků, nálitkování, simulace, ProCAST, hliníkové slitiny, posuv modulu, doba tuhnutí, termofyzikální parametry

Abstract

The master's thesis deals with the influence of the exothermic risers on the solidification of aluminum alloys. The work is divided into three parts. The first theoretical part describes the differences of properties of cast aluminum alloys compared to other based metals, especially iron alloys. It also describes the methodology of designing risers, composition of exothermic mixtures and finally gives an overview on the simulation programs on the market, their application in foundry practice and briefly explains how to define the material in the simulation program ProCAST. The second part describes the experimental measurement of the solidification time of aluminum alloy AlSi7Mg0,3 in the sand form with exothermic riser. The final section describes the simulation of experimental measurements. Further with help of simulation software it is tried to find the general principles that have an influence on feed module rate of exothermic riser.

Key words

Exothermic risers, feeding, simulation, ProCAST, aluminum alloy, feed module rate, solidification time, thermos-physicals parameters

Bibliografická citace

ZAJÍČEK, R. *Vliv exotermických obkladů na tuhnutí slitin hliníku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 84 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaromír Roučka, CSc..

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pod vedením doc. Ing. Jaromíra Roučky, CSc. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne

.....
Roman Zajíček

Poděkování

Děkuji doc. Ing. Jaromíru Roučkovi, CSc. za ochotu, cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat společnosti Mecas ESI za poskytnutí licence a zaškolení do programu ProCAST. V neposlední řadě chci poděkovat rodině, která mě při studiu podporovala.

OBSAH

ÚVOD	10
1 TEORETICKÁ ČÁST	11
1.1 SPECIFICKÉ VLASTNOSTI HLINÍKU V POROVNÁNÍ S DALŠÍMI SLITINAMI A JEJICH VLIV NA SLÉVÁRENSKOU TECHNOLOGII.....	11
1.2 NÁVRH VELIKOSTI NÁLITKU	16
1.2.1 Dvě základní funkce nálitků	16
1.2.2 Nyamovo kritérium	18
1.2.3 Dosazovací vzdálenost.....	20
1.2.4 Design nálitku	20
1.2.5 Tvarový faktor odlitku	21
1.3 EXOTERMICKÉ NÁSTAVCE	23
1.3.1 Typy směsí	24
1.3.2 Složení exotermických směsí	25
1.4 CHARAKTERISTIKA MATERIÁLŮ V SYSTÉMU ODLITEK-FORMA	26
1.4.1 Hustota (ρ)	27
1.4.2 Tepelná vodivost (λ)	27
1.4.3 Měrná tepelná kapacita (c)	28
1.4.4 Teplotní vodivost (a).....	29
1.4.5 Součinitel přestupu tepla (α)	29
1.4.6 Tepelná akumulace formy (b_f).....	30
1.5 SIMULAČNÍ PROGRAMY VE SLÉVÁRENSTVÍ	30
1.5.1 Simulační software na trhu	30
1.5.2 Možnosti využití simulačních programů v praxi	31
1.5.3 ProCast a možnosti zadávání termofyzikálních dat.....	34
2 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ.....	41
2.1 PRVNÍ NÁVRH A REALIZACE EXPERIMENTU PRO MĚŘENÍ DOBY TUHnutí SYSTÉMU ODLITEK-NÁLITEK.....	41
2.2 DRUHÝ NÁVRH A REALIZACE MĚŘENÍ DOBY TUHnutí SYSTÉMU ODLITEK-NÁLITEK.....	45
2.2.1 Návrh experimentu	45
2.2.2 Realizace experimentu - technologie, zařízení a materiály	47
2.2.3 Výsledné křivky tuhnutí a posun modulu	49
2.3 DOPROVODNÁ MĚŘENÍ PRO ZÍSKÁNÍ DAT PRO SIMULACI.....	51
2.3.1 Diferenční skenovací kalorimetrie (DSC).....	51
2.3.2 Měření doby hoření exotermické směsi.....	52
3 SIMULACE DOBY TUHnutí SYSTÉMU NÁLITEK-ODLITEK.....	54
3.1 SIMULACE REÁLNÉHO MĚŘENÍ.....	54
3.1.1 Vstupní data do simulace.....	54
3.1.2 Porovnání výsledné simulace a experimentu – zpřesněná vstupní data	56
3.2 VLIVY POSUV MODULU EXOTERMICKÉHO OBKLADU NÁLITKU.....	57
3.2.1 Vliv samotné odlévané slitiny	57
3.2.2 Vliv přehřátí slitiny.....	59
3.2.3 Vliv formovací směsi	60

4 ZÁVĚR	61
SEZNAM POUŽITÝCH INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	63
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	65
SEZNAM OBRÁZKŮ TABULEK A GRAFŮ	66
SEZNAM PŘÍLOH.....	69
Příloha 1: Fotodokumentace k výrobě forem:	70
Příloha 2: Experimentálně zjištěné doby tuhnutí:	72
Příloha 3: Vstupní data pro simulaci - termofyzikální data slitiny AL - LM25 (AlSi7Mg0,3):.....	75
Příloha 4: Srovnání výsledné simulace s experimentálním měřením: 	76
Příloha 5: Teplotní mapa v průběhu plnění a tuhnutí soustavy:.....	81
Příloha 6: Výsledné termofyzikální parametry pro odladěnou simulaci:.....	83

ÚVOD

Hliníkové slitiny mají svůj boom, který se řadí do období po 2. světové válce, již za sebou, nicméně stále se jedná o jedny z nejdůležitějších slévárenských slitin. Díky jejich dobrým pevnostním vlastnostem a velmi příznivé hmotnosti asi $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$, jsou odlitky z hliníkových slitin často používány v automobilovém nebo leteckém průmyslu. Přičemž například v osobních automobilech tvoří asi 10 % z celkové hmotnosti automobilu a jejich podíl se stále zvyšuje. Dalšími významnými odběrateli hliníkových odlitků jsou zvláště elektrotechnický a spotřební průmysl. Z pohledu způsobu výroby se 50% ze všech hliníkových odlitků vyrábí tlakovým litím. Druhá polovina produkce pak připadá na gravitační lití do kokil a nízkotlaké lití. Do pískových forem je odléváno pouze 5% z celkové produkce.

Úspora materiálu, energie, lidské práce a tím i finančních nákladů je v dnešní době velmi důležitá a to nejen v průmyslové praxi. Co se týká oboru slévárenství, jedním z faktorů, podle kterého může být hodnocena produktivita každé slévárny je využití tekutého kovu. Jinými slovy poměr hmotnosti hrubého a odlitého kovu. Tento poměr zásadně ovlivňují tři faktory: hmotnost vtokové soustavy, hmotnost samotného odlitku a hmotnost nálitků. Možnosti jak ovlivnit první dva faktory jsou velmi omezené. Avšak co se týká nálitků, zde existuje několik metod v praxi méně či více používaných. Hovoříme o intenzifikaci nálitků, kdy jejich tepelné ošetření nám umožňuje snížit jejich velikost. Dalším pozitivním faktem použití menších nálitků je úspora lidské práce nutná pro apretaci odlitků. Zejména pak při využití podnálitkových podložek mohou být následné práce na začištění povrchu minimální.

Mohlo by se zdát, že u hliníkových slitin, vzhledem k jejich poměrně nízkým teplotám tavení (okolo 700°C), není tato energetická úspora až tak významná. Nicméně, jeho slitiny je energeticky náročné roztavit. Je to způsobeno hlavně velkým latentním teplem (396 kJ.kg^{-1}), které má hliník po křemíku (1411 kJ.kg^{-1}) největší ze všech technických kovů. Paradoxně slitina silumin, ve které křemík bývá zastoupen až k 12%, je často používána což vede k navýšení latentního tepla až k 500 kJ.kg^{-1} . Snaha o intenzifikaci nálitků slitin hliníku je tak na místě. Využití izolačních nástavců je v literatuře poměrně dobře popsáno. Nicméně použití nástavců exotermických se v literatuře neobjevuje téměř vůbec. Některé slévárny mají však požadavky na využití této technologie. V praxi se pak používají exotermické nástavce původně určené na slitiny železa. Pro nálitkování hliníku se nabízí používat takové směsi, které se vyznačují nižšími zápalnými teplotami a vzhledem k jeho vysokému latentnímu teplu lepšími izolačními vlastnostmi.

1 Teoretická část

1.1 Specifické vlastnosti hliníku v porovnání s dalšími slitinami a jejich vliv na slévárenskou technologii

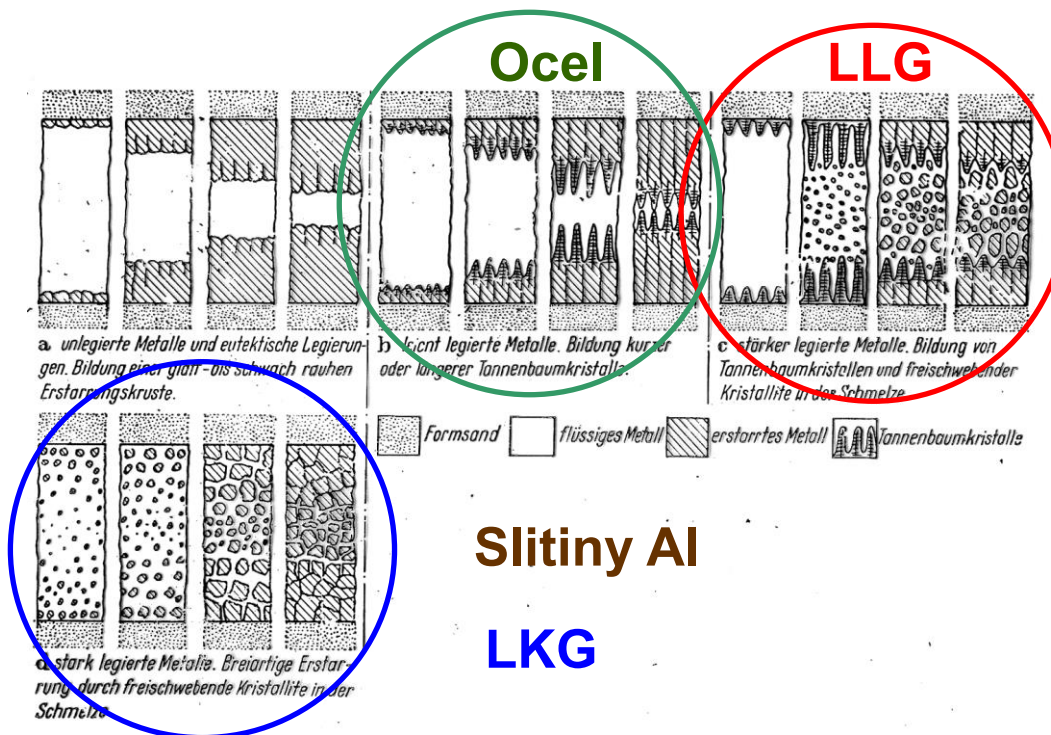
Slévárenské slitiny hliníku mají několik specifických vlastností, které mají vysokou citlivost na rychlost tuhnutí (obecně platí, že vyšší rychlost tuhnutí = lepší vlastnosti odlitku). Proto jsou při jejich odlévání preferovány metody, které zajišťují vysokou rychlost ochlazování a tuhnutí.

Jednou z těchto vlastností je **sklon ke vzniku rozptýlených staženin**, kdy hliníkové slitiny mají tendenci ke kašovitému (objemovému) tuhnutí. Citlivost jednotlivých slitin ukazuje Tab. 1.1.

Tab. 1.1 Typy tuhnutí některých slitin hliníku. [1]

Slitina	Typ tuhnutí	
	Kovové formy	Pískové formy
Al 99,99	s rovinným rozhraním	s rovinným rozhraním
Al 99,5	s rovinným rozhraním	buněčné
AlMg3	dendritické	buněčné
AlMg10	endogenní - vrstevné	endogenní - objemové
AlCu4	dendritické	endogenní - objemové
AlSi5	buněčné/objemové	endogenní - objemové
AlSi9	buněčné/objemové	endogenní - objemové
AlSi12 nemodifikovaná	endogenní - vrstevné	endogenní - vrstevné
AlSi12 modifikovaná	s rovinným rozhraním	s rovinným rozhraním

Příčinou této vlastnosti je mimo jiné jejich vysoká tepelná vodivost (λ) a šířka dvoufázového pásma. To má negativní vliv na homogenitu odlitku, kdy vzniká četná mikroporozita. Odstranění tohoto defektu je pak u technologie gravitačního lití do pískových forem velmi složité. Názorně je způsob tuhnutí hliníku ve srovnání s dalšími slitinami ukázán na Obr. 1.1. Vysoká tepelná vodivost také snižuje velikost teplotního gradientu v odlitku, který ovlivňuje hodnotu Niyamova kritéria a tím i zvyšuje objem porozity viz kapitola 1.2.2.



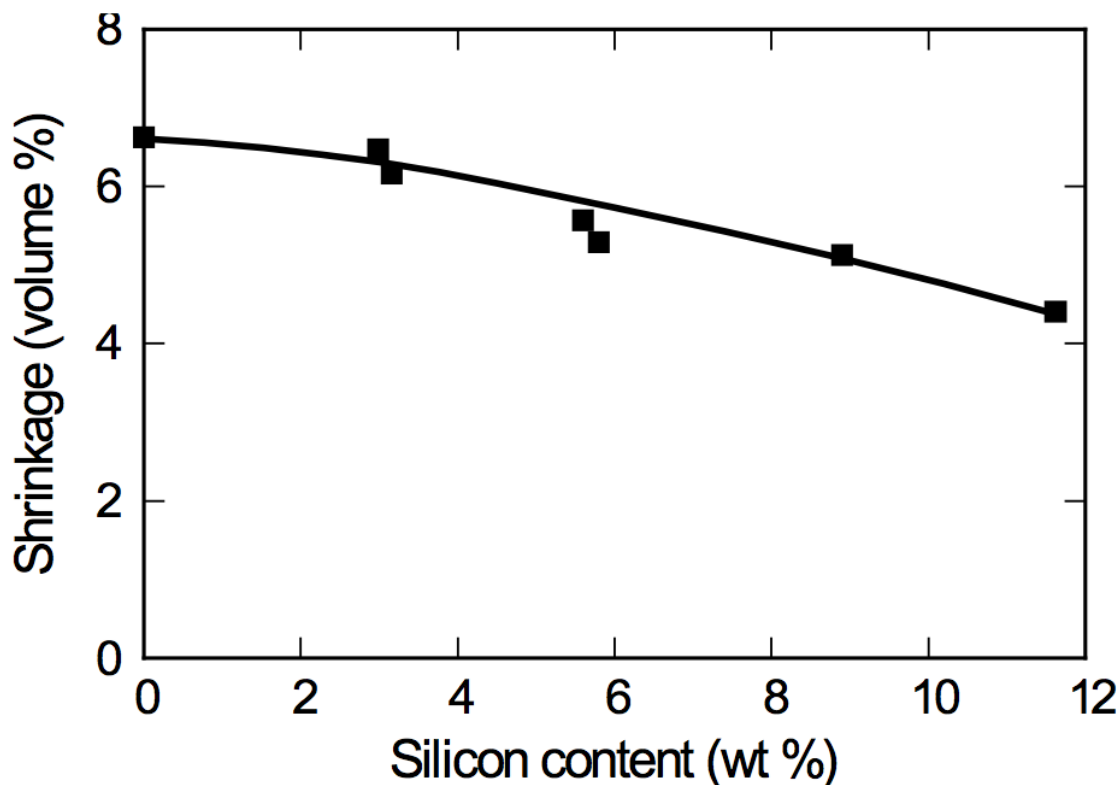
Obr. 1.1 Schéma tuhnutí slévárenských slitin. [1]

Dále mají slitiny hliníku jedno z nejvyšších **latentních tepel tuhnutí (skupenské teplo)** ze všech slévárenských slitin a poměrně **vyšokou měrnou tepelnou kapacitu** přibližně $0,9 \text{ kJ.kg.K}^{-1}$. To je ukázáno v Tab. 1.2. Tyto dvě vlastnosti přispívají k velké energetické náročnosti tavení hliníku. Ta se skládá z tepla ohřevu vsázky v tuhém stavu, skupenského tepla a tepla přehřátí. Další nevýhodou je, že tyto vlastnosti prodlužují dobu tuhnutí, což může vést k hrubnutí zrna. Kdy tato struktura má jednoznačně negativní vliv na všechny mechanické a některé technologické vlastnosti.

Tab. 1.2 Teplota tavení, střední měrné teplo a skupenské teplo čistých prvků. [1]

Prvek	Teplota tavení [°C]	Střední měrné teplo [kJ/kg.K]		Skupenské teplo [kJ/kg]
		V tuhém stavu	V tekutém stavu	
Hliník	660	1,05	1,09	396
Hořčík	650	1,17	1,32	372
Křemík	1410	0,84	2,10	1411
Měď	1083	0,42	0,50	210
Olovo	327	0,12	0,15	25
Zinek	420	0,38	0,46	100
Cín	232	0,21	0,25	61
Železo	1539	0,67	0,71	277

Pro správný návrh nálitku, je důležité znát smrštění kovu. Hliníkové slitiny mají smrštění od 5 do 7%, což jsou poměrně vysoké hodnoty. Na smrštění má zásadní vliv obsah jednotlivých prvků. Například vliv křemíku je ukázána v Graf 1.1.



Graf 1.1 Vliv obsahu křemíku na velikost smrštění hliníkových slitin. [3]

Dalším důležitým parametrem je i **šířka dvoufázového pásma** neboli interval tuhnutí, který má zásadní vliv na slévárenské vlastnosti. Nejlepších vlastností dosahují slitiny s úzkým intervalem tuhnutí, což jsou zejména slitiny blízké se eutektickému složení nebo složení čistého kovu. Naopak slity se širokým intervalem tuhnutí se vyznačují horší zabíhavostí a sklonem ke vzniku rozptýlených staženin. Jejich nálitkování je málo účinné a nálitky mají krátkou dosazovací vzdálenost. Důsledkem je pak netěsnost odlitků. Tab. 1.3 ukazuje běžné slévárenské slitiny seřazeny podle šířky dvoufázového pásma od největšího po nejmenší. Je vidět, že hliníkové slitiny zaujímají horní polovinu tabulky a to až na výjimku v podobě hliníkových slitin absencí mědi a s vysokým obsahem křemíku, který pásmo naopak zužuje.

Tab. 1.3 Teplota liquidu a solidu a šířka dvoufázové pásma běžných slévárenských slitin (řazeno sestupně dle šířky dvoufázového pásma) .[4],[5]

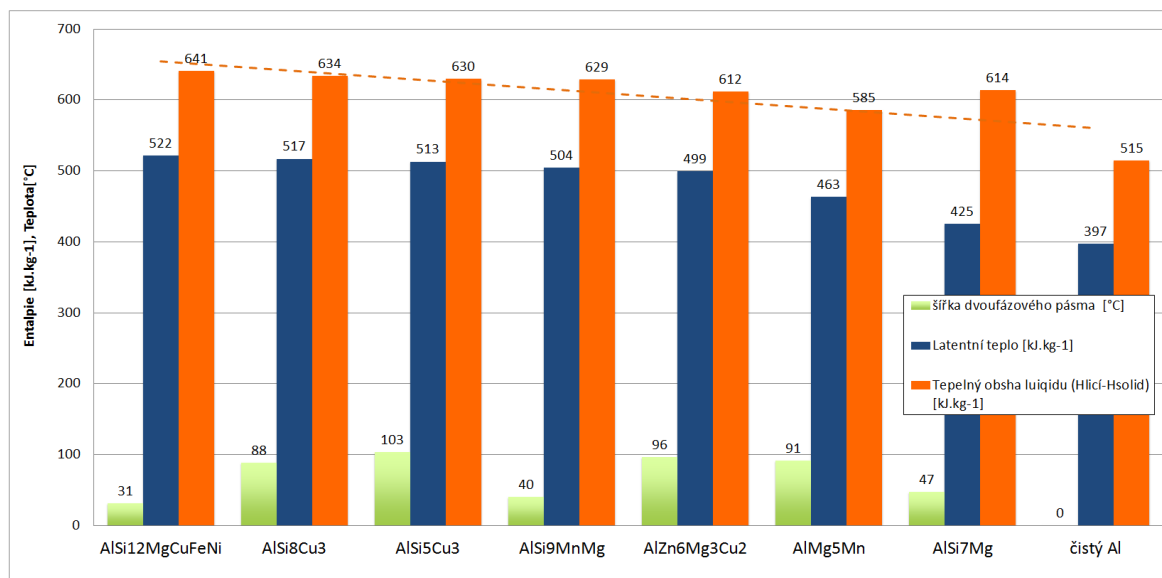
Slitina	Teplota solidu [°C]	Teplota liquidu [°C]	šířka dvoufázového pásma [°C]
Co – X – 45 (CoCr26Ni11W8Fe2SiMn)	1200	1425	225
LLG (3,7% C a 1,9% Si)	1080	1190	110
Al – LM4 (AlSi5Cu3)	518	621	103
AM50A MgAl5	525	626	101
Al-7075-T6 (AlZn6Mg3Cu2)	532	628	96
Al – LM5 (AlMg5Mn)	542	633	91
EN AC-46200 AlSi8Cu3	510	598	88
Ni-CMSX-4 (NiCo10Cr7Ta7W6Al6Re3Ti)	1320	1380	60
Korozivzdorná ocel Fe - 304 (FeCr19Ni10Mn2Cu)	1400	1454	54
TiAl6V4 (IMI 318)	odhad 1600	1650	50
Al – LM25 (AlSi7Mg)	567	614	47
EN AC-43300 AlSi9MnMg (Silafont-36)	550	590	40
LKG (3,6% C a 2,9% Si)	1140	1178	38
CuAl10Fe5Ni5	1040	1077	37
Al - LM13 (AlSi12MgCuFeNi)	542	573	31
ZnAl4	357	387	30
čistý Al	660	660	0
čistý Mg	650	650	0

Stejně slitiny jsou pak i seřazeny v Tab. 1.4 podle velikosti latentního tepla a to opět od největšího po nejmenší. Je vidět, že v tomto srovnání zauímají hliníkové slitiny suverénní postavení v čele tabulky až na výjimku v podobě hořčíku. Čistý hořčík se stejně jako hliník vyznačuje vysokými hodnotami latentního tepla a dokonce i vyšší hodnotou středního měrného tepla viz Tab. 1.2. Dále je v Tab. 1.4 uveden tepelný obsah kovu od lící teploty po teplotu solidu. Jinými slovy se jedná o teplo, které musí kov odvést, než dosáhne tuhého stavu. Tato hodnota může být definována jako tepelný obsah liquidu (Latentní teplo + teplo přehřátí). Lící teplota byla orientačně určena jako teplota liquidu +100 °C, aby bylo možno různé slitiny korektně porovnat. Tato hodnota může hrát významnou roli, při nálitkování a může být určujícím faktorem při rozhodování, zda použít obkladu izolačního nebo exotermického či jejich kombinace.

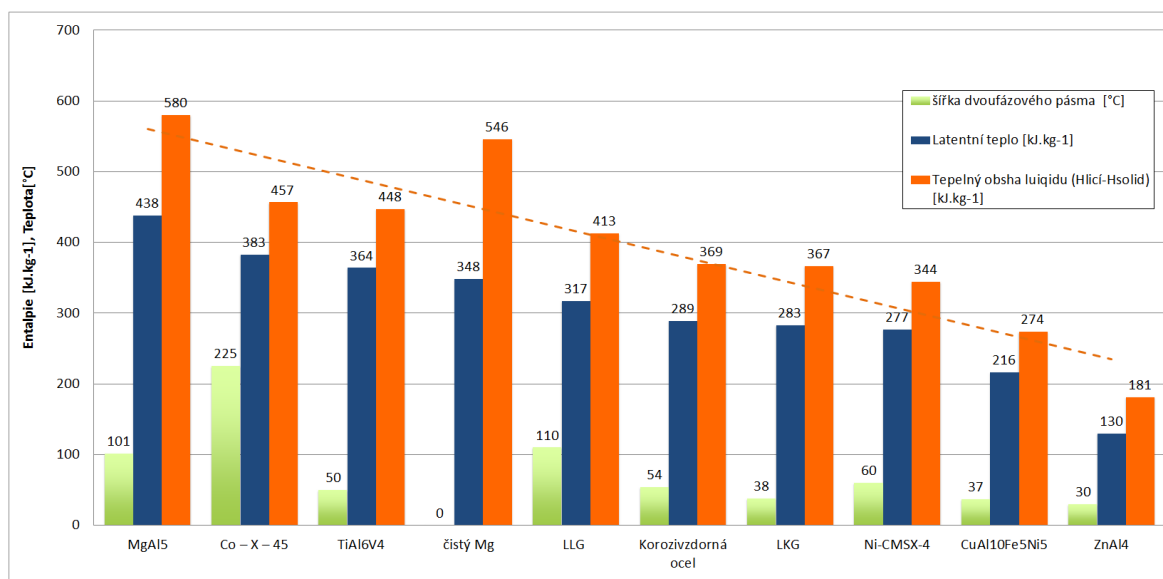
Graf 1.2 a Graf 1.3 jsou pak vyobrazením Tab. 1.4. Jednotlivé slitiny, jsou v nich seřazeny stejně jako v tabulce dle velikosti latentního tepla až na jednu výjimku v podobě hořčíkové slitiny MgAl5, která byla posunuta níže, tak aby Graf 1.1 mohl zahrnovat jen hliníkové slitiny. Z grafů lze vyčíst korelace tepelné obsah liquidu a latentního tepla slitiny. Nicméně to není žádným překvapením, protože Latentní teplo má na tepelný obsah liquidu zásadní vliv.[1]

Tab. 1.4 Lící teplota pro výpočet, latentní teplo a tepelný obsah liquidu běžných slévarenských slitin (řazeno sestupně dle latentního tepla.[4],[5])

Slitina	Lící teplota ($T_{\text{liquid}}+100^{\circ}\text{C}$) [$^{\circ}\text{C}$]	Latentní teplo [$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$]	Tepelný obsah liquidu ($H_{\text{licí}}-H_{\text{solid}}$) [kJ.kg ⁻¹]
Al - LM13 (AlSi12MgCuFeNi)	673	522	641
EN AC-46200 AISi8Cu3	698	517	634
Al - LM4 (AlSi5Cu3)	721	513	630
EN AC-43300 AISi9MnMg (Silafont-36)	690	504	629
Al-7075-T6 (AlZn6Mg3Cu2)	728	499	612
Al - LM5 (AlMg5Mn)	733	463	585
AM50A MgAl5	726	438	580
Al - LM25 (AlSi7Mg)	714	425	614
čistý Al	760	397	515
Co - X - 45 (CoCr26Ni11W8Fe2SiMn)	1525	383	457
TiAl6V4 (IMI 318)	1750	364	448
čistý Mg	750	348	546
LLG (3,7% C a 1,9% Si)	1290	317	413
Korozivzdorná ocel Fe - 304 (FeCr19Ni10Mn2Cu)	1554	289	369
LKG (3,6% C a 2,9% Si)	1278	283	367
Ni-CMSX-4 (NiCo10Cr7Ta7W6Al6Re3Ti)	1480	277	344
CuAl10Fe5Ni5	1177	216	274
ZnAl4	487	130	181



Graf 1.2 Latentní teplo a dvoufázové pásmo běžných slévarenských slitin hliníku.



Graf 1.3 Latentní teplo a dvofázové pásmo běžných slévarenských slitin.

1.2 Návrh velikosti nálitku

1.2.1 Dvě základní funkce nálitků

Nálitky jsou navrhovány tak, aby plnily dvě základní funkce (podmínky). Tuhly jako poslední v soustavě nálitků - nálitkový teplený uzel a byly objemově dostatečné tak, aby nahradily objemový úbytek v odlitku způsobený smršťováním kovu při tuhnutí. První podmínka je matematicky vyjádřena u přirozených nálitků takto:

$$\tau_n > \tau_o \quad (1.1)$$

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

Při užití Chvorinova vztahu (1.2) a (1.3), který určuje dobu tuhnutí odlitku nebo nálitku:

$$\tau = \left(\frac{M}{k}\right)^2 \text{ [s]} \quad (1.2)$$

$$M = \frac{V}{S} \text{ [cm]} \quad (1.3)$$

kde: τ čas tuhnutí odlitku/nálitku [s]
 k materiálová konstanta tuhnutí závislá na vlastnostech slitiny a formy [$m \cdot s^{-1}$]
 M modul odlitku/nálitku [cm]
 V objem tělesa [cm^3]
 S povrch ochlazovaného tělesa [cm^2]

Ize podmínku přepsat do tvaru:

$$M_n > M_o \quad (1.4)$$

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

[6], [7]

Z toho vyplývá, že nejdůležitějším parametrem, který charakterizuje nálitek je jeho modul. To však platí pouze pro nálitky přirozené. V případě nálitků jakýmkoliv způsobem tepelně ošetřených, musíme zavést pojem modul relativní. Snížením rychlosti ochlazování nálitek tuhne tak, jako kdyby byl větší anebo měl větší modul. [3]. To vedlo k zavedení pojmu **faktor posunu modulu**, který je vyjádřen jako:

$$M_{tep.} = f \cdot M_p \quad (1.5)$$

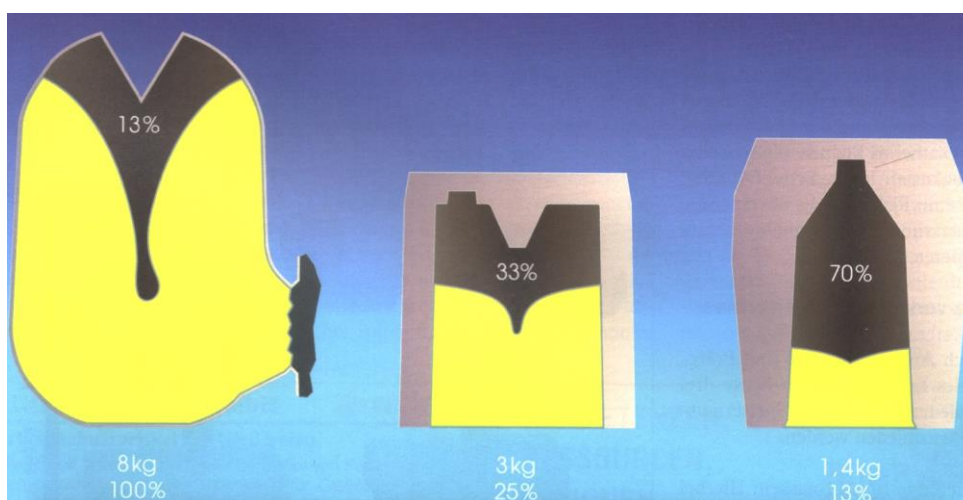
kde: $M_{tep.}$ modul tepelný [cm]
 M_p modul přirozený [cm]
 f faktor posunu modulu [–]

Faktor posunutí modulu lze vypočítat z časů tuhnutí nálitků o stejném geometrickém modulu viz následující rovnice:

$$f = \sqrt{\frac{\tau_{tep.}}{\tau_p}} \quad (1.6)$$

kde: τ_p doba tuhnutí přirozeného nálitku [s]
 $\tau_{tep.}$ doba tuhnutí tepelně ošetřeného nálitku [s]

Ilustrace nálitků se stejným modulem, ale rozdílným objemem, úrovní velikosti tepelného ošetření a velikostí využití kovu jsou na Obr. 1.2.



Obr. 1.2 Nálitky se stejným modulem, ale rozdílným objemem a využitím kovu. Zleva přirozený nálitek, s exotermickým obkladem a ECO-nálitek.[8]

Úspora kovu se dá pak vypočítat dle následující rovnice:

$$V_{exo} = \frac{V_p}{f^3} \quad (1.7)$$

kde: V_{exo} objem exotermického nálitku [cm^3]
 V_p objem přirozeného nálitku [cm^3]

Druhá podmínka o objemové dostatečnosti se dá vyjádřit matematicky takto:

$$V_{st} = \beta \cdot (V_o + V_n) \quad (1.8)$$

kde: β poměrné smrštění slitiny při tuhnutí[-]
 V_o objem odlitku nebo jeho nálitkové části [cm^3]
 V_n objem nálitku [cm^3]
 V_{st} objem staženiny vzniklé v odlitku [cm^3]

$$x = \frac{V_n}{V_{st}} \quad (1.9)$$

kde: x koeficient ne hospodárnosti nálitku

Na základě těchto vztahů byl pak odvozen výsledný vztah, který vyjadřuje velikost nálitku v závislosti na velikosti odlitku a smrštění použité slitiny:

$$V_n = V_o \cdot \frac{\beta \cdot x}{1 - \beta \cdot x} \quad (1.10)$$

[6], [7]

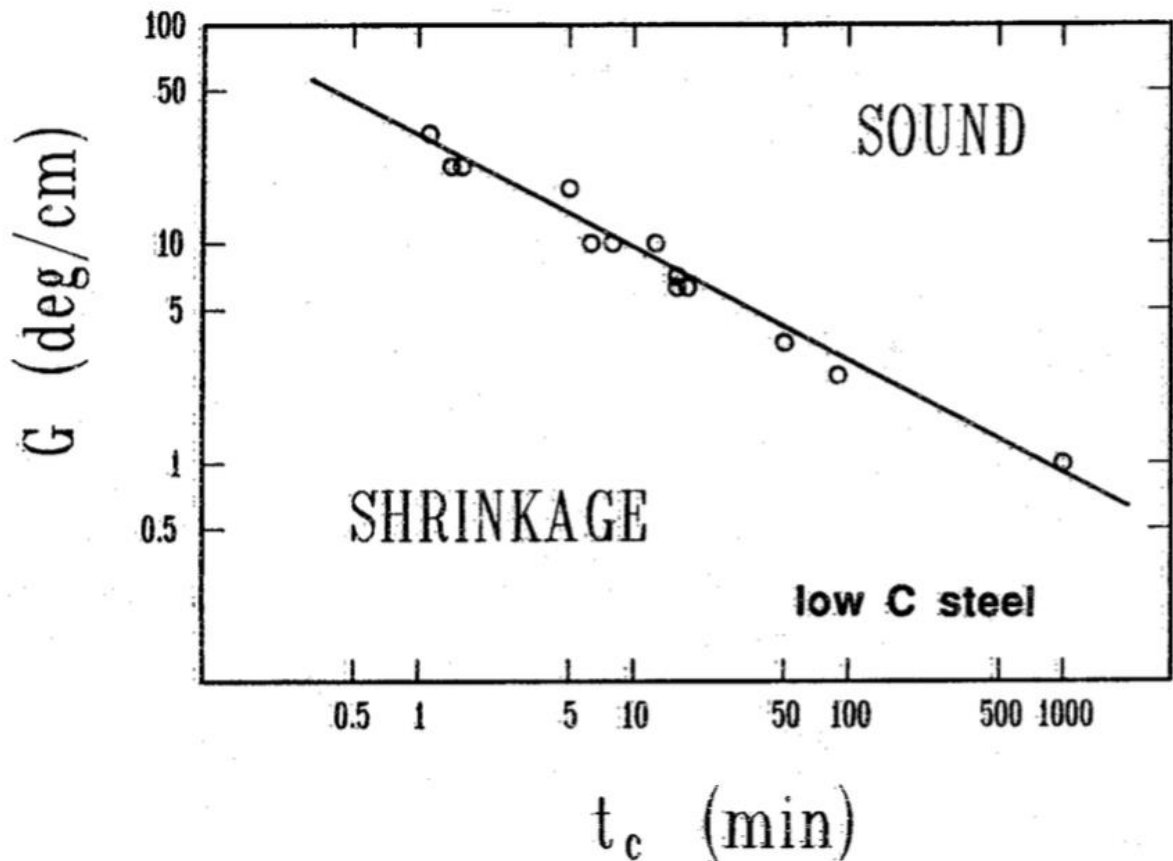
1.2.2 Nyamovo kritérium

Nyamovo kritérium vychází z jedné z prvních studií využívajících počítačovou simulaci k pochopení způsobu tuhnutí odlitků. Ukázalo se, že největší vliv na vznik porozity má teplotní gradient ve směru doplňování kovu. Pokud je gradient větší než určitá hodnota, která je určena druhou mocninou místního času tuhnutí (t_c), v odlitku se nevyskytuje žádná porozita. Výsledný graf z Nyamovy práce je na Obr. 1.3. Čára v grafu je pak definována jako:

$$\frac{G}{R} = konst. = \text{Nyamovo kritérium} \quad (1.11)$$

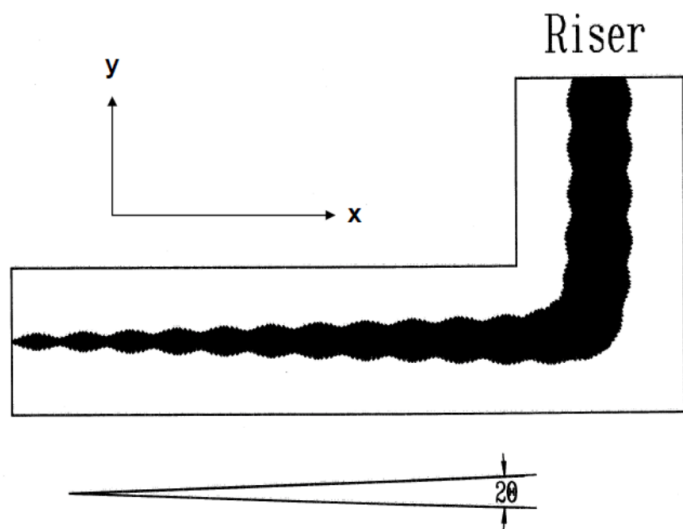
kde: G teplotní gradient ve směru doplňování kovu [$^{\circ}C/cm$]
 R rychlost tuhnutí odlitku [m/s]

,což je samotné Nyamovo kritérium, které je pak využíváno řadou simulačních programů pro posouzení vzniku porozity respektive staženin v odlitcích. Na základě výpočtů, je pak volena technologie, tak aby bylo dosaženo zdravého odlitku. [3]



Obr. 1.3 Vznik porosity v ocelových odlitcích. [3]

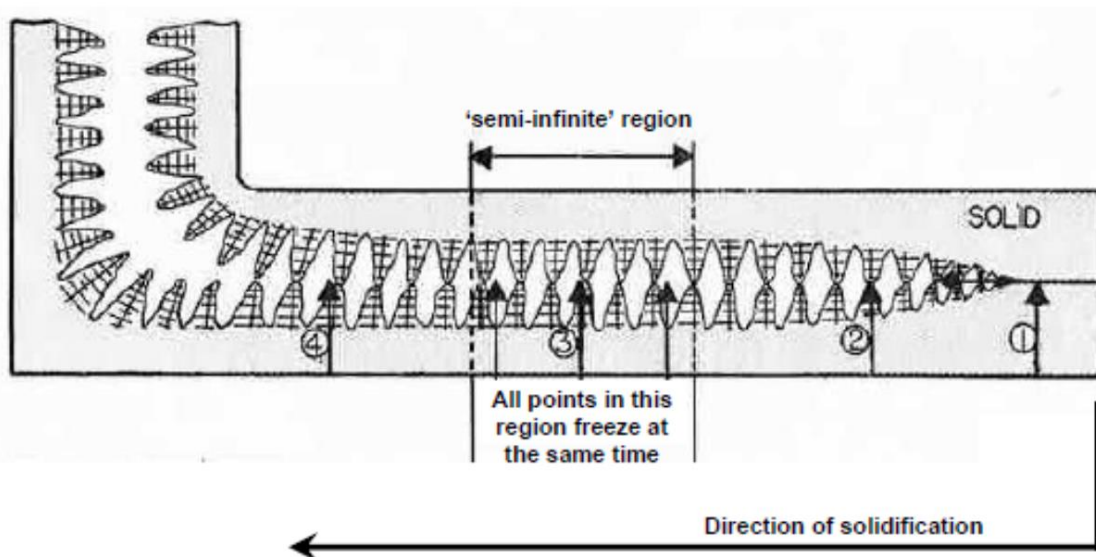
Pro lepší představu byl vytvořen geometrický model viz **Chyba! Chybný odkaz na záložku..** Pro zajištění správného doplňování kovu se předpokládá, že úhel 2Θ bude větší než určitá kritická hodnota. Za použití typických termofyzikálních hodnot pro pískovou formovací směs a ocel bylo ukázáno, že Nyamova čára z Obr. 1.3 koresponduje s úhlem Θ dva stupně. Tento model funguje pokud platí zjednodušení $R=R_y$ a $G=G_x$. [3]



Obr. 1.4 Schématické znázornění geometrického modelu ukazující úhel, který je nutný pro usměrněné tuhnutí. [3]

1.2.3 Dosazovací vzdálenost

Termický efekt nálitku je důvodem, proč nemůže dosazovat do neomezené vzdálenosti. Tento efekt poprvé popsal Pellini v jeho práci a ilustruje ho Obr. 1.5. Pokud je vzdálenost, do které má náletek dosazovat příliš dlouhá, začíná vznikat polo-nekonečná zóna. To znamená, že tuhnutí mechanismus je v tomto místě stejný, jako by se jednalo o nekonečnou tyč. Jinými slovy nálitek ani ochlazovaný konec nemají v tomto místě žádný efekt a gradient (G) je roven nule. Celá sekce tak tuhne stejnou rychlostí, což vede ke vzniku porozity uprostřed stěny odlitku. Empiricky získané hodnoty pro dosazovací vzdálenost u ocelových odlitků jsou pak 4 až 5 násobek tloušťky stěny a 10 až 15 násobek pro slitiny hliníkové. Důvodem takto rozdílných délek je vysoká teplotní vodivost hliníkových slitin. [3]



Obr. 1.5 Rozvoj polo-nekonečné zóny, pokud je dosazovací vzdálenost příliš dlouhá. [3]

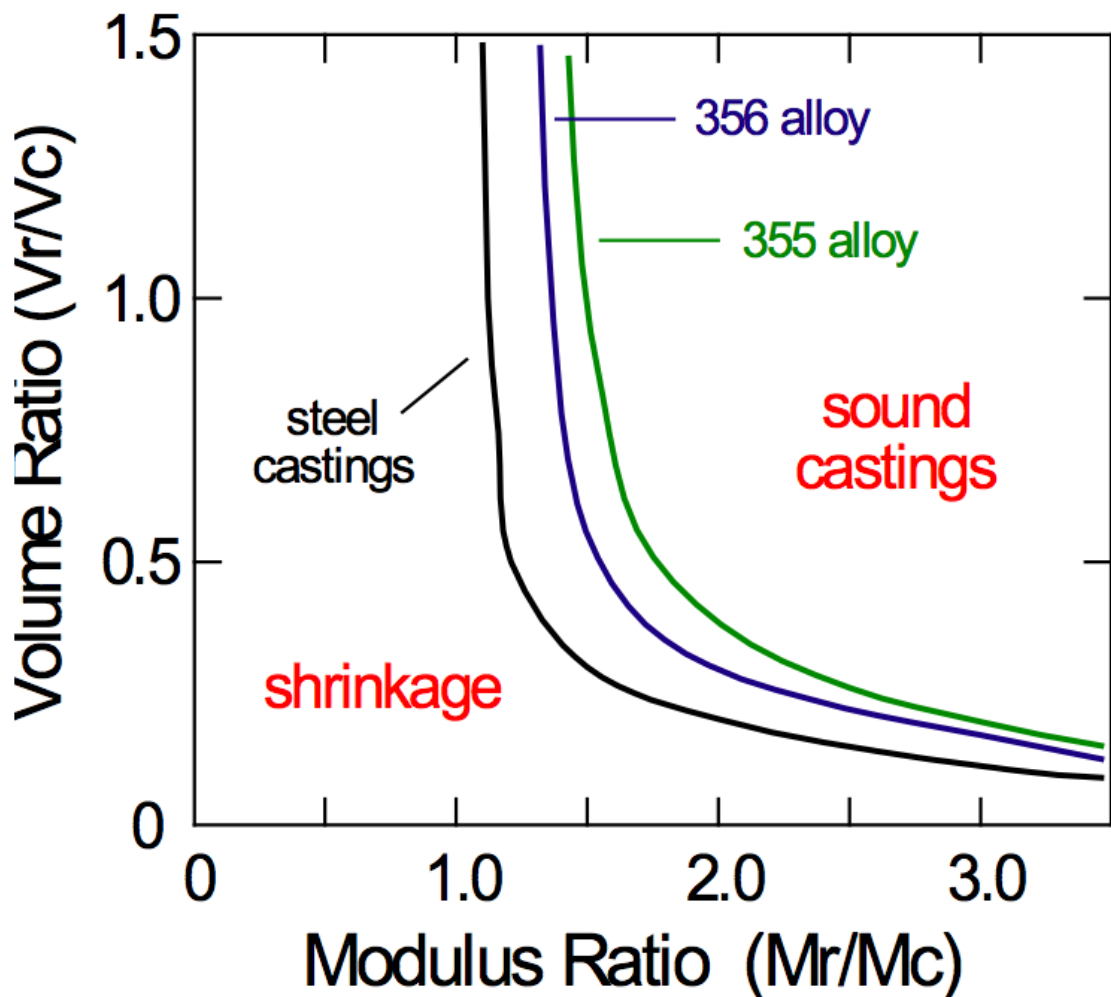
1.2.4 Design nálitku

Bylo vytvořeno mnoho modelů pro správné navrhování nálitku. První z nich navrhnul Caine, který vedl širokou studii zabývající se ocelovými odlitky o různých velikostech a tvarech. Výsledná křivka pro design nálitků je pak na Obr. 1.6. Na obrázku jsou také vykresleny dvě křivky pro hliníkové odlitky experimentálně naměřené Mallyanem a Panchanathanem. Caine rozvinul tento model na základě dvou extrémních případů. První případ je reprezentován čarou vlevo nahoře a nastane, pokud je náletek tak velký, že doplňování je limitováno pouze modulem nálitku. Druhý případ je reprezentován křivkou vpravo dole a nastane, pokud je náletek dobře izolován anebo je použit exotermický nástavec a tak správné doplňování kovu určuje objem kovu, který je náletek schopen do odlitku dodat. Křivka mezi pak popisuje případ, kdy oba faktory hrají roli. Přičemž rovnice popisující tyto křivky navržená Cainem vypadá takto:

$$M_{rc} = \frac{M_r}{M_c} = \frac{0,1}{V_{rc} - \beta} \quad (1.72)$$

kde: M_{rc} poměr modulů nálitku a odlitku
 M_r modul nálitku [cm]
 M_c modul odlitku [cm]
 V_{rc} poměr objemu nálitku a odlitku (V_r/V_c)
 β smrštění odlitku v průběhu tuhnutí

Je vidět, že oblast zdravých hliníkových odlitků je menší než oblast ocelových. Hlavní roli zde hraje velikost smrštění β . V literatuře, je pak možno nalézt podobné více komplexnější nomogramy pro další slitiny hliníku.[3]



Obr. 1.6 Diagram pro výpočet velikosti nálitku navržen Cainem pro ocelové odlitky a Mallyanem a Panchanathanem pro odlitky ze slitin hliníku. [3]

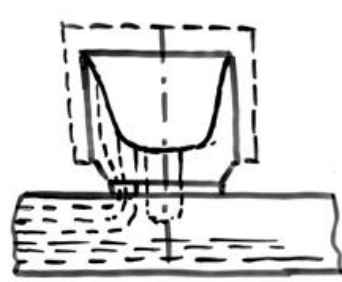
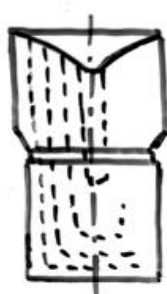
1.2.5 Tvarový faktor odlitku

Tvarový faktor odlitku je bezrozměrné číslo, které udává to, jak moc je odlitek nebo jeho nálitok kompaktní (čím nižší je hodnota, tím je těleso kompaktnější). Značí se q a vypočítá se dle rovnice:

$$q = \frac{V}{M^3} = \frac{S^3}{V^2} \quad (1.73)$$

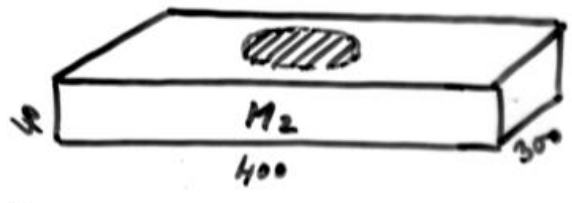
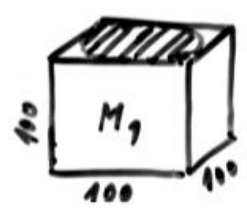
kde: M modul odlitku/nálitku [cm]
 V objem tělesa [cm³]
 S povrch ochlazovaného tělesa [cm²]

Z rovnice vyplývá, že objem nálitku, je pro požadovaný modul nejmenší při minimální hodnotě tvarového faktoru. Z jednoduchých geometrických těles nejnižší hodnoty dosahuje koule ($q_{koule}= 115$) a následně válec o výšce rovné jeho průměru ($q_{válec}=169$). A proto se, snažíme při návrhu designu nálitku těmito tělesům co nejvíce přiblížit, tak abychom ušetřili co nejvíce kovu.



$M = 1,6\text{cm}, V = 1000\text{ cm}^3$
 $q = 216$

$M = 1,5\text{cm}, V = 4800\text{ cm}^3$
 $q = 1480$



$$M_1 = a/5 = 2\text{ cm} \quad M_2 = t/2 = 2\text{ cm}$$

$$M_1 = M_2$$

$$V_{N1} = V_{N2}$$

$$V_1 = 1000\text{ cm}^3 \quad V_2 = 4800\text{ cm}^3$$

$$V_{N1} = 1000 \cdot \beta / \gamma - \beta$$

$$V_{N2} = 4800 \cdot \beta / \gamma - \beta$$

$$V_{N2} = 4,8 \cdot V_{N1}$$

Obr. 1.7 Příklad výpočtu velikosti nálitku dvou odlitků o stejném modulu, ale s výrazně odlišnou velikostí tvarového faktoru. [1]

Tvar samotného odlitku však samozřejmě ve vztahu k tvarovému faktoru významně ovlivnit nemůžeme. Nicméně jeho hodnota nám říká, jak moc bude odlitek nálitek „vysávat“. Jednoduchý výpočet velikosti nálitku u dvou odlitků s výrazně odlišnou velikostí tvarového faktoru z pohledu objemové dostatečnosti je na obrázku Obr. 1.7. Z výpočtu je vidět, že pro odlitek méně kompaktní je potřeba použít nálitek 4,8 krát větší. Nicméně, jak bylo uvedeno v předchozím textu rozhodujícím faktorem, je často podmínka první, Chvorinova, o delší době tuhnutí nálitku než odlitku a proto v konečném návrhu nebudou velikosti nálitků takto výrazně odlišné. Větší vysávání nálitku však snižuje objem kovu v něm, který je potřeba na udržení ho v tekutém stavu. Proto u odlitků rozlehlých je vhodné navrhovat větší nálitky popřípadě je tepelně ošetřit. [1]

1.3 Exotermické nástavce

Dá se říci, že dobu tuhnutí přirozených nálitků ovlivňuje rychlost a velikost tepla, které musí forma odvést. Exotermické obklady ovlivňují oba tyto faktory. Celkové teplo, které je potřeba odvést z nálitku exotermického Q_c se pak skládá z tepla vyvinutého kovem Q_1 a tepla vyvinutého obkladem Q_2 .

$$Q_c = Q_1 + Q_2 [J] \quad (1.14)$$

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.

$$Q_1 = \frac{m \cdot c_{Al}}{M_{Al}} \cdot q_r [J] \quad (1.15)$$

kde:

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

Je vidět, že stěna formy musí odvést větší množství tepla, než je tomu při užití nálitku přirozeného, 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 standardní 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 nálitek 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 případě dochází ke značným rozdílům u jednotlivých směsí. U některých typů je kladen nejvyšší důraz na mohutnost reakce, neboli na

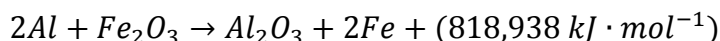
množství tepla, které obklad vyvine, jiné jsou navrženy tak, aby po vyhoření sloužily nadále jako izolant a to i za podmínek, že jejich vývin tepla nebude tak výrazný. [7]

1.3.1 Typy směsí

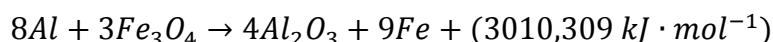
V praxi rozlišujeme tři typy směsí na základě jejich chemického složení. Jedná se o směsi termitové, křemíkové a uhlíkové.

1.3.1.1 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



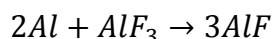
Průběh reakce je velmi rychlý a produkty dosahují po skončení reakce teplot až 2000°C. Pro zpomalení reakce se do směsi přidávají žáruvzdorné materiály. Hliník, jak je zřejmé z rovnic, je oxidován oxidem železitým, takže není nutný přístup vzdušného kyslíku. U této metody se však projevuje několik nevýhod:

- ❖ 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.

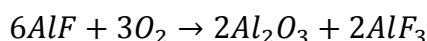
Jako zdroj kyslíku mohou být použity i jiné sloučeniny. Většinou se jedná o dusičnany ($NaNO_3$, KNO_3 , $Ba(NO_3)_2$). Ty reagují i při nižší teplotě (300°C).

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.

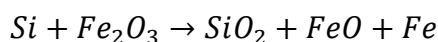


Jejich použití přináší četné výhody:

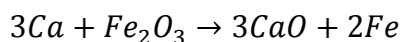
- ❖ Uvolnění vyššího množství tepla (nedochází k endotermické reakci rozkladu Fe_2O_3) a to při zachování množství hliníku téměř dvojnásobně.
- ❖ Lepší izolační vlastnosti po vyhoření.
- ❖ V průběhu i po skončení reakce zachovávají tvar směsi.
- ❖ Dle složení směsi lze řídit teploty reakcí zhruba od 350°C do více než 1150°C. [7]

1.3.1.2 Typ křemíkový

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



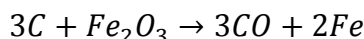
Křemík je do směsi přidáván buď ve formě FeSi 75 nebo FeSiCa. Pokud je ve směsi obsažen vápník probíhá další reakce:



Křemík se v průběhu tuhnutí může dostat do horních vrstev odlitku. To způsobí jejich nalegování křemíkem a teplota tuhnutí se snižuje asi o 50°C. Což tedy prodlužuje dobu tuhnutí. [7]

1.3.1.3 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 vrstvy a snižuje se teplota tuhnutí. [7]

1.3.2 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 obecně obsahují:

❖ Plniva:

Netečný materiál, který prodlužuje dobu hoření a zlepšuje izolační vlastnosti směsi po vyhoření. Jedná se o křemičitý písek, šamot pálené jíly, které jsou určeny pro formovací směsi.

❖ **Pojiva:**

Ta mohou být **pevná** (sulfidový louh, dextrin), která se za přítomnosti vody dávkuje 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 **dušičnany 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. [7]

Následující tabulka ukazuje příklad složení některých typů exotermických směsí:

Tab. 1.5 Příklad složení exotermických směsí. [9]

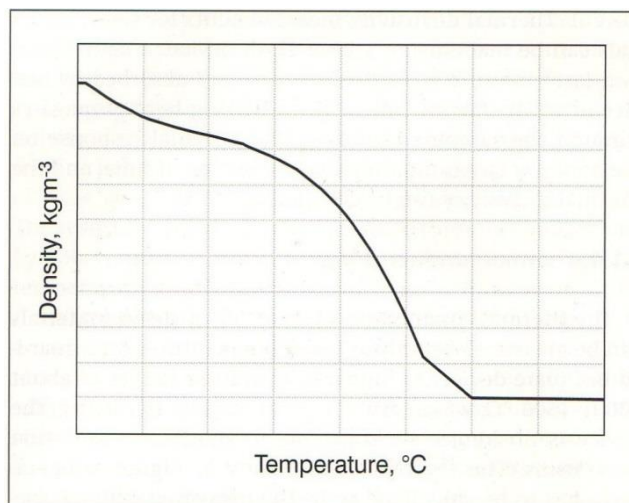
Exozotypy/složení	CH 1	Ferro 2	Feedex 3 KCA	Feedex 3 HN
Al-kov [hm.%]	18-23	18-23	16-20	22-25
Al ₂ O ₃ [hm.%]	27-32	27-32	7-11	15-20
SiO ₂ [hm.%]	5-10	18-22	35-40	30-35
Fe ₂ O ₃ [hm.%]	14-18	5-10	8-10	12-15
Na ₂ O+K ₂ O [hm.%]	4-6	3-5	4-6	2-4
CaO+MgO [hm.%]	3-5	2-5	1-3	1-2
NO ₃ [hm.%]	0-1	3-5	7-9	8-10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

1.4 Charakteristika materiálů v systému odlitek-forma

Důležitými materiálovými charakteristikami popisujícími 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}). Tepelná akumulace formy (b_f) je pak odvozeným parametrem. [11]

1.4.1 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 náliťků může být měřena dilatometrem. Graf 1.4 ukazuje trend závislosti hustoty na teplotě pro běžné materiály obkladů náliťků. [9]



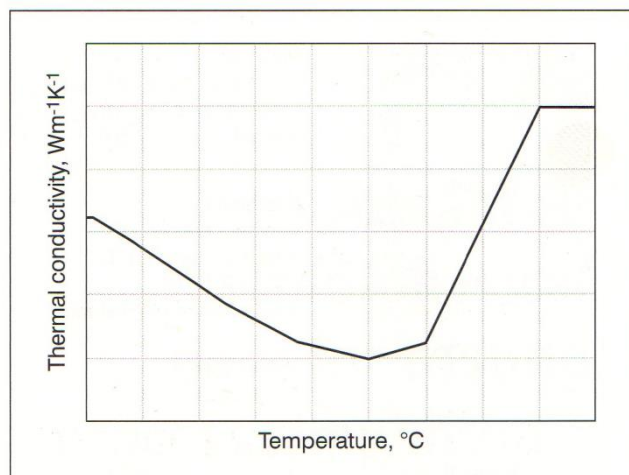
Graf 1.4 Typická křivka závislosti hustoty (ρ) na teplotě pro obkladové materiály náliťků. [11]

1.4.2 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 a struktuře látky
- ❖ Teplotě

Při výpočtech tuhnutí odlitku je důležité znát závislost součinitele tepelné vodivosti na teplotě. A to u všech materiálů vyskytujících se v systému odlitek-forma (odlévaný materiál v tuhém i v tekutém stavu, formovací směsi, obklady atd.). Graf 1.5 ukazuje trend závislosti tepelné vodivosti na teplotě pro běžné materiály náliťků. [6]



Graf 1.5 Typická křivka závislosti tepelné vodivosti (λ) na teplotě pro obkladové materiály nálitků. [11]

1.4.3 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:

$$c = \frac{dQ}{dT \cdot m} \quad (1.16)$$

kde:

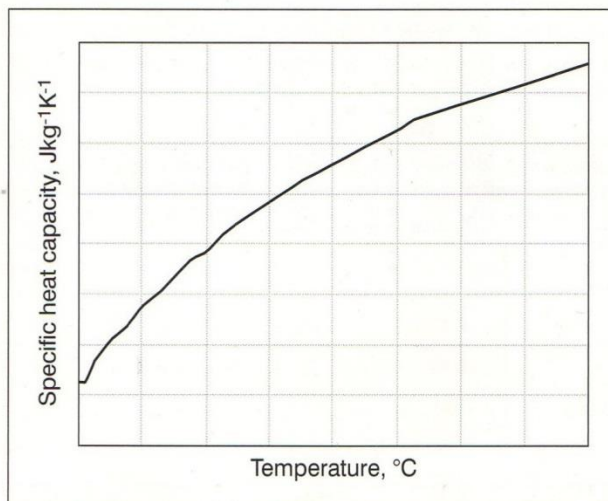
c	měrná tepelná kapacita [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
dQ	diferenciál tepla [J]
dT	přírůstek teploty [K]
m	hmotnost [kg]

Veličina je závislá na teplotě, Graf 1.6 ukazuje trend závislosti měrné tepelné kapacity na teplotě pro běžné materiály nálitků. Obecně ji můžeme vyjádřit pomocí následující rovnice:

$$c = A + B \cdot T + C \cdot T^{-2} \quad (1.17)$$

kde:

A, B, C	konstanty
T	teplota [K] [6]



Graf 1.6 Typická křivka závislosti měrné tepelné kapacity (c) na teplotě pro obkladové materiály náliťků. [11]

1.4.4 Teplotní vodivost (a)

Teplotní vodivost udává míru vodivosti tepelné energie 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):

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad (1.18)$$

Součinitel teplotní vodivosti udává jak rychle je materiál schopen vyrovnávat teplotní rozdíly. Čím vyšší hodnoty součinitele tím materiál rychleji vyrovnává teplotní rozdíly. [7], [11]

1.4.5 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. [7], [12]

1.4.6 Tepelná akumulace formy (b_f)

Jedná se o odvozenou veličinu, která komplexně charakterizuje ochlazovací účinek formy vůči odlitku. Akumulační schopnost materiálu je množství tepla, které projde z odlitku do formy jednotkou plochy za jednotku času při rozdílu teplot 1K.

$$b_f = \sqrt{c_f \cdot \rho_f \cdot \lambda_f} \quad (1.19)$$

kde: c_f měrná tepelná kapacita formy [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
 ρ_f hustota formy [$kg \cdot m^{-3}$]
 λ_f tepelná vodivos formy [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]

Stanovení tepelné akumulace formy lze provést pomocí rovnice 1.19 experimentálně nebo numerickým výpočtem.

1.5 Simulační programy ve slévárenství

Cílem simulačních programů je vytvořit takový numerický model, který by popsal všechny relevantní fyzické procesy tak přesně, jak jen je to možné. Toho může být dosaženo jen tehdy, pokud máme k dispozici vhodné okrajové podmínky a správná termofyzikální data. Pak tento software může být použit jako nástroj pro navrhování slévárenské technologie.[13]

Dalším přínosem simulačních programů může být vzdělávání technologů, kteří díky podrobné vizualizaci procesu mohou hlouběji porozumět tomu, co se děje v průběhu plnění a tuhnutí kovu ve formě. [14]

1.5.1 Simulační software na trhu

Na dnešním trhu je mnoho simulačních balíčků, kdy každý software má jinou úroveň komplexnosti a možnosti definice parametrů. Na samotné špici je spíše vědecký software Ansys. Tento software dodává nejpřesnější výsledky, avšak jeho složitost a výpočetní náročnost ho předurčuje spíše pro použití na akademické úrovni. Pro inženýrské využití, kde je často kladen důraz na rychlost a jednoduchost, jsou spíše vhodné programy využívající různých aproximací a předdefinovaných parametrů pro různé procesy. Přesnost by však měla vždy stát na prvním místě. Tab. 1.6 ukazuje slévárenské simulační programy dostupné na trhu.

Tab. 1.6 Slévárenské simulační programy na trhu. [14]

Software Program	Společnost a původ
AutoCAST	Advanced Reasoning Technologies P. Ltd., Mumbai
CAP/WRAFTS	EKK, Inc., Walled Lake, Michigan, USA
CastCAE	CT-Castech Inc. Oy, Espoo, Finsko
Castflow, Casttherm	Walkington Engineering, Inc., Austrálie
JSCast	Komatsu Soft Ltd., Osaka, Japonsko
MAGMASoft	MAGMA GmbH, Aachen, Německo
MAVIS	Alphacast Software, Swansea, GB
NovaFlow&Solid	Novacast AB, Ronneby, Švédsko
ProCAST	ESI Group, Paris, Francie
RAPID/CAST	Concurrent Technologies Corp., USA
SIMTEC	RWP GmbH, Roetgen, Německo
SOLIDCast	Finite Solutions, Inc., Illinois, USA

1.5.2 Možnosti využití simulačních programů v praxi

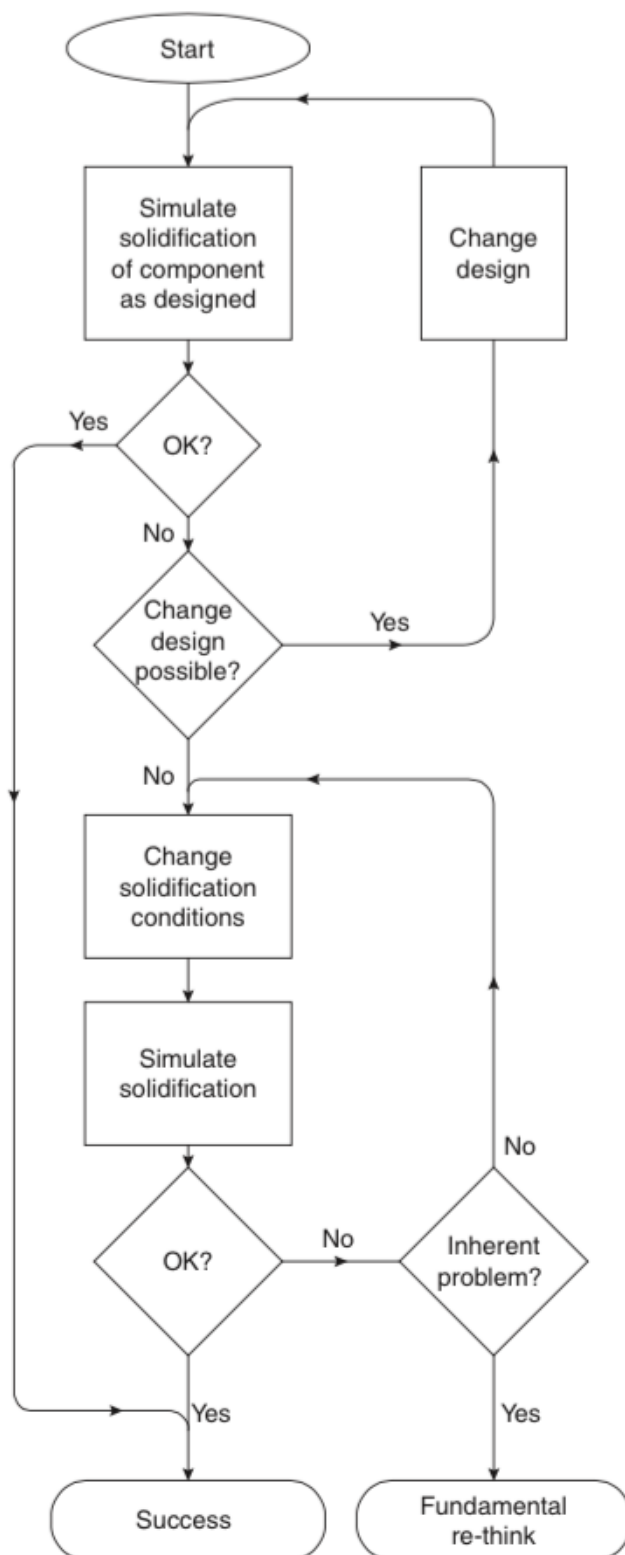
Dá se říci, že existují tři základní způsoby jak použít simulační software:

1. Pomoc při návrhu slévárenské technologie pro konkrétní odlitek.
2. Hledání pravidel – optimalizace procesu
3. Reverzní inženýrství.

1.5.2.1 Návrh slévárenské technologie

Jedná se o tradiční použití simulačního softwaru, jako dobrého pomocníka technologa. Pokud je zapotřebí navrhnout technologii výroby nové součásti, kdy pomocí simulace můžeme odhalit možné chyby návrhu ještě před započítím jakýchkoliv fyzických testů. Přičemž vhodný postup je následující.

Obecně se doporučuje jako první vypočítat tuhnutí samotného odlitku (tak jak přišel od konstruktéra) bez vtokové soustavy a jakékoliv technologie. Simulace tedy začíná v bodu, kdy je odlitek naplněn kovem o lící teplotě, ten následně tuhne a chladne. Důvodem je to, že většina simulačních programů je dostatečně přesná při výpočtech vedení a přestupu tepla. (Simulace plnění, namáhání součásti nebo napětí dávají méně přesné výsledky.) Přičemž rychlost výpočtu zde také hraje svoji roli. Tato brzká simulace nám poskytne přehled o tom, kde by se mohly vyskytovat problémy v odlitku. Zejména pak polohu staženin a porozity. Proces jak postupovat je znázorněn schematicky na Obr. 1.8. [15]



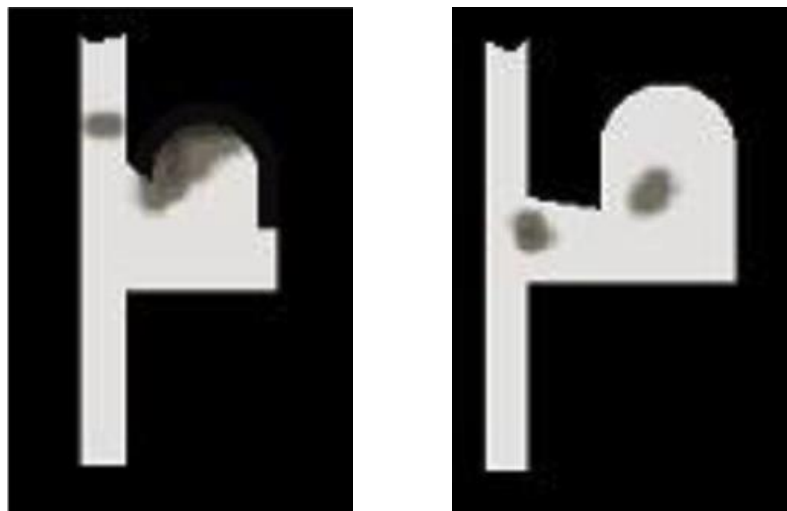
Obr. 1.8 Doporučený postup při návrhu nového odlitku s využitím simulačního softwaru. [15]

1.5.2.2 Optimalizace procesu

Simulační software nemusí být použit jen pro řešení konkrétního problému. Může být také použit jako nástroj pro hledání pravidel obecně. Jako příklad může sloužit

práce [17] provedena Perzykem zabývající se problémem vzdálenosti bočních náliček od stěny odlitku (délka krčku náličky).

Práce se snaží řešit staženiny, které mohou vznikat jako výsledek přehřátí stěny formy v případě, že krček je příliš krátký, tak jak je ukázáno na Obr. 1.9 nalevo. Druhý problém může nastat, je-li krček příliš dlouhý a staženina tak vzniká v místě nahromadění kovu mezi stěnou odlitku a krčkem náličky viz Obr. 1.9 napravo.



Obr. 1.9 Dvě typické staženiny vznikající v odlitcích. Nalevo - vznik v důsledku přehřátí stěny formy. Napravo – vznik v důsledku nahromadění kovu mezi stěnou odlitku a krčkem náličky.[17]

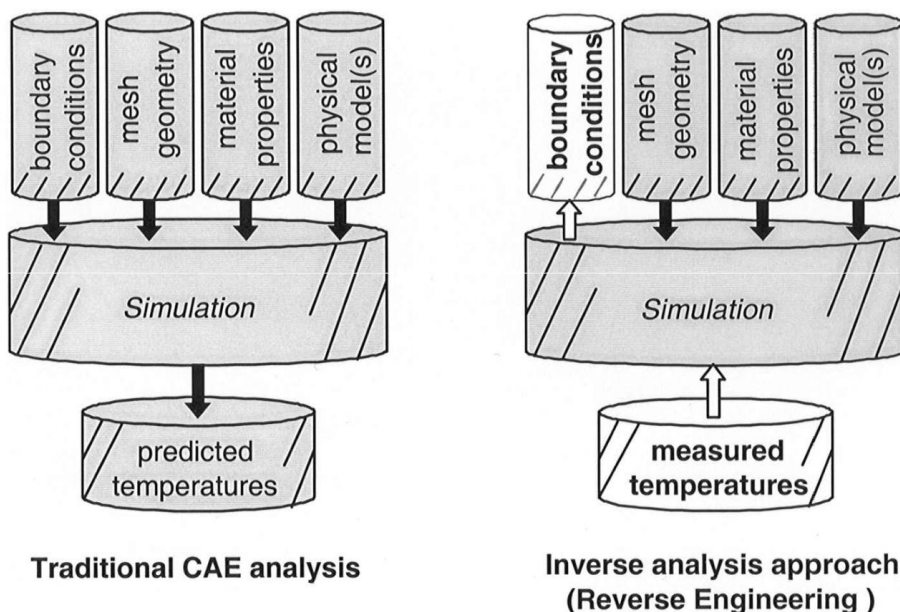
V tomto případě bylo pro nalezení optimálního řešení provedeno 170 simulací. To by byl pro reálné testy těžko realizovatelný experiment, jak po stránce finanční, tak i časové. [17]

1.5.2.3 Reverzní inženýrství

Tradičním cílem numerických simulací je najít řešení (např. teplotní pole, porozitu, staženiny, dynamiku plnění atd.) na základě známých vstupních dat:

- ❖ Okrajových podmínek
- ❖ Geometrie
- ❖ Materiálových vlastností
- ❖ Správného fyzikálního modelu

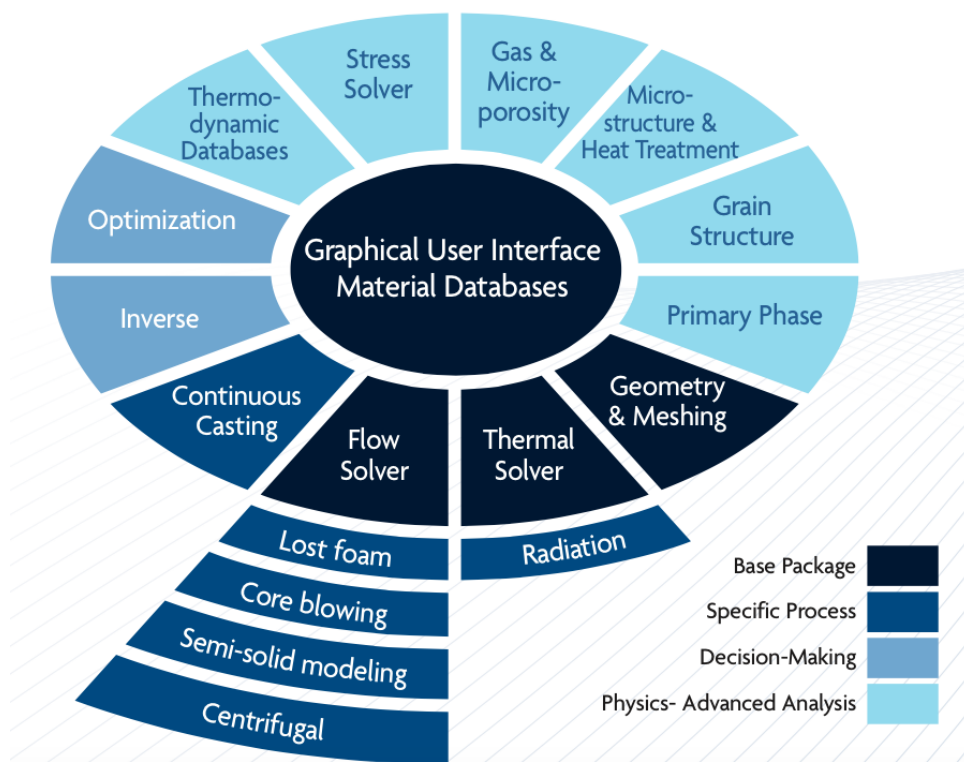
Naneštěstí není vždy jednoduché zajistit přesná vstupní data. To je konkrétně problematické ve slévárenské technologii, kde se vyskytuje velké množství materiálů a proces probíhá za vysokých teplot. Zde pak může simulační software poskytnout určité řešení v podobě zpřesňování vstupních dat na základě fyzického měření. Tato strategie je nazývána reverzní inženýrství. Rozdíl mezi tradiční CAE analýzou a inverzní analýzou je schematicky znázorněn na Obr. 1.10.[13]



Obr. 1.10 Schématické znázornění rozdílu mezi tradiční CAE analýzou a inverzní analýzou z pohledu vstupních dat do simulace.[13]

1.5.3 ProCast a možnosti zadávání termofyzikálních dat

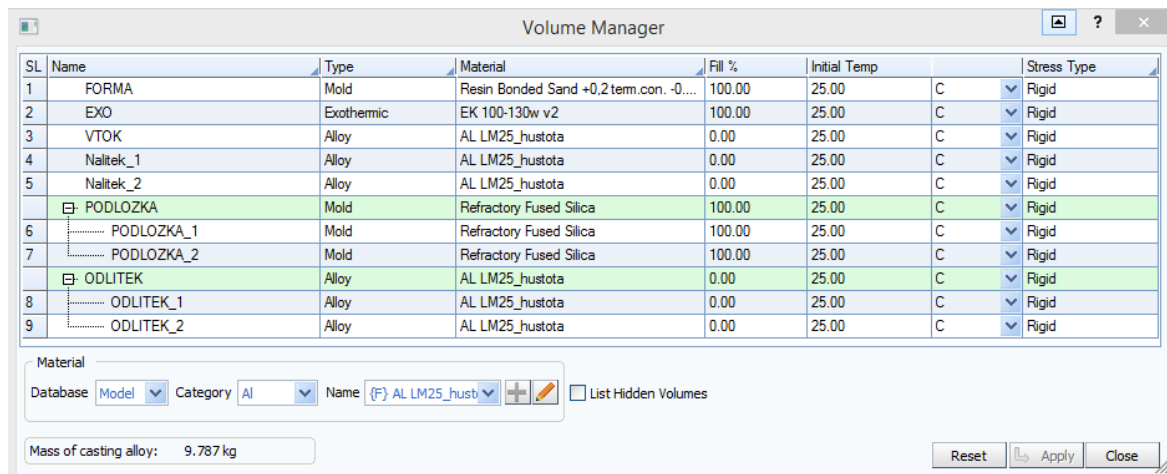
Pro pozdější počítačové simulace v experimentální části byl použit software od společnosti Mecas ESI program ProCAST. Obr. 1.11 ukazuje možnosti softwarového balíku, přičemž je rozčleněn do čtyř částí podle náročnosti a komplexnosti procesů požadovaných uživatelem simulovat.



Obr. 1.11 Možnosti simulace pro slévárství se softwarem od společnosti ESI. [16]

1.5.3.1 Definice materiálů

Všechny objemy, které jsou nedefinovány v simulačním softwaru, musí mít přiřazen nějaký materiál. *Volume manager* je takovým rozcestníkem, který tyto objemy sdružuje. Příklad toho, jak toto menu vypadá, je na Obr. 1.12.

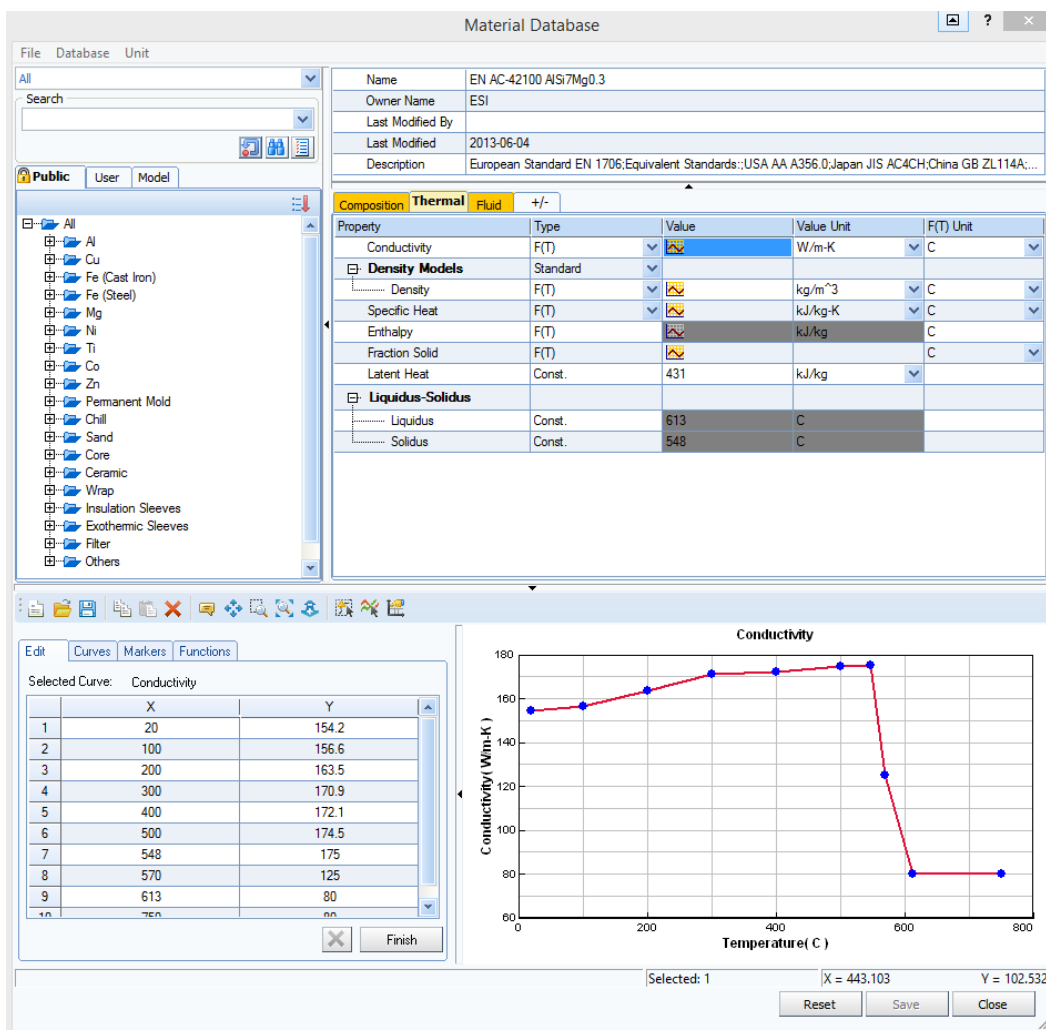


Obr. 1.12 *Volume manager* - Přehled objemových těles v simulaci s přiřazeným materiálem.

Jak je vidět prvním parametrem je typ materiálu. ProCast pro usnadnění rozeznává několik kategorií materiálů, kdy každý z nich má trochu jiné možnosti definice. Jedná se o:

- ❖ Alloy
- ❖ Channel
- ❖ Core
- ❖ Exothermic
- ❖ Filter
- ❖ Foam
- ❖ Insulation
- ❖ Mold

Další kolonkou je už konkrétní materiál, se svými specifickými vlastnostmi, který je možno zvolit z obsáhlé databáze programu. ProCast samozřejmě umožňuje i modifikace materiálů, které jsou k nalezení v jeho databázi nebo definici úplně nového materiálu. Vlastnosti, které je možno definovat jsou rozděleny do několika podmenu. Mezi, z pohledu tuhnutí odlitku, nejdůležitější patří Thermal, Fluid a Exothermic. Konkrétní vlastnosti je možno zadávat jako konstanty anebo jako funkci teploty, což je často nutností. Možnosti definice konkrétních vlastností jsou ukázány na Obr. 1.13, Obr. 1.14 a Obr. 1.15.



Obr. 1.13 Materiálová databáze Procastu (vlevo) a možnosti definice materiálů pomocí termofyzikálních parametrů (vpravo). Možnost definovat vlastnosti materiálů v závislosti na teplotě (dole).

Property	Type	Value	Value Unit	F(T) Unit
Viscosity				
Newtonian Viscosity	F(T)		centipoise	C
Surface Tension				
Surface Tension	Const.		N/m	
Permeability Type				
Permeability	Const.		m ²	

Obr. 1.14 Definice chování materiálů s tekutou fází.

Property	Type	Value	Value Unit	F(T) Unit
Burnt Fraction	F(t)			sec
Ignition Temperature	Const.	300	C	
Exothermic Energy	Const.	500	kJ/kg	

Obr. 1.15 Možnosti definice exotermických materiálů.

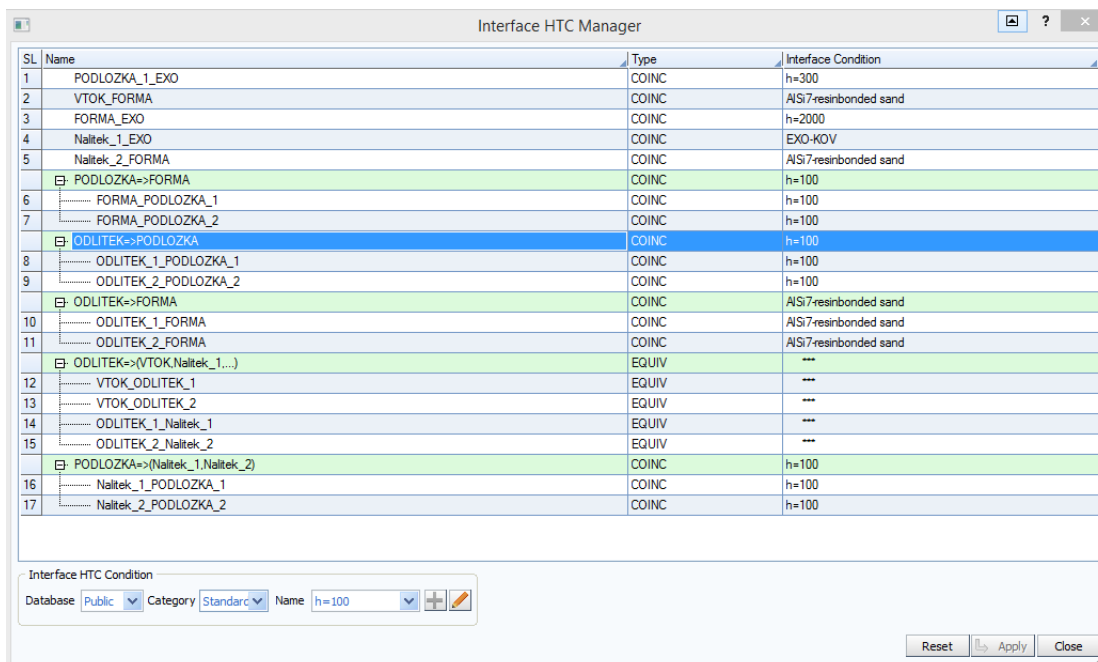
Další užitečnou funkcí je vygenerování vlastností zejména kovových materiálů podle jejich chemického složení viz. Obr. 1.16. Ve *Volume manageru* se dále zadávají okrajové podmínky. Počáteční teplota a procento naplnění objemu, kdy přirozeně dutiny formy mají 0% a samotná forma, obklady podložky atd. mají 100%. Poslední kolonka je určena pro výpočet pnutí a pro simulaci tuhnutí není důležitá.

Composition Thermal Fluid +/-		
Property	Value	Value Unit
[-] Thermodynamic Computations		
Solid Diffusion Model	Scheil	
	[Compute Properties]	
<input type="checkbox"/> CAFE Computations		
Element	%Composition	Recommended Range(%)
[-] Base		
Ag		0 ~ 0.5
B		0 ~ 0.5
C		0 ~ 0.5
Cr		0 ~ 0.5
Cu		0 ~ 5.5
Fe		0 ~ 1
Gd		0 ~ 0.5
Ge		0 ~ 0.5
Hf		0 ~ 0.5
Li		0 ~ 0.5
Mg	0.3	0 ~ 7.6
Mn		0 ~ 1.2
Ni		0 ~ 0.5
Sc		0 ~ 0.5
Si	7	0 ~ 17.5
Sn		0 ~ 0.5
Sr		0 ~ 0.5
Ti		0 ~ 0.5
V		0 ~ 0.5
Y		0 ~ 0.5
Zn		0 ~ 8.1
Zr		0 ~ 0.5

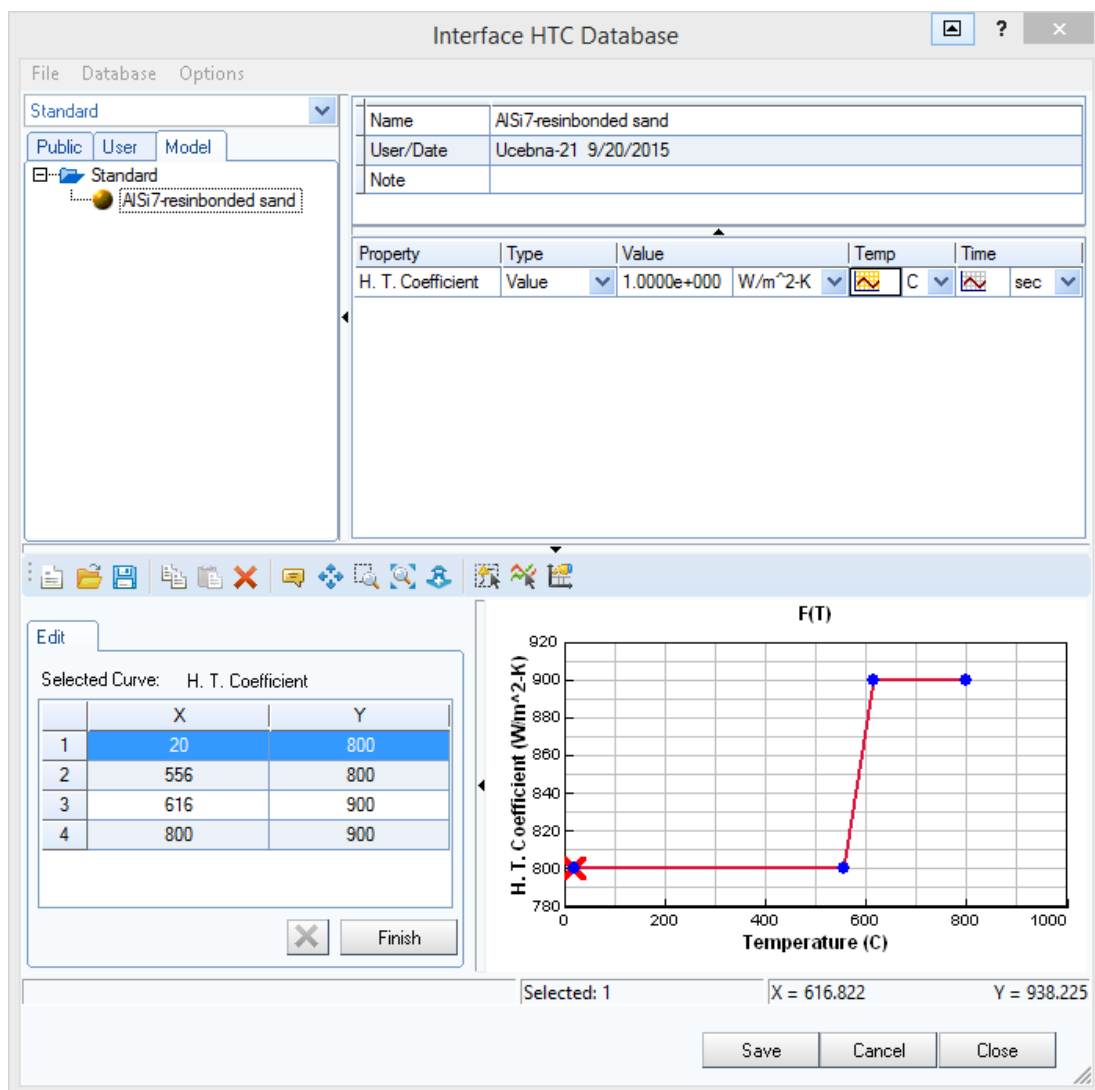
Obr. 1.16 Možnost vygenerovat vlastnosti kovových materiálů na základě chemického složení.

1.5.3.2 Definice počátečních a okrajových podmínek

Interface HTC manager je rozcestníkem, ve kterém jsou zobrazena všechna rozhraní mezi jednotlivými objemy viz Obr. 1.17. ProCast umožňuje definici dvou typů rozhraní EQUV a CONC. EQUV znamená, že na rozhraní není žádná překážka, která by bránila v přestupu tepla. Typicky se jedná o rozhraní kov-kov (vtoková soustava-odlitek). CONC rozhraní je typická definicí nějaké překážky v přestupu tepla a to pomocí součinitele HTC, který může být zadán jako konstanta nebo v závislosti na teplotě. Typicky závislý přestup tepla na teplotě s významnými rozdíly v jeho hodnotě je na rozhraní kov-formovací směs. Příklad definice HTC je na Obr. 1.18.

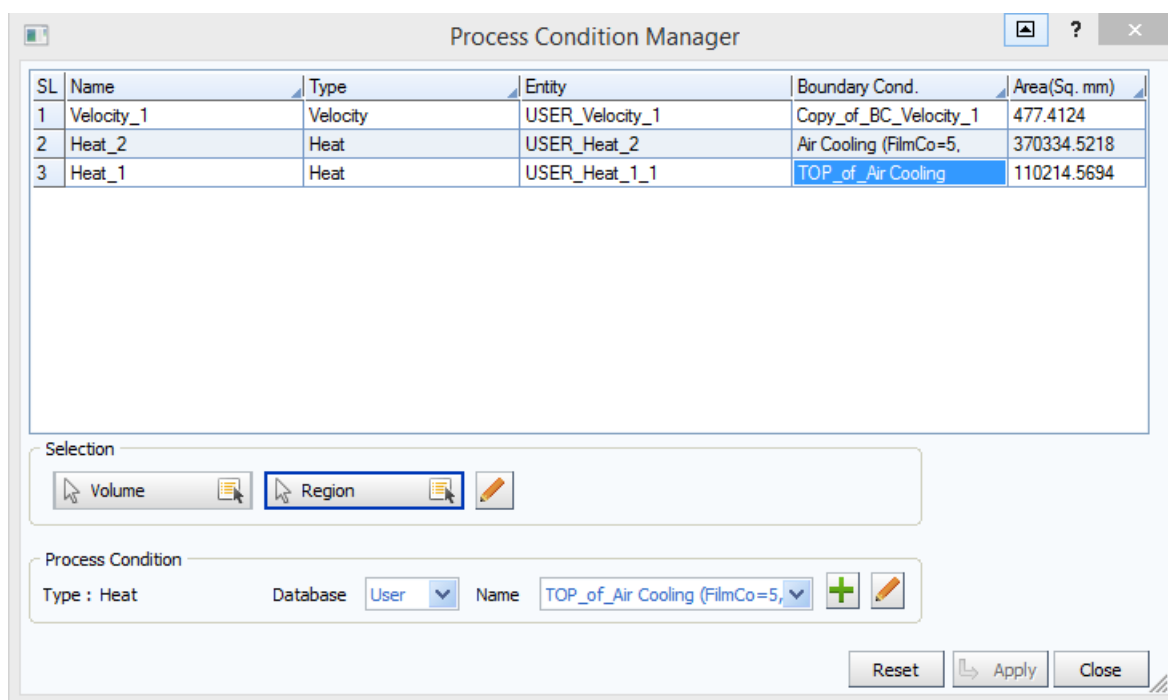


Obr. 1.17 Přehled rozhraní v simulaci s přiřazenou velikostí přestupu tepla pomocí součinitele HTC.

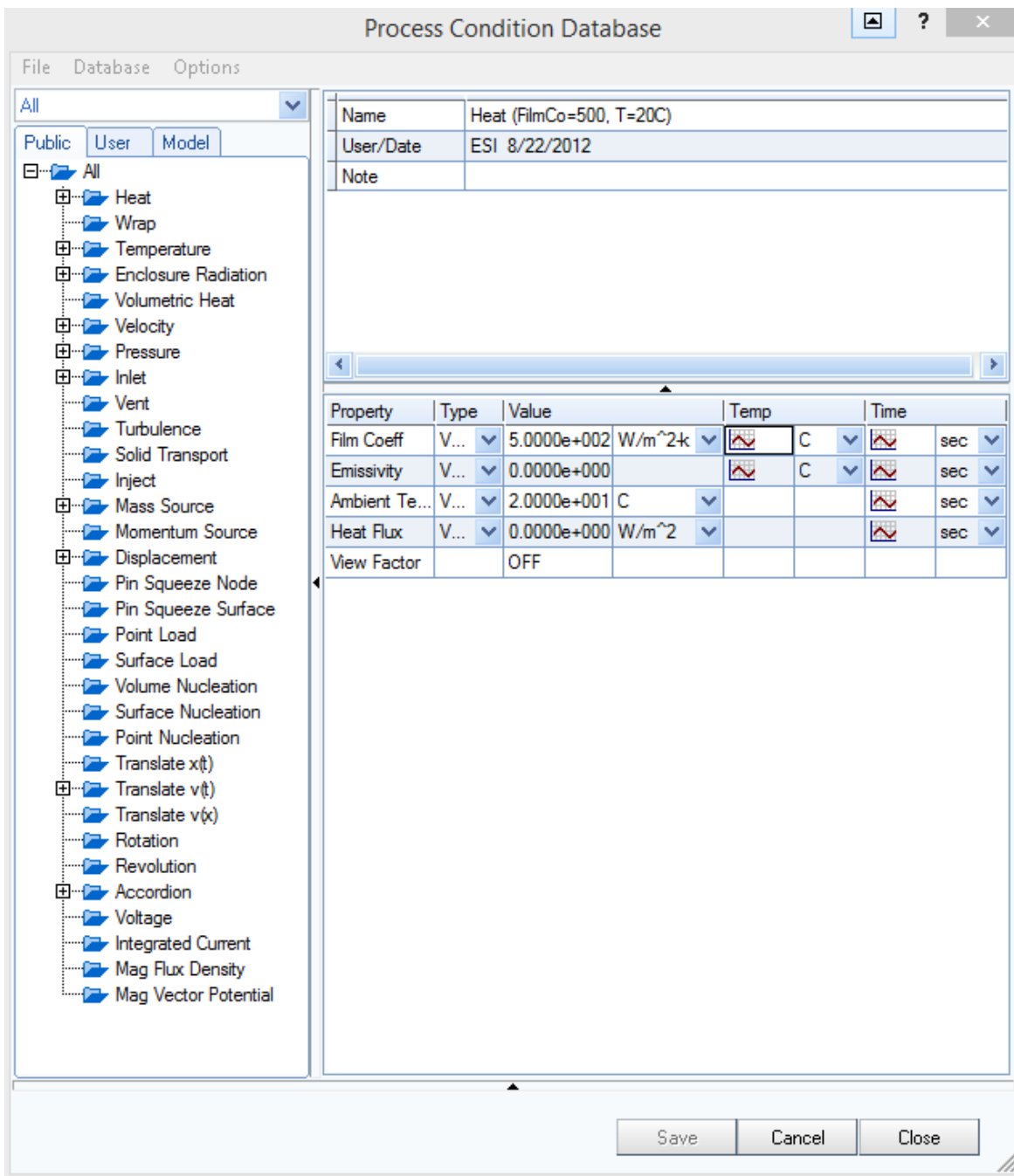


Obr. 1.18 Definice přestupu tepla HTC.

Dalšími důležitými parametry, které je nutné definovat, jsou podmínky procesu. Mezi ty nejdůležitější a prakticky nepostradatelné z pohledu přestupu tepla patří *Heat*, která určuje chování materiálů na rozhraní definovaných objemů a okolním prostředím. Konkrétně se může jednat o to jakou intenzitou je forma ochlazována okolním prostředím. Druhou podmínkou je pak definice vstupu kovu například pomocí objemového průtoku (podmínka *Velocit*). Všechny použité podmínky procesu jsou k nalezení v tabulce *Proces Condition Manager* viz příklad na Obr. 1.19. ProCast však obsahuje mnohem více možností definice s obsáhlou databází předdefinovaných podmínek procesu a samozřejmě umožňuje i uživatelskou definici viz Obr. 1.20.



Obr. 1.19 Podmínky procesu nadefinované v simulaci.



Obr. 1.20 Databáze podmínek (nalevo) procesu a příklad jejich definice(napravo).

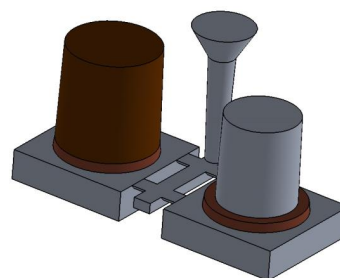
2 Experimentální měření

Pro posouzení vlivu exotermických nástavců na dobu tuhnutí hliníkových odlitek bylo navrženo experimentální měření. Znění návrhu je následující:

- ❖ Bude vytvořena forma, která se bude skládat ze dvou odlitek jednoduchého deskového tvaru.
- ❖ Každý odlitek pak bude opatřen nálitkem se stejným geometrickým modulem (stejného tvaru a velikosti), přičemž jeden z nich bude přirozený a druhý bude opatřen exotermickým obkladem.
- ❖ Budou testovány obklady společnosti HA Kovochem.
- ❖ Ke zjištění vlivu doby tuhnutí budou použity termočlánky.
- ❖ Data získána z experimentu budou použita pro zjištění posunu modulu a pro validaci následujících simulací pomocí programu ProCast.

2.1 První návrh a realizace experimentu pro měření doby tuhnutí systému odlitek-nálitků

Obecný návrh byl pak rozpracován do konkrétního řešení. Byly navrženy 4 typy forem viz. 3D schéma na Obr. 2.1. Jejich rozměry jsou pak specifické pro každou z nich, jsou uvedeny v Tab. 2.1 a schémata v Tab. 2.4. Každá z nich se skládala ze dvou odlitek (deskového typu) připojených na společnou vtokovou soustavu, které byly opatřeny nálitky o stejném geometrickém modulem. Desky ve formách F1, F2 a F3 měly nálitky o menším geometrickém modulu a některé z nálitků byly opatřeny exotermickým obkladem od společnosti HA Kovochem EK 40/70 W. Forma F4 měla geometrický modul nálitku větší a odlitek na pravé části byl opatřen exotermickým obkladem rovněž od společnosti HA Kovochem EK 60/90 W.



Obr. 2.1 Design formy.

Tab. 2.1 Rozměry dvoudílné formy.

Forma	Levá část			Pravá část		
	Odlitek (deska)	Nálitek		Odlitek (deska)	Nálitek	
F1	120 x 120 x 30	∅ 40 x 60	přirozený	120 x 120 x 30	∅ 40 x 60	exoterm. EK 40/70 W
F2	200 x 200 x 25	∅ 40 x 60	exoterm. EK 40/70 W	200 x 200 x 25	∅ 40 x 60	přirozený
F3	120 x 120 x 30	∅ 40 x 60	exoterm. EK 40/70 W	200 x 200 x 25	∅ 40 x 60	exoterm. EK 40/70 W
F4	160 x 160 x 40	∅ 60 x 78	přirozený	160 x 160 x 40	∅ 60 x 78	exoterm. EK 60/90 W

Všechny formy byly navrženy tak, aby poměr $M_{N(\text{tepelny})}/M_o$ odpovídal hodnotě 1,2. Byly vyrobeny ze samotuhnoucí směsi dostupné v univerzitní slévárně ručním formováním za pomoci dřevěných modelů. Všechna použitá zařízení a materiály jsou pak blíže popsány v Tab. 2.2 a Tab. 2.3.

Tab. 2.2 Spotřební materiál použitý při výrobě forem.

Materiál	Specifikace
Formovací směs	samotuhnoucí Alfaset (alkalická fenolická pryskyřice vytvrzená modifikovaným esterem)
Exotermický obklad F1-F3	HA Kovochem EK 40/70 W
Exotermický obklad F4	HA Kovochem EK 60/90 W
Odlévaný kov	silumin - AlSi7Mg0,3

Tab. 2.3 Zařízení použité při výrobě forem.

Zařízení	Specifikace
Rám spodek	ocelový rám
Rám vršek	ocelový rám
Model odlitku	dřevěný, deska s úkosem 1°
Model nálitku	dřevěný, válec s úkosem 1°
AD převodník	OMB-DAQ-55 s rozšiřujícím modulem OMB-PDQ2
Termočlánky	typ K (NiCr-Ni)
Tavící pec 1	LAC, kruhová pec M na výpal keramiky s kelímkem

Metodika měření je shodná s metodikou experimentálního měření 2 a je blíže popsána v kapitole 2.2. Lící teploty byly 750°C a doba lití asi 10 s. Umístění termočlánků a následné křivky tuhnutí jsou shrnuty v Tab. 2.4. Zamýšleným výstupem experimentu pak mělo být:

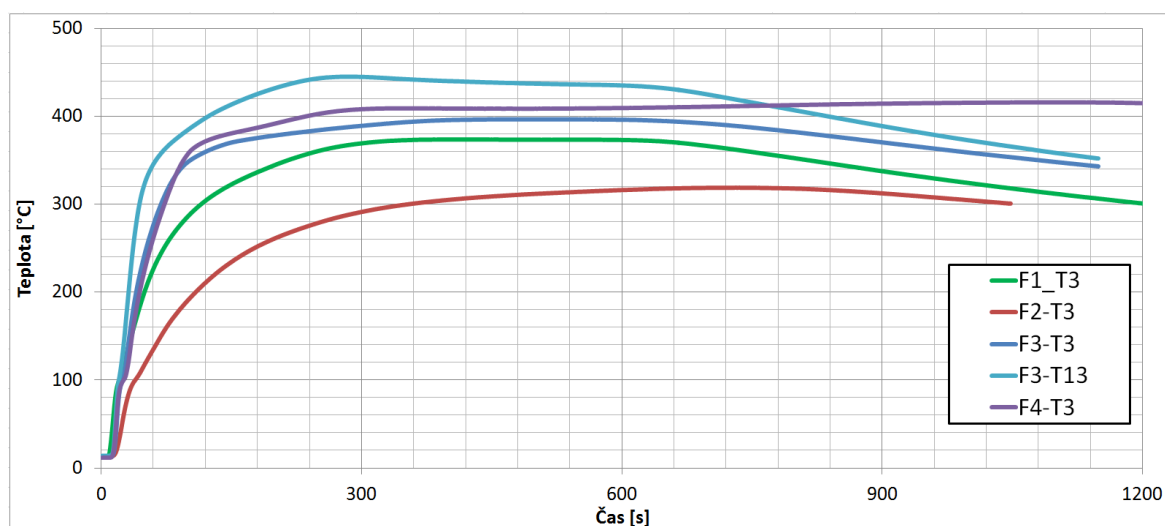
- ❖ Získat data pro následnou simulaci tuhnutí.
- ❖ Zjistit k jakému posunu modulu f reálně dochází při použití exotermických obkladů, kdy výrobcem udávané hodnoty jsou určeny pro slitiny na bázi železa.
- ❖ V neposlední řadě bylo plánováno zjistit jaký má vliv rozlehlost odlitku na dobu tuhnutí nálitků.

První dva cíle nemohly být splněny, protože nedošlo k zapálení exotermických obkladů. To lze na první pohled vyčíst z grafů v Tab. 2.4, kdy průběhy tuhnutí nálitků s exotermickým obkladem (T2) se prakticky překrývají s průběhy tuhnutí nálitků obyčejných (T12). Doba tuhnutí je stejná a nedochází tak k žádnému posunu modulu. Vysvětlením toho chování je, že nedochází k zapálení exotermický obkladů z důvodů malého prohřátí. To dokládají průběhy teplot zobrazené v Graf 2.1, které byly naměřeny ve stěně exotermického obkladu, kdy na nich není možné pozorovat žádný extrém, který by nasvědčoval spuštění exotermické reakce. Křivky dosahují různých maximálních teplot. Problémem bylo praktické umístění termočlánků do stejných míst, komplikované pak bylo zejména dodržet konstantní vzdálenost od osy nálitku (následná měření popsána v kapitole 2.2. vykazují přesnosti vyšší a to i díky zkušenostem získaným tohoto měření). Při srovnání

těchto průběhů s následným druhým experimentem viz kapitola 2.2 bylo zjištěno, že křivky nedosahují zápalné teploty 460°C odhadnuté při druhém měření.

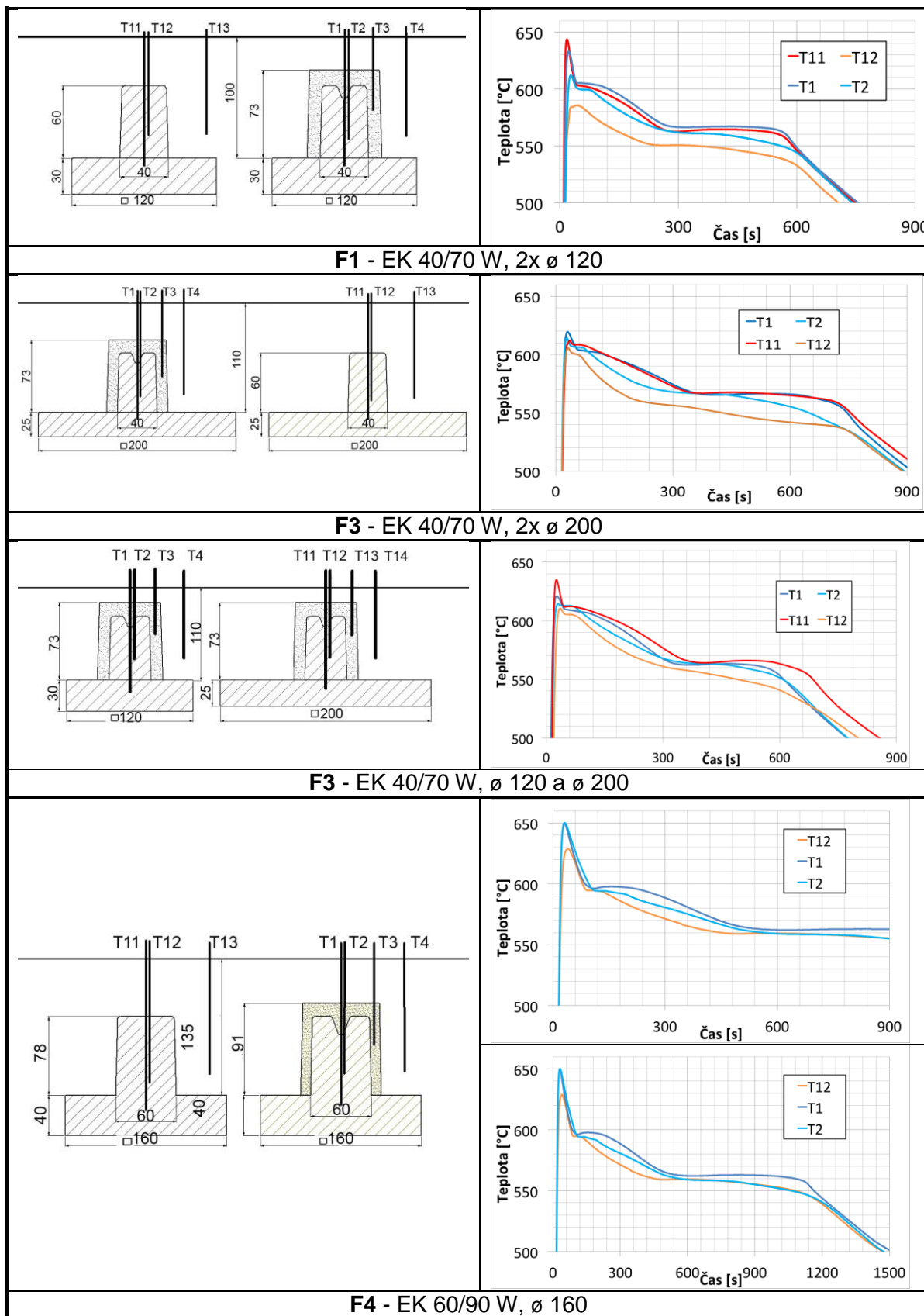
Závěrem se dá říci, že směs obkladů HA Kovochem typu EK xx/xx W není vhodné používat pro hliníkové slitiny za použití nálitků menších rozměrů. Dá se předpokládat, že i další slitiny s nízkou teplotou tavení budou mít problémy s prohřátím a následným zapálením obkladu.

Z výsledných křivek však bylo možné částečně posoudit vliv rozlehlosti odlitku na dobu tuhnutí nálitku. Ze srovnání dob tuhnutí pro formy F1 (méně rozlehlá deska) a F2 (více rozlehlá deska) uvedených v Tab. 2.4 vyplývá, že odlitky i jejich nálitky ve formě F2 tuhly delší doby (pozn. moduly odlitků i nálitků pro obě formy jsou totožné). Tento výsledek je paradoxní, protože dle teorie by zde měl hrát roli tvarový faktor odlitku q , který by měl zapříčinit větší vysávání nálitku v případě formy F2 a tím i zkrátit jeho dobu tuhnutí. Pravděpodobně však převážil účinek většího celkového objemu odlitku F2 a tím i většího množství tepla v něm nahromaděného a to pak zejména tepla latentního, což prodloužilo dobu tuhnutí nálitku formy F2. Pro doložení této hypotézy by však bylo potřeba provést více měření.



Graf 2.1 Průběhy teplot v exotermickém obkladu (T3 a T13) pro všechny formy.

Tab. 2.4 Schéma experimentálních odliktů se základními rozměry a umístěním termočlánků nalevo a naměřené křivky tuhnutí napravo.



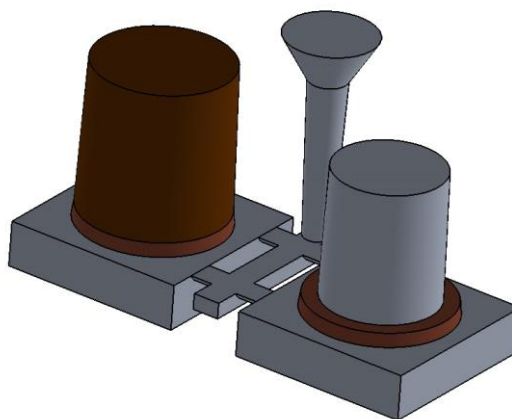
2.2 Druhý návrh a realizace měření doby tuhnutí systému odlitek-nálitek

Po prvotním neúspěchu, kdy nedošlo k zapálení exotermických obkladů a tudíž nebylo možné prakticky jakéhokoliv posouzení jejich vlivu na tuhnutí hliníkových slitin, bylo nutno navrhnout nový experiment.

2.2.1 Návrh experimentu

Po konzultaci s výrobcem obkladů HA Kovochem bylo zjištěno, že méně rozměrné obklady nejsou v praxi pro hliníkové odlitky používány. Pro nový experiment byl pak zvolen v praxi používaný a tedy „ověřený“ exotermický obklad EK 100/130 W. Jeho parametry jsou k nalezení v Tab. 2.5 a schéma je vyobrazena na Obr. 2.2. Bohužel vzhledem k omezené kapacitě tavicího kelímku nebylo možné navrhnout odlitek hmotnější než cca 11kg, byl porušen poměr modulů ($M_{N(\text{tepelný})}/M_o = 1,2$) a nálitek byl postaven na modulově menší desku. Následkem tohoto počínu prakticky odpadla možnost validace simulace na základě tvaru staženiny. To lze vidět na Obr. 0.4 v příloze 1, kdy z důvodů předimenzování a z endogenního charakteru tuhnutí hliníkových slitin vzniká pouze rozptýlená staženina s minimálním poklesem hladiny. Byla tedy navržena jednoduchá soustava odlitek-nálitek. Obr. 2.2 ukazuje tuto soustavu, která se skládá ze dvou deskových odlitků a válcových nálitků stejných rozměrů, přičemž jeden nálitek je opatřen posuzovaným exotermickým obkladem. Jeho geometrie je na Obr. 2.3, rozměry a parametry v Tab. 2.5. Uvedený tepelný modul 2,7 cm pro exotermický nástavec je pouze orientační, protože výrobce garantuje jeho hodnotu pouze pro slitiny železa. Druhý nálitek je bez jakékoliv izolace a jeho stěny jsou tedy tvořeny stejným materiálem jako zbytek formy. Toto rozvržení je výhodné z několika důvodů:

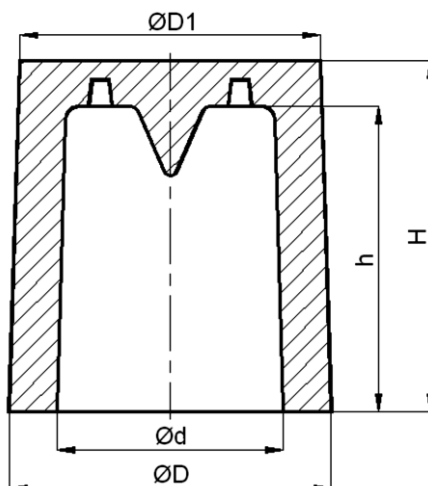
- ❖ Rozvržení umožňuje získat posun modulu exotermického obkladu, což je jedna z hlavních charakteristik, díky které jsme schopni posoudit jeho účinnost.
- ❖ Odlitky jsou napojeny na stejnou vtokovou soustavu, což zaručuje stejné podmínky plnění a stejnou lící teplotu.



Obr. 2.2 3D Pohled na navrhnutou soustavu skládající se ze dvou deskových odlitků, dvou válcových nálitků a společné vtokové soustavy.

Tab. 2.5 Parametry exotermického obkladu

D [mm]	H [mm]	D1 [mm]	d [mm]	h [mm]	Modul [cm]	Objem [dm ³]
127	130	120	100	116	2,7	0,7

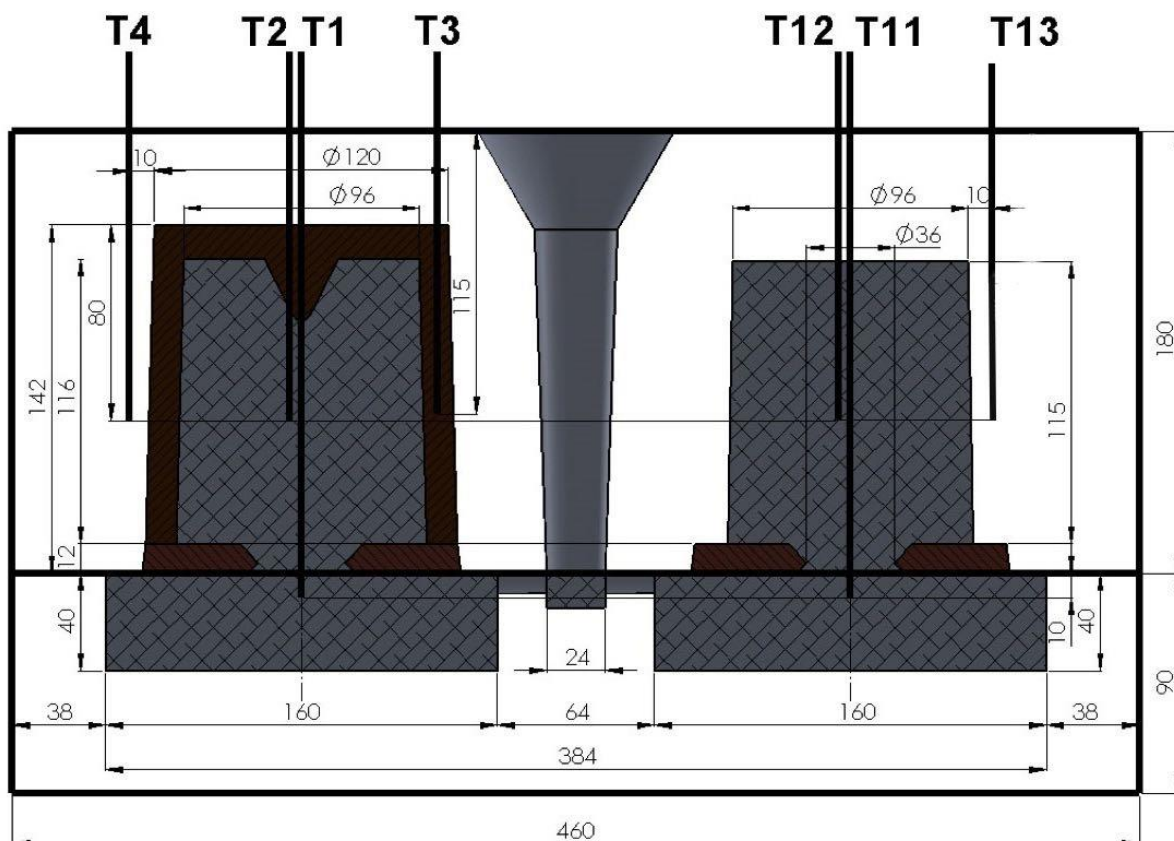


Obr. 2.3 Rozměry exotermického obkladu

Za účelem získání potřebných dob tuhnutí byly použity termočlánky. Obr. 2.4 ukazuje jejich konkrétní umístění ve formě, kdy jsou termočlánky situovány v centru nálitků (T2,T12), v podnálitkové části odlitků (T1,T11), ve formovací směsi v blízkosti nálitků (T4, T13) a jeden termočlánek je přímo v exotermickém obkladu (T3). Tab. 2.6 stručně odůvodňuje zvolené umístění:

Tab. 2.6 Odůvodnění umístění termočlánků.

Termočlánky	Umístění	Účel
T1,T11	v odlitku těsně pod nálitkem	doby tuhnutí odlitku
T2,T12	v centru nálitku	doby tuhnutí nálitku a faktoru posunutí modulu
T3	ve stěně exotermického obkladu	razance hoření exotermické směsi
T4,T13	ve formovací směsi	odvod tepla formovací směsí
Všechny	-	validace simulace

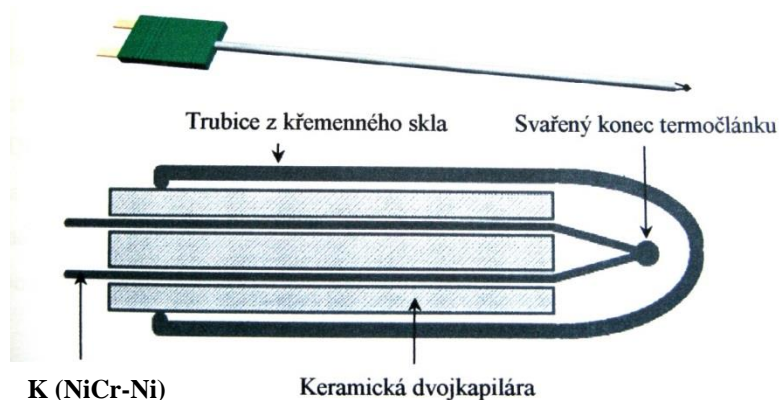


Obr. 2.4 Umístění termočlánků v odlitcích. Termočlánky jsou vyznačeny tlustou čarou. Hranice dvoudílné formy jsou rovněž označeny tlustou čarou.

2.2.2 Realizace experimentu - technologie, zařízení a materiály

Dle popsaného návrhu byly zhotoveny a odlity 3 formy s označením A, B a C. Vzhledem ke složitosti přípravy se první forma C nepovedla dle očekávání, přičemž některé termočlánky vykazovaly odchylky v umístění k původnímu návrhu nebo selhaly. Forma také byla nedolitá. Z těchto důvodů výsledné průběhy teplot nejsou důvěryhodné a nebyly použity pro validaci simulací. Nicméně zkušenosti získané při výrobě této formy posloužily ke zhotovení forem A a B, které odpovídají návrhu s vysokou spolehlivostí. To je potvrzeno i výslednými křivkami průběhu tuhnutí, které si odpovídají velmi dobře, viz vyhodnocení v kapitole 2.2.3.

Pro zhotovení forem byla zvolena pryskyřicová samotuhnoucí směs Alfaset, kterou disponuje univerzitní laboratorní slévárna na FSI. Odlitky byly odlity z hliníkové slitiny AlSi7Mg0,3, kdy slitina byla z důvodů jednoduchosti ponechána v základním nemodifikované a neodplyněném stavu. Pro měření průběhů teplot byly použity termočlánky typu K (NiCr-Ni), které byly napojeny na kompenzační vedení připojené na AD převodník OMB-DAQ-55 s rozšiřujícím modulem OMB-PDQ2 a dále do počítače, kde byl signál zpracováván a zaznamenáván. Termočlánky zasahující do dutiny formy (T1, T2, T11 a T12) byly umístěny ve skleněných trubičkách z křemenného skla, které bránily jejich zničení. Je tedy nutno uvažovat určité zpoždění oproti realitě. Schéma uložení termočlánku v trubičce je na Obr. 2.5.



Obr. 2.5 Schéma umístění termočláunku ve skleněné trubičce. [7]

Použitý materiál, zařízení pro výrobu forem a parametry odlitku jsou přehledně shrnuty v Tab. 2.8, Tab. 2.9 a Tab. 2.9. Fotodokumentace z výroby forem a fotografie výsledných odlitků jsou k nalezení v příloze 1.

Doba lití forem byla asi 16 s a teplota lití 760°C (pro jistotu zapálení exotermického obkladu byla volena takto zvýšená teplota). Odlití bylo provedeno ručně přímo z vyjímatelného tavicího kelímku.

Tab. 2.7 Spotřební materiál použitý při výrobě forem

Materiál	Specifikace
Formovací směs	samotuhnoucí Alfaset (alkalická fenolická pryskyřice vytvrzená modifikovaným esterem)
Exotermický obklad	HA Kovochem EK 100/130 W
Podnálitková podložka	HA Kovochem EK 100/130 W B2
Odlévaný kov	silumin - AlSi7Mg0,3

Tab. 2.8 Zařízení použité při výrobě forem

Zařízení	Specifikace
Rám spodek	ocelový rám o rozměrech 460x300x90
Rám vršek	ocelový rám o rozměrech 460x300x180
Model odlitku	dřevěný, deska 160x160x40 s úkosem 1°
Model nálitku	dřevěný, válec $\varnothing 100-116$ s úkosem 1°
AD převodník	OMB-DAQ-55 s rozšiřujícím modulem OMB-PDQ2
Termočláanky	typ K (NiCr-Ni)
Tavicí pec 1	LAC, kruhová pec M na výpal keramiky s kelímkem
Tavicí pec 2	LAC, kruhová pec

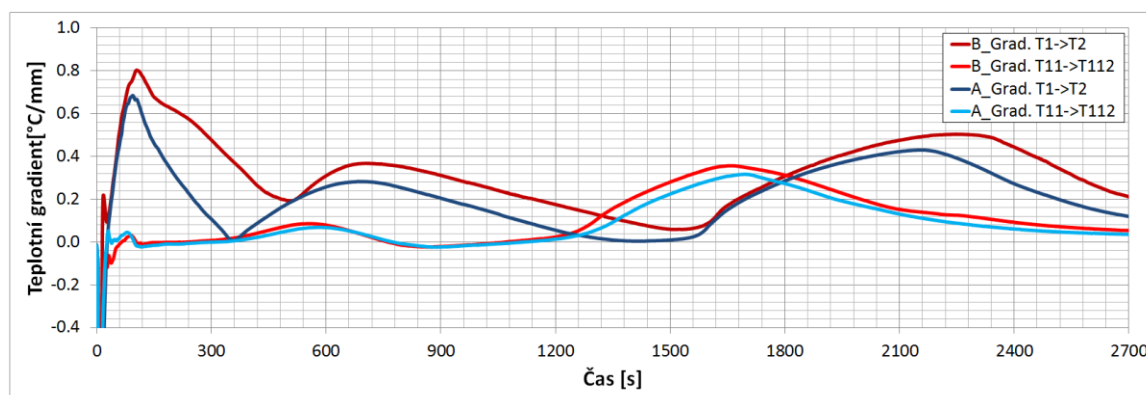
Tab. 2.9 Parametry soustavy odlitek-nálitek

Parametry	Odlitek (deska)	Nálitok	Celá dvojforma
Hmotnost [kg]	2,4	1,8	9,8
Objem [dm ³]	1	0,75	4
Modul geometrický [cm]	1,3	2	-

2.2.3 Výsledné křivky tuhnutí a posun modulu

Hlavním výstupem experimentálního měření jsou naměřené průběhy teplot. Souhrnně jsou všechny naměřené průběhy ze všech tří měření (A, B a C) uvedeny v grafech v příloze 2. Pouze průběh teplot z bodu C-T1 chybí vzhledem k poruše termočlánku. Z naměřených průběhů teplot byl vypočítán teplotní gradient mezi nálitkem (T_2/T_{12}) a odlitkem (T_1/T_{11}), který ukazuje Graf 2.2. Jeho kladné hodnoty znamenají usměrněné tuhnutí. Je vidět, že gradient je pro odlitky, které mají náliček opatřený exotermickým obkladem, příznivější. U přirozených náliček se gradient dlouhou dobu drží kolem nuly. V tomto časovém okamžiku hrozí vznik mikroporozity v odlitku, na kterou jsou hliníkové odlitky obecně citlivé.

Výsledky ze všech tří měření na první pohled ukazují, že exotermický nástavec zafungoval, tedy došlo k jeho zapálení (výrazný extrém na zelené křivce, kdy se jedná o termočlánek T3 umístěný ve stěně exoobkladu). Důvodem pro menší razanci píku u měření A je to, že termočlánek A-T3 byl patrně ve skutečnosti umístěn dále od osy náličky, nežli termočlánky B-T3 a C-T3. Tato chyba patrně vznikla nepřesností jeho umístění. Druhou možností je výskyt lokální nehomogenosti směsi. Nicméně pozdější výsledky potvrzují, že exonástavec zafungoval stejně dobře jako exonástavec ve formě B (posun modulu je téměř shodný). Dalším nepřehlédnutelným faktem je, že forma C tuhla znatelně déle. Chyba je patrně způsobena částečným nedolítím formy. To že nedolítá forma tuhne déle se může zdát zvláštní. Možným vysvětlením je, že odvod tepla z hladiny sáláním může být méně intenzivní, než přestup tepla vedením u dolité formy. Měření C nebylo bráno v potaz při validaci simulace.



Graf 2.2 Teplotní gradient ve formě mezi nálitkem (T_2/T_{12}) a odlitkem (T_1/T_{11}), kladné hodnoty gradientu znamenají usměrněné tuhnutí

Křivky tuhnutí byly následně numericky zderivovány viz příloha 2. Vzhledem k velkému rozptylu hodnot, byly výsledné body v Excelu proloženy křivkou klouzavého průměru 16. (To znamená, že z 16 po sobě jdoucích hodnot byla spočtena průměrná hodnota, která byla zanesena do grafu.) Z polohy lokálního minima za eutektickou prodlevou byly určeny doby tuhnutí v jednotlivých místech. Z těchto hodnot byl pak vypočítán posun modulu a následně tepelný modul náličky. Naměřené a vypočtené hodnoty jsou uvedené v Tab. 2.10.

Tab. 2.10 Naměřené a vypočtené parametry exotermických nálitků

Forma	A	B	C
Konec tuhnutí nálitku s exotermickým obkladem (T2) [s]	2370	2497	2553
Konec tuhnutí obyčejného nálitku (T12) [s]	1905	1933	2218
Posun modulu f	1,12	1,14	1,07
Geometrický modul nálitku	2	2	2
Vypočtený tepelný modul [cm]	2,24	2,28	2,14

Posuvy modulů u forem A a B i přes drobné rozdíly v celkových dobách tuhnutí jsou téměř totožné. Jejich hodnota je však relativně nízká a slovně vyjadřuje, že exotermický obklad zvětšuje modul nálitku pouze o 12-14%. Výsledný tepelný modul exotermického nálitku pro slitiny hliníku je pak 2,24 - 2,28 cm, který je výrazně nižší nežli modul udávaný výrobcem pro slitiny železa (2,7 cm). Při zpětném dopočtení posuvu modulu z tepelného modulu udávaného výrobcem můžeme tento rozdíl vyjádřit kvantitativně viz následující výpočet:

$$f = \frac{M_{\text{teplný}}}{M_{\text{geometrický}}} = \frac{2,7 \text{ cm}}{2 \text{ cm}} = 1,35 \Rightarrow 35\% \quad (2.1)$$

Je vidět exotermický obklad nálitků pro železné slitiny funguje o 21 - 23% lépe nežli pro slitiny hliníku.

Z toho vyplývá, že stejný exotermický náletek má různé moduly při použití různých slitin. Důvod tohoto chování plyne ze samé podstaty procesu. Exotermický nástavec prodlužuje dobu tuhnutí na základě produkce dodatečného tepla do soustavy formaků. Nicméně procentuálně je toto teplo vždy relativní vůči teplu, které je nahromaděno v celém systému a rychlosti jakou je teplo odváděno ze systému, tím pádem musí být i relativní přínos obkladu na prodloužení doby tuhnutí. Mezi materiálové a termofyzikální vlastnosti, které mohou mít zásadnější vliv na tento proces, budou patřit:

- ❖ Latentní teplo odlévané slitiny
- ❖ Licí teplota kovu
- ❖ Měrná tepelná kapacita a hustota kovu
- ❖ Interval tuhnutí slitiny
- ❖ Tepelná vodivost

S největší pravděpodobností nezanedbatelný vliv na posun modulu f bude mít latentní teplo slitiny. To je u hliníkových slitin jedno z největších ze všech slévárenských slitin. Prověření těchto faktů je pak ukázáno v následující kapitole 3 věnující se počítačovým simulacím.

2.3 Doprovodná měření pro získání dat pro simulaci

Pro zjištění vlastností exotermického obkladu od firmy HA Kovochem byla navržena a provedena měření vyprodukovaného tepla, zápalné teploty a rychlosti hoření. Data pak sloužila pro definici obkladu v simulaci.

2.3.1 Diferenční skenovací kalorimetrie (DSC)

Za účelem získání vyprodukovaného tepla a zápalné teploty exotermického obkladu bylo provedeno DSC měření na Přírodovědecké fakultě Masarykovy univerzity v Brně.

Principem měření je udržování dvou vzorků (referenčního a měřeného) na stejné teplotě, přičemž oba vzorky jsou současně zahřívány pod stejným teplotním programem. V praxi se rozlišují dva základní typy analyzátorů: **Diferenční skenovací kalorimetrie s kompenzací příkonu**, kdy přístroj měří energii, kterou musí dodat navíc anebo ubrat v případě, že probíhá nějaký děj v testovaném vzorku. **Diferenční skenovací kalorimetrie s tepelným tokem**. Zde jsou oba vzory spojeny tepelným mostem a je měřen tepelný tok mezi nimi. Obě měřicí metody dávají stejné výsledky. Výsledkem měření je pak graf závislosti měrného výkonu na teplotě. Pokud se na křivce objeví odchylka od zvoleného teplotního režimu, jedná se o exotermickou nebo exotermickou reakci, která probíhá v měřeném vzorku. Je konvencí, že exotermické píky jsou vynášeny v kladném směru osy y.

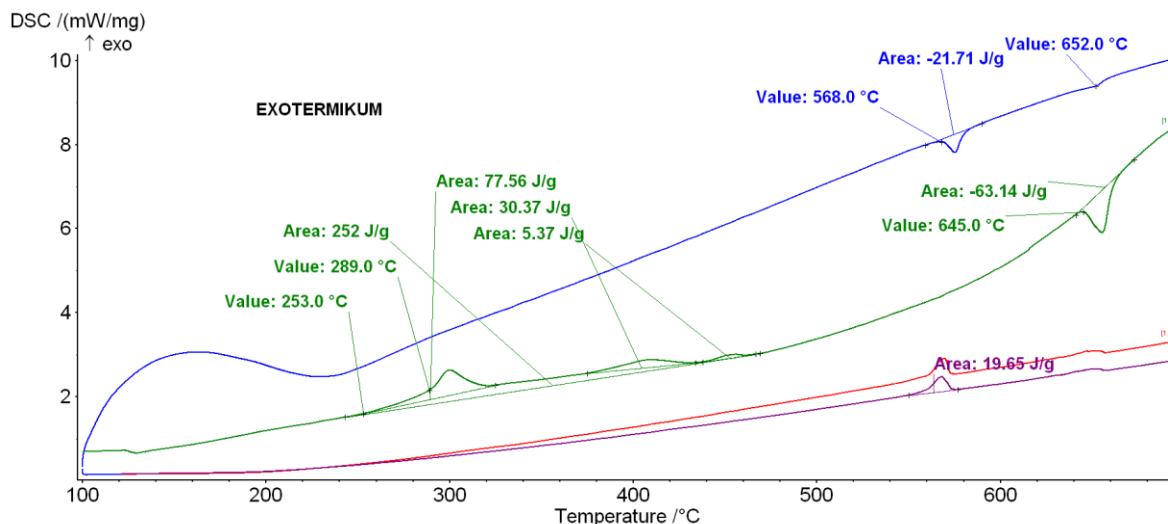
Pro účely měření exotermického obkladu byl odebrán vzorek o navážce 16,4 mg. Další parametry měření jsou pak v Tab. 2.11. Naměřené křivky jsou na Obr. 2.6 a jejich význam popsán v Tab. 2.12.

Tab. 2.11 Parametry a použité zařízení DSC analýzy měření.

Sestava DSC		
Kelímky	VK1+V1=219.9 mg	VK2+V2=225,4 mg
Vzorek	Hrudka o hmotnosti 16,4 mg	
Ochranná atmosféra	Ar7N	
Parametry měření	Proplachy RV 0,042 mbar, Ar rychle, RV 0,038 mbar-Ar pomalu, RV 0,038 mbar-Ar kombinace	
Měření dle	DSC_EXO_3_Al2O3_70mlAr_A.sss	

Tab. 2.12 Význam křivek z termické analýzy.

Křivka	Význam
Zelená	První zahřátí vzorku
Modrá	Druhé zahřátí vzorku
Červená	První ochlazování vzorku
Fialová	Druhé ochlazování vzorku



Obr. 2.6 DSC měření. Zelená křivka znázorňuje první ohřev vzorků s odečtenou velikostí exotermických pík a jejich zápalnou teplotou. Další křivky vyjadřují chování vzorku při druhém zahřátí (modrá) a při prvním a druhém ochlazení vzorku (červená a fialová).

Nejdůležitější křivka je z pohledu vyhodnocení vlastností exotermického obkladu zelená, která popisuje chování materiálu při prvním zahřátí. Je na ní vidět jeden výrazný pík, který začíná narůstat asi při teplotě 250 °C přičemž jeho vyprodukovaná energie je 77,6 J/g. Další dva viditelné píky jsou výrazně menší a vyprodukovaly energii 30 J/g a 5 J/g. Jejich součtem tedy můžeme získat energii 113,6 J/g, což ve srovnání například s exotermickými materiály uvedených v databázi simulačního programu ProCast(, kde hodnoty vyprodukovaného tepla u nejslabší exotermických obkladů začínají na 400 J/g,) je velmi málo. Následně tedy byly sečteny všechny píky dohromady a získána hodnota vyprodukované energie 252 J/g. Tato hodnota pak byla použita, pro samotné simulace. I tak se však později ukázalo, že vyprodukované teplo je příliš malé. Důvodem, proč naměřené vyprodukované teplo nemusí reálně popisovat chování exotermického obkladu je relativně malá navážka, kdy může sehrát roli náhoda a složení vzorku nemusí pak odpovídat složení celého obkladu. Také chování exotermického obkladu může být ve formě, kde panuje odlišná atmosféra a jiné teplotní režimy odlišná.

Dalším důležitým parametrem pro následné simulace je zápalná teplota exotermické směsi. Ta byla určena jako prvotní moment, kdy začíná narůstat exotermický pík, tedy 250 °C.

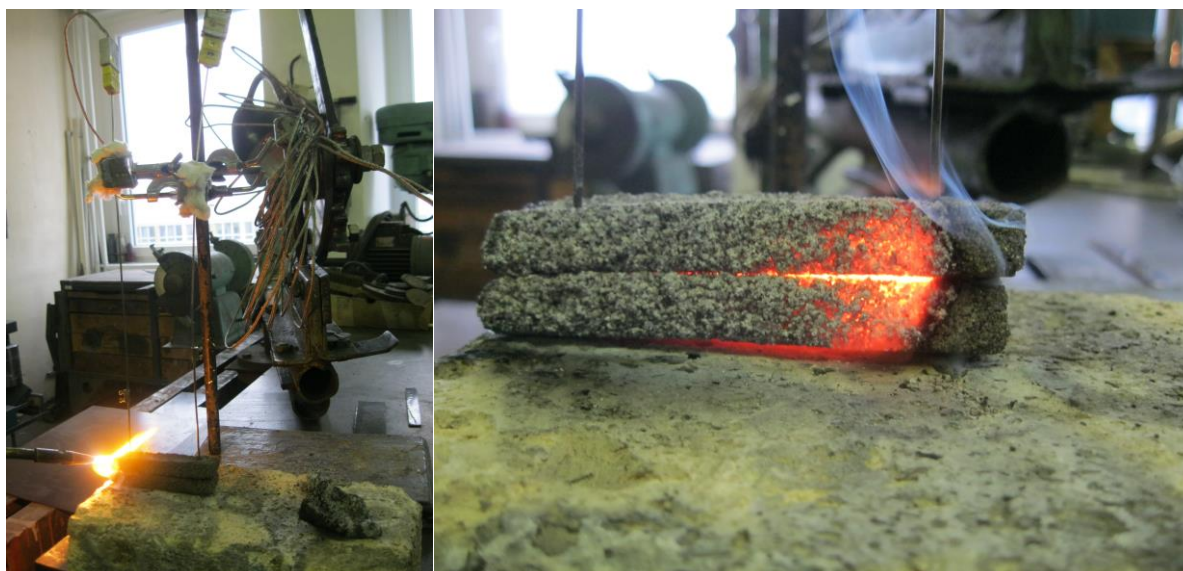
2.3.2 Měření doby hoření exotermické směsi

Dalším důležitým parametrem exotermických nástavců je rychlost hoření. Pro zjištění tohoto parametru byl navržen a zrealizován jednoduchý experiment. Z exotermického nástavce bylo vyříznuto několik podlouhlých obdélníkových vzorečků. Na oba konce byly pak umístěny termočlánky, kdy z křivek posunu těchto dvou křivek byla vypočítána rychlost hoření. Následně byly vzorečky položeny na šamotovou cihlu a zapáleny. Při prvním pokusu bylo zjištěno, že odvod tepla z pouze jednoho vzorečku je tak vysoký, že exotermická reakce není stabilní a vzorek uhasne.

Úspěšným řešením tohoto problému je položení dvou vzorečků na sebe anebo umístění zkušebního trámku na již vyhořelý. Realizaci experimentu ukazuje Obr. 2.7. Celkem byla provedena dvě měření, která se velmi dobře shodují ve výsledné rychlosti hoření 0,34 mm/s a 0,35 mm/s. Tyto výsledky pak korespondují i s rychlostí hoření uváděnou výrobcem 0,37 mm/s. Parametry měření jsou uvedeny v Tab. 2.13.

Tab. 2.13 Parametry měření rychlosti hoření exotermu.

Měření	Rozměry vzorečku [mm]	Rychlost hoření [mm/s]	Poznámka
První	13x20x75	0,35	dva vzorky na sobě
Druhé	13x20x60	0,34	jeden vzorek umístěný na dvou vyhořelých
Výrobcem	∅ 50-50	0,37	laboratorní váleček (standard GF)



Obr. 2.7 Realizace experimentu pro zjištění rychlosti hoření exotermické směsi.

3 SIMULACE DOBY TUHnutí SYSTÉMU NÁLITEK-ODLITEK

Vzhledem k tomu, že měření ve slévárenství jsou pracná, časově i finančně náročná, je využití počítačové simulace pro pochopení vlivu exotermických obkladů na tuhnutí hliníkových slitin více než příhodné.

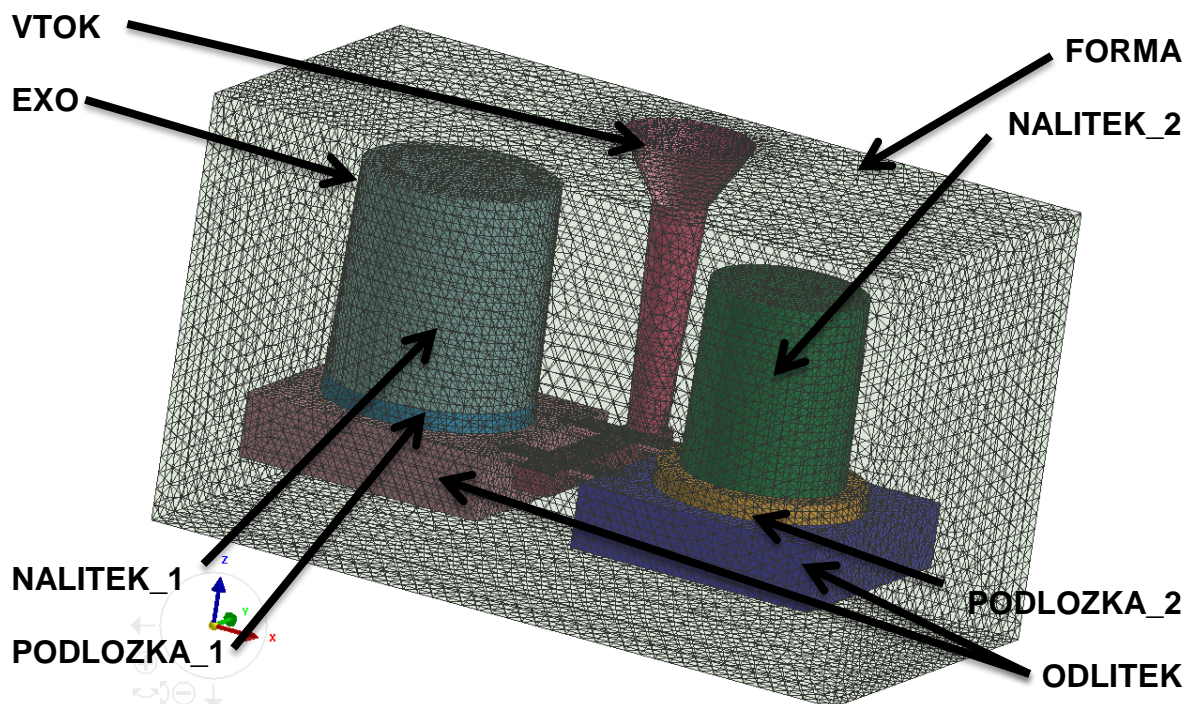
3.1 Simulace reálného měření

Prvním dílčím cílem bylo nasimulovat tuhnutí soustavy odlitek-forma tak, aby odpovídalo experimentálnímu měření popsanému v předchozí kapitole 2.2. Pro validaci simulace tak posloužily křivky průběhu teplot získaných ze všech 7 termočlánků z měření A a B viz Příloha 2. Cílem byla co největší shoda křivek obdržených z měření a vypočítaných ze simulace. Tímto postupem pak byla zpětně zpřesněna termofyzikální data pro měřenou soustavu. Jednalo se tedy o metodu reverzního inženýrství.

3.1.1 Vstupní data do simulace

Pro simulaci byla použita data hned z několika zdrojů. Hlavním zdrojem byla databáze programu ProCAST. Termofyzikální data slitiny AlSi7Mg0,3 byla převzata z literatury [4] MILLS, K. *Recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys*. Cambridge: Woodhead, což je publikace, ve které jsou uvedena experimentálně měřená termofyzikální data běžných slévárenských slitin. Třetím zdrojem byla vlastní měření, která jsou popsána v odstavci 2.3. Jednalo se o měření vlastností exotermické směsi (zápalná teplota, vyprodukované teplo a rychlost hoření). Tyto vlastnosti jsou pro každý exotermický obal specifické, v literatuře málo popsané a tudíž je nutné je měřit.

Použitá geometrie soustavy byla vymodelována v programu Solidworks, následně importován do ProCASTu a diskretizována, tak jak je vidět na Obr. 3.1. Vstupní podmínky jako doba lití (16s) a lící teplota (760°C) byly zadány dle experimentálního měření.



Obr. 3.1 Vstupní geometrie do simulace.

Pro definici odlévané hliníkové slitiny (AlSi7Mg0,3) byla použita termofyzikální data z literatury [4]. Data jsou k nalezení v příloze 3.

Další materiály vycházely z databáze ProCASTu viz Tab. 3.1 Definice reálných materiálů v simulaci pomocí databáze ProCASTu. Přičemž u exotermického obkladů byla ihned modifikována zápalná teplota (na 250°C), vyprodukované teplo (na 250 J/g) a rychlost hoření (na 0,35 mm/s) dle měření viz kapitola 2.3. Přestupy tepla (HTC), byly voleny na základě zkušeností a jejich prvotní návrh je na Obr. 3.2.

Tab. 3.1 Definice reálných materiálů v simulaci pomocí databáze ProCASTu.

Reálný materiál	Definice materiálu v simulaci
Formovací směs (Alfaset)	Resin Bonded sand
Exotermický obklad	Exactcast 6/12 insertable sleeve
Podnálitková podložka	Refractory fused silica

SL	Name	Type	Interface Condition
1	PODLOZKA_1_EXO	COINC	h=500
2	VTOK_FORMA	COINC	h=500
3	FORMA_EXO	COINC	h=500
4	Nalitek_1_EXO	COINC	h=100
5	Nalitek_2_FORMA	COINC	h=500
	PODLOZKA=>FORMA	COINC	h=500
	ODLITEK=>PODLOZKA	COINC	h=500
	ODLITEK=>FORMA	COINC	h=750
	ODLITEK=>(VTOK,Nalitek_1,...)	EQUIV	---
	PODLOZKA=>(Nalitek_1,Nalitek_2)	COINC	h=500

Obr. 3.2 Přestupy tepla navrhnutý na základě zkušeností pro první simulaci (jednotky [W/m².K])

3.1.2 Porovnání výsledné simulace a experimentu – zpřesněná vstupní data

Proces, který vede k uspokojivému výsledku, je náročný a to vzhledem k vysokému počtu neznámých vstupujících do výpočtu. Pro zajištění co nejlepší shody křivek tuhnutí, získaných v experimentu s křivkami ze simulace, bylo provedeno téměř 100 simulací.

V rámci zredukování proměnných byla termofyzikální data kovu, obdržená z literatury [4] považována za dostatečně přesná a nebyla, až na výjimku v podobě hustoty měněna. Ta byla upravována tak, aby se pokles hladiny co nejvíce blížil k poklesu hladiny naměřenému v experimentu. U dalších materiálů (formovací směs, podložky, exotermický obklad) bylo přistoupeno ke změnám termofyzikálních vlastností. U exotermického obkladu bylo dokonce přistoupeno ke změně vyprodukovaného tepla z 250 J/g na 500 J/g, zápalné teploty z 250 °C na 300 °C a rychlosti hoření z 0,34 mm/s na 0,13 mm/s. Důvodem byla nemožnost dosažení dobré shody křivek za použití experimentálně naměřených parametrů. Bylo vzato v potaz, že parametry byly naměřeny za jiných podmínek, než které panují ve slévárenské formě a tak nemusí být vypovídající. Další faktorem, který mohl zkreslovat výsledky z DTA analýzy je to, že vzorek byl poměrně malé gramáže 16 mg, což mohlo zapříčinit jeho nehomogenitu a tudíž jiné složení než má celý exotermický obklad. Přestupy tepel byly také měněny. Určujícím parametrem bylo pak i docílení co největší shody časů tuhnutí určených lokálním minimem první derivace za eutektickou teplotou.

Výsledné křivky tuhnutí z poslední „nejpřesnější“ simulace byly srovnány s křivkami z experimentálního měření a jsou vyobrazeny v příloze 4. Křivky vykazují poměrně vysokou shodu průběhu. Kvantitativně pak shodu vyjadřuje Tab. 3.2, která ukazuje srovnání dob tuhnutí z experimentálního měření a ze simulace.

Tab. 3.2 Srovnání dob tuhnutí naměřených pomocí experimentu a vypočítaných v simulaci.

Konec tuhnutí	Měření A	Měření B	Průměr měření	Simulace	Absolutní chyba	Relativní chyba
	[s]	[s]	[s]	[s]	[s]	[%]
Tepelného uzlu pod nálitkem s exotermickým obkladem (T1)	1609	1620	1615	1634	-20	1,2
Tepelného uzlu pod přirozeným nálitkem (T11)	1381	1322	1352	1425	-74	5,4
Nálitku s exotermickým obkladem (T2)	2370	2497	2434	2475	-42	1,7
Přirozeného nálitku (T12)	1905	1933	1919	1864	55	2,9
Posun modulu f	1,12	1,14	1,13	1,15	-0,02	1,8

Největší chyby bylo dosaženo u doby tuhnutí tepelného uzlu pod nálitkem přirozeným (termočlánek T11) a to 5,4%. Další chyby se však blíží již 2% a to platí i pro nejdůležitější parametr posuv modulu f s relativní chybou 1,8%. Dá se tedy říci, že bylo dosaženo dobré shody.

V příloze 5 je dále ukázána teplotní mapa soustavy odlitek-forma v průběhu lití a tuhnutí odlitků v závislosti na čase. Z mapy lze vyčíst průběh prohřívání formy a názorně ukazuje opožděné chladnutí odlitku s nálitkem opatřeným exotermickým obkladem. Příloha 6 ukazuje termofyzikální data materiálů, která byla změněna oproti původním vstupním datům a která vedla k výsledným křivkám. Tyto data se dají s jistou opatrností použít pro dané materiály i pro simulace odlitků složitějších tvarů. Metoda, kterou byla data získána, samozřejmě neumožňuje určit přesné hodnoty jednotlivých termofyzikálních parametrů a to z toho důvodu, že jednotlivé parametry se mohou navzájem ovlivňovat, jinými slovy zastupovat. Například vysokou tepelnou vodivost formovací směsi, která vede k rychlejšímu ztuhnutí odlitku, vykompenzuje menší hodnota přestupu tepla mezi odlitkem a formovací směsí. Nebo nižší hustota exotermického obkladu může vykompenzovat jeho nižší vyprodukované teplo. A takových příkladů lze nalézt nespočetně. Je možné tedy dojít ke stejným průběhům dob tuhnutí s odlišnými velikostmi různých parametrů. Touto problematikou se pak zabývá podrobněji například práce [11] *Advanced thermo-physical data for simulation – the importance of accurate sleeve properties*.

3.2 Vlivy na posuv modulu exotermického obkladu nálitku

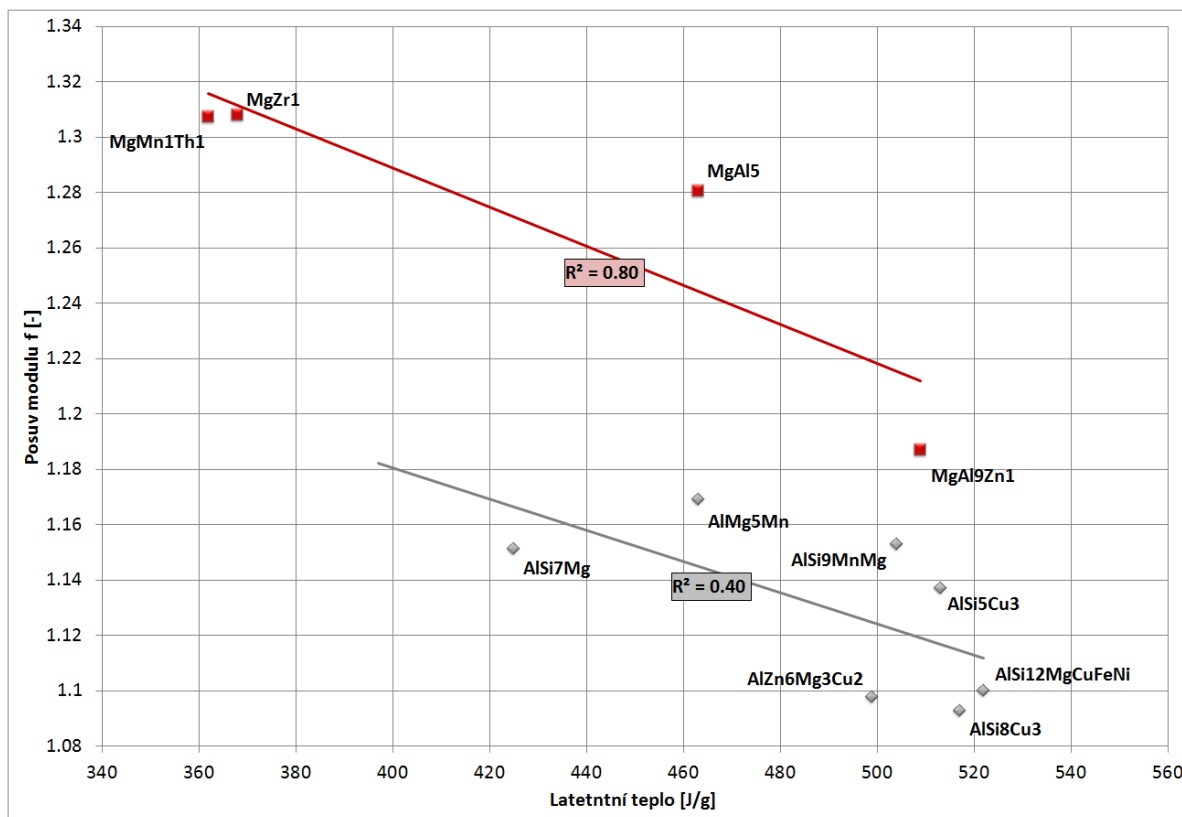
Tato kapitola si klade za cíl posouzení různých faktorů na posuv modulu exotermického obkladu. Všechna data jsou získána na základě výpočtu z počítačové simulace a je tedy nutné brát výsledky a to zejména konkrétní hodnoty s rezervou.

3.2.1 Vliv samotné odlévané slitiny

Experimentální měření ukázalo, že při lití hliníkové slitiny AlSi7Mg0,3 s nálitkem opatřeným exotermickým nástavcem má poměrně malou hodnotu modulu ve srovnání s modulem přirozeného nálitku o stejné velikosti. Faktor posunutí modulu byl v průměru pouze 1,13. Posuv modulu pro slitiny železa vypočítaný pomocí rovnice (2.1) z velikosti modulu exotermického nálitku udávaného výrobcem pro slitiny železa je 1,35. To vedlo k hypotéze o vlivu velikosti latentního tepla na posuvu modulu. A to vzhledem k tomu, že hliníkové slitiny mají největší hodnoty latentního tepla ze všech běžně používaných slévárenských slitin viz Tab. 1.4. Nutnost odvodu vysokých hodnot tepla slévárenskou formou při nižších teplotách (myšleny nízké teploty lití hliníku oproti vysokým teplotám lití slitiny popřípadě oceli) vede k výraznému prodloužení doby tuhnutí.

Pro posouzení pravdivosti této hypotézy bylo využito počítačových simulací, kdy posuzovaný model a vstupní data do výpočtu byla totožná s modelem popsáním v kapitole 3.1 (to platí pro všechna měření v této kapitole). V každé simulaci byla pouze měněna odlévaná slitina. Slitiny byly definovány podle termofyzikálních dat z databáze ProCastu nebo podle termofyzikálních dat uvedených v literatuře [4]. Licí teplota všech slitin byla 760°C. Výsledný Graf 3.1 ukazuje velikost vlivu latentního tepla hliníkových slitin na posuv modulu (šedá přímka). Je vidět určitá závislost, která je vyjádřena koeficientem korelace $R^2 = 0,40$, kdy s rostoucí velikostí latentního tepla klesá posuv modulu exotermického nálitku. Závislost tedy není příliš

silná. Nicméně posuzované slitiny mají různorodé složení, takže latentní teplo není jediným faktorem majícím vliv na posuv modulu.



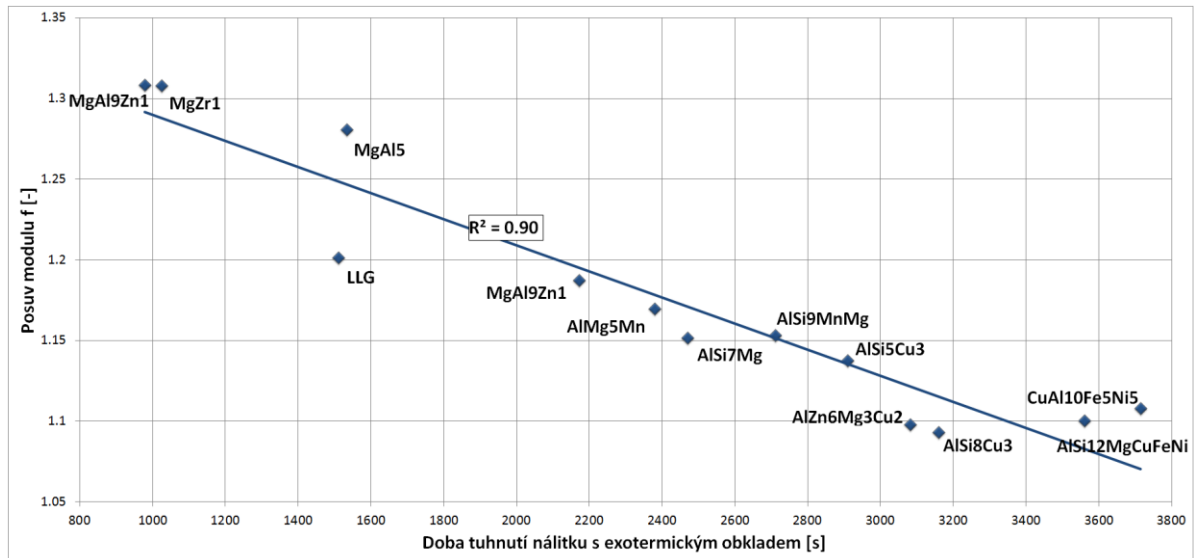
Graf 3.1 Závislost posuvu modulu na latentním teple některých slévarenských slitin hliníku a hořčíku

Další simulovanou materiálovou skupinou byly slitiny hořčíku, které mají podobné termofyzikální vlastnosti jako slitiny hliníku. S jistou vědomou chybou, která při výpočtu vznikla, byl použit stejný model, stejné termofyzikální vlastnosti materiálů v soustavě a přestupy tepla jako u předchozích výpočtů pro hliníkové slitiny. Rozdílně byla však volena teplota lití. Ta byla u každé slitiny určena individuálně jako teplota liquidu plus 100°C. Výsledky byly opět zaneseny do Graf 3.1. Závislost posuvu modulu na latentním teple pro hořčíkové slitiny je pak vyjádřena červenou křivkou s velmi dobrým koeficientem korelace $R^2=0,80$. Důvodem je individuálnější volení teploty lití pro každou slitinu (teplota přehřátí kovu má také nezanedbatelný vliv na posuv modulu viz Graf 3.3) a menší počet srovnávaných slitin.

Graf 3.1 také ukazuje, že hořčíkové slitiny dosahují obecně vyšších hodnot posuvu modulu než slitiny hliníku. Jedním z důvodů je jejich kratší doba tuhnutí (dle výpočtu ze simulace). To může být ovšem zavádějící, protože tyto doby tuhnutí nemusí odpovídat realitě, protože na jejich výpočet byla použita termofyzikální data a přestupy tepla odladěné na slitiny hliníku.

Dalším posuzovaným faktorem byl vliv doby tuhnutí slitiny na posuv modulu exotermického nálitku. Jako faktor, který vyjadřuje dobu tuhnutí slitiny, byla zvolena doba tuhnutí exotermického nálitku (T_2). Výsledný Graf 3.2 tuto závislost ukazuje s velmi dobrým koeficientem korelace $R^2=0,90$ a to i přesto, že do srovnání byla zahrnuta litina s lupínkovým grafitem a jedna slitina mědi. Je tedy jasně vidět, že pro slitiny s dlouhou dobou tuhnutí není výhodné používat exotermické obklady. Důvodem je, že vyprodukované teplo z exotermické reakce u dlouho tuhoucích

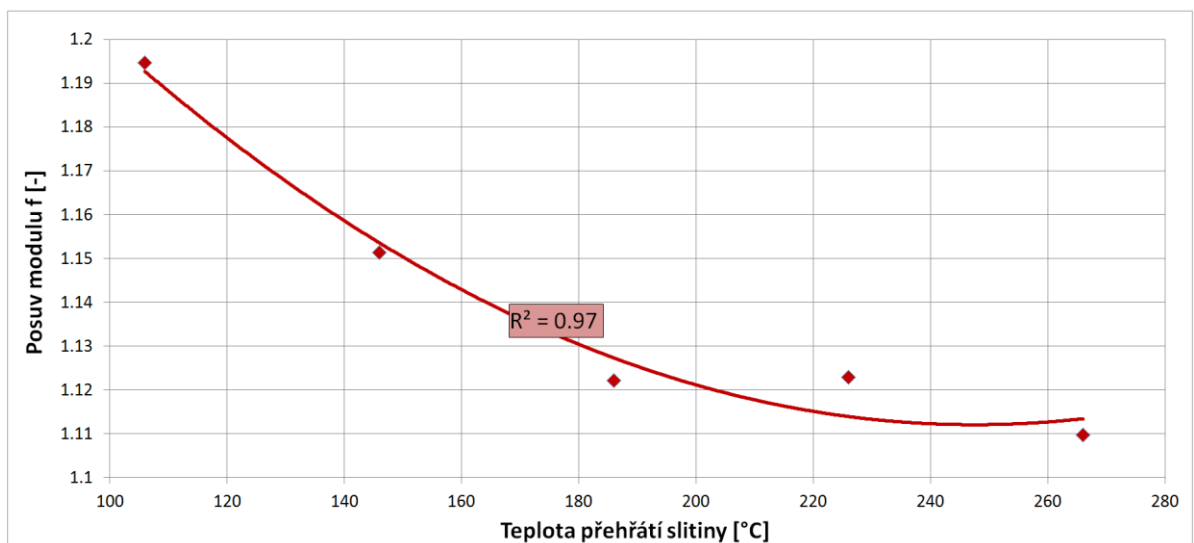
slitin je relativně menší. Za zvážení u těchto slitin pak stojí využití izolačních obkladů, které mohou vykazovat lepší hodnoty posuvu modulu.



Graf 3.2 Závislost posuvu modulu na době tuhnutí nálitku s exotermickým obkladem pro různé slévarenské slitiny.

3.2.2 Vliv přehřátí slitiny

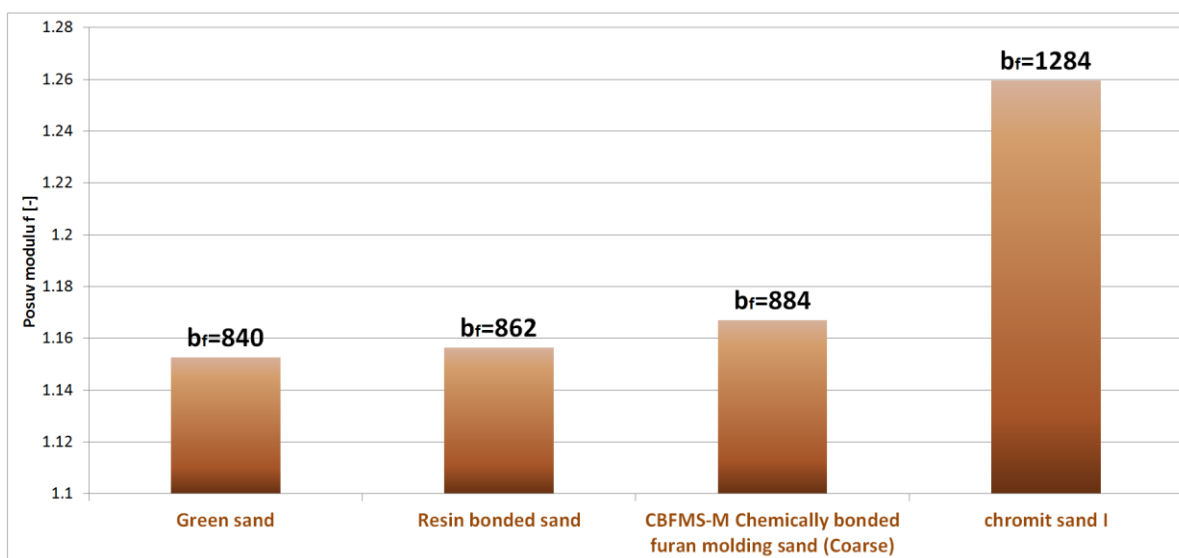
Dalším posuzovaným parametrem byla teplota přehřátí slitiny. Pro toto měření byl použit originální model a termofyzikální data z odstavce 3.1 i slitina LM-25 (AlSi7Mg). Výsledný Graf 3.3 ukazuje závislost posuvu modulu na teplotě přehřátí slitiny. Jednotlivé body byly proloženy polynomem druhého stupně a bylo tak dosaženo vysoké spolehlivosti $R^2=97$. Vliv přehřátí slitiny tak není zanedbatelný a pro zajištění kvalitních odlitků by se mělo lít z co možná nejnížší teploty. Tento fakt také částečně vysvětluje, proč výsledný posuv modulu v experimentálním měření byl tak nízký. Teplota přehřátí byla asi 180°C.



Graf 3.3 Závislost posuvu modulu exotermického obkladu na teplotě přehřátí hliníkové slitiny LM-25.

3.2.3 Vliv formovací směsi

Pro posouzení vlivu formovací směsi na posuv modulu, byl použit originální model a termofyzikální data z odstavce 3.1 a slitina LM-25 (AlSi7Mg). Bylo vybráno několik materiálů z databáze ProCASTu (jejich názvy odpovídají názvům v databázi). Výsledky těchto simulací jsou shrnuty v Graf 3.4. U běžných slévárenských pískových formovacích materiálů není vidět žádný významný rozdíl ve velikosti posuvu modulu. Nejlepšího posuvu modulu $f = 1,26$ dosahuje chromitový písek. To však není typický formovací materiál a to vzhledem k jeho vysoké ceně. Hlavní roli zde pak hraje tepelná akumulace formy b_f , která výrazně ovlivňuje dobu tuhnutí soustavy. Ta byla pro každý materiál vypočítána dle rovnice 1.19 z průměrných hodnot termofyzikálních parametrů z databáze ProCASTu.



Graf 3.4 Vliv formovací směsi a její tepelné akumulace na posuv modulu exotermického obkladu nálitku.

4 ZÁVĚR

Slévárenské slitiny hliníku mají oproti slévárenským slitinám jiných bázeických kovů několik specifických technologických vlastností, které mají vysokou citlivost na rychlost tuhnutí. Jedná se o sklon ke vzniku rozptýlených staženin, který je zapříčiněn vysokou tepelnou vodivostí, která snižuje velikost teplotního gradientu. Dalšími vlastnostmi jsou vysoké latentní teplo tání/tuhnutí a vysoká tepelná kapacita. Ty má hliník největší ze všech slévárenských slitin viz Tab. 1.2. Tyto dvě vlastnosti přispívají k vysoké energetické náročnosti natavení hliníkových slitin a naopak nepříznivě působí při tuhnutí odlitku, kdy musí být velké množství tepla odvedeno formou, což prodlužuje dobu tuhnutí. Mnoho hliníkových slitin má velkou šířku dvoufázového pásma. Srovnání s ostatními běžně používanými slitinami je v Tab. 1.3.

Při navrhování vtokové soustavy a technologie se s těmito vlastnostmi musí počítat. Pro správný návrh nálitků musí být vždy splněny dvě obecné základní podmínky. Nálitek musí v soustavě nálitek-odlitek tuhnout jako poslední a musí být objemově dostatečný. Určující podmínkou je většinou podmínka první a matematicky ji vyjadřuje rovnice 1.4, která říká, že modul nálitku musí být větší než modul odlitku. Z důvodu zvýšení využití tekutého kovu je běžnou praxí nálitky tepelně ošetřit. Úroveň tepelného ošetření vyjadřuje faktor posuvu modulu nálitku f . Ten se dá nejpřesněji určit pomocí rovnice 1.6 jako druhá odmocnina poměrů časů tuhnutí tepelně ošetřeného nálitku a přirozeného nálitku o stejných geometrických modulech.

Jednou z možností tepelného ošetření nálitků je použití exotermických obkladů. Jejich principem je na základě chemické reakce produkce přídavného tepla, které zpomaluje tuhnutí nálitku. Jejich využití je ve slévárnách ocelí a litin běžnou praxí. Pro hliníkové slitiny však použití není příliš běžné a v literatuře není téměř vůbec popsáno. Některé slévárny nezelezných slitin však zkoušejí jejich použití v praxi. To bylo hlavní motivací, proč testovat exotermické nálitky na slitinách hliníku. Za tímto účelem byl navrhnout a zrealizován jednoduchý experiment. Byla vytvořena písková forma, skládající ze dvou totožných odlitků, každý opatřený jedním nálitkem o shodném geometrickém modulu. Odlitky byly napojeny na společnou vtokovou soustavu. Jeden z nálitků byl pak opatřen testovaným exotermickým obkladem od společnosti HA Kovochem. Druhý nálitek byl vytvořen z formovací směsi a jednalo se tak o nálitek přirozený. Pro zjištění chování kovu byly do formy na významná místa zavedeny termočlánky, kterými byla zaznamenávána teplota v soustavě. První měření ukázala, že nálitkové obklady menších velikostí (EK 40/70 W a EK 60/90 W) není testovaná hliníková slitina AISi7Mg_{0,3} schopná prohřát a zapálit. A to i přesto, že laboratorně zjištěná zápalná teplota byla asi 250°C. Naměřené teploty v exotermickém obkladu dosahovaly až 400°C. Další experimenty proto byly realizovány s obkladem větším (EK 100/130 W), který je i v praxi slévárnami používán na slitiny hliníku a pro větší jistotu byla teplota lití zvýšena na 760°C. To znamenalo přehřátí slitiny oproti teplotě liquidu až o 180 °C. Díky této modifikaci měření se podařilo exotermický obklad zapálit a byly naměřeny průběhy teplot. Z dob tuhnutí exotermického nálitku a nálitku přirozeného, byl vypočten posuv modulu, který vyjadřuje účinnost exotermického obkladu. Vypočtený posuv modulu je při srovnání s posuvem modulu od výrobce velmi nízký. Nicméně výrobce uvádí modul pouze pro slitiny železa, na který je exotermický obklad původně navrhnout. Důvody rozdílů v modulech jsou odlišné vlastnosti slitin hliníku a poměrně vysoká teplota lití.

Pro hlubší porozumění vlivu exotermického obkladu nálitku na tuhnutí hliníkových slitin bylo dále využito počítačových simulací. Konkrétně se pak jednalo o simulační software dodávaný společností Mecas ESI ProCAST. V prvním kroku byla provedena simulace experimentálního měření. Průběhy teplot v něm naměřené sloužily jako referenční data, kdy cílem bylo odladění vstupních dat do simulace. Vzhledem k velkému počtu vstupních dat bylo realizováno téměř 100 výpočtů, než bylo dosaženo uspokojivé shody křivek, vypočítaných ze simulace a křivek experimentálních. Tímto procesem odladěná termofyzikální data je možné použít s jistou opatrností i do simulací složitějšího designu. Další sada simulací byla provedena za účelem posouzení určitých faktorů na posuv modulu exotermického nálitku, neboli na posouzení jeho účinnosti viz odstavec 3.2. Pro výpočet byla použita odladěná data z předchozí simulace. Simulacemi byl zjištěn určitý **vliv latentního tepla**, kdy jeho vyšší hodnoty snižují účinnost obkladu a tím i smysl jeho použití. Dále byl posuzován obecně **vliv doby tuhnutí slitiny** na účinnost exotermického nálitku. Zde byla jasně prokázána korelace těchto dvou faktorů, přičemž u dlouhotuhnoucích slitin je faktor posuvu modulu velmi nízký. Další výpočty byly zaměřeny na **vliv velikosti přehřátí**. Tento faktor souvisí s prodloužením doby tuhnutí soustavy, a bylo prokázáno, že vysoké přehřátí slitiny snižuje opět faktor posunutí modulu. Na závěr byly testovány různé formovací materiály. Bylo zjištěno, že běžně používané formovací směsi s křemenným ostřivem mají podobný vliv na faktor posunutí modulu a to vzhledem k jejich velmi podobným termofyzikálním vlastnostem. Na příkladu použití chromitové směsi bylo prokázáno, že formovací směsi s vyšší **tepelnou akumulací mají pozitivní vliv** na posuv modulu.

Je jasné, že výsledky ze simulace nemohou nahradit reálné měření. Nicméně ukázaly, jakým směrem je vhodné se v experimentálním měření ubírat. Některé výsledky, jako je například vliv lící teploty na posuv modulu formy, jsou však lehce pochopitelné a představitelné. Ukazují tak slévači, vyskytne-li se problém v odlitku, potenciální řešení. Diplomová práce dokazuje, že simulační programy mají ve slévárenství své místo. Množství experimentů, které bylo odsimulováno, by v praxi znamenalo nemalé finanční i časové náklady na jejich realizaci. Nicméně pro potvrzení správnosti by bylo v budoucnu vhodné výsledky získané výpočtem prakticky ověřit a to nejen na experimentální soustavě, ale i na tvarově složitějším odlitku. Vzhledem k vysokému množství tepelné energie, která je nahromaděna v tekutém hliníku stojí za zvážení, zda by izolační nástavce nevykazovaly lepší výsledky nežli nástavce exotermické. Bylo by tak přínosné zrealizovat experiment, který by posoudil a popřípadě určil hranice, kdy je která možnost výhodnější.

SEZNAM POUŽITÝCH INFORMAČNÍCH ZDROJŮ

- [1] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 148 s. ISBN 80-214-2790-6.
- [2] ROUČKA, Jaromír. *Přednášky z předmětu Technická příprava výroby*.
- [3] SIGWORTH, G. K. *Shrinkage, Feeding and Riser Design*. American Foundry Society, 2014, 12 s.
- [4] MILLS, K. *Recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys*. Cambridge: Woodhead, 2002, 244 s. ISBN 0871707535.
- [5] Databáze softwaru ProCAST
- [6] *Návrh odlítků a vtokové soustavy – Nálitky* [online]. [vid. 2015-09-16]
Dostupné z: http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TE1/cvic_odlitek.pdf
- [7] KRUTIŠ, V. *Vliv tepelného ošetření nálitků na tuhnutí kovu*. Disertační práce v oboru "Strojírenská technologie". Brno: VUT-FSI, Ústav materiálového inženýrství. 2003. S. 187
- [8] FISCHER, S. A. *Moderní způsoby nálitkování - historie a současnost*. Slévárenství, 2014, č. 9-10, s 364 – 368.
- [9] SCHÄFER, J. *Energieeffizienzsteigerung im Speisersystem – ECO-Speiser mit erweiterten Einsatzmöglichkeiten*. GIESSEREI ERFAHRUNGSAUSTAUSCH, 2013, č. 1-2. s 12 - 17.
- [10] Firemní materiál. FOSECO
- [11] ANTHONY, C. aj. *Advanced thermo-physical data for simulation – the importance of accurate sleeve properties*. Giessereiforschung, 2007, č. 1, s. 34-43.
- [12] PAVELEK, Milan, *Přenos tepla konvekcí (prouděním)*. Přednášky z předmětu termomechanika [online]. [vid. 2015-09-10]
Dostupné z: http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/termo/17_Konvekce.pdf
- [13] DARIUS P. K. S., *Applications of optimization and inverse modeling to alloy wheel casting - Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, An International Journal of Computation and Methodology, 2002, č. 41:6-7, s. 741-756 [online]. [vid. 2015-09-10]:
Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1080/104077802317418331>

- [14] VASKOVÁ, I., *Comparison of simulation programs MAGMASOFT and NOVAFLOW&SOLID in terms of results accuracy*. Archives of Foundry Engineering, 2011. č.1:11, s. 51-54.
- [15] CAMPBELL J., *Complete casting handbook*. Elsevier Ltd. 1st edition, 2011. ISBN-13: 978-1-85617-809-9
- [16] ProCAST [online]. [vid. 2015-09-4]. Dostupné z: <https://www.esi-group.com/software-services/virtual-manufacturing/casting/procast-quikcast>
- [17] PERZYK M., *Optimization of Side Feeders Systems by Means of Simulation of Solidification*. Archives of Foundry Engineering, 2015, č. 1:15, s. 69-74. [online] Dostupné z: <http://www.afe.polsl.pl/index.php/pl/3952/optimization-of-side-feeders-systems-by-means-of-simulation-of-solidification.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka/ Symbol	Jednotka	Popis
V	m ³	Objem
β	-	Poměrné smrštění
x	-	Koeficient nehospodárnosti
τ	s	Čas tuhnutí
M	cm	Modul odlitku/nálitku
f	-	faktor posunutí modulu
k	m/s	Materiálová konstanta tuhnutí
S	m ²	Povrch
G	°C/cm	Teplotní gradient ve směru doplňování kovu
R	m/s	Rychlost tuhnutí odlitku
θ	°	Stupeň usměrnění
q	-	Tvarový faktor odlitku
Q	J	Teplo
m	kg	Hmotnost
c _{al}	%	Koncentrace hliníku v exosměsi
M _{Al}	-	Relativní atomová hmotnost
q _r	J/mol	Reakční teplo
ρ	kg/m ³	hustota
λ	W/m.K	Součinitel tepelné vodivosti
c	J/kg.K	Měrná tepelná kapacita
a	m ² /s	Součinitel teplotní vodivosti
ΔH_{exo}	J/kg	Vyprodukované teplo exotermickým obkladem
T	°C	Teplota
T(1-13)	-	Označení termočlánku
α (HTC)	W/m ² .K	součinitel přestupu tepla

SEZNAM OBRÁZKŮ TABULEK A GRAFŮ

OBR. 1.1 SCHÉMA TUHNUTÍ SLÉVÁRENSKÝCH SLITIN. [1]	12
OBR. 1.2 NÁLITKY SE STEJNÝM MODULEM, ALE ROZDÍLNÝM OBJEMEM A VYUŽITÍM KOVU. ZLEVA PŘIROZENÝ NÁLITEK, S EXOTERMICKÝM OBKLADEM A ECO-NÁLITEK.[8]	17
OBR. 1.3 VZNIK POROSITY V OCELOVÝCH ODLITCÍCH. [3]	19
OBR. 1.4 SCHÉMATICKÉ ZNÁZORNĚNÍ GEOMETRICKÉHO MODELU UKAZUJÍCÍ ÚHEL, KTERÝ JE NUTNÝ PRO USMĚRNĚNÉ TUHNUTÍ. [3]	19
OBR. 1.5 ROZVOJ POLO-NEKONEČNÉ ZÓNY, POKUD JE DOSAZOVACÍ VZDÁLENOST PŘILÍŠ DLOUHÁ. [3]	20
OBR. 1.6 DIAGRAM PRO VÝPOČET VELIKOSTI NÁLITKY NAVRŽEN CAINEM PRO OCELOVÉ ODLITKY A MALLYANEM A PANCHANATHANEM PRO ODLITKY ZE SLITIN HLINÍKU. [3].....	21
OBR. 1.7 PŘÍKLAD VÝPOČET VELIKOSTI NÁLITKY DVOU ODLITKŮ O STEJNÉM MODULE, ALE S VÝRAZNĚ ODLIŠNOU VELIKOSTÍ TVAROVÉHO FAKTORU. [1].....	22
OBR. 1.8 DOPORUČENÝ POSTUP PŘI NÁVRHU NOVÉHO ODLITKU S VYUŽITÍM SIMULAČNÍHO SOFTWARE. [15] 32	
OBR. 1.9 DVĚ TYPICKÉ STAŽENINY VZNIKAJÍCÍ V ODLITCÍCH. NALEVO - VZNIK V DŮSLEDKU PŘEHŘÁTÍ STĚNY FORMY. NAPRAVO – VZNIK V DŮSLEDKU NAHROMADĚNÍ KOVU MEZI STĚNOU ODLITKU A KRČKEM NÁLITKY.[17]	33
OBR. 1.10 SCHÉMATICKÉ ZNÁZORNĚNÍ ROZDÍLU MEZI TRADIČNÍ CAE ANALÝZOU A INVERZNÍ ANALÝZOU Z POHLEDU VSTUPNÍCH DAT DO SIMULACE.[13].....	34
OBR. 1.11 MOŽNOSTI SIMULACE PRO SLÉVÁRENSTVÍ SE SOFTWAREM OD SPOLEČNOSTI ESI. [16].....	34
OBR. 1.12 VOLUME MANAGER - PŘEHLED OBJEMOVÝCH TĚLES V SIMULACI S PŘÍŘAZENÝM MATERIÁLEM....	35
OBR. 1.13 MATERIÁLOVÁ DATABÁZE PROCASTU (VLEVO) A MOŽNOSTI DEFINICE MATERIÁLŮ POMOCÍ TERMOFYZIKÁLNÍCH PARAMETRŮ (VPRAVO). MOŽNOST DEFINOVAT VLASTNOSTI MATERIÁLŮ V ZÁVISLOSTI NA TEPLOTĚ (DOLE).....	36
OBR. 1.14 DEFINICE CHOVÁNÍ MATERIÁLŮ S TEKUTOU FÁZÍ.	36
OBR. 1.15 MOŽNOSTI DEFINICE EXOTERMICKÝCH MATERIÁLŮ.....	36
OBR. 1.16 MOŽNOST VYGENEROVAT VLASTNOSTI KOVOVÝCH MATERIÁLŮ NA ZÁKLADĚ CHEMICKÉHO SLOŽENÍ.	37
OBR. 1.17 PŘEHLED ROZHRANÍ V SIMULACI S PŘÍŘAZENOU VELIKOSTÍ PŘESTUPU TEPLA POMOCÍ SOUČinitele HTC.....	38
OBR. 1.18 DEFINICE PŘESTUPU TEPLA HTC.....	38
OBR. 1.19 PODMÍNKY PROCESU NADEFINOVANÉ V SIMULACI.	39
OBR. 1.20 DATABÁZE PODMÍNEK (NALEVO) PROCESU A PŘÍKLAD JEJICH DEFINICE(NAPRAVO).....	40
OBR. 2.1 DESIGN FORMY.....	41
OBR. 2.2 3D POHLED NA NAVRHNUTOU SOUSTAVU SKLÁDAJÍCÍ SE ZE DVOU DESKOVÝCH ODLITKŮ, DVOU VÁLCOVÝCH NÁLITKŮ A SPOLEČNÉ VTKOVÉ SOUSTAVY.....	45
OBR. 2.3 ROZMĚRY EXOTERMICKÉHO OBKLADU.....	46
OBR. 2.4 UMÍSTĚNÍ TERMOČLÁNKŮ V ODLITCÍCH. TERMOČLÁNKY JSOU VYZNAČENY TLUSTOU ČAROU. HRANICE DVOUDÍLNÉ FORMY JSOU ROVNĚŽ OZNAČENY TLUSTOU ČAROU.	47
OBR. 2.5 SCHÉMA UMÍSTĚNÍ TERMOČLÁNKU VE SKLENĚNÉ TRUBIČCE. [7].....	48
OBR. 2.6 DSC MĚŘENÍ. ZELENÁ KŘIVKA ZNÁZORŇUJE PRVNÍ OHŘEV VZORKŮ S ODEČTENOU VELIKOSTÍ EXOTERMICKÝCH PÍKŮ A JEJICH ZÁPALNOU TEPLOTOU. DALŠÍ KŘIVKY VYJADŘUJÍ CHOVÁNÍ VZORKU PŘI DRUHÉM ZAHŘÁTÍ (MODRÁ) A PŘI PRVNÍM A DRUHÉM OCHLAZENÍ VZORKU (ČERVENÁ A FIALOVÁ).	52
OBR. 2.7 REALIZACE EXPERIMENTU PRO ZJIŠTĚNÍ RYCHLOSTI HOŘENÁ EXOTERMICKÉ SMĚSI.	53
OBR. 3.1 VSTUPNÍ GEOMETRIE DO SIMULACE.	55
OBR. 3.2 PŘESTUPY TEPLA NAVRHNUTY NA ZÁKLADĚ ZKUŠENOSTÍ PRO PRVNÍ SIMULACI (JEDNOTKY [W/m ² .K])	55
OBR. 0.1 VÝROBA VRŠKU FORMY S PŘICHYSTANÝMI DRÁTKY A TRUBIČKAMI PRO BUDOUCÍ UMÍSTĚNÍ TERMOČLÁNKŮ	70
OBR. 0.2 FORMA PŘED LITÍM S TERMOČLÁNKY	70
OBR. 0.3 VÝSLEDNÉ HLINÍKOVÉ ODLITKY A NALEVO A B NAPRAVO	71
OBR. 0.4 PÓROVITOST V ODLITKU C, KTERÁ VZNIKÁ Z DŮVODŮ VELKÉHO DVOUFÁZOVÉHO ROZHRANÍ, VYSOKÉ TEPelné VODIVOSTI SLITINY, VYSOKÉHO LATENTNÍHO TEPLA A NÍZKÁ TEPelná AKUMULACE PÍSKOVÉ FORMY COŽ VŠE VEDE KE KAŠOVITÉMU TUHNUTÍ.....	71
OBR. 0.5 POZMĚNĚNÁ HUSTOTA VE VÝPOČTU PRO SIMULACI ODLÉVANÉ SLITINY LM 25 (ALSi7Mg0,3) ZA ÚČELEM SNÍŽENÍ POKLESU HLADINY.	84

VUT BRNO, FSI UST
 VLIV EXOTERMICKÝCH OBKLADŮ NA TUHNUTÍ SLITIN HLINÍKU
 ROMAN ZAJÍČEK

TAB. 1.1	TYPY TUHNUTÍ NĚKTERÝCH SLITIN HLINÍKU. [1]	11
TAB. 1.2	TEPLOTA TAVENÍ, STŘEDNÍ MĚRNÉ TEPLA A SKUPENSKÉ TEPLA ČISTÝCH PRVKŮ. [1]	12
TAB. 1.3	TEPLOTA LIQUIDU A SOLIDU A ŠÍŘKA DVOUFÁZOVÉ PÁSMO BĚŽNÝCH SLÉVÁRENSKÝCH SLITIN (ŘAZENO SESTUPNĚ DLE ŠÍŘKY DVOUFÁZOVÉHO PÁSMO) .[4],[5]	14
TAB. 1.4	LICÍ TEPLOTA PRO VÝPOČET, LATENTNÍ TEPLA A TEPELNÝ OBSAH LIQUIDU BĚŽNÝCH SLÉVÁRENSKÝCH SLITIN (ŘAZENO SESTUPNĚ DLE LATENTNÍHO TEPLA).[4],[5]	15
TAB. 1.5	PŘÍKLAD SLOŽENÍ EXOTERMICKÝCH SMĚSÍ. [9]	26
TAB. 1.6	SLÉVÁRENSKÉ SIMULAČNÍ PROGRAMY NA TRHU. [14].....	31
TAB. 2.1	ROZMĚRY DVOUDÍLNÉ FORMY.	41
TAB. 2.2	SPOTŘEBNÍ MATERIÁL POUŽITÝ PŘI VÝROBĚ FOREM.	42
TAB. 2.3	ZAŘÍZENÍ POUŽITÉ PŘI VÝROBĚ FOREM.	42
TAB. 2.4	SCHÉMA EXPERIMENTÁLNÍCH ODLITKŮ SE ZÁKLADNÍMI ROZMĚRY A UMÍSTĚNÍM TERMOČLÁNKŮ NALEVO A NAMĚŘENÉ KŘIVKY TUHNUTÍ NAPRAVO.....	44
TAB. 2.5	PARAMETRY EXOTERMICKÉHO OBKLADU.....	46
TAB. 2.6	ODŮVODNĚNÍ UMÍSTĚNÍ TERMOČLÁNKŮ.	46
TAB. 2.7	SPOTŘEBNÍ MATERIÁL POUŽITÝ PŘI VÝROBĚ FOREM	48
TAB. 2.8	ZAŘÍZENÍ POUŽITÉ PŘI VÝROBĚ FOREM	48
TAB. 2.9	PARAMETRY SOUSTAVY ODLITEK-NÁLITEK.....	48
TAB. 2.10	NAMĚŘENÉ A VYPOČTENÉ PARAMETRY EXOTERMICKÝCH NÁLITKŮ.....	50
TAB. 2.11	PARAMETRY A POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ DSC ANALÝZY MĚŘENÍ.	51
TAB. 2.12	VÝZNAM KŘIVEK Z TERMICKÉ ANALÝZY.....	51
TAB. 2.13	PARAMETRY MĚŘENÍ RYCHLOSTI HOŘENÍ EXOTERMU.	53
TAB. 3.1	DEFINICE REÁLNÝCH MATERIÁLŮ V SIMULACI POMOCÍ DATABÁZE PROCASTU.....	55
TAB. 3.2	SROVNÁNÍ DOB TUHNUTÍ NAMĚŘENÝCH POMOCÍ EXPERIMENTU A VYPOČÍTANÝCH V SIMULACI.	56
TAB. 0.1	SLOŽENÍ SLITINY AL - LM25 (ALSi7Mg0,3) [4].....	75
TAB. 0.2	TERMOFYZIKÁLNÍ DATA SLITINY AL - LM25 (ALSi7Mg0,3) [4].....	75
TAB. 0.3	FRAKCE SOLID SLITINY AL - LM25 (ALSi7Mg0,3) [4].....	75
TAB. 0.4	VIZUALIZACE PRŮBĚHU PLNĚNÍ FORMY	81
TAB. 0.5	VIZUALIZACE TUHNUTÍ ODLITKU	82
TAB. 0.6	FORMOVACÍ SMĚS - RESIN BONDED SAND. KONEČNÉ HODNOTY TERMOFYZIKÁLNÍCH PARAMETRŮ PRO ODLADĚNOU SIMULACI (TEPELNÁ VODIVOST, TEPELNÁ KAPACITA A HUSTOTA).	83
TAB. 0.7	EXOTERMICKÝ OBKLAD – EK xx/xx W HA KOVOCHEM. KONEČNÉ HODNOTY TERMOFYZIKÁLNÍCH PARAMETRŮ PRO ODLADĚNOU SIMULACI (TEPELNÁ VODIVOST, TEPELNÁ KAPACITA, PRŮBĚH HOŘENÍ, HUSTOTA, ZÁPALNÁ TEPLOTA A VYPRODUKOVANÉ TEPLA).....	83
TAB. 0.8	PODNÁLITKOVÁ PODLOŽKA - REFRACTORY FUSED SILICA. KONEČNÉ HODNOTY TERMOFYZIKÁLNÍCH PARAMETRŮ PRO ODLADĚNOU SIMULACI (TEPELNÁ VODIVOST, TEPELNÁ KAPACITA A HUSTOTA).	84
TAB. 0.9	KONEČNÉ HODNOTY PŘESTUPŮ TEPLA PRO ODLADĚNOU SIMULACI.....	84
GRAF 1.1	VLIV OBSAHU KŘEMÍKU NA VELIKOST SMRŠTĚNÍ HLINÍKOVÝCH SLITIN. [3]	13
GRAF 1.2	LATENTNÍ TEPLA A DVOUFÁZOVÉ PÁSMO BĚŽNÝCH SLÉVÁRENSKÝCH SLITIN HLINÍKU.	15
GRAF 1.3	LATENTNÍ TEPLA A DVOUFÁZOVÉ PÁSMO BĚŽNÝCH SLÉVÁRENSKÝCH SLITIN.	16
GRAF 1.4	TYPICKÁ KŘIVKA ZÁVISLOSTI HUSTOTY (ρ) NA TEPLITĚ PRO OBKLADOVÉ MATERIÁLY NÁLITKŮ. [11]	27
GRAF 1.5	TYPICKÁ KŘIVKA ZÁVISLOSTI TEPELNÉ VODIVOSTI (λ) NA TEPLITĚ PRO OBKLADOVÉ MATERIÁLY NÁLITKŮ. [11].....	28
GRAF 1.6	TYPICKÁ KŘIVKA ZÁVISLOSTI MĚRNÉ TEPELNÉ KAPACITY (C) NA TEPLITĚ PRO OBKLADOVÉ MATERIÁLY NÁLITKŮ. [11].....	29
GRAF 2.1	PRŮBĚHY TEPLA V EXOTERMICKÉM OBKLADU (T3 A T13) PRO VŠECHNY FORMY.....	43
GRAF 2.2	TEPLOTNÍ GRADIENT VE FORMĚ MEZI NÁLITKEM(T2/T12) A ODLITKEM (T1/11), Kladné hodnoty GRADIENTU ZNAMENAJÍ USMĚRNĚNÉ TUHNUTÍ	49
GRAF 3.1	ZÁVISLOST POSUVU MODULU NA LATENTNÍM TEPLE NĚKTERÝCH SLÉVÁRENSKÝCH SLITIN HLINÍKU A HOŘČÍKU.....	58
GRAF 3.2	ZÁVISLOST POSUVU MODULU NA DOBĚ TUHNUTÍ NÁLITKU S EXOTERMICKÝM OBKLADEM PRO RŮZNÉ SLÉVÁRENSKÉ SLITINY.	59
GRAF 3.3	ZÁVISLOST POSUVU MODULU EXOTERMICKÉHO OBKLADU NA TEPLITĚ PŘEHŘÁTÍ HLINÍKOVÉ SLITINY LM-25.	59
GRAF 3.4	VLIV FORMOVACÍ SMĚSÍ A JEJÍ TEPELNÉ AKUMULACE NA POSUV MODULU EXOTERMICKÉHO OBKLADU NÁLITKU.	60

GRAF 0.1 VÝSLEDNÉ KŘIVKY TUHnutí PRO MĚŘENÍ C. TERMOČLÁNEK T1 SELHAL A TERMOČLÁNKY T4 A T13 NEBYLY UMÍSTĚNY V BODECH SCHÉMATU. (UMÍSTĚNÍ TERMOČLÁNKŮ, JE NA SCHÉMATU NA OBR. 2.4)	72
GRAF 0.2 PROCENTO 16 KLOUZAVÉHO PRŮMĚRU PRVNÍ DERIVACE KŘIVEK TUHnutí PRO MĚŘENÍ C V NÁLITKU A ODLITKU. ZA DOBU TUHnutí BYLO POVAŽOVÁNO LOKÁLNÍ MINIMUM ZA EUTEKTICKOU PRODLEVOU...	72
GRAF 0.3 VÝSLEDNÉ KŘIVKY TUHnutí PRO MĚŘENÍ A. (UMÍSTĚNÍ TERMOČLÁNKŮ, JE NA SCHÉMATU NA OBR. 2.4.)	73
GRAF 0.4 PROCENTO 16 KLOUZAVÉHO PRŮMĚRU PRVNÍ DERIVACE KŘIVEK TUHnutí PRO MĚŘENÍ A V NÁLITKU A ODLITKU. ZA DOBU TUHnutí BYLO POVAŽOVÁNO LOKÁLNÍ MINIMUM ZA EUTEKTICKOU PRODLEVOU...	73
GRAF 0.5 VÝSLEDNÉ KŘIVKY TUHnutí PRO MĚŘENÍ B. (UMÍSTĚNÍ TERMOČLÁNKŮ, JE NA SCHÉMATU NA OBR. 2.4.)	74
GRAF 0.6 PROCENTO 16 KLOUZAVÉHO PRŮMĚRU PRVNÍ DERIVACE KŘIVEK TUHnutí PRO MĚŘENÍ B V NÁLITKU A ODLITKU. ZA DOBU TUHnutí BYLO POVAŽOVÁNO LOKÁLNÍ MINIMUM ZA EUTEKTICKOU PRODLEVOU...	74
GRAF 0.7 SROVNÁNÍ PRŮBĚHŮ TEPLIT KŘIVEK OBDRŽENÝCH Z EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ A A B A ODLADĚNÉ SIMULACE PRO TERMOČLÁNEK T1	76
GRAF 0.8 SROVNÁNÍ PROCENTA 16 KLOUZAVÉHO PRŮMĚRU PRVNÍ DERIVACE KŘIVEK TUHnutí PRO MĚŘENÍ A A B A ODLADĚNÉ SIMULACE PRO TERMOČLÁNEK T1	76
GRAF 0.9 SROVNÁNÍ PRŮBĚHŮ TEPLIT KŘIVEK OBDRŽENÝCH Z EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ A A B A ODLADĚNÉ SIMULACE PRO TERMOČLÁNEK T2	77
GRAF 0.10 SROVNÁNÍ PROCENTA 16 KLOUZAVÉHO PRŮMĚRU PRVNÍ DERIVACE KŘIVEK TUHnutí PRO MĚŘENÍ A A B A ODLADĚNÉ SIMULACE PRO TERMOČLÁNEK T2	77
GRAF 0.11 SROVNÁNÍ PRŮBĚHŮ TEPLIT KŘIVEK OBDRŽENÝCH Z EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ A A B A ODLADĚNÉ SIMULACE PRO TERMOČLÁNEK T3	78
GRAF 0.12 SROVNÁNÍ PRŮBĚHŮ TEPLIT KŘIVEK OBDRŽENÝCH Z EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ A A B A ODLADĚNÉ SIMULACE PRO TERMOČLÁNEK T4	78
GRAF 0.13 SROVNÁNÍ PRŮBĚHŮ TEPLIT KŘIVEK OBDRŽENÝCH Z EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ A A B A ODLADĚNÉ SIMULACE PRO TERMOČLÁNEK T11	79
GRAF 0.14 SROVNÁNÍ PROCENTA 16 KLOUZAVÉHO PRŮMĚRU PRVNÍ DERIVACE KŘIVEK TUHnutí PRO MĚŘENÍ A A B A ODLADĚNÉ SIMULACE PRO TERMOČLÁNEK T11	79
GRAF 0.15 SROVNÁNÍ PRŮBĚHŮ TEPLIT KŘIVEK OBDRŽENÝCH Z EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ A A B A ODLADĚNÉ SIMULACE PRO TERMOČLÁNEK T12	80
GRAF 0.16 SROVNÁNÍ PROCENTA 16 KLOUZAVÉHO PRŮMĚRU PRVNÍ DERIVACE KŘIVEK TUHnutí PRO MĚŘENÍ A A B A ODLADĚNÉ SIMULACE PRO TERMOČLÁNEK T12	80
GRAF 0.17 SROVNÁNÍ PRŮBĚHŮ TEPLIT KŘIVEK OBDRŽENÝCH Z EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ A A B A ODLADĚNÉ SIMULACE PRO TERMOČLÁNEK T13	80

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1:	Fotodokumentace k výrobě forem:	70
Příloha 2:	Experimentálně zjištěné doby tuhnutí:	72
Příloha 3:	Vstupní data pro simulaci - termofyzikální data slitiny AL - LM25 (AlSi7Mg0,3):	75
Příloha 4:	Srovnání výsledné simulace s experimentálním měřením:	76
Příloha 5:	Teplovní mapa v průběhu plnění a tuhnutí soustavy:	81
Příloha 6:	Výsledné termofyzikální parametry pro odladěnou simulaci:	83

Příloha 1: Fotodokumentace k výrobě forem:



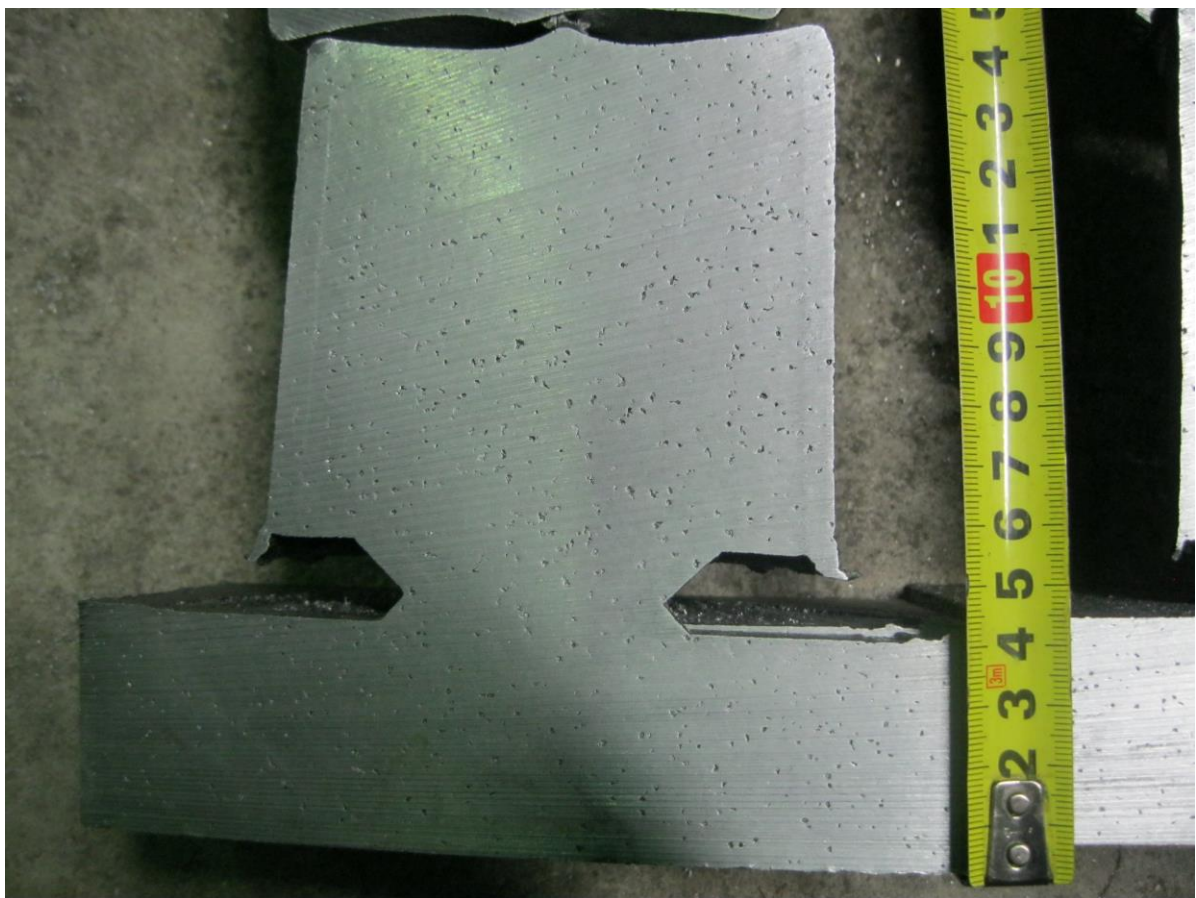
Obr. 0.1 Výroba vršku formy s přichystanými drátky a trubičkami pro budoucí umístění termočlánků



Obr. 0.2 Forma před litím s termočlánky

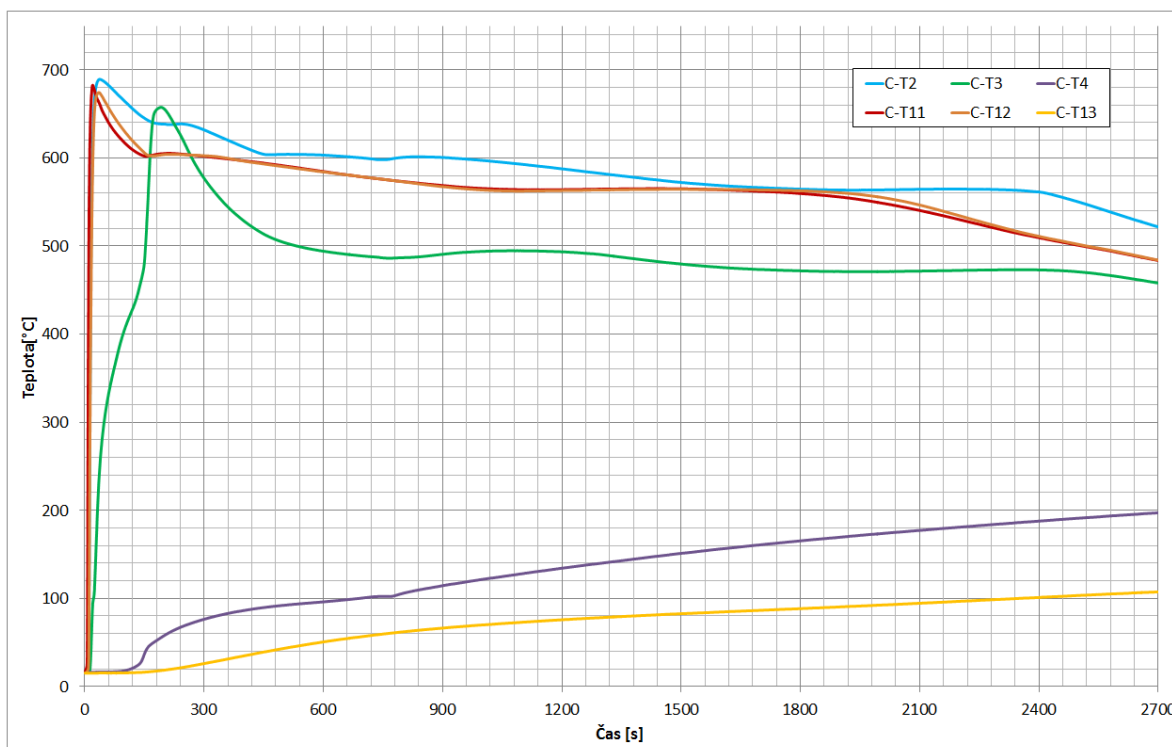


Obr. 0.3 Výsledné hliníkové odlitky A nalevo a B napravo

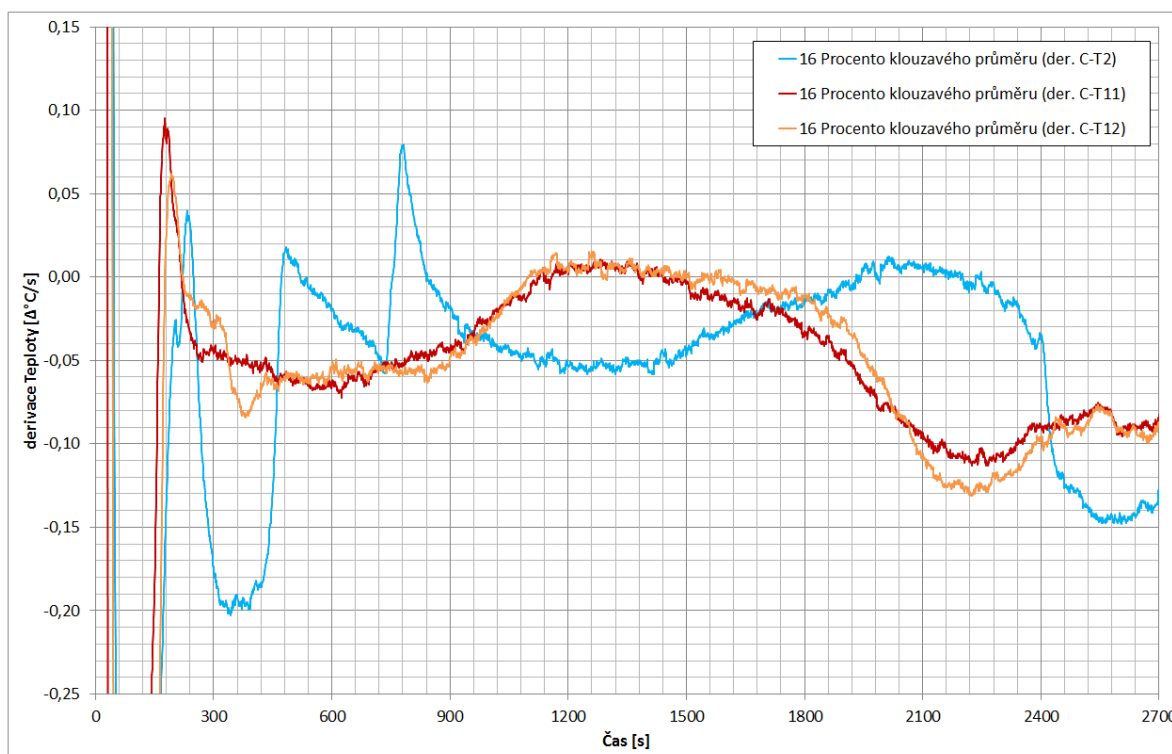


Obr. 0.4 Pórovitost v odlitku C, která vzniká z důvodů velkého dvoufázového rozhraní, vysoké tepelné vodivosti slitiny, vysokého latentního tepla a nízká tepelná akumulace pískové formy což vše vede ke kašovitému tuhnutí

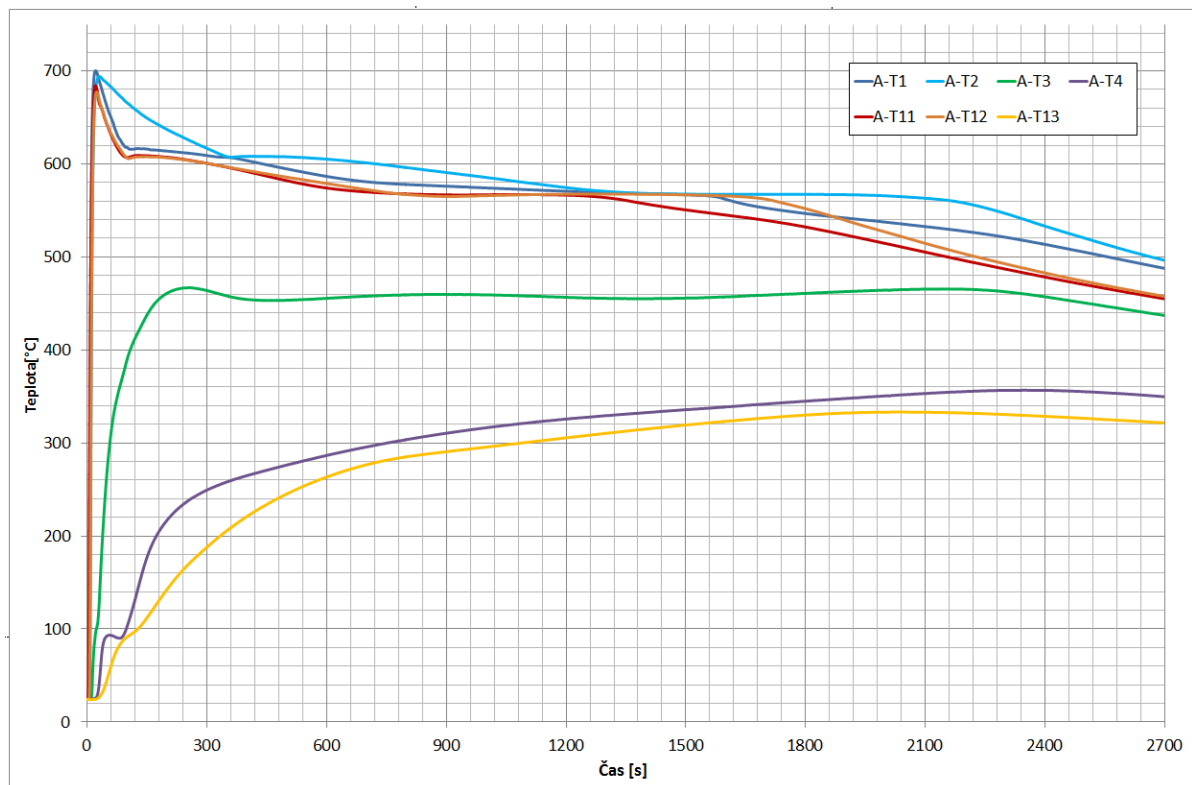
Příloha 2: Experimentálně zjištěné doby tuhnutí:



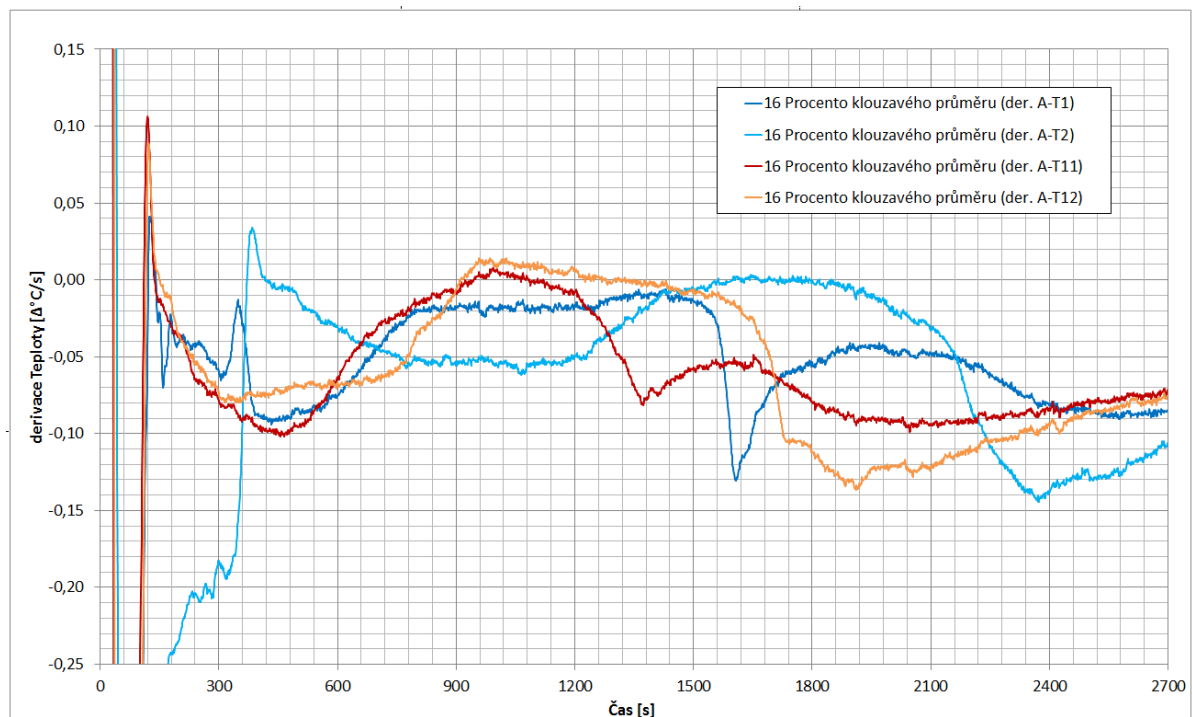
Graf 0.1 Výsledné křivky tuhnutí pro měření C. Termočlánek T1 selhal a termočlánky T4 a T13 nebyly umístěny v bodech schématu. (Umístění termočláneků, je na schématu na Obr. 2.4)



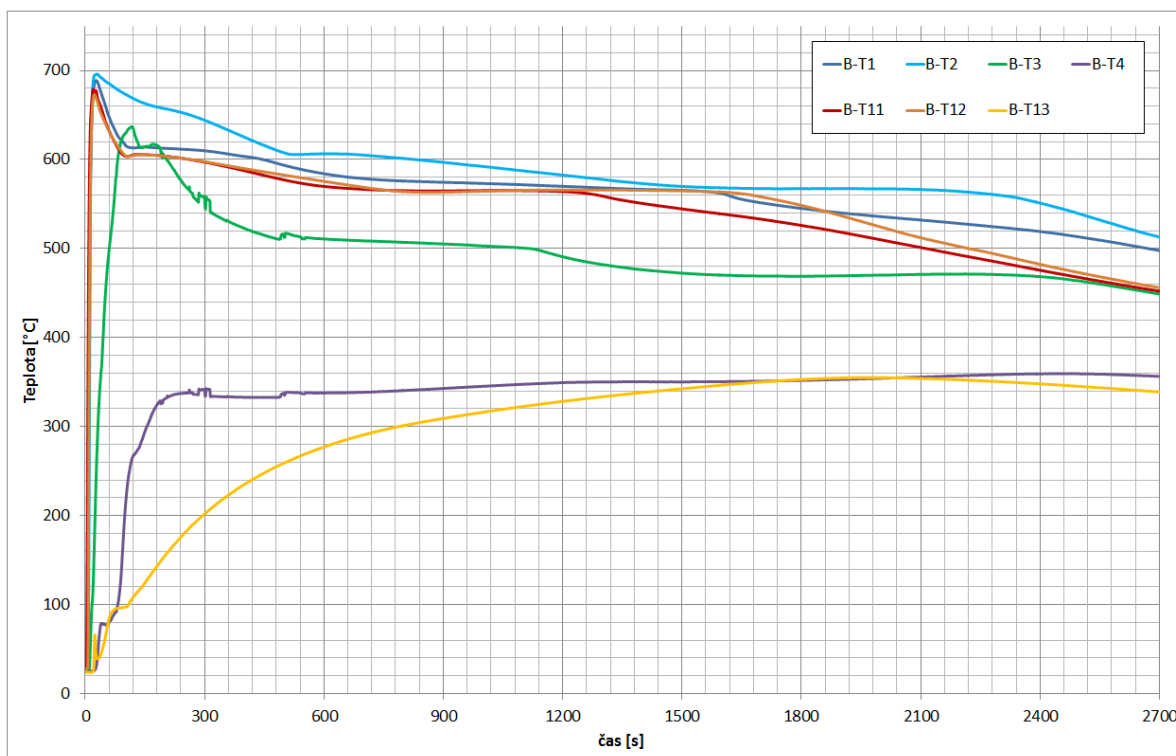
Graf 0.2 Procento 16 klouzavého průměru první derivace křivek tuhnutí pro měření C v nálitku a odlitku. Za dobu tuhnutí bylo považováno lokální minimum za eutektickou prodlevou.



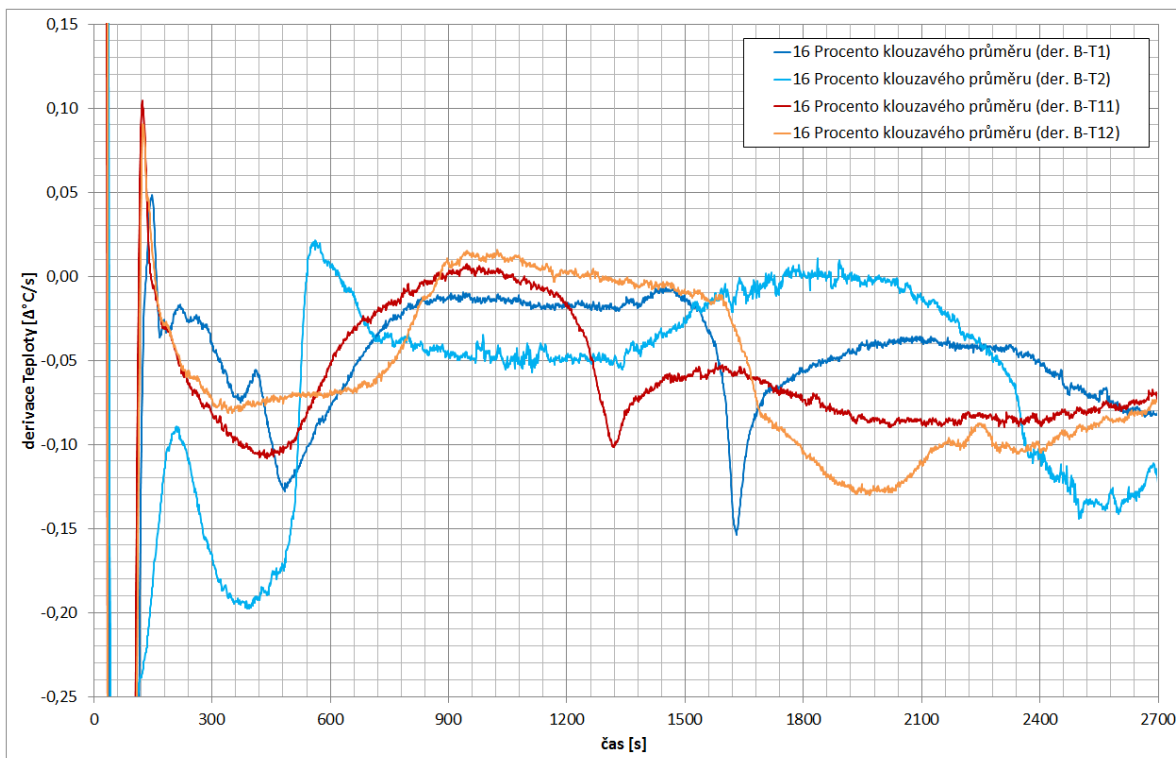
Graf 0.3 Výsledné křivky tuhnutí pro měření A. (Umístění termočlánků, je na schématu na Obr. 2.4.)



Graf 0.4 Procento 16 klouzavého průměru první derivace křivek tuhnutí pro měření A v nálitku a odlitku. Za dobu tuhnutí bylo považováno lokální minimum za eutektickou prodlevou.



Graf 0.5 Výsledné křivky tuhnutí pro měření B. (Umístění termočlánků, je na schématu na Obr. 2.4.)



Graf 0.6 Procento 16 klouzavého průměru první derivace křivek tuhnutí pro měření B v nálitku a odlitku. Za dobu tuhnutí bylo považováno lokální minimum za eutektickou prodlevou.

Příloha 3: Vstupní data pro simulaci - termofyzikální data slitiny AL - LM25 (AlSi7Mg0,3):

Tab. 0.1 Složení slitiny AL - LM25 (AlSi7Mg0,3) [4]

Al	Co	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Ni	Si	Ti	Others	
91.1	-	-	0.2	0.5	0.4	0.3	0.1	7.0	0.2	0.2	[1]

Tab. 0.2 Termofyzikální data slitiny AL - LM25 (AlSi7Mg0,3) [4]

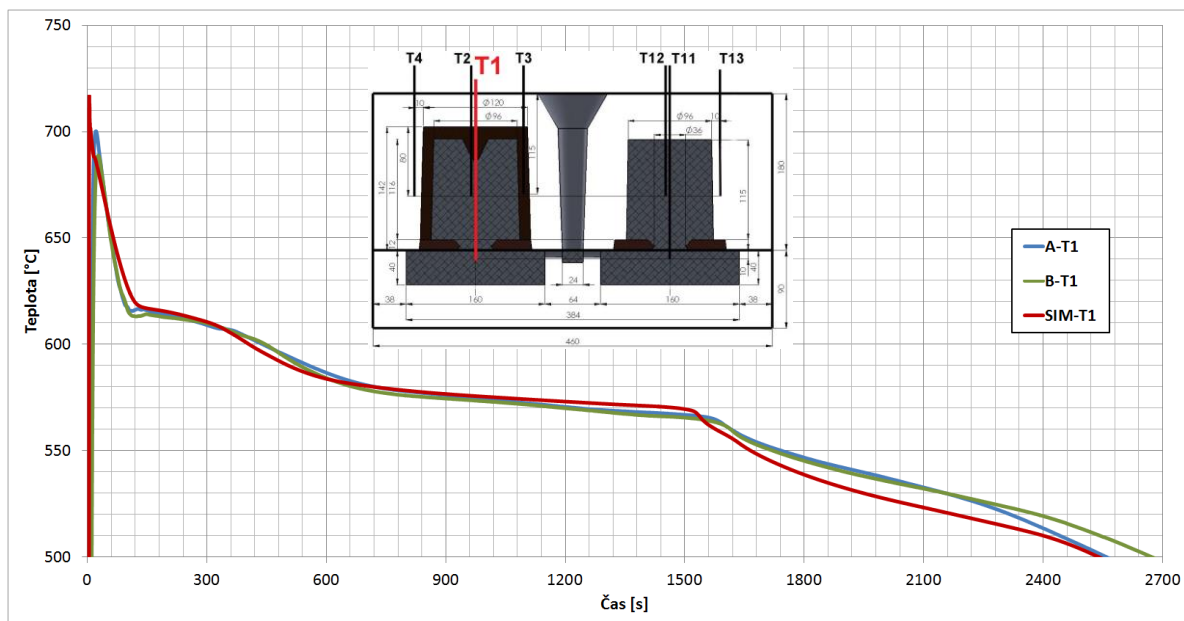
Temp (°C)	Density kgm ⁻³	C _p (Jg ⁻¹ K ⁻¹)	(H _T -H ₂₅) (Jg ⁻¹)	λ ^(a) Wm ⁻¹ K ⁻¹	10 ⁶ a m ² s ⁻¹	η(mPas)
25	2680	0.880	0	163	69	-
100	2662	0.921	68	165	67	
200	2641	0.967	162	162	63	
300	2620	1.011	261	155	60	
Transition	380	2602	1.046	343	56	
400	2600	1.055	364	153	55	
500	2578	1.098	472	145	50	
567 ^a	2567	1.127	547	134	45	
614 ^a	2406	1.19	1025	65.8	23	1.38
700	2379	1.19	1144	67.9	24	1.2
800	2352	1.19	1263	70	25	1.1
900	2325	1.19	1382	71.9	26	1.0 ^b
1000	2300	1.19	1401	73.9	27	0.9 ^b
	± 3%	± 3%	± 3%	± 10%	± 10%	± 10%
ΔH _{fus} = 425 Jg ⁻¹			β _s = 80 x 10 ⁻⁶ K ⁻¹		β _l = 116 x 10 ⁻⁶ K ⁻¹	

(a) melting range b extrapolated value

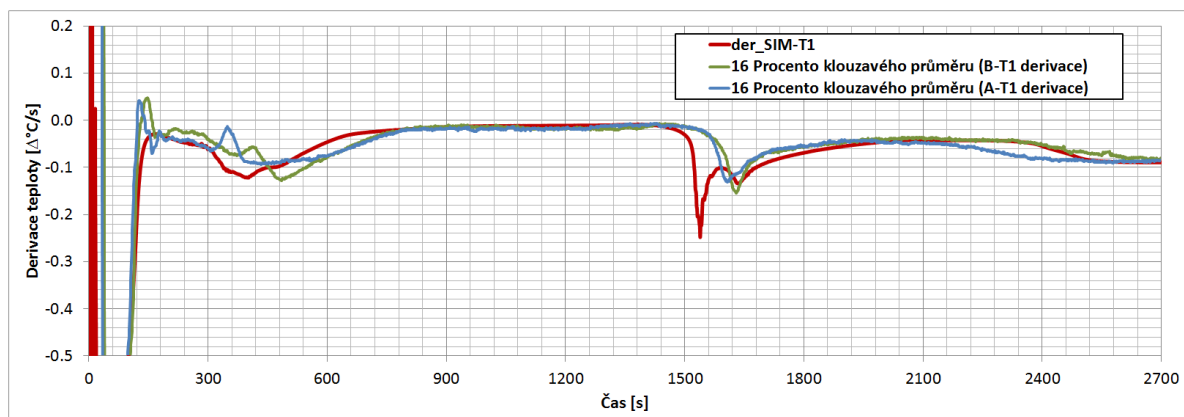
Tab. 0.3 Frakce solid slitiny AL - LM25 (AlSi7Mg0,3) [4]

f _s	0	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95	1.0
T °C	611	609	607	600	590	577	571	570	569	568	567	565	550

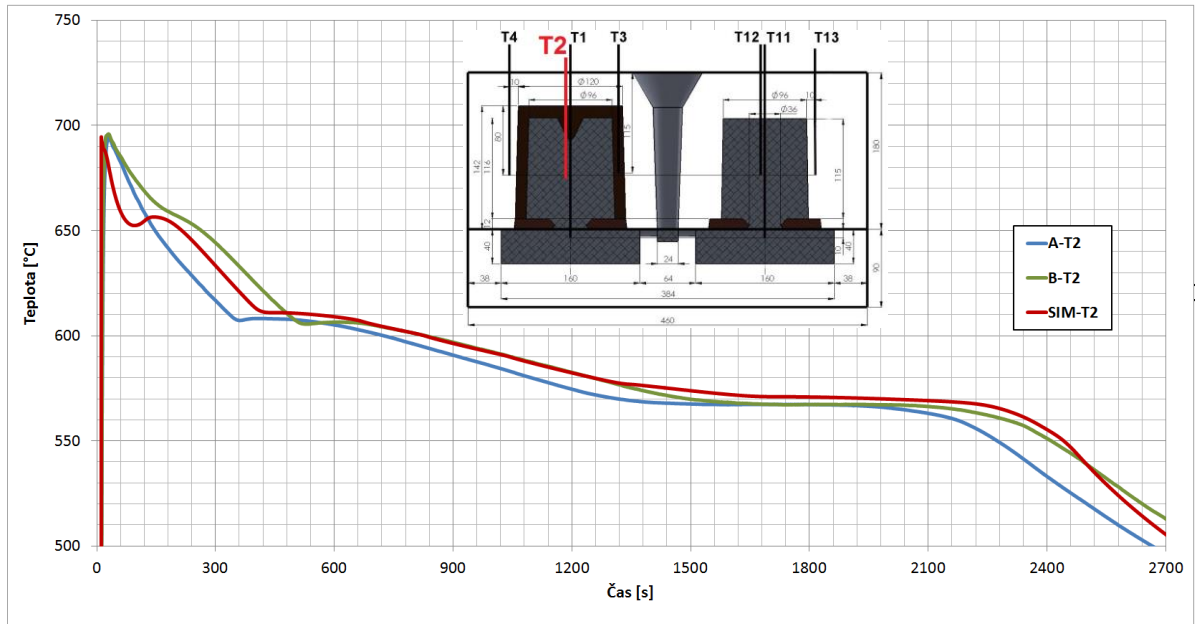
Příloha 4: Srovnání výsledné simulace s experimentálním měřením:



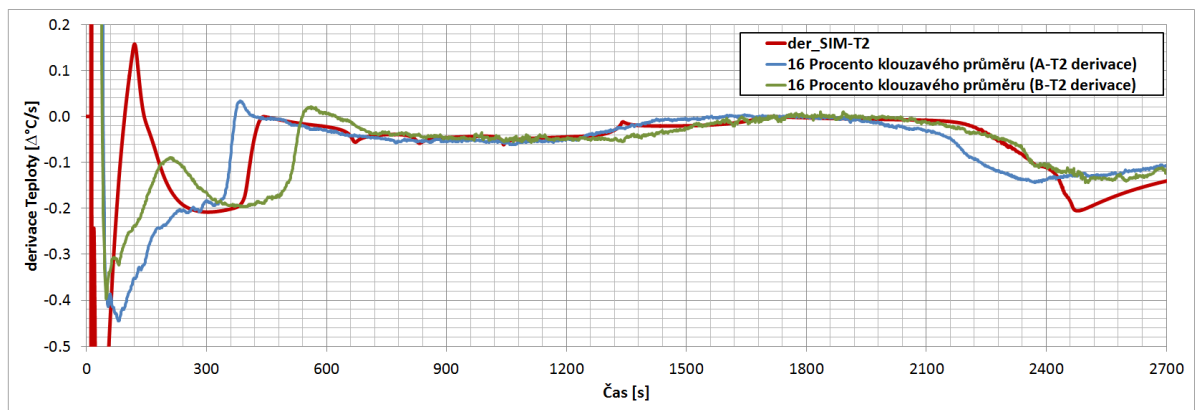
Graf 0.7 Srovnání průběhů teplot křivek obdržných z experimentálního měření A a B a odladěné simulace pro termočlánek T1.



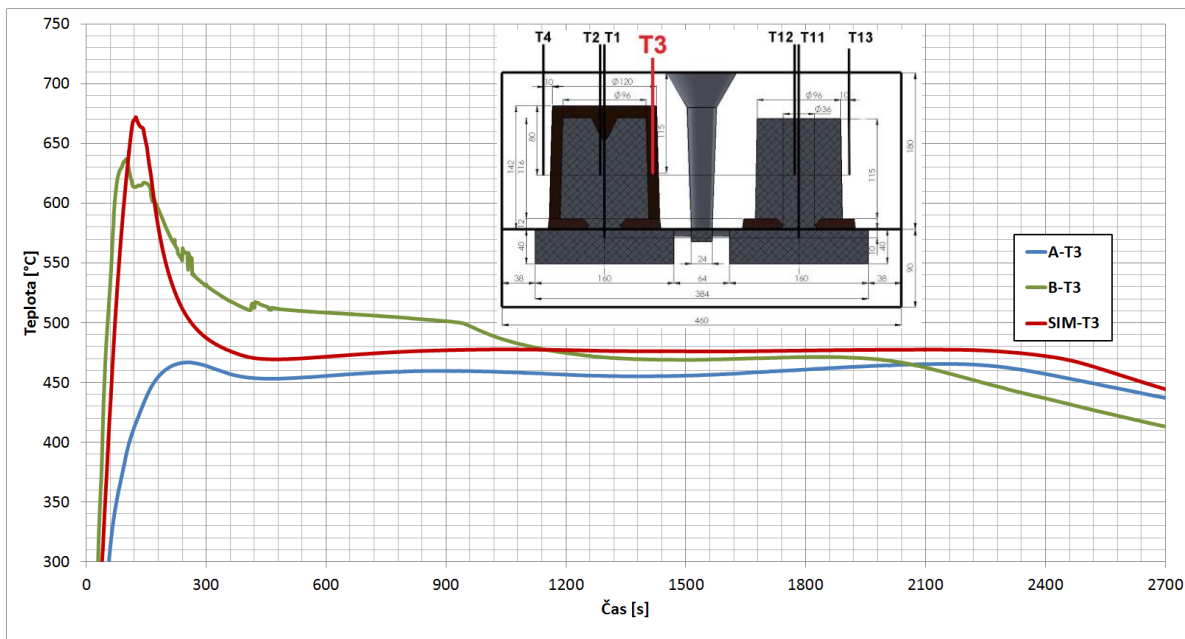
Graf 0.8 Srovnání procenta 16 klouzavého průměru první derivace křivek tuhnutí pro měření A a B a odladěné simulace pro termočlánek T1.



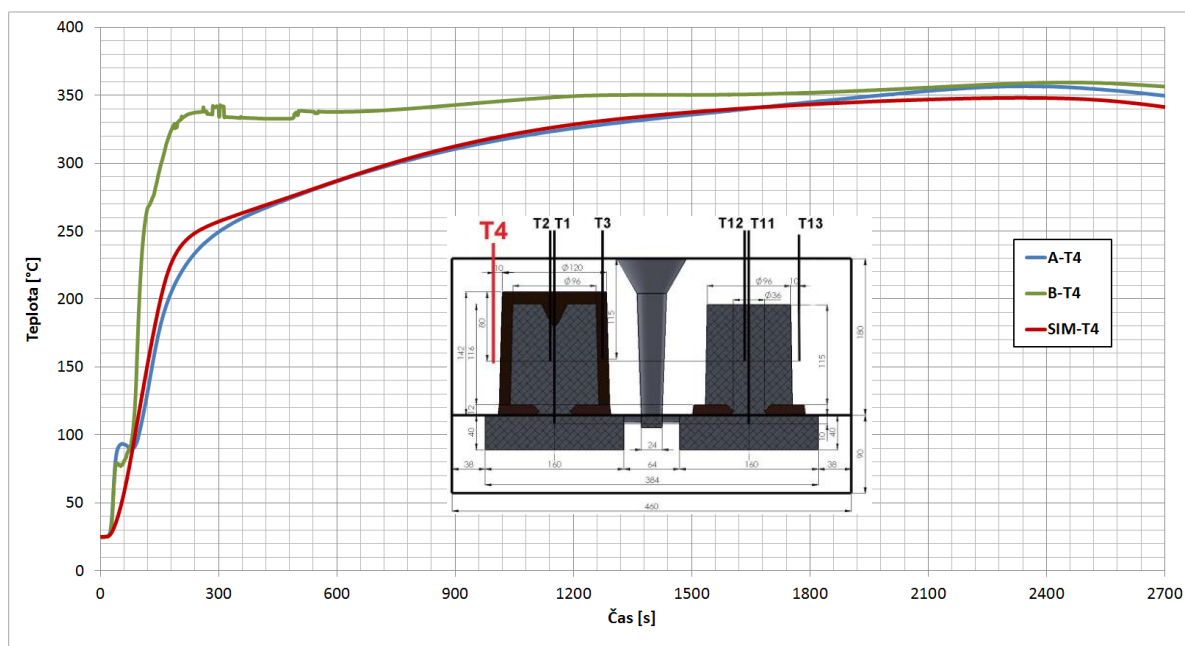
Graf 0.9 Srovnání průběhů teplot křivek obdržných z experimentálního měření A a B a odladěné simulace pro termočlánek T2.



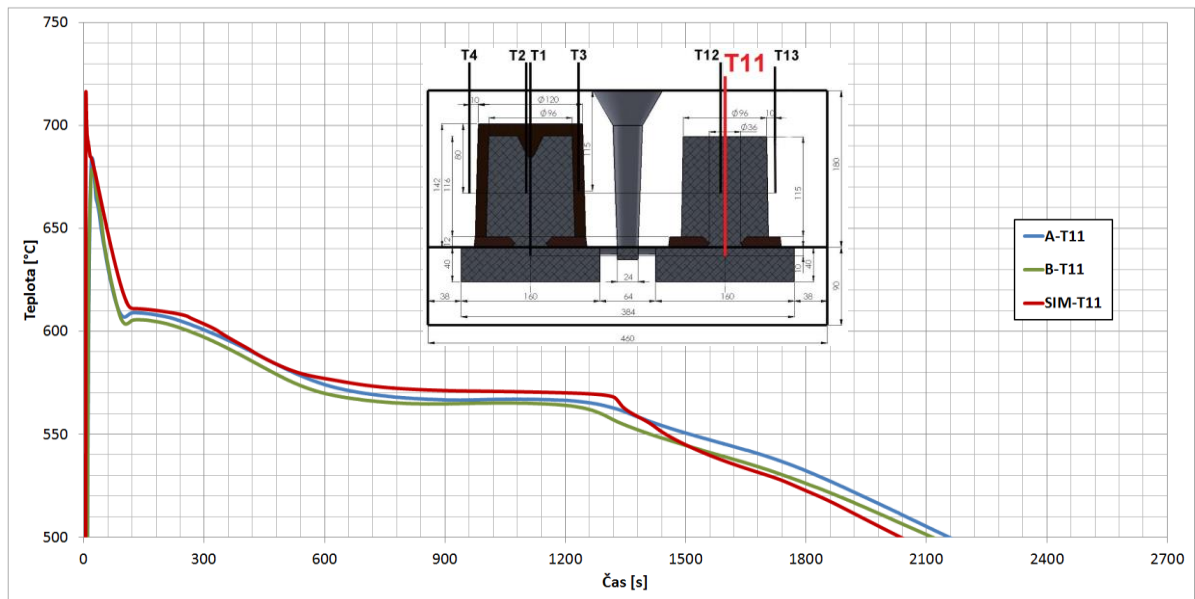
Graf 0.10 Srovnání procenta 16 klouzavého průměru první derivace křivek tuhnutí pro měření A a B a odladěné simulace pro termočlánek T2.



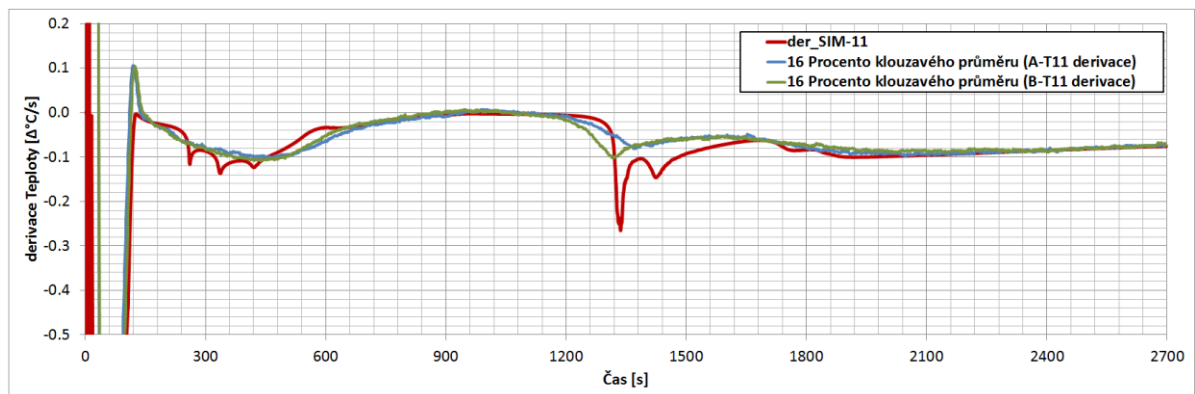
Graf 0.11 Srovnání průběhů teplot křivek obrženyých z experimentálního měření A a B a odladěné simulace pro termočlánek T3.



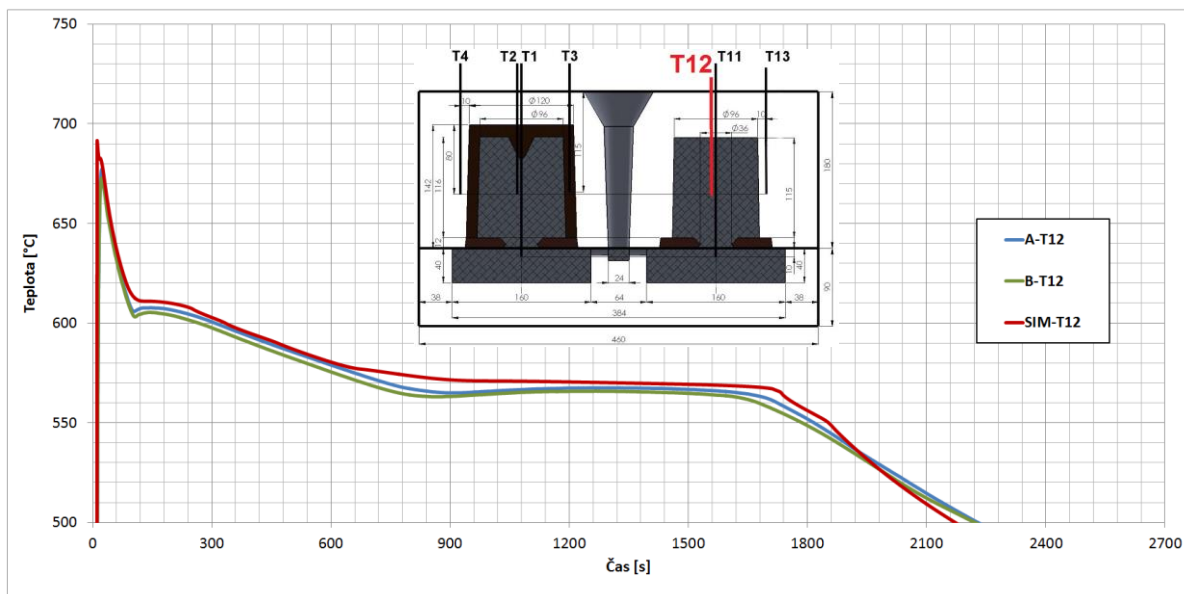
Graf 0.12 Srovnání průběhů teplot křivek obrženyých z experimentálního měření A a B a odladěné simulace pro termočlánek T4.



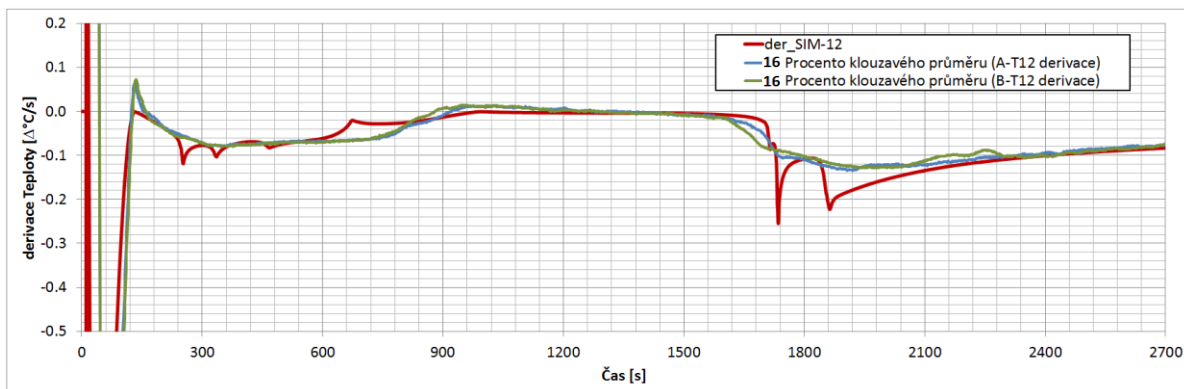
Graf 0.13 Srovnání průběhů teplot křivek obdržných z experimentálního měření A a B a odladěné simulace pro termočlánek T11.



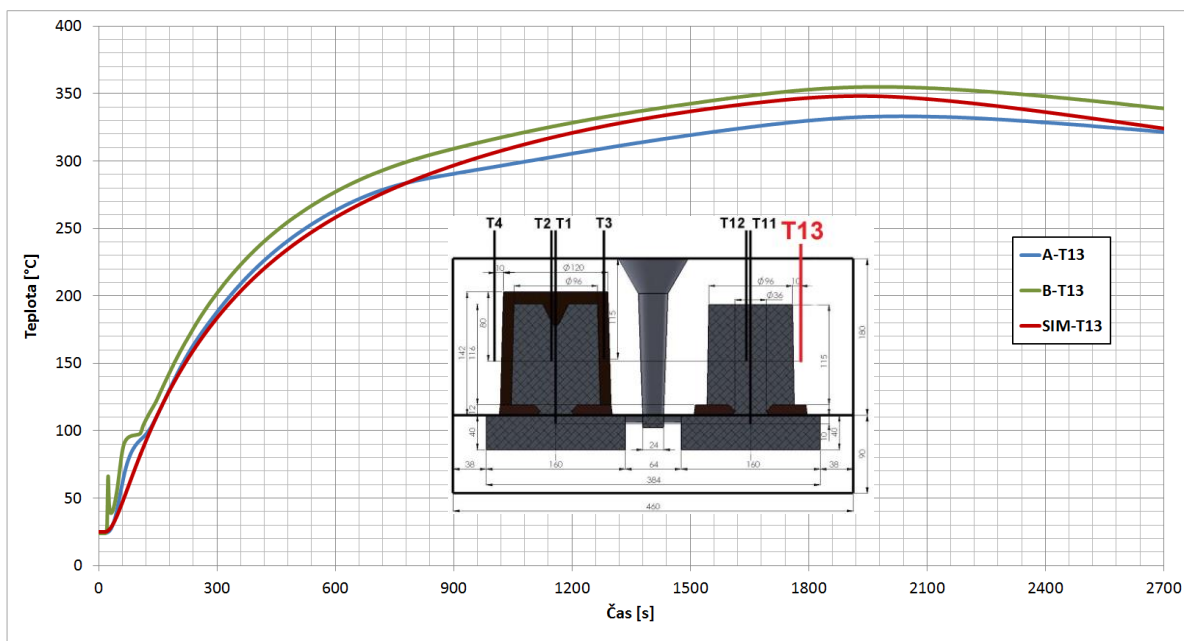
Graf 0.14 Srovnání procenta 16 klouzavého průměru první derivace křivek tuhnutí pro měření A a B a odladěné simulace pro termočlánek T11.



Graf 0.15 Srovnání průběhů teplot křivek obrženy z experimentálního měření A a B a odladěné simulace pro termočlánek T12.



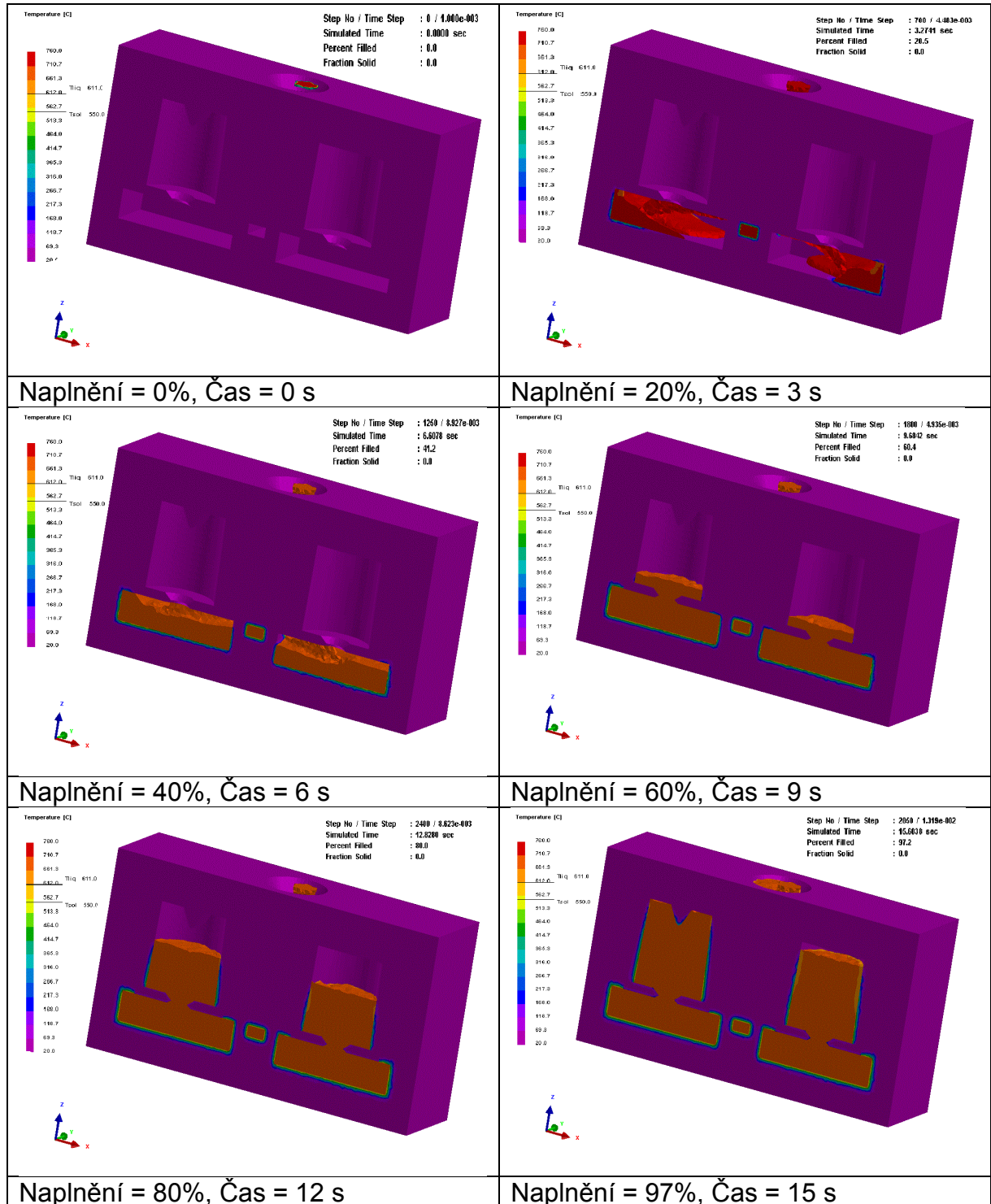
Graf 0.16 Srovnání procenta 16 klouzavého průměru první derivace křivek tuhnutí pro měření A a B a odladěné simulace pro termočlánek T12.



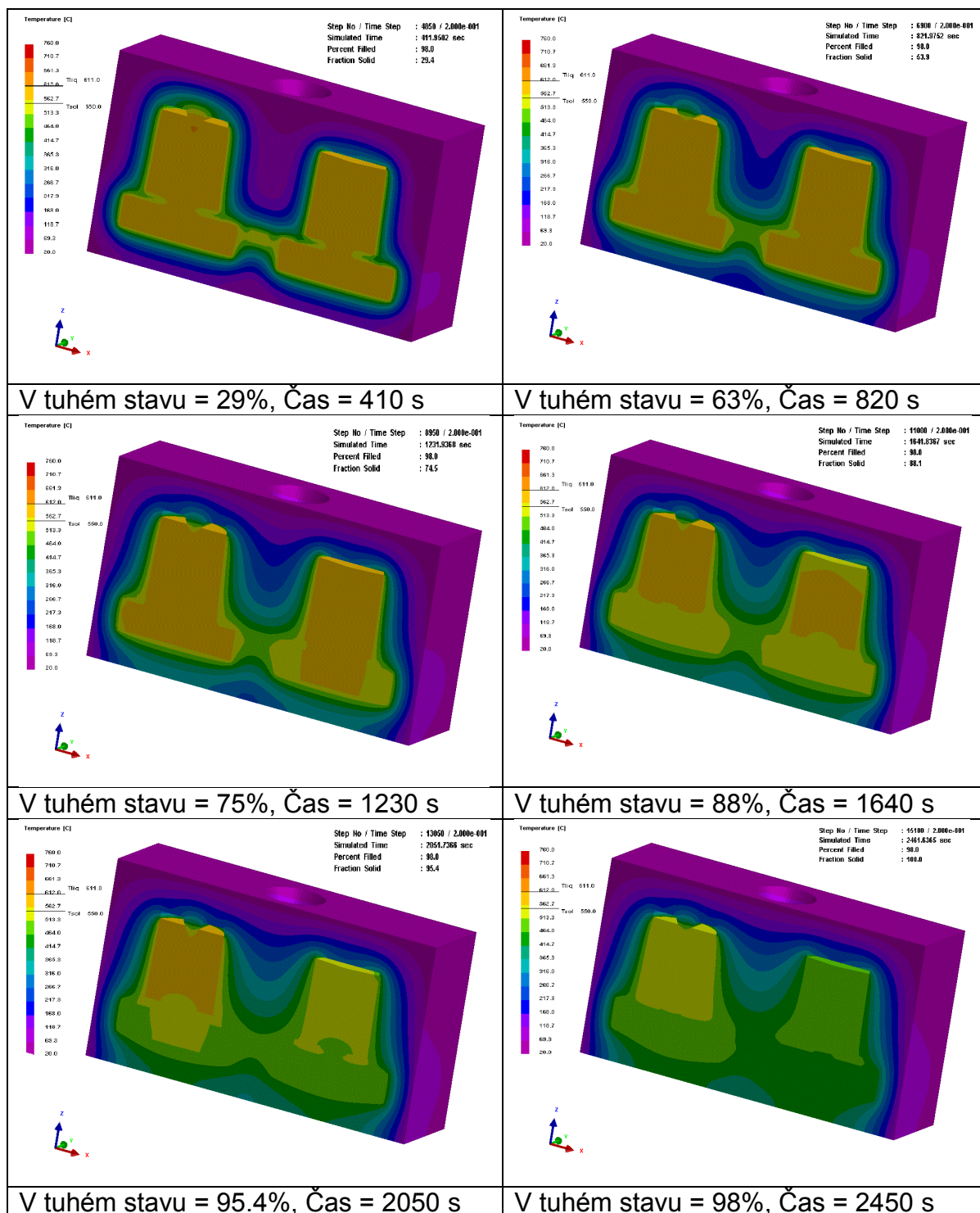
Graf 0.17 Srovnání průběhů teplot křivek obrženy z experimentálního měření A a B a odladěné simulace pro termočlánek T13.

Příloha 5: Teplotní mapa v průběhu plnění a tuhnutí soustavy:

Tab. 0.4 Vizualizace průběhu plnění formy

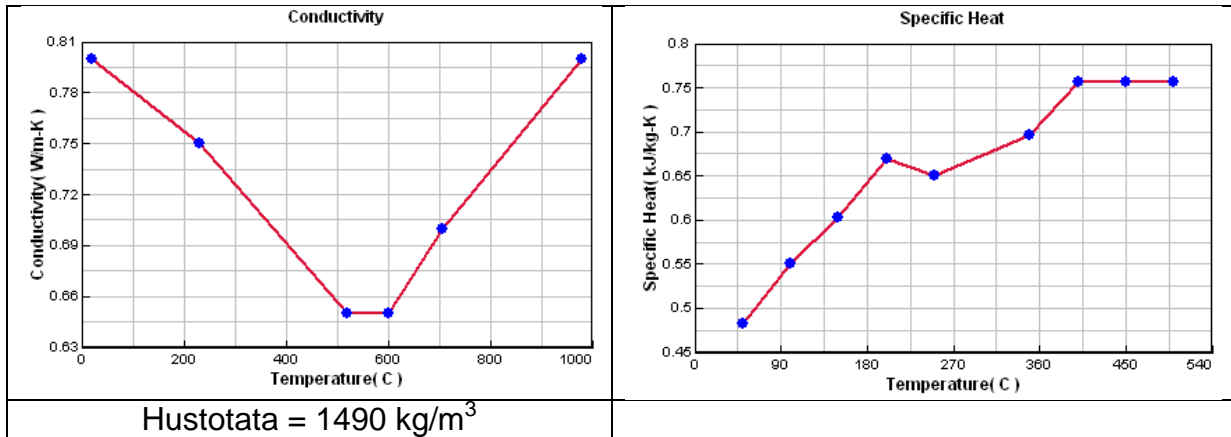


Tab. 0.5 Vizualizace tuhnutí odlitku

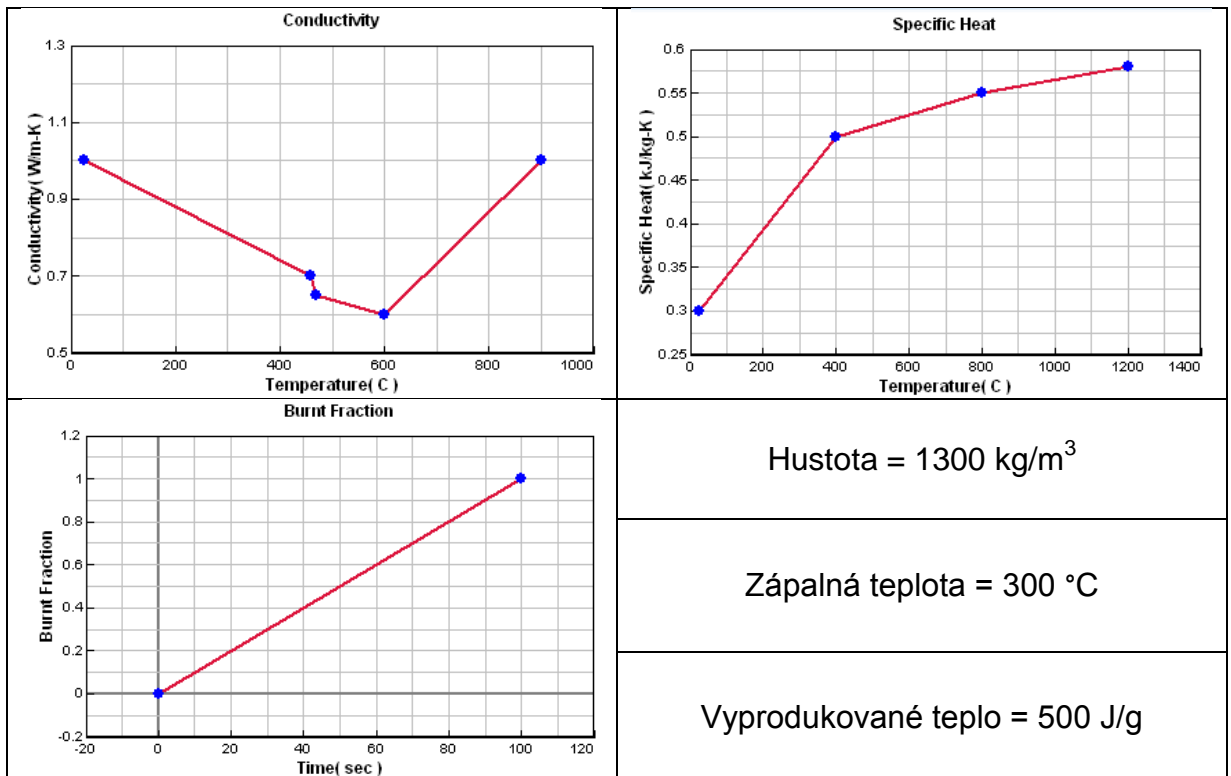


Příloha 6: Výsledné termofyzikální parametry pro odladěnou simulaci:

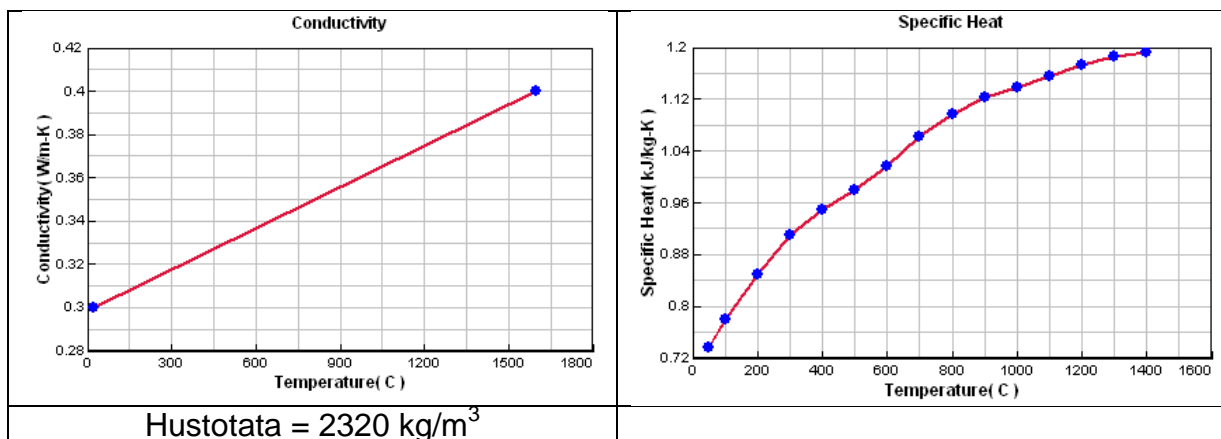
Tab. 0.6 Formovací směs - Resin bonded sand. Konečné hodnoty termofyzikálních parametrů pro odladěnou simulaci (tepelná vodivost, tepelná kapacita a hustota).



Tab. 0.7 Exotermický obklad – EK xx/xx W HA Kovochem. Konečné hodnoty termofyzikálních parametrů pro odladěnou simulaci (tepelná vodivost, tepelná kapacita, průběh hoření, hustota, zápalná teplota a vyprodukované teplo).

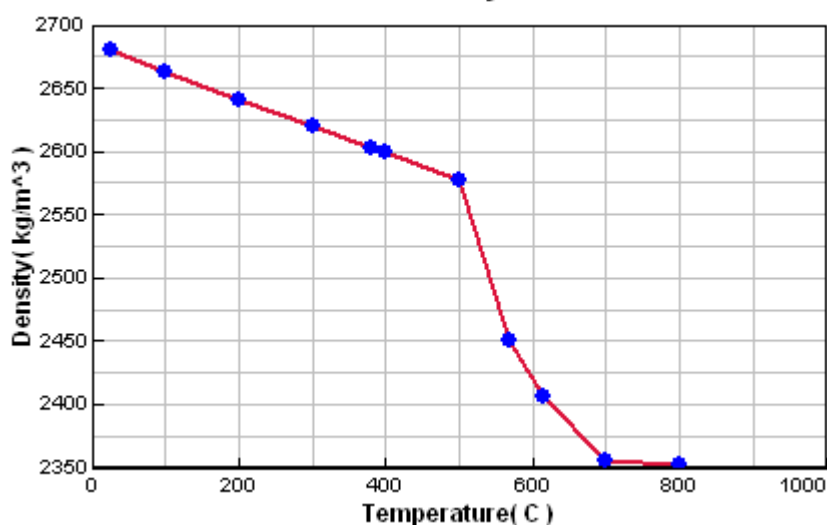


Tab. 0.8 Podnálitková podložka - Refractory fused silica. Konečné hodnoty termofyzikálních parametrů pro odladěnou simulaci (tepelná vodivost, tepelná kapacita a hustota).



Hustotata = 2320 kg/m³

Density



Obr. 0.5 Pozměněná hustota ve výpočtu pro simulaci odlévané slitiny LM 25 (AlSi7Mg0,3) za účelem snížení poklesu hladiny.

Tab. 0.9 Konečné hodnoty přestupů tepla pro odladěnou simulaci.

