# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

# FAKULTA STROJNÍ

Katedra strojírenské technologie – Oddělení strojírenské metalurgie



Obor 2303V002 – Strojírenská technologie

Zaměření – slévárenství

# Sledování vlastností slitin hliníku používaných pro výrobu pístů spalovacích motorů

# Observing the properties of aluminium alloys which are used for making pistons of gas engines

[Doktorská disertační práce]

Autor: Ing. Bc. Jiří Morávek Školitel: Prof. Ing. Iva Nová, CSc.

Vedoucí katedry: Prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld

Liberec, 2011

#### Anotace

Disertační práce se zabývá sledováním vlastností slitin hliníku používaných pro výrobu pístů spalovacích motorů. Byly sledovány slévárenské, tepelně-fyzikální a především dilatační vlastnosti slitiny AlSi12CuNiMg při tuhnutí a chladnutí odlitků v závislosti na parametrech lití. Dále bylo sledováno chování odlitků z této slitiny při jejich ohřevu. Tato slitina je významným, prakticky nejpoužívanějším, materiálem pro výrobu pístů spalovacích motorů, avšak o této slitině je v dostupných literárních podkladech málo informací. Výsledky a poznatky při řešení práce přinesly další informace, které lze uplatnit například při predikci a simulačních výpočtech chování odlitků z této slitiny. Významnou součástí řešení práce bylo i sledování struktury odlitků, včetně rozboru přítomných fází a sledování mechanických vlastností odlitků v závislosti na technologických parametrech. Pro porovnání sledovaných vlastností této slitiny byly zkoumány i vlastnosti slitiny AlSi12 a čistého hliníku (Al99,5).

Práce je rozčleněna do 12 navazujících kapitol, které zahrnují dvě hlavní části, teoretickou a experimentální. Všechny kapitoly se komplexně podílejí na sledování vlastností použitých slévárenských materiálů (slitina AlSi12CuNiMg, slitina AlSi12 a čistý hliník Al99,5).

**Teoretická část práce** se zabývá charakteristikou čistého hliníku a slitin hliníku z hlediska jejich užitných, tepelně-fyzikálních a fyzikálních vlastností. Také je věnována pozornost charakteristice slitin hliníku používaných pro výrobu pístů spalovacích motorů. Dále jsou zde charakterizovány procesy doprovázející tuhnutí a chladnutí odlitků.

**Experimentální část práce** je zaměřena na sledování vybraných slévárenských a tepelně-fyzikálních vlastností tavenin zkoumaných materiálů. Byl proveden výpočet vybraných termodynamických vlastností čistého hliníku a posuzovaných slitin hliníku (změna Gibbsovy energie, molární entalpie a entropie při tavení; výpočet tepelné energie nutné k roztavení sledovaných materiálů). V rámci experimentální části byla navržena a odzkoušena metodika sledování slévárenských a tepelně-fyzikálních vlastností, zejména vlastností dilatačních při tuhnutí a chladnutí odlitků, v závislosti na licích parametrech. Byla sledována zabíhavost a průběh a doba tuhnutí odlitků ze zkoumaných materiálů. Dále byla věnována velká pozornost sledování dilatačních charakteristik zkušebních odlitků ze zkoumaných materiálů tvaru "I", resp. desky a válce při jejich tuhnutí a chladnutí v závislosti na licích parametrech (materiál slévárenské formy, licí teplota a tloušťka stěny

odlitku), přičemž před vlastním měřením byl proveden výpočet těchto vlastností na základě teoretických poznatků. Také bylo prováděno zkoumání dilatačních vlastností zkoumaných materiálů při jejich ohřevu. K těmto experimentům byla použita tři měřicí zařízení vyvinutá na Katedře strojírenské technologie, FS, TU v Liberci. Ze získaných výsledků byly vypočítány hodnoty součinitele teplotní smrštivosti a roztažnosti. Byla také posuzována tvrdost zkoumaných materiálů a sledována jejich vnitřní struktura pomocí světelné a elektronové mikroskopie.

Klíčová slova: pístové slitiny, dilatace, součinitel teplotní smrštivosti, struktura odlitků

#### Annotation

Doctoral thesis deals with observing the properties of aluminium alloys which are used for casting pistons of gas engines. Casting, thermo-physical, physical and dilatation properties of piston aluminium alloy AlSi12CuNiMg during solidification and cooling processes of castings were observed in dependence on casting parameters. As a next step were observed dilatation changes during heating of castings from this alloy. This alloy is an important and most used material for production pistons of gas engines. But in literature is not enough information about this material, especially about his dilatation behavior during casting process. Results which are contained in this thesis contribute to better description of these properties and their use for example in numerical simulations of behavior of this material in casting moulds. The important part of this thesis is focused on observing the microstructure of casting. This part is also including analysis of intermetallic phases, which are presented in microstructure. The mechanical properties, hardness, in dependence on casting conditions were also studied. For comparing of observing properties of this alloy were observed the same properties of eutectic aluminium alloy AlSi12 and pure aluminium Al99,5.

Thesis is divided to 12 chapters, which are contains two main parts, theoretical part and experimental part. All these chapters are comprehensively involved in the observing of properties of used casting materials (alloy AlSi12CuNiMg, alloy AlSi12 and pure aluminium Al99,5).

**Theoretical part** deals with characteristic of pure aluminium and aluminium alloys from utility, thermo-physical and physical properties point of view. In this part are also

describe properties of aluminium alloys which are used for making pistons of gas engines. There are also description processes during solidification and cooling castings.

Experimental part deals with observing of selected casting and thermo-physical properties of melts from observed materials. There was made a calculation of selected thermodynamic properties of pure aluminium and aluminium alloys (change of Gibbs energy, molar enthalpy and entropy during melting process and calculation of thermal energy for melting). In the frame of experimental part was suggested and tested the methodology for observing the casting, thermo-physical and dilatation changes in dependence on casting parameters. At the beginning were observed the fluidity and solidification time of castings from tested materials. As a next experiments were observed the dilatation changes of test castings with the shape of letter "I" (desk shape) and cylindrical shape during their solidification and cooling processes in dependence of casting parameters (casting temperature, material of casting mould and wall thickness of the castings). Before measuring were made a calculations of these properties on the base of theoretical assumptions. The observing of dilatation changes of tested materials during their heating was also made. For these experimental measurements were used three measuring equipments which were built and constructed on Department of engineering technology, Technical university of Liberec. From obtained results were calculated values of coefficient of thermal contraction and expansion for tested materials. There were also observed the hardness of castings from tested aluminium materials and their microstructure with the help of light and electron microscopy.

Key words: piston alloys, dilatation, coefficient of thermal contraction, microstructure

Disertační práce vznikla s podporou výzkumného záměru **MSM 4674788501** a na základě finanční podpory z projektu studentské grantové soutěže **SGS 2822** ze strany Technické univerzity v Liberci v rámci podpory specifického vysokoškolského výzkumu.

#### Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat paní prof. Ing. Ivě Nové, CSc. za její pomoc, cenné rady a připomínky, které přispěly a pomohly ke vzniku této disertační práce a také Katedře strojírenské technologie FS, TU v Liberci, která mi umožnila přístup k jejímu laboratornímu vybavení. Dále bych chtěl poděkovat panu Drahoslavu Vinšovi za jeho pomoc při provádění experimentálních měření. Mé poděkování patří také členům Katedry konstrukčních materiálů na švédské univerzitě v Linköpingu, kteří mi taktéž poskytli cenné rady a připomínky a umožnili přístup k jejich laboratornímu vybavení, zejména pak panu prof. Stenu Johanssonovi, Mohsenu Sadrossadatovi, Robertu Erikssonovi a paní Annethe Billenius.

Největší dík patří mým rodičům, kteří mě morálně i hmotně podporovali po celou dobu studia. Dále bych chtěl poděkovat slečně Haně Vallové za jazykovou úpravu práce a podporu a také dalším přátelům za jejich podporu.

Liberec, 25.8. 2011

Jiří Morávek

Obsah
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ9
1. ÚVOD
1.1 Cíle disertační práce 15
1.2 Publikace doktoranda k tématu disertační práce a ostatní publikace 15
2. OBECNÉ VLASTNOSTI HLINÍKU A JEHO SLITIN
2.1 Hliník
2.2 Slévárenské slitiny hliníku 25
2.2.1 Slévárenské slitiny hliníku pro tlakové lití 28
2.2.2 Slévárenské slitiny hliníku pro gravitační lití
2.2.3 Vliv prvků ve slitinách hliníku
3. HISTORIE, KONSTRUKCE A VÝROBA PÍSTŮ SPALOVACÍCH MOTORŮ
3.1 Vlastnosti slitin hliníku používaných pro odlévání pístů spalovacích motorů
3.2 Fázové diagramy pístových slitin se systémem prvků Al-Si-Cu-Ni-Mg 45
4. FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI SLITIN HLINÍKU
4.1 Lineární a objemové změny při tuhnutí a chladnutí53
4.2 Tepelně-fyzikální vlastnosti slitin hliníku
5. VÝPOČTY TEPELNĚ-FYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ ČISTÉHO HLINÍKU
5.1 Výpočet změny entropie při tavení čistého hliníku76
5.2 Výpočet změny molární entalpie při tavení čistého hliníku
5.3 Výpočet závislosti Gibbsovy energie na teplotě při tavení čistého hliníku 80
5.4 Výpočet závislosti Gibbsovy energie na tlaku při tavení čistého hliníku 81
5.5 Výpočet závislosti Gibbsovy energie při tavení čistého hliníku na tlaku a teplotě 82
6. EXPERIMENTÁLNÍ SLEDOVÁNÍ SLÉVÁRENSKÝCH VLASTNOSTÍ VYBRANÝCH SLITIN HLINÍKU
6.1 Výpočet množství tepla potřebného k přehřátí vybraných slitin hliníku
6.1.1 Vyhodnocení množství tepla potřebného k přehřátí vybraných slitin hliníku
6.2 Zjišťování času tuhnutí odlitků ze slitin hliníku

6.2.1 Vyhodnocení času tuhnutí odlitků ze slitin hliníku
6.3 Sledování zabíhavosti zkoumaných slitin 100
6.3.1 Vyhodnocení zkoušek zabíhavosti 102
7.SLEDOVÁNÍ DILATAČNÍCH VLASTNOSTÍ SLITIN HLINÍKU PŘI TUHNUTÍ A CHLADNUTÍ ODLITKŮ TVARU DESKY METODOU BRŽDĚNÉHO SMRŠŤOVÁNÍ 103
7.1 Výpočet lineárních rozměrových změn odlitku tvaru desky 103
7.2 Měření dilatačních změn při tuhnutí a chladnutí odlitků
7.2.1 Popis měřícího zařízení 107
7.2.2 Charakteristika slévárenských forem použitých pro experimenty 109
7.2.3 Popis provedených experimentálních měření 111
7.3 Vyhodnocení křivek tuhnutí a dilatace 113
7.3.1 Vyhodnocení 1. etapy měření 114
7.3.2 Vyhodnocení 2. etapy měření 123
7.3.3 Vyhodnocení 3. etapy měření 129
7.4 Stanovení součinitele teplotního smrštění 133
8. SLEDOVÁNÍ DILATAČNÍCH VLASTNOSTÍ PÍSTOVÉ HLINÍKOVÉ SLITINY PŘI TUHNUTÍ A CHLADNUTÍ ODLITKŮ TVARU VÁLCE
8.1 Výpočet lineárních dilatačních změn odlitku tvaru válce
8.2 Měření lineárních rozměrových změn odlitků142
8.2.1 Popis měřícího zařízení 142
8.2.2 Charakteristika forem použitých pro experimenty 144
8.2.3 Popis provedených experimentálních měření145
8.3 Vyhodnocení křivek tuhnutí a dilatace147
8.3.1 Vyhodnocení 1. etapy měření 149
8.3.2 Vyhodnocení 2. etapy měření 156
8.3.3 Vyhodnocení 3. etapy měření 160
8.4 Stanovení součinitele teplotního smrštění 164
9. SLEDOVÁNÍ DILATAČNÍCH VLASTNOSTÍ SLITIN HLINÍKU PŘI JEJICH PLYNULÉM OHŘEVU

9.1 Výpočet lineárních rozměrových změn odlitku tvaru válce	L71
9.2 Měření dilatačních změn odlitků1	L72
9.2.1 Popis měřícího zařízení 1	173
9.2.2 Charakteristika forem použitých pro experimenty1	L74
9.2.3 Popis provedených experimentálních měření1	L75
9.3.1 Vyhodnocení 1. etapy měření 1	L79
9.3.2 Vyhodnocení 2. etapy měření 1	L84
9.4 Stanovení součinitele teplotní roztažnosti 1	187
10. METALOGRAFICKÉ HODNOCENÍ STRUKTURY ODLITKŮ ZE ZKOUMANÝO SLITIN A HODNOCENÍ JEJICH MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ	<b>)H</b> 193
10.1 Hodnocení struktury vzorků pomocí světelné mikroskopie a měření tvrdosti 1	193
10.1.2 Sledování struktury vzorků pomocí světelné mikroskopie 1	194
10.1.3 Měření tvrdosti slitin hliníku1	199
10.2 Hodnocení struktury vzorků na elektronovém mikroskopu 2	203
10.2.1 Zkoumání lomových ploch a zjišťování chemického složení slitin 2	204
10.2.2 Sledování chemického složení intermetalických fází 2	208
11. DISKUSE VÝSLEDKŮ 2	215
12. ZÁVĚR	234
13. POUŽITÁ LITERATURA 2	242
PŘÍLOHYKniha příl	oh

# SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

- a součinitel teplotní vodivosti  $[m^2.s^{-1}]$
- A<sub>0,2</sub> tažnost materiálu [%]
- Bi Biotovo kritérium [1]
- c měrná tepelná kapacita  $[J.kg^{-1}.K^{-1}]$
- C integrační konstanta [1]
- $c_S$  měrná tepelná kapacita v tuhém stavu [J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>];
- $c_L$  měrná tepelná kapacita v kapalném stavu [J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>];
- $\Delta c_p$  změnu molární tepelné kapacity při konstantním tlaku [1]
- d integrační konstanta [1]
- d<sub>50</sub> střední velikost zrna [m]
- Do počáteční průměr odlitku [m]
- ΔD dilatační změna odlitku [m]

 $\Delta G_{táni}$  – změna Gibbsovi energie při tání [1]

- $G_L^{\ 0}$  molární volná entalpie taveniny [J.mol<sup>-1</sup>]
- $G_8^{\ 0}$  molární volná entalpie tuhé fáze [J.mol<sup>-1</sup>]
- HB, HV tvrdost materiálu [1]

 $\Delta H$  – změna entalpie [1]

- $d(\Delta H)$  diferenciál přírůstku molární entalpie [1]
- k rovnovážný rozdělovací koeficient [1]
- $k_D$  konstanta tuhnutí odlitku tvaru desky [m.s<sup>-1/2</sup>];
- $k_V$  konstanta tuhnutí odlitku tvaru válce [m.s<sup>-1/2</sup>];
- l délka hrany krychlového krystalového zárodku [m]
- lkrit kritická velikost zárodku [m]
- ΔL filtrační dráha [m]
- l<sub>P</sub>, l<sub>0</sub> počáteční rozměr odlitku [m]

l – délka odlitku [m]

 $L_{KR}$ ,  $l_{ta}$  – latentní teplo  $[J.kg^{-1}]$ 

M – molekulová hmotnost [kg.mol<sup>-1</sup>]

m	– hmotnost [kg]
n	– počet molů [1]
dP	– diferenciál tlaku [Pa]
Р	– tlak [Pa]
Q	– teplo [J]
Re <sub>0,2</sub>	– mez kluzu materiálu [MPa]
$R_{m}$	– mez pevnosti materiálu [MPa]
$\Delta S^0_{tání}$	– změna entropie při tání [1]
T <sub>tá</sub>	– teplota tání [°C]
T <sub>20</sub>	– teplota okolí [°C]
T <sub>lití</sub>	– teplota lití [°C]
T <sub>ZLS</sub>	<ul> <li>teplota počátku lineárního smrštění [°C]</li> </ul>
T <sub>L</sub> , T <sub>li</sub>	<sub>k</sub> – teplota likvidu [°C]
$T_S, T_{sc}$	<sub>ol</sub> – teplota solidu [°C]
t <sub>tuh</sub>	– čas tuhnutí [s]
$T_{D}$	– tloušťka desky [m]
$T_{v}$	– tloušťka ztuhlého mezikruží [m]
ts	– čas dosažení teploty solidu [s]
dT	– diferenciál teploty [°C]
$\mathbf{V}_0$	– počáteční objem [m <sup>3</sup> ]
$\Delta V_L^{I}$ ,	$\Delta V_L^{II}$ – úbytek objemu v kapalném stavu [m <sup>3</sup> ]
$\Delta V_{\text{L-S}}$	– změna objemu při fázové přeměně [m <sup>3</sup> ]
$\Delta V_{\text{S}}$	– změna objemu při chladnutí odlitku [m <sup>3</sup> ]
$\Delta V$	– změna molárního objemu [m <sup>3</sup> ]
X	– lineární smrštění odlitku [%]
α	– součinitel teplotní smrštivosti a roztažnosti materiálu [K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_{o}$	– součinitel objemového teplotního smrštění [K <sup>-1</sup> ]

– součinitel přestupu tepla [W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>],  $\alpha_{k\text{-}f}$ 

- $\lambda \qquad \text{ součinitel tepelné vodivosti } [W.m^{\text{-1}}.K^{\text{-1}}]$
- $\gamma$  koeficient objemové roztažnosti [K<sup>-1</sup>],
- η dynamická viskozita [Pa.s]
- v kinematická viskozita [m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>]
- $\zeta$  tloušťka ztuhlé vrstvy odlitku [m]
- $\epsilon_v$  relativní (poměrná) dilatace [1]
- $\epsilon_b$  brzděná tepelná dilatace [1]
- $\rho$  hustota [kg.m<sup>-3</sup>]
- $ho_S$  hustota v tuhém stavu [kg.m<sup>-3</sup>],
- $\rho_L$  hustota v tekutém stavu [kg.m<sup>-3</sup>],
- $\sigma$  povrchové napětí [N.m<sup>-1</sup>]

# 1. ÚVOD

Technologie slévárenství se zaměřuje na výrobu kvalitních a rozměrově přesných odlitků, které jsou zhotovovány z různých kovů a jejich slitin. Takovými materiály jsou litiny, slitiny zinku, hořčíku a dnes velmi rozšířené slitiny hliníku. Slitiny hliníku s křemíkem, hořčíkem i dalšími prvky se dnes pro své dobré slévárenské, technologické a fyzikální vlastnosti používají v různých odvětvích výroby a především v automobilovém průmyslu pro výrobu složitých odlitků, jako jsou bloky a hlavy spalovacích motorů, převodové skříně, lité disky kol, atd., tj. velmi členité a složité odlitky s nutností vysoké rozměrové přesnosti a kvality povrchu. Hliníkové, zinkové, hořčíkové a další slitiny jsou zpracovávány progresivními technologiemi (vysokotlaké a nízkotlaké lití, gravitační lití, atd.). Pro výrobu odlitků jsou také velmi důležité slévárenské vlastnosti použitých slitin. Ve vztahu ke konečné rozměrové přesnosti odlitku je to především jejich sklon ke stahování a lineárnímu smršťování. Tyto rozměrové změny jsou důležité při návrhu dutiny slévárenské formy, nebo volbě velikosti nálitku, především při gravitačním odlévání. V současné době roste podíl výroby odlitků ze slitin neželezných kovů oproti odlitkům vyrobeným ze slitin železa, což je způsobeno především poklesem výroby odlitků z litiny (s výjimkou litiny tvárné) a oceli na odlitky. Podíl jednotlivých slitin při výrobě odlitků je patrný z tabulky 1.1 a ukazuje značnou nerovnováhu v produkci jednotlivých skupin slévárenských slitin.

Země	GJL	GJS	Ocel	slitiny Al	slitiny Mg	slitiny Zn	Ostatní	Celkem
Anglie	192 000	215 000	72 000	110 000	3 500	9 500	1 000	603 000
Brazílie	1 589 886	677 611	323 818	224 966	6 005	3 462	-	2 825 748
ČR	252 964	52 150	97 869	114 973	-	4 101	432	522 489
Čína	16 400 000	8 200 000	4 600 000	3 000 000	-	-	200 000	32 400 000
Indie	4 532 000	785 000	916 000	-	-	-	547 000	6 780 000
Japonsko	2 753 475	1 995 649	298 720	414 002	9 268	30 207	5 912	5 507 233
Německo	2 677 674	1 846 793	220 132	802 202	31 532	67 908	2 024	5 648 265
Rusko	3 320 000	1 800 000	1 300 000	840 000	80 000	30 000	50 000	7 420 000
USA	3 502 640	3 597 894	1 172 082	1 739 980	109 769	273 970	52 617	10 448 952
Celkem	35 220 639	19 170 097	9 000 621	7 246 123	240 074	419 148	858 985	72 155 687

Tabulka 1.1	Podíl	odlitků ve	vybraných	zemích	světa v	roce 20	08	[1]
I uouna I.I	I Uull	ountinu ve	, joi un jon	Lonnen	brota i	1000 20	00	L * J

Hliník a jeho slitiny mají v současné době velmi významné uplatnění v konstrukci a výrobě dílů pro automobilový průmysl a to především při výrobě hnacích a převodových agregátů, kde se dnes ze slitin hliníku vyrábí, jak velké funkční celky těchto zařízení, tak malé odlitky. Nejdůležitější části spalovacího motoru s výjimkou klikového a vačkového hřídele a rozvodů obecně, ojnic (menší a méně namáhané ojnice lze vyrobit kováním ze slitin hliníku) a ventilů se ostatní části jako hlava spalovacího motoru, blok motoru a písty vyrábějí odléváním nebo jinou technologií (kované písty) ze slitin hliníku. Podíl hliníku při výrobě spalovacího motoru je tedy značně vysoký, kolem 65 %. Z toho vyplývá, že jsou hliníkové slitiny využívány při výrobě i těch nejsložitějších a také velmi teplotně a mechanicky namáhaných součástí spalovacích motorů ať už jakéhokoliv typu. Z těchto důvodů je výzkumu a vývoji slitin hliníku věnována značná pozornost. Hliníkové slitiny mají oproti železným slitinám nižší hustotu při často srovnatelných mechanických a jiných vlastnostech, která hraje při dnes stále rostoucích nárocích na ekologii významnou roli, viz obr. 1-1.



Obr. 1-1 Podíl hliníku při stavbě automobilů [2]

Vzhledem k poměrně krátké historii průmyslové výroby a zpracování hliníku se ve světě publikace s touto tématikou objevily ve 40. letech minulého století. Na našem území se komplexní publikace zabývající se hliníkem, kterou vytvořil KOLEKTIV AUTORŮ [3], objevila v roce 1969. Zatím u nás poslední a nejrozsáhlejší publikace věnovaná hliníku a jeho slitinám vznikla v roce 2005 pod vedením MICHNY [4]. MICHNA [5,6] se ve svých dalších publikacích také věnuje zkoumání strukturních vlastností pístových slitin. U

nás se také materiály pro písty spalovacích motorů zabýval KORITTA [7]. Vývoj materiálů pro písty spalovacích motorů, a to převážně motorů dieselových, sledují publikace BAKERA [8] a MUNROA [9]. Dále se vlastnostmi pístových slitin zabýval BACON [10] a také HAQUE [11,12], který sledoval vliv výrobních metod na materiály pístů. Již v roce 1935 se vlastnostmi pístových slitin zabýval MABREY [13] a poukázal na nutnost vývinu speciálních slitin s vyšším obsahem křemíku, protože se písty vyráběly s použitím, v té době obvyklých, slitin hliníku.

Obecně je známo, že slitiny hliníku s křemíkem (tzv. siluminy) se vyznačují poměrně velkou lineární smrštivostí i stahováním při tuhnutí. Podstatou těchto změn se u nás zabývali ve svých publikacích, např. PTÁČEK [14], KUBÍČEK [15] a GRÍGEROVÁ [16]. V zahraničí to byl Brit CAMPBELL [17], který věnoval hlavní pozornost obecným zákonitostem tuhnutí a pochodům, které ho doprovází. Obecnými zákonitostmi dilatačních změn slitin hliníku a zinku se zabýval také SMIRNOFF [18], již v roce 1912. Dějům při tuhnutí tavenin slitin hliníku a jejich sledováním se ve svých publikacích věnoval DEVAUX [19]. Avšak, nikdo z výše uvedených autorů, se ve svých pracích se nezabýval dilatometrickým měřením. Bylo to pravděpodobně proto, že pro tato měření je nutné speciální měřicí zařízení.

Dilatační změny a jejich hodnoty při tuhnutí a chladnutí odlitků ze slitin hliníku závisí mimo jiné také na obsahu křemíku. U materiálů pro výrobu pístů spalovacích motorů je obsah křemíku, a jeho vliv na dilatační chování, také důležitý z hlediska jejich užitných vlastností. V tomto smyslu je také koncipována tato disertační práce, která se věnuje zkoumání dilatačních vlastností slitiny hliníku AlSi12CuNiMg, používané pro výrobu pístů spalovacích motorů při jejím tuhnutí a chladnutí. Slitina AlSi12CuNiMg je s dvanácti procenty Si slitinou eutektického složení a patří mezi siluminy, což jsou slitiny hliníku s křemíkem. Tato slitina se používá pro gravitační odlévání pístů spalovacích motorů, přičemž se využívají její dobré slévárenské vlastnosti, nízkou hustotu a dobré tepelné vlastnosti, které slitina vykazuje i za zvýšených teplot (tj. za teplot, které odpovídají pracovním teplotám pístu ve válci spalovacího motoru). U této slitiny, stejně jako u některých dalších siluminů, lze zvýšit její mechanické vlastnosti pomocí tepelného zpracování, tzv. precipitačního vytvrzování.

Disertační práce je zaměřena na výzkum dilatačních vlastností při tuhnutí a chladnutí odlitků z vybraných slitin hliníku. Hlavní pozornost je věnována právě slitině

AlSi12CuNiMg. Rozměrové změny jsou sledovány pomocí zařízení, která byla vyvinuta na Katedře strojírenské technologie, FS – TU v Liberci, kde se její pracovníci sledováním těchto vlastností dlouhodobě zabývají.

## 1.1 Cíle disertační práce

1. Sestavení a shrnutí známých poznatků o hliníku a jeho slitinách, které zahrnuje vlastnosti tepelně-fyzikální, mechanické, vliv chemického složení a jejich využití ve slévárenství.

2. Využít získaných poznatků k tepelně-fyzikálním a termodynamickým výpočtům u čistého hliníku a jeho slitin.

3. Provedení zkoušek slévárenských vlastností, jako je tavitelnost, doba tuhnutí a zabíhavost vybraných hliníkových materiálů.

4. Vyvinout a odzkoušet metodiku pro sledování dilatačních vlastností slitin hliníku při jejich tuhnutí a chladnutí v závislosti na různých parametrech lití odlitků.

5. Navrhnout a aplikovat metodiku pro sledování dilatačních změn slitin hliníku při ohřevu odlitků z těchto slitin vyrobených v závislosti na různých podmínkách lití, včetně otestování vlivu tepelného zpracování na toto dilatační chování.

6. Provést metalografické zhodnocení struktury vybraných odlitků ze slitin hliníku s využitím optické a elektronové mikroskopie.

7. Prozkoumání vlivu parametrů lití na mechanické vlastnosti vybraných slitin hliníku.

# 1.2 Publikace doktoranda k tématu disertační práce a ostatní publikace

[1] MORÁVEK, J. Observing the proportions changes during solidification and cooling cast of aluminum alloys. Sborník 2. Zlievarenské sympózium. ISBN 978-80-8070-899-3.

[2] NOVÁ, I., MORÁVEK, J. *Linear contraction monitoring of casting Al-Si in the cooling process.* Sborník konference Metal 2009. ISBN 978-80-87294-03-1.

[3] MORÁVEK, J. Measurement of the coefficient of temperature contraction of casting aluminum alloy. Sborník příspěvků WTF 2009. ISBN 978-80-214-3871-2.

[4] MORÁVEK, J. Detection *the coefficient of temperature contraction of castings piston alloys*. Mitech 2009. ISBN 978-80-213-1931-8.

[5] NOVÁ, I., MORÁVEK, J. *Linear contraction monitoring of casting Al-Si in the cooling process.* Sborník Thomson Reuters.

[6] NOVÁ, I., ŠMRHA, J., NOVÁKOVÁ, I., MORÁVEK, J. Výroba litiny s kuličkovým grafitem s vyšším obsahem křemíku pro automobilový průmysl. Slévárenství LVII. ISSN 0037-6825.

[7] NOVÁ, I., MORÁVEK, J. *Continuity oxygen aktivity and type nodulizier for ductile iron production*. Transactions of the VŠB – Technical University of Ostrava č.2, 2009, ročník LII. ISSN 0474-8484.

[8] NOVÁ, I., MORÁVEK, J., TVRZNÍK, P. *Production of spheroidal graphite cast iron with higher amount of silicon*. Transactions of the VŠB – Technical University of Ostrava, č.2, 2009, ročník LII. ISSN 0474-8484.

[9] NOVÁ, I., MORÁVEK, J., MACHUTA, J. Sledování dilatačních změn slévárenské slitiny hliníku AlSi12CuNiMg určené pro odlévání pístů spalovacích motorů. Slévárenství LVIII. ISSN 0037-6825.

[10] MORÁVEK, J., NOVÁ, I. Connection between temperature of melting and coefficient of thermal contraction of Al-Si alloys. Sborník konference Metal 2010. ISBN 978-80-87294-15-4.

[11] MORÁVEK, J. Matching methods for monitoring of dilation changes during solidification and cooling casts from aluminium alloys. 47. Slévárenské dny, Sborník
7. mezinárodní Ph.D. konference Brno, ISBN 978-80-904020-6-5.

[12] MORÁVEK, J., NOVÁ, I. *Connection between temperature of melting and coefficient of thermal contraction of Al-Si alloys.* sborník Thompson reuters (databáze ISI).

[13] MORÁVEK, J. NOVÁ, I. Observing the dilatation changes and microstructure of castings from piston aluminium alloy. Sborník konference Metal 2011, ISBN 978-80-87294-22-2.

[14] MORÁVEK, J. Sledování dilatačních vlastností hliníkových slitin metodou brzděného smršťování. Strojírenská technologie, číslo 3, ročník XVI, ISSN 1211-4162.

## 2. OBECNÉ VLASTNOSTI HLINÍKU A JEHO SLITIN

### 2.1 Hliník

Hliník lze v dnešní době použít k řadě aplikací ve všemožných odvětvích průmyslu, ale především ve výrobě automobilů a automobilových dílů. Většinou se však nepoužívá čistý, ale jeho slitiny. K masové aplikaci výrobků z hliníku vedlo především překonání úskalí jeho výroby z rud, které je zapříčiněno jeho vysokou afinitou ke kyslíku. Celosvětová výroba oxidu hlinitého spotřebovává 90 % vytěženého bauxitu, ze kterého se oxid hlinitý vyrábí především alkalickými metodami. Tyto metody jsou energeticky náročné a navíc zatěžují životní prostředí. Jejich výtěžnost je 1 tuna oxidu hlinitého na 6 tun bauxitu.

Hliník je třetí nejrozšířenější prvek po kyslíku a křemíku a nejrozšířenější ze všech kovů na Zemi. Čistý hliník je neušlechtilý, stříbrošedý kov a zaujímá v Mendělejevově periodické soustavě prvků místo mezi hořčíkem a křemíkem s elektronovou konfigurací  $1s^22s^22p^63s^23p^1$ . Počet valenčních elektronů je tedy 3, což je rozhodující pro jeho fyzikální a chemické vlastnosti. Protonové číslo hliníku je 13, relativní atomová hmotnost 26,9815. Teplota tání čistého hliníku o čistotě 99,2 až 99,5 % se uvádí v rozmezí 657 až 658 °C. Čistší hliník s obsahem 99,6 % Al se taví při 658,7 °C a hliník o čistotě 99,97 % Al má teplotu tání 659,8 °C. Pozdější měření pro čistý hliník s obsahem 99,996 % Al udávají teplotu tání 660,24 °C. Teplota tání uváděná pro superčistý hliník 99,9995 % Al je 660,452 °C [4]. Teplota varu 2519 °C a jeho hustota je 2698,9 kg.m<sup>-3</sup> (při 20 °C) a 2375 kg.m<sup>-3</sup> (při teplotě tání). Čistý hliník krystalizuje v krychlové prostorově středěné mřížce s těsným uspořádáním. Tato soustava má ve třech na sebe kolmých směrech stejnou tepelnou roztažnost. Objemový součinitel roztažnosti kovů je přibližně roven trojnásobku lineárního součinitele tepelné roztažnosti, který je závislý na teplotě. Hodnotu koeficientu teplotní roztažnosti hliníku lze nalézt 2,40.10<sup>-5</sup> K<sup>-1</sup> pro teplotní interval 20 až 100 °C. V tabulce 2.1 jsou uvedeny vybrané vlastnosti čistého hliníku. Hliník, jak již bylo uvedeno, leží v Mendělejevově periodické tabulce prvků ve třinácté skupině a podskupině III.A, z toho vyplývá, že hliník je schopen tvořit slitiny a je zároveň vhodný pro jejich výrobu a to nejčastěji s prvky v sousedních skupinách a podskupinách jako jsou Mg, Cu, Zn, Sn a asi nejpoužívanější základní slitinový prvek Si. Ze slitin hliníku používaných v průmyslové praxi lze vybrat např. tyto: AlSi9Cu3, AlSi12CuNiMg, AlZn5Mg. Na obrázku 2-1 je uvedena část Mendělejevovi periodické tabulky prvků s vyznačením pozice hliníku vůči prvkům ostatních podskupin.

Tab. 2.1 Vybrané vlastnosti čistého hliníku [4]

Vlastnost	Hodnota
Mřížka	K12
Parametr mřížky	0,404958 mm
Hustota při teplotě 20 °C	2699 kg.m <sup>-1</sup>
Teplota tání	660,4 °C
Teplota varu	2494 °C
Teplená vodivost při 25 °C	247 W.m <sup>-1</sup>
Elektrická vodivost	62 % IACS
Latentní teplo tání	397 kJ.kg <sup>-1</sup>
Latentní teplo varu	10,78 MJ.kg <sup>-1</sup>
Atomová hmotnost	26,98154
Objemová změna při krystalizaci	6,50 %
Měrná tepelná kapacita při 20 °C	0,9 kJ.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
Spalné teplo	31,05 MJ.kg <sup>-1</sup>
Elektrický odpor při 20 °C	26,2 nΩm
Teplota supravodivosti	1,2 K

Skupina							
II. A	I. B	II. B	III. A	IV. A			
<sub>4</sub> Be			5 B	<sub>6</sub> C			
<sub>12</sub> Mg			13 Al	14 Si			
<sub>20</sub> Ca	29 Cu	<sub>30</sub> Zn	<sub>31</sub> Ga	<sub>32</sub> Ge			

Obr. 2-1 Pozice hliníku vůči ostatním prvkům

Čistý hliník je výborným vodičem elektrického proudu jeho průměrná hodnota je  $36,2 \text{ m.W}^{-1}.\text{mm}^{-2}$ , ale přidáním legujících prvků, tepelným zpracování nebo po tváření tato vodivost klesá. Rezistivita hliníku je 3 µΩm. Poměr mezi elektrickou a tepelnou vodivostí je přibližně stejný. Z toho vyplývá, že kovy s dobrou elektrickou vodivostí mají dobrou i vodivost tepelnou a totéž platí i pro hliník. Na tepelnou vodivost má vliv především teplota, přítomnost cizích atomů v mřížce a tedy i struktura. Tepelná vodivost čistého hliníku při teplotě 20 °C je v závislosti na jeho čistotě přibližně 234 W.m<sup>-1</sup>. K<sup>-1</sup> a při teplotě 100 °C tato klesá na 218 W.m<sup>-1</sup>. K<sup>-1</sup>. Dále tepelná vodivost klesá, jsou-li v základním kovu v tomto případě hliníku obsaženy atomy prvku, které vytvářejí se základním kovem tuhý roztok.

Střední hodnota modulu pružnosti u čistého hliníku a jeho slitin je 69.10<sup>3</sup> MPa, což je hodnota velmi nízká a proto se používají v technické praxi slitiny hliníku, které mají tyto pevnostní meze větší a nejvyšších pevnostních vlastností (v litém stavu) se dosahuje odléváním slitin hliníku do kovových forem. Materiál forem jak bude uvedeno dále ani teplota lití nemají zásadní vliv na pevnostní vlastnosti čistého hliníku. Hodnoty mechanických vlastností je však závislá na čistotě, množství legujících prvků, teplotě a velikosti deformace za studena. Legující prvky a nečistoty s větším modulem pružnosti než hliník zvětšují modul pružnosti slitiny, tzn. že většina prvků s výjimkou např. hořčíku, cínu nebo olova jej zvětšuje, [3]. Obecně zvyšuje pevnost slitin hliníku přídavek Cu a Mg.

Ačkoliv je hliník, jak již bylo uvedeno, nejvíce se vyskytujícím kovem na Zemi a podle posledních dostupných údajů tvoří asi 8 % zemské kůry, byl objeven až poměrně nedávno, na počátku 19. století. Jeho výroba patřila ještě do nedávné doby k velmi obtížným procesům a to především z toho důvodu že hliník nelze jednoduše metalurgicky vyredukovat z jeho rudy, jako např. železo koksem ve vysoké peci. Na jeho existenci poukázal Brit Humpry Davy (1778-1829), ale až dánskému chemikovi Hansu Christianu Oerstedovi, viz obrázek 2-2a, se podařilo v roce 1825 čistý hliník isolovat.



Obr. 2-2 a) Hans Christian Oersted [20], b) Charles Martin Hall, c) Paul Louis Herault [21]

Výroba hliníku jeho metodou byla velmi nákladná, a tudíž bylo využití hliníku omezené. Až v roce 1854 francouzský chemik Henry Etiene Saint-Claire Deville vynalezl podstatně levnější způsob výroby hliníku, čímž bylo umožněno jeho větší rozšíření, neboť cena výroby tímto klesla na desetinu původní ceny. Deville také upravil název hliníku na dnes používané aluminium. I přes toto vylepšení výrobních metod byla cena hliníku vysoká a stále se hledaly způsoby výhodnější. Nezávisle na sobě objevili dnes používaný způsob výroby hliníku elektrolýzou francouzský metalurg Paul Louis Herault a Američan Charles Martin Hall v roce 1886, viz obrázek 2-2b, c. [20, 21, 22] Hliník se v přírodě nachází ve sloučeninách. Neznámější takovou sloučeninou je bauxit, který je směsí několika minerálů. Bauxit obsahuje minerály Gibbsit Al(OH)<sub>3</sub>, Boehmit  $\gamma$ -AlO(OH) a Diaspor  $\alpha$ -AlO(OH). Tyto minerály jsou ve směsi se dvěma železitými oxidy Goethitem  $\alpha$ -FeO(OH) a Hematitem Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> s Kaolínem Al<sub>2</sub>SI<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub> a Anatasem TiO<sub>2</sub>. Název dostal podle vesnice Les Baux v jižní Francii, kde byl poprvé klasifikován jako hornina obsahující hliník a pojmenován francouzským geologem Pierrem Berhierem v roce 1921. [23] Dalšími minerály, ze kterých lze hliník získat jsou Kryolit Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> a Korund Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Hliník se vyrábí z bauxitu elektrolýzou roztavených solí v elektrolyzérech při teplotě asi 960 °C. Na katodě se vylučuje čistý hliník a na grafitové anodě, za vzniku oxidu uhelnatého, kyslík. Čistota takto vyrobeného hliníku je 99,5 %. [4]

Povrch čistého hliníku a jeho slitin se díky jeho vysoké afinitě ke kyslíku pokrývá na vzduchu vrstvou oxidu hlinitého Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, který chrání povrch před další oxidací, především v atmosférických podmínkách. Špatnou korozní odolnost má hliník a jeho slitiny v mořské vodě a je také náchylný na elektrochemickou korozi. Nejlepší korozní odolnost má hliník o čistotě 99,998 % jak je patrno z tabulky 2.2. Korozní odolnost slitin hliníku je závislá především na obsahu mědi. Slitiny, které měď neobsahují, mají přibližně stejnou korozní odolnost jako hliník s čistotou 99,5 %. [24]

Tab. 2.2 Korozní odolnost čistého hliníku [24]

Čistota Al [%]	99,998	99,99	99,97	99,57	99,2
Rychlost koroze [g.m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup> ]	7,7	28,6	36,3	56,3	664,4

Slitiny hliníku mají dobré antikorozní vlastnosti ve styku s benzínem a oleji, a proto jsou používány pro výrobu pístů spalovacích motorů, tvarově složitých odlitků bloků spalovacích motorů a převodových skříní. K povrchové úpravě součástí z hliníku a jeho slitin se nejčastěji používá eloxování (anodická oxidace). Eloxováním se vytváří na povrchu kompaktní vrstva stabilních hliníkových oxidů.

Obrobitelnost čistého hliníku je velmi špatná a na nástroji vytváří nalepenou vrstvu na jeho řezné hraně. Slitiny hliníku patří ve srovnání s ostatními materiály mezi lépe obrobitelné. Zvláště dobrou obrobitelnost mají slitiny s příměsí mědi, hořčíku a zinku. Pro zlepšení obrobitelnosti se do slitin přidává i bismutu a olova, u něhož je snaha ho pro jeho toxicitu nahradit. Naopak opotřebení nástrojů vzrůstá s rostoucím procentem křemíku. Svařování slitin hliníku patří dnes mezi běžné způsoby spojování dílů, které se nejčastěji provádí metodami tavného svařování MIG a TIG. Dříve se také využívalo obalované elektrody, zde však byla nutno provádět další přípravné operace. Obecně lze říci, že se lépe svařují nevytvrditelné slitiny a ze slitin vytvrditelných jsou to slitiny na bázi AlMgSi a AlZnMg. Přídavným materiálem jsou dráty podobného chemického složení jako svařované materiály. Další dnes používanou metodou pro svařování slitin hliníku je metoda využívající rotujícího čepu FSW, což není metoda tavného svařování, jelikož během procesu se nacházíme pod teplotou solidu.

Nejběžnější binární slitiny hliníku jsou tvořeny Al-Cu, Al-Mg, Al-Mn, Al-Zn a ve slévárenství prakticky nejpoužívanější Al-Si. V těchto systémech tvoří Al s příslušnými prvky substituční tuhý roztok (α), který má při dobré tvářitelnosti a houževnatosti lepší mechanické vlastnosti než čistý hliník. Maximální rozpustnost příměsí v tuhém roztoku je při eutektické teplotě, přičemž tato rozpustnost klesá s klesající teplotou a při teplotě 20 °C je prakticky zanedbatelná. Ani jeden ze známých prvků periodické soustavy se v tuhém roztoku hliníku úplně rozpustný. Maximální rozpust má Zn, který má mez rozpustnosti při 381 °C 67 % (at. %). Rovnovážné diagramy slitin hliníku jsou převážně jednoduchého eutektického nebo peritektického typu a při vyšších koncentracích legujících přísad jsou zde přítomny intermetalické fáze. V případě, že je základním slitinovým křemík, potom rovnovážná soustava Al-Si, viz obrázek 2-3, tvoří rovnovážný diagram s omezenou vzájemnou rozpustností obou složek v tuhém stavu se vznikem eutektika. Z rovnovážného diagramu na obrázku 2-3 je patrno, že eutektikum je tvořeno směsí Al a Si a eutektické teploty je dosaženo při 577 °C. Jedná se o jednoduchý eutektický systém tvořený dvěma tuhými roztoky, kubickým plošně centrovaným Al ( $\alpha$ ) a diamantovým kubickým Si ( $\beta$ ). Eutektická reakce probíhá při teplotě 577  $\pm 1$  °C a složeni 12,2  $\pm$  0,1 at. % Si za vzniku tuhého roztoku ( $\alpha$ ) 1,5 at. % Si a ( $\beta$ ) ~100 at. % Si. Maximální rozpustnost Al v ( $\beta$ ) je  $0.016 \pm 0.003$  at. % při 1190 °C. Rozpustnost Si v ( $\alpha$ ) může být značně rozšířena použitím rychlého tuhnutí taveniny Al, čímž lze dosáhnout maximální rozpustnosti 11 ± 1 at. % Si v tuhém roztoku (α). [4]



Obr. 2-3 Rovnovážný diagram hliník-křemík [17]

Další používanou binární soustavou je soustava Al-Cu. Rovnovážné fáze v systému Al-Cu na straně obou kovů tvoří omezeně tuhé roztoky (Cu) a (Al) s kubickou plošně středěnou mřížkou. Tuhý roztok bývá označován jako  $\alpha$  fáze a nízkoteplotní uspořádaná fáze na bázi kubické plošně středěné mřížky se označuje jako fáze  $\alpha_2$ . Fáze  $\beta$  tvoří neuspořádaný tuhý roztok s kubickou prostorově středěnou mřížkou. V této soustavě se za vysokých teplot vyskytuje ještě fáze  $\beta_0$ , které má neznámé chemické složení a dále je zmiňován tuhý roztok  $\beta_1$  mající fázi s kubickou prostorově středěnou mřížkou, vykazující metastabilní stav. V diagramu lze dále nalézt další fáze, z nichž nejdůležitější je fáze CuAl<sub>2</sub>, která spolu s fází Mg<sub>2</sub>Si umožňuje vytvrzování slitin hliníku. Rozpustnost Al v Cu je při eutektické teplotě 19,7 at. % Al a maximální rozpustnost mědi v tuhém roztoku hliníku je za rovnovážných podmínek 2,48 at. % Cu při teplotě eutektické reakce 548,2 °C. Rovnovážný diagram Al-Cu je uveden na obrázku 2-4.



Obr. 2-4 Rovnovážný diagram hliník-měď [4]

Nejčastěji užívanými slitinami ve slévárenství tvoří ternární soustavu Al-Cu-Si, viz obrázek 2-5, ve kterém nevzniká žádná ternární sloučenina a fáze. Fáze Al<sub>2</sub>Cu a Si jsou v rovnováze s hliníkem. Vyskytuje se zde ternární eutektikum L = (Al) + Al<sub>2</sub>Cu + (Si), v oblasti 26 až 31 hm. % Cu, 5 až 6,5 hm. % Si při 520 až 525 °C, s nejpravděpodobnějšími hodnotami 27 hm. % Cu, 5 hm. % Si při 525 °C. V pevném skupenství jsou v rovnováze tři fáze Al, Al<sub>2</sub>Cu a Si, a to ve většině slitin bohatých na hliník. Vrchol třífázového pole se posouvá s teplotou. Rozpustnosti Cu v Si a Si v Al<sub>2</sub>Cu jsou zanedbatelné.



Obr. 2-5 Rovnovážný diagram hliník-křemík-měď [25]

Přítomnost intermetalických fází ve slitinách hliníku souvisí s přidáním legujících prvků při jejich výrobě. Dále s tím, že hliník má vysoký elektronegativní potenciál. Intermetalické fáze tvoří částice různé velikosti a mají na vlastnosti slitin hliníku velký vliv. Výskyt těchto fází v binárních systémech je různý, některé mohou mít přesné stechiometrické složení (AlP, AlAs, Al<sub>2</sub>Ca, AlSb). V jiných případech může sloučenina existovat v úzkém intervalu koncentrace neodpovídající jejímu chemickému vzorci (CuAl<sub>2</sub>), nebo naopak širokém (Ag<sub>2</sub>Al), což je způsobeno přítomností defektů v krystalické mřížce. Přechodové kovy vykazují také často metastabilní stavy. Jedna fáze vznikající při rychlém tuhnutí přechází v druhou v pevném skupenství (např. FeAl<sub>6</sub> přechází na FeAl<sub>3</sub>, která se nepodílí na procesu vytvrzování a podle jejího množství, velikosti, distribuce morfologie negativně ovlivňuje především plastické a únavové vlastnosti), nebo dochází k vyloučení metastabilních fází z přesyceného tuhého roztoku (MnAl<sub>12</sub>). Některé z těchto intermetalických fází jsou běžné valenční sloučeniny hliníku, vyznačující se vysokou teplotou tání. Podstata tvorby dalších hliníkových sloučenin, jako jsou sloučeniny s přechodovými kovy a křemíkem, není přesně popsána a probíhá její zkoumání. [4]

## 2.2 Slévárenské slitiny hliníku

Hliníkové slitiny se v technické praxi zpracovávají tvářením a odléváním a proto je věnována zvýšená pozornost také slévárenským slitinám hliníku. Asociace ASM uvádí přes 50 různých druhů slévárenských slitin hliníku pro lití odlitků a dalších zhruba 50 pro odlévání ingotů. Slévárenské slitiny hliníku obsahují jako hlavní přísadový prvek křemík, který zlepšuje slévárenské vlastnosti a jsou nazývány siluminy. Dalšími legujícími prvky jsou především měď, která umožňuje vytvrzování některých slévárenských slitin hliníku, ale zhoršuje jejich korozní odolnost. Dále pak hořčík a zinek. Zastoupení dalších prvků závisí na daném využití slévárenské slitiny. Slévárenské slitiny hliníku mají oproti slitinám z jiných kovů řadu výhod, jako jsou dobrá slévatelnost, nízká teplota tavení, malý interval krystalizace, redukovatelný obsah vodíku ve slitině (jediný rozpustný plyn v hliníku), dobrá chemická stabilita. U většiny slitin hliníku je nízká náchylnost k tvorbě trhlin za tepla.



Obr. 2-6 Výroba hliníkových ingotů [26]

Slévárenské slitiny hliníku lze rozdělit na základě přidaných legujících prvků na:

*Slitiny typu Al – Cu.* Obsah Cu je obvykle v rozmezí 4 - 5 %. Tepelným zpracováním lze zvýšit jejich pevnostní vlastnosti v litém stavu. Dalšími legujícími prvky jsou Mg a Ni. Vyrábějí se také slitiny s obsahem 9 – 11 % Cu vyznačující se dobrými pevnostními vlastnostmi za vyšších teplot. Nevýhodami těchto slitin jsou horší slévatelnost a poměrně nízká korozní odolnost.

*Slitiny typu Al – Cu – Si.* Jedná se o značně používané slitiny, u kterých se legováním Si, vůči typu slitin Al – Cu zlepšily slévárenské vlastnosti. U těchto slitin je v převaze Cu nebo Si. Slitiny s obsahem Cu nad 3 % jsou tepelně zpracovatelné. Většinou se tepelně zpracovávají jen slitiny, u kterých je legurou také Mg.

*Slitiny typu Al – Si.* Tyto slitiny jsou aplikovány při požadavku na dobrou slévatelnost a odolnost vůči korozi. Obsah Si se u těchto slitin pohybuje většinou mezi 5 až 13 %. Podle obsahu křemíku jsou rozděleny na: podeutektické (obsah Si menší než 12 %),

eutektické (obsah Si kolem 12 %), nadeutektické (nad 12 % Si).

*Slitiny typu Al – Mg.* Slitiny tohoto typu mají velmi dobrou odolnost vůči korozi především v mořské vodě. Nejlepší korozní odolnost vykazují slitiny vyrobené z vysoce čistých surovin. Jsou poměrně dobře svařitelné a mají také dobrou obrobitelnost. Nevýhodou těchto slitin je špatná slévatelnost a náchylnost hořčíku k oxidaci v procesu tavení.

*Slitiny typu Al* – *Zn* – *Mg.* Tyto slitiny mají velmi dobré pevnostní vlastnosti již v litém stavu, dobrou odolnost vůči korozi, avšak ne při napětí. V případě tepelného zpracování není nutné drastické ochlazování z kalící teploty (v porovnání se slitinami typu Al – Cu) a maximálních pevností lze dosáhnout po 20 až 30 dnech přirozeným stárnutím. Slévatelnost slitin tohoto typu je ale špatná a jsou náchylné k tvorbě trhlin za tepla.

*Slitiny typu Al – Sn.* Jedná se o slitiny s obsahem cca. 6 % cínu a malým množstvím Cu a Ni (pro zlepšení pevnostních vlastností) speciálně určené pro výrobu kluzných ložisek. Z hlediska slévárenského je hlavním problémem těchto slitin velký interval krystalizace a možnost segregace Sn.

V tabulce 2.3 jsou uvedeny zástupci výše uvedených skupin slévárenských slitin hliníku s jejich chemickým složením a technologií lití, kterou jsou běžně využívány.

#### Tab. 2.3 Příklady slitin hliníku používaných v jednotlivých skupinách

viz soubor Tab\_2\_3.pdf

Slévárenské slitiny hliníku se využívají prakticky pro všechny druhy licích technologií, nejčastěji však pro lití tlakové (bloky motorů, tělesa převodových skříní, apod.), příp. gravitační (hlavy válců spalovacích motorů, písty spalovacích motorů). Při gravitačním lití se hliníkové slitiny lijí nečastěji do kovových forem tzv. kokil, ale i do forem vyrobených z pískových formovacích směsí, sádry a skořepinových keramických forem na vytavitelný model. Nejpoužívanějšími slitinami hliníku ve slévárenství jsou slitiny AlSi5Cu1Mg, AlMg5, AlSi10MgMn a AlSi9Cu3 (AlSi8Cu2Mn) pro tlakové lití, AlSi12 a AlSi12CuNiMg pro lití gravitační. Tyto slitiny mají dobré slévárenské vlastnosti, dobrou obrobitelnost a povrchovou upravitelnost. Některé z nich (např. AlSi8Cu2Mn, AlSi6Cu4, AlZn5Mg) lze i tepelně zpracovávat a zvyšovat tak jejich již tak dobré mechanické vlastnosti. Informativní mechanické vlastnosti slévárenských slitin hliníku jsou uvedeny v tabulce 2.4, [4].

Typ materiálu	Norma materiálu	Stav	Re <sub>0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>0,2</sub> [%]	HB [MPa]
AlSi12	EN AW-4047A	1	60-80	160-240	2-6	50-60
AlSi12Cu	EN AB-47100	1	70-100	160-220	1-3	50-60
AlSi12Mg	EN AB-47100	1	80-150	150-230	1-2	50-60
C		Z	180-260	200-300	1-2	60-100
AlSi5Cu	EN AB-45400	1	90-150	150-220	0,5-2	60-70
		Z	160-250	200-300	0,5-2	70-100
AlSi10Mg	EN AC-43400	1	90-150	140-200	0,5-3	55-65
		Z	150-250	160-260	0,5-4	70-100
AlMg3	EN AB 51200	1	80-160	140-200	2-6	50-60
AlMg5	EN AB 51200	1	90-100	160-250	1-4	55-75
AlMgSi	EN AW 6060	1	90-150	130-200	1-4	50-60
		Z	150-250	180-300	1-4	55-85
AlCu5Si	EN AC-45200	1	110-160	150-200	0-2	65-85
AlCu4Ti	EN AW 2024	1	180-220	250-350	4-10	80-100
		Z	200-250	270-400	3-8	85-110

Tab. 2.4 Informativní mechanické vlastnosti slévárenských slitin hliníku [3]

Označení: 1- lité, z- zušlechtěné

### 2.2.1 Slévárenské slitiny hliníku pro tlakové lití

Jak již bylo uvedeno největší podíl odlitků z hliníku na světovém trhu je vyroben tlakovým litím. Nejčastěji využívaný způsob tlakového lití je lití nízkotlaké a vysokotlaké s horizontální studenou komorou. Základem těchto slitin je opět většinou binární soustava Al-Si nebo Al-Cu. Příklady slitin používaných pro tlakové lití jsou uvedeny v tabulce 2.5. Protože slitiny pro tlakové lití tvoří vlastní skupinu, bylo pro ně zavedeno odlišné značení:

*Slitiny typu Al – Cu – Si.* Nejvíce používaným typem slitiny pro tlakové lití je zástupce této skupiny, u nás známý pod označením AlSi8Cu2Mn (A02420 nebo náš ekvivalent ČSN 42 4339). Tyto slitiny jsou pro tlakové lití prakticky nejpoužívanější (bloky spalovacích motorů, skříně převodovek), mají díky křemíku dobrou slévatelnost a mechanické vlastnosti, ale jejich nevýhodou je poměrně nízká korozní odolnost zapříčiněná vyšším obsahem mědi.

*Slitiny typu Al – Si – Mg.* Z této skupiny lze uvést slitinu AlSi10MgMn. Opět se jedná o slitiny s univerzálním použitím, s dobrou slévatelností a odolností proti korozi, dobrými mechanickými vlastnostmi, avšak s poměrně špatnou obrobitelností.

*Slitiny typu Al – Si – Cu – Mg.* Tyto slitiny mají poměrně dobré slévárenské vlastnosti, výbornou otěruvzdornost, nízký součinitel teplotní roztažnosti, vysokou tepelnou vodivost a dobré mechanické vlastnosti, a to i za vyšších teplot. Toto je předurčuje pro výrobu pístů spalovacích motorů (nikoliv tlakovým způsobem). Oproti těmto dobrým vlastnostem mají špatnou obrobitelnost a nízkou korozní odolnost. Zástupcem těchto slitin jsou slitiny AlSi20Cu2NiMgMn a AlSi12CuNiMg.

*Slitiny typu Al – Si.* Tento typ slin nazývaný siluminy lze z hlediska slévárenských vlastností hodnotit jako vynikající spolu s dobrou odolností vůči korozi. Negativními vlastnostmi jsou poměrně špatná obrobitelnost a nižší mechanické vlastnosti. Používají se spíše pro menší odlitky běžných tvarů, které mohou mít tenčí tloušťku stěny. Z těchto slitin lze uvést podeutektickou slitinu AlSi5Fe a eutektickou AlSi12Mn.

*Slitiny typu Al – Mg* Tyto slitiny nalézají uplatnění především tam, kde se vyžaduje vysoká odolnost proti korozi v kombinaci s dobrými mechanickými vlastnostmi a snadnou obrobitelností. Mají také nízkou hustotu, a proto se používají pro odlitky v leteckém průmyslu, jejichž výroba je však ztížena jejich špatnými slévárenskými vlastnostmi. Zástupcem tohoto typu slitin je AlMg5Si1Mn.

Skupina slitin	Norma	Chemické označení
AlSi10Mg	EN AC-43400	EN AC-Al Si10Mg(Fe)
A 1C;	EN AC-44300	EN AC-Al Si12(Fe)
AISI	EN AC-44400	EN AC-Al Si9
	EN AC-46000	EN AC-Al Si9Cu3(Fe)
A15:0C.,	EN AC-46100	EN AC-Al Si11Cu2(Fe)
AISI9Cu	EN AC-46200	EN AC-Al Si8Cu3
	EN AC-46500	EN AC-Al Si9Cu3(Fe)(Zn)
AlSi(Cu)	EN AC-47100	EN AC-Al Si12Cu1(Fe)
AlMg	EN AC-51200	EN AC-Al Mg9

Tab. 2.5 Příklady slitin používaných pro tlakové lití [28]

Z uvedených druhů slévárenských slitin hliníku a výčtu jejich vlastností je patrné, že žádnou z těchto slitin nelze využívat univerzálně pro všechny typy odlitků, namáhání, prostředí, slévárenskou technologii, atd. Proto je snaha o nalezení a vytvoření univerzální hliníkové slitiny. Nalézt optimální slitinu pro všechny co nejširší spektrum aplikací se zatím nepodařilo. Odlitky vyrobené tlakovým litím mají dobré mechanické vlastnosti a na rozdíl od jiných technologií lze u nich konstruovat i velmi tenké stěny spolu s velmi dobrou rozměrovou přesností, vzhledovými vlastnostmi a povrchem, který není-li to vyžadováno dalšími operacemi, není nutno dále upravovat. Odlitky z vybraných slitin lze tepelně zpracovávat pro zvýšení mechanických vlastností. Obsahují ale značné množství vzduchových bublin a pórů, a proto je nutné odlitky, jejichž aplikace vyžaduje těsnost např. blok motoru, před jejich expedicí ošetřit. Povrch odlitků je možno dále upravovat eloxováním nebo galvanicky.

#### 2.2.2 Slévárenské slitiny hliníku pro gravitační lití

Slitiny používané pro gravitační lití mají vyšší obsah křemíku než slitiny pro tlakové lití a odlévají se do netrvalých pískových forem s bentonitovým pojivem a křemenným ostřivem, které s ohledem na to, že tavenina a forma by se měly během procesu lití co nejméně ovlivňovat, vyhovuje a do forem kovových neboli kokil. Materiál používaných jader také nemá žádná speciální omezení. Odlitky ze slitin hliníku vyráběné gravitačním litím je však potřeba nálitkovat, jelikož mají sklon k tvorbě staženin. Slitiny využívané pro gravitační lití se dělí na: podeutektické (obsah Si menší než 12 %),

eutektické (obsah Si kolem 12 %) nadeutektické (nad 12 % Si). Slitiny používané pro gravitační lití do písku a kokil jsou uvedeny v tabulkách 2.6a a 2.6b.

Tab. 2.6a Hliníkové slitiny využívané pro gravitační lití do pískových slévárenských forem [28]

Skupina slitin	Norma	Chemické označení
AICu	EN AC-21000	EN AC-Al Cu4MgTi
AICu	EN AC-21100	EN AC-Al Cu4Ti
AlSiMgTi	EN AC-41000	EN AC-Al Si2MgTi
	EN AC-42000	EN AC-Al Si7Mg
AlSi7Mg	EN AC-42100	EN AC-Al Si7Mg0,3
	EN AC-42200	EN AC-Al Si7Mg0,6
	EN AC-43000	EN AC-Al Si10Mg(a)
	EN AC-43100	EN AC-Al Si10Mg(b)
AlSi10Mg		EN AC-Al
	EN AC-43200	Sil0Mg(Cu)
	EN AC-43300	EN AC-Al Si9Mg
	EN AC-44000	EN AC-Al Si11
AlSi	EN AC-44100	EN AC-Al Si12(b)
	EN AC-44200	EN AC-Al Si12(a)
	EN AC-45000	EN AC-Al Si6Cu4
AlSi5Cu	EN AC-45200	EN AC-Al Si5Cu3Mn
	EN AC-45300	EN AC-Al Si5Cu1Mg
	EN AC-46200	EN AC-Al Si8Cu3
AlSi9Cu	EN AC-46400	EN AC-Al Si9Cu1Mg
	EN AC-46600	EN AC-Al Si7Cu2
AlSi(Cu)	EN AC-47000	EN AC-Al Si12(Cu)
	EN AC-51000	EN AC-Al Mg3(b)
	EN AC-51100	EN AC-Al Mg3(a)
AINIg	EN AC-51300	EN AC-Al Mg5
	EN AC-51400	EN AC-Al Mg5(Si)
AlZnMg	EN AC-71000	EN AC-Al Zn5Mg

Skupina slitin	Norma	Označení
AlCu	EN AC-21000	EN AC-Al Cu4MgTi
	EN AC-21100	EN AC-Al Cu4Ti
AlSiMgTi	EN AC-41000	EN AC-Al Si2MgTi
AlSi7Mg	EN AC-42000	EN AC-Al Si7Mg
AlSi10Mg	EN AC-42100	EN AC-Al Si7Mg0,3
	EN AC-42200	EN AC-Al Si7Mg0,6
	EN AC-43000	EN AC-Al Si10Mg(a)
	EN AC-43100	EN AC-Al Si10Mg(b)
	EN AC-43200	EN AC-Al Si10Mg(Cu)
	EN AC-43300	EN AC-Al Si9Mg
AlSi	EN AC-44000	EN AC-Al Si11
	EN AC-44100	EN AC-Al Si12(b)
	EN AC-44200	EN AC-Al Si12(a)
AlSi5Cu	EN AC-45000	EN AC-Al Si6Cu4
	EN AC-45100	EN AC-Al Si5Cu3Mg
	EN AC-45200	EN AC-Al Si5Cu3Mn
	EN AC-45300	EN AC-Al Si5Cu1Mg
	EN AC-45400	EN AC-Al Si5Cu3
AlSi9Cu	EN AC-46200	EN AC-Al Si8Cu3
	EN AC-46300	EN AC-Al Si7Cu3Mg
	EN AC-46400	EN AC-Al Si9Cu1Mg
	EN AC-46600	EN AC-Al Si7Cu2
AlSi(Cu)	EN AC-47000	EN AC-Al Si12(Cu)
AlSiCuNiMg	EN AC-48000	EN AC-Al Si12CuNiMg
AlMg	EN AC-51000	EN AC-Al Mg3(b)
	EN AC-51100	EN AC-Al Mg3(a)
	EN AC-51300	EN AC-Al Mg5
	EN AC-51400	EN AC-Al Mg5(Si)
AlZnMg	EN AC-71000	EN AC-Al Zn5Mg

Tab. 2.6b Hliníkové slitiny používané pro gravitační odlévání do kokil [28]

## 2.2.3 Vliv prvků ve slitinách hliníku

Prvky z periodické soustavy vyskytující se ve slitinách hliníku, ať už úmyslně přidané nebo jako doprovodné, ovlivňují tyto slitiny z hlediska slévárenských, mechanických, korozních vlastností a vlastností za vyšších teplot. Vliv nejběžněji se vyskytujících prvků ve slévárenských slitinách hliníku je následující:

Antimon. V koncentracích 0,05 % nebo vyšších, antimon zjemňuje eutektikum hliníkkřemík na lamelární formu. Účinnost antimonu na změnu eutektické struktury závisí na absenci fosforu a dostatečně velké rychlosti tuhnutí. Antimon rovněž reaguje se sodíkem nebo stronciem a tvoří s nimi hrubá intermetalika s nepříznivými účinky na slévatelnost a eutektickou strukturu tím, že se chemicky spojuje a sráží s modifikátory sodíkem a stronciem. Proto antimon působí při modifikaci negativně. Chemická analýza obsahu antimonu je velmi obtížná, a to i s moderními optickými emisními spektrometry, protože se jeho spektrum překrývá se spektrem železa. Antimon je klasifikován jako těžký kov s potenciálem toxicity a může způsobit zdravotní komplikace. Zejména ve spojitosti s možností vývinu antimonovodíku (stibin) a jiných sloučenin antimonu pokud je jim člověk vystaven.

*Beryllium.* Přídavek beryllia už v minimálním množství ppm může být efektivní při snižování oxidačních ztrát v souvislosti s obsahem hořčíku ve slitině. Studie ukázaly, že zvýšená koncentrace beryllia je nutná pro potlačení oxidace při vyšším obsahu hořčíku. Při vyšších koncentracích (> 0,04 %), beryllium ovlivňuje formu a složení železo obsahujících intermetalických fází a výrazně zlepšuje pevnost a tažnost. Kromě pozitivní změny morfologie nerozpustné fáze, beryllium změní její složení tím, že vytěsňuje hořčík z komplexů Al-Fe-Si, a tím zlepšuje podmínky tepelného zpracování. Berylliové sloučeniny však patří mezi známé karcinogeny, proto jsou vyžadována zvláštní opatření při tavení, manipulaci s roztaveným kovem, stěry a při následných operacích s odlitky jako je tryskání, broušení a svařování. Normy omezují maximální obsah beryllia ve svařovacích drátech na 0,008 % a ve svařovaných materiálech 0,010 %. Při vystavení berylliovým výparům hrozí člověku akutní i chronická beryllióza. Z těchto důvodů, i přes jeho pozitivní účinky, jsou snahy o odstranění tohoto prvku ze slitin hliníku.

*Bor.* Bor má tendence v kombinaci s jinými kovy tvořit boridy, které jsou přítomny jako pevné částice v tavenině hliníku. Jsou to například boridy AlB<sub>2</sub> a TiB<sub>2</sub>. Částice diboridů titanu pak působí jako nukleační zárodky pro fáze TiAl<sub>3</sub>, které po nukleaci z taveniny hliníku slouží jako nukleační zárodky pro nová zrna. Intermetalické boridy snižují životnost nástrojů při obrábění, protože jsou to hrubé částice a tvoří nežádoucí vměstky s nežádoucími účinky i na mechanické vlastnosti a tvárnost. Při vysokých koncentracích bóru přispívají boridy k tvorbě pecního kalu a jeho hromadění a proto hrozí zvýšené riziko vměstků v odlitcích.

*Cín* je účinný při zlepšování valivých a kluzných vlastností a je proto přidáván do slitin používaných v ložiskových aplikacích. Slévárenské slitiny mohou obsahovat až 25 % Sn. Přídavek cínu dále zlepšuje obrobitelnost. Cín může ovlivnit reakce při precipitačním vytvrzování některých slitin už na úrovních ve stovkách ppm.

*Fosfor* reaguje s hliníkem a tvoří AlP, které zvyšují počet nukleačních zárodků a zjemňují fázi primárního křemíku u nadeutektických slitin hliník-křemík, ale přítomnost fosforu ve vyšším množství v podeutektických slitinách hliník-křemík způsobuje hrubnutí jejich eutektické struktury. Fosfor také snižuje účinek eutektických modifikátorů sodíku a stroncia, stejně jako antimonu.

*Hořčík* je základem pro lepší pevnost a tvrdost v tepelně zpracovatelných slitinách hliníkkřemík a je za stejným účelem běžně používán i ve složitějších slitinách obsahující měď, nikl a další prvky. Precipitáty na bázi Mg<sub>2</sub>Si ve vytvrzeném systému ukazují, že užitečná mez rozpustnosti odpovídá přibližně 0,7 % Mg, po které buď k žádnému dalšímu posilování nedochází, nebo naopak dochází ke změkčování matrice. Hliníkové slitiny proto obvykle obsahují 0,4 až 0,7 % hořčíku. Hořčíku se přidává kolem 1 % do slitin s vysokým obsahem křemíku používaných při výrobě pístů spalovacích motorů. Obsah hořčíku je udržován na nízké úrovni u slitin pro tlakové lití, aby se zabránilo křehnutí. Binární slitiny hliník-hořčík jsou široce používány v aplikacích, které vyžadují dobrý povrch dílů a jejich odolnost proti korozi spolu s velmi dobrou kombinací pevnosti a tažnosti. Obvyklé složení slitin je 4 až 10 % Mg a slitiny obsahující více než 7 % hořčíku jsou tepelně zpracovatelné. Přítomnost hořčíku však zvyšuje ztráty tavenin hliníku oxidací.

*Chrom* se obvykle v malém množství přidává do taveniny, jelikož podporuje přirozené stárnutí. Chrom ve většině případů tvoří s hliníkem sloučeninu CrAl<sub>7</sub>, která vykazuje velmi omezenou rozpustnost v tuhém stavu a dobře proto potlačuje růst zrn. Pecní kal a sraženiny obsahující železo, mangan a chrom mohou být občas problémem v tlakových odlitcích, Tyto sraženiny se ale jen zřídka kdy vyskytují v gravitačně litých odlitcích. Chrom také zvyšuje odolnost některých slitin proti korozi.

*Indium* je přidáváno do odlitků spolu se zinkem jako obětovaná anoda, protože pomáhá narušit normálně tvrdý a soudržný oxid hlinitý pokrývající povrch hliníkový slitin.

*Kadmium*. V koncentracích nad 0,1 % zlepšuje obrobitelnost, avšak kvůli známým negativním a toxickým vlivům na lidské zdraví je nutné dodržovat opatření, která potvrdí jeho odpařování při 767 °C.

*Křemík*. Přítomnost křemíku ve slitinách hliníku zlepšuje vlastnosti odlitků. Přidáním křemíku do čistého hliníku se dramaticky zvyšuje jeho tekutost, odpor proti trhlinám za tepla a zabíhavost. Slitiny na bázi hliník-křemík jsou proto ve slévárenství nejběžněji a nejvíce používané. Komerční slitiny obsahují až kolem 25 % Si. Obecně platí, že optimální obsah křemíku přispívá k lepšímu procesu lití. Pro pomalé rychlosti ochlazování v technologiích lití, jako jsou např. odlévání do pískových a sádrových forem, je rozsah obsahu Si 5 až 7 %, u trvalých forem 7 – 9 %, a pro tlakové lití 8 až 12 %. Základem těchto doporučovaných obsahů je optimální vztah mezi rychlostí chlazení a tekutostí a vliv obsahu eutektika na zabíhavost. Přídavek křemíku do slitiny je navíc doprovázen snížením hustoty výsledného materiálu a koeficientu tepelné roztažnosti. Fáze bohaté na křemík jsou tvrdé, takže zvyšují tvrdost slitiny, ale snižují houževnatost a obrobitelnost. Eutektické a nadeutektické slitiny hliník-křemík jsou používány pro aplikace, ve kterých je vyžadována vysoká odolnost proti opotřebení, jako jsou např. písty spalovacích motorů.

*Lithium*. Zatímco lithium až do obsahu 3 % může být použito ke zlepšení vlastností tvářecích slitin hliníku, má obecně škodlivé účinky na slévárenské vlastnosti. Jsou to především snížení modifikační účinnosti Na nebo Sr při obsahu nad 0,5 %. Při ještě nižších obsazích, nad 0,01 %, působí problémy s pórovitostí odlitků. Proto se doporučuje, aby maximální obsah Li ve slévárenských slitinách byl pod úrovní 0,003 %.

*Mangan*. Přídavek manganu se ve slévárenských slitinách používá pro dva hlavní účely. Prvním cílem je upravit železité fáze  $\beta$ , které tvoří ve slévárenských slitinách jehlice, na Mn- $\alpha$  čímž se zlepší tažnost a tvárnost. Druhé použití je v tlakovém lití odlitků, kde lze manganem nahradit železo a snížit tak lepení na stěny forem. Vysoká rozpustnost manganu v hliníku v kombinaci s jeho tendencí snižovat obsah fází působících křehkost dává slitinám lepší vlastnosti než těm, v nichž je železo používáno jako prostředek proti lepení na stěny formy. Výzkumy také prokazují, že velké množství fáze MnAl<sub>6</sub> ve slitinách obsahující více než 0,5 % Mn může příznivě ovlivnit vnitřní zdravost odlitků a snižuje smrštění. *Měď*. První a nejrozšířenější slitiny hliníku byly ty, které obsahovaly 4 až 10 % Cu. Měď podstatně zlepšuje pevnost a tvrdost už v litém stavu a následně po tepelném zpracování. Slitiny obsahující 4 až 6 % Cu reagují na tepelné zpracování největším nárůstem pevnosti. Obsah mědi ve slitinách hliníku obecně zlepšuje jejich pevnost, tvrdost, obrobitelnost a tepelnou vodivost, ale naopak snižuje jejich odolnost proti korozi a někdy zvyšuje citlivost na korozi při napětí. Přídavek mědi rovněž snižuje odolnost proti trhlinám za tepla a zhoršuje slévatelnost.

*Nikl* je obvykle přidáván spolu s mědí ke zlepšení vlastností za zvýšených teplot. Také snižuje koeficient tepelné roztažnosti. Nikl urychluje vláknitou korozi v odlitcích, jako jsou potahované disky automobilových kol, pokud je přítomen ve vyšším než stopovém množství, tj. zhruba do 100 ppm.

*Olovo* je běžně používáno ve slévárenských slitinách hliníku do 0,1 % pro lepší obrobitelnost.

*Rtuť*. Slitiny obsahující rtuť jako obětní anodu byly vyvinuty jako materiály s katodovou ochranou zejména pro práci ve slané vodě a atmosféře. Použití těchto optimálně elektronegativní slitin, které nepasivují v mořské vodě, bylo přísně omezeno z ekologických důvodů.

*Sodík* se používá pro modifikaci eutektika hliník-křemík. Jeho přítomnost způsobuje křehnutí v hliníko-hořčíkových slitinách. Sodík reaguje s fosforem, což snižuje jeho vlastní účinnost při modifikaci v podeutektických a eutektických slitinách a zároveň snížení rafinačního účinku fosforu u nadeutektických slitin. Účinky sodíku a fosforu jdou tedy proti sobě.

*Stroncium* se také používá k modifikaci slitin hliníku. Efektivní modifikace může být dosaženo při velmi nízkých úrovních, ale běžně se přidává 0,0040 až 0,02 % stroncia. Vyšší přídavky stroncia způsobují pórovitost odlitků, a to zejména v tlustých stěnách, ve kterých probíhá tuhnutí pomaleji. Tento nárůst poréznosti však může být použit k vyrovnání smrštění v odlitcích, kde vyšší rozptýlená pórovitost nevadí. Vzájemné účinky stroncia a fosforu jsou stejné, jako je tomu u sodíku.
*Stříbro* se používá jen v omezeném rozsahu slitin hliníku s mědí, které mají vysokou pevnost v rozsahu 0,5 až 1,0 % a zvyšuje jejich odolnost proti korozi.

*Titan* je hojně využíván pro zlepšení struktury slévárenských slitin hliníku, často v kombinaci s menším množstvím bóru. Zjemnění zrna slévárenských slitin je účinně provedeno při poměru obsahu Ti a B 5:1. Titan má často větší koncentraci než je požadovaná pro zjemnění zrna, protože snižuje tendence k praskání.

*Vápník* je slabý modifikátor eutektika hliník-křemík. Zvyšuje rozpustnost vodíku už ve stopovém množství a je proto často zodpovědný za pórovitost odlitků. Koncentrace vápníku vyšší než přibližně 0,005 % má nepříznivý vliv na tažnost hlinito-hořčíkových slitin.

*Bismut*. Zlepšuje obrobitelnost slévárenských slitin hliníku v koncentraci vyšší než 0,1 %. Je také známo, že při koncentraci vyšší než 30 ppm zvyšuje smrštění slitin na bázi hliníkkřemík.

*Vodík.* Je jediným plynem rozpustným v tekutém hliníku. Rozpustnost vodíku je podstatně nižší v tuhé fázi než v tavenině, proto má vodík sklon působit pórovitost. Vylučuje se z taveniny ve formě bublinek, které zůstanou ve ztuhlém kovu. Bublinám vodíku, které způsobují plynovou pórovitost, lze zabránit odplyňováním taveniny pomocí probublávání inertního nebo aktivního plynu taveninou. Nejčastějším zdrojem vodíku je vlhkost z atmosféry nad taveninou, tím že tavenina pohlcuje vodní páru a tvoří tak povrchovou vrstvu oxidu hlinitého (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) a zbylý vodík se rozpouští v tavenině.

**Zinek**. Přidání zinku do čistého hliníku nepřináší žádné významné výhody. Spolu s přídavkem mědi a / nebo hořčíku, nicméně zinek zlepšuje výsledky tepelného zpracování a přirozeného stárnutí. Poměrně mnoho slitin využívaných pro gravitační lití sice obsahuje záměrně přidaný zinek pro zvýšení zabíhavosti, ale vyskytují se problémy se smrštěním.

Železo. Zvyšuje odolnost proti trhlinám za tepla a při obsahu 0,9-1 % snižuje tendenci lepení taveniny na stěny formy při tlakovém lití. Zvýšením obsahu železa však dochází k výraznému snížení tažnosti, vrubové houževnatosti a obrobitelnosti. Železo reaguje s taveninou hliníku na velké množství nerozpustných intermetalických fází. Obvykle se běžně vyskytují v odlitcích fáze FeAl<sub>3</sub>, FeMnAl<sub>6</sub> a αAlFeSi. Ve slitinách hliník-křemík jsou nejběžnější dvě intermetalické sloučeniny a to β-jehlice (FeSiAl<sub>5</sub>) a Mn-α((Fe, Mn)<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>Al<sub>15</sub>). Tyto v podstatě nerozpustné fáze zlepšují pevnost zejména při vyšších teplotách, ale snižují tvárnost. Z hlediska slévárenského tyto nerozpustné fáze negativně ovlivňují tekutost a zabíhavost. Železo se také podílí na tvorbě kalů s manganem, chromem a dalšími prvky, které mohou zůstávat v odlitcích, proto je obsah železa při jiném než tlakovém lití obvykle limitován 0,8 %. [27, 28]

## 3. HISTORIE, KONSTRUKCE A VÝROBA PÍSTŮ SPALOVACÍCH MOTORŮ

Píst je nejvíce namáhanou součástí ve spalovacím motoru. Má tři důležité úlohy: Za prvé je to v podstatě ložisko, které je zatěžováno spalovacím procesem a toto zatížení musí přenášet přes spojovací tyč, ojnici, na klikovou hřídel. Druhou funkcí pístu je to, že píst je také těsněním, které těsní spalovací síly a kompresi ve spalovacím prostoru. V neposlední řadě je píst vodičem tepla, který přenáší část tepla vzniklého v prostoru válce do venkovního prostředí. Ve skutečnosti je to téměř 80 % tepla, které je odváděno pryč jen pístními kroužky.

Jako tvarově komplikovaná součást se píst spalovacího motoru skládá v podstatě ze sedmi částí. Horní část pístu neboli hlava, někdy nazývaná koruna, absorbuje část tepla z procesu spalování a přenáší sílu vzniklou při procesu spalování. V důsledku toho je hlava pístu nejteplejší částí motoru hned po zapalovací svíčce. Proto musí být hlava pístu poměrně tlustá, aby tento nápor vydržela, ačkoli to není vždy nejtlustší část pístu. V další části pístu směrem dolů od hlavy jsou drážky pro pístní kroužky, které jsou umístěny na každém pístu jinak a jejich počet je také odlišný podle typu motoru a dalších parametrů. Prostory mezi drážkami pro pístní kroužky přenášejí dynamické rázové zatížení od pístních kroužků vyvolané spalovacím procesem. V drážkách pro pístní kroužky jsou osazeny pístní kroužky, které tvoří třetí část pístu. Pístní kroužky jsou pružné a vyráběné především z litiny s lupínkovým grafitem, která díky obsahu grafitu zajišťuje lepší mazací schopnosti a vylepšuje podmínky tření mezi kroužkem a stěnou válce. U čtyřdobých vznětových a zážehových motorů se díky pohybu pístu nahoru a dolů ve válci pístní kroužky v drážkách pohybují, čímž se dosáhne mimo jiné toho, že drážky pístních kroužků zůstanou čisté tj. bez usazenin karbonu. U dvoudobých motorů jsou pístní kroužky pevně zajištěny proti otáčení kolíky nalisovanými do drážek pro pístní kroužky. Pístní kroužky se u těchto typů motorů nesmí otáčet, protože by docházelo k jejich vychylování do prostoru přepouštěcích kanálů ve válci a následnému silnému opotřebení až destrukci, jak pístního kroužku, tak stěny válce a ústí přepouštěcího kanálu. V další části je otvor pro pístní čep. Do tohoto otvoru je vložen pístní čep, který zajišťuje spojení pístu s ojnicí. Otvor je lehce posunut mimo střed pístu, čímž se dosáhne toho, že rázové namáhání při vysokých otáčkách způsobuje menší namáhání ojnice a zároveň se odstraní klepání pístu. V otvoru pro pístní čep jsou obrobeny drážky, které zajišťují pístní čep v pozici. V partiích kolem

otvorů pro pístní čep je poměrně velké množství materiálu, které musí přenášet zatížení pístu, a proto jsou někdy tyto partie nejtlustší částí. V jiných případech nejsou tak silné jako hlava, záleží na aplikaci a konstrukci pístu. V obou případech je však tloušťka těchto dvou částí pístu velmi důležitá, protože určuje, jak je z pístu přenášeno teplo. Poslední částí pístu pod otvorem pro pístní čep je tzv. plášť pístu, který je nosnou částí pístu. Pohybuje se vůči stěně válce a přenáší energii spalování během pracovního zdvihu a zatížení od komprese při kompresním zdvihu. Plášť je část pístu, která nejvíce potřebuje mazání, neboť může být přímo ve styku se stěnou válce na rozdíl od hlavy pístu, která je od stěny oddělena pístními kroužky. Proto se většina problémů spojených s mazáním motoru ukáže právě na plášti jako první.

Píst spalovacího motoru je komplikovaná součást i z hlediska počtu jeho částí a je proto zřejmé, že i tvary těchto částí jsou pro jeho správnou funkci důležité. Píst jako součást motoru má dva základní tvary: Za prvé, píst nemá tvar přesně kulatý, ale elipsovitý tvar. Důvodem pro tento eliptický tvar jsou výše uvedené otvory pro pístní čep, jejichž hmota, tj. množství materiálu v jejich okolí způsobuje, že absorbují velké množství tepla, což vede k jejich rozšíření vlivem tepelné dilatace. Pokud by píst byl v jejich rovině ve tvaru kruhu, po jeho ohřevu by došlo ke změně tohoto tvaru, což by působilo problémy. Proto je šířka resp. průměr pístu v oblasti otvorů pro pístní čepy menší, než je tomu jinde. Výsledný tvar (z pohledu dolů od hlavy pístu) je elipsa (ovál). Dalším (druhým) tvarem, který mají všechny písty je kužel. To znamená, že průměr hlavy pístu je podstatně menší než jeho průměr v oblasti pláště ze stejného důvodu jako u tvaru elipsy, tj. velké množství materiálu tvořící hlavu pístu. Hlava totiž absorbuje tolik tepla, že musí být menší, aby při plném zahřátí byl píst ve tvaru válce.

Dnes se písty spalovacích motorů vyrábí prakticky dvěma technologiemi. První kategorií jsou písty vyráběné odléváním tudíž písty lité a druhou písty vyráběné tvářením, tedy písty kované. Každá z těchto technologií výroby má své klady a zápory. Lité písty jsou vyrobeny z roztaveného hliníku odlévané do kovové formy, čímž se dosáhne velmi přesného konečného tvaru výrobku, který vyžaduje jen minimální obráběcí operace. Kované písty jsou vyráběny odlišně. Kov není roztaven, ale pouze ohřát na kovací teplotu a poté vložen do lisu, kde je kován v raznici. Výsledkem tohoto procesu není skoro konečný tvar pístu jako u pístů litých, ale polotovar pístu, na němž musí být povedeno podstatně více obráběcích operací. Jak již bylo uvedeno, dnes se používají obě metody výroby pístů spalovacích motorů.

Odlévané písty mají podstatně delší historii než písty kované, přesto že v počátcích vývoje spalovacích motorů se písty vyráběly obráběním z oceli a až později odlévané z litiny. První odlévané písty byly vyrobeny ze slitin, které nebyly určeny pro výrobu pístů, proto se projevovaly velkou tepelnou roztažností, což mělo za následek, že písty ve studeném motoru klepaly, neboť musely být vyrobeny s dostatečnou vůlí. Jedno z prvních vylepšení těchto neblahých projevů tepelné dilatace provedli ve firmě Harley-Davidson, kde do pístů zalévali ocelová žebra, která měla dilataci bránit. Toto vylepšení však neřešilo situaci úplně a bylo značně nákladné. Kolem roku 1960 byl zahájen vlastní výzkum a vývoj pístových slitin umožňující výše popsanou a dnes používanou konstrukci odlévaných pístů spalovacích motorů. Pístové slitiny byly obohaceny o křemík, který dává pístům přírodní mazivost a zmenšuje koeficient teplotní roztažnosti slitiny. I písty kované obsahují křemík, který zaručuje tyto vlastnosti, ale písty lité ho obsahují podstatně více, některé z nich až 25 %, obvykle 12-20 %. Nevýhodou křemíku je ale to, že zvyšuje křehkost slitiny a tudíž pístu. Křehkost se vylepšuje přídavkem niklu a manganu. Lité písty jsou písty vyráběné sériově, jelikož výroba slévárenských kokil je nákladná. Nejmodernější lité písty pro závodní automobily jsou vyráběny ze slitiny AlBe (hliník-beryllium), která má nižší hustotu (2100 [kg.m<sup>-1</sup>]), vyšší pevnost, nižší koeficient teplotní roztažnosti, a pak také lepší tepelnou vodivost. Zřejmě největší nevýhodou je zdravotní závadnost beryllia.



A) píst dvoutaktního spalovacího motoru z nadeutektické slitiny (18 % Si, materiál KS 281.1), B) píst pro dieselový spalovací motor se zalitým nosičem pístního kroužku z eutektické slitiny (12 % Si, materiál KS 1275), C) píst pro spalovací motor s přímým vstřikováním, D) píst zážehového spalovacího motoru z eutektické slitiny (12 % Si, materiál KS 1275), E) píst pro kompresor z eutektické slitiny (12 % Si, materiál KS 1275), F) píst dieselového spalovacího motoru se zalitým nosičem pístního kroužku z eutektické slitiny (12 % Si, materiál KS 1275), F) píst dieselového spalovacího motoru se zalitým nosičem pístního kroužku z eutektické slitiny (12 % Si, materiál KS 1275), F) píst dieselového spalovacího motoru se zalitým nosičem pístního kroužku z eutektické slitiny (12 % Si, materiál KS 1295).

Obr. 3-1 Příklady pístů spalovacích motorů [29]



Obr. 3-2 Píst vyrobený ze slitiny AlBe [30]

Kované písty jsou otázkou nedávné minulosti. Jejich první aplikace se objevila na vysoce výkonných dvoudobých spalovacích motorech. Slitiny, ze kterých byly vyrobeny, měly v mnoha případech ještě horší vlastnosti než slitiny pro lité písty, protože neobsahovaly křemík, který jak již bylo řečeno, působí křehkost slitiny a tudíž obtížné zpracování tvářením. Kované písty proto musely být vyráběny se značně větší vůlí než písty lité a proto byly hlučné, stejně jako první lité písty. Moderní kované písty však obsahují křemík také, jelikož byly vyvinuty takové hliníkové slitiny, které mohou být zpracovávány kováním bez zvýšeného rizika vadných výkovků. Toho bylo dosaženo stejně jako u slévárenských slitin opět přidáním zejména niklu. Výsledkem toho je, že moderní kovaný píst je mnohem rozměrově stabilnější. Dalším faktem, který charakterizuje vlastnosti kovaného pístu je, že se jedná o díl vyráběný technologií tváření. Kované písty mají hrubý vnitřní tvar a výsledný výkovek je hmotný. V důsledku toho, kované písty mají špatnou tvarovou stálost. Konstruktéři spalovacích motorů vyřešili tyto dva problémy (příliš velkou váhu, rozměrovou nestálost), alespoň částečně tím, že se odstraní materiál z vnitřku resp. ze dna pístu a stěny pláště, což však jako další obráběcí operace výrobu pístu prodražuje. Vlastní kování pístů je na rozdíl od jejich lití jednodušší. Menší výrobci pístů se proto specializují na tento typ pístů a kované písty se rychle staly volbou konstruktérů vlastních a závodních motorů, protože kované písty mohou být vyrobeny velmi rychle a prakticky v jakékoli konfiguraci, jelikož kování je variabilnější. Pro kované písty, se ze stejných důvodů, také jako první začali používat ultratenké pístní kroužky. Toto vše vedlo k poměrně velkému rozmachu kovaných pístů, ikdyž klasické lité stále převažují. Kovaný píst je sice pevnější než píst litý a díky nižšímu obsahu křemíku také méně křehký. Díky technologii výroby je kovaný píst homogennější a tím pádem lépe snáší podmínky spalování, ale je ve výsledku dražší a proto se kované písty využívají spíše pro speciální aplikace. [30, 31]



Obr. 3-3 Kovaný píst automobilu [32]

# 3.1 Vlastnosti slitin hliníku používaných pro odlévání pístů spalovacích motorů

Samostatnou skupinu slévárenských slitin hliníku tvoří slitiny hliníku používané pro odlévání pístů spalovacích motorů. V současné době se pro výrobu litých pístů spalovacích motorů používá dvou typů slitin Al-Si a to slitin eutektických a nadeutektických. Největší množství pístů se odlévá ze slitiny eutektické AlSi12CuNiMg (podle EN AW 4032). Dalším typem slitin, používaných zejména pro odlévání menších pístů, jsou slitiny nadeutektické, které se podle obsahu křemíku dělí na dvě skupiny:

- a) slitiny Al-Si 20;
- b) slitiny Al-Si 25.

Vlastnosti všech uvedených typů slitin musí odpovídat tomu, že jsou používány pro odlévání vysoce tepelně namáhaných součástí. Vzhledem k tomu, že písty spalovacích motorů pracují při vysokých teplotách, nelze uvažovat hodnoty naměřené při normálních teplotách za vypovídající. Proto je vhodné brát za směrodatné ty hodnoty, které byly naměřeny při teplotě 200 až 250 °C. Tato teplota je považována za průměrnou pracovní teplotu hlavy pístu spalovacího motoru. V tabulce 3.1 jsou uvedeny mechanické vlastnosti pístových slitin, které jsou během používání namáhány při jiné teplotě než normální, tj. při teplotě pracovní, která je, jak již bylo řečeno, u pístů spalovacích motorů vyšší než 200 °C. Souhrnně lze říci, že zvýšením teploty se pevnost hliníkových materiálů sníží, tvárnost a nárazová práce se zvýší. Pevnost pístových slitin s vysokým obsahem mědi a křemíku se do teploty 200 °C podstatně nesnižuje. Při teplotě 250 °C dosahuje asi 50 až 60 % hodnoty odpovídající pokojové teplotě.

Typ materiálu	Norma materiálu	Re <sub>0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>0,2</sub> [%]	HB [MPa]
AlSi12CuNiMg	EN AW 4032	140-190	160-210	0,5-1	100
AlCu4Ni2	EN AW-2031	180-230	200-250	0,5-1	110
AlSi18CuNi	UK LM28/LM29	170-200	180-230	0,2-0,7	110
AlSi25CuNi	UK LM28/LM29	170-200	180-220	0-0,3	110

Tab. 3.1 Mechanické vlastnosti pístových slitin [3]

Odlito do kokil, v zušlechtěném stavu

Nejpoužívanější slitinou při výrobě pístů spalovacích motorů je tedy slitina AlSi12CuNiMg, která patří do skupiny slévárenských slitin na bázi Al-Si. Její složení je v oblasti eutektického bodu, jedná se tedy o eutektický silumin. Z hlediska jejího chemického složení jde o složitou polykomponentní soustavu s pěti základními prvky: Al, Si, Cu, Ni, Mg a dalšími doprovodnými prvky, nejčastěji: Fe, Mn, Ti a Zn. U této slitiny jsou v rovnovážném stavu v matrici  $\alpha$  fáze přítomny tyto intermetalické fáze: Al<sub>5</sub>SiFe, Al<sub>8</sub>Si<sub>6</sub>Mg<sub>3</sub>Fe, Al<sub>4</sub>CuMg<sub>5</sub>Si<sub>4</sub> (fáze W), Al<sub>6</sub>Cu<sub>3</sub>Ni (fáze T<sub>Ni</sub>), NiAl<sub>3</sub> (fáze  $\varepsilon$ ), Al<sub>3</sub>Ni<sub>2</sub> (fáze  $\delta$ ) a CuAl<sub>2</sub>, viz tabulka 3.2. Ve fázi  $\delta$  se rozpouští Cu. Protože se v této slitině nachází jako příměs také Fe, dochází ke vzniku intermetalické fáze Al<sub>7</sub>Cu<sub>2</sub>Fe, která je při teplotě 530 °C schopna rozpustit do 6,8 % Ni. V ternárním systému Al-Cu-Ni dochází k následující eutektické reakci, jejímž produktem je ternární eutektikum: Tavenina  $\leftrightarrow \alpha + T_{Ni} + CuAl_2$ při teplotě 546 °C. Slitina je tedy vytvrditelná a odlitky pístů se jednostupňově či dvoustupňově tepelně zpracovávají. Postup tepelného zpracování AlSi12NiCuMg: 1) Rozpouštěcí žíhání (510 °C/4 – 6 hod. voda (80 °C)), 2) Umělé stárnutí (230 °C/6 hod. vzduch), 3) Stabilizační žíhání (180 °C/3 – 6 hod. vzduch)). Poté následuje velmi přesné opracování pístů obráběním na NC strojích s použitím vysokých řezných rychlostí. Povrchová úprava pístů se dále provádí například eloxováním, fosfátováním, grafitovým kluzným lakem nebo kluzným lakem na bázi jiných prvků.

Složení hliníkové pístové slitiny a výrobní technologie se tudíž liší v závislosti konkrétního použití pístu (písty pro dieselové motory v osobních automobilech, písty pro benzinové motory v osobních automobilech, písty pro dvoutaktní motory, písty pro nákladní automobily a pro další dopravní prostředky). Obecně je odlévání pístů nejčastěji prováděno metodou gravitačního lití do kovových forem na licích strojích. Formy bývají ocelové s povrchovou úpravou nitridací funkčních ploch formy. Odlévaná slitina Al je modifikována a odplyněna, [4, 5, 6].

-44-

AlSi12CuNiMg [6]

Intermetalická	Hmotnostní procenta obsahu jednotlivých prvků						
fáze	Al	Si	Fe	Mg	Cu	Ni	Zn
AlSi <sub>5</sub> Fe	61,7	12,8	25,5	-	-	-	-
Al <sub>8</sub> Si <sub>6</sub> Mg <sub>3</sub> Fe	42,1	32,8	10,9	14,2	-	-	-
W (Al <sub>4</sub> CuMg <sub>5</sub> Si <sub>4</sub> )	26,7	27,6	-	30,0	15,7	-	-
T <sub>Ni</sub> (Al <sub>6</sub> Cu <sub>3</sub> Ni)	39,4	-	-	-	46,3	14,3	-
ε (NiAl <sub>3</sub> )	58,0	-	-	-	-	42,0	-
$\delta$ (Al <sub>3</sub> Ni <sub>2</sub> )	40,9	-	-	-	-	59,1	-
Al <sub>7</sub> Cu <sub>2</sub> Fe	50,8	-	15,0	-	34,2	-	-
CuAl <sub>2</sub>	46,0	-	_	-	54,0	_	-

Tab. 3.2 Zastoupení jednotlivých prvků v intermetalických sloučeninách slitiny

0. 5.2 Zastoupem jednotnýven prvku v intermetanekých sloučennať

# 3.2 Fázové diagramy pístových slitin se systémem prvků Al-Si-Cu-Ni-Mg

Nejběžněji komerčně využívané slévárenské hliníkové slitiny tvoří pěti složkový systém. Přídavkem železa se počet složek zvýší na šest. Obvykle obsahují několik hlavních komponentů a je známo, že mají velmi složité fázové složení. Různé druhy používaných pístových slitin hliníku, viz výše, obsahují chemické prvky v tomto množství (hmotnostní procenta) 11-23 % Si, 0.5-3 % Ni, 0,5-5.5 % Cu, 0,6 - 1,3 % Mg, do 1,3 % Fe a až 1 % Mn. Koncentrace Mn je však obvykle nízká a může být proto zanedbána. Není však zanedbatelná pokud jde o její účinky na fázové složení a reakce tuhnutí. Analýza šesti složkové soustavy Al-Cu-Fe-Mg-Ni-Si je velmi náročný úkol, protože všechny prvky mohou tvořit různé fáze, což závisí na poměru mezi těmito legujícími prvky. Složení a hustoty fází, které se mohou tvořit v pístových slitinách Al-Si, jsou uvedeny v tabulkách 3.2 a 3.3 spolu s běžně používaným označením. Analýzu také komplikuje skutečnost, že pěti a čtyř komponentní diagramy s Ni dosud nejsou známy. Jelikož složení fází uvedených v tabulkách 3.2 a 3.3 lze považovat za konstantní, polohy bodů v izotermické pěti složkové soustavě mohou být vypočteny pomocí složení těchto fází. Při analýze třísložkových systémů, obsahujících nutně i Al a Si, jejichž rovnovážné reakce je nutno zvážit, tj. systémů Al-Cu-Si, Al-Fe-Si, Al-Mg-Si, a Al-Ni-Si ukazuje, že následující fáze jsou v rovnováze s Al a Si: Al<sub>2</sub>Cu (θ), Al<sub>5</sub>FeSi (β), Mg<sub>2</sub>Si (M), a Al<sub>3</sub>Ni (ε). Tyto fáze vznikají během tuhnutí v teplotním rozmezí mezi 576 a 525 °C. Ternární eutektika ve slitinách obsahující nikl, hořčík a železo by měla být tvořena i za rovnovážných podmínek, ale ve slitinách obsahující méně než 4 % mědi není ternární eutektikum Al + Si + Al<sub>2</sub>Cu tvořeno

za rovnovážných podmínek. V praxi, která představuje samozřejmě nerovnovážné podmínky tuhnutí, je toto eutektikum tvořeno dokonce při koncentracích mědi menší než zlomky procent. Čtyř fázové diagramy jsou složitější kvůli výrazně většímu počtu reakcí tuhnutí. Kromě toho výskyt peritektických reakcí, které probíhají pouze částečně při velmi pomalém chlazení, odchyluje fázové složení z rovnováhy.

Intermetalická fáze	Označení	Chemické složení [hm. %]	Hustota [g.cm <sup>-3</sup> ]		
Al <sub>3</sub> Ni	3	42Ni	3,95		
Al <sub>2</sub> Cu	θ	52,5Cu	4,34		
Mg <sub>2</sub> Si	М	63,2Mg; 36,8Si	1,98		
Al <sub>3</sub> CuNi (Al <sub>3</sub> Ni <sub>2</sub> )	δ	30Ni; 31Cu	4,76		
Al <sub>7</sub> Cu <sub>4</sub> Ni	γ	38,7-50,7Cu; 11,8-22,2Ni	5,48		
Al <sub>9</sub> FeNi	Т	4,5-14Fe; 18-28Ni	3,4		
Al <sub>9</sub> FeSi	β	25-30Fe; 12-15Si	3,45		
Al <sub>8</sub> FeMg <sub>3</sub> Si <sub>6</sub>	π	10,9Fe; 14,1Mg; 32,9Si	2,82		
$Al_8Cu_2Mg_8Si_6$	Q	20,3Cu; 31,1Mg; 27Si	2,79		
Při přítomnosti Mn ve slitině je vytvářena fáze Al <sub>15</sub> (FeMn) <sub>3</sub> Si <sub>2</sub>					

Tab. 3.3 Intermetalické sloučeniny ve slitině AlSi12CuNiMg [33]

Systém Al-Cu-Fe-Mg-Ni-Si je tvořen čtyř složkovými systémy: Al-Cu-Fe-Si, Al-Cu-Mg-Si, Al-Cu-Ni-Si, Al-Fe-Mg-Si, Al-Fe-Ni-Si, a Al-Mg-Ni-Si a všechny fáze uvedené v tabulkách 3.2 a 3.3 jsou v těchto systémech přítomny a pístové slitiny obsahující relativně malé množství železa mohou být analyzovány pomocí fázového diagramu Al-Cu-Mg-Ni-Si, v němž mohou být v rovnováze s Al a Si tyto fáze -  $\varepsilon$ ,  $\delta$ ,  $\gamma$ ,  $\theta$ , M a Q. Obrázek 3-4 ukazuje nejpravděpodobnější distribuce fází v tuhém stavu ve čtyř a pěti fázovém poli, tj. Al + Si + Q +  $\theta$ +  $\gamma$ , Al + Si + Q +  $\gamma$  + M, Al + Si +  $\gamma$  +  $\delta$  + M a Al + Si +  $\delta$  +  $\varepsilon$  + M. Obrázek 3-5 ukazuje blokový diagram tuhnutí pístové slitiny. (Si) fáze je vylučována z taveniny jako první a je následována eutektikem Al + Si. Další reakce tuhnutí následují, přičemž čím vyšší je poměr Cu:Ni, tím nižší je možnost vytvoření  $\varepsilon$ . Takovéto diagramy jsou široce používány pro lepší znázornění sekvencí tuhnutí v multikomponentních slitinách.



Obr. 3-4 Fázový diagram Al-Cu-Mg-Ni-Si, rozdělení fází v tuhém stavu [33]



Obr. 3-5 Blokové schéma tuhnutí slitiny AlSi12CuNiMg [33]

Al-Fe-Mg-Ni-Si stejně jako Al-Cu-Fe-Ni-Si zahrnuje přítomnost železa ve slitinách hliníku, které je v mnoha pístových slitinách příčinou tvorby železo obsahujících fází. V systému Al-Cu-Fe-Mg-Si se železo podílí na tvorbě dvou fází  $\beta$  a  $\pi$ , přičemž fáze  $\pi$  je zapojena v eutektické reakci pouze za nejnižších teplot. Distribuce fází v pevném stavu a polythermální projekce tuhnutí jsou uvedeny na obrázku 3-6.



Obr. 3-6 Fázový diagram Al-Fe-Mg-Ni-Si, rozdělení fází v tuhém stavu[33]

Rovnováha mezi T a  $\theta$  fází je nejpravděpodobnější v systému Al-Cu-Fe-Ni-Si, který má čtyři pěti-fázová pole, jak je znázorněno na obrázku 3-7. Přítomnost železa zde může vést k vytvoření jedné z následujících fází:  $\pi$ , T, a  $\beta$ . První fáze se tvoří převážně při nízkých koncentracích železa. Pístové slitiny jsou obvykle používány v ustáleném stavu, tj. žíhané při 200 až 250 °C. Když se vezme v úvahu, že horní hranice provozních teplot je maximálně 300 °C, pak jsou izotermické úseky při této teplotě a obsah Si kolem 13 % nejvíce charakteristické. Je dobré však zmínit, že skutečné fázové složení při těchto teplotách může ještě být odlišné od rovnováhy, protože odchylku od rovnováhy při tuhnutí nelze odstranit žíháním při takto relativně nízké teplotě.



Obr. 3-7 Fázový diagram Al-Cu-Fe-Ni-Si, rozdělení fází v tuhém stavu [33]

Pokud by kompozice pístových slitin Al-Cu-Mg-Ni-Si neobsahovala železo, vypadal by vertikální řez v závislosti na obsahu mědi tak, jak je uvedeno na obrázku 3-8. Za nerovnovážných podmínek tuhnutí téměř všechny pístové slitiny patřící k systému Al-Cu-Ni-Mg-Si a obsahující více než 1-1,5 % Cu, skončí tuhnutí podle eutektické reakce, viz bod E, obrázek 3-4. Železo je však jako doprovodný prvek důležitým faktorem ovlivňujícím fázové složení mnoha slévárenských slitin, včetně slitin pístových. Izotermický řez při 300 °C, 13 % Si a 1 % Ni ukazuje obrázek 3-9. Za rovnovážných podmínek je zřejmé, že železo může být vázáno pouze na kvartérní  $\pi$  fáze. Na druhou stranu se na vertikálním řezu diagramu při 13 % Si, 1 % Ni a 1 % Mg na tomtéž obrázku ukazuje, že ternární T fáze by se měla tvořit během tuhnutí u slitin obsahující více než 0,2 % Fe, což je způsobeno neúplností peritektické reakce a značně vysokou koncentrací železa, 0,5-0,6 %. Následkem toho bude výskyt z nerovnovážné  $\beta$  fáze ve struktuře po odlití.



Obr. 3-8 Řez fázovým diagramem Al-Cu-Mg-Ni-Si na 13 % Si, 1 % Ni a 1 % Mg, uvedená procenta jsou hm. % [34]



Obr. 3-9 Izotermický řez fázovým diagramem Al-Fe-Mg-Ni-Si při 300 °C, 13 % Si a 1 % Ni (hm %) [33]

Dále se ukazuje, že železo jako nečistota může tvořit kvartérní fázi Al8FeMg3Si6 ve slitinách s nižším obsahem železa a dále ternární fáze Al9FeNi a Al5FeSi ve slitinách s vyšším obsahem železa. Tabulka 3.4 ukazuje přehled reakcí v uvedených pěti složkových systémech. [33, 34]

rue. Still femer ve vjse uveren per biožitov jen bjstemetni [5]
---

	Složení taveniny [hm.%]					
Reakce	Cu	Fe	Mg	NI	Si	°C
Al-Cu-Mg-Ni-Si						
$U_I : L + \epsilon \leftrightarrow (AI) + (Si) + \delta + M$	-12	0	-3	<1	-10	535-540
$U_2: L + \delta \leftrightarrow (Al) + (Si) + \gamma + M$	-10	0	-3	<2	-11	530-535
$U_3: L + M + (Si) \leftrightarrow (Al) + Q + \gamma$	-8	0	-3	<2	-12	525-530
E: L $\leftrightarrow$ (AI) + (Si) + $\theta$ + Q + $\gamma$	-28	0	-2	<1	-6	503-506
AI-Fe-Mg-Ni-Si						
$U_1: L + \beta \leftrightarrow (Al) + (Si) + \pi + T$	0	<0.5	-3	-1	-12	560-565
$U_2 : L + T \leftrightarrow (AI) + (Si) + \pi + \epsilon$	0	<0.5	-3	-1	-12	550-560
E: L $\leftrightarrow$ (Al) + (Si) + M + $\pi$ + $\epsilon$	0	<0.15	-3.5	-2	-13	-548
Al-Cu-Fe-Ni-Si						
$U_1 : L + \varepsilon \leftrightarrow (Al) + (Si) + \delta + T$	-16	<0.5	0	-4	-3	540-550
$U_2 : L + \delta \leftrightarrow (Al) + (Si) + \gamma + T$	-22	<0.5	0	-2	-4	530-540
$U_3: L + \beta \leftrightarrow (Al) + (Si) + \theta + T$	-28	<0.5	0	<1	-5	520-525
E: L $\leftrightarrow$ (Al) + (Si) + $\theta$ + T + $\gamma$	-30	<0.5	0	-1	-5	515-520

## 4. FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI SLITIN HLINÍKU

Interakci slitin hliníku včetně slitin pístových se slévárenskou formou je možno hodnotit na základě fyzikálně-chemických vlastností slitin hliníku, neboť procesy ve slévárenských formách jsou právě výsledkem této interakce. Z těchto důvodů jsou hodnoceny vlastnosti slévárenských slitin. Těmito vlastnostmi, které podstatně ovlivňují kvalitu odlitku, jsou zabíhavost, stahování, smršťování a s nimi související sklon k tvorbě trhlin a prasklin. Tyto a další vlastnosti ovlivňují jistou měrou i vlastnosti fyzikální, ke kterým patří:

Povrchové napětí taveniny  $\sigma$  [N.m<sup>-1</sup>], které má vliv především na zabíhavost slévárenských slitin, je důsledkem rovnoměrného působení sil na povrchu částice. Energie částic na povrchu taveniny je větší než energie částic uvnitř taveniny. Příklady hodnot povrchového napětí tavenin některých kovů a slitin jsou uvedeny v tabulce 4.1.

Prvek	Povrchové napětí při T <sub>tá</sub> .10 <sup>-3</sup> [N/m]
Al	914
Cu	1285
Fe	1872
Mg	559
Mn	1090
Мо	2250
Ni	1778
Si	865
Sn	544
Ti	1650
V	1950
W	2500
Zn	782

Tab. 4.1 Hodnoty povrchového napětí pro vybrané prvky [35]

Viskozita taveniny je vnitřní odpor taveniny proti proudění, vyvolaný vnitřním třením částic taveniny při jejich pohybu. Čím větší viskozita taveniny, tím hůře tavenina teče, tj. má menší tekutost. Rozlišujeme viskozitu dynamickou η [Pa.s], která udává poměr tangenciálního napětí působícího mezi částicemi taveniny ve směru jejího pohybu k velikosti rychlostního spádu kolmého k proudu, viz uvedené hodnoty dynamické

viskozity v tabulce 4.2. Vliv na rychlost proudění taveniny lépe popisuje viskozita kinematická v  $[m^2.s^{-1}]$ , která zohledňuje hustotu taveniny.

Materiál	Dynamická viskozita [Pa.s]
Al	1,34 při T <sub>tá</sub>
AlSi5Cu3Mn	1,3 při 894 K; 1,1 při 1073 K
AlSi7Mg	1,38 při 887 K; 1,1 při 1073 K
Bi	1,63 při T <sub>tá</sub>
Cd	2,6 při T <sub>tá</sub>
Cu	4,37 při T <sub>tá</sub>
Cu9,7Al (Al bronz)	6,3 při 1350 K; 5,2 při 1473 K
Fe	5,85 při T <sub>tá</sub>
Grafitická litina	14,3 při 1463 K; 14,0 při 1473 K; 10,5 při 1573 K
Mg	1,32 při T <sub>tá</sub>
Pb	2,61 při T <sub>tá</sub>
Sn	1,81 při T <sub>tá</sub>
Ti	5,2 při T <sub>tá</sub>
Tvárná litina	14,0 při 1451 K; 11,5 při 1573 K; 9,0 při 1673 K
Zn	3,85 při T <sub>tá</sub>
Zn4,5Al0,05Mg	3,5 při 673 K; 2,6 při 773 K

Tab. 4.2 Hodnoty dynamické viskozity pro vybrané materiály [35]

Objemové a lineární změny při tuhnutí a chladnutí: Tyto změny souvisí se vznikem staženin a pórovitosti v odlitku. Hliník a většina jeho slitin stahují více než jiné kovy. Opět jako u všech technologických vlastností nejméně stahují slitiny s přibližně eutektickým složením a větší objem staženin je u slitin s menším obsahem křemíku. Slitiny s malým intervalem tuhnutí mají sklon tvořit soustředěné staženiny a slitiny s velkým intervalem tuhnutí staženiny rozptýlené. Lineární smršťování tj. rozměrové změny, ke kterým dochází po ztuhnutí odlitku, jsou při odlévání slitin hliníku do kokil menší než při odlévání do pískových slévárenských forem. Obecně lze říci, že velmi dobrou slévatelnost vykazují ty kovové slitiny, které tuhnou při konstantní teplotě, tedy slitiny eutektické. Ze slitin hliníku tedy mají nejlepší zabíhavost slitiny s přibližně eutektickým složením jako např. AlSi12, AlSi10Mg nebo pístová slitina AlSi12CuNiMg. Podrobněji je tato problematika řešena v kap. 4.1, [36]

## 4.1 Lineární a objemové změny při tuhnutí a chladnutí

#### Porovnání vlastností kovů v tuhém a kapalném stavu

Ze zkoumání struktury roztavených kovů vyplývají jejich vlastnosti v roztaveném stavu, které během každého metalurgického procesu měníme podle požadovaných vlastností roztaveného kovu. Zvláštní význam zde mají změny vlastností spojené s odkysličením, odsířením, legováním, atd., které dále výrazně ovlivňují jak vlastnosti polotovarů, tak konečných výrobků.

Na rozdíl od roztavených kovů byly již vlastnosti kovů v tuhém stavu podrobně prozkoumány, což bylo usnadněno tím, že kovy v tuhém stavu mají atomy uspořádány v krystalické mřížce. Toto umožnilo jejich výzkum metodami rentgenové strukturní analýzy a dalšími. Řada vlastností kovů v tuhém stavu byla takto kvalitativně vysvětlena pomocí elektronové teorie a teorie dislokací.

Oproti tomu struktura metalurgických tavenin je na zkoumání podstatně složitější, neboť zde krystalová mřížka neexistuje. Určitý obraz o struktuře metalurgických tavenin nám poskytují výsledky zkoumání jejich fyzikálních vlastností v oblasti teplot nad bodem tání. Z porovnání latentních tepel tání kovů s jejich latentním teplem vypařování vyplývá, že se struktura kovů při tavení mění méně výrazně, než při jejich vypařování, neboť latentní tepla tání jsou asi 30 až 40 krát menší než latentní tepla vypařování. U kovů s těsným uspořádáním atomů v krystalické mřížce roste po roztavení jejich objem o 2 až 6 %, příklady objemových změn některých kovů jsou uvedeny v tabulce 4.3. Hustoty kovů v tuhém a roztaveném stavu svědčí o tom, že volný objem v tavenině je jen o málo větší než v tuhém stavu. Hodnoty tepelných kapacit tavenin kovů, což ukazuje, že tepelný pohyb atomů v roztaveném kovu je řádově stejný jako u kovů v tuhém stavu. Také hodnoty koeficientů teplotních roztažností, tepelné a také elektrické vodivosti se u kovů v tuhém a roztaveném stavu liší jen málo.

Motoriól	Toplata tání	Hustota [kg.m <sup>-3</sup> ]při	Hustota [kg.m <sup>-3</sup> ] při	Změna objemu
Material	Teplota tam	20[°C]	T <sub>tá</sub>	[%]
Al	660	2700	2380	5,1
Au	1063	18 280	17 380	5,47
Bi	271	9800	10 034	-3,32
Cd	321	8650	7998	4
Ce	787	6770	6868	-0,33
Со	1495	8180	7750	5,26
Cu	1083	8382	7938	5,3
Fe	1536	7265	7035	3,16
In	156	7310	7017	1,98
K	64	890	827	2,54
Li	181	534	528	2,74
Mg	651	1655	1590	4,1
Mn	1525	7210	5730	4,4
Na	97	968	927	2,6
Ni	1453	8210	7790	5,11
Pb	327	11 020	10 665	3,22
Rb	303	1532	1 200	2,2
Sb	631	6697	6493	0,64
Si	1410	2300	2525	-5
Sn	232	7260	6986	2,51
Zn	420	6646	6577	4,08

Tab. 4.3 Hodnoty změn objemu a hustot pro vybrané čisté kovy [17, 35]

### Tavení kovů

Tavení je přechod kovů a slitin nebo jakýchkoliv jiných látek z tuhého do kapalného stavu a jedná se tedy o fázovou přeměnu. Čisté kovy se taví při přesně definované teplotě, kterou nazýváme teplotou tání. Teplota tání závisí na tlaku a zůstává během tání konstantní a charakteristická pro každý kov. Tavení slitiny na rozdíl od čistého kovu, tedy jednosložkové látky, probíhá v určitém intervalu teplot, který je závislý na složení slitiny a vnějším tlaku. Při tavení dochází k náhlé změně vnitřní energie, objemu a entropie látek a ke změně jednotlivých fyzikálních vlastností. Tání kovů je spojeno se spotřebou tepla, jež je potřebné jednak k zeslabení meziatomových vazeb, jednak k určité objemové práci, spojené u většiny kovů se zvětšením objemu. Pohlcené teplo, které nezpůsobuje zvýšení teploty, nýbrž jen změnu skupenství z tuhého na kapalné, nazýváme latentním teplem tání. Toto teplo se rovněž uvolňuje při tuhnutí kovů.



Obr. 4-1 Schéma krystalizace čistého kovu a slitiny

Molární teplo tání představuje množství tepelné energie, kterou potřebujeme k roztavení jednoho molu látky za stálé teploty. Oproti tomu měrné teplo tání vztahujeme na jeden gram látky. Souvislost mezi molárním teplem tání a měrným teplem vyjadřujeme rovnicí:

$$\Delta H^{0}_{t\acute{a}} = l_{t\acute{a}} \times M \tag{4.1}$$

kde značí:  $\Delta H_{ta}^0$  – molární teplo tání,

 $l_{t\acute{a}}$  – měrné teplo tání,

M – molekulovou hmotnost.

Dále můžeme psát rovnici pro diferenciální kvocient udávající změnu teploty s tlakem:

$$\frac{dT}{dp} = \frac{T_{T\dot{a}} \times [V(l) - V(s)]}{\Delta H_{t\dot{a}}^0}$$
(4.2)

kde značí:  $\frac{dT}{dp}$  – diferenciální kvocient udávající změnu teploty tání s tlakem,

 $T_{T\acute{a}}$  – teplotu tání,

V(l)-V(s) – rozdíl molárních objemů v kapalném a tuhém stavu,

 $\Delta H_{ta}^0$  – molární teplo tání.

U většiny látek je objem v kapalném stavu větší než v tuhém stavu, a proto má diferenciální kvocient  $\frac{dT}{dp}$ , který udává změnu teploty tání s tlakem, kladnou hodnotu. Teplota tání tak u většiny látek se vzrůstajícím tlakem roste. Vzhledem k malému rozdílu molárních objemů látek v kapalném a tuhém stavu je zvýšení nebo snížení teploty tání s tlakem samo o sobě poměrně malé.

Teploty tání kovů se naopak výrazně mění s přítomností dalších prvků, přičemž jejich vliv závisí na jejich koncentraci, jejich atomové hmotnosti a jejich tendenci k odměšování a tuhnutí. Tendenci jednotlivých prvků k odměšování vyjadřujeme rovnovážným rozdělovacím koeficientem k, který se při dané teplotě určuje pomocí rovnovážných stavových diagramů:

$$k = \frac{/\% X/_s}{/\% X/_l} \tag{4.3}$$

kde značí: /%X/s – koncentraci uvažovaného prvku na čáře solidu,

 $/\%X_l$  – koncentraci uvažovaného prvku na čáře likvidu.



Obr. 4-2 Schéma rovnovážného diagramu pro k<1

Tento vztah platí zcela přesně pouze při rovnovážných podmínkách. Čím nižší je hodnota rovnovážného rozdělovacího koeficientu, tj. čím je větší rozdíl mezi koncentracemi prvku v tuhé a kapalné fázi, tím větší hodnotu má koeficient segregace a tím se ve větší míře odměšuje uvažovaný prvek v roztaveném kovu. V praxi se pro vyjádření tendence prvků k odměšování používá tzv. koeficient segregace (1-k). Tavení látek je také spojeno se vzrůstem entropie, neboť se snižuje stupeň uspořádání jejich základních strukturních částic.

#### Krystalizace a chladnutí kovů

Většina technických kovů se vyrábí pyrometalurgickou technikou, což znamená, že v určitém stádiu výroby prochází kov kapalným stavem. Rovněž druhotné zpracování kovů slévárenskou technologií předpokládá ohřev kovů do oblasti tavenin, aby bylo možno dopravit kov do dutiny slévárenské formy, kde ztuhne a vytvoří odlitek. Výsledné vlastnosti takto zpracovávaných kovů závisí na řadě faktorů, z nichž nejdůležitější je krystalizace. Krystalizací se přeměňuje kapalná fáze ve fázi tuhou. V důsledku přechodu kapalné fáze do fáze tuhé při krystalizaci kovů a jejich slitin vzniká průvodní jev - smršťování materiálu. Smršťováním se rozumí zmenšování objemu i rozměrů kovu vzhledem ke kapalné fázi (tavenině).

Krystalizace je tedy fázová přeměna s růstem řízeným přenosem tepla. Její mechanizmus je charakterizován vznikem stabilních zárodků a jejich následným růstem.

Základní podmínkou pro uskutečnění tohoto mechanizmu je velké přechlazení taveniny. Krystalizace čistých kovů může probíhat formou:

a) Homogenní nukleace, což je proces, kdy v tavenině vznikají shluky atomů, které mají vzájemnou polohu, jaká odpovídá jejich krystalickému uspořádání. Tyto shluky se mohou rozpadat nebo se stabilizovat a dále růst. Stabilní zárodky vznikají tehdy, je-li jejich volná entalpie nižší než entalpie kapalného stavu, tedy je-li poloměr zárodku větší než poloměr kritický.

Homogenní nukleace při krystalizaci kovů probíhá pouze při extrémně velkém přechlazení taveniny. Za běžných podmínek probíhá v taveninách nukleace heterogenní.

b) Heterogenní nukleace je na rozdíl od homogenní iniciována přítomností cizích povrchů v tavenině jako jsou stěny formy, úlomky pecní vyzdívky, částice očkovadla, atd. Je to tudíž proces energeticky výhodnější a změna volné entalpie spojená s tvorbou zárodku při heterogenní nukleaci je nižší než tatáž veličina při nukleaci homogenní. Heterogenní nukleace tedy usnadňuje proces krystalizace. U stěny formy dochází k nukleaci již při relativně malém přechlazení, okolo 0,98  $T_{tá}$ , zatímco homogenní nukleace vyžaduje přechlazení 0,8  $T_{tá}$ .

Jak již bylo popsáno výše, po vytvoření stabilního zárodku jednou ze dvou možných forem nukleace je zárodek schopen dalšího růstu, neboť jeho volná entalpie se snižuje s růstem jeho poloměru. Tento proces růstu je závislý na několika faktorech: velikosti přechlazení, difuzi, povrchovém napětí, atd. Z obrázku 4-3, který znázorňuje teplotní závislost volné entalpie dané látky v kapalném a tuhém stavu vyplývá, že nad teplotou krystalizace  $T_{tá}$  je tekutá fáze, resp. tavenina, oproti tuhé fázi stabilnější, zatím co při teplotách nižších je tomu naopak. V tavenině, která dosáhla teploty krystalizace, případně určitého přechlazení, vznikají v určitých mikroobjemech podmínky pro vznik krystalizačních zárodků tuhé fáze.



Obr. 4-3 Teplotní závislost volné entalpie

Jde-li o zárodek krychlového tvaru, lze změnu volné entalpie soustavy při vzniku krystalizačních zárodků tuhé fáze v tavenině vyjádřit rovnicí:

$$\Delta G = l^3 \times \frac{\rho}{M} \times \left(G_s^0 - G_L^0\right) + 6l^2 \sigma \tag{4.4}$$

kde značí: *l* – délku hrany krychlového krystalového zárodku,

 $\rho$ , *M* – hustotu a molekulovou hmotnost krystalového zárodku,

- $G_L^0$  molární volnou entalpii taveniny,
- $G_s^0$  molární volnou entalpii tuhé fáze,
- $\sigma$  mezifázové napětí mezi krystalovým zárodkem a taveninou.

Kritickou velikost zárodku *l<sub>krit</sub>*, jako délku hrany základní krychle lze odvodit:

$$l_{krit} = \frac{4\sigma T_{t\dot{a}}}{\Delta H_{t\dot{a}}^0 \times (T_{t\dot{a}} - T_p)} \times \frac{M}{\rho}$$
(4.5)

kde značí:  $\Delta H_{ta}^0$  – molární teplo tání,

 $T_{t\dot{a}}$  teplotu tání,

 $T_p$ - teplotu přechlazení, přičemž  $T_p < T_{tá}$ .

Z rovnice (4.5) vyplývá, že při dané  $T_{t\hat{a}}$ ,  $\Delta H^0_{t\hat{a}}$ , M a  $\rho$  bude kritický rozměr zárodku tím menší, čím větší bude přechlazení a čím bude menší mezifázové napětí.

Teoretickou teplotou krystalizace je teplota, při které je počet atomů přecházejících z taveniny na povrch zárodku roven počtu atomů přecházejících z povrchu zárodku do taveniny. Fázové rozhraní se v tomto stavu nepohybuje, je tedy v rovnovážném stacionárním stavu. Krystal může růst pouze do teploty, která je nižší než teoretická teplota krystalizace, protože pak je počet přeskoků atomů na povrch rostoucího krystalu větší. Tvar rostoucího krystalu je závislý na tepelných podmínkách v okolí fázového rozhraní. Obrázek 4-4 ukazuje potřebnou velikost zárodku, tzv. kritickou potřebnou k tomu, aby zárodek při daném přechlazení nezanikl.



Obr. 4-4 Změna volné entalpie při vzniku krystalizačních zárodků v tavenině

Růst probíhá z tohoto hlediska buď za pozitivního, nebo negativního teplotního gradientu taveniny. Uskutečňuje-li se růst podle pozitivního teplotního gradientu, je latentní teplo

tuhnutí z rozhranní tuhá fáze - tavenina odváděno tuhou fází. Je-li teplotní gradient taveniny negativní, bude latentní teplo tuhnutí odváděno jak tuhou fází, tak taveninou.

Analýza tepelných podmínek na rozhranní tavenina - rostoucí krystal poskytuje informace o typu krystalizace (dendritická, celulární). U vícesložkových systémů závisí přechlazení nejen na teplotě, ale i na chemickém složení. Typ krystalizace bude tedy záviset i na koncentraci přísad. Proces růstu spočívá v připojování jednotlivých atomů z taveniny na povrch krystalu. Pro silové připoutání atomu je výhodné, když je povrch krystalu členitý. Významně odlišné morfologie struktury, a s tím spojených rozdílů v mechanických vlastnostech, je možno dosáhnout tzv. řízenou krystalizací, což je ovlivňování průběhu krystalizace.

Zjemnění struktury lze dosáhnout zvýšením rychlosti nukleace, tj. zvýšením počtu krystalizačních zárodků. Významný vliv na rychlost nukleace má rozsah přechlazení. Vysokého přechlazení dosáhneme zvýšením rychlosti ochlazování taveniny. Zvýšení počtu zárodků lze také získat pomocí přidávání přísad do taveniny tzv. očkování, které vytvoří cizí částice pro heterogenní nukleaci. Jinou, doposud málo používanou metodou zjemňování zrna je vibrace formy při krystalizaci, kdy účinek tlakových vln zmenšuje kritický rozměr zárodku. V neposlední řadě lze takto usměrňovat růst zrn.

#### Lineární a objemové změny tuhnoucího a chladnoucího odlitku

Z výše uvedených skutečností vyplývá, že proces přechodu z kapalného stavu do tuhého je značně složitý a je doprovázen řadou změn, včetně změny objemu a lineárních rozměrů tuhnoucí a chladnoucí látky. Objem kovu je při dané teplotě a tlaku konstantní. Při normálním tlaku je objem kovu funkcí teploty. Měřítkem přírůstku objemu na stupeň zvýšení teploty je koeficient objemové roztažnosti:

$$\gamma = \frac{1}{V_0} \times \frac{\Delta V}{\Delta T} \tag{4.6}$$

kde značí:  $\gamma$  – koeficient objemové roztažnosti [K<sup>-1</sup>],

 $V_0$  – počáteční objem [m<sup>3</sup>],

 $\Delta V$  – změnu objemu [m<sup>3</sup>],

 $\Delta T$  – změnu teploty [K].

Se stoupající teplotou se plynule zvětšuje objem kovových materiálů spolu s poklesem jejich hustoty. Při změně skupenství se objem, tak jako další vlastnosti materiálů, mění skokově s dalším plynulým přírůstkem v tekutém stavu. Fyzikální proces změny objemu při změně teploty je vratný proces, tj. objem, který se zvětšuje při ohřevu, se při ochlazování vrátí do původní velikosti. Úbytek objemu při snížení teploty se nazývá smršťování, které lze rozdělit na smršťování a) v kapalném stavu,

b) při změně skupenství,

c) v tuhém stavu.

U slitin tuhnoucích při konstantní teplotě má závislost změny objemu na teplotě stejný průběh jako u čistých kovů. U slitin tuhnoucích v intervalu teplot nastává prudká změna objemu v intervalu mezi teplotami likvidu a solidu.

Smrštění odlitku vyrobeného z určité slitiny je odlišné od smrštění této slitiny, neboť smrštění slitiny je fyzikální vlastnost, kterou určuje fyzikální úbytek objemu při snížení teploty. Smrštění odlitku je závislé jak na smrštění slitiny, tak na technologických podmínkách při výrobě odlitku, jako je teplota a čas lití, intenzita odvodu tepla a konstrukce odlitku. Změny objemu při smrštění odlitku charakterizuje technologický úbytek objemu.

Objemové změny při tuhnutí a chladnutí odlitku lze v souvislosti s teplotním intervalem tedy rozdělit na:

a) objemové změny v tekutém stavu, tj. v intervalu mezi teplotou lití a teplotou likvidu,

b) objemové změny v intervalu tuhnutí, tj. v intervalu teploty likvidu a teploty solidu,

c) objemové (lineární) změny při chladnutí odlitku, tj. v intervalu teplot mezi teplotou počátku lineárního smršťování a teplotou okolí.

Výsledkem těchto objemových změn je vznik dutin (staženin makroskopických a mikroskopických rozměrů) v odlitku, zmenšení rozměrů odlitku a vznik vnitřních pnutí v odlitku.

#### Smršťování v tekutém stavu

K tomuto smrštění dochází při chladnutí taveniny z teploty ukončení lití na teplotu likvidu. Objemové změny v tomto teplotním intervalu se projevují poklesem hladiny taveniny vlivem gravitační síly, tj. zmenšením jednoho rozměru odlitku- výšky hladiny. Tuto fázi smrštění v kapalném stavu charakterizuje úbytek objemu  $\Delta V_L^{I}$  [m<sup>3</sup>]. Celá plocha hladiny klesá do té doby, dokud se na stěnách odlitku nevytvoří souvislá vrstva ztuhlého kovu až k povrchu hladiny. Od tohoto okamžiku se průřez klesající hladiny stále zužuje a roste rychlost klesání hladiny. V tomto okamžiku nastává úbytek objemu  $\Delta V_L^{II}$  [m<sup>3</sup>]. Hodnota celkového smrštění v kapalném stavu pak bude:

$$\Delta V_L = \Delta V_L^I + \Delta V_L^{II} = \gamma_L \times (T_{lif} - T_L) \times V_0 \tag{4.6}$$

kde značí:  $V_0$  – počáteční objem [m<sup>3</sup>],

 $\gamma_L$  – průměrnou hodnotu součinitele objemového smrštění

taveniny v rozsahu teplot  $T_{litf}$  až  $T_L$  [K<sup>-1</sup>].

Z tohoto vztahu vyplývá, že hodnota smrštění v kapalném stavu je přímo úměrná přehřátí taveniny nad teplotu likvidu a to znamená, že při výrobě odlitku lze hodnotu smrštění v kapalném stavu výrazně ovlivnit regulací teploty lití.

#### Smršťování v intervalu tuhnutí

Objemové změny při tuhnutí se projevují vznikem soustředěné staženiny vnitrodendritické a mezidendritické pórovitosti. Rozdělení objemových změn mezi uvedené dutiny je odvislé od morfologie tuhnutí slitiny a od intenzity chladnutí odlitku.

Smrštění odlitku při tuhnutí začíná vznikem prvních tuhých částic z taveniny na stěnách formy a končí ztuhnutím poslední kapky taveniny v tepelné ose odlitku. Při tuhnutí taveniny se vyskytují všechny druhy objemových změn současně. Při tuhnutí čistých kovů a slitin s nulovým intervalem tuhnutí, tj. při tuhnutí s plynulým postupem souvislého krystalizačního frontu, vzniká soustředěná staženina s objemem  $V_{st}$  [m<sup>3</sup>]. Staženina se začíná vytvářet tehdy, když na celé ploše líce formy ztuhne souvislá vrstva kovu, uzavírající uvnitř taveninu. Od tohoto okamžiku plynule probíhá:

- zmenšení objemu taveniny uzavřené mezi stěnami odlitku o hodnotu  $\Delta V_L^{II}$  [m<sup>3</sup>], což se projeví poklesem hladiny,

- zvětšení objemu tuhé fáze, tzv. narůstáním, a jeho postup k tepelné ose odlitku při současném zmenšení objemu o hodnotu  $\Delta V_{L-S}$  [m<sup>3</sup>] při fázové přeměně:

$$\Delta V_{L-S} = \gamma_S \times (T_L - T_S) \times V_0 \tag{4.7}$$

kde značí:  $V_0$  – počáteční objem [m<sup>3</sup>],

 $\gamma_s$  – průměrnou hodnotu součinitele objemového smrštění v intervalu

teplot 
$$T_L$$
 až  $T_S$  [K<sup>-1</sup>].

- zmenšení plochy klesající hladiny v důsledku postupu tuhé fáze k tepelné ose odlitku,

- smrštění ztuhlých částí při jejich ochlazování o hodnotu  $\Delta V_s$  [m<sup>3</sup>], které se projevuje zmenšením lineárních rozměrů. Zmenšení lineárních rozměrů ovlivňuje rozměry vznikajících dutin tím, že se smršťující vrstva vtlačuje do taveniny a zvyšuje její hladinu.

Výsledek uvedených procesů je znázorněn na obrázku 4-5, ze kterého vyplývá celkový objem soustředěné staženiny:

$$V_{ST} = \Delta V_L^{II} + \Delta V_{L-S} - \Delta V_S \ [m^3]$$
(4.8)



a) vytvoření souvislé tuhé vrstvy až k povrchu hladiny a začátek tvorby staženiny, b) pokles hladiny taveniny
 při soustavném zmenšování její plochy v důsledku růstu tuhé fáze, c) staženina ve ztuhlém odlitku, d)
 přemístění staženiny do nálitku.

#### Obr. 4-5 Schéma etap smršťování odlitku [15,16]

Z porovnání vztahů (4.7) a (4.8) vyplývá, že objem soustředěné staženiny v odlitku je větší než úbytek objemu při změně skupenství  $\Delta V_{L-S}$  [m<sup>3</sup>], liší se o hodnotu  $\Delta V_{L}^{II}$  [m<sup>3</sup>] a zároveň je menší o hodnotu  $\Delta V_{S}$  [m<sup>3</sup>]. Úbytek objemu v odlitku  $V_{ST}$  se nahradí taveninou z nálitku, která se může lehce přemísťovat.

Při tuhnutí slitiny s intervalem tuhnutí probíhají v podstatě ty samé procesy, ale úbytek objemu  $\Delta V_{L-S}$  [m<sup>3</sup>] se rozděluje mezi soustředěnou staženinu  $V_{ST}$ , mezidendritickou pórovitost  $V_{MD}$  a vnitrodendritickou pórovitost  $V_{VD}$ . Tedy:

$$\Delta V_{L-S} = V_{ST} + V_{MD} + V_{VD} \ [m^3]$$
(4.9)

Mezidendritické póry se vytvářejí při tuhnutí poloostrůvku taveniny uzavřené mezi dendrity. Vnitrodendritické póry vznikají při tuhnutí ostrůvku taveniny mezi větvemi dendritů. Mají velmi malé rozměry, a protože síly přilnavosti taveniny při těchto rozměrech převyšují gravitační síly působící na taveninu, nacházejí se v centrální části ostrůvku, viz obrázek 4-6.



a) schéma vzniku mezidendritického póru, b) schéma vzniku vnitrodendritického póru, 1)
 poloostrůvek taveniny, 2) ostrůvek taveniny

Obr. 4-6 Schéma vzniku pórů [15,16]

Rozsah dendritické pórovitosti udává hodnota  $V_D$  a je přímo závislá na šířce intervalu tuhnutí slitiny, tzn. čím širší interval tuhnutí, tím větší je rozsah dendritické pórovitosti. Tato skutečnost souvisí se schopností slitiny nahradit úbytek vlastního objemu při tuhnutí. Toto je umožněno schopností taveniny přefiltrovat se přes svoje dvoufázové pásmo, protože pokud se mají kompenzovat ztráty objemu v době tuhnutí, musí se tavenina transportovat do nejhlubší části dvoufázového pásma, a to vždy k souvislému povrchu tuhé fáze. Zvýšením intenzity ochlazování je možno na začátku tuhnutí výrazně zmenšit dvoufázové pásmo a tím rozsah dendritické pórovitosti.

Vnitřní zdravost odlitku se hodnotí poměrem  $\frac{V_{ST}}{\Delta V_{L-S}}$ . Čím víc se tento poměr blíží

k 1, tím je větší zdravost odlitku. Tento způsob hodnocení má svůj smysl, neboť odstranění dendritické pórovitosti z odlitku (kompenzace objemu  $V_D$ ), hlavně při objemovém tuhnutí, je těžší než kompenzace objemových ztrát  $V_{ST}$ , což souvisí se ztíženými podmínkami pro filtraci taveniny během tuhnutí  $\tau_{3-4}$ . Přesun taveniny do dvoufázového pásma působením kapilárních sil je poměrně intenzivní, pokud existuje volná tavenina ve středu odlitku. K izosolidu filtruje tavenina přes relativně úzké dvoufázové pásmo, jehož šířka  $\delta_{\tau}$  je v souladu s intervalem tuhnutí postupně klesá hladina taveniny v centrální části odlitku, kde se vytváří staženina. Současně k izosolidu působením kapilárních sil postupuje tavenina, jejíž část se spotřebuje u izosolidu na kompenzaci ztrát objemu smrštěním. Proto se do centrální části odlitku vrátí vždy méně taveniny, než se předtím přesunulo k izosolidu. Směr filtrace v této etapě (obrázek 4-7a) je protichůdný postupu tuhnutí. Rychlost filtrace je úměrná filtrační dráze  $\Delta L$ , tj. tloušť ce vertikálního pásma. Zvýšením intenzity ochlazování na začátku třetí etapy tuhnutí se zmenšuje  $\Delta L$ , čímž se zvyšuje intenzita filtrace.

Podmínky zásobování dvoufázového pásma tekutým kovem se prudce mění po spojení izolikvidů v tepelné ose odlitku (obrázek 4-7b), ke kterému dochází v průběhu tuhnutí  $\tau_{3-4}$ . Dvoufázové pásmo se vytvoří po celé délce odlitku, která je podstatně větší než tloušťka  $\delta_{\tau}$ . Hlavní směr filtrace taveniny je nyní rovnoběžný s tepelnou osou odlitku a tloušťka dvoufázového pásma z hlediska filtrace taveniny ztrácí svůj význam. Zvýšení intenzity ochlazování po dobu  $\tau_{3-4}$  je nežádoucí, protože se zkracuje čas filtrace.



a) po dobu tuhnutí  $t_3$  (horizontální šipky znázorňují směr filtrace, vertikální šipky znázorňují směr dosazování kovu z nálitku, b) po dobu ukončení  $\tau_3$  a na začátku  $\tau_4$  (vertikální šipka znázorňuje směr filtrace), c) zkrácení filtrační dráhy  $\Delta L$  při zvýšení usměrnění tuhnutí (vertikální šipka znázorňuje směr dosazování tuhnoucího odlitku taveninou).

Obr. 4-7 Změna filtrační dráhy  $\Delta L$  v průběhu tuhnutí odlitku [15,16]

Šířka dvoufázového pásma po spojení izolikvidů v tepelné ose odlitku je hlavním zdrojem dendritické pórovitosti ve ztuhlém odlitku. Představu o postupu tuhnutí odlitku po spojení izolikvidů poskytuje schéma na obrázku 4-8, které je možno použít i při výpočtu šířky pórovitého pásma v odlitku podle vztahu:

$$\delta = X \times \frac{\Delta T_{kr}}{T_L - T_{OP}} \times (1 - \frac{1}{Bi}) \times \frac{\rho_s - \rho_L}{\rho_L}$$
(4.10)

kde značí:  $\delta$  – šířku pórovitého pásma [m],

- X polovinu tloušťky stěny odlitku [m],
- $\Delta T_{KR}$  interval tuhnutí slitiny [K],
- $T_{OP}$  teplotu okolí [K],
- $\rho_s$  hustotu slitiny v tuhém stavu [kg.m<sup>-3</sup>],
- $\rho_L$  hustotu slitiny v tekutém stavu [kg.m<sup>-3</sup>],
- Bi-Biotovo kritérium:

$$Bi = \frac{\alpha_{k-f}}{\lambda_f} \times X \tag{4.11}$$

kde značí:  $\alpha_{k-f}$  – součinitel přestupu tepla [W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-1</sup>],

 $\lambda_f$  – tepelnou vodivost formy [W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>].

Na obrázku 4-8 jsou křivkami 1,2 a 3 znázorněné teplotní gradienty v průřezu odlitku po ukončení třetí a po dobu čtvrté etapy tuhnutí. Křivka 4 znázorňuje průběh chladnutí odlitku po ztuhnutí poslední kapky taveniny.

Teplotní poměry ve stěně odlitku vyjádřené křivkou 1, odpovídají času, ve kterém se teplota taveniny v tepelné ose snížila na teplotu likvidu, a stěnu odlitku tvoří ztuhlá vrstva s tloušťkou  $\xi_1$  a dvojité pásmo s tloušťkou  $\delta_1$ . Podíl tuhé fáze v dvoufázovém pásmu se zmenšuje směrem k tepelné ose odlitku. Dosazování tuhnoucí vrstvy se realizuje filtrací taveniny skrz vrstvu dvoufázového pásma vymezenou kolmicemi z průsečíku teploty začátku  $T_{zf}$  a teploty ukončení  $T_{kf}$  s křivkou 1. Teplotě  $T_{zf}$  odpovídá 30 až 40 % tuhé fáze v dvoufázovém pásmu. S pokročením tuhnutí, kterému odpovídá 70 až 80 % tuhé fáze v dvoufázovém pásmu. S pokročením tuhnutí, kterému odpovídá křivka 2, se zvětšuje tloušťka ztuhlé vrstvy  $\xi_2$  a též podíl tuhé fáze (na 30 až 40 %) v dvoufázovém pásmu v blízkosti tepelné osy (průsečík  $T_{zf}$  a křivky 2 je na tepelné ose odlitku). Filtrace ještě pokračuje, ale za velmi

ztížených podmínek. Pohyb taveniny se úplně zastaví při tepelném gradientu vyjádřeném křivkou 3. Teplotní interval  $T_{zf}$  - $T_S$  a křivka 3 vymezují tloušťku odlitku  $\delta_3$ , která ztuhne pórovitě.

Ve skutečnosti je šířka pórovitého pásma v odlitku užší, protože po dobu poklesu teploty z  $T_{zf}$  na  $T_{kf}$  ztuhne další vrstva zdravého kovu ve směru od stěny formy. Právě v tomto objemu ztuhne zdravě i vrstva odlitku vymezená intervalem  $T_{kf}$  - $T_S$ . Proto se rozptýlená pórovitost obyčejně projevuje v centrálních částech odlitku ve III. strukturní zóně. Při stejné intenzitě ochlazování je oblast zasažená pórovitostí tím větší, čím širší je interval tuhnutí slitiny.

Staženina po spojení izolikvidů už nezvětšuje svůj objem. Zbytková tavenina klesá mezi souvislou kostrou krystalů tvořících pevný povrch staženiny a vyplňuje jen blízké okolí pod ní. Proto je povrch staženin slitin tuhnoucích v intervalu teplot drsný a tvoří ho předčasně obnažené dendrity.

Odlitky ze slitin s úzkým intervalem tuhnutí např. hliníkové bronzy, mosazi nebo siluminy se složením blízkým eutektickému, vytvářejí při tuhnutí soustředěné staženiny velkých rozměrů. Při tuhnutí těchto slitin v pískové slévárenské formě se vytváří jen úzké dvoufázové pásmo, ve kterém nevzniká dendritická pórovitost. Odlitek zde tuhne i od spodu při určitém stupni usměrněnosti. Objemové změny se kompenzují dosazováním taveniny (příp. velmi pohyblivé taveniny s malým podílem tuhé fáze) z nálitku.

Význam dvoufázového pásma se prohlubuje při objemovém tuhnutí, tj. při tuhnutí odlitku ze slitiny s širokým intervalem krystalizace např. cínové bronzy, slitiny typu Al-Mg, Al-Cu a Mg-Al. Objemové změny při tuhnutí odlitku z těchto slitin jsou dané staženinou malého rozměru a poměrně rozsáhlou dendritickou pórovitostí.



X- polovina tloušťky stěny odlitku, křivky 1,2,3- teplotní gradienty ve stěně odlitku ve třech po sobě jdoucích fázích tuhnutí odlitku, křivka 4 značí teplotní gradient v odlitku po ztuhnutí poslední kapky taveniny,  $T_L$ - teplota likvidu,  $T_{zf}$  a  $T_{kf}$ - teploty začátku a konce filtrace,  $T_s$ - teplota solidu,  $T_{op}$ - teplota okolního prostředí, d- šířka pórovitého pásma, x- tloušťka ztuhlé vrstvy odlitku, l- tepelná vodivost formy, a-součinitel přestupu tepla z odlitku do stěny formy, a,b,c- tloušťka stěny odlitku odpovídající teplotnímu gradientu znázorněnému křivkami 1,2,3.

Obr. 4-1-8 Schéma pro výpočet šířky pórovitého pásma v odlitku [2]

Je třeba uvést, že i při objemovém tuhnutí přesun taveniny filtrací ve třetí etapě tuhnutí stačí na pokrytí objemových ztrát ve vnějších částech odlitku a tyto ztuhnou bez dendritické pórovitosti. Celý odlitek bude pórovitý, pokud se v okamžiku  $\tau_{3-4}$  vytvořily podmínky, kterým odpovídá  $\frac{\delta}{X} > 1$  (obrázek 4-7).

Nahrazování objemu  $V_D$  v tepelné ose odlitku pomocí nálitku při objemovém tuhnutí tudíž není účinné, neboť z nálitku se přemísťuje málo pohyblivá tavenina, nebo dokonce tavenina kašovitá (obrázek 4-9).



a) vytvoření "kaše" v celém objemu, b) klesání "kaše" při tuhnutí

Obr. 4-9 Schéma objemového tuhnutí ve třech po sobě jdoucích fázích [15,16]

Účinnějším způsobem potlačení rozsahu pórovitosti v odlitku je zvýšení stupně usměrněnosti tuhnutí, např. pomocí vložení vhodných chladítek.

Z uvedených skutečností vyplývá, že slévárenské materiály, resp. odlitky z nich, je třeba proti důsledkům těchto změn opatřovat vhodnými nálitky. Nálitek totiž plní svou funkci zásobníku tekutého kovu jen tehdy, pokud ztuhne později než odlitek a po dobu celého tuhnutí je schopný nahrazovat úbytek objemu v odlitku taveninou. Z ekonomického hlediska výroby je nutné použití nálitků takových velikostí, které při zabezpečení nahrazení objemových změn tuhnoucího odlitku mají po ztuhnutí stěnu s velmi malou tloušťkou. Účinnost nálitku lze podstatně zvýšit (a tím snížit jeho hmotnost) snížením intenzity jeho ochlazování např. použitím obalů nálitků s izolačními vlastnostmi nebo přímo použitím exotermických nálitků, doléváním kovu přes nálitek apod. Dalším velmi efektivním způsobem jak snížit hmotnost nálitku, je zvýšením stupně usměrněnosti tuhnutí, čehož je možno dosáhnout např. vhodným zaústěním zářezů, polohou odlitku ve formě, použitím chladítek, apod.

#### Smršťování odlitku při ochlazování

Smrštění odlitku v tuhém stavu se projevuje především změnou délkových rozměrů, a proto se označuje jako lineární smrštění, popř. tepelná dilatace. Pojem tepelná dilatace znamená souhrnnou změnu objemu (rozměrů) tuhé fáze v závislosti na teplotě, tj. při chladnutí a ohřevu. Význam smrštění při ochlazování je stejně důležitý jako význam

smrštění při tuhnutí, neboť určuje míru zmenšení odlitku oproti rozměrům formy a výrazně ovlivňuje velikost vnitřního napětí v odlitku.

Ke změně rozměrů odlitku při ochlazování dochází už v okamžiku vytvoření kostry s určitou pevností navzájem zaklíněných dendritů. Teplota, při níž se vytvoří tato kostra, se nachází v teplotním intervalu tuhnutí slitiny a je teplotou počátku lineárního smrštění  $T_{ZLS}$ . Po úplném ztuhnutí odlitku se plynule zmenšují jeho rozměry až do vychladnutí na teplotu okolního prostředí. Dilatace odlitku bez působení odporů se nazývá volná tepelná dilatace. Volná objemová dilatace je dána vztahem:

$$\Delta V_V = \gamma_S \times (T_{ZLS} - T_{OK}) \times V_0 [\text{m}^3]$$
(4.12)

kde značí:  $\gamma_s$  – průměrnou hodnotu součinitele objemové dilatace materiálu v daném

rozsahu teplot [K<sup>-1</sup>],

 $V_0$  – počáteční objem [m<sup>3</sup>].

a je spojená se změnou lineárních rozměrů přibližným vztahem:

$$\Delta V_V \cong 3\Delta l_V \,[\mathrm{m}^3] \tag{4.13}$$

kde značí:  $\Delta l_v$  – hodnotu úbytku rozměru odlitku [m].

Rozměr odlitku  $l_V$  po jeho volném smrštění lze vyjádřit vztahem:

$$l_{V} = l_{P} - \Delta l_{V} = l_{P} - l_{P} \times (T_{ZIS} - T_{OK}) \text{ [m]}$$
(4.14)

a dále lze psát vztah pro hodnotu relativní (poměrné) dilatace:

$$\varepsilon_{\rm v} = \frac{l_P - l_V}{l_P} \times 100 = \alpha \times (T_{ZLS} - T_{OK}) \times 100 \ [\%]$$
(4.15)

kde značí:  $l_P$  – počáteční rozměr odlitku při teplotě  $T_{ZLS}$ , který je roven

rozměru slévárenské formy [m],

 $l_V$ -rozměr odlitku po volné dilataci, tj. při teplotě  $T_{OK}$ , což je
teplota okolního prostředí,

 $\alpha$  – průměrnou hodnotu součinitele volného délkového smrštění

(volné dilatace) v intervalu teplot  $T_{ZLS}$  - $T_{OK}$  [K<sup>-1</sup>].

Skutečný rozměr odlitku, tj. rozměr naměřený na odlitku těsně po jeho uvolnění z formy, je odlišný od hodnoty  $l_V$ , podle vztahu (4.14) a zpravidla je větší. Vysvětluje se to tím, že po vytvoření kostry dendritů určující geometrický tvar odlitku (tj. od  $T_{ZLS}$ ), změna rozměrů odlitku probíhá při překonávání odporů působících proti smrštění. Smrštění odlitků při působení odporů je skutečné smrštění a označuje se jako brzděné smrštění nebo jako brzděná tepelná dilatace  $\varepsilon_B$ , přičemž  $\varepsilon_B \neq \varepsilon_V$ . Brzděné smršťování má za následek vznik vnitřních napětí v odlitku. [15,16]

#### 4.2 Tepelně-fyzikální vlastnosti slitin hliníku

Technologické vlastnosti kovů, tedy i hliníku a jeho slitin, jsou ovlivněny řadou vlastností, z nichž nejdůležitější je měrná tepelná kapacita, latentní krystalizační teplo, tepelná vodivost. Dalšími veličinami jsou tepelná roztažnost, teplota tavení, způsob tuhnutí, teplota lití kovu nebo slitiny, ale i druh a teplota formy, její tepelná vodivost a další vlastnosti. Všechny zmíněné vlastnosti jsou funkcí teploty a zjistit tuto funkční závislost není jednoduché, proto jsou tyto závislosti nejčastěji publikovány pro čistý hliník.

Latentní krystalizační teplo  $L_{KR}$  [J.kg<sup>-1</sup>] vyjadřuje množství tepla, které musí být dodáno nebo odebráno látce při změně skupenství. Uvolnění tohoto tepla se neprojevuje změnou teploty, neboť se spotřebuje na změnu skupenství. Příklady  $L_{KR}$  pro čisté kovy, viz tabulka 4.4.

Měrná tepelná kapacita c [J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>] udává množství tepla, které je potřeba dodat jednomu kilogramu látky, aby se její teplota zvýšila o jeden kelvin. S rostoucí teplotou měrná tepelná kapacita roste. Závislost měrné tepelné kapacity látek na teplotě je uvedena na obrázku 4-10a.

Materiál	Latentní krystalizační				
	teplo [J.kg <sup>-1</sup> ]				
Al	399 000				
Ag	105 000				
Au	64 000				
Cu	205 000				
Fe	289 000				
Grafitická litina	96 000				
Mg	368 000				
Mn	268 000				
Мо	289 000				
Ni	19 400				
Pb	23 000				
Si	1 926 000				
Sn	59 000				
Ti	58 500				
W	19 000				
Zn	118 000				

Tab. 4.4 Latentní krystalizační teplo materiálů [37]

Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  [W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>] udává pro určitý časový okamžik množství tepla, které projde jednotkou délky materiálu a vytvoří teplotní rozdíl jeden kelvin, resp. charakterizuje vedení tepla látkou ve směru teplotního gradientu. Tepelná vodivost s teplotou u většiny látek klesá, viz obrázek 4-10b.



Obr. 4-10a) Teplotní závislost měrné tepelné kapacity pro vybrané materiály, b) Teplotní závislost tepelné vodivosti vybraných materiálů [38]

Součinitel teplotní vodivosti *a*  $[m^2.s^{-1}]$  je měřítkem nestacionárních dějů a charakterizuje schopnost látky vyrovnávat teploty. Neustálenost tepelných dějů se vyznačuje změnou teplotního pole a teplotního obsahu sledované soustavy těles v závislosti na čase. Rychlost změny tepelných dějů v tělese je tedy přímo úměrná jeho tepelné vodivosti  $\lambda$  a nepřímo úměrná objemové teplené kapacitě c.p, [36].

# 5. VÝPOČTY TEPELNĚ-FYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ ČISTÉHO HLINÍKU

Tato kapitola se zabývá výpočtem termodynamických veličin čistého hliníku. Největší pozornost byla věnována přeměnám z tuhé do kapalné fáze tedy tání a krystalizaci čistého hliníku, přičemž nejdůležitějšími veličinami pro tuto fázovou přeměnu jsou teplota tání a latentní krystalizační teplo, které je spotřebováváno nebo uvolňováno danou soustavou během změny fáze. Pro tání platí podmínka  $\Delta G_{tání} = 0$  a toho lze využít při dosazení do vztahu pro výpočet Gibbsovy energie  $\Delta G_{tání} = \Delta H_{tání} - T.\Delta S_{tání}$  k výpočtu změny entropie při tání  $\Delta S_{tání}$ . Byly provedeny tyto výpočty:

- a) Výpočet změny molární entropie při tavení čistého hliníku
- b) Výpočet změny molární entalpie čistého hliníku pro případ jeho tání a dále byla stanovena tepelná energie potřebná k tavení 1kg čistého hliníku při této teplotě.
- c) Výpočet závislosti Gibbsovy energie na teplotě při tavení čistého hliníku při atmosférickém tlaku.
- d) Výpočet závislosti Gibbsovy energie na tlaku při tavení čistého hliníku při teplotě
   933 K.
- e) Výpočet závislosti Gibbsovy energie při tavení čistého hliníku na teplotě a tlaku.

#### 5.1 Výpočet změny entropie při tavení čistého hliníku

Jak bylo zmíněno v úvodu, výpočet této veličiny vychází ze vztahu:

$$\Delta S_{t\acute{a}n\acute{t}}^{0} = \frac{\Delta H_{t\acute{a}n\acute{t}}}{T_{t\acute{a}n\acute{t}}} = \frac{10460}{933}$$
(5.1)

 $\Delta S^{0}_{tani} = \underline{11,211} [J.mol^{-1}.K^{-1}]$ 

kde značí:  $\Delta S^{0}_{táni}$  – změnu entropie při tání,

 $\Delta H_{táni}$  – změnu entalpie při tání,

T<sub>tání</sub> – teplotu tání čistého hliníku.

Přepočet kilogramů na moly vychází ze vztahu:

$$n = \frac{m}{M} = \frac{1000}{26,981}$$
(5.2)
$$n = \frac{37,063}{1000} \text{ [mol]}$$

kde značí: n – počet molů,

m – hmotnost [g],

Změna entropie při tavení 1 kg čistého hliníku:

$$\Delta S = \Delta S_{táni}^0 \times n = 11,211 \times 37,063 \tag{5.3}$$

 $\Delta S = \frac{415,513}{[J.kg^{-1}.K^{-1}]}$ 

~

Ze vztahu (3.1) lze vyjádřit změnu entalpie čistého hliníku při teplotě tání jako:

$$\Delta H_{t\acute{a}n\acute{l}} = \Delta S^{0}_{t\acute{a}n\acute{l}} \times T_{t\acute{a}n\acute{l}} \tag{5.4}$$

#### 5.2 Výpočet změny molární entalpie při tavení čistého hliníku

Závislost změny entalpie na teplotě popisuje vztah:

$$\Delta H_T = H_T - H_{298} = 24,769 \times T - 447,71 \tag{5.5}$$

 $\Delta H = 22662$  [J.mol<sup>-1</sup>]

Ze znalosti rovnice (5.5) je možno provést výpočet množství tepla, které je potřeba dodat 1 kg čistého hliníku při jeho ohřevu z 25 °C (298 K) na jeho teplotu tání 660 °C (933 K):

$$\Delta h = h_{933} - h_{298} = 37,063 \times (24,769 \times 933 - 471,71) \tag{5.6}$$

 $\Delta h = 839023$  [J]

#### Výpočet molární entalpie čistého hliníku při jeho tavení

Tento výpočet vychází z integrace Kirchhoffovy rovnice, která vyjadřuje teplotní závislost změny molární entalpie za konstantního tlaku:

$$\left(\frac{d(\Delta H)}{dT}\right)_{P} = \Delta c_{P} \tag{5.7}$$

kde značí:  $d(\Delta H)$  – diferenciál přírůstku molární entalpie,

dT – diferenciál teploty,

 $\Delta c_p$  – změnu molární tepelné kapacity při konstantním tlaku.

Molární tepelná kapacita pro čistý hliník v tuhém stavu je uvedena v tabulkách a je platná v teplotním intervalu 298 až 933 K:

Al(s): 
$$c_p = 20,68 + 12,39.10^{-3} \times T^2 + 0.10^{-5} \times T^{-2} [J.mol^{-1}.K^{-1}]$$
 (5.8)

Pro čistý hliník v tuhém stavu je dále třeba určit konstantu d z dosazení (5.8) do (5.5):

$$H_{T} - H_{298} = 20,68 \times T + \frac{12,39}{2} \cdot 10^{-3} \times T^{2} - 0.10^{-5} \times T^{-1} + d$$

$$d = -20,68 \times T - \frac{12,39}{2} \cdot 10^{-3} \times T^{2} + 0.10^{-5} \times 298^{-1}$$

$$d = \underline{-6713} \text{ [J.mol}^{-1]}$$
(5.9)

Vztah (5.9) lze zapsat ve zjednodušeném tvaru:

$$H_T - H_{298} = 20,68 \times T + 6,195.10^{-3} \times T^2 - 6713$$
(5.10)

Do rovnice (5.10) dosadíme teplotu tání čistého hliníku 933 K a tak získáme hodnotu změny molární entalpie v intervalu 295 až 933 K:

$$H_{933} - H_{298} = 20,68 \times 933 + 6,195.10^{-3} \times 933^2 - 6713$$
  
 $H_{933} - H_{298} = \underline{17974} \text{ [J.mol}^{-1}\text{]}$ 

K této hodnotě je ještě třeba přičíst hodnotu změny molární entalpie tání ( $\Delta H_{táni}$ ), která je pro čistý hliník udávána 10460 [J.mol<sup>-1</sup>].

Pro roztavení 1 molu čistého hliníku je tedy třeba 28434 [J].

Přepočtem na kg dostáváme hodnotu entalpie pro roztavení 1 kg čistého hliníku:

28434 × 37,063= <u>1053854</u> [J].

#### Výpočet molární entalpie čistého hliníku při jeho přehřátí na teplotu lití

Molární tepelná kapacita pro čistý hliník v tekutém stavu je tabelována a je platná v teplotním intervalu 933 až 1546 K:

Al(1): 
$$c_p = 29.3 [J.mol^{-1}.K^{-1}]$$
 (5.11)

Diferenciál přírůstku molární entalpie d je pak roven 8731 [J.mol<sup>-1</sup>], rovnice pro změnu molární entalpie čistého hliníku v tekutém stavu pak má tvar:

$$H_T - H_{298} = 29.3 \times T - 8731 \tag{5.12}$$

Dosazením rovnice (3.12) lze stanovit změnu molární entalpie při teplotě přehřátí čistého hliníku na teplotu 725 °C (998 K), tedy obvyklou teplotu lití:

$$H_{998} - H_{298} = 29.3 \times 998 - 8731 \tag{5.13}$$

 $H_{998} - H_{298} = 20510$  [J.mol<sup>-1</sup>]

Hodnotu získanou z rovnice (3.13) lze přepočítat pro 1 kg čistého hliníku při jeho přehřátí na 725 °C:

20510 × 37,063= <u>760176</u> [J].





Obr. 5-1a) Závislost molární entalpie čistého hliníku na teplotě, b) Závislost molární entalpie čistého hliníku na teplotě (do teploty tání)

# 5.3 Výpočet závislosti Gibbsovy energie na teplotě při tavení čistého hliníku

Výpočet je prováděn za předpokladu konstantního atmosférického tlaku.

Tání hliníku lze vyjádřit rovnicí:

$$\left(\frac{\partial G_T}{\partial T}\right)_P = -S_T \tag{5.14}$$

Integrací tohoto vztahu (3.14) získáme závislost  $\Delta G_{táni}$  na teplotě při p= konst.:

$$\Delta G_{táni} = \int -\Delta S_{táni} \times dT \tag{5.15}$$

Je-li změna molární entropie konstantní po integraci získáváme vztah pro  $\Delta G_{táni}$ :

$$\Delta G_{t\acute{a}n\acute{l}} = -\Delta S_{t\acute{a}n\acute{l}} \times T + C \tag{5.16}$$

kde C značí integrační konstantu, kterou lze určit při podmínkách  $\Delta G_{tánf}=0$  při teplotě tání.

Dosazením do rovnice (3.16) dostáváme:

$$0 = -11,48 \times 933 + C$$

Výsledný tvar vztahu pro závislost  $\Delta G_{táni}$  na teplotě:

$$\Delta G_{tani} = -11,48 \times T + 10710,8 \tag{5.17}$$



Obr. 5-2 Teplotní závislost změny Gibbsovy energie čistého hliníku při konstantním tlaku

## 5.4 Výpočet závislosti Gibbsovy energie na tlaku při tavení čistého hliníku

Tento výpočet vychází z úvahy, že při tavení čistého hliníku (933 K) dochází ke změně molárního objemu, což je dáno rozdílnou hustotou taveniny ( $\rho_l$ = 2380 [kg.m<sup>-3</sup>]) a pevné fáze ( $\rho_s$ = 2700 [kg.m<sup>-3</sup>]). Tato změna činí  $\Delta V_{tánf}$ = 1,344.10<sup>-6</sup> [m<sup>3</sup>.mol<sup>-1</sup>] a zároveň lze předpokládat, že tato změna nezávisí na tlaku. Z tohoto lze odvodit vztah pro stanovení Gibbsovy energie:

$$\Delta G_T = V \times dP \tag{5.18}$$

Tento vztah po integraci má následující tvar:

$$\Delta G_{táni} = \int \Delta V \times dP \tag{5.19}$$

Je-li  $\Delta V$ = konst. získáme po integraci (3.19):

$$\Delta G_{t\acute{a}n\acute{l}} = \Delta V_{t\acute{a}n\acute{l}} \times P + C \tag{5.20}$$

Integrační konstantu C určíme z podmínky  $\Delta G_{tání} = 0$  při teplotě tání 933 K a tlaku 101 kPa z rovnice (3.20):

$$0=1,344.10^{-6} \times 101000 + C$$

#### Závislost Gibbsovy energie čistého hliníku na tlaku má pak tvar:

$$\Delta G_{táni} = 1,344.10^{-6} \times P - 0,136 \tag{5.21}$$



Obr. 5-3 Závislost Gibbsovy energie čistého hliníku na tlaku při konstantní teplotě

# 5.5 Výpočet závislosti Gibbsovy energie při tavení čistého hliníku na tlaku a teplotě

Stanovení této závislosti vychází z předpokladu, že změna molárního objemu čistého hliníku je při jeho teplotě tání 933 K rovna  $\Delta V_{tání} = 1,344.10^{-6} \text{ [m}^3.\text{mol}^{-1}\text{] a změna molární entropie je } \Delta S_{tání} = 11,48 \text{ [J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}\text{]:}$ 

$$d\Delta G_{t\acute{a}n\acute{t}} = \Delta V_{t\acute{a}n\acute{t}} \times dP - \Delta S_{t\acute{a}n\acute{t}} \times dT$$
(5.22)

Po integraci vztahu (3.22):

$$\Delta G_{táni} = \Delta V_{táni} \times P - \Delta S_{táni} \times T + C$$
(5.23)

kde značí:  $\Delta V_{táni}$  – změnu molárního objemu čistého hliníku při tání [m<sup>3</sup>.mol<sup>-1</sup>],

P-tlak [Pa],  $\Delta S_{táni} - změnu entropie čistého hliníku při tání [J.K<sup>-1</sup>.mol<sup>-1</sup>], T-teplotu [K],$ 

Integrační konstantu určíme dosazením do rovnice (3.23) za podmínek  $\Delta G_{tání} = 0$  při teplotě tání čistého hliníku 933 K a tlaku 101 kPa:

 $0{=}1{,}344.10^{{-}6}{\,\times\,}101000{\,-\,}11{,}48{\,\times\,}933{\,+\,}C$ 

C=<u>10710</u>

Závislost změny Gibbsovy energie na teplotě a tlaku pak má tvar:

$$\Delta G_{t\acute{a}n\acute{l}} = 1,344.10^{-6} \times P - 11,48 \times T + 10710 \text{ [J.mol}^{-1}\text{]}$$
(5.24)

Na základě rovnice (3.24) lze určit teplotu tání čistého hliníku při atmosférickém tlaku 101 kPa:

 $0 {=}\; 1{,}344.10^{{\text{-}6}} {\times}\; 101000 {-}\; 11{,}48 {\times}\; T {+}\; 10710$ 

 $T=T_{táni}=\underline{933} \text{ K}$ 

Obdobně lze určit dosazením do vztahu (3.24) tlak při teplotě tání čistého hliníku 933 K:

 $0 {=}\; 1{,}344.10^{{\text{-}6}} {\times}\, P {-}\; 11{,}48 {\times}\, 933 {+}\; 10710$ 

 $P = P_{táni} = 101000$  Pa

Současně lze vypočítat i teplotu tání čistého hliníku při tlaku 50 MPa jako je tlak při tlakovém lití hliníku:

$$0 = 1,344.10^{-6} \times 50000000 - 11,48 \times T + 10710$$

 $T=T_{táni}=939 \text{ K}$ 



Obr. 5-4 Závislost Gibbsovi energie na teplotě a tlaku

Výpočty byly provedeny na základě dat a hodnot uvedených v [38, 39, 40].

# 6. EXPERIMENTÁLNÍ SLEDOVÁNÍ SLÉVÁRENSKÝCH VLASTNOSTÍ VYBRANÝCH SLITIN HLINÍKU

V návaznosti na předchozí teoretické kapitoly disertační práce je tato kapitola zaměřena na výpočet tepel, která jsou nutná pro tavení, resp. přehřátí taveniny před odléváním. Hlavním slévárenským materiálem, kterému je věnována značná pozornost je slitina AlSi12CuNiMg, která je určena pro výrobu pístů spalovacích motorů. Dále byla zkoumána slitina AlSi12 a z ryze experimentálních důvodů také čistý hliník, jako základní prvek tvořící tyto slitiny.

V další části této kapitoly byl zkoumán čas tuhnutí odlitků speciální konstrukce, vyrobených z těchto slitin. K tomuto účelu bylo použito měřicí zařízení, které je popsané v další části této kapitoly.

Chemické složení slitiny AlSi12CuNiMg podle materiálového listu je uvedeno v tabulce 6.1. Chemické složení této slitiny, slitiny AlSi12 a čistého hliníku Al99,5, které byly používány při těchto experimentech je v tabulce 6.2. Tato chemická složení byla stanovena pomocí EDX analýzy (Energy Dispersive X-ray) na skenovacím elektronovém mikroskopu HITACHI SU-70 s detektorem INCA PentaFETx3 a vyhodnocovacím software INCA. Toto vybavení jsem použil v rámci vykonané zahraniční odborné stáže na univerzitě v Linköpingu ve Švédsku. Tavenina pro experimenty byla připravena v odporové elektrické peci PEK-1, tavena v grafitovém kelímku a před odlitím metalurgicky ošetřena rafinační solí T3 a následně byla z povrchu odstraněna struska a ostatní nečistoty. Teplota slitiny byla před odléváním zjišťována digitálním teploměrem GTH 1150 s termočlánkovým elementem typu K (NiCr-Ni).

Tab. 6.1 Chemické slože	ní použité slitiny	AlSi12CuNiMg dle	e materiálového listu
-------------------------	--------------------	------------------	-----------------------

	Chemické složení [hm.%]											
Al	Al Si Cu Mg Mn Fe Zn Ni Sn											
83,09	12,1	1,025	1,15	0,45	0,07	0	2,1	< 0,001				
Cr	Ti	Ca	Pb	Р	Na	Sr	Sb	Be				
0,0006	0,01	< 0,001	0,001	< 0,0005	0,0007	< 0,001	< 0,001	0,0002				

Cliting	Chemické složení [hm. %]										
Sittila	Al	Si	Mg	S	Ti	Mn	Fe	Ni	Cu	Zbytek	
Al 99,5	99,10	0,13	0,11	0,14	0	0,01	0,31	0,04	0,09	0,07	
AlSi12	77,15	12,07	0,07	0	0,03	3,01	7,15	0,05	0,15	0,32	
AlSi12CuNiMg	77,47	11,51	0,94	0	0,07	0,15	1,68	5,99	1,94	0,25	

Tab. 6.2 Chemické složení použitých slévárenských slitin hliníku zjištěné pomocí EDX analýzy

## 6.1 Výpočet množství tepla potřebného k přehřátí vybraných slitin hliníku

Tavení kovů je jednou ze základních slévárenských operací. Rozhodující vlastností pro tavení kovů je tavitelnost, která se hodnotí na základě teploty tání a je ovlivňována dalšími fyzikálními vlastnostmi materiálu (měrná tepelná kapacita a latentní krystalizační teplo a tepelná vodivost). Pro snadnou tavitelnost je důležité, aby hodnoty těchto veličin byly pokud možno co nejnižší. Jak je obecně známo, podle teploty tání se rozlišují kovy a jejich slitiny s nízkou, střední a vysokou teplotou tání. Současně je nutno brát v úvahu, že při tavení dochází také k reakcím mezi tekutým kovem a okolní atmosférou, což zhoršuje a komplikuje proces tavení. Výpočet množství tepla potřebného k roztavení a přehřátí určitého množství materiálu je možno provést podle vztahu:

$$Q = m \times [c_L \times (T_{liff} - T_L) + L_{KR} + c_S \times (T_S - T_{20})]$$
(6.1)

kde značí: m – hmotnost taveného kovu [kg];

 $c_L$  – měrnou tepelnou kapacitu v kapalném stavu [J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>];

T<sub>lití</sub> - T<sub>L</sub> - rozdíl teplot lití a likvidu taveného materiálu [°C];

L<sub>KR</sub> – latentní krystalizační teplo [J.kg<sup>-1</sup>];

 $c_{s}$  – měrnou tepelnou kapacitu v tuhém stavu [J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>];

 $T_S$  -  $T_{20}$  – rozdíl teploty solidu taveného materiálu a teploty okolí [°C].

K výpočtu byly použity tepelně-fyzikální hodnoty čistého hliníku a slitin AlSi12 a AlSi12CuNiMg uvedené v tabulce 6.3.

Materiál	c <sub>L</sub> [J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	c <sub>S</sub> [J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	L <sub>KR</sub> [J.kg <sup>-1</sup> ]	Т <sub>L</sub> [°С]	T <sub>S</sub> [°C]	Zdroj
Al 99,5	1289	897	397000	660	660	[41]
AlSi12	1131	1080	513000	560 <sup>*)</sup>	560 <sup>*)</sup>	[41], [25]
AlSi12CuNiMg	1050	760	500000	565	557	[42]

Tab. 6.3 Tepelně- fyzikální vlastnosti použitých slitin

Poznámka:  $c_L$ - měrná tepelná kapacita při teplotě likvidu,  $c_S$ - měrná tepelná kapacita při teplotě solidu,  $L_{KR}$ - latentní krystalizační teplo tání,  $T_L$ - teplota likvidu,  $T_S$ - teplota solidu; <sup>\*)</sup> teploty likvidu a solidu po modifikaci slitiny AlSi12.

V tabulce 6.4 jsou uvedeny teploty likvidu a solidu odlévaných slévárenských materiálů, které jsou známé z fyzikálních tabulek a současně také byly potvrzeny na základě prováděných experimentálních měření v rámci řešení této disertační práce.

Tab. 6.4 Hodnoty teplot likvidu a solidu daných materiálů odečtené z grafických závislostí

Materiál	Forma	T <sub>L</sub> [°C]	<b>T</b> <sub>S</sub> [°C]	Průměrná hodnota T <sub>L</sub> [°C]	Průměrná hodnota T <sub>S</sub> [°C]	
Al 99,5	Kov	-	-		655	
	CT	658	656	657		
	Písek	661	657			
	Kov	564	559			
AlSi12	CT	561	557	570	564	
	Písek	543	543			
AlSi12CuNiMg	Kov	571	565			
	СТ	572	567	569	567	
	Písek	565	562			

Teplota byla měřena při tuhnutí odlitku jednoduchého tvaru (27x10x157 mm) v jeho tepelné ose. K tomuto účelu bylo použito měřicí zařízení, které je uvedeno na obr. 7-5, resp. 7-6. Dutina formy je otevřená a zčásti je tvořena vyměnitelnými příložkami. Slévárenské slitiny a čitý hliník byly odlévány z teploty lití 725 °C, 700 °C a 675 °C. Naměřené časové závislosti teploty v tepelné ose odlitků z uvedených slitin a typů příložek, resp. materiálu formy jsou uvedeny na obr. 6-1. Z těchto závislostí byly odečteny teploty likvidu a solidu daného materiálu. Průměrné hodnoty těchto teplot uvádí tabulka 6.4.



a) Al 99,5, b) AlSi12, c) AlSi12CuNiMg.

Obr. 6-1 Grafické závislosti teploty na čase pro vybrané slévárenské slitiny

V tabulkách 6.5 až 6.7 jsou uvedena množství tepla potřebného pro přehřátí různého množství daných kovů vypočtených podle vztahu (6.1) a na obr. 6-2 až 6-4 jsou k nim příslušné grafické závislosti. Tyto hodnoty jsou vypočítány pro ohřátí, resp. přehřátí vybraných slitin AlSi12CuNiMg, AlSi12 a čistého hliníku Al99,5 od teploty 600 °C do teploty 750 °C pro hmotnost vsázky 1 až 1000 kg.

Teplota	Hmotnost vsázky [kg]											
[ 0]	1	5	10	20	30	50	100	500	1000			
600	949210	4746050	9492100	18984200	28476300	47460500	94921000	474605000	949210000			
610	959710	4798550	9597100	19194200	28791300	47985500	95971000	479855000	959710000			
620	970210	4851050	9702100	19404200	29106300	48510500	97021000	485105000	970210000			
630	980710	4903550	9807100	19614200	29421300	49035500	98071000	490355000	980710000			
640	991210	4956050	9912100	19824200	29736300	49560500	99121000	495605000	991210000			
650	1001710	5008550	10017100	20034200	30051300	50085500	100171000	500855000	1001710000			
660	1012210	5061050	10122100	20244200	30366300	50610500	101221000	506105000	1012210000			
670	1022710	5113550	10227100	20454200	30681300	51135500	102271000	511355000	1022710000			
680	1033210	5166050	10332100	20664200	30996300	51660500	103321000	516605000	1033210000			
690	1043710	5218550	10437100	20874200	31311300	52185500	104371000	521855000	1043710000			
700	1054210	5271050	10542100	21084200	31626300	52710500	105421000	527105000	1054210000			
710	1064710	5323550	10647100	21294200	31941300	53235500	106471000	532355000	1064710000			
720	1075210	5376050	10752100	21504200	32256300	53760500	107521000	537605000	1075210000			
730	1085710	5428550	10857100	21714200	32571300	54285500	108571000	542855000	1085710000			
740	1096210	5481050	10962100	21924200	32886300	54810500	109621000	548105000	1096210000			
750	1106710	5533550	11067100	22134200	33201300	55335500	110671000	553355000	1106710000			

Tab. 6.5 Te	plo potřebné	k přehřátí	slitiny	AlSi12CuNiMg
-------------	--------------	------------	---------	--------------



Obr. 6-2 Grafická závislost tepla potřebného k přehřátí různého množství slitiny AlSi12CuNiMg

Teplota	Hmotnost vsázky [kg]											
[0]	1	5	10	20	30	50	100	500	1000			
600	1141440	5707200	11414400	22828800	34243200	57072000	114144000	570720000	1141440000			
610	1152750	5763750	11527500	23055000	34582500	57637500	115275000	576375000	1152750000			
620	1164060	5820300	11640600	23281200	34921800	58203000	116406000	582030000	1164060000			
630	1175370	5876850	11753700	23507400	35261100	58768500	117537000	587685000	1175370000			
640	1186680	5933400	11866800	23733600	35600400	59334000	118668000	593340000	1186680000			
650	1197990	5989950	11979900	23959800	35939700	59899500	119799000	598995000	1197990000			
660	1209300	6046500	12093000	24186000	36279000	60465000	120930000	604650000	1209300000			
670	1220610	6103050	12206100	24412200	36618300	61030500	122061000	610305000	1220610000			
680	1231920	6159600	12319200	24638400	36957600	61596000	123192000	615960000	1231920000			
690	1243230	6216150	12432300	24864600	37296900	62161500	124323000	621615000	1243230000			
700	1254540	6272700	12545400	25090800	37636200	62727000	125454000	627270000	1254540000			
710	1265850	6329250	12658500	25317000	37975500	63292500	126585000	632925000	1265850000			
720	1277160	6385800	12771600	25543200	38314800	63858000	127716000	638580000	1277160000			
730	1288470	6442350	12884700	25769400	38654100	64423500	128847000	644235000	1288470000			
740	1299780	6498900	12997800	25995600	38993400	64989000	129978000	649890000	1299780000			
750	1311090	6555450	13110900	26221800	39332700	65554500	131109000	655545000	1311090000			

Tab. 6.6	Teplo	potřebné	k přehřátí	slitiny	AlSi12
----------	-------	----------	------------	---------	--------



Obr. 6-3 Grafická závislost tepla potřebného k přehřátí různého množství slitiny AlSi12

Teplota	Hmotnost vsázky [kg]												
[ ~]	1	5	10	20	30	50	100	500	1000				
600	893740	4468700	8937400	17874800	26812200	44687000	89374000	446870000	893740000				
610	906630	4533150	9066300	18132600	27198900	45331500	90663000	453315000	906630000				
620	919520	4597600	9195200	18390400	27585600	45976000	91952000	459760000	919520000				
630	932410	4662050	9324100	18648200	27972300	46620500	93241000	466205000	932410000				
640	945300	4726500	9453000	18906000	28359000	47265000	94530000	472650000	945300000				
650	958190	4790950	9581900	19163800	28745700	47909500	95819000	479095000	958190000				
660	971080	4855400	9710800	19421600	29132400	48554000	97108000	485540000	971080000				
670	983970	4919850	9839700	19679400	29519100	49198500	98397000	491985000	983970000				
680	996860	4984300	9968600	19937200	29905800	49843000	99686000	498430000	996860000				
690	1009750	5048750	10097500	20195000	30292500	50487500	100975000	504875000	1009750000				
700	1022640	5113200	10226400	20452800	30679200	51132000	102264000	511320000	1022640000				
710	1035530	5177650	10355300	20710600	31065900	51776500	103553000	517765000	1035530000				
720	1048420	5242100	10484200	20968400	31452600	52421000	104842000	524210000	1048420000				
730	1061310	5306550	10613100	21226200	31839300	53065500	106131000	530655000	1061310000				
740	1074200	5371000	10742000	21484000	32226000	53710000	107420000	537100000	1074200000				
750	1087090	5435450	10870900	21741800	32612700	54354500	108709000	543545000	1087090000				

Tab. 6.7 Teplo potřebné k přehřátí čistého hliníku Al 99,5



Obr. 6-4 Grafická závislost tepla potřebného k přehřátí různého množství čistého hliníku Al99,5

Pro porovnání náročnosti tavení jednotlivých slévárenských slitin je v tabulce 6.8 uvedeno množství tepla potřebné k přehřátí 5 kg vybraného materiálu na různé teploty. Obr. 6-5 ukazuje grafickou závislost množství tepla v porovnání pro jednotlivé materiály.

Teplota	Materiál										
	Čistý zinek	AlSi9Cu3	Mosaz	ZnAl4	AlSi10	ZnAl4Cu3					
400	1280830	3814800	1241610	1282430	3911085	1333450					
420	1331030	3923800	1289610	1326030	4018085	1378950					
440	1381230	4032800	1337610	1369630	4125085	1424450					
460	1431430	4141800	1385610	1413230	4232085	1469950					
480	1481630	4250800	1433610	1456830	4339085	1515450					
500	1531830	4359800	1481610	1500430	4446085	1560950					
520	1582030	4468800	1529610	1544030	4553085	1606450					
540	1632230	4577800	1577610	1587630	4660085	1651950					
560	1682430	4686800	1625610	1631230	4767085	1697450					
580	1732630	4795800	1673610	1674830	4874085	1742950					
600	1782830	4904800	1721610	1718430	4981085	1788450					
620	1833030	5013800	1769610	1762030	5088085	1833950					
640	1883230	5122800	1817610	1805630	5195085	1879450					
660	1933430	5231800	1865610	1849230	5302085	1924950					
680	1983630	5340800	1913610	1892830	5409085	1970450					
700	2033830	5449800	1961610	1936430	5516085	2015950					
720	2084030	5558800	2009610	1980030	5623085	2061450					
740	2134230	5667800	2057610	2023630	5730085	2106950					
760	2184430	5776800	2105610	2067230	5837085	2152450					

#### Tab. 6.8 Teplo potřebné k přehřátí 5 kg vybraných materiálů



Obr. 6-5a Grafická závislost spotřebovaného tepla k přehřátí 5 kg dané slitiny na danou teplotu



Obr. 6-5b Detail grafické závislosti z obrázku 6-5a

## 6.1.1 Vyhodnocení množství tepla potřebného k přehřátí vybraných slitin hliníku

V této kapitole byla sledována tavitelnost a teploty likvidu a solidu slévárenských slitin hliníku a čistého hliníku. Tavitelnost byla sledována i u dalších slévárenských materiálů. Z provedených výpočtů a experimentálních měření lze vyvodit tyto dílčí závěry:

1. Tavitelnost čistého hliníku i ostatních materiálů je silně závislá na teplotě tání kovu, jeho tepelné kapacitě a latentním krystalizačním teple. Tavitelnost byla sledována na základě výpočtu s využitím publikovaných hodnot fyzikálně tepelných vlastností. Hliníkové slitiny patří mezi neželezné kovy s vyšší teplotou tání, která se pohybuje v intervalu 550 až 660 °C. Latentní krystalizační teplo slitin hliníku je poměrně vysoké, pohybuje se okolo 500 kJ.kg<sup>-1</sup>, a proto dodávané teplo pro roztavení těchto slitin je vyšší než pro jiné používané slévárenské materiály, viz obr. 6-5, např. zinek. Avšak pro roztavení slitin hliníku je třeba delšího času, neboť tyto slitiny mají díky vysoké tepelné vodivosti, cca. 250 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>, tendenci dodávané teplo rozvádět. Pro přehřátí 5 kg čistého hliníku na teplotu 720 °C je třeba 5242100 J tepla. Slitinám AlSi12 a AlSi12CuNiMg je třeba dodat 6385800 a 5376050 J tepla. U slitin zinku je třeba např. čistému zinku k přehřátí jeho stejného množství na teplotu 720 °C dodat 2084030 J a pro zinkovou slitinu ZnAl4 je to 1980030 J. Množství dodaného tepla pro slitiny zinku je tato hodnota tedy podstatně nižší a jak již bylo uvedeno, díky nižší tepelné vodivosti, cca. 100 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>, trvá tavení slitin

zinku kratší dobu. Vypočtené hodnoty pro jiná množství uvedených slitin a ostatní vybrané slévárenské materiály jsou uvedeny v tabulkách 6.5 až 6.8 a grafické závislosti v jim odpovídajících obr. 6-2 až 6-5.

2. Teploty likvidu a solidu pro zkoumané materiály byly zjištěny na základě experimentálních měření. Měření teploty byla prováděna v tepelné ose odlitku ve tvaru desky, resp. tvaru "I" s rozměry 27 x 10 x 157 mm z dané slitiny, který byl odléván do různých slévárenských formovacích materiálů, resp. slévárenských forem. Tyto materiály byly kovová forma, forma z CT směsi tvrzené vodním sklem a forma z pískové formovací směsi s bentonitovým pojivem, které byly tvořeny příložkami z těchto materiálů na použitém měřícím zařízení. Z těchto měření byly získány grafické závislosti pro jednotlivé slitiny a formovací materiály uvedené na obr. 6.1. Z těchto závislostí teplota-čas byly odečteny hodnoty teplot likvidu a solidu pro použité slitiny. V porovnání s hodnotami uvedenými v literatuře jsou tyto neměřené hodnoty vesměs nižší, pro čistý hliník byla stanovena průměrná hodnota teploty likvidu 657 °C a teploty solidu 655 °C. Pro slitiny AlSi12 a AlSi12CuNiMg byly stanoveny teploty likvidu 570 °C a 569 °C a teploty solidu 564 °C a 567 °C, viz tabulka 6.4, opět jako průměrné hodnoty ze všech měření.

#### 6.2 Zjišťování času tuhnutí odlitků ze slitin hliníku

Tato kapitola disertační práce byla zaměřena na sledování času tuhnutí odlitků tvaru "I", resp. desky z výše uvedených slitin. Jak je obecně známo, čas tuhnutí je závislý na typu slévárenské formy, na teplotě jejího předehřevu, přehřátí taveniny a charakteru odlévaného materiálu. Pro tyto experimentální účely bylo použito již zmíněné měřicí zařízení, viz obr. 7-5, pro sledování časových závislostí teplot v tepelné ose příslušného odlitku (27x10x157 mm, nebo 7x10x157 mm). Do otevřené dutiny formy byly po metalurgickém ošetření a změření teploty lití odlity slitiny AlSi12, AlSi12CuNiMg a čistý hliník. Z naměřených časových závislostí byla u každé použité slévárenské slitiny odečtena teplota likvidu, teplota solidu a příslušný čas jejich dosažení. Teploty likvidu a solidu pro použité materiály byly naměřeny v průměru pro AlSi12CuNiMg:  $T_{lik}$ = 569 °C a  $T_{sol}$ = 567 °C, AlSi12:  $T_{lik}$ = 570 °C a  $T_{sol}$ = 564 °C a pro Al99,5:  $T_{lik}$ = 657 °C a  $T_{sol}$ = 655 °C. Rozdílem daných časů byl spočítán čas tuhnutí odlitků. V tabulce 6.9 jsou uvedeny časy tuhnutí měřených odlitků pro jednotlivé zkoumané slitiny a materiály slévárenských forem.

Materiál	Velikost dříku	Teplota	Slitina, t <sub>tuh</sub> [s]			
formy	odlitku [mm]	lití [°C]	AlSi12CuNiMg	AlSi12	A199,5	
	7x10x157	725	_	—	3,3	
Ocel	7x10x157	700	-	_	_	
	7x10x157	675	—	_	_	
	7x10x157	725	20,4	10,8	_	
CT směs	7x10x157	700	-	_	_	
	7x10x157	675	_	_	_	
Písek	7x10x157	725	24,8	_	_	
	7x10x157	700	19,6	_	_	
	7x10x157	675	—	_	_	
	27x10x157	725	19,2	38,4	4,4	
Ocel	27x10x157	700	31,2	28,8	3,6	
	27x10x157	675	14,4	28,8	_	
CT směs	27x10x157	725	41,8	55,2	_	
	27x10x157	700	41,1	46,8	_	
	27x10x157	675	39,6	50,4	_	
Písek	27x10x157	725	41,6	_	_	
	27x10x157	700	39,8	57,6	_	
	27x10x157	675	35,8	_	_	

Tab. 6.9 Časy tuhnutí zkoumaných materiálů v závislosti na materiálu slévárenské formy

Grafická závislost získaných časů tuhnutí zkoumaných odlitků při různém typu použité slévárenské formy je uvedena na obr. 6-6.



Ocel,7- ocelová forma, tloušťka dříku 7 mm; Ocel,27- ocelová forma tloušťka dříku 27 mm Obr. 6-6 Časy tuhnutí odlitků v jednotlivých typech forem

Čas tuhnutí je závislý kromě použité slévárenské formy i na teplotě jejího předehřevu, a také na teplotě lití dané slitiny. Jak již bylo uvedeno, pro každé provedené měření byla u dané slévárenské slitiny odečtena teplota likvidu a solidu a k nim zaznamenán příslušný čas jejich dosažení, z jejichž rozdílu získáme čas tuhnutí dané slitiny. V tabulce 6.10 jsou uvedeny časy tuhnutí měřených odlitků pro jednotlivé zkoumané slitiny, pro předem stanovené teploty lití 725 °C, 700 °C a 675 °C. Obr. 6-7 ukazuje grafickou závislost časů tuhnutí zkoumaných odlitků ze slitin AlSi12CuNiMg, AlSi12 a čistého hliníku Al99,5 při různé teplotě lití.

Teplota lití	Velikost lota lití dříku Materiál		Slitina, t <sub>tuh</sub> [s]			
[°C]	odlitku [mm]	formy	AlSi12CuNiMg	AlSi12	A199,5	
	7x10x157	Ocel	—	—	3,3	
	7x10x157	CT směs	20,4	10,8	_	
725	7x10x157	Písek	24,8	_	—	
125	27x10x157	Ocel	19,2	38,4	4,4	
	27x10x157	CT směs	41,8	55,2	—	
	27x10x157	Písek	41,6	_	_	
	7x10x157	Ocel	_	_	_	
	7x10x157	CT směs	_	_	_	
700	7x10x157	Písek	19,6	_	_	
	27x10x157	Ocel	31,2	28,8	3,6	
	27x10x157	CT směs	41,1	46,8	_	
	27x10x157	Písek	39,8	57,6	_	
	7x10x157	Ocel	_	_	_	
	7x10x157	CT směs	_	_	_	
675	7x10x157	Písek	-	—	_	
0/5	27x10x157	Ocel	14,4	28,8	_	
	27x10x157	CT směs	39,6	50,4	_	
	27x10x157	Písek	35,8	_	_	

Tab. 6.10 Časy tuhnutí pro jednotlivé slitiny v závislosti na teplotě lití



O,7- ocelová forma, tloušťka dříku 7 mm; O,27- ocelová forma tloušťka dříku 27 mm

Obr. 6-7 Grafická závislost časů tuhnutí na teplotě lití slitin

Proces tuhnutí je závislý i na tloušťce stěny odlitku. Z odečtených hodnot byl u jednotlivých slitin AlSi12CuNiMg, AlSi12 a Al99,5 stanoven čas tuhnutí odlitků ve formách s různou tloušťkou stěny odlitku. Obr. 6-8 ukazuje grafickou závislost časů tuhnutí zkoumaných odlitků ze slitin AlSi12CuNiMg, AlSi12 a čistého hliníku Al99,5 při různé velikosti dříků zkušebních odlitků.



O,725,7- ocelová forma, teplota lití 725 °C, tloušťka dříku 7 mm

Obr. 6-8 Čas tuhnutí odlitků ve formách s různou tloušťkou stěny odlitku

Ze zjištěných časů tuhnutí odlitků resp. z hodnoty času dosažení teploty solidu byla stanovena konstanta tuhnutí pro odlitek tvaru desky, jejíž hodnoty jsou uvedeny v tabulce 6.11. Tato konstanta byla vypočítána na základě vztahu:

$$k_D = \frac{T_D}{\sqrt{t_s}} \tag{6.2}$$

kde značí:  $k_D$  – konstantu tuhnutí odlitku tvaru desky [m.s<sup>-1/2</sup>];

T<sub>D</sub> – tloušťku desky [m];

t<sub>s</sub> – čas dosažení teploty solidu [s].

Tab. 6.11 Průměrné hodnoty konstanty tuhnutí pro sledované materiály

Materiál	Tloušťka dříku	Teplota	Slitina, Konstanta tuhnutí [m.s <sup>-1/2</sup> ]			
formy	odlitku [mm]	lití [°C]	AlSi12CuNiMg	AlSi12	A199,5	
	7x10x157	725	0,0021	_	0,0030	
Ocel	7x10x157	700	_	_	_	
	7x10x157	675	_	_	_	
	7x10x157	725	0,0014	0,0016	_	
CT směs	7x10x157	700	_	_	_	
	7x10x157	675	_	_	-	
Písek	7x10x157	725	0,0013	_	_	
	7x10x157	700	0,0015	_	_	
	7x10x157	675	_	_	_	
	27x10x157	725	0,0055	0,0041	0,0101	
Ocel	27x10x157	700	0,0046	0,0045	0,0110	
	27x10x157	675	0,0061	0,0047	_	
	27x10x157	725	0,0039	0,0034	_	
CT směs	27x10x157	700	0,0041	0,0035	_	
	27x10x157	675	0,0041	0,0036	0,0142	
Písek	27x10x157	725	0,0039	_	_	
	27x10x157	700	0,0041	0,0034	_	
	27x10x157	675	0,0043	_	_	

#### 6.2.1 Vyhodnocení času tuhnutí odlitků ze slitin hliníku

Tato kapitola se zabývala sledováním času tuhnutí slévárenských slitin hliníku a čistého hliníku. Byla taktéž počítána konstanta tuhnutí těchto materiálů. Z provedených výpočtů a experimentálních měření lze vyvodit tyto dílčí závěry:

1. Výsledky obsažené v tabulce 6.9, resp. získané závislosti, viz obr. 6-6, ve všech případech nepotvrzují teoretické předpoklady o tuhnutí odlitků. Ze získaných výsledků totiž vyplývá, že nejdéle tuhnou odlitky ve formách z CT směsi s křemenným ostřivem a vodním sklem tvrzené CO<sub>2</sub>, což je způsobeno pravděpodobně tím, že bylo použito velké množství CO<sub>2</sub> k vytvrzení CT směsi, které způsobilo její nadměrné vysušení. Tím je způsobeno, že tato forma vykazuje poměrně nízkou hodnotu součinitele tepelné akumulace než použitá forma z pískové směsi. Kovové formy díky své vysoké tepelné vodivosti i hustotě lépe odvádí a akumulují teplo z tuhnoucího odlitku než formy pískové a z CT směsi. Ze získaných hodnot je patrné, že čas tuhnutí čistého hliníku je kratší než čas tuhnutí slitin hliníku. Nejdelší čas tuhnutí 57,6 s, vykazuje odlitek s tloušťkou dříku 27 mm ze slitiny AlSi12 litý do formy z CT směsi z teploty 725 °C. Naopak nejkratší čas vykazuje čistý hliník litý do ocelové formy. Z tabulky a grafické závislosti je patrno, že při takto relativně malých rozdílech rozměrů odlitků jsou časy tuhnutí rozdílné jen minimálně, avšak stále platí a výsledky to potvrzují, že záleží na použitém typu formy, byť při stejných podmínkách odlévání.

**2.** Při porovnávání doby tuhnutí odlitků v závislosti na teplotě lití slitiny je z grafické závislosti na obr. 6-7 vidět, že nejdéle tuhnou odlitky ze slitiny AlSi12 a to při všech teplotách lití, následované slitinou AlSi12CuNiMg a nejkratší časy tuhnutí vykazuje čistý hliník Al99,5. Průměrné hodnoty časů tuhnutí jsou pro slitinu AlSi12 při teplotách lití 725 °C 55,2 s, při teplotě 700 °C je to 44,4s a při 675 °C 39,6 s. Nejdéle tuhnou odlitky ze slitiny AlSi12 z teploty lití 725 °C. Pro slitinu AlSi12CuNiMg byly zjištěny průměrné hodnoty časů tuhnutí pro jednotlivé teploty lití, pro 725 °C hodnota 32,9 s, pro 700 °C hodnota 29,9 s a pro 675 °C 29,6 s. Hodnoty časů tuhnutí, resp. jejich průměrné hodnoty pro čistý hliník Al99,5 byly zjištěny pro 725 °C hodnota 3,9 s, z teploty lití 700 °C hodnota 3,6 s a pro 675 °C nebyl čas tuhnutí naměřen. Při sledování celkové průměrné doby tuhnutí odlitků v jednotlivých formách je vidět, že odlitky, které byly odlity z vyšší teploty lití, tuhnou déle. Ze získaných hodnot je patrné, že čas tuhnutí čistého hliníku je kratší než čas tuhnutí slitin hliníku pro všechny měřené teploty lití.

**3.** Měření časů tuhnutí v závislosti na tloušťce stěny odlitku přineslo očekávané výsledky a to takové, že odlitky s menší tloušťkou stěny odlitku tuhnou rychleji než ty s tloušťkou větší. Pro jednotlivé zkoumané slitiny odlité do formy s velikostí dříku odlitku 7 mm byly určeny tyto průměrné doby tuhnutí, pro AlSi12CuNiMg 21,6 s, AlSi12 10,8 s a pro čistý hliník Al99,5 3,3 s. Pro odlitky s tloušťkou stěny 27 mm byly naměřeny tyto průměrné hodnoty časů tuhnutí, pro AlSi12CuNiMg 33,8 s, pro AlSi12 43,7 s a pro Al99,5 4,0 s. Z průměrných hodnot a grafické závislosti na obr. 6-8 vyplývá, že nejrychleji tuhne čistý hliník ve formách, kde má odlitek tloušťku stěny 7 mm a naopak nejdéle tuhnou odlitky ze slitiny AlSi12 ve formách s rozměrem dříku odlitku 27mm.

#### 6.3 Sledování zabíhavosti zkoumaných slitin

Tato kapitola disertační práce se zabývá sledováním zabíhavosti použitých slitin, tj. slitiny pro výrobu pístů spalovacích motorů AlSi12CuNiMg, slitiny AlSi12 a čistého hliníku Al99,5. Sledování zabíhavosti bylo prováděno na základě poznatků o viskozitě a povrchovém napětí tavenin a o chování tavenin jako Newtonovských kapalin uvedených v kap. 4. Zabíhavost materiálu je v podstatě tekutost jeho taveniny v reálné slévárenské formě a je to tedy schopnost materiálů, resp. jeho taveniny, vyplňovat dutinu formy. Je to jedna z nejdůležitějších slévárenských vlastností kovů, která podmiňuje jejich slévatelnost. Zabíhavost jako technologická vlastnost, je tedy závislá na vlastnostech odlévané slitiny a vlastnostech použité slévárenské formy jako jsou: teplota odlévané slitiny, interval tuhnutí slitiny, vtoková soustava formy a především vlastnostech slévárenské formy, z nichž nejdůležitější je její ochlazovací účinek, tj. součinitel tepelné akumulace formy.

Ke sledování zabíhavosti zkoumaných slitin byla použita spirálová zkouška s využitím Curryho spirály, tj. zkouška s neproměnným průřezem, která byla zaformována do slévárenské formy vyrobené z pískové formovací směsi s křemenným ostřivem a bentonitovým pojivem Sabenil. Pro každou slitinu byly provedeny 3 experimentální odlití do takto zhotovené slévárenské formy z teploty lití 725 °C, z čehož vyplývá, že byla zkoumána praktická zabíhavost. Taveniny materiálů AlSi12CuNiMg, AlSi12 a Al99,5 byly připraveny v elektrické odporové peci (PEK-1) a taveny v grafitovém kelímku. Před odlitím byly taveniny metalurgicky ošetřeny rafinační solí T3 a teplota odlévané slitiny byla změřena digitálním teploměrem s termočlánkem typu K. Na obr. 6-9 je uvedeno

schéma použité Curryho spirály a pohled na slévárenskou formu se zaformovanou Curryho spirálou. Obr. 6-10 uvádí fotografii získaných výsledků zkoušky praktické zabíhavosti.



Obr. 6-9 Schéma Curryho spirály a písková forma se zaformovanou spirálou



a) Čistý hliník Al99,5; b) Slitina AlSi12CuNiMg; c) Slitina AlSi12

Obr. 6-10 Fotografie spirál získaných při experimentálním měření zabíhavosti pomocí Curryho spirály

V tabulce 6.12 jsou uvedeny naměřené hodnoty praktické zabíhavosti a této tabulce odpovídá obr. 6-11, který uvádí závislost zabíhavosti na použité slévárenské slitině.

Materiál	Praktická za	Průměr [mm]		
AlSi12CuNiMg	760	800	790	780
AlSi12	790	830	810	810
A199,5	550	570	570	560

Tab. 6.12 Naměřené hodnoty praktické zabíhavosti pro zkoumané materiály



Obr. 6-11 Zabíhavost zkoumaných slitin v závislosti na obsahu křemíku

#### 6.3.1 Vyhodnocení zkoušek zabíhavosti

Ze získaných hodnot praktické zabíhavosti zkoumaných slitin AlSi12CuNiMg, AlSi12 a čistého hliníku Al99,5 uvedených v této kapitole je možno konstatovat, že výsledky naplňují předpoklady tj. že nejvyšší zabíhavost při teplotě lití 725 °C má eutektická slitina AlSi12, průměrná hodnota 810 mm následovaná slitinou AlSi12CuNiMg, 78 mm a nejnižší zabíhavost z těchto materiálů má čistý hliník Al99,5 s průměrnou hodnotou 56 mm.

# 7. SLEDOVÁNÍ DILATAČNÍCH VLASTNOSTÍ SLITIN HLINÍKU PŘI TUHNUTÍ A CHLADNUTÍ ODLITKŮ TVARU DESKY METODOU BRŽDĚNÉHO SMRŠŤOVÁNÍ

V souladu s cíli disertační práce bylo provedeno sledování dilatačních vlastností vybraných slitin hliníku při jejich tuhnutí a chladnutí dvěma metodami, které bylo realizováno na základě experimentálních měření.

První metoda, které se věnuje tato kapitola, využívá pro zjištění dilatačních změn tzv. brzděné smršťování odlitku. Druhá metoda využívá také speciální měřící zařízení, ovšem toto zařízení pracuje na jiném principu, viz kap. 8. Jako zkoumané slitiny byly pro první metodu vybrány výše uvedené materiály Al 99,5, AlSi12 a AlSi12CuNiMg. Pro experimenty byl v tomto případě použit odlitek deskovitého tvaru písmene "I", odlévaný do třech typů slévárenských forem z různých teplot lití a odlitky měly dvě tloušťky stěn, resp. dříku odlitku. Formy byly vyrobeny z kovu (ocel 11 500), z CT směsi tvrzené vodním sklem a z pískové formovací směsi s křemenným ostřivem a bentonitovým pojivem. Dilatometrické analýzy byly prováděny na měřícím zařízení navrženém a zkonstruovaném na katedře Strojírenské technologie, Technické univerzity v Liberci a měření probíhalo v dílnách a laboratořích katedry Strojírenské technologie, Technické univerzity v Liberci.

### 7.1 Výpočet lineárních rozměrových změn odlitku tvaru desky

Před vlastním měřením dilatačních změn odlitků deskovitého tvaru o rozměrech 7 a 27x10x157mm byl nejdříve proveden výpočet smrštění odlitku tvaru desky, viz obr. 7-1. Předpokladem výpočtu lineárního smrštění bylo použití tabelovaných hodnot součinitele lineární smrštivosti sledovaných materiálů a velikosti lineárního smrštění, viz tabulka 7.1. Výpočet byl proveden pro délku deskovitého odlitku od 10 do 110 mm na základě vztahu:

$$\Delta l = x \times l \tag{7.1}$$

kde značí: Δl – smrštění odlitku [mm];

x – velikost lineárního smrštění odlitku [%];

l – délku odlitku [mm].



Obr. 7-1 Schéma smrštění odlitku tvaru desky

Z této rovnice (7.1) lze odvodit vztah pro výpočet lineárního smrštění s využitím součinitele teplotní smrštivosti odlitku:

$$\Delta l = l_0 \times \alpha \times (T_2 - T_1) \tag{7.2}$$

kde značí: Δl – smrštění odlitku [mm];

 $\alpha$  – součinitel teplotní smrštivosti materiálu [K<sup>-1</sup>];

l0 – počáteční délku odlitku [mm];

 $T_2$ - $T_1$  – teplotní interval dilatace [°C].

Tab. 7.1 Hodnoty součinitele teplotní smrštivosti a lineárního smrštění pro použité materiály

Materiál	α.10 <sup>-5</sup> [K <sup>-1</sup> ]	x [%]	Zdroj
Al 99,5	2,22	2,5	[37]
AlSi12	2,04	1,2	[43]
AlSi12CuNiMg	1,90	1,1	[44]

Obr. 7-2 ukazuje závislost dilatace odlitku na jeho délce určenou podle rovnice (7.1) a na obr. 7-3 je uvedena táž závislost vypočítaná podle vztahu (7.2) a vztažená k teplotě solidu, viz tabulka 7.3, tj. teplotní rozdíl je  $T_s$ -20 °C, neboť vztah (7.1) neuvažuje teplotu, avšak smrštění x [%] se udává pro lineární změny při chladnutí odlitku.

Délka	Lineární smrštění [mm]				
odlitku [mm]	Al 99,5	AlSi12	AlSi12CuNiMg		
10	-0,25	-0,12	-0,11		
15	-0,38	-0,18	-0,17		
20	-0,50	-0,24	-0,22		
25	-0,63	-0,30	-0,28		
30	-0,75	-0,36	-0,33		
35	-0,88	-0,42	-0,39		
40	-1,00	-0,48	-0,44		
45	-1,13	-0,54	-0,50		
50	-1,25	-0,60	-0,55		
55	-1,38	-0,66	-0,61		
60	-1,50	-0,72	-0,66		
65	-1,63	-0,78	-0,72		
70	-1,75	-0,84	-0,77		
75	-1,88	-0,90	-0,83		
80	-2,00	-0,96	-0,88		
85	-2,13	-1,02	-0,94		
90	-2,25	-1,08	-0,99		
95	-2,38	-1,14	-1,05		
100	-2,50	-1,20	-1,10		
105	-2,63	-1,26	-1,16		
110	-2,75	-1,32	-1,21		

Tab. 7.2 Hodnoty lineárního smrštění odlitků vypočítané na základě vztahu (7.1)





Délka	Lineární smrštění [mm]				
odlitku [mm]	Al 99,5	AlSi12	AlSi12CuNiMg		
10	-0,14	-0,11	-0,09		
15	-0,21	-0,17	-0,14		
20	-0,28	-0,23	-0,19		
25	-0,36	-0,28	-0,23		
30	-0,43	-0,34	-0,28		
35	-0,50	-0,40	-0,32		
40	-0,57	-0,45	-0,37		
45	-0,64	-0,51	-0,42		
50	-0,71	-0,57	-0,46		
55	-0,78	-0,62	-0,51		
60	-0,85	-0,68	-0,56		
65	-0,92	-0,73	-0,60		
70	-0,99	-0,79	-0,65		
75	-1,07	-0,85	-0,69		
80	-1,14	-0,90	-0,74		
85	-1,21	-0,96	-0,79		
90	-1,28	-1,02	-0,83		
95	-1,35	-1,07	-0,88		
100	-1,42	-1,13	-0,93		
105	-1,49	-1,19	-0,97		
110	-1,56	-1,24	-1,02		

Tab. 7.3 Hodnoty lineárního smrštění odlitků vypočítané na základě vztahu (7.2)



Obr. 7-3 Závislost lineárního smrštění hliníku a vybraných slitin hliníku na délce odlitku podle vztahu (7.2)



Obr. 7-4 Porovnání výsledků dilatačích změn při použití vztahů (7.1) a (7.2)

#### 7.2 Měření dilatačních změn při tuhnutí a chladnutí odlitků

Dilatační vlastnosti slitin hliníku při jejich tuhnutí a chladnutí je možno sledovat pomocí zkušebního zařízení pro sledování dilatačních změn při brzděném smršťování. Toto zařízení bylo zkonstruováno a je k dispozici na Katedře strojírenské technologie, viz obr. 7-5 a 7-6. Na zařízení byla provedena konstrukční změna, která umožnila sledování dilatačních vlastností vybrané slitiny pomocí indukčního snímače při různých podmínkách tuhnutí a chladnutí, resp. podmínkách odlévání do různých materiálů slévárenských forem. S tímto zařízením je propojen dilatometr, který je déle napojen na počítač a celá soustava je napájena zdrojem stabilizovaného napětí. Zařízení je schopno zaznamenávat časový průběh dilatačních změn a teploty.

#### 7.2.1 Popis měřícího zařízení

Použité měřící zařízení fungující na principu brzděného smršťování odlitků se skládá ze tří základních částí 1) měřícího rámu, 2) indukčního snímače a 3) dilatometru s PC pro záznam naměřených dat, viz schéma na obr. 7-5. První částí je měřící rám, který obsahuje dutinu slévárenské formy o hloubce 10 mm a délce 157 mm ve tvaru písmene "I", který má na jedné straně pevnou čelist a na druhé straně přechází v drážku. K této dutině z obou jejích podélných stran přiléhají dvě vyměnitelné vymezující příložky

s obdélníkovým půdorysem, které je možno zhotovit z různých formovacích materiálů jako je ocel, CT směs, nebo písková formovací směs, a zároveň lze takto i měnit tloušťku dříku odlitku na 7 nebo 27 mm. Do podélné osy tvarové desky je do drážky vsazena pohyblivá tvarová čelist, která se volně pohybuje v drážce této dutiny a konec této čelisti je opatřen táhlem z křemenné trubičky, které prochází příložkou a je vedeno dvěma stavitelnými hroty a břitem. Konec táhla je opatřen magnetickou spojkou. Druhou částí je příložka základové desky, do které jsou připevněny dvě vodicí tyče, na které je nasazena objímka indukčního spínače pro snímání dilatačních změn při tuhnutí a chladnutí odlitku ve tvarové dutině. V objímce, která leží v podélné ose táhla, je otvor pro ustavení indukčního snímače, jehož pracovní čidlo je zakončeno rovnou ploškou z feromagnetické oceli. Indukční snímač je propojen přes sběrnici dat vybavenou paralelním A/D převodníkem s dilatometrem, který tvoří třetí základní část měřícího zařízení. Skládá se z PC se software, který byl součástí dilatometru pro registraci dilatačních změn a teplot a dilatometru polské výroby CRYSTALDIAGRAPH PC-4T2L, viz obr. 7-6, který slouží k přenosu dat mezi měřícím rámem a počítačem. Sběrnice dat je připojena přes počítač s monitorem k regulátoru vstupního napětí. Teplota tuhnoucího a chladnoucího odlitku je měřena termočlánkem NiCr-Ni (typ K) v místě předpokládané tepelné osy měřeného odlitku v dutině formy.



1- pevná čelist a měřící rám, 2- vyměnitelná příložka, 3- dutina, 4- pohyblivá čelist, 5- táhlo, 6základní deska, 7- magnet, 8- indukční snímač

Obr. 7-5 Schéma měřícího zařízení pro sledování dilatačních změn

při brzděném smršťování


Obr. 7-6 Použitý dilatometr polské výroby spolu s PC

Na obr. 7-7 je fotografie měřícího zařízení v průběhu měření a obr. 7-8 uvádí průběh dilatačních změn a teploty pístové slitiny odlévané do dutiny formy tvořené příložkami z CT směsi s vyhodnocovanými dilatačními charakteristikami.



Obr. 7-7 Pohled na měřící zařízení

# 7.2.2 Charakteristika slévárenských forem použitých pro experimenty

Pro experimenty v této části práce byly použity tři druhy slévárenských forem a to forma kovová, forma vyrobená z CT směsi s vodním sklem tvrzená CO<sub>2</sub> a forma z pískové formovací směsi s křemenným ostřivem a bentonitovým pojivem, které byly tvořeny příložkami osazenými na měřícím zařízení. Tyto rozdílné druhy forem byly použity z důvodu zjištění vlivu materiálu formy a jeho odvodu tepla právě na dilatační vlastnosti a výsledné rozměry odlitku. Písty spalovacích motorů se odlévají gravitačně do kovových forem, ale lze použít i jádra, či při kusové výrobě je odlévat do pískové slévárenské formy, a proto byl zkoumán vliv i těchto materiálů. Kovová forma má vysokou akumulační schopnost a teplotní vodivost, proto je schopna teplo z materiálu odebrat rychleji než formy z ostatních použitých materiálů a proto materiál slévárenské formy výrazně ovlivňuje dilatační změn při tuhnutí a chladnutí odlitků.

Pro experimenty byly tedy použity formy:

1) Kovové formy, resp. kovová forma byla vytvořena použitím ocelových příložek na formování dříku odlitku tvaru "I" z materiálu 11 500, o rozměrech 7 a 27 mm x 10 mm x 157 mm, čehož se dosáhlo použitím ocelových příložek z materiálu 11 500 s tloušťkou 13 a 23 mm.

2) Formy z CT směsi byly použity pro zjištění vlivu materiálu případných jader na dilatační vlastnosti zkoumaných slitin. Příložky pro formy z CT směsi byly vytvořeny křemenným ostřivem a vodním sklem tvrzeným  $CO_2$  s rozměry stejnými jako pro příložky kovové. Dutina výsledné složené formy opět měla rozměry 7 a 27x10x 157 mm. V tabulce 7.4 je uvedeno složení použité formovací CT směsi.

	Vlastnosti formovací směsi						
Použitá směs	Charakteristika směsi	Hustota [kg.m <sup>-3</sup> ]	Pevr v tla [M]	nost aku Pa]	Prodyšno [j.p.SI]	ost 	Střední velikost zrna d <sub>50</sub> [mm]
CT-SiO <sub>2</sub>	4 % vodního skla (m=2,4)	1517	0,8	32	468,4		0,27
Směrodatná odchylka (s)	křemenné ostřivo Střeleč TS2. vytyrzeno	16,03	0,0	36	6,99		0,007
Variační koeficient (v)	CO <sub>2</sub>	0,010	0,044		0,014		0,025
Tepelně fyzikální vlastnosti forem							
CT-SiO <sub>2</sub>	$\begin{tabular}{lllllllllllllllllllllllllllllllllll$	Měrná tepelná kapacita formy c <sub>F</sub> [J. kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]		lná Tepelná vodivost λ <sub>i</sub> [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>		T f	eplotní vodivost ormy a <sub>F</sub> [m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]

Tab. 7.4 Vlastnosti použité CT směsi pro výrobu forem pro tyto experimenty

	1169	0,82	924,8	7,09.10 <sup>-7</sup>
Směrodatná odchylka (s)	11,66	0,036	75,69	1,00.10 <sup>-7</sup>
Variační koeficient (v)	0,010	0,044	0,082	0,140

3) Formy z pískové formovací směsi byly tvořeny křemenným ostřivem a bentonitovým pojivem Sabenil. Příložky měly rozměry shodné jako pro oba předchozí formovací materiály a byly vyrobeny pěchováním této směsi přímo v dutině formující odlitek tak, aby výsledné rozměry formy byly 7 a 27 mm x 157 mm.

# 7.2.3 Popis provedených experimentálních měření

Z měření dilatačních změn odlitku je možné získat hodnoty součinitele teplotní smrštivosti α pro různé teplotní intervaly a za tímto účelem byla prováděna experimentální měření dilatačních změn při tuhnutí a chladnutí odlitku tvaru desky resp. tvaru "I" na měřícím zařízení popsaném v kap. 7.2.1. Měřením byly získány tyto hodnoty pro slitiny hliníku AlSi12CuNiMg, AlSi12 a pro čistý hliník Al 99,5. Měření byla provedena ve třech etapách, ve kterých byly postupně sledovány vlivy jednotlivých parametrů na dilatační vlastnosti daných slitin.

1. etapa: V této etapě byla měřena a zkoumána závislost dilatačních změn odlitku tvaru "I", resp. desky na materiálu použité slévárenské formy. Použité formy, viz kap. 7.2.2, byly kovové, z CT směsi a formy pískové při dvou různých rozměrech odlitku a to 7 a 27 mm x 10 mm x 157 mm a teplot lití 675, 700 a 725 °C.

2. etapa: Tato etapa experimentálních měření se zabývala vlivem teploty lití na dilatační změny odlitků o rozměrech 7 a 27x10x157 mm z použitých slévárenských slitin. Teploty lití byly 675, 700 a 725 °C a odlévání probíhalo do slévárenských forem z kovu, CT směsi a pískové formovací směsi.

3. etapa: V poslední třetí etapě měření byla věnována pozornost vlivu tloušťky stěny odlitku na jeho dilatační vlastnosti. Zkušební odlitky deskovitého tvaru o rozměrech 7 a 27

mm x 10 mm x 157 mm byly odlévány z teplot lití 675, 700 a 725 °C do forem vyrobených z kovu, CT směsi a pískové formovací směsi.

Vzhledem k tomu, že při některých podmínkách lití nebylo možno měření z technologických důvodů realizovat, např. lití do kovové formy s rozměrem odlitku 7 x 10 x 157 mm z teploty 675°C (vysoká ochlazovací rychlost taveniny a malé množství taveniny v dříku odlitku způsobí, že tavenina nezaběhne a nevyplní úplně dutinu formy), nejsou v některých grafických závislostech a tabulce výsledků 7.5 výsledky těchto měření uvedeny.

Použité hliníkové slévárenské slitiny byly připravovány a odlévány za pokud možno stejných podmínek měření mimo změněné parametry lití. Slitiny byly nataveny v grafitových kelímcích v elektrické odporové peci PEK-1 a před odléváním byly taveniny slitin metalurgicky ošetřeny rafinační solí T3. Teplota taveniny dané slitiny byla před odlitím měřena digitálním teploměrem s termočlánkem NiCr-Ni (typ K) a po té byl materiál odlit do dutiny slévárenské formy vytvořené v měřícím zařízení, z něhož byla dilatometrem naměřená data zaznamenávána na disku PC. Program dodávaný společně s dilatometrem umožňuje sledování hodnot teploty a dilatace v reálném čase s automatickým spuštěním měření při předem definované teplotě na měřícím konci termočlánku v dutině slévárenské formy. Data byla na disku počítače připojeném k dilatometru ukládána ve formě datového souboru \*.dat. Z těchto souborů byla data exportována do software Microsoft Excel, kde z nich byly odečteny hodnoty potřebné pro výpočet součinitele teplotní smrštivosti  $\alpha$  a další hodnoty. Dále byly ze získaných dat vytvořeny grafické závislosti dilatací a teplot na čase, viz obr. 7-8, na němž je ukázáno, které hodnoty byly z obdržených závislostí získány a vyhodnoceny.

Všechny měření byla realizována ve výše uvedených etapách a v jednotlivých etapách byly získány časové závislosti dilatací a teploty tuhnoucích a chladnoucích odlitků z čistého hliníku a slitin hliníku. Měření byla automaticky ukončena, když teplota v místě měřícího konce termočlánku tj. teplota v tepelné ose odlitku dosáhla 80 °C, neboť při této teplotě jsou dilatační změny prakticky ustálené a také proto, že dosažení teploty okolí v tepelné ose odlitku trvá velmi dlouhý časový úsek, který nemůže program dodávaný k dilatometru registrovat neboť jeho maximální paměť je při neměně nastavené hodnotě 1 odečtu měřených dat za sekundu, maximálně 7000 s.

# 7.3 Vyhodnocení křivek tuhnutí a dilatace

Z provedených experimentů byly získány křivky tuhnutí a dilatace, resp. časové závislosti teploty a dilatace odlitků ve tvaru písmene "I", tedy desky, které byly následně vyhodnoceny a zpracovány podle jednotlivých etap měření. Veškeré experimenty byly sledovány do konečné teploty v ose odlitku 80 °C. Ze získaných křivek byly odečteny hodnoty maximálních dilatací  $L_{max}$  a jim odpovídající teploty  $T_{max}$  a času  $t_{max}$ , které mají hlavní význam z hlediska zkoumaných dilatačních vlastností. Dále byla hodnocena teplota likvidu a solidu  $T_{lik}$  a  $T_{sol}$  a dilatace při této teplotě  $L_{lik}$  a  $L_{sol}$  při času dosažení  $t_{lik}$  a  $t_{sol}$ . Při dosažení maximální teploty ve slévárenské formě  $T_{maxf}$  byla sledována dilatace  $L_{maxf}$ . Dalším hodnotícím kritériem je hodnota rozdílu  $L_{200} - L_{max}$ . Také byly vypočteny poměry dilatací při teplotách likvidu, solidu a maximální dilatace k výchozímu rozměru odlitku, tj. 157 mm, tedy hodnoty  $L_{maxp}$ ,  $L_{likp}$  a  $L_{solp}$ . Hodnoty odečtené ze získaných grafických závislostí jsou uvedeny v tabulce 7.5 a dále zpracovány pro vyvození dílčích závěrů.



 $T_{max}$ - teplota při maximální dilataci odlitku,  $L_{max}$ - maximální dilatace odlitku,  $t_{max}$ - čas maximální dilatace odlitku,  $T_{min}$ - teplota při minimální dilataci odlitku,  $L_{min}$ - minimální dilatace odlitku,  $t_{min}$ - čas minimální dilatace,  $T_{lik}$ - teplota likvidu,  $L_{lik}$ - dilatace při teplotě likvidu,  $t_{lik}$ - čas dosažení teploty likvidu,  $T_{sol}$ - teplota solidu,  $L_{sol}$ - dilatace při teplotě solidu,  $t_{sol}$ - čas dosažení teploty solidu,  $T_{maxf}$ - maximální teplota dosažená ve formě,  $L_{maxf}$ - dilatace při maximální teplotě dosažené ve formě,  $t_{maxf}$ - čas dosažení maximální teploty ve formě,  $L_{200}$ - dilatace při teplotě 200 °C,  $t_{200}$ - čas dosažení teploty 200 °C.

Obr. 7-8 Časová závislost teploty a dilatace s vyznačenými hodnocenými

charakteristikami

Tab. 7.5 Výsledky dilatometrické analýzy odlitků tvaru "I"

viz soubor Tab\_7\_5.pdf

# 7.3.1 Vyhodnocení 1. etapy měření

V této etapě byla zkoumána závislost dilatačních změn odlitku tvaru "I" na materiálu použité slévárenské formy. Použité formy byly kovové, z CT směsi a formy pískové při dvou různých rozměrech odlitku 7 a 27 x 10 x 157 mm. Teploty lití 675, 700 a 725 °C. Ze získaných dilatačních křivek, které jsou uvedeny v příloze 1, lze hodnotit tyto závislosti:

1) vztah dilatačních změn k materiálu formy;

2) poměr dilatace k délce měřeného odlitku;

3) velikost dilatace při teplotě 200 °C;

4) velikost dilatace při teplotě solidu zkoumané slitiny;

5) velikost dilatace při teplotě likvidu zkoumané slitiny.

## 1) Vztah mezi dilatačními změnami odlitku a materiálem použité formy

Za účelem hodnocení těchto vlastností byly z naměřených závislostí odečteny hodnoty dilatačních změn při předem vybraných teplotách a to  $L_{max}$ ,  $L_{maxf}$ ,  $L_{lik}$ ,  $L_{sol}$ ,  $L_{200}$ , viz tabulka 7.5. Grafické závislosti dilatačních změn při lití odlitků o rozměrech 7 a 27 x 10 x 157 mm na materiálu použité slévárenské formy (kovová, z CT směsi tvrzené vodním sklem, písková formovací směs s křemenným ostřivem a bentonitovým pojivem) lité z teploty 675, 700 a 725 °C ze slitiny AlSi12CuNiMg je uvedena na obr. 7-9, ze slitiny AlSi12 na obr. 7-10 a z čistého hliníku Al99,5 na obr. 7-11.



Obr. 7-9 Naměřené dilatační charakteristiky pro slitinu AlSi12CuNiMg



Obr. 7-10 Naměřené dilatační charakteristiky pro slitinu AlSi12



Obr. 7-11 Naměřené dilatační charakteristiky pro čistý hliník Al99,5

Pístová slitina AlSi12CuNiMg vykazuje největší dilataci  $L_{max}$  ve formách z CT směsi a pískové formovací směsi s největší hodnotou -1,45 mm ve formě z CT směsi a -1,38 mm ve formě z pískové formovací směsi. Při srovnání průměrných hodnot jsou hodnoty dosahované v těchto formách porovnatelné a to -1,37 mm pro CT a -1,35 mm pro formu pískovou. Průměrná hodnota  $L_{max}$  ve formě kovové je nižší a to -1,24 mm. Nejmenší hodnotu dilatace  $L_{max}$  vykazuje tato slitina ve formě z oceli -0,95 mm při teplotě lití 725 °C. Pro kovovou formu vykazují nejnižší dilataci  $L_{max}$  všechna měřění provedená se slitinou AlSi12CuNiMg v porovnání se slitinami AlSi12 a Al99,5.

Slitina AlSi12 vykazuje nejnižší hodnotu dilatace  $L_{max}$  -1,31 mm ve formě vyrobené z oceli při lití z teploty 725 °C. Při použití forem z pískové formovací směsi lze říct, že se hodnoty dilatace blíží formám kovovým a minimální hodnoty dilatace  $L_{max}$  -1,41 mm je dosahováno při lití z teploty lití 675 °C. Při srovnání průměrných hodnot dilatací  $L_{max}$  se potvrzuje, že slitina AlSi12 s hodnotou -1,59 mm vykazuje přibližně stejnou dilataci ve formě kovové, jako ve formě pískové, která byla -1,61 mm. Při použití formy z CT směsi je průměrná hodnota dilatace  $L_{max}$  -1,82 mm při teplotě lití 725 °C.

Nejvyšší hodnoty dilatace  $L_{max}$  ze zkoumaných slitin ve všech typech použitých slévárenských forem, z hlediska průměrných a jmenovitých hodnot, vykazuje čistý hliník Al99,5. Nejvyšší průměrná hodnota  $L_{max}$  byla dosažena ve formě z oceli, -2,20 mm. Nejnižší hodnota ve formě z oceli -2,04 mm byla zjištěna při teplotě lití 725 °C. Nejnižší hodnotu dilatace -1,15 mm vykazuje čistý hliník ve formě vyrobené z pískové formovací směsi s křemenným ostřivem a průměrná hodnota v této forma činí -1,96 mm. Ve formě z CT směsi je dilatační chování čistého hliníku Al99,5 charakterizováno nejvyšší hodnotou -2,25 mm a průměrnou hodnotou -2,13 mm.

Z naměřeného času lze usuzovat i na ochlazovací schopnost formy a časy uvedené v tab. 7.5 potvrzují předem daný předpoklad, že ochlazovací schopnost formy má největší forma kovová, následovaná formou z CT směsi. Nejmenší ochlazovací schopnost formy má forma písková s křemenným ostřivem a bentonitovým pojivem.

#### 2) Poměr dilatace k délce měřeného odlitku

Poměr dilatace k původní délce měřeného odlitku (157 mm) byl vztažen k maximální naměřené dilataci odlitku, jak je uvedeno v tabulce 7.6, která ukazuje průměrné hodnoty poměru dilatace pro jednotlivé zkoumané slitiny v různých typech forem.

Materiál	Velikost odlitku	Teplota	Slitina, Poměr L <sub>max</sub> /L <sub>o</sub> [%]			
Iormy	[mm]		AlSi12CuNiMg	AlSi12	Al99,5	
	7x10x157	725	0,608	0,835	1,437	
Ocel	7x10x157	700	—	_	-	
	7x10x157	675	—	—	_	
	7x10x157	725	0,840	0,963	1,247	
CT směs	7x10x157	700	0,861	1,015	1,143	
	7x10x157	675	—	_	_	
	7x10x157	725	0,851	1,129	1,412	
Písek	7x10x157	700	0,832	1,067	1,321	
	7x10x157	675	—	—	_	
	27x10x157	725	0,859	1,003	1,305	
Ocel	27x10x157	700	0,787	1,140	1,498	
	27x10x157	675	0,912	1,073	1,375	
CT směs	27x10x157	725	0,866	1,092	1,556	
	27x10x157	700	0,867	1,125	1,434	

Tab. 7.6 Poměrná hodnota	maximální dilatace
--------------------------	--------------------

	27x10x157	675	0,928	1,163	1,388
	27x10x157	725	0,870	1,123	1,360
Písek	27x10x157	700	0,866	0,925	0,736
	27x10x157	675	0,884	0,904	1,416

Tabulce 7.6 odpovídá obr. 7-12, který znázorňuje grafickou závislost maximálního poměrného smrštění. Z grafické závislosti je vidět, že největší hodnota poměrného smrštění 1,556 % odpovídá pro čistý hliník litý do formy z CT směsi tvrzené vodním sklem při teplotě lití 725 °C u odlitku s tloušťkou stěny 27 mm. Pro slitinu AlSi12 je tato hodnota 1,163 % nejvyšší také u odlitku litého do slévárenské formy z CT směsi, avšak při teplotě lití 675 °C u odlitku s tloušťkou stěny 27 mm. U slitiny AlSi12CuNiMg je poměrné smrštění nejvyšší taktéž ve formě vyrobené z CT směsi u odlitku s tloušťkou stěny 27 mm při teplotě lití slitiny 675 °C s hodnotou 0,928 %. Naopak nejnižší hodnoty 0,736 % byly dosaženy pro čistý hliník ve formě z pískové formovací směsi s křemenným ostřivem a bentonitovým pojivem při teplotě lití 700 °C a to u odlitku s tloušťkou stěny 27 mm. Pro slitinu AlSi12 je to hodnota 0,835 % v kovové formě z teploty lití 725 °C při rozměru odlitku 7 mm. Pístová slitina dosahuje minima s hodnotou 0,608 % taktéž v kovové formě z teploty lití 725 °C a tloušťce stěny odlitku 7 mm.



Obr. 7-12 Poměr L<sub>max</sub>/L<sub>o</sub>

Při souhrnném porovnání poměrné dilatace vzhledem k materiálu použité slévárenské formy dosahují všechny slitiny až na čistý hliník, nejnižší v kovové formě a u čistého hliníku ve formě pískové.

#### 3) Velikost dilatace při teplotě 200 °C

Hodnocení velikosti dilatace při teplotě odlitku 200 °C, provádíme zejména proto, že pracovní teplota pístu v komoře spalovacího motoru je cca. 200 °C je z grafické závislosti na obr. 7-13, patrné že největší dilatace u zkoumaného odlitku činí -1,91 mm a vykazuje ji čistý hliník v kovové formě při teplotě lití 725 °C. Nejnižší hodnotu dilatace vykazuje ve všech měřených případech slitina AlSi12CuNiMg a tato vykazuje nejnižší hodnotu při lití do kovové formy s tloušťkou stěny odlitku 7 mm při teplotě lití 725 °C. Nejvyšší hodnotu, která však nepřevyšuje naměřené hodnoty ani u slitiny AlSi12 ani u čistého hliníku Al99,5, vykazuje daná slitina ve formě z CT směsi tvrzené CO<sub>2</sub> při teplotě lití 675 °C a rozměru odlitku 27 mm, hodnota -1,72 mm.



Obr. 7-13 Dilatace L<sub>200</sub> v závislosti na materiálu formy

Průměrný čas dosažení teploty 200 °C je i při různých podmínkách ochlazování slévárenských forem pro všechny slitiny téměř shodný, pro AlSi12CuNiMg je to 152 s, pro AlSi12 je to 182 s a pro Al99,5 je čas dosažení teploty 200 °C v tepelné ose odlitku 173 s. Podmínky tuhnutí jsou velmi podobné a průměrný čas chladnutí na 200 °C je 170 s. V tabulce 7.7 jsou uvedeny hodnoty dilatací  $L_{200}$  při teplotě 200 °C u jednotlivých měřených odlitků pro jednotlivé zkoumané slitiny, materiály slévárenských forem a teploty lití.

Materiál	Velikost odlitku	Teplota	Slitina, L <sub>200</sub> [mm]			
Iormy	formy Ittí [°C]   [mm] 7.10.157 705		AlSi12CuNiMg	AlSi12	A199,5	
	7x10x157	725	-0,673	-0,888	-1,910	
Ocel	7x10x157	700	—	—	—	
	7x10x157	675	—	—	—	
	7x10x157	725	-0,917	-1,135	-1,498	
CT směs	7x10x157	700	-0,950	-1,193	-1,343	
	7x10x157	675	—	—	_	
	7x10x157	725	-0,921	-1,360	-1,767	
Písek	7x10x157	700	-0,899	-1,244	-1,601	
	7x10x157	675	—	—	—	
	27x10x157	725	-0,997	-1,199	-1,660	
Ocel	27x10x157	700	-0,937	-1,367	-1,919	
	27x10x157	675	-1,058	-1,278	-1,743	
	27x10x157	725	-0,991	-1,311	-1,960	
CT směs	27x10x157	700	-0,953	-1,348	-1,817	
	27x10x157	675	-1,073	-1,419	-1,727	
	27x10x157	725	-0,972	-1,315	-1,819	
Písek	27x10x157	700	-0,969	-1,172	-0,982	
	27x10x157	675	-0,990	-1,014	-1,789	

Tab. 7.7 Hodnoty dilatace při teplotě 200 °C

## 4) Velikost dilatace při teplotě solidu

Hodnotíme-li velikost dilatace zkoumaného odlitku při teplotě solidu, viz obr. 7-14, je její hodnota z valné většiny záporná, tudíž odlitek má tendenci při teplotě solidu smršťovat. Ostatní kladné dilatace jsou v tomto případě nepříliš přesně interpretovatelné, jelikož zařízení neumožňuje svojí konstrukcí měřit dilataci v kladném směru. Tato kladná hodnota není umožněna vůlí mezi pohyblivou čelistí a jejím dorazem. Pozorovatelný růst dilatace do kladných hodnot je pouze u odlitků ze slitiny AlSi12CuNiMg, která tuto

vlastnost, tzv. pěchuje do kladných hodnot v intervalu tuhnutí, vykazuje při měření dilatace jiným způsobem (viz kap. 8), tj. na zařízení, které toto sledování umožňuje.

Nejvyšší naměřená kladná hodnota dilatace 0,08 mm byla odečtena pro slitinu AlSi12CuNiMg v kovové formě s teplotou lití 725 °C a rozměrem dříku odlitku 7 mm. Slitina AlSi12CuNiMg vykazuje nejmenší hodnoty dilatace ve všech formách. Slitina AlSi12 naopak hodnoty nejvyšší. Nejvyšší hodnota -0,48 mm u slitiny AlSi12 byla naměřena ve formě z CT směsi s vodním sklem s rozměrem dříku odlitku 27 mm. Čistý hliník vykazuje podobný trend průběhu dilatace při teplotě solidu v závislosti na slévárenské formě jako pístová slitina AlSi12CuNiMg.



Obr. 7-14 Dilatace při teplotě solidu Lsol

#### 5) Velikost dilatace při teplotě likvidu

Při hodnocení dilatace při teplotě likvidu byl identifikován stejný problém znehodnocující výsledky měření kladných dilatací jako u měření dilatace při teplotě solidu. Výsledky dilatačního chování v kladném směru nejsou příliš přesně interpretovatelné, jelikož zařízení neumožňuje svojí konstrukcí měřit dilataci v kladném směru a tudíž je tato kladná hodnota umožněna vůlí mezi pohyblivou čelistí a jejím dorazem.

Na obr. 7-15 je patrno, že největší pokles dilatace vykazuje slitina AlSi12 v kovové slévárenské formě při teplotě lití 725 °C a velikosti dříku odlitku 27 mm, hodnota -0,08 mm. Slitina AlSi12CuNiMg má tendenci ve většině případů ke kladné dilataci, tj. k rozpínání a tudíž nebude toto hodnoceno. Nejvyšší zápornou dilataci vykazuje v kovové formě při teplotě lití 675 °C a velikosti odlitku 27 mm, hodnota -0,04 mm. Čistý hliník vykazuje prakticky setrvalou hodnotu dilatace při teplotě likvidu bez ohledu na podmínky lití s průměrnou hodnotou -0,02 mm.



Obr. 7-15 Dilatace při teplotě likvidu

## 7.3.2 Vyhodnocení 2. etapy měření

V této etapě experimentálních měření byla měřena závislost dilatačních změn na teplotě lití. Teploty lití 725, 700 a 675 °C byly shodné pro všechny zkoumané slitiny. Tato měření byla provedena do forem kovových, forem z CT směsi tvrzené  $CO_2$  a forem z pískové formovací směsi s křemenným ostřivem a bentonitovým pojivem. Rozměry odlitku byly 7 a 27 mm x 10 mm x 157 mm. Z naměřených hodnot uvedených v tabulce 7.5, získaných a odečtených z dilatačních závislostí, které jsou uvedeny v příloze 1, byly posuzovány tyto závislosti:

- 1) vztah dilatačních změn k teplotě lití slitiny;
- 2) poměr dilatace k délce měřeného odlitku;
- 3) velikost dilatace při teplotě 200 °C.

#### 1) Vztah mezi dilatačními změnami odlitku a teplotou lití slitiny

Pro účely hodnocení těchto vlastností byly z naměřených závislostí odečteny hodnoty dilatačních změn při předem vybraných teplotách:  $L_{max}$ ,  $L_{maxf}$ ,  $L_{lik}$ ,  $L_{sol}$ ,  $L_{200}$  (viz tabulka 7.5). Grafické závislosti dilatačních změn při lití odlitků o rozměrech 7 a 27 x 10 x 157 mm na materiálu použité slévárenské formy (kovová, z CT směsi tvrzené vodním sklem a pískové formovací směsi s křemenným ostřivem a bentonitovým pojivem) lité z teploty 675, 700 a 725 °C ze slitin AlSi12CuNiMg, AlSi12 a z čistého hliníku Al99,5, je uvedena pro teplotu lití 725 °C na obr. 7-16, pro teplotu lití 700 °C na obr. 7-17 a pro teplotu lití 675 °C na obr. 7-18.



Obr. 7-16 Závislost dilatačních charakteristik pro měřené slitiny při teplotě lití 725 °C

Na obr. 7-16 je zobrazena závislost dilatace pro zkoumané slitiny AlSi12CuNiMg, AlSi12 a Al99,5 při teplotě lití 725 °C. Pro dilataci L<sub>max</sub>, byla zjištěna hodnota -2,44 mm a vykazuje ji odlitek ze slitiny Al99,5. Nejmenší hodnota byla naměřena u slitiny AlSi12CuNiMg, a to -0,95 mm. Pro teplotu 725 °C je vidět stoupající tendence dilatace pro jednotlivé slitiny s tím, že hodnoty pro slitinu AlSi12CuNiMg jsou pro všechna měření nejnižší, v průměru -1,28 mm, slitina AlSi12 vykazuje hodnoty vyšší, v průměru -1,61 mm. Čistý hliník vykazuje hodnoty nejvyšší, průměrně -2,18 mm.



Obr. 7-17 Závislost dilatačních charakteristik pro měřené slitiny při teplotě lití 700 °C

Obr. 7-17 ukazuje závislost dilatace pro zkoumané slitiny AlSi12CuNiMg, AlSi12 a Al99,5 při teplotě lití 700 °C. Největší dilataci  $L_{max}$  -2,35 mm, vykazuje opět odlitek ze slitiny Al99,5, což je hodnota o 0,1 mm nižší než pro ten samý materiál při teplotě lití 725 °C. Nejmenší hodnota -1,23 mm byla naměřena u slitiny AlSi12CuNiMg, což je naopak hodnota oproti předchozímu případu vyšší o 0,3 mm. Hodnoty dilatace při teplotě lití 700 °C pro slitinu AlSi12CuNiMg jsou pro všechna měření nejnižší, v průměru -1,32 mm, slitina AlSi12 vykazuje průměrnou hodnotu -1,66 mm, která je vyšší než u slitiny AlSi12CuNiMg.Čistý hliník opět vykazuje průměrné hodnoty nejvyšší, -1,92 mm.



Obr. Obr. 7-18 Závislost dilatačních charakteristik pro měřené slitiny při teplotě lití 675 °C

Grafická závislost na obr. 7-18 ukazuje závislost dilatace pro zkoumané slitiny AlSi12CuNiMg, AlSi12 a Al99,5 při teplotě lití 675 °C. Největší dilataci L<sub>max</sub> vykazuje opět odlitek ze slitiny Al99,5, byla zjištěna hodnota -2,22 mm v pískové slévárenské formě. Nejmenší hodnota -1,38 mm byla naměřena u slitiny AlSi12CuNiMg opět v pískové slévárenské formě s křemenným ostřivem a bentonitovým pojivem. Hodnoty dilatace při teplotě lití 675 °C pro slitinu AlSi12CuNiMg jsou pro všechna měření nejnižší v průměru -1,42 mm. Slitina AlSi12 vykazuje hodnoty vyšší v průměru -1,64 mm a čistý hliník hodnoty nejvyšší, -2,18 mm.

Z uvedených grafů na obr. 7-16 až 7-18 je vidět stoupající trend dilatačních změn směrem od slitiny AlSi12CuNiMg s nejnižšími hodnotami, přes slitinu AlSi12 a čistý hliník Al99,5. Dilatační změny u jednotlivých slitin vzhledem k teplotě lití mají podobný trend se vzrůstající dilatací pro slitinu AlSi12CuNiMg od 725 °C po 675 °C. Slitina AlSi12 vykazuje v průměru stejnou dilataci při všech teplotách lití. Čistý hliník Al99,5 má přibližně stejnou dilataci při teplotě 725 °C a 675 °C a dilatace při teplotě 700 °C je nižší.

#### 2) Poměr dilatace k délce měřeného odlitku

Poměr dilatace k původní délce měřeného odlitku (157 mm) byl vztažen k maximální naměřené dilataci odlitku  $L_{max}$ , jak je uvedeno v tabulce 7.9, která ukazuje průměrné hodnoty poměru dilatace pro jednotlivé zkoumané slitiny při teplotách lití 725 °C, 700 °C a 675 °C.

Teplota lití [°C]	Velikost odlitku	Materiál	Slitina, Poměr L <sub>max</sub> /L <sub>o</sub> [%]		
		Tormy	AlSi12CuNiMg	AlSi12	Al99,5
	7x10x157	Ocel	0,608	0,835	1,437
	7x10x157	CT směs	0,840	0,963	1,247
725	7x10x157	Písek	0,851	1,129	1,412
	27x10x157	Ocel	0,859	1,003	1,305
	27x10x157	CT směs	0,866	1,092	1,556
	27x10x157	Písek	0,870	1,123	1,360
	7x10x157	Ocel	_	_	_
700	7x10x157	CT směs	0,861	1,015	1,143
	7x10x157	Písek	0,832	1,067	1,321
	27x10x157	Ocel	0,787	1,140	1,498
	27x10x157	CT směs	0,867	1,125	1,434
	27x10x157	Písek	0,866	0,925	0,736
	7x10x157	Ocel	_	_	_
	7x10x157	CT směs	_	_	_
(75	7x10x157	Písek	_	-	_
675	27x10x157	Ocel	0,912	1,073	1,375
	27x10x157	CT směs	0,928	1,163	1,388
	27x10x157	Písek	0,884	0,904	1,416

Tab. 7.9 Poměrná hodnota	maximální dilatace
--------------------------	--------------------

Tabulce 7.9 odpovídá obr. 7-19, který ukazuje maximální poměrné smrštění v závislosti na teplotě lití dané slitiny. Z grafické závislosti je vidět, že největší hodnotu poměrného smrštění vykazuje čistý hliník při všech teplotách lití. V celkovém průměru pro tento materiál pro teplotu lití 725 °C odpovídá hodnota 1,39 %, pro 700 °C hodnota 1,22 % a pro teplotu 675 °C 1,39 %. Slitina AlSi12 následuje co do výše poměrného smrštění za čistým hliníkem a vykazuje průměrné hodnoty pro teplotu 725 °C 1,02 %, teplotě 700 °C odpovídá 1,05 % a pro 675 °C je to hodnota 1,05 %. Nejnižší hodnoty poměrného smrštění vykazuje při všech teplotách slitina AlSi12CuNiMg s hodnotami, pro 725 °C 0,82 %, pro 700 °C 0,84 % a pro 675 °C hodnota 0,91 %.



Obr. 7-19 Poměr  $L_{max}/L_o$  v závislosti na teplotě lití

# 3) Velikost dilatace při teplotě 200 °C

Závislost na obr. 7-20, kterému přísluší tabulka 7.10, ukazuje závislost dilatace při 200 °C na teplotě lití dané slitiny u všech slitin. Teploty lití byly 725 °C, 700 °C a 675 °C. Tabulka 7.10 Hodnoty dilatace při 200 °C pro měřené slitiny

Teplota		Materiál	Slitina, L <sub>200</sub> [mm]			
nu [ C]	[mm]	IOTINY	AlSi12CuNiMg	AlSi12	Al99,5	
	7x10x157	Ocel	-0,673	-0,888	-1,910	
	7x10x157	CT směs	-0,917	-1,135	-1,498	
725	7x10x157	Písek	-0,921	-1,360	-1,767	
125	27x10x157	Ocel	-0,997	-1,199	-1,660	
	27x10x157	CT směs	-0,991	-1,311	-1,960	
	27x10x157	Písek	-0,972	-1,315	-1,819	
	7x10x157	Ocel		_	_	
	7x10x157	CT směs	-0,950	-1,193	-1,343	
700	7x10x157	Písek	-0,899	-1,244	-1,601	
700	27x10x157	Ocel	-0,937	-1,367	-1,919	
	27x10x157	CT směs	-0,953	-1,348	-1,817	
	27x10x157	Písek	-0,969	-1,172	-0,982	
	7x10x157	Ocel		_	—	
	7x10x157	CT směs		_	_	
675	7x10x157	Písek		_	_	
0/5	27x10x157	Ocel	-1,058	-1,278	-1,743	
	27x10x157	CT směs	-1,073	-1,419	-1,727	
	27x10x157	Písek	-0,990	-1,014	-1,789	

Ze závislosti na obr. 7-20 je možno odečíst, že největší hodnotu dilatace  $L_{200}$  vykazuje čistý hliník při všech teplotách lití. Nejnižší hodnoty dilatace při teplotě 200 °C při všech zkoušených teplotách lití slévárenských slitin opět vykazuje slitina AlSi12CuNiMg s průměrnými hodnotami, pro 725 °C -0,91 mm, pro 700 °C -0,94 mm a pro 675 °C -1,04 mm. Tyto hodnoty mají vzestupnou tendenci od 725 °C do 675 °C právě jen pro tuto slitinu (AlSi12CuNiMg), pro ostatní slitiny je to tendence opačná nebo jsou si hodnoty velmi podobné. U slitiny AlSi12 byly zjištěny hodnoty pro teplotu 725 °C -1,20 mm, pro 700 °C hodnota -1,27 mm a pro 675 °C je to hodnota -1,24 mm. Nejvyšší průměrná hodnota byla zjištěna pro čistý hliník při teplotě lití 725 °C, které odpovídá hodnota -1,77 mm. Hodnoty pro další teploty jsou pro 700 °C hodnota -1,53 mm a pro teplotu 675 °C -1,75 %, která se velmi blíží hodnotě pro teplotu lití 725 °C.



Obr. 7-20 Grafická závislost dilatace při teplotě 200 °C L<sub>200</sub> na teplotě lití

# 7.3.3 Vyhodnocení 3. etapy měření

Tato etapa experimentálních měření byla zaměřena na sledování závislosti dilatačních změn na velikosti odlitku. Rozměry odlitků 7 mm a 27 mm x 10 mm x 157 mm, byly pro všechny zkoumané slitiny. Měření v této etapě byla provedena do forem kovových, forem z CT směsi tvrzené  $CO_2$  a forem z pískové formovací směsi s křemenným ostřivem a bentonitovým pojivem z teplot lití 725 °C, 700 °C a 675 °C. Z naměřených hodnot uvedených v tabulce 7.5 a získaných z dilatačních křivek, které jsou uvedeny v příloze 1, byly posuzovány tyto závislosti:

- 1) vztah dilatačních změn k teplotě lití slitiny;
- 2) poměr dilatace k délce měřeného odlitku;
- 3) velikost dilatace při teplotě 200 °C.

#### 1) Vztah mezi dilatačními změnami odlitku a teplotou lití slitiny

Z hodnot získaných z měření a uvedených v tabulce 7.5 byla sestavena grafická závislost dilatačních změn při lití odlitků o rozměrech 7 a 27 x 10 x 157 mm. Materiály použitých slévárenský forem byly ocel, CT směs s vodním sklem tvrzená CO<sub>2</sub> a písková formovací směs s křemenným ostřivem a bentonitovým pojivem. Teploty lití u experimentů byly 675, 700 a 725 °C. Slitiny, u kterých se tyto vlastnosti zkoumaly, byly AlSi12CuNIMg, AlSi12 a čistý hliník Al99,5. Získané grafické závislosti jsou uvedeny pro tloušťku dříku odlitku 27 mm na obr. 7-21, a pro tloušťku dříku odlitku 7 mm na obr. 7-22.



Obr. 7-21 Závislost dilatace na tloušťce dříku odlitku

Z grafické závislosti na obr. 7-21 pro zkoumané slitiny AlSi12CuNiMg, AlSi12 a Al99,5 pro tloušťku dříku odlitku 27 mm je patrné, že největší dilataci L<sub>max</sub> vykazuje

odlitek z čistého hliníku Al99,5 následován slitinou AlSi12 a nejnižší hodnoty vykazuje slitina AlSi12CuNiMg. Průměrná hodnota dilatace pro jednotlivé slitiny byla vypočtena pro slitinu AlSi12CuNiMg -1,37 mm, pro slitinu AlSi12 je to hodnota -1,67 mm a pro čistý hliník Al99,5 -2,11 mm. Celková průměrná hodnota dilatace ve formě s tloušťkou dříku resp. stěny odlitku 27 mm činí -1,71 mm.



Obr. 7-22 Závislost dilatace na tloušť ce dříku odlitku

Podobně jako na obr. 7-21 je na obr. 7-22 uvedena závislost dilatačních vlastností pro zkoumané slitiny AlSi12CuNiMg, AlSi12 a Al99,5 pro tloušťku dříku odlitku 7 mm. Největší hodnotu dilatace  $L_{max}$  opět vykazuje odlitek z čistého hliníku Al99,5 následován slitinou AlSi12 a nejnižší hodnoty vykazuje slitina AlSi12CuNiMg. Průměrná hodnota dilatace pro jednotlivé slitiny byla vypočtena pro slitinu AlSi12CuNiMg -1,25 mm, pro slitinu AlSi12 je to hodnota -1,57 mm a pro čistý hliník Al99,5 -2,04 mm. Toto jsou hodnoty nižší než pro tloušťku stěny odlitku 27 mm. Celková průměrná hodnota dilatace pro všechny materiály ve formě s tloušťkou dříku resp. stěny odlitku 7 mm je -1,63 mm, a je nižší než pro odlitek s tloušťkou dříku 27 mm, průměrné hodnota -1,71 mm.

#### 2) Poměr dilatace k délce měřeného odlitku

Poměr dilatace k původní délce měřeného odlitku (157 mm) byl pro jednotlivé tloušťky stěn odlitku vztažen k maximální naměřené dilataci odlitku L<sub>max</sub>. Obr. 7-23 ukazuje maximální poměrné smrštění v závislosti na tloušťce dříku odlitku z dané slitiny. Průměrné hodnoty pro velikost dříku 27 mm pro jednotlivé slitiny byly stanoveny pro slitinu AlSi12CuNiMg hodnota 0,87 %, pro AlSi12 1,06 % a pro Al99,5 1,34 %. Pro velikost dříku 7 mm jsou to hodnoty pro AlSi12CuNiMg 0,80 %, AlSi12 1,00 % a pro čistý hliník 1,31 %. Tyto výsledky jsou pro všechny případy srovnatelné.



Obr. 7-23 Poměr L<sub>max</sub>/L<sub>o</sub> pro jednotlivé slitiny v závislosti na tloušť ce dříku odlitku

#### 3) Velikost dilatace při teplotě 200 °C

Obr. 7-24 ukazuje smrštění odlitků při teplotě odlitku v tepelné ose 200 °C v závislosti na tloušť ce dříku odlitku z dané slitiny. Průměrné hodnoty pro velikost dříku 27 mm u jednotlivých slitin byly stanoveny pro slitinu AlSi12CuNiMg hodnota -0,99 mm, pro AlSi12 -1,27 mm a pro čistý hliník -1,71 mm. Pro velikost dříku 7 mm byly zjištěny u zkoumaných slitin tyto hodnoty: AlSi12CuNiMg -0,87 mm, AlSi12 -1,16 mm a pro Al99,5 -1,62 mm. Z průměrných hodnot je patrné, že u odlitku s tloušťkou dříku,

resp. stěny 7 mm je dilatace při 200 °C menší než u odlitků s tloušťkou stěny 27 mm a to v průměru o 0,1 mm.



Obr. 7-24 Dilatace při 200 °C pro odlitky z vybraných slitin v závislosti na tloušť ce stěny odlitku

# 7.4 Stanovení součinitele teplotního smrštění

Z provedených experimentů byly získány křivky tuhnutí a dilatace, tedy časové závislosti teploty a dilatace odlitků ve tvaru "I", ze kterých byly z vybraných hodnot dilatačních změn odpovídající teplotám tuhnoucího a chladnoucího odlitku vypočítány hodnoty součinitele teplotní smrštivosti α podle vztahu:

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_o \times (T_2 - T_1)} \tag{7.3}$$

kde značí:  $\alpha$  – součinitel teplotní smrštivosti [K<sup>-1</sup>];

- $\Delta l zm$ ěnu dilatace odlitku [mm];
- lo počáteční délku odlitku [mm];
- $(T_2-T_1)$  teplotní interval kde je určován součinitel  $\alpha$ .

Vypočítané hodnoty součinitele teplotní smrštivosti pro slitiny AlSi12CuNiMg, AlSi12 a čistý hliník Al99,5 pro různé podmínky lití, tj. pro tuhnutí odlitků s tloušťkami stěn 7 mm a 27 mm ve slévárenských formách z oceli, CT směsi tvrzené CO<sub>2</sub> a pískové formovací směsi s křemenným ostřivem a bentonitovým pojivem, litých z teplot 675 °C, 700 °C a 725 °C, jsou uvedeny v tabulce 7.12. V této tabulce jsou kromě hodnot součinitele lineárního smrštění uvedeny i hodnoty smrštění objemového, které byly vypočítány na základě vztahu:

$$\alpha_0 = 3 \times \alpha[K^{-1}] \tag{7.4}$$

kde značí:  $\alpha_0$ - součinitel objemového teplotního smrštění;

α- součinitel lineárního teplotního smrštění.

Z hodnot uvedených v tabulce 7.12 byly sestrojeny grafické závislosti pro lepší přehlednost některých dosažených závislostí. Na obr. 7-25 je uvedena grafická závislost součinitele teplotního smrštění pro slitinu AlSi12CuNiMg při teplotě lití 725 °C a v závislosti na použité slévárenské formě u odlitku s tloušťkou dříku 27 mm. Z grafické závislosti je patrné, že součinitel  $\alpha$  má pro všechny případy prakticky totožnou hodnotu v jednotlivých zkoumaných intervalech.

Tab. 7.12 Hodnoty součinitele teplotní smrštivosti vypočítané ze získaných závislostí pro odlitek tvaru "I"

viz soubor Tab\_7\_12.pdf



Obr. 7-25 Grafická závislost součinitele α na použité formě pro slitinu AlSi12CuNiMg v různých formách s rozměrem dříku 27 mm

Z grafické závislosti na obr. 7-26, který ukazuje grafickou závislost α u pístové slitiny AlSi12CuNiMg na teplotě lití dané slitiny je vidět, že slitina vykazuje větší hodnoty součinitele teplotní smrštivosti při teplotě lití 675 °C. Naopak nižší hodnoty vychází pro teplotu lití 725 °C.



Obr. 7-26 Grafická závislost součinitele α na použité formě pro slitinu AlSi12CuNiMg při různé teplotě lití

Obr. 7-27 zobrazuje grafickou závislost (podobně jako na obr. 7-26) u pístové slitiny na použité slévárenské formě u odlitku s velikostí dříku 7 mm. Z uvedené grafické závislosti vyplývá, že nejnižší hodnoty součinitele teplotní smrštivosti vykazuje zkoumaná slitina AlSi12CuNiMg při teplotě lití 725 °C, ostatní teploty lití jsou srovnatelné.



Obr. 7-27 Grafická závislost součinitele α na použité formě pro slitinu AlSi12CuNiMg v různých formách s rozměrem dříku 7 mm

Závislost součinitele α na velikosti dříku odlitků pro jednotlivé zkoumané slitiny lité do ocelové formy z teploty 725 °C je uvedena na obr. 7-28, ze kterého je patrné, že nejvyšší hodnoty α vykazuje pro oba rozměry odlitků, tj. 7 mm a 27 mm, čistý hliník Al99,5. Slitiny AlSi12CuNiMg a AlSi12 vykazují podobné hodnoty pro odlitky s tloušťkami odlitku 7 mm u slitiny AlSi12 a 7 mm a 27 mm pro slitinu AlSi12CuNiMg a AlSi12. Nejnižší hodnoty vykazuje za daných podmínek lití slitina AlSi12CuNiMg s tloušťkou dříku odlitku 7 mm.



Obr. 7-28 Grafická závislost součinitele α pro zkoumané slitiny na tloušť ce dříku odlitku

Na obr. 7-29 je uvedena závislost součinitele teplotní smrštivosti na použité slévárenské formě tentokráte pro slitinu AlSi12. Slitina AlSi12 vykazuje nižší hodnoty tohoto součinitele pro teplotu lití 725 °C v kovové slévárenské formě. Podobnou závislost ukazuje obr. 7-30, ovšem pro čistý hliník Al99,5. Zde vykazuje nejnižší hodnoty součinitele  $\alpha$  tento materiál litý do formy z oceli. Ovšem na rozdíl od slitiny AlSi12 jsou zde nižší hodnoty při odlévání do pískové slévárenské formy.







Obr. 7-30 Závislost součinitele teplotní smrštivosti na použité slévárenské formě pro Al99,5

# 8. SLEDOVÁNÍ DILATAČNÍCH VLASTNOSTÍ PÍSTOVÉ HLINÍKOVÉ SLITINY PŘI TUHNUTÍ A CHLADNUTÍ ODLITKŮ TVARU VÁLCE

V této disertační práci v souladu s jejími cíli prováděno sledování dilatačních vlastností pístové slitiny při jejím tuhnutí a chladnutí pomocí dvou měřících metod na dvou různých zařízeních. Kapitola 8 se zabývá sledováním těchto dilatačních změn pomocí dalšího speciálního měřícího zařízení, které umožňuje sledovat dilatační vlastnosti slitin při jejich tuhnutí a chladnutí. Zřízení bylo zkonstruováno na Katedře strojírenské technologie na TU v Liberci. Toto zařízení se skládá z měřícího rámu s indukčním snímačem, který spolu s dilatometrem umožňuje sledování dilatačních vlastností vybrané slitiny při různých podmínkách tuhnutí a chladnutí, resp. podmínkách odlévání do různých materiálů slévárenských forem, které mají dutinu tvaru válce. Formy pro experimenty v této kapitole byly vyrobeny z CT směsi tvrzené CO<sub>2</sub> a pískové formovací směsi s křemenným ostřivem a bentonitovým pojivem s válcovými dutinami průměrů 40, 50 a 60 mm, tudíž pro experimenty byl v tomto případě použit odlitek tvaru válce odlévaný z různých teplot lití. Formy s válcovou dutinou vyrobené z oceli, resp. litiny, ať už předehřáté, nebo nepředehřáté, nebyly v této práci zkoumány, neboť se jimi zabývám již ve své diplomové práci. Měření probíhalo v dílnách a laboratořích katedry Strojírenské technologie, Technické univerzity v Liberci.

# 8.1 Výpočet lineárních dilatačních změn odlitku tvaru válce

Podobně jako v kap. 7 byl před vlastním měřením dilatačních změn odlitků tvaru válce o rozměrech 40 mm, 50 mm a 60 mm nejdříve proveden výpočet smrštění odlitku tvaru válce uvedeného na obr. 8-1. Výpočet lineárního smrštění byl proveden za použití tabelovaných hodnot součinitele lineární smrštivosti sledovaného materiálu, tj. pístové hliníkové slitiny AlSi12CuNiMg a velikosti lineárního smrštění, které jsou uvedeny již v tabulce 7.1. Výpočet byl proveden pro průměr odlitku tvaru válce od 20 do 80 mm na základě vztahů (7.1) a (7.2).



Obr. 8-1 Schéma smrštění odlitku tvaru válce

Grafická závislost na obr. 8-2 ukazuje závislost dilatace odlitku tvaru válce na jeho průměru. Tato závislost byla zkonstruována na základě dat vypočtených z rovnic (7.1) a (7.2). Hodnoty vypočtené z těchto vztahů jsou uvedené v tabulce 8.1.

Tabulka	8.1	Hodnoty	dilatací	pro	slitinu	AlSi12CuNiMg	vypočtené	podle	vztahů	(7.1)
a (7.2)										

<b>D</b> <sup>0</sup> <b>X</b>	Dilatace odlitku [mm]						
Prumer odlitku [mm]	AlSi12CuNiMg	AlSi12CuNiMg					
	(7.1)	(7.2)					
20	-0,22	-0,18506					
25	-0,275	-0,231325					
30	-0,33	-0,27759					
35	-0,385	-0,323855					
40	-0,44	-0,37012					
45	-0,495	-0,416385					
50	-0,55	-0,46265					
55	-0,605	-0,508915					
60	-0,66	-0,55518					
65	-0,715	-0,601445					
70	-0,77	-0,64771					
75	-0,825	-0,693975					
80	-0,88	-0,74024					



Obr. 8-2 Grafická závislost dilatace na průměru odlitku pro slitinu AlSi12CuNiMg

#### 8.2 Měření lineárních rozměrových změn odlitků

Dilatační vlastnosti pístové slitiny hliníku AlSi12CuNiMg při jejím tuhnutí a chladnutí byly měřeny pomocí speciálního zkušebního zařízení pro sledování dilatačních změn odlitků tvaru válce. Toto zařízení bylo zkonstruováno a je k dispozici na Katedře strojírenské technologie na TU v Liberci. K zařízení je připojen dilatometr s počítačem a celá soustava je napájena zdrojem stabilizovaného napětí. Zařízení je schopno zaznamenávat časový průběh dilatačních změn a teploty v tepelné ose odlitku.

#### 8.2.1 Popis měřícího zařízení

Použité měřící zařízení se skládá ze tří základních částí 1) speciálního měřícího rámu s indukčním snímačem rozměrových změn, 2) slévárenské formy a 3) dilatometru s PC pro záznam naměřených dat, viz schéma na obr. 8-3. První částí je měřící rám, který se skládá ze dvou ocelových příčníků, z nichž na jednom je upevněn indukční snímač pro snímání dilatací, který je na konci opatřen magnetickou spojkou přes níž je ke spínači připojena křemenná trubice zasahující do dutiny slévárenské formy v polovině její výšky, která přenáší dilatační změny odlitku na indukční snímač. Na druhém příčníku je vyrovnávací křemenná trubice, která taktéž zasahuje do dutiny slévárenské formy. Příčníky jsou spojeny dvěma křemennými trubicemi, které jsou uloženy na rolnách podpůrné

základní desky a umožňují rámu volný pohyb ve směru kolmém na osu odlitku. Křemenné trubice byly zvoleny z důvodu minimální teplotní roztažnosti. Druhou částí tohoto zařízení je slévárenská forma, která má vnější tvar i tvar dutiny válcový. Velikost dutiny formy je proměnná s průměry 40 mm, 50 mm a 60 mm x 84 mm. Forma je uložena svojí základnou na základní desce a do její dutiny zasahuje trubice od snímače dilatací, vyrovnávací trubice a termočlánek NiCr-Ni (typ K), který slouží k měření teploty v tepelné ose odlitku. Do dutiny formy je odlévána tavenina zkoumané slitiny. Indukční snímač je propojen přes sběrnici dat vybavenou paralelním A/D převodníkem s dilatometrem, který tvoří třetí základní část měřícího zařízení. Skládá se z PC s příslušným softwarovým vybavením, který je napojen dilatometr pro registraci dilatačních změn a teploty a dilatometru polské výroby CRYSTALDIAGRAPH PC-4T2L, viz obr. 7-6, který slouží k přenosu dat mezi dilatujícím odlitkem a počítačem. Sběrnice dat je připojena přes počítač s monitorem k regulátoru vstupního napětí.



Obr. 8-3 Schéma speciálního měřícího zařízení



Obr. 8-4 Schéma celkového zapojení měřícího zařízení

Na obr. 8-5 je fotografie měřícího zařízení v průběhu měření a zařízení připraveného k měření.



Obr. 8-5 Měřící zařízení připravené k měření a v průběhu měření

# 8.2.2 Charakteristika forem použitých pro experimenty

Experimentální měření se slitinou AlSi12CuNiMg v této části práce byla realizována ve dvou druzích slévárenských forem a to ve formě vyrobené z CT směsi s vodním sklem tvrzené  $CO_2$  a ve formě z pískové formovací směsi s křemenným ostřivem a bentonitovým pojivem. Tyto rozdílné druhy forem byly použity z důvodu zjištění vlivu materiálu formy a jeho odvodu tepla na dilatační vlastnosti odlitku. Písty spalovacích motorů mají válcovitý tvar, a proto byla zvolena pro realizaci měření forma s dutinou tvaru válce. Dutiny slévárenských forem měly rozměry 40 mm, 50 mm a 60mm x 84 mm.
Pro experimenty byly použity formy:

Formy z CT směsi byly tvořeny křemenným ostřivem a vodním sklem tvrzeným CO<sub>2</sub>.
 Vnitřní průměr dutiny forem byl proměnný 40, 50 a 60 mm. Vnějším průměr obvodu forem 100 mm byl stálý. V tabulce 7.4 je uvedeno složení použité formovací CT směsi.



Obr. 8-6 Pohled na formu vyrobenou z CT směsi s křemenným ostřivem, z níž byl vytlučen odlitek

2) Formy z pískové formovací směsi byly vyrobeny z křemenného ostřiva a bentonitového pojiva Sabenil s rozměry shodnými jako forem z CT směsi. Byly vyrobeny pěchováním této směsi do kovové, resp. hliníkové objímky kruhového tvaru, která tvoří rám slévárenské formy.

# 8.2.3 Popis provedených experimentálních měření

I z měření dilatačních změn odlitku pomocí tohoto zařízení je možné získat hodnoty součinitele teplotní smrštivosti α pro různé teplotní intervaly. Za tímto účelem byla prováděna experimentální měření dilatačních změn při tuhnutí a chladnutí odlitku tvaru válce na měřícím zařízení popsaném v kap. 8.2.1. Měřením byly získány hodnoty dilatačních změn pro pístovou slitinu hliníku AlSi12CuNiMg, chemické složení viz tab. 6.2. Měření byla podobně jako v kap. 7 provedena ve třech etapách, aby bylo možno dosažené výsledky porovnat. V jednotlivých etapách byly postupně sledovány vlivy parametrů lití na dilatační vlastnosti této slitiny.

1. etapa: V 1. etapě byla měřena a zkoumána závislost dilatačních změn odlitku tvaru válce na materiálu použitých slévárenských forem, které byly vyrobeny z CT směsi z pískové formovací směsi při třech různých rozměrech odlitku 40 mm, 50 mm a 60 mm x 84 mm a teplot lití 675, 700 a 725 °C.

2. etapa: Druhá etapa měření se zabývala vlivem teplot lití, které byly 675 °C, 700 °C a 725 °C, na dilatační změny odlitků o rozměrech 40 mm, 50 mm a 60 mm. Odlévání bylo realizováno do slévárenských forem z CT směsi a pískové formovací směsi.

3. etapa: V poslední etapě měření byla věnována pozornost vlivu rozměru odlitku (průměr 40, 50 a 60 mm) na jeho dilatační vlastnosti. Zkušební odlitky válcového tvaru o výše uvedených rozměrech byly odlévány z teplot lití 675 °C, 700 °C a 725 °C do slévárenských forem s dutinou tvaru válce vyrobených z CT směsi a pískové formovací směsi.

Tavenina zkoumané hliníkové pístové slévárenské slitiny AlSi12CuNiMg byla připravována a odlévána za stejných podmínek měření mimo proměnné technologické parametry lití. Slitina byla natavena v grafitovém kelímku v elektrické odporové peci PEK-1 a před odléváním metalurgicky ošetřena rafinační solí T3. Teplota taveniny byla před odlitím kontrolována a měřena digitálním teploměrem s termočlánkem NiCr-Ni (typ K), a po té odlita do dutiny slévárenské formy umístěné do měřícího zařízení, z něhož byla dilatometrem naměřená data zaznamenávána na disku PC. Program dodávaný společně s dilatometrem umožňuje sledování hodnot teploty a dilatace v reálném čase s automatickým spuštěním měření při předem definované teplotě na měřícím konci termočlánku v dutině slévárenské formy. Data byla na disku počítače připojeném k dilatometru ukládána ve formě datového souboru \*.dat. Z těchto souborů byla data stejně jako při vyhodnocování měření v kap. 7 exportována do software Microsoft Excel, kde z nich byly odečteny hodnoty potřebné pro výpočet součinitele teplotní smrštivosti α a další hodnoty. Dále byly ze získaných dat vytvořeny grafické závislosti dilatací a teplot na čase, viz obr. 8-6, který zobrazuje hodnoty vyhodnocené ze získaných závislostí.

Experimentální měření byla realizována ve třech výše uvedených etapách. V jednotlivých etapách byly získány časové závislosti dilatací a teploty tuhnoucích a chladnoucích odlitků ze slitiny AlSi12CuNiMg. Měření byla automaticky ukončena, když teplota v místě měřícího konce termočlánku, tj. teplota v tepelné ose odlitku, dosáhla 80 °C, neboť při této teplotě jsou dilatační změny prakticky ustálené. Dalším důvodem

volby konečné teploty měření 80°C (podobně jako v kap. 7) bylo, že dosažení teploty okolí v tepelné ose odlitku trvá velmi dlouhý časový úsek, který nemůže program dodávaný k dilatometru registrovat, neboť neumožňuje změnu rastrovací frekvence a jeho maximální paměť je při neměně nastaveném rastru odečtu 1 odečet/sekundu, maximálně 7000 s.

### 8.3 Vyhodnocení křivek tuhnutí a dilatace

Z realizovaných experimentů byly získány křivky tuhnutí a dilatace odlitků ve tvaru válce, které byly následně vyhodnoceny a zpracovány podle jednotlivých etap měření uvedených v kap. 8.2.3. Veškeré experimenty probíhaly po dobu, dokud teplota v tepelné ose odlitku nedosáhla 80 °C. Ze získaných křivek byly odečteny hodnoty maximálních dilatací L<sub>max</sub> a L<sub>min</sub> a jim odpovídajících teploty T<sub>max</sub>, T<sub>min</sub> a času t<sub>max</sub> a t<sub>min</sub>, které mají hlavní význam. Dále byla hodnocena teplota likvidu a solidu T<sub>lik</sub> a T<sub>sol</sub> a dilatace při této teplotě L<sub>lik</sub> a L<sub>sol</sub> a čas dosažení těchto teplot t<sub>lik</sub> a t<sub>sol</sub>. Také byla odečítána dilatace L<sub>200</sub> při dosažení teploty 200 °C v čase t<sub>200</sub> a při dosažení maximální teploty ve slévárenské formě  $T_{maxf}$  byla sledována dilatace  $L_{maxf}$ . Významným hodnotícím kritériem jsou hodnoty rozdílu L<sub>max</sub> – L<sub>min</sub> a L<sub>200</sub> – L<sub>max</sub>. Také byly vypočteny poměru dilatací při teplotách likvidu, solidu a maximální dilatace k rozměrům odlitku tedy 40 mm, 50 mm a 60 mm, a to hodnoty L<sub>maxp</sub>, L<sub>minp</sub>, L<sub>likp</sub> a L<sub>solp</sub>. Přehled odečítaných hodnot je uveden na obr. 8-7 a tyto hodnoty odečtené ze všech získaných grafických závislostí jsou uvedeny v tabulce 8.2. Naměřená data byla dále zpracována pro vyvození dílčích závěrů. Byly taktéž vypočítány hodnoty konstanty tuhnutí pro jednotlivá měření odlitku tvaru válce, podobně jako v kap. 6, které jsou uvedeny v tabulce výsledků 8.2, byly stanoveny z rovnice (8.1), která vychází z rovnice (6.2):

$$k_{v} = \frac{T_{v} \times (1 - \frac{T_{v}}{D})}{\sqrt{t_{s}}}$$
(8.1)

kde značí:  $k_v$  – konstantu tuhnutí odlitku tvaru válce [m.s<sup>-1/2</sup>];

T<sub>v</sub>-tloušťku ztuhlého mezikruží [m];

t<sub>s</sub> – čas solidu [s].



 $T_{max}$ - teplota při maximální dilataci odlitku,  $L_{max}$ - maximální dilatace odlitku,  $t_{max}$ - čas maximální dilatace odlitku,  $T_{min}$ - teplota při minimální dilataci odlitku,  $L_{min}$ - minimální dilatace odlitku,  $t_{min}$ - čas minimální dilatace,  $T_{lik}$ - teplota likvidu,  $L_{lik}$ - dilatace při teplotě likvidu,  $t_{lik}$ - čas dosažení teploty likvidu,  $T_{sol}$ - teplota solidu,  $L_{sol}$ - dilatace při teplotě solidu,  $t_{sol}$ - čas dosažení teploty solidu,  $T_{maxf}$ - maximální teplota dosažená ve formě,  $L_{maxf}$ - dilatace při maximální teplotě dosažené ve formě,  $t_{maxf}$ - čas dosažení maximální teploty ve formě,  $L_{200}$ - dilatace při teplotě 200 °C,  $t_{200}$ - čas dosažení teploty 200 °C,  $T_{min}$ - teplota dosažení minimální dilatace odlitku,  $t_{min}$ - minimální dilatace odlitku,  $t_{min}$ - čas dosažení minimální dilatace.

Obr. 8-7 Časová závislost teploty a dilatace s vyznačenými hodnocenými

hodnotami

Tab. 8.2 Výsledky dilatometrické analýzy odlitků tvaru válce

viz soubor Tab\_8\_2.pdf

### 8.3.1 Vyhodnocení 1. etapy měření

Tato etapa experimentálních měření se zabývala zkoumáním závislosti dilatačních změn odlitku tvaru válce na materiálu použité slévárenské formy, který byl CT směs s křemenným ostřivem tvrzená CO<sub>2</sub> a písková formovací směs s křemenným ostřivem a bentonitovým pojivem. Byly odlévány tři rozměry odlitků o průměrech 40 mm, 50 mm a 60 mm a 84 mm z teplot lití 675 °C, 700 °C a 725 °C. Ze získaných dilatačních křivek, které jsou uvedeny v příloze 2, lze (opět jako v kap. 7.3.1) hodnotit tyto závislosti pro zkoumanou slitinu AlSi12CuNiMg:

- 1) vztah dilatačních změn k materiálu formy;
- 2) poměr dilatace k průměru měřeného odlitku;
- 3) velikost dilatace při teplotě 200 °C;
- 4) velikost dilatace při teplotě solidu a likvidu zkoumané slitiny AlSi12CuNiMg;
- 5) čas tuhnutí zkoumaného odlitku.

#### 1) Vztah mezi dilatačními změnami odlitku a materiálem použité formy

Hodnocení dilatačních vlastností bylo provedeno na základě hodnot odečtených z naměřených závislostí  $L_{max}$ ,  $L_{min}$ ,  $L_{maxf}$ ,  $L_{lik}$ ,  $L_{sol}$ ,  $L_{200}$ , viz tabulka 8.2. Obr. 8-8 ukazuje grafickou závislost pístové slitiny lité do forem z písku a CT směsi průměru 40 mm, 50 mm a 60 mm z teplot 725 °C, 700 °C a 675 °C. Tato slitina vykazuje největší dilataci do kladných hodnot  $L_{max}$  ve formách z CT směsi u všech rozměrů odlitku. Největší hodnota 0,35 mm ve formě z CT směsi je o 0,24 mm větší než hodnota ve formě z pískové formovací směsi, která činí 0,11 mm. Hodnota minimální dilatace  $L_{min}$  je oproti tomu větší ve formě z pískové formovací směsi a dosahuje hodnoty -0,94 mm. Průměrná hodnota dilatace  $L_{max}$  a  $L_{min}$  je ve formě z CT směsi 0,12 mm a -0,24 mm. Ve formě z pískové formovací směsi s křemenným ostřivem a bentonitovým pojivem jsou to hodnoty 0,05 mm a -0,46 mm. Z těchto výsledků vyplývá, že hodnota  $L_{max}$  je ve formě z CT směsi o 0,07 mm větší což znamená, že hodnoty počátečního roztažení, které toto zařízení umožnuje na rozdíl od zařízení uvedeného v kap. 7 měřit jsou pro obě formy porovnatelné a stejně velké. Naopak hodnoty  $L_{min}$  jsou v průměru ve formě z CT směsi -0,24 mm a v pískové slévárenské formě -0,46 mm, což je hodnota skoro dvakrát větší.



Obr. 8-8 Grafická závislost naměřených dilatačních charakteristik pro slitinu AlSi12CuNiMg v závislosti na použité slévárenské formě

Z naměřeného času t<sub>min</sub> lze usuzovat i na ochlazovací schopnost formy a tyto časy uvedené v tab. 8.2 opět ukazují, že nejnižší ochlazovací schopnost ze zkoumaných forem má forma z pískové formovací směsi s křemenným ostřivem, v průměru 4788 s. Forma z CT směsi s křemenným ostřivem a vodním sklem tvrzená  $CO_2$  má tuto vlastnost lepší a vykazuje průměrnou hodnotu doby ochlazování 3511 s.

#### 2) Poměr dilatace k průměru měřeného odlitku

Tabulka 8.2 obsahuje hodnoty poměru dilatací  $L_{max}$  a  $L_{min}$  k původnímu průměru měřeného odlitku, tj. 40, 50 a 60 mm ve dvou zkoumaných typech forem z CT směsi a pískové formovací směsi u odlitků litých z teplot 675 °C, 700 °C a 725 °C a odpovídá jí obr. 8-9, který znázorňuje grafickou závislost tohoto maximálního poměrného smrštění pro slitinu AlSi12CuNiMg.



Obr. 8-9 Poměrné smrštění v závislosti na použité slévárenské formě

Z uvedené závislosti je vidět, že největší hodnoty poměrného smrštění v kladném směru dilatace, tj. hodnotu  $L_{max}/L_o$  jsou dosahovány ve formách z CT směsi, v průměru 0,23 %. Maximální hodnoty poměrného smrštění v záporném směru dilatace, tj.  $L_{min}/L_o$  jsou naopak dosahovány ve formách pískových s hodnotou průměrně 0,94 %, tj. prakticky 1 %.

### 3) Velikost dilatace při teplotě 200 °C

Dilatační chování odlitků z pístové slévárenské slitiny AlSi12CuNiMg, určené pro odlévání pístů spalovacích motorů, je důležité sledovat při teplotě 200 °C při jejich ohřevu, avšak je zajímavé tuto hodnotu sledovat i při jejich ochlazování z tuhého stavu, tj. při jejich výrobě odléváním, viz obr. 8-10. Největší dilatace při této teplotě u zkoumaných odlitků do pískové slévárenské formy činí -0,78 mm a do formy z CT směsi je to hodnota -0,29 mm, obojí při teplotě lití 675 °C. Nejnižší hodnoty pro uvedené formovací materiály jsou pro pískovou formu -0,07 mm a pro formu z CT směsi -0,02 mm.



Obr. 8-10 Dilatace při 200 °C u odlitků ze slitiny AlSi12CuNiMg v závislosti na použitém formovacím materiálu

Průměrný čas dosažení teploty 200 °C ve formě je vzhledem k poměrně velkému rozdílu ve velikosti zkušebních odlitků při různých podmínkách ochlazování slévárenských forem různě velký a je uveden v tab. 8.6.

#### 4) Velikost dilatace při teplotách likvidu a solidu zkoumané slitiny

Hodnocením velikosti dilatace zkoumaného odlitku při teplotách likvidu a solidu, viz obr. 8-11, docházíme k závěrům, že hodnota dilatací je v některých případech kladná a to většinou ve formách vyrobených z CT směsi tvrzených CO<sub>2</sub>, prakticky ve všech případech v těchto formách vykazuje slitina AlSi12CuNiMg dilataci v kladném směru a to jak hodnoty L<sub>lik</sub> tak L<sub>sol</sub>, a v jiných záporná, u odlitků do pískové formovací směsi a tudíž odlitek zde má tendenci při teplotě solidu smršťovat, při teplotě likvidu toto neplatí, zde odlitek většinou v pískové formě prodělává dilataci v kladném směru, viz obr. 8-11.

Toto lze tvrdit, protože jak již bylo uvedeno, toto zařízení na rozdíl od zařízení uvedeného v kap. 7, umožňuje svou konstrukcí měřit hodnoty dilatace v kladném směru. Proto jsou tyto hodnoty přesně interpretovatelné. Potvrzuje se tedy to, že slitina AlSi12CuNiMg vykazuje během tuhnutí růst dilatace do kladných hodnot, tzv. pěchuje do kladných hodnot v intervalu tuhnutí, tedy vykazuje roztažení.



Obr. 8-11 Dilatace při teplotách solidu a likvidu pro slitinu AlSi12CuNiMg

Nejvyšší naměřená kladná hodnota dilatace  $L_{sol}$  0,35 mm byla odečtena pro slitinu AlSi12CuNiMg ve formě z CT směsi tvrzené CO<sub>2</sub> při teplotě lití 700 °C u odlitku s průměrem 60 mm. Nejvyšší naměřená kladná hodnota dilatace při teplotě likvidu  $L_{lik}$ 0,08 mm byla u této slitiny zjištěna taktéž ve formě vyrobené CT směsi při stejných podmínkách, avšak tato hodnota je proti hodnotám dilatací při teplotách solidu zanedbatelná. Největší záporné hodnoty dilatace  $L_{sol}$  -0,35 mm vykazují odlitky lité do forem z pískové formovací směsi s křemenným ostřivem a bentonitovým pojivem a to u odlitků s průměrem 50 mm při teplotě lití 675 °C. I odlitky ve formách z pískové směsi o průměrech 40 mm a 60 mm vykazují zápornou hodnotu  $L_{sol}$ . Dilatace  $L_{lik}$  záporných hodnot prakticky nedosahuje, viz obr. 8-11.

Průměrné hodnoty teploty likvidu a solidu pro slitinu AlSi12CuNiMg byly z experimentálních měření zjištěny  $T_{lik}$ = 569 °C a  $T_{sol}$ = 567 °C.

### 6) Čas tuhnutí zkoumaného odlitku

Podobně jako v kap. 6 byl pro slitinu AlSi12CuNiMg při lití do slévárenské formy s dutinou tvaru válce vypočítán čas tuhnutí odlitku. Čas tuhnutí je jak známo závislý na materiálu použité slévárenské formy, v tomto případě se jednalo o slévárenské formy vyrobené z CT směsi a z pískové formovací směsi. Ve formách kde docházelo k tuhnutí slitiny AlSi12CuNiMg byly odečteny hodnoty teplot likvidu a solidu a z rozdílu časů jejich dosažení pro každé měření vypočítán čas tuhnutí odlitku. V tabulce 8.3 jsou uvedeny časy tuhnutí měřených odlitků pro jednotlivé materiály slévárenských forem a na obr. 8-12 je uvedena grafická závislost časů tuhnutí zkoumaných odlitků při různém typu použité slévárenské formy.



Obr. 8-12 Čas tuhnutí odlitků ze slitiny AlSi12CuNiMg v závislosti na materiálu formy.

Materiál formy	Velikost odlitku [mm]	Teplota lití [°C]	t <sub>tuh</sub> [s]
	Ø40x84	725	121,2
CT směs	Ø40x84	700	120,0
	Ø40x84	675	101,1
	Ø40x84	725	252,0
Písek	Ø40x84	700	195,6
	Ø40x84	675	188,4
	Ø50x84	725	174,0
CT směs	Ø50x84	700	147,6
	Ø50x84	675	145,0
	Ø50x84	725	315,6
Písek	Ø50x84	700	230,4
	Ø50x84	675	228,0
	Ø60x84	725	229,2
CT směs	Ø60x84	700	210,0
	Ø60x84	675	199,4
Písek	Ø60x84	725	498,0
	Ø60x84	700	240,8
	Ø60x84	675	290,0

Tab. 8.3 Hodnoty časů tuhnutí slitiny AlSi12CuNiMg

Z grafické závislosti a tabulky 8-12 a 8.3 jasně vyplývá, že nejdéle tuhnou odlitky ve formách z pískové formovací směsi s křemenným ostřivem a bentonitovým pojivem, což může být způsobené větší vlhkostí použité formovací směsi. Hodnoty ukazují nejdelší čas tuhnutí 498 s u odlitku s průměrem 60 mm litého do pískové formovací směsi a naopak nejkratší 101 s ve formě z CT směsi.

### 8.3.2 Vyhodnocení 2. etapy měření

Další experimentální měření byla prováděna pro zjištění závislosti dilatačních změn slitiny AlSi12CuNiMg na teplotě lití. Teploty lití při odlévání odlitků o průměrech 40 mm, 50 mm a 60 mm do forem z CT směsi tvrzené  $CO_2$  a forem z pískové formovací směsi s křemenným ostřivem a bentonitovým pojivem 725, 700 a 675 °C. Z naměřených hodnot uvedených v tabulce 8.6 a získaných z dilatačních závislostí, které jsou uvedeny v příloze 2, byly posuzovány tyto závislosti:

1) vztah dilatačních změn k teplotě lití slitiny;

- 2) velikost dilatace při teplotě 200 °C;
- 3) čas tuhnutí zkoumaného odlitku.

#### 1) Vztah mezi dilatačními změnami odlitku a teplotou lití slitiny

Hodnoty dilatací  $L_{max}$ ,  $L_{maxf}$ ,  $L_{lik}$ ,  $L_{sol}$ ,  $L_{200}$ , viz tabulka 8.2, získané z experimentálních měření byly zpracovány na grafickou závislost uvedenou na obr. 8-13, která tyto hodnoty slitiny AlSi12CuNiMg ukazuje v závislosti na teplotě lití 675 °C, 700 °C a 725 °C u odlitků s průměrem 40, 50 a 60 mm litých do formy z CT směsi tvrzené  $CO_2$  a pískové formovací směsi s bentonitovým pojivem.



Obr. 8-13 Závislost dilatačních charakteristik slitiny AlSi12CuNiMg na teplotě lití

Na obr. 8-13 je závislost dilatace pro zkoumanou slitinu AlSi12CuNiMg při teplotách lití 725 °C, 700 °C a 675 °C. Největší dilataci  $L_{max}$ , tj. dilataci v kladném směru vykazuje odlitek z této slitiny litý z teploty 700 °C, hodnota 0,34 mm. Nejmenší hodnota 0,0005 mm byla naměřena při teplotě lití 725 °C. Pro všechny teploty lití je vidět prakticky stejný trend dilatace  $L_{max}$ , v průměru pro teplotu 725 °C 0,08 mm, pro 700 °C 0,12 mm a pro 675 °C 0,07mm. Naopak pro hodnotu nejvyšší záporné dilatace je z uvedené grafické

závislosti vidět stoupající trend dilatačních změn pro slitinu AlSi12CuNiMg směrem od teploty 725 °C s nižšími hodnotami dilatace  $L_{min}$ , v průměru -0,26 mm, přes teplotu lití 700 °C, která má průměrnou hodnotu srovnatelnou také -0,26, po teplotu lití 675 °C, která vykazuje průměrnou hodnotu nejvyšší, -0,52 mm. Hodnota pro 675°C je skoro dvakrát větší.

### 2) Velikost dilatace při teplotě 200 °C

Grafická závislost uvedená na obr. 8-14, které přísluší tabulka 8.4, ukazuje závislost dilatace odlitku při 200 °C pro slitinu AlSi12CuNiMg na teplotě lití dané slitiny, která byla 725 °C, 700 °C a 675 °C. Odlévání bylo prováděno do slévárenské formy z CT směsi a pískové formovací směsi.

Teplota lití [°C]	Materiál formy	Velikost odlitku [mm]	L <sub>200</sub> [mm]
	CT směs	Ø40x84	-0,1048
	CT směs	Ø50x84	-0,0898
725	CT směs	Ø60x84	-0,0266
125	Písek	Ø40x84	-0,3915
	Písek	Ø50x84	-0,2791
	Písek	Ø60x84	-0,2991
	CT směs	Ø40x84	-0,1571
700	CT směs	Ø50x84	-0,1702
	CT směs	Ø60x84	-0,2094
700	Písek	Ø40x84	-0,0711
	Písek	Ø50x84	-0,3141
	Písek	Ø60x84	-0,0833
	CT směs	Ø40x84	-0,0318
675	CT směs	Ø50x84	-0,2905
	CT směs	Ø60x84	-0,1505
	Písek	Ø40x84	-0,3886
	Písek	Ø50x84	-0,7846
	Písek	Ø60x84	-0,6511

Tab. 8.4 Hodnoty dilatace při 200 °C pro slitinu AlSi12CuNiMg



Obr. 8-14 Závislost dilatace při 200 °C na teplotě lití

Z grafické závislosti uvedené na obr. 8-14 je patrné, že největší hodnotu dilatace  $L_{200}$  vykazuje slitina AlSi12CuNiMg při teplotě lití 675 °C, průměrná hodnota -0,38mm. Dále je patrné, že hodnoty této dilatace jsou nejnižší pro teplotu 700 °C, průměrná hodnota -0,17 mm. Pro teplotu lití 725 °C je průměrná hodnota jen o něco vyšší, -0,20 mm.

### 4) Čas tuhnutí zkoumaného odlitku

Čas tuhnutí slitiny je závislý nejen na použité slévárenské formě, ale i na teplotě lití dané slitiny. Pro každý experiment byl opět odečten čas dosažení teplot likvidu a solidu a z jejich rozdílu vypočten čas tuhnutí zkoumané slitiny AlSi12CuNiMg, který je uveden tabulce 8.5 pro předem stanovené teploty lití 725 °C, 700 °C a 675 °C. Obr. 8-15 ukazuje grafickou závislost časů tuhnutí odlitků z pístové hliníkové slitiny AlSi12CuNiMg při různých teplotách lití.

Teplota lití [°C]	Velikost odlitku [mm]	Materiál formy	t <sub>tuh</sub> [s]
725	Ø40x84	CT směs	121,2
	Ø50x84	CT směs	174,0
	Ø60x84	CT směs	229,2
	Ø40x84	Písek	252,0
	Ø50x84	Písek	315,6
	Ø60x84	Písek	498,0

Tab. 8.5 Časy tuhnutí slitiny AlSi12CuNiMg

	Ø40x84	CT směs	120,0
700	Ø50x84	CT směs	147,6
	Ø60x84	CT směs	210,0
	Ø40x84	Písek	195,6
	Ø50x84	Písek	230,4
	Ø60x84	Písek	240,8
675	Ø40x84	CT směs	101,1
	Ø50x84	CT směs	145,0
	Ø60x84	CT směs	199,4
	Ø40x84	Písek	188,4
	Ø50x84	Písek	228,0
	Ø60x84	Písek	290,0



Obr. 8-15 Čas tuhnutí odlitků z pístové slitiny v závislosti na teplotě lití

Z obr. 8-15 vyplývá, že prakticky stejný trend časů tuhnutí vykazují odlitky ze slitiny AlSi12CuNiMg lité ze všech teplot, tedy 725 °C, 700 °C a 675 °C s průměrnými hodnotami 265 s, 191 s a 192 s. Odlitky lité z teploty 725 °C tuhnou nejdéle.

#### 8.3.3 Vyhodnocení 3. etapy měření

Třetí etapa experimentálních měření byla zaměřena na měření dilatačních změn pístové slitiny AlSi12CuNiMg v závislosti na velikosti, resp. průměru odlitku. Průměry odlitků byly pro všechna měření 40 mm, 50 mm a 60 mm x 84 mm. Měření probíhala do forem vyrobených z CT směsi tvrzené  $CO_2$  a forem z pískové formovací směsi

s křemenným ostřivem a bentonitovým pojivem z teplot lití 725 °C, 700 °C a 675 °C. Z naměřených hodnot uvedených v tabulce 8.2 a získaných z dilatačních křivek, které jsou uvedeny v příloze 2, byly posuzovány tyto závislosti:

1) vztah dilatačních změn k teplotě lití slitiny AlSi12CuNiMg;

2) velikost dilatace při teplotě 200 °C;

3) čas tuhnutí zkoumaného odlitku.

### 1) Vztah mezi dilatačními změnami odlitku a teplotou lití slitiny

Z hodnot dilatací slitiny AlSi12CuNiMg získaných z měření a uvedených v tabulce 8.2 byly sestaveny grafické závislosti dilatačních změn při lití odlitků o rozměrech 40, 50 a 60 x 84 mm. Materiálem použitých slévárenský forem byla CT směs s vodním sklem a písková formovací směs s křemenným ostřivem a bentonitovým pojivem. Teploty lití u experimentů byly 675, 700 a 725 °C. Získané grafické závislosti jsou uvedeny pro všechny průměry odlitků, tj. 40 mm, 50 mm a 60 mm, na obr. 8-16.



Obr. 8-16 Grafická závislost dilatačních charakteristik slitiny AlSi12CuNiMg na průměru odlitku

Z grafické závislosti na obr. 8-16 pro zkoumanou slitinu AlSi12CuNiMg je pro průměr odlitku 40 mm patrné, že odlitek vykazuje největší kladnou dilataci  $L_{max}$  0,08 mm a největší zápornou dilataci  $L_{min}$  -0,51 mm. Pro průměr 50 mm činí to největší hodnoty  $L_{max}$  a  $L_{min}$  0,13 a -0,93 mm. A pro průměr 60 mm 0,34 a -0,84 mm. Průměrné hodnoty  $L_{max}$  jsou pro průměr 40 mm 0,05 mm, 50 mm 0,06 mm a 60 mm 0,15 mm a  $L_{min}$ -0,27 mm, -0,43 mm a -0,36 mm. Z těchto hodnot je patrný nárůst těchto dialtací od menších průměrů odlitků k větším.

#### 3) Velikost dilatace při teplotě 200 °C

Obr. 8-17 ukazuje opět smrštění odlitků při teplotě odlitku v tepelné ose 200 °C v závislosti na průměru odlitku ze slitiny AlSi12CuNiMg lité do forem z CT směsi a pískové formovací směsi z teplot lití 725, 700 a 675 °C. Průměrné hodnoty pro odlitky s průměry 40 mm, 50 mm a 60 mm jsou -0,19 mm, -0,32 mm a -0,24 mm.



Obr. 8-17 Závislost dilatace L<sub>200</sub> na průměru odlitku

### 4) Čas tuhnutí zkoumaného odlitku

Čas tuhnutí odlitků ve formách v závislosti na velikosti, resp. průměru odlitku je uveden na grafické závislosti na obr. 8-18. Pro jednotlivé průměry odlitků byly určeny tyto průměrné doby tuhnutí: pro 40 mm 163 s, 50 mm 207 s a pro průměr 60 mm 278 s. Z průměrných hodnot a grafické závislosti na obr. 8-18 vyplývá, že podle předpokladu nejrychleji tuhnou odlitky ze slitiny AlSi12CuNiMg ve formách s průměrem odlitku 40 mm a naopak nejdéle tuhnou odlitky z této slitiny ve formách s průměrem odlitku 60 mm.



Obr. 8-18 Grafická závislost časů tuhnutí na průměru odlitku ze slitiny AlSi12CuNiMg

V tabulce 8.6 jsou uvedeny vypočtené hodnoty konstanty tuhnutí pro jednotlivé experimenty.

Velikost odlitku [mm]	Materiál formy	Teplota lití [°C]	Konstanta tuhnutí [m.s <sup>-1/2</sup> ]
Ø40	CT směs	725	0,000320
	CT směs	700	0,000312
	CT směs	675	0,000337
	Písek	725	0,000224
	Písek	700	0,000253
	Písek	675	0,000264
Ø50	CT směs	725	0,000324
	CT směs	700	0,000352
	CT směs	675	0,000357
	Písek	725	0,000246
	Písek	700	0,000289
	Písek	675	0,000293
Ø60	CT směs	725	0,000334
	CT směs	700	0,000362
	CT směs	675	0,000357
	Písek	725	0,000241
	Písek	700	0,000353
	Písek	675	0,000308

Tab. 8.6 Hodnoty konstanty tuhnutí pro odlitek tvaru válce

Z křivek tuhnutí a dilatace odlitků ze slitiny pístové hliníkové slitiny AlSi12CuNiMg ve tvaru válce byly z vybraných hodnot dilatačních změn odpovídající teplotám tuhnoucího a chladnoucího odlitku vypočítány hodnoty součinitele teplotní smrštivosti α podle vztahu:

$$\alpha = \frac{\Delta D}{D_o \times (T_2 - T_1)} \tag{8.1}$$

kde značí:  $\alpha$  – součinitel teplotní smrštivosti [K<sup>-1</sup>];

ΔD – dilatační změnu odlitku [mm];

D<sub>o</sub> – počáteční průměr odlitku [mm];

 $(T_2-T_1)$  – teplotní interval, ve kterém je určován součinitel  $\alpha$ .

Vyhodnocení dat součinitele teplotní smrštivosti pro slitinu AlSi12CuNiMg odlitou do forem z CT směsi s vodním sklem tvrzené CO<sub>2</sub> a pískové formovací směsi s křemenným ostřivem a bentonitovým pojivem při rozměrech odlitků 40 mm, 50 mm a 60 mm x 84 mm litých z teplot 675 °C, 700 °C a 725 °C, je uvedeno v tabulce 8.10. V této tabulce jsou kromě hodnot součinitele lineárního smrštění uvedeny i hodnoty smrštění objemového, které byly vypočítány na základě vztahu (7.2).

Z dat uvedených v tabulce 8.6 byly sestrojeny grafické závislosti, které ukazují vybrané teplotní závislosti součinitele teplotní smrštivosti pro slitinu AlSi12CuNiMg. Na obr. 8-19, je uvedena grafická závislost součinitele teplotního smrštění pro zkoumanou slitinu při teplotě lití 725 °C. Z grafické závislosti je patrné, že součinitel α má pro všechny případy prakticky totožnou hodnotu v jednotlivých zkoumaných intervalech s výjimkou experimentu provedeného do pískové slévárenské formy s průměrem 40 mm.

Tab. 8.6 Hodnoty součinitele teplotní smrštivosti vypočítané ze získaných závislostí pro odlitek tvaru válce

viz soubor Tab\_8\_6.pdf



Obr. 8-19 Závislost součinitele teplotního smrštění na průměru a materiálu formy při teplotě lití 725 °C

Další grafickou závislost zpracovanou na základě dat v tab. 8.6 ukazuje obr. 8-20, na kterém je zobrazena závislost  $\alpha$  u pístové slitiny AlSi12CuNiMg na teplotě lití dané slitiny. Je patrné, že tato slitina vykazuje stejné hodnoty součinitele  $\alpha$  při teplotách lití 675 °C, 700 °C a 725 °C ve formě z CT směsi s vodním sklem tvrzené CO<sub>2</sub> i z pískové s formovací směsi. Výjimku tvoří odlitek litý do formy z pískové formovací směsi z teploty 675 °C.



Obr. 8-20 Závislost součinitele α na teplotě lití pro slitinu AlSi12CuNiMg při lití do formy s průměrem 50 mm

Obr. 8-21 a 8-22 zobrazují grafickou závislost, podobně jako obr. 8-20, tj. závislost součinitele teplotního smrštění zkoumané slitiny na použité slévárenské formě u odlitku s průměrem 40 mm a 60 mm. Z obrázků je patrné, že zvýšené hodnoty součinitele teplotní smrštivosti vykazuje slitina AlSi12CuNiMg při teplotách lití 725 °C a 675 °C ve formách s průměrem 40 mm při teplotě lití 675 °C. Ostatní teploty lití jsou ve všech průměrech prakticky podobné pro všechny rozměry, tj. 40 mm a 60 mm a mírně nižší pro průměr 50 mm.



Obr. 8-21 Závislost součinitele α na teplotě lití pro slitinu AlSi12CuNiMg při lití do formy s průměrem 40 mm



Obr. 8-22 Závislost součinitele α na teplotě lití pro slitinu AlSi12CuNiMg při lití do formy s průměrem 60 mm

Závislost součinitele α na průměru odlitků pro slitinu AlSi12CuNiMg při lítí z teploty 700 °C ukazuje obr. 8-23. Z této grafické závislosti je patrné, že odlitky lité do pískové formy vykazují podobný průběh součinitele teplotní smrštivosti na teplotních intervalech mimo průměru 50 mm. Závislosti v pískových formách mají také nižší hodnoty než hodnoty lité do forem z CT směsi.



Obr. 8-23 Závislost součinitele teplotního smrštění na průměru a materiálu formy při teplotě lití 700 °C

Na obr. 8-24 je uvedena opět závislost součinitele teplotní smrštivosti na použité slévárenské formě a průměru odlitku tentokráte pro teplotu lití 675 °C. Zde však naopak vykazují nižší hodnoty součinitele teplotní smrštivosti  $\alpha$  odlitky lité do forem z CT směsi a to pro všechny průměry odlitku.



Obr. 8-24 Závislost součinitele teplotního smrštění na průměru a materiálu formy při teplotě lití 675 °C

# 9. SLEDOVÁNÍ DILATAČNÍCH VLASTNOSTÍ SLITIN HLINÍKU PŘI JEJICH PLYNULÉM OHŘEVU

Tato disertační práce se zabývá nejen sledováním dilatačních změn při tuhnutí a chladnutí odlitků ze slitiny AlSi12CuNiMg, tj. zkoumáním dilatačních vlastností ve spojitosti se součinitelem teplotním smrštivosti, ale i zkoumáním a měřením dilatačních změn odlitků z této slitiny při jejich ohřívání (tedy součinitelem teplotní roztažnosti). Obojí naměřené a vypočítané hodnoty (součinitel teplotní smrštivosti a roztažnosti) je možno porovnat a v souladu s cíly této práce tak sledovat jejich možnou souvislost. Kromě sledování dilatačního chování slitiny AlSi12CuNiMg při jejím ohřevu bylo sledováno toto chování i u slitiny AlSi12 a čistého hliníku Al99,5. K tomuto účelu bylo použito dalšího speciálního měřícího zařízení, které umožňuje sledovat dilatační vlastnosti slitin tentokráte při jejich ohřevu a bylo taktéž zkonstruováno na Katedře strojírenské technologie na TU v Liberci. Bližší popis zařízení uvádí kap. 9.2.1. Zařízení se skládá z trubkové odporové pece s regulátorem, aby bylo možno měnit podmínky ohřevu odlitků ve tvaru válce, do které se vkládají vzorky ze zkoumaných slitin a indukčního snímače, který spolu s datovými sběrnicemi, resp. převodníky, umožňuje sledování dilatačních vlastností vybrané slitiny. Forma pro odlévání vzorků pro měření dilatačních charakteristik při ohřevu byla vyrobena z oceli o průměru 10 mm, z čehož je patrné, že pro experimenty byl v tomto případě použit odlitek tvaru válce, odlévaný z různých teplot lití. Forma s válcovou dutinou vyrobená z oceli nebyla před odléváním vzorků předehřívána. Měření probíhalo v dílnách a laboratořích katedry Strojírenské technologie, Technické univerzity v Liberci.

# 9.1 Výpočet lineárních rozměrových změn odlitku tvaru válce

Jako v předchozích kapitolách bude před vlastním měřením dilatačních změn odlitků o průměru 10 mm x 50 mm proveden výpočet smrštění odlitku tvaru válce, viz obr. 9-1, s využitím tabelovaných hodnot součinitele lineární roztažnosti materiálu AlSi12CuNiMg, který se používá pro výrobu pístů spalovacích motorů, slitiny AlSi12 a čistého hliníku Al99,5, viz tabulka 9.1. Tabulka 9.2 uvádí vypočtené hodnoty lineárního smrštění. Výpočet byl proveden pro rozměr odlitku od 40 mm do 60 mm v intervalu 500 °C až 20 °C na základě vztahu:

$$\Delta l = \alpha \times l_0 \times (T_2 - T_1) \tag{9.1}$$

kde značí: Δl – roztažení odlitku [mm];

- $\alpha$  součinitel teplotní roztažnosti materiálu [K<sup>-1</sup>];
- l<sub>0</sub> počáteční délku odlitku [mm];
- $T_2$ - $T_1$  teplotní interval [°C].

Tab. 9.1 Hodnoty koeficientu teplotní roztažnosti pro zkoumané slitiny

Materiál	Koeficient teplotní roztažnosti α [K <sup>-1</sup> ]	Zdroj
AlSi12CuNiMg	$2,1x10^{-5}$	[45]
AlSi12	$2,2x10^{-5}$	[46]
A199,5	$2,4x10^{-5}$	[47]



Obr. 9-1 Vypočtené závislosti dilatací na rozměru odlitku pro sledované slitiny

### 9.2 Měření dilatačních změn odlitků

Rozměrové změny slitin hliníku při jejich ohřevu je možno zkoumat na speciálním zařízení, které bylo zkonstruováno a je k dispozici na Katedře strojírenské technologie.

S tímto měřícím zařízením s trubkovou odporovou pecí, které je schopno zaznamenávat časový průběh dilatačních změn a teploty je propojen prostřednictvím datových sběrnic počítač a celá soustava je napájena zdrojem stabilizovaného napětí.

## 9.2.1 Popis měřícího zařízení

Použité měřící zařízení pro sledování dilatačních vlastností slévárenských slitin při ohřevu se skládá ze tří základních částí. První a nejdůležitější částí je elektrická odporová pec kruhového průřezu, která je schopna pracovat do teplot 1100 °C. Vnitřní prostor pece, ve kterém probíhá zahřívání vzorku je vyroben z keramické trubky, která je na vnějším průměru opatřena odporovým vinutím. Vnitřek pece je vyhříván tímto odporovým vinutím, které je připojeno na zdroj elektrického proudu s regulátorem teploty Eurotherm 91e, který reguluje teplotu v peci pomocí termočlánky PtRh-Pt. Keramická trubka je obložena izolační šamotovou vyzdívkou a uložena do ocelového pláště. Celá pec je uložena suvně na trubkovém vedení rámu zařízení, aby bylo možno snadněji vkládat zkoumané vzorky do jejího vyhřívacího prostoru. Druhou částí měřícího zařízení, která slouží k vlastnímu snímání dilatačních změn je indukční snímač, který je taktéž uložen na rámu zařízení, ovšem pevně. Na držák indukčního snímače v ose jeho snímací části je připevněna nosná křemenná trubice, která má na opačném konci zářez pro vkládání vzorků. Středem této nosné trubice prochází měřící křemenná trubice, která je k vzorku a čidlu snímače přitlačena pružinou a přenáší dilatace ze vzorku na indukční snímač tím, že se dotýká měřícího konce snímače a je v nosné trubici volně suvná. Na zářezu nosné trubice, který slouží pro ukládání vzorků, jsou umístěny dva termočlánky NiCr-Ni (typ K), z nichž jeden snímá teplotu v prostoru pece a druhý teplotu měřeného vzorku. Výstupní signál z indukčního snímače, elektrické napětí, je přes třetí základní část měřícího zařízení, která slouží ke zpracování naměřených dat a to sběrnice typu QMB-DAQ-56 a PC, které slouží k zaznamenání a vyhodnocení získaných dat teplot a rozměrových změn.



 indukční snímač, 2- suvná trubice, 3- nosná trubice, 4- izolace trubkové pece, 5- trubková odporová pec,
 suvné vedení pece, 7- vzorek, 8- držák indukčního snímače, Tvz- termočlánek teploty vzorku, Tvptermočlánek teploty vnitřku pece, Treg- termočlánek regulátoru teploty v peci.

Obr. 9-2 Nákres měřícího zařízení pro měření dilatačních změn při ohřevu



Obr. 9-3 Zařízení pro sledování dilatace při ohřevu a celá měřící aparatura

# 9.2.2 Charakteristika forem použitých pro experimenty

Experimentální měření v této části práce byly prováděny do slévárenské formy vyrobené z oceli 11 500 což není ocel, která se používá v průmyslové výrobě pístů spalovacích motorů, tj. nástrojová ocel např. 19 552, ovšem ochlazovací podmínky můžeme považovat za dostatečně obdobné. Použití finančně nákladné nástrojové oceli pro takto malé odlitky není třeba, jelikož se nejedná o formu tepelně cyklicky namáhanou.

Kovová forma má obecně vysokou akumulační schopnost a teplotní vodivost, a proto je schopna teplo z materiálu odebrat velmi rychle.

Pro experimenty byla tedy použita kovová forma s těmito parametry:

Forma byla vyrobena z kovového masivu z materiálu 11 500 a v ní byla obrobena dutina o průměru 10 mm x 157 mm, viz obr. 9-4. Z takto vyrobené formy lze získat dva vzorky z jednoho odlití taveniny a to vzorky o rozměrech Ø 10 mm x 50 mm.



Obr. 9-4 Kovová slévárenská forma pro odlévání vzorků na měření dilatačních změn při ohřevu

# 9.2.3 Popis provedených experimentálních měření

Při měření dilatačních změn odlitků byly získány hodnoty součinitele teplotní roztažnosti α pro různé teplotní intervaly. Experimentální měření dilatačních změn při ohřevu odlitku tvaru válce probíhalo na měřícím zařízení popsaném v kap. 9.2.1. Takto byly získány hodnoty součinitele teplotní roztažnosti pro slitiny hliníku AlSi12CuNiMg, tepelně nezpracovanou a zpracovanou, AlSi12 a čistý hliník Al99,5. Měření byla provedena ve dvou etapách za plynulého ohřevu odlitků, který umožňuje plný výkon pece, ve kterých byly postupně sledovány vlivy parametrů lití na dilatační vlastnosti daných slitin a vliv tepelného zpracování na hodnotu součinitel teplotní roztažnosti pro slitinu AlSi12CuNiMg.

1. etapa: Tato etapa experimentálních měření se zabývala vlivem teploty lití na dilatační změny při ohřevu odlitků o průměru 10 mm x 50 mm z použitých slévárenských slitin. Teploty lití byly 675, 700 a 725 °C a odlévání probíhalo do kovové slévárenské formy.

Z každé slitiny byly pro dané podmínky lití připraveny tři vzorky a měření dilatací při ohřevu probíhalo až na teplotu vzorku 500 °C.

2. etapa: Ve druhé etapě experimentů byla věnována pozornost vlivu tepelného zpracování, resp. precipitačního vytvrzování, na dilatační vlastnosti pístové slitiny AlSi12CuNiMg při jejím ohřevu. Byly použity vzorky odlité z různých teplot lití 675, 700 a 725 °C do kovové formy, které byly následně tepelně zpracovány. Měření dilatací při ohřevu tepelně zpracované pístové slitiny probíhalo taktéž na třech vzorcích pro každou teplotu lití na teplotu vzorku 500 °C.

Použité slitiny na bázi hliníku a čistý hliník byly připravovány a odlévány za stejných podmínek měření mimo měnící se teploty lití odlitků, resp. vzorků. Slitiny byly nataveny v grafitových kelímcích v elektrické odporové peci PEK-1 a před odléváním byly taveniny slitin opět metalurgicky ošetřeny rafinační solí T3. Teplota taveniny dané slitiny byla před odlitím měřena digitálním teploměrem s termočlánkem NiCr-Ni (typ K) a po té byla odlita do dutiny kovové slévárenské formy. Potom byly odlitky nařezány na rozměr Ø 10 mm x 50 mm a vloženy do odporové pece měřícího zařízení, která plynule plným výkonem ohřívala zkoumaný vzorek na 500 °C. Naměřená data byla přes sběrnice a pomocí software dodávaného se sběrnicemi zaznamenávána na disku PC. Program DAQview dodávaný společně se sběrnicemi umožňuje sledování hodnot teploty vzorku, teploty v peci a zároveň hodnoty dilatace (ta je zaznamenávána prostřednictvím změny napětí) v reálném čase. Data byla na disku počítače připojeném k dilatometru ukládána ve formě textového souboru \*.txt. Z těchto souborů byla data exportována do software Microsoft Excel, kde z nich byly po přepočtu pomocí kalibrační konstanty s hodnotou 0,004114, odečteny hodnoty potřebné pro výpočet součinitele teplotní smrštivosti α. Potom byly ze získaných dat vytvořeny grafické závislosti dilatací a teplot na čase, viz obr. 9-5, kde je ukázáno, které hodnoty byly z obdržených závislostí získány a vyhodnoceny.

Výše zmíněná měření byla provedena v uvedených etapách. Z všech etap byly získány časové závislosti dilatací a teploty při ohřevu odlitků z čistého hliníku a slitin hliníku. Měření byla ukončena, když teplota na termočlánku vzorku, tj. teplota vzorku, dosáhla 500 °C, neboť při vyšší teplotě hrozí roztavení vzorku v peci měřícího zařízení. Data odečtená z dilatačních křivek jsou uvedena v tabulce 9.2.



 $L_{100}$ - dilatace odlitku při teplotě 100 °C ,  $t_{100}$ - čas dilatace odlitku  $L_{100}$ ,  $L_{200}$ - dilatace odlitku při teplotě 200 °C ,  $t_{200}$ - čas dilatace odlitku  $L_{200}$ ,  $L_{300}$ - dilatace odlitku při teplotě 300 °C ,  $t_{300}$ - čas dilatace odlitku  $L_{300}$ ,  $L_{400}$ - dilatace odlitku při teplotě 400 °C ,  $t_{400}$ - čas dilatace odlitku  $L_{500}$ - dilatace odlitku při teplotě 500 °C odpovídá dilataci  $L_{max}$ ,  $t_{500}$ - čas dilatace odlitku  $L_{500}$  odpovídá času  $t_{max}$ .

Obr. 9-5 Hodnoty odečítané z dilatačních křivek

# Tab. 9.2 Výsledky dilatometrické analýzy při ohřevu odlitků

viz soubor Tab\_9\_2.pdf

### 9.3.1 Vyhodnocení 1. etapy měření

V této etapě byla, jak je výše uvedeno, zkoumána závislost dilatačních změn válcového odlitku o průměru 10 mm x 50 mm z materiálů AlSi12CuNiMg, AlSi12 a Al99,5 litých do ocelové slévárenské formy na teplotě lití 675, 700 a 725 °C při plynulém ohřevu vzorku z 20 °C na 500 °C. Ze získaných dilatačních křivek, které jsou uvedeny v příloze 3, lze hodnotit tyto závislosti:

1) vztah dilatačních změn při ohřevu k teplotě lití slitiny;

2) velikost dilatace při teplotě 200 °C;

3) poměr dilatace k délce měřeného odlitku.

#### 1) Vztah mezi dilatačními změnami odlitku při ohřevu k teplotě lití slitiny

Pro vyhodnocení dilatačních vlastností slitin AlSi12CuNiMg, AlSi12 a čistého hliníku Al99,5 byly z naměřených závislostí odečteny hodnoty dilatačních změn při předem vybraných teplotách  $L_{100}$ ,  $L_{200}$ ,  $L_{300}$ ,  $L_{400}$ ,  $L_{500}$ , viz tabulka 9.2. Grafické závislosti dilatačních změn při plynulém ohřevu odlitků o rozměrech Ø10 x 50 mm litých z teploty 725 °C ze zkoumaných slitin je uvedena na obr. 9-6. Obdobné závislosti dilatačních změn ze zkoumaných slitin při teplotě lití 700 °C uvádí obr. 9-7 a z teploty lití 675 °C obr. 9-8.





Na obr. 9-6 je zobrazena závislost dilatace pro zkoumané slitiny AlSi12CuNiMg, AlSi12 a Al99,5 při teplotě lití 725 °C. Největší průměrnou dilataci  $L_{max}$ , tedy dilataci při 500 °C, vykazuje odlitek ze slitiny Al99,5 s hodnotou 0,37 mm. Nejnižší průměrná hodnota byla zjištěna u slitiny AlSi12 0,31 mm a pro slitinu AlSi12CuNiMg byla zjištěna průměrná hodnota velmi podobná 0,32 mm. Pro teplotu 725 °C jsou průměrné hodnoty dilatací slitiny AlSi12CuNiMg vyšší než pro ostatní slitiny.



Obr. 9-7 Měřené dilatační charakteristiky zkoumaných slitin při teplotě lití 700 °C a následném plynulém ohřevu na 500 °C

Grafická závislost dilatace (viz obr. 9-7) pro zkoumané slitiny AlSi12CuNiMg, AlSi12 a Al99,5 při teplotě lití 700 °C udává opět nejvyšší průměrnou hodnotu dilatace  $L_{max}$  pro odlitek ze slitiny Al99,5 s hodnotou 0,38 mm, což je hodnota prakticky stejná jako v případě lití z teploty 725 °C. Hodnoty  $L_{max}$  naměřené u slitin AlSi12CuNiMg a AlSi12 jsou totožné 0,31 mm a opět stejné jako v předchozím případě. Zde však hodnoty dilatací pro slitinu AlSi12CuNiMg vykazují nejnižší hodnoty ze všech měření při teplotách lití 700 °C.


Obr. 9-8 Měřené dilatační charakteristiky zkoumaných slitin při teplotě lití 725 °C a následném plynulém ohřevu na 500 °C

Z obr. 9-8 je patrné, že trend hodnot dilatací u zkoumaných slitin je podobný jako pro teplotu lití 725 °C. Průměrná dilatace  $L_{max}$  vykazovaná slitinami AlSi12CuNiMg je 0,32 mm, AlSi12 je 0,30 mm. Pro odlitek z čistého hliníku Al99,5 byla zjištěna hodnota stejná jako pro oba předchozí případy, tj. 0,37 mm.

Z uvedených grafů, viz obr. 9-6, 9-7 a 9-8, je vidět ustálený trend dilatačních změn při ohřevu pro všechny slitiny, kde nejvyšší hodnoty dilatací vykazuje materiál Al99,5. Nižší hodnoty byly naměřeny pro slitiny AlSi12CuNiMg a AlSi12 stejné.

#### 2) Velikost dilatace při teplotě 200 °C

Hodnocení dilatačního chování při ohřevu testovaných slitin při teplotě odlitku 200 °C, je provedeno na základě zkušeností, že pracovní teplota pístu v komoře spalovacího motoru je přibližně 200 °C. Odlitky byly připravovány v kovové formě opět z teplot lití 675 °C, 700 °C a 725 °C. Z grafické závislosti na obr. 9-9 je patrné, že nejnižší průměrnou dilataci při této teplotě (200 °C) vykazuje pístová slitina AlSi12CuNiMg při lití z teplot 725 a 700 °C. Pro slitinu AlSi12 platí jiná závislost. Nejnižší průměrnou hodnotu dilatace  $L_{200}$  dostáváme při lití z teplot 725 °C a 675 °C se stejnou hodnotou pro oba případy 0,042 mm. Odlitky z čistého hliníku mají hodnotu dilatace při této teplotě nejnižší při lití z teploty 725 °C.



Obr. 9-9 Dilatace při teplotě 200 °C během plynulého ohřevu na 500 °C pro zkoumané slitiny v závislosti na teplotě lití vzorku

Průměrná hodnota dilatace během ohřevu  $L_{200}$  vzorků zhotovených při všech teplotách lití je nejnižší pro slitinu AlSi12 s hodnotou 0,047 mm následovanou pístovou slitinou AlSi12CuNiMg s hodnotou 0,052 mm. Nejvyšší hodnotu 0,057 mm vykazuje čistý hliník. V tabulce 9.3 jsou uvedeny hodnoty dilatací  $L_{200}$  při teplotě 200 °C během ohřevu vzorků zhotovených z teplot lití 675 °C, 700 °C a 725 °C.

Slitina	Teplota lití [°C], L <sub>200</sub> [mm]							
	725	700	675					
AlSi12CuNiMg	0,048	0,047	0,060					
AlSi12	0,042	0,058	0,042					
A199,5	0,046	0,062	0,064					

Tab. 9.3 Hodnoty L<sub>200</sub> při ohřevu na 500 °C pro vzorky ze zkoumaných slitin

#### 3) Poměr dilatace k délce měřeného odlitku

Poměr dilatace odlitku při ohřevu k původní délce měřeného odlitku (cca. 50 mm, hodnota byla stanovena pro každý vzorek jiná a k ní byl poměr vztažen) byl propočítán pro maximální naměřenou dilataci odlitku  $L_{max}$  a pro dilataci  $L_{200}$  tak, jak uvádí tabulka 9.2

pro jednotlivé teploty lití 725 °C, 700 °C a 675 °C zkoumaných slitin AlSi12CuNiMg, AlSi12 a Al99,5.



Obr. 9-10 Maximální poměrné roztažení slitin při ohřevu na 500 °C

Obr. 9-10 ukazuje maximální poměrné roztažení zkoumaných slitin v závislosti na teplotě lití dané slitiny. Z grafické závislosti je dobře patrné, že nejnižší hodnotu poměrného roztažení 0,61 % vykazuje slitina AlSi12 pro všechny teploty lití odlitků. Pístová slitina vykazuje průměrnou hodnotu 0,64 %. Čistý hliník má hodnotu 0,74 %, což je hodnota ze všech nejvyšší. Slitina AlSi12CuNiMg naopak vykazuje nejnižší poměrné roztažení při teplotě 200 °C, viz obr. 9-11, s hodnotou 0,1 %.



Obr. 9-11 Poměrné roztažení slitin při teplotě 200 °C při jejich plynulém ohřevu

## 9.3.2 Vyhodnocení 2. etapy měření

Tato etapa měření se zabývá vlivem tepelného zpracování slitiny na její dilatační vlastnosti. Za tímto účelem bylo připraveno 18 vzorků z teplot lití 725 °C, 700 °C a 675 °C ze slitiny AlSi12CuNiMg. Devět z těchto vzorků (3 pro každou teplotu lití) bylo následně tepelně zpracováno (postup tepelného zpracování viz tabulka 9.4) a byla u nich stejně jako u tepelně nezpracovaných odlitků měřena závislost dilatačních změn při ohřevu na 500 °C a zkoumán při tomto i vliv teploty lití. Všechny odlitky s rozměrem Ø 10 mm x 50 mm byly odlity do kovové slévárenské formy z oceli 11 500. Z naměřených hodnot uvedených v tabulce 9.2 a získaných z dilatačních závislostí, které jsou uvedeny v příloze 3, byly posuzovány stejné závislosti jako pro první etapu měření, tedy:

1) vztah dilatačních změn při ohřevu k teplotě lití slitiny;

- 2) velikost dilatace při teplotě 200 °C;
- 3) poměr dilatace k délce měřeného odlitku.

#### 1) Vztah mezi dilatačními změnami odlitku a teplotou lití slitiny

Pro vyhodnocení dilatačních vlastností tepelně zpracované a nezpracované pístové slitiny AlSi12CuNiMg byly z naměřených závislostí opět odečteny hodnoty dilatačních změn při předem vybraných teplotách  $L_{100}$ ,  $L_{200}$ ,  $L_{300}$ ,  $L_{400}$ ,  $L_{500}$ , viz tabulka 9.2. Graf závislosti rozměrových změn při plynulém ohřevu tepelně zpracovaných a nezpracovaných odlitků o rozměrech Ø10 x 50 mm litých z teplot 725 °C, 700 °C a 675 °C ukazuje obr. 9-12.

Operace	Čas trvání	Zařízení / Médium	Teplota procesu / média		
Rozpouštěcí žíhání	1 hodina	Elektrická odporová pec ELSKO	500 °C		
Ochlazení	30 sekund	Voda	60 °C		
Umělé stárnutí	8 hodin	Elektrická odporová pec PEK-1	120 °C		

T - 1-	0 4 D 4	1 /1	/	- 11:41_9	1141	A10:100-	NT'N I
Lan	9 4 Postur	n teneineno	zpracovani	OCHIERT	ze sumv	AIN1170 II	$ \mathbf{N}  \mathbf{V}  \mathcal{O} $
I uo.	2.1 I Obtup	<i>icpennente</i>	Lprue o vuin	ounnu	Le blitting	11011200	



Obr. 9-12 Grafická závislost dilatačních charakteristik při ohřevu, pro tepleně zpracovanou a nezpracovanou slitinu AlSi12CuNiMg, v závislosti na teplotě lití odlitku

Na obr. 9-6 je zobrazen graf závislosti dilatace při teplotách 100, 200, 300, 400 a 500 °C pro slitinu AlSi12CuNiMg, z níž měřené odlitky lité z teplot 725 °C, 700 °C a 675 °C byly tepelně zpracované a nezpracované. Největší průměrnou dilataci  $L_{max}$ , tedy dilataci při 500 °C vykazuje odlitek z této slitiny 0,32 mm, který byl tepelně nezpracován a odlit z teploty 675 °C. Nejnižší dilataci vykazují odlitky tepelně zpracované lité z teplot 700 °C a 675 °C mající stejnou průměrnou hodnotu 0,30 mm. Průměrná hodnota při všech teplotách lití je pro tepelně zpracované vzorky 0,30 mm a pro tepelně nezpracované 0,32 mm, což nejsou hodnoty výrazně odlišné.

#### 2) Velikost dilatace při teplotě 200 °C

U tepelně zpracované a nezpracované pístové slitiny AlSi12CuNiMg byla taktéž hodnocena velice důležitá dilatační charakteristika při jejím ohřevu, a to dilatace při 200 °C, která je jak, již bylo uvedeno průměrná pracovní teplota pístu spalovacího motoru. Odlitky byly připravovány v kovové formě, tj. v typu slévárenské formy, který se používá při výrobě pístů spalovacích motorů z teplot lití 675 °C, 700 °C a 725 °C. Grafická závislost na obr. 9-13 ukazuje hodnoty dilatace při ohřevu této slitiny při teplotě 200 °C a je z ní viditelné, že stejnou průměrnou dilataci ze všech teplot lití při této teplotě (200 °C)

vykazuje pístová slitina, jak tepelně zpracovaná, tak nezpracovaná, hodnota 0,05 mm. Nejnižší průměrnou hodnotu 0,043 mm vykazuje tato slitina při teplotě lití 700 °C a tepelně zpracovaná.



Obr. 9-13 Závislost dilatace L<sub>200</sub> na teplotě lití a tepelném zpracování odlitků ze slitiny AlSi12CuNiMg

V tabulce 9.5 jsou uvedeny hodnoty dilatací  $L_{200}$  při teplotě 200 °C během ohřevu tepelně zpracovaných a nezpracovaných vzorků zhotovených z teplot lití 675 °C, 700 °C a 725 °C.

Tab. 9.5 Hodnoty dilatace  $L_{200}$  tepelně zpracovaných a nezpracovaných vzorků ze slitiny AlSi12CuNiMg

Slitina	Teplota lití [°C], L <sub>200</sub> [mm]						
	725	700	675				
AlSi12CuNiMg tep. nezpr.	0,048	0,047	0,060				
AlSi12CuNiMg tep. zpr.	0,057	0,043	0,052				

#### 3) Poměr dilatace k délce měřeného odlitku

Poměr dilatace odlitků ze slitiny AlSi12CuNiMg (tepelně zpracovaných a nezpracovaných) litých z teplot 675 °C, 700 °C a 725 °C při jejich ohřevu k původní délce měřeného odlitku (cca. 50 mm, hodnota  $L_0$  byla stanovena pro každý vzorek jiná a k ní byl poměr vztažen) byl propočítán pro maximální naměřenou dilataci odlitku  $L_{max}$  a pro dilataci  $L_{200}$ , viz tabulka 9.2 a obr. 9-14.



Obr. 9-14 Grafická závislost poměrného roztažení pro tepelně nezpracovanou a zpracovanou pístovou slitinu AlSi12CuNiMg

Z obr. 9-14 je patrné, že tepelně zpracované odlitky vykazují nižší poměrné teplotní roztažení při ohřevu než odlitky tepelně nezpracované s výjimkou lití z teploty 725 °C pro poměr  $L_{200}/L_0$ . Průměrné hodnoty pro všechny podmínky lití jsou pro maximální poměrné roztažení tepelně nezpracovaných odlitků 0,64 % a pro tepelně zpracované 0,61 %, což jsou hodnoty jen velmi nepatrně odlišné. Pro poměrné roztažení  $L_{200}/L_0$  je tato hodnota u tepelně nezpracovaných odlitků 0,15 % a zpracovaných 0,10 %, což jsou hodnoty prakticky totožné.

#### 9.4 Stanovení součinitele teplotní roztažnosti

Ze získaných křivek dilatace při ohřevu u odlitků s rozměry Ø 10 mm x 50 mm litých do kovové formy ze slitin AlSi12CuNiMg, AlSi12 a Al99,5 byly z vybraných

hodnot dilatačních změn odpovídající teplotám ohřívaného odlitku vypočítány hodnoty součinitele teplotní roztažnosti α na základě rovnice (9.1). Zjištěné hodnoty součinitele teplotní roztažnosti pro tyto materiály lité z teplot 675 °C, 700 °C a 725 °C do kovové formy, z nichž polovina vzorků ze slitiny AlSi12CuNiMg byla podrobena tepelnému zpracování při jejich plynulém ohřevu na 500 °C, jsou uvedeny v tabulce 9.6.

Data uvedená v tabulce 9.6 byla použita k sestrojení grafů dosažených závislostí. Na obr. 9-15 je uvedena grafická závislost součinitele teplotní roztažnosti pro slitiny AlSi12CuNiMg, AlSi12 a Al99,5 při teplotě lití 725 °C. Ze závislosti je vidět, že součinitel α má pro všechny případy až do teploty 300 °C prakticky totožnou hodnotu, a dále jsou rozdíly markantnější, přičemž nejvyšší hodnoty součinitele vykazuje čistý hliník a nejnižší hodnoty ze všech vykazuje slitina AlSi12 ve všech intervalech.

#### Tab. 9.6 Hodnoty součinitele teplotní roztažnosti vypočítané ze získaných závislostí

viz soubor Tab\_9\_6.pdf



Obr. 9-15 Porovnání teplotní závisloti součinitele teplotní roztažnosti pro zkoumané slitiny při teplotě lití odlitků 725 °C



Obr. 9-16 Porovnání teplotní závisloti součinitele teplotní roztažnosti pro zkoumané slitiny při teplotě lití odlitků 700 °C

Z grafické závislosti, viz obr. 9-16 je patrné, že na rozdíl od teploty lití vzorků 725 °C (obr. 9-15) vykazuje při této teplotě lití nejnižší hodnoty součinitele  $\alpha$  slitina AlSi12CuNiMg ve všech intervalech a naopak nejvyšší opět čistý hliník Al99,5. Pro teplotu lití 675 °C

vykazuje nejnižší hodnoty  $\alpha$  ve všech intervalech opět slitina AlSi12 a nejvyšší  $\alpha$  jako v předchozích případech čistý hliník. Toto je patrné i z grafických závislostí součinitele teplotní roztažnosti během ohřevu při porovnání teplot lití odlitků pro materiál AlSi12, viz obr. 9-17, a pro čistý hliník na obr. 9-18.



Obr. 9-17 Závislost součinitele teplotní roztažnosti pro slitinu AlSi12 v závislosti na teplotě lití odlitků



Obr. 9-18 Závislost součinitele teplotní roztažnosti pro Al99,5 v závislosti na teplotě lití odlitků

Další a poslední grafickou závislostí získanou na základě dat uvedených v tab. 9.6, je grafická závislost na obr. 9-19, která ukazuje závislost součinitele teplotní roztažnosti α u pístové slitiny AlSi12CuNiMg na teplotě lití odlitků a na jejich tepelném zpracování. Pístová slitina vykazuje velmi podobné hodnoty tohoto součinitele při všech teplotách lití tepelně zpracovaná i nezpracovaná až do teploty 200 °C, což je pracovní teplota pro písty spalovacích motorů a tudíž je velmi významná. Od teploty 200 °C vykazují tepelně zpracované odlitky lité z teplot 700 °C a 675 °C nižší hodnoty než odlitky ostatní. Nejvyšší hodnoty α také vykazují tepelně zpracované odlitky, a to odlitky lité z teploty 725 °C.



Obr. 9-19 Závislost součinitele teplotní roztažnosti u odlitků tepelně zpracovaných a nezpracovaných litých ze slitiny AlSi12CuNiMg v závislosti na teplotě lití odlitků

## 10. METALOGRAFICKÉ HODNOCENÍ STRUKTURY ODLITKŮ ZE ZKOUMANÝCH SLITIN A HODNOCENÍ JEJICH MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

V rámci řešení této disertační práce jsem měl jako student doktorského studijního programu možnost vycestovat na zahraniční stáž do Švédského království na Linköping university, kde v laboratořích zdejší Katedry konstrukčních materiálů byla k dispozici zařízení pro přípravu vzorků na metalografickou analýzu vzorků na světelném a skenovacím elektronovém mikroskopu a také zařízení k měření makro a mikrotvrdosti vzorků. S využitím těchto zařízení byly provedeny analýzy vnitřní struktury vzorků odlitků získaných při měření dilatačního chování těchto slitin na měřících zařízeních uvedených v kap. 7 a 8. Zkoumání struktury na světelném mikroskopu bylo zaměřeno na zkoumání velikosti, rozložení, tvaru a dalších charakteristik α fáze a křemíku ve slitinách AlSi12CuNiMg, AlSi12 a čistého hliníku Al99,5 v závislosti na podmínkách lití odlitků, ze kterých byly připraveny vzorky. Analýza vzorků na elektronovém mikroskopu byla prováděna pro zjištění chemického složení intermetalických fází obsažených ve slitinách AlSi12CuNiMg, AlSi12 a Al99,5 a chemického složení těchto materiálů a byla také věnována pozornost zkoumání lomových ploch. Tvrdost, jako jedna ze základních mechanických vlastností byla měřena u všech vzorků. Tato měření probíhala, na rozdíl od ostatních uvedených v předchozích kapitolách, v dílnách a laboratořích katedry Konstrukčních materiálů, Linköping university pod vedením Prof. Stena Johanssona a ostatních pracovníků laboratoří a katedry.

## 10.1 Hodnocení struktury vzorků pomocí světelné mikroskopie a měření tvrdosti

Vzorky odebrané z odlitků (bylo voleno místo v tepelné ose ve středu odlitku) byly roztříděny podle materiálu vzorku do tří skupin.

První a největší skupina obsahovala 32 vzorků ze slitiny AlSi12CuNiMg, které byly odebrány z odlitků o rozměrech 7, 27, 40, 50 a 60 mm do kovové formy, formy z CT směsi s vodním sklem a vytvrzené CO<sub>2</sub> a pískové formy vyrobené z křemenného písku a bentonitového pojiva z teplot lití 725 °C, 700 °C a 675 °C. Druhou skupinu tvořilo 13 vzorků ze slitiny AlSi12, které byly lité ze stejných teplot jako vzorky z pístové slitiny do forem z kovu, CT směsi a pískové formovací směsi s rozměry 7 mm a 27 mm. Třetí

skupina obsahovala vzorky z čistého hliníku Al99,5, a to 12 kusů, získaných za stejných podmínek lití, jako vzorky ze slitiny AlSi12. Celkem 57 vzorků bylo ručně, nebo na strojní laboratorní kotoučové pile rozřezáno na malé kusy a zalisováno do plastového nosiče na zařízení STRUERS PRONTOPRESS-2. Plastový nosič byl vyroben z pryskyřice Specifast, která je elektricky nevodivá a transparentní. Lisovací teplota byla volena 165 °C, aby se zabránilo tepelnému ovlivnění vzorků při tomto procesu. Po zalisování vzorku následovala volba vhodného postupu leštícího procesu pro každou skupinu vzorků, z nichž zejména vzorky z čistého hliníku vyžadovaly speciální leštící podmínky. Leštění vzorků probíhalo na zařízení STRUERS ABRAMIN, viz obr. 10-1.



Obr. 10-1 Leštící zařízení Struers ABRAMIN a odebrané vzorky před leštěním

## 10.1.2 Sledování struktury vzorků pomocí světelné mikroskopie

Všechny zalisované a vyleštěné vzorky ze všech 3 skupin byly zkoumány pomocí světelného mikroskopu NIKON 510 s kamerou KAPPA DX 40, viz obr. 10-2, při třech zvětšeních s měřítky 300 µm, 100 µm a 50 µm, viz příloha 4. Dále byly vybrány fotografie s měřítkem 100 µm a pro vybrané podmínky lití bylo provedeno měření vzdálenosti sekundárních ramen dendritů (DAS – dendrite arm spacing) na pěti místech všech fotografií pomocí software KAPPA METREO, který provedl i statistické vyhodnocení.



Obr. 10-2 Použitý světelný mikroskop Nikon 510 s kamerou Kappa DX 40 a vyleštěné vzorky připravené k analýze

Struktury, u nichž bylo prováděno sledování DAS, jsou uvedeny na obr. 10-3 až 10-8 a výsledky měření uvádí tabulka 10.1. Ze získaných struktur je možno vyvodit předpoklady o kompozici, rozmístění a morfologii každé obsažené fáze a bylo možno konstatovat, že vnitřní struktura odlitků odpovídala podmínkám lití.



Obr. 10-3 Slitina AlSi12CuNiMg, kovová forma, teplota lití 675 °C, tloušťka stěny 27 mm



Obr. 10-4 Slitina AlSi12CuNiMg, forma z pískové formovací směsi, teplota lití 675 °C, tloušťka stěny 27 mm



Obr. 10-5 Slitina AlSi12CuNiMg, forma z CT směsi, teplota lití 725 °C, tloušťka stěny

7 mm



Obr. 10-6 Slitina AlSi12, kovová forma, teplota lití 725 °C, tloušťka stěny 7 mm



Obr. 10-7 Slitina AlSi12, forma z pískové formovací směsi, teplota lití 700 °C, tloušťka stěny 7 mm



Obr. 10-8 Slitina AlSi12, forma z CT směsi, teplota lití 675 °C, tloušťka stěny 27 mm

Vzorek	Číslo obrázku	Slitina	DAS	Směrodatná odchylka
č.1	10-3	AlSi12CuNiMg	15,58	2,79
č.2	10-4	AlSi12CuNiMg	41,86	11,41
č.3	10-5	AlSi12CuNiMg	45,14	15,51
č.4	10-6	AlSi12	13,23	4,11
č.5	10-7	AlSi12	53,54	9,88
č.6	10-8	AlSi12	65,37	13,47

Tab. 10.1 Velikosti DAS pro zkoumané vzorky ze slitin AlSi12CuNiMg a AlSi12

Velikost DAS je ovlivňována rychlostí ochlazování a obvykle se nachází mezi 10 až 100 µm. Pro zkoumané vzorky je při nižších ochlazovacích rychlostech, tj. pískovou slévárenskou formu, hodnota DAS vyšší. Pro slitinu AlSi12CuNiMg je průměrná velikost DAS 34,19 µm a pro slitinu AlSi12 44,05 µm.

Zjišťování velikosti DAS bylo prováděno pouze u slitin AlSi12CuNiMg a AlSi12. U čistého hliníku Al99,5 toto prováděno nebylo, neboť tento materiál žádné dendrity neobsahuje. Na obr. 10-9 je uveden příklad získané struktury čistého hliníku, na níž jsou patrné hranice zrn.



Obr. 10-9 Čistý hliník Al99,5, forma z CT směsi, teplota lití 675 °C, tloušťka stěny 27 mm

Čistý hliník měl ve struktuře mnoho intermetalických fází (černé body na fotografii) AlFeSi, což bylo způsobeno nízkou čistotou kovu zaviněnou pravděpodobně nečistotami v tavícím kelímku. Na několika snímcích je patrná mikroporózita způsobená plynovými bublinami (póry mají hladkou stěnu) uzavřenými v materiálu během tuhnutí. Více bublin bylo pozorováno v odlitcích do forem z CT směsi s vodním sklem tvrzenou  $CO_2$  a u odlitků zhotovených z vyšších teplot lití.

Ve struktuře odlitků z eutektické slitiny AlSi12 byla pozorována eutektická fáze obsahující jehlice křemíku a tuhý roztok  $\alpha$  a také poměrně velké částice nerozpuštěného křemíku s deskovitým nebo jiným nepravidelným geometrickým tvarem. Velikost a morfologie jehlic křemíku byla jemnější (menší jehlice a nerozpuštěné částice) u odlitků litých z vyšších teplot lití, s menší tloušťkou stěny a u odlitků do kovové slévárenské formy. Odlitky z pískové formy a formy z CT směsi měli přibližně stejnou morfologii a velikost křemíkových jehlic. Struktura dendritů byla více rozvětvená ve směru odvodu tepla v odlitcích s větší tloušťkou stěny. Intermetalické fáze nebyly pozorovány ve větším množství, jejich struktura je blíže sledována v kap. 10.2.2. Nečistoty ve formě pískových zrn byly nalezeny v odlitcích do forem z pískové formovací směsi a CT směsi a oxidické blány nebyly přítomny prakticky v žádném odlitku. Porózita, pravděpodobně také způsobená plynovými bublinami, byla vyšší u odlitků s nižší tloušťkou stěny, což bylo způsobeno vyšší ochlazovací rychlostí.

Mikrostruktura pístové hliníkové slitiny AlSi12CuNiMg byla složena z eutektické fáze tvořené  $\alpha$  fází, jehlicemi křemíku a vysokým poměrem různých druhů intermetalických fází, viz kap. 10.2.2. Mnoho strukturních vlastností má tato slitina

stejných jako slitina AlSi12. Kompozice, velikost, morfologie, a jiné vlastnosti eutektika a křemíku jsou zhruba stejná pro obě slitiny. Toto neplatí pro intermetalické fáze. V kovových formách byly opět přítomny poměrně velké částice nerozpuštěného křemíku nepravidelného geometrického tvaru a ve formách vyrobených z CT směsi s větší tloušťkou stěny odlitku (40, 50 a 60 mm) je možno pozorovat hrubší jehlice křemíku než u odlitků s tloušťkou stěny 7 a 27 mm. Porózita byla opět způsobena plynovými bublinami a nečistoty byly nalezeny ve formě zrn písku. Ve formách z CT směsi s průměry 40, 50 a 60 mm byla pozorována porózita větší, což bylo pravděpodobně způsobeno kombinací vzduchu a plynů vznikajících degradací pojiva. Oxidické blány nebyly pozorovány.

## 10.1.3 Měření tvrdosti slitin hliníku

Na zalisovaných vzorcích všech 3 skupin bylo prováděno měření tvrdosti pomocí mikro- a makrotvrdoměru podle Vickerse značky LECO M400 a LECO V100A, viz obr. 10-10, který byl taktéž k dispozici v laboratořích katedry Konstrukčních materiálů na Linköping university. Tato měření byla prováděna za účelem zjištění vlivu parametrů lití tj. teploty lití 725 °C, 700 °C a 675 °C, materiálu slévárenské formy kovové, formy z CT směsi s křemenným ostřivem tvrzené CO<sub>2</sub> a pískové formovací směsi s křemenným ostřivem a bentonitovým pojivem a tloušťky stěny, resp. velikosti odlitku 7, 27, 40, 50, 60 mm na tvrdost materiálů AlSi12CuNiMg, AlSi12 a Al99,5. Pro měření tvrdosti čistého hliníku Al99,5 byl z důvodu její nízké hodnoty pro dosažení přesnějších výsledků použit mikrotvrdoměr s parametry- zatížení: 300 g, čas působení zatížení: 15 s, zvětšení: 10x (mikro).

Hodnoty tvrdosti pro ostatní materiály AlSi12CuNiMg a AlSi12 byly získány z měření na makrotvrdoměru s parametry- zatížení: 1000 g, čas působení zatížení: 15 s, zvětšení: 10x (makro).



Obr. 10-10 Vickersův mikro- a makrotvrdoměr LECO s vyhodnocovacím software MICROGOP

Do každého vzorku bylo provedeno 5 zkušebních vpichů a výsledky měření byly automaticky zpracovány pomocí software MICROGOP dodávaného k zařízení. Hodnoty tvrdosti pro jednotlivé materiály při proměnných podmínkách lití jsou uvedeny u fotografií struktur jednotlivých materiálů v příloze 4 a z těchto hodnot byly po jejich zpracování vytvořeny grafické závislosti pro jednotlivé slitiny a podmínky lití, které jsou uvedeny na následujících obrázcích.







Obr. 10-12 Tvrdost pístové slitiny AlSi12CuNiMg v závislosti na tloušťce stěny odlitku

Z grafických závislostí uvedených na obr. 10-11 a 10-12 je patrné, že při zkoumání závislosti tvrdosti na teplotě lití dosahuje nejvyšší průměrné hodnoty tato slitina litá z teploty 675 °C a 700 °C, hodnota 103 HV. Při zkoumání vlivu tloušťky stěny dosahuje pístová slitina nejvyšší průměrné hodnoty tvrdosti při lití do formy s tloušťkou stěny 7 mm. Hodnoty tvrdosti při odlévání tohoto materiálu do různých materiálů použité slévárenské formy, která byla zhotovena z oceli 11 500, CT směsi s křemenným ostřivem a vodním sklem a pískové formovací směsi s křemenným ostřivem a bentonitovým pojivem, vykazuje slitina AlSi12CuNiMg pro ocelovou formu nejvyšší průměrnou hodnotu 92 HV a pro formu z CT směsi a z pískové formovací směsi přibližně stejné hodnoty 84 a 83 HV.







Obr. 10-14 Závislost tvrdosti slitiny AlSi12 na tloušťce stěny odlitku

Ze závislostí tvrdosti slitiny AlSi12 na teplotě jejího lití a na tloušťce stěny odlitku, který z ní byl odlit, viz obr. 10-13 a 10-14, je patrné, že vyšší průměrnou hodnotu tvrdosti vykazuje tato slitina při teplotě lití 700 °C a tloušťce stěny 7 mm. Z hlediska vlivu materiálu slévárenské formy na tvrdost slitiny AlSi12 mají stejný vliv ocelová forma a forma vyrobená z CT směsi s křemenným ostřivem s vodním sklem tvrzená CO<sub>2</sub>, obě s průměrnou hodnotou 71 HV. Při lití do pískové formy vykazuje tato slitina průměrnou tvrdost 67 HV, což je hodnota jen o málo nižší než pro ostatní fomovací materiály.

Čistý hliník Al99,5 vykazuje při lití do kovové formy, formy z CT směsi a formy z pískové formovací směsi a z teplot lití 675 °C, 700 °C a 725 °C, u odlitků s tloušťkou stěny 7 mm a 27 mm prakticky stejnou hodnotu ve všech uvedených případech a to 25 HV.

Ze všech testovaných materiálů vykazuje podle předpokladu nejvyšší průměrnou hodnotu tvrdosti pístová slitina AlSi12CuNiMg 87 HV, následovaná slitinou AlSi12 s průměrnou tvrdostí 70 HV. Nejnižší průměrnou hodnotu tvrdosti 25 HV vykazuje čistý hliník Al99,5. Srovnání celkové průměrné tvrdosti zkoumaných materiálů je uvedeno na obr. 10-15.



Obr. 10-15 Srovnání tvrdosti zkoumaných materiálů

## 10.2 Hodnocení struktury vzorků na elektronovém mikroskopu

Hodnocení struktury vzorků pomocí elektronové mikroskopie probíhalo na skenovacím elektronovém mikroskopu HITACHI SU-70 s detektorem INCA PentaFETx3 a vyhodnocovacím software INCA, viz obr. 10-16. Hodnoceny byly vzorky s lomovou plochou za účelem zjištění druhu lomové plochy, dále bylo zjišťováno chemické složení zkoumaných slitin a zkoumání struktury bylo zaměřeno i na zjišťování druhu vyskytujících se intermetalických fází. Sledování těchto vlastností probíhalo na vybraných vzorcích, které byly vyjmuty z plastového nosiče (pryskyřice Specifast), jelikož nosič byl, jak již bylo popsáno výše elektricky nevodivý. Ještě před vyjmutím byly vzorky přeleštěny na leštícím disku s použitím speciální leštící suspenze, která zvýraznila strukturu a zjemnila povrch. Byly zkoumány vzorky ze slitin AlSi12CuNiMg, AlSi12 a Al99,5 litých do forem z kovu, CT směsi s vodním sklem vytvrzených CO<sub>2</sub> a do pískové formy s křemenným ostřivem a bentonitovým pojivem. Vzorky byly lité z teplot 675 °C, 700 °C a 725 °C do forem s tloušťkou stěny 7 a 27 mm.



Obr. 10-16 Skenovací elektronový mikroskop HITACHI SU-70

# 10.2.1 Zkoumání lomových ploch a zjišťování chemického složení slitin

Jak již bylo uvedeno, byly zkoumány lomové plochy vzorků z uvedených slitin pro zjištění druhu lomové plochy. Toto zkoumání probíhalo za použití SE detektoru, urychlovacího napětí 20 kV s různým zvětšením a pracovní vzdáleností. Na následujících obrázcích jsou uvedeny pořízené fotografie lomových ploch. Lomové plochy byly sledovány pouze u slitin AlSi12CuNiMg a AlSi12. U čistého hliníku nebyly získány vzorky s lomovou plochou z vysoké tvárnosti tohoto materiálu. Získané obrázky jsou uvedeny v příloze 5.



Obr. 10-17 Lomová plocha vzorku o tloušťce stěny 27 mm z pístové slitiny AlSi12CuNiMg litého do formy z CT směsi z teploty lití 700 °C



Obr. 10-18 Lomová plocha vzorku o tloušťce stěny 27 mm z pístové slitiny AlSi12CuNiMg litého do formy z oceli z teploty lití 675 °C



Obr. 10-19 Lomová plocha vzorku o tloušťce stěny 27 mm ze slitiny AlSi12 litého do formy z CT směsi z teploty lití 700 °C, zrno písku ve struktuře



Obr. 10-20 Lomová plocha vzorku o tloušťce stěny 27 mm ze slitiny AlSi12CuNiMg litého do pískové formovací směsi z teploty lití 725 °C, zrna písku a póry ve struktuře



Obr. 10-21 Lomová plocha vzorku o tloušťce stěny 27 mm ze slitiny AlSi12CuNiMg litého do formy z oceli z teploty lití 725 °C, detail praskliny



Obr. 10-21 Lomová plocha vzorku o tloušťce stěny 7 mm ze slitiny AlSi12 litého do formy z oceli z teploty lití 725 °C

Z výše uvedených fotografií lomových ploch odlitků ze slitin AlSi12CuNiMg a AlSi12, není možno přesně určit, o jaký druh lomových ploch se jedná, což je způsobeno velkým množstvím přítomných fází. Byly pozorovány oba typy lomů, jak křehký, tak tvárný lom v různých místech struktur, ale z pozorování a zkušeností lze tvrdit, že převažuje lom křehký obsahující praskliny, které pravděpodobně začaly růst z hranic zrn.

Zkoumání chemického složení sledovaných slitin, jehož výsledky jsou uvedeny v tabulce 6.2, kap. 6, bylo provedeno s použitím EDX analýzy s využitím SE detektoru a PDBSE (Backscatter) detektoru s parametry: urychlovací napětí 20 kV, nízkým proudem (Low probe current) a pracovní vzdáleností 15 mm. Pro kalibraci detektorů byl jako kalibrační prvek použit kobalt. Analýza byla provedena v bodech a oblastech na dvou vybraných snímcích zkoumaných vzorků. Výsledky byly normalizovány a statisticky vyhodnoceny a jsou uvedeny v příloze 6.

## 10.2.2 Sledování chemického složení intermetalických fází

Ve struktuře všech vzorků ze zkoumaných slitin byly nalezeny intermetalické fáze. Aby bylo možno zjistit, o jaké fáze se jedná, byla provedena jejich EDX analýza na výše uvedeném skenovacím elektronovém mikroskopu za použití analýzy bodů a oblastí, viz kap. 10.2.1. Dále bylo použito tzv. mappingu, který umožňuje sledovat chemické složení vybrané oblasti a zaznamenat výskyt chemických prvků na snímku. Mapping analýza byla tedy provedena pro lepší prozkoumání chemické struktury matrice a intermetalických fází a byly použity její parametry: SE detektor, urychlovací napětí 20 kV, nízký proud (Low probe current) a pracovní vzdálenost 15 mm. Pro každý mapping bylo provedeno 60 skenovacích snímků se zaměřením na výskyt prvků: Hliník, Křemík, Měď, Titan, Zinek, Železo, Mangan a Hořčík, o nichž bylo z předchozích bodových a oblastních analýz známo, že se ve struktuře vyskytují. Všechny získané výsledky jsou uvedeny v příloze 6 a 7. Příklady získaných výsledků jsou uvedeny na následujících stránkách.

## AlSi12CuNiMg, tloušťka stěny 27 mm, teplota lití 725°C, kovová forma



20µm

Electron Image 1

Processing aption	· All elements anal	wed (Normalized)
mocessing obtain	. Fur creater to area	goed (rionnance d)

Spectrum	In stats.	Mg	Al	Si	Ti	Min	Fè	Ni	Cu	Total	
Spectrum 1 Spectrum 2 Spectrum 3 Spectrum 4 Spectrum 5	Yes Yes Yes Yes Yes	0.31 0.19 4.22 0.08 0.23	97.41 73.48 62.19 43.02 58.09	133 325 4 <i>5</i> 3 5626 4.15	0.05 0.02 0.06 0.00 0.01	-0.04 0.44 -0.03 -0.04 0.66	0.01 291 0.00 0.04 4.27	0.09 14.88 7.60 0.09 23.53	0.84 4.82 21.43 0.55 9.06	100.00 100.00 100.00 100.00 100.00	
Mean Std. deviation Max. Min		1.01 1.80 4.22 0.08	66.84 20.27 97.41 43.02	13 90 23 71 56 26 1 33	0.03 0.03 0.06 0.00	0.20 0.33 0.66 -0.04	1.45 2.01 4.27 0.00	9.24 10.08 23.53 0.09	7.34 8.60 21.43 0.55	100.00	

All results in weight%



# AlSi12CuNiMg, tloušťka stěny 27 mm, teplota lití 725°C, kovová forma





Al Ka1



Si Ka1





Ni Ka1

Mg Ka1\_2

INCO

## AlSi12, tloušťka stěny 27 mm, teplota lití 675°C, forma z CT směsi



30µm

Electron Image 1

Drococciner antion :	All alconomic	mahradi	Morran lies d)
Mocessing option :	All elements	anaiyseu (	Nonualize d)

Spectrum	In stats.	Mg	Al	Si	Ti	Mh	Fe	Ni	Cu	Total
Spectrum 1 Spectrum 2 Spectrum 3 Spectrum 4 Spectrum 5	Yes Yes Yes Yes Yes	0.10 0.06 0.09 0.12 0.10	74.40 69.09 61.20 77.05 80.20	7,46 8,19 9,49 6,73 14,51	-0.06 0.05 0.06 -0.01 0.06	6.54 7.93 9.97 4.08 1.81	11.34 14.56 18.92 11.60 3.12	0.11 0.11 0.08 0.01 0.03	0.11 -0.01 0.19 0.42 0.17	100.00 100.00 100.00 100.00 100.00
Mean Std. deviation Max. Min		0.09 0.02 0.12 0.06	72.39 7.46 80.20 61.20	9 28 3.10 14 51 6.73	0.02 0.05 0.06 -0.06	6.07 3.20 9.97 1.81	11.91 5.78 18.92 3.12	0.07 0.05 0.11 0.01	0.18 0.16 0.42 -0.01	100.00

All results in weight%



# AlSi12, tloušťka stěny 27 mm, teplota lití 675°C, forma z CT směsi



Electron Image 1







Si Ka1





Ni Ka1

Mg Ka1\_2

Ti Ka1





100µm

Electron Image 1

Processing option : All elements analysed (Normalised)

Spectrum	In stats.	Mg	Al	Si	Ti	Mn	Fe	Ni	Öı	Total
Spectrum 1	Yes	0.10	98.22	0.23	0.98	0.07	0.72	-0.20	-0.11	100.00
Spectrum 2	Yes	0.11	99.90	-0.01	-0.02	-0.02	0.21	0.05	-0.21	100.00
Spectrum 3	Yes	0.07	99.51	0.05	0.07	0.06	0.10	0.14	0.00	100.00
Spectrum 4	Yes	0.13	99.91	-0.04	0.00	-0.06	0.10	0.07	-0.11	100.00
Spectrum 5	Yes	0.05	100.00	0.10	-0.08	-0.09	0.00	0.06	-0.03	100.00
Mean		0.09	99.51	0.07	0.19	-0.01	0.22	0.02	-0.09	100.00
Std. deviation		0.03	0.74	0.10	0.44	0.07	0.29	0.13	0.08	
Max.		0.13	100.00	0.23	0.98	0.07	0.72	0.14	0.00	
Min.		0.05	98.22	-0.04	-0.08	-0.09	0.00	-0.20	-0.21	

All results in weight%



Jak uvádí kap. 10.1.2, bylo při pozorování struktury čistého hliníku Al99,5 pozorováno značné množství intermetalických částic pravděpodobně typu AlFeSi. Při EDX analýze na skenovacím elektronovém mikroskopu bylo toto potvrzeno a byla také potvrzena čistota všech zkoumaných odlitků z hlediska obsahu hliníku. Bylo pozorováno menší množství znečisťujících prvků jako je právě železo, křemík a také mangan.

U slitiny AlSi12 byly pozorovány intermetalické fáze v malých množstvích a jednalo se pravděpodobně o typy FeAl<sub>3</sub>, FeMnAl<sub>6</sub> pozorované při EDX analýze, jiné typy pozorovány nebyly. Tato ukazuje na zhoršenou kvalitu surové housky nebo na ovlivnění taveniny během tavícího procesu, kdy byly pravděpodobně ze znečištěného tavícího grafitového kelímku vneseny do taveniny příměsi železa.

Při EDX analýze na skenovacím elektronovém mikroskopu i při pozorování struktury na světelném mikroskopu byl poměr intermetalických fází v pístové slitině AlSi12CuNiMg vyšší při lití z nižších teplot lití (675 a 700 °C) ve formách z pískové a CT směsi a ve větších tloušťkách stěn, ale typ intermetalických fází je stejný pro všechny podmínky lití. Z provedené EDX analýzy je možno tvrdit, že s největší pravděpodobností byly přítomné intermetalické fáze typu AlCu<sub>2</sub> (během rozpouštěcího žíhání přecházejí do  $\alpha$  fáze, ale zkoumané odlitky žíhány resp. tepelně zpracovány nebyly), T<sub>NI</sub> (Al<sub>6</sub>Cu<sub>3</sub>Ni), Al<sub>5</sub>SiFe a intermetalická fáze typu W (Al<sub>4</sub>CuMg<sub>5</sub>Si<sub>4</sub>). Toto jsou intermetalické fáze jiných typů, než se vyskytují ve slitině AlSi12, což je dobře patrné z provedených mapping analýz. Ostatní intermetalické fáze např. typu FeAl<sub>3</sub> byly ve struktuře pravděpodobně také přítomny, však při prováděných analýzách nebyly ve struktuře pístové slitiny detekovány.

Složení přítomných intermetalických fází ve strukturách všech tří zkoumaných slitin hliníku typu AlSi12CuNiMg, AlSi12 a čistého hliníku Al99,5 bylo zjištěno s pomocí analýzy EDX. Zjištěné složení bylo pro zjištění konkrétního typu intermetalické fáze porovnáno se známým chemickým složením intermetalických fází, uvedeném v tabulkách 3.2 a 3.3, které vychází z prací MICHNY [5, 6], BELOVA [33] a RAGHAVANA [34].

## 11. DISKUSE VÝSLEDKŮ

Výsledky uvedené v této disertační práci přinášejí dílčí informace o dilatačním chování slévárenské slitiny AlSi12CuNiMg určené pro výrobu pístů spalovacích motorů v porovnání s eutektickou slitinou AlSi12 a čistým hliníkem. Tyto informace přispívají ke komplexnímu náhledu na slitiny hliníku používané pro výrobu pístů spalovacích motorů. I přesto, že písty spalovacích motorů prodělávají teplotní dilatace, jak při svém pracovním cyklu, tak během své výroby (tj. jako odlitky ve slévárenské formě), neexistují žádné publikace, které by se tímto chováním zabývaly, zejména chováním během tuhnutí a chladnutí odlitků ve slévárenské formě. Publikace vydané u nás MICHNA [4, 5, 6] a v zahraničí BELOV [33], popisují různé technologické vlastnosti slitin hliníku a zabývají se procesy doprovázející tepelné zpracování a krystalizaci na základě zkoumání vnitřní struktury těchto slitin, a také použitím slitin hliníku v automobilovém průmyslu.

Na základě dat a výsledků obsažených v této disertační práci se lze vyjádřit k těmto zjištěným skutečnostem.

**1.** Při porovnávání tepelně-fyzikálních, fyzikálních, tepelných, mechanických a ostatních užitných vlastností hliníku a jeho slitin s dalšími slévárenskými materiály, jako jsou zejména zinek a hořčík a jejich slitiny, lze konstatovat, že z hlediska vlastností, které jsou pro slévárenství nejdůležitější (teplota tání 660 °C, latentní teplo 397000 J.kg<sup>-1</sup> a měrná tepelná kapacita taveniny hliníku 1287 J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>, která má významný vliv na ohřev a chladnutí materiálu) mají hliníkové slitiny tyto vlastnosti také příznivé a jsou kvalitními slévárenskými materiály.

Poměrně vysoká hodnota tepelné energie je však pro podmínky tavení hliníku mírně nepříznivá jak z technického, tak z ekonomického hlediska. Dále je tavení slitin hliníku doprovázeno dalšími nepříznivými jevy, které jsou spojeny s vysokou slučivostí (afinitou) hliníku s kyslíkem. Tak vznikají obtížně odstranitelné oxidy. Nepříznivý vliv na tavení slitin hliníku má také jejich naplyňování plyny z okolní atmosféry, zejména vodíkem, který je nutno z taveniny pokud možno úplně odstranit. To zvyšuje náklady na přípravu kvalitních tavenin slitin hliníku. Hořčík a jeho slitiny vykazují ještě vyšší afinitu ke kyslíku než hliník, proto je nutné jejich taveninu připravovat ve vakuových pecích. Naopak příznivou vlastností slitin hliníku proti slitinám zinku je jejich nízká hustota. Hustota čistého hliníku v kapalném stavu je cca. 2600 kg.m<sup>-3</sup>, což je 2,5 krát vyšší hodnota,

než je hustota taveniny čistého zinku (6500 kg.m<sup>-3</sup>). Slitiny hořčíku mají ještě příznivější hustotu než slitiny hliníku. Hustota čistého hořčíku v kapalném stavu je 1690 kg.m<sup>-3</sup>, tj. 1,5 krát menší než je hustota čistého hliníku. Slitiny hořčíku v porovnání se standardními slitinami hliníku také dosahují lepších mechanických vlastností, zejména tažnosti, čehož se využívá při výrobě namáhaných součástí v automobilovém a leteckém průmyslu.

Povrchové napětí a dynamická viskozita, což jsou fyzikální vlastnosti, které mají zásadní vliv na tekutost a tím i na zabíhavost tavenin, příznivě ovlivňují výrobu odlitků ze slitin hliníku. Zabíhavost slitin zinku je ještě příznivější. K tomuto přispívá vyšší hustota slitin zinku a jejich nízká afinita ke kyslíku.

Z hlediska chemického je hliník kov ze III.A skupiny, se třemi valenčními elektrony, což je rozhodující pro jeho fyzikální a chemické vlastnosti. Protonové číslo hliníku je 13, relativní atomová hmotnost 26,9815. Teplota tání čistého hliníku o čistotě 99,2 až 99,5 % Al se uvádí v rozmezí 660 °C při normálním atmosférickém tlaku.

Další vlastností, která dělá ze slitin hliníku kvalitní slévárenské materiály je jejich poměrně nízký sklon k tvorbě rozptýlených staženin při gravitačním lití. Tyto slitiny mají sklon k tvorbě staženin soustředěných, které se snáze eliminují a tak je nutno odlitky ze slitin hliníku při gravitačním lití (např. právě písty spalovacích motorů) opatřovat nálitky, aby odlitky byly hutné a homogenní. Na soustředěné stahování slitin hliníku má také vliv jejich chemické složení, protože se ve velké míře používají slitiny eutektické nebo mírně podeutektické, tj. slitiny s obsahem křemíku 9-12 %. Při tlakovém lití odlitky ze slitin hliníku obsahují velké množství pórů, což je ovšem způsobeno přípravou taveniny nebo technologií zpracování, nikoliv materiálem. Velikost objemových změn se pohybuje u slitin hliníku okolo 6 %. Při jejich využití pro gravitační lití do kovových forem, kde tyto slitiny vzhledem k vysoké ochlazovací schopnosti formy, mají jen omezenou možnost penetrace taveniny mezi větve dendritů a tím vyplňovat vzniklé staženiny, je možno i přes tyto skutečnosti vyrábět kvalitní odlitky. Jak již bylo řečeno, slitiny hliníku při gravitačním lití vytvářejí především soustředěné staženiny. Slitiny zinku jsou na tom z hlediska objemových změn velmi podobně, při jejich využití pro gravitační lití velikost těchto změn dosahuje cca. 5 %. Změny lineárních rozměrů, které pro slitiny hliníku dosahují hodnot do 2 %, jsou odvislé od typu slitiny a použité technologie odlévání. Vyšší hodnoty lineárního smrštění (přibližně 2 %) odpovídají gravitačnímu lití. Při lití tlakovém, jsou tyto hodnoty
nižší, dosahují max. 1 %. Slitiny zinku vykazují při gravitačním lití hodnoty lineárního smrštění přibližně 1,5 % a při lití tlakovém 0,5 %.

Pokud se jedná o mechanické vlastnosti odlitků ze slitin hliníku, které mají rozhodující vliv na jejich následné použití, např. v automobilovém průmyslu, výroba bloků, pístů a hlav spalovacích motorů, bloků převodových skříní, mají tyto slitiny velmi dobré mechanické vlastnosti. Mechanické vlastnosti slitin hliníku jsou odvozeny od vlastností čistého hliníku, jehož hodnoty jsou: mez pevnosti v tahu 90 MPa, mez kluzu 35 MPa, tažnost čistého hliníku 40 % (na rozdíl od jeho slitin je velmi vysoká), tvrdost 24 HV a modul pružnosti v tahu cca. 70 GPa. Odlitky ze slitin hliníku vykazují vyšší hodnoty mechanických vlastností než čistý hliník. Odlitky ze slitin hliníku, které pracující za vyšších teplot, jako jsou součásti spalovacích motorů, musí vykazovat stálost mechanických vlastností za pracovních teplot, kde má rozhodující vliv čas působení tepelného zatížení. Čistý zinek vykazuje proti čistému hliníku lepší mechanické vlastnosti (mez pevnosti v tahu 130 MPa, tvrdost 300 HB, modul pružnosti cca. 80 GPa).

Další vlastností, která ovlivňuje volbu použití hliníku a jeho slitin pro výrobu odlitků strojních součástí je jeho dobrá odolnost proti korozi. Povrch čistého hliníku a jeho slitin se díky jeho vysoké afinitě ke kyslíku pokrývá na vzduchu vrstvou oxidu hlinitého Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, který chrání povrch před další oxidací především v atmosférických podmínkách, avšak hliníkové slitiny mají špatnou korozní odolnost v mořské vodě a jsou také náchylné na elektrochemickou korozi. Z hlediska jejich využití, hliníkové slitiny také dobře odolávají působení olejů a benzínu a to i za zvýšených teplot. Korozní odolnost slitin hliníku je závislá především na obsahu mědi, přičemž slitiny, které měď neobsahují, vykazují přibližně stejnou korozní odolnost jako hliník s čistotou 99,5 %. Hliník má také v porovnání se zinkem velmi dobré elektrické a vodivostní vlastnosti. Slitiny hliníku mají oproti čistému hliníku dobrou obrobitelnost a v porovnání se slitinami zinku a hořčíku jsou na tom podobně.

Z hlediska metalurgické přípravy taveniny je hliník a jeho slitiny tavitelný za použití běžných metalurgických metod a postupů v průmyslových tavících agregátech, jako jsou plynové a indukční pece. Pro poloprovozní tavení lze využít odporové kelímkové pece s litinovými nebo grafitovými kelímky, přičemž v obou případech je dobré krýt povrch taveniny solí a stahovat oxidické nečistoty. Slitiny hliníku lze před odléváním očkovat a modifikovat pro zlepšení jejich užitných vlastností. Dále je nutné taveniny

hliníku před odléváním rafinovat a také odplyňovat. Tavení slitin zinku není tak náročné na energii, jelikož zinek jak známo má nižší teplotu tání a latentní teplo a je vhodné jejich taveniny také ošetřovat krycími solemi, byť jejich afinita ke kyslíku a reaktivita s atmosférou není tak značná jako u slitin hliníku a hořčíku. Vyšší hustota slitin zinku však ztěžuje manipulaci s taveninou a jejich využití pro některé větší odlitky. Slitiny hliníku lze odlévat prakticky všemi známými slévárenskými technologiemi jako je gravitační lití do pískových a kovových forem, nízkotlaké lití a lití vysokotlaké, které je dnes pro odlévání těchto slitin, dalo by se říci, nevyužívanější technologií.

2. Při hodnocení výsledků tepelných výpočtů čistého hliníku a slitin hliníku je zřejmé, že pro ohřátí 1 kg čistého hliníku z teploty okolí 20 °C na teplotu tání je třeba 971080 J, oproti tomu pro ohřátí stejného množství slitin AlSi12 a AlSi12CuNiMg je nutno 1209300 J a 1012210 J. Pro ohřátí 1 kg čistého zinku na teplotu 660 °C je teoreticky třeba 386686 J, avšak při této teplotě je již značně přehřátý, protože má teplotu tání 420 °C. Pro ohřátí čistého zinku na teplotu 420 °C je třeba 266206 J, z čehož je vidět, že pro natavení hliníku je třeba zhruba 3 krát více tepelné energie, než pro natavení zinku. Hliník má kromě vyšší teploty tání také vyšší tepelnou vodivost ( $\lambda_{Al}= 230 \text{ W.m}^{-1}$ .K<sup>-1</sup> a  $\lambda_{Zn}= 110 \text{ W.m}^{-1}$ .K<sup>-1</sup>) a latentní krystalizační teplo (Lkr<sub>Al</sub>= 399000 J a Lkr<sub>Zn</sub>= 118000 J) než zinek. Pro natavení slitin hliníku AlSi12 a AlSi12CuNiMg, byť mají nižší teploty tání, je také třeba dodat více tepla, než pro čistý hliník, což je způsobeno jejich vysokým latentním krystalizačním teplem. K natavení hliníku a jeho slitin je tedy potřeba poměrně značné množství tepelné energie, což souvisí s výše uvedenými vlivy tepelně-fyzikálních vlastností a prodražuje výrobu odlitků ze slitin hliníku. Teploty tání resp. teploty likvidu a solidu čistého hliníku a slitin hliníku zjištěné měřením, jsou srovnatelné s hodnotami uváděnými v literatuře [41, 42]. Pro čistý hliník Al99,5 byla naměřena teplota likvidu 657 °C a teplota solidu 655 °C. Pro slitinu AlSi12 byla teplota likvidu 570 °C a teplota solidu 564 °C. U slitiny AlSi12CuNiMg byla naměřena teplota likvidu 569 °C a teplota solidu 567 °C.

**3.** Doby tuhnutí odlitků tvaru "I" s rozměry 7 x 10 x 157 mm a 27 x 10 x 157 mm z čistého hliníku Al99,5, ze slitiny AlSi12 a ze slitiny AlSi12CuNiMg, které byly sledovány v závislosti na teplotě lití, materiálu slévárenské formy a tloušťce stěny odlitku, odpovídaly teoretickým předpokladům. Nejrychleji tuhnou odlitky v kovové formě ze všech teplot lití, neboť je zde největší teplotní rozdíl (mezi teplotou taveniny a teplotou formy) a současně kovová forma je velkým akumulátorem a vodičem tepla. Čas tuhnutí odlitků tvaru "I" z čistého hliníku je kratší, než čas tuhnutí těchto odlitků ze slitin hliníku. To je z důvodu,

že čistý hliník má vyšší teplotu tuhnutí a tím se ustavuje větší rozdíl teplot mezi formou a odlévanou slitinou. Toto je hybnou silou pro větší intenzitu odvodu tepla z tuhnoucí taveniny. Současně atomům čistého kovu při jejich tuhnutí nebrání atomy příměsi, která je typická pro slitinu. Proto také slitiny AlSi12 a AlSi12CuNiMg vykazovaly delší časy tuhnutí. Odlitky tvaru "I", které byly odlévány do formy z CT směsi, tuhly déle než odlitky odlité do kovové formy a kratší dobu, než odlitky vyráběné v pískové, resp. bentonitové formě. Tyto výsledky potvrdily teoretické předpoklady. Bentonitové formy obsahují více vody a jsou také méně kompaktní, než formy z CT směsi. Rychlost tuhnutí odlitků také závisí na teplotě lití. Při těchto experimentech byly použity teploty lití 725 °C, 700 °C a 675 °C. Odlitky ze slitin hliníku, opět v souladu s teoretickými poznatky a předpoklady, vykazují nejdelší dobu tuhnutí při teplotě lití 725 °C. Nejkratší čas tuhnutí vykazují při teplotě 675 °C, což opět souvisí s velikostí rozdílu teplot (resp. strmostí teplotního gradientu). Pro jednotlivé materiály byly zjištěny průměrné hodnoty času tuhnutí při teplotě lití 725 °C. Čistý hliník Al99,5 vykazoval dobu tuhnutí 3,9 s. Nejvyšší hodnota času tuhnutí při této teplotě lití byla zjištěna u slitiny AlSi12 55,2 s. Slitina AlSi12CuNiMg vykazovala čas tuhnutí 32,9 s. Při teplotě lití 700 °C byla naměřena hodnota času tuhnutí pro čistý hliník Al99,5 3,6 s, pro slitinu AlSi12 44,4 s a pro slitinu AlSi12CuNiMg 29,9 s. Při teplotě lití 675 °C nebyl pro čistý hliník Al99,5 z důvodu velmi rychlého ochlazování čas tuhnutí naměřen. Slitina AlSi12 při této teplotě vykazovala čas tuhnutí 39,6 s a slitina AlSi12CuNiMg 29,6 s. Z toho je patrné, že jako v předchozím případě, kdy byl sledován vliv slévárenské formy, má opět na dobu tuhnutí odlitku vliv teplota tuhnutí materiálu. Nejdéle ve všech případech tuhnou odlitky ze slitiny AlSi12. Posledním uvedeným faktorem, který má vliv na rychlost tuhnutí odlitku je tloušťka jeho stěny. Měření přineslo očekávané výsledky, kdy nejrychleji tuhly odlitky tvaru "I" s tloušťkou stěny 7 mm.

**4.** Doby tuhnutí slitiny AlSi12CuNiMg byly také sledovány při výrobě odlitků tvaru válce Ø40 x 84 mm, Ø50 x 84 mm a Ø60 x 84 mm. I zde byly potvrzeny všechny výše uvedené předpoklady a závěry o vlivu materiálu slévárenské formy, teplotě lití a tloušťky stěny odlitku na dobu trvání procesu tuhnutí. Všem těmto poznatkům odpovídaly i zjištěné hodnoty konstant tuhnutí.

**5.** Hodnoty zabíhavosti, resp. praktické zabíhavosti, získané z prováděných experimentů pomocí Curryho spirály ukazují na podstatný význam vlivu obsahu křemíku ve slitinách hliníku. Nejvyšší zabíhavost vykazuje slitina AlSi12 s průměrnou hodnotou 810 mm. Je to díky jejímu eutektickému složení a tím i příznivým podmínkám tuhnutí a dobrým

technologickým vlastnostem. Slitina AlSi12CuNiMg vykazuje díky vlivu legujících prvků zabíhavost o něco menší, s průměrnou hodnotou 780 mm. Nejnižší zabíhavost s průměrnou hodnotou 560 mm vykazuje čistý hliník Al99,5. V této souvislosti je nutno uvést, že zabíhavost je technologickou vlastností, která závisí na typu slévárenské formy (pro experimenty byla použita forma s křemenným ostřivem a bentonitovým pojivem Sabenil), na charakteru odlévané taveniny (povrchové napětí, viskozita, teplota a tepelně fyzikální vlastnosti) a způsobu odlévání (rychlost a plynulost odlévání). Zabíhavost slitin hliníku lze obecně považovat za dobrou, přičemž velmi dobrou zabíhavost mají ty slitiny, které se blíží eutektickému složení.

**6.** Při sledování dilatačních změn na odlitcích tvaru "I" ze slitiny AlSi12CuNiMg, slitiny AlSi12 a čistého hliníku Al99,5 během jejich tuhnutí a chladnutí, lze konstatovat:

a) Pro tato experimentální měření je použít nutné měřící zařízení, které tyto změny dokáže sledovat a registrovat. K tomuto účelu bylo na našem pracovišti navrženo a zkonstruováno měřící zařízení, které je podrobně popsáno v kap. 7. Pomocí výsledků experimentů na tomto zařízení (hodnot dilatace a příslušné teploty) je možno provádět výpočet součinitele teplotní smrštivosti  $\alpha$ .

b) Současně je možno konstatovat, že dilatace odlitků je výrazně ovlivněna typem použité slévárenské formy. V tomto případě byly slévárenské formy vyrobeny pomocí vyměnitelných příložek formujících nejdůležitější partii zkušebního odlitku tvaru "I", tj. jeho dřík s rozměry 7 x 10 mm a 27 x 10 mm. Vyměnitelné příložky slévárenské formy byly vyrobeny z různých slévárenských materiálů: oceli, CT směsi s křemenným ostřivem a vodním sklem tvrzené CO2 a pískové formovací směsi s křemenným ostřivem a bentonitovým pojivem Sabenil. Při hodnocení dilatačních změn odlitků, vzhledem k typu použité formy, je z naměřených výsledků patrné, že největší dilataci vykazuje odlitek z hliníkové slitiny AlSi12CuNiMg ve formách CT směsi s hodnotou -1,45 mm. Průměrná hodnota rozměrových změn odlitků z této slitiny ve formě z CT směsi činí -1,37 mm a je srovnatelná s průměrnými hodnotami této slitiny dosahovanými ve formách z pískové formovací směsi. Tato hodnota činí -1,35 mm. Z toho vyplývá, že oba typy těchto forem mají z hlediska dilatačního chování této slitiny přibližně stejný vliv. V kovové formě je hodnota smrštění pro tuto slitinu přibližně o 0,1 mm menší, tj. dosahuje průměrné hodnoty -1,24 mm. Nejnižší zjištěná hodnota dilatace slitiny AlSi12CuNiMg v kovové formě byla naměřena -0,95 mm při teplotě lití 725 °C.

Pokud se jedná o dilatační chování slitiny AlSi12, tak tato slitina vykazuje podobné dilatační chování vzhledem k druhu slévárenské formy, jako slitina AlSi12CuNiMg. Nejnižší hodnotu dilatace odlitek tvaru "I" ze slitiny AlSi12 vykazuje také ve formě vyrobené z oceli. Tato hodnota činí -1,35 mm. Průměrná hodnota dilatace v kovové formě byla -1,59 mm. Průměrná hodnota dilatace této slitiny ve formě vyrobené z pískové formovací směsi je -1,68 mm. Průměrná hodnota dilatace této slitiny ve formě z CT směsi činí -1,61 mm. Jak je z těchto hodnot zřejmé, i v těchto typech forem jsou hodnoty dilatací slitiny AlSi12 porovnatelné s dilatačními vlastnostmi slitiny AlSi12CuNiMg. Nepatrně vyšší hodnoty dilatace slitiny AlSi12 lze přisuzovat tomu, že tato slitina neobsahuje jiné slitinové prvky než křemík.

Při sledování dilatačních změn odlitků tvaru "I" z čistého hliníku Al99,5 byly naměřeny nejvyšší hodnoty dilatace ze všech zkoumaných materiálů. Hodnoty dilatačních změn čistého hliníku ve všech typech slévárenských forem jsou srovnatelné a přesahují -2,0 mm. Z toho vyplývá, že čistý hliník má nejhorší dilatační vlastnosti ze zkoumaných materiálů.

c) Na základě experimentálních měření bylo sledováno také poměrné smrštění odlitků tvaru "I" ze slitiny AlSi12CuNiMg. Pod pojmem poměrné smrštění se rozumí poměr maximální záporné dilatace k rozměru výchozího odlitku. Poměrné roztažení je poměr maximální kladné dilatace k rozměru výchozího odlitku. U slitiny AlSi12CuNiMg je nejnižší poměrné smrštění odlitku v kovové slévárenské formě, jehož průměrná hodnota činí 0,79 %. Hodnoty poměrného smrštění této slitiny v ostatních typech slévárenské formy jsou mezi sebou srovnatelné a dosahují hodnoty pro formu z CT směsi 0,87 % a pro pískovou formu 0,86 %. Poměrné smrštění slitiny AlSi12 v kovové slévárenské formě dosahuje průměrné hodnoty 1,01 %. Průměrná hodnota poměrného smrštění slitiny AlSi12 v kovové slévárenské formě dosahuje průměrné hodnoty 1,07 % a ve formách z CT směsi 1,03 %. Průměrná hodnota poměrného smrštění u odlitků tvaru "I" z čistého hliníku Al99,5 dosahuje 1,34 %, což je hodnota blížící se 2 %. Tato hodnota koresponduje s obecně udávanou hodnotou smrštění hliníkových materiálů. Tuto hodnotu smrštění čistého hliníku lze přisoudit skutečnosti, že neobsahuje žádné slitinové prvky a to především křemík, který má na dilatační chování slitin hliníku zásadní vliv.

d) Mimo hodnot maximální dilatace a poměrného smrštění byly sledovány na odlitcích tvaru "I" i další dilatační charakteristiky, na něž má materiál slévárenské formy také vliv.

Jednalo se o sledování dilatace odlitků z výše uvedených slitin při teplotě likvidu a solidu. Hodnota dilatace při teplotě likvidu byla největší opět pro slitinu AlSi12, činila -0,29 mm a nejnižší pro slitinu AlSi12CuNiMg, s hodnotou 0,02 mm. Totéž bylo zjištěno i pro dilatace při teplotě solidu, tj. pro celou oblast tuhnutí zkoumaných materiálů. Toto zjištění sleduje trend dilatačních změn při nižších teplotách. To je významné především pro slitinu AlSi12CuNiMg, která vykazuje nejlepší dilatační chování v závislosti na použité slévárenské formě.

e) Dále byly sledovány dilatační změny odlitků tvaru "I" také v závislosti na teplotě lití. Teploty lití byly voleny vzhledem k teplotám lití užívaným v praxi pro lití odlitků ze slitin hliníku. Hodnoty teplot lití při experimentálních měření byly 725 °C, 700 °C a 675 °C, přičemž teplota lití 675 °C byla volena jako mezní, která se v praxi nepoužívá. Při teplotě lití 725 °C vykazoval nejvyšší hodnotu dilatace odlitek tvaru "I" odlitý z čistého hliníku Al99,5 s hodnotou -2,44 mm a nejnižší hodnota byla zjištěna u slitiny AlSi12CuNiMg, -0,95 mm. Průměrná hodnota maximální dilatace pro zkoumané slitiny při teplotě lití 725 °C byla nejvyšší pro čistý hliník Al99,5, činila -2,18 mm. Slitina AlSi12 vykazovala průměrnou hodnotu -1,61 mm a slitina AlSi12CuNiMg -1,28 mm. Při teplotě lití 700 °C dosahují průměrné hodnoty maximální dilatace odlitků tvaru "I" ze zkoumaných materiálů těchto hodnot: pro čistý hliník -1,93 mm, pro slitinu AlSi12 -1,66 mm a pro slitinu AlSi12CuNiMg -1,32 mm. To jsou hodnoty dilatací vyšší, než byly zjištěny při použití teploty lití 725 °C pro slitiny AlSi12CuNiMg a AlSi12 o cca. 0,05 mm a nižší pro čistý hliník o 0,25 mm. Pro teplotu lití 675 °C byla zjištěna nevyšší průměrná hodnota dilatace odlitků z čistého hliníku Al99,5, která činila -2,19 mm. Odlitky ze slitiny AlSi12 vykazují při této teplotě průměrnou hodnotu dilatace -1,64 mm a ze slitiny AlSi12CuNiMg -1,43 mm. Z těchto výsledků vyplývá, že z hlediska dilatačních změn je pro zkoumané slitiny optimální teplota lití 725 °C.

Také z hlediska poměrného smrštění s ohledem na teplotu lití, lze konstatovat, že při teplotě lití 725 °C pro čistý hliník Al99,5 je průměrná hodnota poměrného smrštění nejvyšší a činí 1,39 %. Pro slitinu AlSi12 je průměrná hodnota poměrného smrštění při této teplotě 1,02 % a pro slitinu AlSi12CuNiMg je 0,82 %. Při teplotě lití 700 °C dosahují průměrné hodnoty poměrného smrštění odlitků z čistého hliníku Al99,5 hodnotu 1,23 %, ze slitiny AlSi12 1,05 % a ze slitiny AlSi12CuNiMg 0,84 %. Pro teplotu lití 675 °C byly také vypočteny průměrné hodnoty poměrného smrštění pro všechny materiály odlitků tvaru

"I". Čistý hliník vykazoval poměrné smrštění 1,39 %, slitina AlSi12 vykazovala 1,05 % a pro slitinu AlSi12CuNiMg byla vypočítána hodnota poměrného smrštění 0,90 %.

f) Také byl sledován vliv rozměru odlitku na velikost dilatačních změn a na poměrné smrštění při tuhnutí a chladnutí odlitků tvaru "I" ze zkoumaných materiálů. Za tloušťku stěny odlitku byla brána velikost dříku odlitku tvaru "I", resp. jeho průřezu s rozměry 7 x 10 mm nebo 27 x 10 mm. Bylo zjištěno, že nejvyšší průměrnou hodnotu dilatace a poměrného smrštění v závislosti na tloušť ce stěny vykazují odlitky z čistého hliníku. U těchto odlitků byly zjištěny pro velikost dříku 7 x 10 mm průměrné hodnoty dilatace -2,04 mm a průměrné hodnoty poměrného smrštění 1,31 %. Pro odlitky z čistého hliníku Al99,5 s velikostí dříku 27 x 10 mm byla zjištěná průměrná hodnota dilatace -2,11 mm a poměrného smrštění 1,34 %. Odlitek z hliníkové slitiny AlSi12 vykazuje při velikosti dříku 7 x 10 mm průměrnou hodnotu dilatace -1,57 mm a poměrného smrštění 1,06 %. U odlitku ze slitiny AlSi12CuNiMg je průměrná hodnota dilatace -1,25 mm a poměrné smrštění odlitku činí 0,80 %. Při velikosti dříku odlitku 27 x 10 mm, vykazuje odlitek ze slitiny AlSi12 hodnotu smrštění -1,37 mm a poměrné smrštění činí 1,06 %. U odlitku ze slitiny AlSi12CuNiMg byla zjištěna průměrná hodnota dilatace -1,67 mm a poměrné smrštění 0,87 %. Výše uvedené výsledky potvrzují teoretický předpoklad, že odlitky s menšími tloušťkami stěn vykazují pro zkoumané materiály menší hodnoty dilatačních změn. Toto je dáno tím, že tuhnou rychleji.

d) Za přínos řešení práce lze také považovat možnost výpočtů hodnot součinitele teplotní smrštivosti  $\alpha$  zkoumaných materiálů. Hodnoty součinitelů teplotní smrštivosti  $\alpha$ , byly zjištěny na základě uvedených dilatačních charakteristik v závislosti na teplotě lití, použité slévárenské formě a tloušťce stěny odlitku. Součinitel lineárního smrštění při tuhnutí a chladnutí odlitků byl stanoven v teplotních intervalech od 500 °C do 20 °C. Tyto hodnoty byly porovnány s tabelovanými hodnotami pro zkoumané slitiny. Je možno konstatovat, že tabelované hodnotě pro slitinu AlSi12CuNiMg v intervalu 20-100 °C se naměřená hodnota řádově blíží, jelikož průměrná hodnota, vypočítaná ze všech získaných hodnot z experimentů činí 10,08.10<sup>-5</sup> K<sup>-1</sup>. Stejně je tomu i u ostatních zkoumaných materiálů, kdy průměrné hodnoty součinitele teplotní smrštivosti jsou pro slitinu AlSi12 12,5.10<sup>-5</sup> K<sup>-1</sup>

**7.** Sledování dilatačních změn odlitků ze slitiny hliníku AlSi12CuNiMg, určené pro výrobu pístů spalovacích motorů při jejich tuhnutí a chladnutí bylo prováděno také na základě

měření dilatací odlitků tvaru válce. K tomuto bylo použito měřící zařízení, které zaznamenává dilatační změny při smršťování odlitku tvaru válce (s proměnnými průměry odlitků 40 mm, 50 mm a 60 mm), který byl zaformován do dvou typů slévárenských forem (slévárenská forma z CT směsi, tvrzená CO<sub>2</sub> a z pískové formovací směsi s křemenným ostřivem a bentonitovým pojivem Sabenil). Do slévárenských forem byla odlita tavenina slitiny AlSi12CuNiMg z teplot lití 675 °C, 700 °C a 725 °C. Ze získaných výsledků lze vyvodit následující poznatky:

a) Dilatace odlitků je výrazně ovlivněna nejen druhem použitého formovacího materiálu slévárenské formy, ale také velikostí její dutiny. Velikost dutiny ovlivňuje množství taveniny, které způsobuje prohřívání ztuhlých vrstev odlitku a tím způsobuje kladnou dilataci tuhnoucího odlitku. Z tohoto důvodu je křivkách dilatací patrný nárůst do kladných hodnot. Při hodnocení rozměrových změn vzhledem k typu použité formy je z naměřených výsledků patrné, že největší dilataci v kladných hodnotách vykazuje odlitek z hliníkové slitiny AlSi12CuNiMg ve formách CT směsi ve všech zkoumaných případech s nejvyšší hodnotou 0,35 mm. Tato hodnota je o cca. 0,2 mm větší, než maximální dosažená hodnota ve formách pískových. Průměrná hodnota kladných dilatací odlitků ze slitiny AlSi12CuNiMg je ve formách z CT směsi 0,12 mm. Průměrná hodnota těchto dilatací v pískových formách činí 0,05 mm. Naopak vyšší hodnoty maximální záporné dilatace byly zjištěny u odlitků z této slitiny zhotovených ve formách z pískové formovací směsi, kde byla zjištěna maximální hodnota -0,94 mm. Průměrná hodnota maximální záporné dilatace odlitku byla ve formách z CT směsi, která činí -0,24 mm. To je hodnota téměř dvakrát menší, než průměrný výsledek tohoto parametru v pískových formách, kde byla zjištěna hodnota -0,46 mm. Lze proto tvrdit, že slitina AlSi12CuNiMg vykazuje srovnatelné hodnoty kladných dilatací v obou typech forem, tj. ve formách z CT směsi a z pískové formovací směsi. Hodnoty dilatačních změn po zchladnutí odlitku (cca. na 80 °C), tj. hodnoty maximální záporné dilatace jsou téměř dvakrát větší. To je způsobeno rozdílnými vlastnostmi materiálů slévárenských forem.

Dalším parametrem, který byl hodnocen v závislosti na materiálu slévárenské formy je velikost poměrného smrštění a roztažení, které bylo sledováno u odlitků tvaru válce ze slitiny AlSi12CuNiMg. U této slitiny je poměr maximální kladné dilatace k rozměru výchozího odlitku srovnatelný pro odlitky vyrobené v obou typech forem. Ve formě z CT směsi byla vypočítána průměrná hodnota 0,2 % a ve formě z písku 0,1 % v případě poměrného roztažení. V případě poměrného smrštění dosahovala jeho hodnota v průměru 0,94 % ve formách z písku a ve formách z CT směsi 0,47 %, což jsou hodnoty naopak značně odlišné.

b) Tak jako v předchozím případě (u odlitku tvaru "I") bylo sledováno dilatační chování slitiny AlSi12CuNiMg v oblasti tuhnutí, tj. zkoumání dilatací při teplotách likvidu a solidu. Jak bylo výše vysvětleno, vlivem množství materiálu ve formě dochází ke kladné dilataci odlitku. To se také projevilo při těchto experimentech, kdy při teplotě likvidu odlitky z této slitiny prodělávají ve většině případů dilataci v kladném směru v obou materiálech slévárenských forem (ve formě z CT směsi i ve formě z pískové formovací směsi). Vyšší hodnoty těchto změn jsou dosahovány ve formách vyrobených z CT směsi, avšak v průměru jsou zjištěné hodnoty v obou typech forem porovnatelné s průměrnou hodnotou 0,01 mm. Při dosažení teploty solidu zůstává hodnota dilatace v případě forem z CT směsi vesměs v kladných hodnotách, s výjimkou větších rozměrů odlitků, kdy je delší čas tuhnutí a odlitek přechází z kladné hodnoty smrštění do záporné. Průměrná hodnota dilatací při teplotě solidu ve formách z CT směsi je 0,05 mm, což je větší hodnota oproti dilataci při teplotě likvidu. Ve slévárenských formách vyrobených z pískové formovací směsi jsou při teplotě solidu dosahovány průměrné hodnoty dilatace -0,01 mm. To je způsobeno delšími časy tuhnutí odlitků v pískových formách.

c) Dále byly sledovány dilatační změny odlitků tvaru válce (průměry 40, 50 a 60 mm) ze slitiny AlSi12CuNiMg na základě vlivu teploty lití. Tak jako v předchozím případě byly voleny teploty lití 725 °C, 700 °C a 675 °C. Nejvyšší průměrnou dilataci v kladném směru vykazuje odlitek ze slitiny AlSi12CuNiMg litý z teploty 700 °C, tato dilatace činí 0,12 mm. Při teplotě 725 °C byla vypočítána průměrná hodnota maximální kladné dilatace 0,1 mm a při teplotě lití 675 °C byla dosažena průměrná hodnota 0,06 mm. Při sledování maximálních záporných dilatačních změn bylo dosaženo předpokládaných výsledků. Nejnižší průměrnou hodnotu rozměrových změn v záporném směru vykazoval tento materiál litý z teplot 725 °C a 700 °C se srovnatelnou hodnotou -0,26 mm. Tato dilatace při teplotě lití 675 °C vykazovala průměrnou hodnotnou -0,53 mm. To je hodnota prakticky dvakrát vyšší než z teplot lití 725 °C a 700 °C, což je také důvod, proč se tato teplota lití taveniny v praxi nepoužívá.

d) Při zkoumání doby tuhnutí odlitku tvaru válce s průměry 40, 50 a 60 mm vzhledem k teplotě lití bylo dosaženo předpokládaných výsledků. Nejdéle tuhnou odlitky lité

z teploty 725 °C, průměrný čas tuhnutí je 260 s, kratší čas tuhnutí 191 s vykazovaly odlitky s teplotou lití 700 °C. Při teplotě lití 675 °C byl stanoven průměrný čas tuhnutí odlitků 185 s.

e) Dalším zkoumaným vlivem na dilatační změny válcových odlitků ze slitiny AlSi12CuNiMg byla tloušťka stěny odlitku. V této souvislosti je třeba zdůraznit, že tvar válcových odlitků byl volen na základě tvaru reálných odlitků ze slitiny AlSi12CuNiMg, kterými jsou písty spalovacích motorů. Odlitky měly tvar válce s průměry 40 mm, 50 mm a 60 mm a byly odlévány do dvou typů válcových forem (z CT směsi a z pískové formovací směsi), které měly vnější průměr 85 x 100 mm. Touto konstrukcí slévárenské formy byla dosažena proměnná tloušťka stěny formy v závislosti na velikosti, resp. průměru odlitku. To mělo vliv na naměřené výsledky sledovaných dilatací. Výchozí rozměry zkušebních odlitků byly Ø40 mm x 84 mm, Ø50 mm x 84 mm a Ø60 mm x 84 mm. Nejvyšší průměrnou kladnou hodnotu dilatace 0,34 mm dosahovaly odlitky ze slitiny AlSi12CuNiMg s rozměrem Ø60 x 84 mm, nejnižší průměrnou hodnotu dilatace 0,08 mm dosahovaly odlitky Ø40 x 84 mm. Podobný trend vykazují maximální hodnoty dilatace v záporném směru, kdy nižší hodnoty dilatací odpovídají menším průměrům odlitků a naopak vyšší hodnoty dilatací větším průměrům odlitků. Toto potvrzují i průměrné hodnoty kladných a záporných dilatací. Průměrné hodnoty kladné dilatace jsou následující: pro odlitek Ø 40 x 84 mm je to hodnota 0,05 mm, pro odlitek Ø50 x 84 mm je dilatace 0,06 mm a odlitek Ø60 x 84 mm vykazoval dilataci 0,15 mm. Podobný trend vykazují i hodnoty poměrného roztažení vzhledem k výchozímu průměru odlitku. Odlitkům s rozměrem Ø40 x 84 mm a Ø50 x 84 mm odpovídá hodnota 0,12 %, a odlitku Ø60 x 84 mm hodnota 0,25 %. Průměrné hodnoty záporné dilatace jsou-0,27 mm pro odlitek Ø 40 x 84 mm, -0,43 mm pro odlitek Ø50 x 84 mm a -0,36 mm pro odlitek Ø60 x 84 mm. Průměrná hodnota poměrného smrštění je pro odlitek Ø40 x 84 mm 0,66 %, pro odlitek Ø50 x 84 mm je 0,85 % a pro odlitek Ø60 x 84 mm je 0,60 %. Tyto hodnoty jsou z hlediska výroby odlitků poměrně příznivé.

f) Hodnoty získaných součinitelů teplotní smrštivosti odlitků tvaru válce, které byly vypočítány pro teplotní intervaly od 500 do 20 °C pro slitinu AlSi12CuNiMg v závislosti na teplotě lití, použité slévárenské formě a tloušťce stěny odlitku, lze hodnotit následovně. Při porovnání průměrné hodnoty  $8,4.10^{-5}$  K<sup>-1</sup> ze všech měření v intervalu teplot 100 - 20 °C se tato hodnota velmi blíží hodnotě tabelované (1,9.10<sup>-5</sup> K<sup>-1</sup>). V ostatních teplotních intervalech, tj. 500-400 °C, 400-300 °C, 300-200 °C a 200-100 °C, byly stanoveny

následující průměrné hodnoty tohoto součinitele  $2,2.10^{-5}$  K<sup>-1</sup>,  $2,5.10^{-5}$  K<sup>-1</sup>,  $3,5.10^{-5}$  K<sup>-1</sup> a  $5,0.10^{-5}$  K<sup>-1</sup>. Z těchto hodnot je patrný stoupající trend součinitele teplotní smrštivosti  $\alpha$  s klesající teplotou taveniny, podobně jako tomu bylo i v případě odlitku tvaru desky, resp. tvaru "I".

**8.** Experimenty, které byly zaměřeny na dilatační chování odlitků ze sledovaných slévárenských slitin při jejich ohřevu, přispívají k náhledu především na chování slitiny AlSi12CuNiMg, resp. odlitků pístů spalovacích motorů v jejich pracovním prostředí. K tomuto účelu bylo použito zařízení umožňující plynulý ohřev sledovaných vzorků na teplotu 500 °C. Měření byla prováděna na vzorcích odlitků tvaru válce Ø10 x 50 mm. Tyto vzorky byly odlévány gravitačním způsobem do ocelové slévárenské formy, v podstatě analogicky jako jsou odlévány písty spalovacích motorů. Vzorky byly vyrobeny z čistého hliníku Al99,5, slitiny AlSi12 a slitiny AlSi12CuNiMg. U slitiny AlSi12CuNiMg byl sledován i vliv tepelného zpracování na její dilatační vlastnosti vlivem ohřevu. Na základě dosažených výsledků lze konstatovat:

a) Odlitky ze slitin AlSi12CuNiMg, AlSi12 a z čistého hliníku Al99,5 byly odlévány z teplot 725 °C, 700 °C a 675 °C. Takto vyrobené odlitky ze slitiny AlSi12CuNiMg vykazují maximální průměrnou dilataci (tj. dilataci při teplotě 500 °C) 0,32 mm pro odlitek litý z teploty 725 °C, hodnotu 0,31 mm pro odlitek litý z teploty 700 °C a hodnotu 0,32 mm pro odlitek litý z teploty 675 °C. Pro slitinu AlSi12 byly u odlitků ze všech teplot lití stanoveny stejné průměrné hodnoty maximální dilatace 0,31 mm. Pro odlitky z čistého hliníku Al99,5 byla při teplotě lití 725 °C stanovena průměrná hodnota maximální dilatace 0,37 mm, při teplotě lití 700 °C hodnota 0,38 mm a při teplotě lití 675 °C hodnota 0,38 mm. Z těchto hodnot je patrné, že nejnižší dilataci vykazují podle předpokladu hliníkové slitiny AlSi12CuNiMg a AlSi12 se stejnou hodnotou 0,32 mm.

Z hlediska poměrného roztažení ve vztahu k původní délce odlitku vykazují zkoumané odlitky průměrné hodnoty pro slitinu AlSi12CuNiMg 0,63 %, pro slitinu AlSi12 0,61 % a pro čistý hliník Al99,5 0,74 %.

Ovšem nejdůležitější dilatační charakteristika zejména pro slitinu AlSi12CuNiMg (výroba pístů spalovacích motorů) je při teplotě 200 °C, což je přibližně pracovní teplota pístu ve válci spalovacího motoru. Při této teplotě vykazují nižší dilataci slitiny AlSi12 a AlSi12CuNiMg shodně s průměrnou hodnotou 0,05 mm. Z toho lze usuzovat, že ostatní slitinové prvky v materiálu AlSi12CuNiMg mají vliv především na mechanické vlastnosti

za zvýšených teplot. V této souvislosti je nutno připomenout, že slitiny hliníku s určitým obsahem niklu vykazují i poněkud nižší součinitel teplotní roztažnosti za vyšších teplot. Z tohoto důvodu je důležitý obsah niklu ve slitinách určených pro výrobu pístů spalovacích motorů. Čistý hliník vykazuje průměrnou hodnotu dilatace při 200 °C 0,06 mm, přičemž nejvyšší hodnotu lze odečíst při teplotě lití 675 °C podobně jako pro ostatní slitiny, kdy tyto slitiny vykazují nejhorší dilatační vlastnosti, jsou-li lité z 675 °C. Nejvýhodnější teplotou lití z hlediska dilatačních vlastností je pro všechny zkoumané slitiny teplota 725 °C. Při zkoumání poměrného roztažení vykazují slitiny při teplotě 200 °C tyto průměrné hodnoty, pro čistý hliník Al99,5 0,11 %, u slitiny AlSi12 0,09 % a u slitiny AlSi12CuNiMg 0,1 %.

b) Dále byl sledován vliv tepelného zpracování na dilatační vlastnosti slitiny AlSi12CuNiMg, která byla jako jediná ze zkoumaných materiálů tepelně zpracovaná za účelem precipitačního vytvrzení. Na základě získaných výsledků je možno konstatovat, že toto tepelné zpracování má jistý vliv na dilatační chování této slitiny, kdy dilatace tepelně zpracovaných odlitků je nižší. To je pravděpodobně způsobeno změnou struktury. Největší hodnotu maximální dilatace (při ohřevu na 500 °C) vykazuje odlitek z této slitiny tepelně nezpracovaný, litý z teploty 675 °C s hodnotou 0,32 mm. Nejnižší hodnotu 0,30 mm vykazuje odlitek litý z teploty 725 °C a následně tepelně zpracovaný. V průměru vychází maximální dilatace u odlitků tepelně nezpracovaných o 0,02 mm vyšší než u odlitků tepelně zpracovaných. Stanovená průměrná hodnota maximální teplotní dilatace 0,32mm byla určena pro odlitek tepelně nezpracovaný a 0,30 mm pro odlitek tepelně zpracovaný. Uvedený pokles dilatace je však v technické praxi zanedbatelný. Poměrné roztažení při teplotě ohřevu vzorku 500 °C je u nezpracovaných odlitků v průměru 0,64 % a u tepelně zpracovaných 0,60 %. Při ohřevu vzorků odlitků na teplotu 200 °C vykazují tepelně nezpracované i zpracované vzorky stejnou hodnotu dilatacích změn, která činí 0,05 mm. Hodnoty poměrného roztažení obou typů vzorků při této teplotě (tepelně nezpracovaných a zpracovaných) jsou 0,1 %.

c) Ze získaných závislostí dilatačních změn na teplotě lití a tepelném zpracování odlitků byly podle známého vztahu (9.1) vypočteny hodnoty součinitele lineární roztažnosti α při ohřevu odlitků ze zkoumaných slitin AlSi12CuNIMg, AlSi12 a čistého hliníku Al99,5 na teplotu 500 °C. Hodnoty součinitele α byly sledovány v teplotních intervalech od 20 °C do 500 °C. Získané hodnoty byly porovnány s tabelovanými hodnotami pro zkoumané slitiny. Na základě získaných poznatků lze konstatovat, že průměrná naměřená hodnota součinitele

teplotní roztažnosti slitiny AlSi12CuNiMg činí 3,4.10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup> pro interval teplot 20-100 °C. Tato hodnota se řádově blíží hodnotě tabelované (24.10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>) pro tuto slitinu. U slitiny AlSi12 byla v tomto teplotním intervalu stanovena průměrná hodnota součinitele teplotní roztažnosti 2,1.10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>. Pro čistý hliník Al99,5 byla v intervalu teplot 20-100 °C průměrná hodnota součinitele teplotní roztažnosti činí 2,4.10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>. Pro tepelně zpracovanou slitinu AlSi12CuNiMg nejsou hodnoty v literatuře uváděny, zjištěná průměrná hodnota součinitele teplotní roztažnosti v intervalu 20-100 °C činí 3,1.10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>. Pro interval teplot 100-200 °C byla pro tepelně nezpracovanou slitinu zjištěná hodnota tohoto součinitele 10,4.10<sup>-5</sup> K<sup>-1</sup>. Pro slitinu AlSi12CuNiMg tepelně zpracovanou v intervalu 100-200 °C je hodnota tohoto součinitele 10,1.10<sup>-5</sup> K<sup>-1</sup>. Pro teplotní interval 200-300 °C byla pro tepelně nezpracovanou slitinu zjištěná hodnota součinitele 10,1.10<sup>-5</sup> K<sup>-1</sup>. Pro teplotní interval 200-300 °C byla pro tepelně nezpracovanou slitinu zjištěná hodnota součinitele 10,1.10<sup>-5</sup> K<sup>-1</sup>. Pro teplotní interval 200-300 °C byla pro tepelně nezpracovanou slitinu zjištěna hodnota součinitele  $\alpha 21,9.10^{-5}$  K<sup>-1</sup> a pro tepelně zpracovanou slitinu byl součinitel  $\alpha 23,7.10^{-5}$  K<sup>-1</sup>. Pro všechny slitiny je patrný rostoucí trend součinitele teplotní roztažnosti s rostoucí teplotou ohřevu.

**9.** Sledování metalografické struktury zkušebních odlitků bylo prováděno pomocí světelné mikroskopie za účelem sledování vlivu rychlosti ochlazování na kompozici, rozložení, morfologii a velikost vyloučených fází u zkoumaných materiálů AlSi12CuNiMg, AlSi12 a Al99,5 v závislosti na podmínkách lití. Dále byla použita elektronová skenovací mikroskopie pro určení chemického složení zkoumaných slitin a analýzu obsažených intermetalických fází a analýzu lomových ploch. Na metalografických vzorcích byla sledována také jejich tvrdost. Na základě obdržených výsledků lze konstatovat:

a) Při sledování vlivu licích a technologických podmínek (teploty lití: 675 °C, 700 °C a 725 °C; použitá slévárenská forma: ocelová, CT směs s vodním sklem a křemenným ostřivem tvrzená CO<sub>2</sub> a písková formovací směs s křemenným ostřivem a bentonitovým pojivem Sabenil; tloušťka stěny 7, 27, 40, 50 a 60 mm) na strukturu odlitků ze zkoumaných slitin lze konstatovat, že byly splněny výchozí předpoklady. Čím je vyšší ochlazovací rychlost, tím vzniká jemnější struktura vyráběných odlitků. Toto bylo potvrzeno u slitin AlSi12CuNiMg a AlSi12. Struktura těchto odlitků byla sledována vyhodnocením parametru DAS (dendrite arm sparing) pomocí software Kappa Metreo. Ukázalo se, že nejmenší velikost parametru DAS byla u odlitků litých do kovové slévárenské formy. Zde se díky velké ochlazovací schopnosti vytváří podmínky pro růst jemných dendritů. Naopak u odlitků odlitých do forem pískových, která má akumulační schopnost podstatně nižší, je výsledná dendritická struktura hrubší a více rozvětvená a tedy parametr DAS nejvyšší. Slitina AlSi12 vykazovala podle předpokladů ve struktuře eutektickou fázi tvořenou jehlicemi křemíku a fází  $\alpha$  (hliníkem). Její struktura obsahovala poměrně velké částice nepravidelného tvaru, které byly tvořeny nerozpuštěným křemíkem. V malém množství byly pozorovány intermetalické fáze. Nečistoty ve formě oxidických blan nebyly nalezeny v žádném odlitku, neboť tavenina byla před každým odlitím důkladně vyčištěna. Jediné přítomné nečistoty byly charakteru pískových zrn z použité formovací směsi. Porózita odlitků z této slitiny, způsobená plynovými bublinami, byla sledována spíše u odlitků s nižší tloušťkou stěny, kde je vyšší ochlazovací rychlost.

Slitina hliníku AlSi12CuNiMg určená pro výrobu pístů spalovacích motorů měla ve struktuře, tvořené  $\alpha$  fází a jehlicemi křemíku, poměrně vysoké procento intermetalických fází, jejichž složení bylo zkoumáno pomocí elektronového mikroskopu. Ostatní strukturní vlastnosti, jako jsou např. velikost a morfologie strukturních fází, mimo těch intermetalických, mají vzhledem k blízkému chemickému složení s materiálem AlSi12 s touto slitinou velmi podobné. Také ve struktuře slitiny AlSi12CuNiMg bylo přítomno velké množství nerozpuštěných částic křemíku s nepravidelnými geometrickými tvary a to především u odlitků připravených v kovových formách, což je pravděpodobně dáno její vysokou ochlazovací schopností. U odlitků větších tlouštěk, odlévaných do forem z písku, byly pozorovány velmi hrubé jehlice křemíku. To lze přisoudit nízké ochlazovací schopnosti pískových forem a dlouhé době tuhnutí odlitků v těchto formách. Porózita odlitků byla obdobně jako v předchozích případech slitiny AlSi12 způsobena plynovými bublinami. Taveninu nebylo možno vzhledem k možnostem laboratorního vybavení důkladně odplynit. U odlitků větších rozměrů byl pozorován také větší obsah plynových bublin, který byl pravděpodobně podpořen plyny vznikajícími rozkladem pojiva slévárenské formy. Nekovové nečistoty byly způsobené pískovými zrny. Oxidické nečistoty nebyly v odlitcích ze slitiny AlSi12CuNiMg detekovány, což ukazuje na kvalitní rafinaci a přípravu taveniny a ostatních metalurgických operací.

U odlitků z čistého hliníku se ve struktuře vyskytovalo určité množství intermetalických fází, jejichž původ lze vzhledem k jejich chemickému složení (fáze AlFeSi byly potvrzené EDX analýzou) přisoudit z části kvalitě a čistotě housky (Al99,5) a z části kvalitě rafinace taveniny. Odlitky také obsahovaly póry plynových bublin.

b) Při hodnocení chemického složení použitých slitin a chemického složení intermetalických fází vznikajících ve slitinách bylo použito, jak již bylo uvedeno výše,

elektronového skenovacího mikroskopu v kombinaci s EDX analýzou. Lze konstatovat, že chemické složení zkoumaných slitin odpovídalo normám jejich chemického složení a tomuto složení uvedenému v jejich materiálových listech, resp. listu pro slitinu AlSi12CuNiMg. Analýza chemického složení materiálu a intermetalických fází byla prováděna u vybraných vzorků se zájmem především o tyto chemické prvky: Al, Si, Cu, Ti, Zn, Fe, Mn a Mg s využitím SE detektoru a s parametry analýzy: urychlovací napětí 20 kV, Low probe current, pracovní vzdálenost od detektoru 15 mm a jako kalibrační prvek detektoru byl zvolen Cobalt. Intermetalické fáze přítomné ve struktuře vybraných vzorků ze zkoumaných materiálů AlSi12CuNIMg, AlSi12 a Al99,5 byly detailně zkoumány pomocí bodové, oblastní a mappingové EDX analýzy. Al99,5 měl ve struktuře přítomno poměrně malé množství znečišťujících prvků (pravděpodobně vnesených procesem tavení), které se ve struktuře uspořádaly v intermetalické fáze typu AlFeSi. Dále bylo pozorováno menší množství manganu ve struktuře některých odlitků.

U odlitků ze slitiny AlSi12 byla pomocí EDX analýzy zjištěna přítomnost intermetalických fází typu FeAl<sub>3</sub> a FeMnAl<sub>6</sub>, což vypovídá opět o znečištění taveniny nebo základního materiálu železem a manganem. Intermetalická fáze typu AlSiFe byla pravděpodobně ve struktuře přítomna také, avšak EDX analýzou nebyla potvrzena.

Typ intermetalických fází detekovaný ve slitině AlSi12CuNiMg je oproti slitině AlSi12 a čistému hliníku, díky přidaným legujícím prvkům, odlišný. Množství vyloučených intermetalických fází je závislé na teplotě lití odlitků (větší poměr těchto fází byl v odlitcích litých z nižších teplot, tj. 675 °C a 700 °C) a také na tloušťce stěny odlitku, jejíž velikost podobně jako materiál použité slévárenské formy ovlivňuje podmínky tuhnutí a chladnutí. Větší poměr intermetalických fází byl zjištěn v odlitcích s větší tloušťkou stěny a ve formách z CT směsi. Typ intermetalických fází byl ve všech případech stejný. Ve strukturách odlitků ze slitiny hliníku určené pro výrobu pístů spalovacích motorů AlSi12CuNiMg, byly zjištěny 4 typy intermetalických fází: AlCu<sub>2</sub> (právě tato fáze umožňuje tepelnou vytvrditelnost této slitiny), fáze  $T_{NI}$  (Al<sub>6</sub>Cu<sub>3</sub>Ni), Al<sub>5</sub>SiFe a také fáze typu W (Al<sub>4</sub>CuMg<sub>5</sub>Si<sub>4</sub>). Je pravděpodobné, že se ve struktuře odlitků z této slitiny vyskytovaly i další typy intermetalických fází, avšak EDX analýza jejich přítomnost nepotvrdila (např. fáze AlSiFe).

c) Pomocí elektronového mikroskopu byl také pozorován charakter lomových ploch odlitků ze slitin AlSi12CuNiMg a AlSi12. Z výše uvedených obrázků je patrné, že na

lomových plochách je možno pozorovat oba typy lomů, tvárný i křehký, což je způsobeno přítomností různorodých fází ve struktuře těchto materiálů. Ze zkušeností a pozorování těchto ploch je možno tvrdit, že u tohoto typu materiálů však převažuje nad lomem tvárným lom křehký, který navíc obsahuje velké množství prasklin nukleovaných pravděpodobně na hranicích zrn.

**10.** Hodnocením tvrdosti zkoumaných materiálů AlSi12CuNiMg, AlSi12 a Al99,5 pomocí Vickersova tvrdoměru lze konstatovat, že při sledování vlivu parametrů lití (teplota lití 675 °C, 700 °C a 725 °C; tloušťka stěny odlitků 7, 27, 40, 50 a 60 mm; materiál slévárenské formy ocel, CT směs s křemenným ostřivem a vodním sklem tvrzená CO<sub>2</sub> a písková formovací směs s křemenným ostřivem a bentonitovým pojivem Sabenil) na tvrdost slitiny AlSi12CuNiMg bylo nejvyšších hodnot tvrdosti dosaženo při lití z nižších teplot 675 °C a 700 °C, v průměru 92 HV (725 °C vykazuje průměrnou hodnotu 84 HV). Toto je způsobeno vyšší ochlazovací rychlostí, při níž má materiál jemnější strukturu a tudíž lepší mechanické vlastnosti včetně tvrdosti. Totéž platí o odlitcích do kovové formy, průměrná hodnota tvrdosti odlitků vyráběných ve formách z CT směsi činila 84 HV a ve formách z pískových směsí 83 HV. S ohledem na tloušťku stěny vykazuje opět nejvyšší tvrdost odlitek s průměrnou hodnotu tvrdosti 91 HV, který byl lit do formy s tloušťkou stěny 7 mm. Pro tloušťku stěny 27 mm je průměrná hodnota tvrdosti 88 HV.

U odlitků ze slitiny AlSi12 bylo dosaženo nižších hodnot tvrdostí, než u slitiny AlSi12CuNiMg, avšak vliv parametrů lití na tvrdost zůstal stejný, resp. podobný, jako u této slitiny. Průměrná hodnota tvrdosti při teplotě lití 675 °C, 700 °C a 725 °C je u slitiny AlSi12 porovnatelná, 71 HV. To že nebyly zjištěny markantní rozdíly tvrdosti v závislosti na teplotě lití odlitků, bylo pravděpodobně způsobeno tím, že slitina AlSi12 neobsahuje legující prvky. Vyšších hodnot tvrdosti bylo opět dosaženo v menších tloušťkách stěn. Průměrná hodnota 72 HV byla zjištěna u odlitků s tloušťkou stěny 7 mm a průměrná hodnota tvrdosti 69 HV u odlitků s velikostí stěny 27 mm.

U čistého hliníku nebyl sledován žádný trend změn tvrdosti struktury s měnícími se parametry lití a u všech odlitků byla naměřena průměrná hodnota tvrdosti 25 HV.

Ze všech testovaných materiálů nejvyšší tvrdost vykazuje slitina AlSi12CuNiMg (používaná pro výrobu pístů spalovacích motorů) s průměrnou hodnotou tvrdosti 87 HV (tuto hodnotu je možno na rozdíl od ostatních testovaných materiálů podstatně zvýšit tepelným zpracováním). Slitina AlSi12 vykazovala průměrnou hodnotou tvrdosti 70 HV. Nejnižší průměrnou hodnotu tvrdosti vykazuje čistý hliník Al99,5 s hodnotou 25 HV. Naměřené hodnoty tvrdosti sledovaných slévárenských materiálů odpovídají teoretickým předpokladům.

## 12. ZÁVĚR

Tato disertační práce zpracovává téma: *"Sledování vlastností slitin hliníku používaných pro výrobu pístů spalovacích motorů"* a přispívá tak ke komplexnějšímu pohledu na hliníkové slitiny, především na slitiny určené pro výrobu pístů spalovacích motorů, zejména pro automobilový průmysl. Zde mají tyto slitiny při výrobě přesných odlitků různých tvarů a složitostí, významné zastoupení. Práce je členěna na 12 kapitol, které jsou obsahem dvou hlavních částí práce – části teoretické a experimentální. Těchto 12 kapitol přispívá k ucelenějšímu pohledu a rozšiřuje stávající poznatky o slitinách hliníku především v oblasti jejich dilatačních vlastností. Poznatky vyplývající z řešení této disertační práce je možno využít v praxi při výrobě odlitků a jejich následném použití.

*Teoretická část práce* se zabývá charakteristikou čistého hliníku a jeho slitin především z hlediska jejich využití pro výrobu odlitků. S tímto souvisí i uvedený popis jejich slévárenských, tepelných, fyzikálních, tepelně-fyzikálních a mechanických vlastností, které jsou zpracovány na základě dostupné odborné literatury a jsou nezbytné pro komplexní sledování vybraných vlastností čistého hliníku a jeho slitin. Byl také proveden výpočet termodynamických veličin čistého hliníku a především změny Gibbsovy energie, která určuje průběh děje krystalizace nebo tavení. Kromě změny Gibbsovy energie byla také vypočtena změna molární entropie a entalpie.

*Experimentální část práce* se zabývá sledováním vybraných slévárenských a dilatačních vlastností slitiny hliníku určené pro výrobu pístů spalovacích motorů AlSi12CuNiMg, čistého hliníku Al99,5 a slitiny hliníku AlSi12. Podobně jako v teoretické části byly i v části experimentální provedeny výpočty. Byl proveden výpočet tepelné energie potřebné k roztavení různých množství vybraných materiálů na základě zjištěných tepelně-fyzikálních vlastností. Bylo provedeno i sledování zabíhavosti pomocí standardní metody, která využívá Curryho spirálu. Dalšími prováděnými výpočty jsou výpočty dilatačních změn zkoumaných materiálů a následně jejich experimentální zkoušení, které je nosnou částí této práce a k jejichž provádění je zapotřebí speciálních měřících zařízení, z nichž dvě slouží k měření dilatačních změn odlitků při jejich tuhnutí a chladnutí a jedno k měření dilatačních charakteristik při ohřevu odlitků. Tato zařízení byla sestavena a jsou k dispozici na Katedře strojírenské technologie FS, TU v Liberci a před měřením důkladně odzkoušena. Během experimentálních měření byly na zařízeních prováděný konstrukční úpravy a inovace pro vylepšení jejich vlastností a dosahování přesnějších výsledků měření současně s navržením a odzkoušením vhodné metodiky pro sledování zkoumaných

vlastností. Dilatační vlastnosti byly sledovány na odlitcích jednoduchého tvaru desky, resp. tvaru písmene "I", s proměnnými rozměry a podobně odlitky tvaru válce taktéž s proměnnými rozměry, přičemž tvar zkušebního odlitku byl závislý na použitém měřícím zařízení. Odlitky byly odlévány do slévárenských forem z různých materiálů: ocel, CT směs s křemenným ostřivem a vodním sklem tvrzená  $CO_2$  a písková formovací s křemenným ostřivem a bentonitovým pojivem z různých teplot lití.

Na základě obdržených poznatků a výsledků v rámci této disertační práce lze učinit následující dílčí závěry:

**1.** Hliník a jeho slitiny především na bázi Al-Si, tzv. siluminy, patří k velice perspektivním slévárenským materiálům s nízkou hustotou (hustota těchto slitin je cca. 2700 [kg.m<sup>-3</sup>]), poměrně nízkou teplotou tání. Slévárensky využívané slitiny mají teplotu tání do 600 °C, avšak všechny mají vysoké latentní krystalizační teplo, což zvyšuje náklady na jejich tavení. Dále se vyznačují dobrými tepelně-fyzikálními vlastnostmi, vlastnostmi slévárenskými a především vlastnostmi užitnými. K dobrým tepelně-fyzikálním vlastnostem a následně slévárenským vlastnostem hliníku a jeho slitin přispívají výhodné hodnoty následujících veličin s výjimkou hodnoty latentního krystalizačního tepla:

Čistý hliník:  $T_L= 660 [^{\circ}C]$ ,  $T_S= 660 [^{\circ}C]$ ,  $c_L= 1289 [J.kg^{-1}.K^{-1}]$ ,  $c_S= 897 [J.kg^{-1}.K^{-1}]$ ,  $L_{KR}= 397 [kJ.kg^{-1}]$ ; Slitina AlSi12:  $T_L= 560 [^{\circ}C]$  (po modifikaci),  $T_S= 560 [^{\circ}C]$  (po modifikaci),  $c_L= 1131 [J.kg^{-1}.K^{-1}]$ ,  $c_S= 1080 [J.kg^{-1}.K^{-1}]$ ,  $L_{KR}= 513 [kJ.kg^{-1}]$ ; Slitina AlSi12CuNiMg:  $T_L= 565 [^{\circ}C]$ ,  $T_S= 557 [^{\circ}C]$ ,  $c_L= 1050 [J.kg^{-1}.K^{-1}]$ ,  $c_S= 760 [J.kg^{-1}.K^{-1}]$ ,  $L_{KR}= 500 [kJ.kg^{-1}]$ .

Objemové změny při tavení hliníku a jeho slitin jsou do 6 %. Další vlastností, která pozitivně ovlivňuje slévárenské vlastnosti slitin hliníku, je jejich poměrně nízké povrchové napětí 0,91 [N.m<sup>-1</sup>] a dynamická viskozita 1,34 [Pa.s]. Z výše uvedených vlastností, resp. hodnot, lze zjistit, že množství tepla potřebné pro roztavení 1 kg čistého hliníku činí 971080 [J] a za použití molární entalpie byla vypočtena hodnota 1053854 [J]. Pro slitinu AlSi12 je dle výpočtu na základě tepelně-fyzikálních veličin třeba k jejímu roztavení 1209300 [J] tepla a pro slitinu AlSi12CuNiMg 1012210 [J].

2. Zabíhavost slitin hliníku je závislá nejen na tepelně-fyzikálních vlastnostech odlévané slitiny a slévárenské formy, ale i na obsahu křemíku ve slitinách. Zabíhavost zjištěná pomocí Curryho spirály (zaformované do pískové slévárenské formy z pískové formovací směsi s křemenným ostřivem a bentonitovým pojivem) potvrdila výchozí teoretické

předpoklady. Nejvyšší hodnoty praktické zabíhavosti s teplotou lití 725 °C vykazuje slitina AlSi12, průměrná délka spirály činila 810 [mm]. Slitina AlSi12CuNiMg, díky vlivu legujících prvků, vykazovala průměrnou hodnotu zabíhavosti 780 [mm]. Nejnižší hodnoty praktické zabíhavosti ze zkoumaných materiálů vykazoval čistý hliník Al99,5 s hodnotou 560 [mm]. Se vzrůstajícím obsahem křemíku tedy zabíhavost slitin hliníku stoupá.

**3.** Čas tuhnutí odlitků tvaru "I" (desky) a válce z čistého hliníku a slitin hliníku, který byl sledován v závislosti na vlivu teploty lití, materiálu slévárenské formy, tj. vlivu ochlazovací schopnosti formy a tloušťce stěny odlitku potvrdila skutečnost, že nejrychleji tuhnou odlitky v kovové formě ze všech teplot lití, neboť tato forma má nejvyšší hodnotu tepelné akumulace. Byly zjištěny následující průměrné časy tuhnutí odlitků tvaru "I" (desky) ve formách: AlSi12CuNiMg: slévárenská forma z oceli 21,6 [s]; slévárenská forma z cCT směsi 30,7 [s]; slévárenská forma z písku 32,3 [s]; AlSi12: slévárenská forma z oceli 32,0 [s]; slévárenská forma z CT směsi 40,8 [s]; slévárenská forma z písku 57,6 [s]; Al99,5: slévárenská forma z oceli 3,8 [s].

**4.** Při sledování hodnoty konstanty tuhnutí během lití do formy s vyšší ochlazovací schopností vykazuje konstanta tuhnutí vyšší hodnoty a při odlévání s vyšší teplotou přehřátí taveniny je naopak konstanta tuhnutí odlitku nižší. Konstanta tuhnutí slitiny AlSi12CuNiMg při odlévání odlitku tvaru "I", resp. desky, do kovové slévárenské formy, vykazuje hodnotu 4,57.10<sup>-3</sup> [m.s<sup>-1/2</sup>]. Při odlévání do formy z CT směsi je konstanta tuhnutí 3,37.10<sup>-3</sup> [m.s<sup>-1/2</sup>] a písková slévárenská forma s nejnižší ochlazovací schopností vykazuje hodnotu konstanty tuhnutí 3,02.10<sup>-3</sup> [m.s<sup>-1/2</sup>]. Pro odlitky tvaru válce ze slitiny AlSi12CuNiMg do slévárenské formy z CT směsi má konstanta tuhnutí hodnotu 3,35.10<sup>-4</sup> [m.s<sup>-1/2</sup>] a při lití do forem z pískových směsí na bázi bentonitu je konstanta tuhnutí 2,71.10<sup>-4</sup> [m.s<sup>-1/2</sup>]. U odlitků tvaru desky ze slitiny AlSi12 byla při lití do kovové formy zjištěna hodnota konstanty tuhnutí 4,43.10<sup>-3</sup> [m.s<sup>-1/2</sup>], do formy z CT směsi 3,02.10<sup>-3</sup> [m.s<sup>-1/2</sup>]. Pro odlitky tvaru válce ze slitiny z CT směsi hodnota konstanty tuhnutí 4,43.10<sup>-3</sup> [m.s<sup>-1/2</sup>]. Pro odlitky tvaru z CT směsi 3,02.10<sup>-3</sup> [m.s<sup>-1/2</sup>].

**5.** Sledováním dilatačních změn při tuhnutí a chladnutí odlitků tvaru "I", resp. desky, délky 157 mm s rozměry dříku 7 x 10 mm a 27 x 10 mm v závislosti na parametrech lití ze slitiny AlSi12CuNiMg, slitiny AlSi12 a čistého hliníku byly zjištěny průměrné hodnoty dilatace pro slitinu AlSi12CuNiMg -1,32 [mm], pro slitinu AlSi12 -1,63 [mm] a pro čistý hliník

Al99,5 -2,08 [mm]. Tyto hodnoty velmi dobře korespondují s hodnotami vypočítanými: pro slitinu AlSi12CuNiMg -1,21 [mm] a -1,02 [mm], pro slitinu AlSi12 -1,32 [mm] a -1,24 [mm] a u čistého hliníku Al99,5 -2,75 [mm] a -1,56 [mm]. Nejnižší průměrné hodnoty maximální dilatace vykazuje podle předpokladů slitina AlSi12CuNiMg. Na dilatační změny byl zkoumán především vliv teplot lití, materiálů slévárenských forem a tloušťky stěny odlitků, kdy se ukazuje, že nejnižší dilatace vykazují odlitky ze zkoumaných materiálů při teplotách lití 725 a 700 °C a teplota lití 675 °C se ukázala jako nevhodná. Při zkoumání vlivu slévárenské formy se ukázalo, že nejvýhodnější hodnoty dilatačních změn jsou ve slévárenské formě vyrobené z oceli. Ve formách z ostatních materiálů, tj. CT směs s křemenným ostřivem a vodním sklem tvrzená  $CO_2$  a písková slévárenská forma s křemenným ostřivem a bentonitovým pojivem jsou podmínky tuhnutí a chladnutí odlitků z hlediska dilatačních vlastností prakticky srovnatelné.

**6.** Ukazatel maximálního poměrného smrštění odlitku tvaru "I", resp. tvaru desky, pro slitinu AlSi12CuNiMg je nejnižší právě v kovové slévárenské formě, průměrná hodnota 0,79 %. Ve formě z CT směsi je průměrná hodnota poměrného smrštění 0,87 % a v pískové formě 0,86 %. Ostatní materiály vykazují průměrné hodnoty vyšší. Slitina AlSi12 vykazuje průměrné poměrné maximální smrštění v kovové formě 1,01 %, ve formě z CT směsi 1,03 % a ve formě z pískové formovací směsi 1,07 %. Čistý hliník vykazuje ve formě z oceli průměrné maximální poměrné smrštění 1,40 %, což je pro tento materiál opět nejnižší hodnota, ve formě z CT směsi 1,45 % a ve formě z pískové směsi s bentonitovým pojivem 1,44 %. Z hlediska vlivu velikosti odlitku, resp. tloušťky stěny odlitku, na dilatační vlastnosti platí, že nižší tloušťka stěny znamená menší dilatace u všech zkoumaných materiálů.

**7.** Sledováním dilatačních změn při tuhnutí a chladnutí odlitků tvaru válce s rozměry Ø40, Ø50 a Ø60 mm x 84 mm ze slitiny AlSi12CuNiMg v závislosti na materiálu slévárenské formy, teplotě lití taveniny a velikosti odlitku je dilatační chování těchto odlitků velmi podobné jako u odlitků tvaru "I" (desky) z této slitiny. Nejvýhodnější teplotou lití, kdy odlitky vykazují nejnižší záporné dilatace, jsou pro tuto slitinu opět teploty 725 °C a 700 °C, které jsou ale z hlediska kladných dilatací méně výhodné (vykazují průměrnou hodnotu kladné dilatace 0,13 [mm]). Z hlediska záporných dilatací jsou tyto teploty podstatně výhodnější, průměrné dilatace -0,26 [mm], než teplota 675 °C, která se opět ukázala jako nevýhodná s průměrnou zápornou dilatací -0,53 [mm]. Chování ve slévárenských formách vykazuje tato slitina stejné, jako v případě odlitků tvaru "I" (desky), tj. vykazuje menší dilatace ve formách z CT směsi, s hodnotou dilatace -0,24 [mm] než ve formách z pískové směsi, s hodnotou dilatace -0,46 [mm]. Z hlediska velikosti odlitku opět vykazují menší dilatační změny odlitky menších rozměrů, tedy Ø40 x 84 mm.

8. Při výpočtu součinitele teplotní smrštivosti  $\alpha$  v intervalech teplot 500-20 °C na základě naměřených dat je patrný rostoucí trend velikosti součinitele  $\alpha$  s klesající teplotou. U odlitků tvaru "I" (desky) byly pro čistý hliník vypočítány průměrné hodnoty součinitele  $\alpha$ : teplotní interval 500-400 °C hodnota 4,0.10<sup>-5</sup> [K<sup>-1</sup>]; teplotní interval 400-300 °C hodnota 6.1.10<sup>-5</sup> [K<sup>-1</sup>], teplotní interval 300-200 °C hodnota 8.3.10<sup>-5</sup> [K<sup>-1</sup>]; teplotní interval 200-100 °C hodnota 10,5.10<sup>-5</sup> [K<sup>-1</sup>] a teplotní interval 100-20 °C hodnota 15,9.10<sup>-5</sup> [K<sup>-1</sup>]. Pro slitinu AlSi12 v teplotním intervalu 500-400 °C hodnota 2,1.10<sup>-5</sup> [K<sup>-1</sup>]; v teplotním intervalu 400-300 °C hodnota 3,8.10<sup>-5</sup> [K<sup>-1</sup>]; v teplotním intervalu 300-200 °C hodnota 5,8.10<sup>-5</sup> [K<sup>-1</sup>]; v teplotním intervalu 200-100 °C hodnota 7,8.10<sup>-5</sup> [K<sup>-1</sup>] a v teplotním intervalu 100-20 °C hodnota 12,5.10<sup>-5</sup> [K<sup>-1</sup>]. U slitiny AlSi12CuNiMg v teplotním intervalu 500-400 °C hodnota 0,8.10<sup>-5</sup> [K<sup>-1</sup>]; v teplotním intervalu 400-300 °C hodnota 2,3.10<sup>-5</sup> [K<sup>-1</sup>]; v teplotním intervalu 300-200 °C hodnota 4,1.10<sup>-5</sup> [K<sup>-1</sup>]; v teplotním intervalu 200-100 °C hodnota 6.0.10<sup>-5</sup> [K<sup>-1</sup>] a v teplotním intervalu 100-20 °C hodnota 10.1.10<sup>-5</sup> [K<sup>-1</sup>]. U odlitků tvaru válce byly pro slitinu AlSi12CuNiMg ze získaných dat vypočítány velmi podobné průměrné hodnoty součinitele teplotní smrštivosti α jako u odlitků tvaru desky. V teplotním intervalu 500-400 °C hodnota 2,2.10<sup>-5</sup> [K<sup>-1</sup>]; v teplotním intervalu 400-300 °C hodnota 2,5.10<sup>-5</sup> [K<sup>-1</sup>]; v teplotním intervalu 300-200 °C hodnota  $3,5.10^{-5}$  [K<sup>-1</sup>]; v teplotním intervalu 200-100 °C hodnota  $5,0.10^{-5}$  [K<sup>-1</sup>] a v teplotním intervalu 100-20 °C hodnota  $8,4.10^{-5}$  [K<sup>-1</sup>]. U slitiny AlSi12CuNiMg je z uvedených výsledků patrný příznivý vliv jejích legujících prvků na její dilatační vlastnosti.

**9.** Dilatometrická analýza ohřívaných vzorků odlitků s rozměry Ø10 x 50 mm ze slitin AlSi12CuNiMg, AlSi12 a čistého hliníku, které byly odlévány do kovové formy, byla porovnána s hodnotami stanovenými na základě výpočtu. Pro slitinu AlSi12CuNiMg bylo vypočítáno roztažení 0,50 [mm], u slitiny AlSi12 0,53 [mm] a u čistého hliníku Al99,5 0,58 [mm], což velmi dobře koresponduje s naměřenými hodnotami dilatace. Pro slitinu AlSi12CuNiMg byla naměřena hodnota dilatace je 0,31 [mm], pro slitinu AlSi12 byla naměřena hodnota dilatace 0,32 [mm] a pro čistý hliník Al99,5 byla naměřena hodnota dilatace 0,37 [mm]. Výsledky potvrzují, že teplota lití nemá prakticky vliv na teplotní roztažnost materiálů.

**10.** Vliv tepelného zpracování (v tomto případě precipitační vytvrzování) na rozměrové změny slitiny AlSi12CuNiMg je nepatrný. Tepelně zpracované odlitky vykazují menší dilataci, hodnota 0,30 [mm], než odlitky tepelně nezpracované, hodnota 0,32 [mm], a to zejména při vyšších teplotách (přibližně 500 °C). V teplotním intervalu 200-300 °C (který je pro výrobky z této slitiny, tj. písty spalovacích motorů, intervalem pracovních teplot) vykazuje tepelně nezpracovaný odlitek průměrnou dilataci 0,052 [mm] a tepelně zpracovaný 0,050 [mm], tj. hodnoty jsou stejné. Hodnota poměrného roztažení 0,1 % je pro oba případy stejná.

**11.** Vypočítaný součinitel teplotní roztažnosti α v intervalech teplot 20-500 °C vykazuje rostoucí trend jeho velikosti s rostoucí teplotou. Průměrné hodnoty součinitele teplotní roztažnosti α vypočítané pro slitinu AlSi12CuNiMg tepelně nezpracovanou mají v teplotním intervalu 20-100 °C hodnotu 0,34.10<sup>-5</sup> [K<sup>-1</sup>]; v teplotním intervalu 100-200 °C hodnotu 1,04.10<sup>-5</sup> [K<sup>-1</sup>], v teplotním intervalu 200-300 °C hodnotu 2,19.10<sup>-5</sup> [K<sup>-1</sup>]; v teplotním intervalu 300-400 °C hodnotu 4,58.10<sup>-5</sup> [K<sup>-1</sup>] a v teplotním intervalu 400-500 °C hodnotu  $6,35.10^{-5}$  [K<sup>-1</sup>]. Pro tuto slitinu tepelně zpracovanou byly vypočítány průměrné hodnoty součinitele  $\alpha$  v teplotním intervalu 20-100 °C hodnota 0,31.10<sup>-5</sup> [K<sup>-1</sup>]; v teplotním intervalu 100-200 °C hodnota 1,01.10<sup>-5</sup> [K<sup>-1</sup>]; v teplotním intervalu 200-300 °C hodnota  $2.23.10^{-5}$  [K<sup>-1</sup>]; v teplotním intervalu 300-400 °C hodnota  $4.38.10^{-5}$  [K<sup>-1</sup>] a v teplotním intervalu 400-500 °C hodnota 6,11.10<sup>-5</sup> [K<sup>-1</sup>], což jsou hodnoty vlivem tepelného zpracování nižší. Pro slitinu AlSi12 v teplotním intervalu 20-100 °C hodnota 0.21.10<sup>-5</sup>  $[K^{-1}]$ ; v teplotním intervalu 100-200 °C hodnota 1,0.10<sup>-5</sup>  $[K^{-1}]$ ; v teplotním intervalu 200-300 °C hodnota 2,18.10<sup>-5</sup> [K<sup>-1</sup>]; v teplotním intervalu 300-400 °C hodnota  $4,35.10^{-5}$  [K<sup>-1</sup>] a v teplotním intervalu 20-100 °C hodnota  $6,13.10^{-5}$  [K<sup>-1</sup>]. Pro čistý hliník v teplotním intervalu 20-100 °C hodnota 0,24.10<sup>-5</sup> [K<sup>-1</sup>]; v teplotním intervalu 100-200 °C hodnota 1,13.10<sup>-5</sup> [K<sup>-1</sup>]; v teplotním intervalu 200-300 °C hodnota 2,49.10<sup>-5</sup> [K<sup>-1</sup>]; v teplotním intervalu 300-400 °C hodnota 4,84.10<sup>-5</sup> [K<sup>-1</sup>] a v teplotním intervalu 400-500 °C hodnota 7,37.10<sup>-5</sup> [K<sup>-1</sup>].

**12.** Hodnocení vlivu parametrů lití (teploty lití: 675, 700, 725 °C; typ slévárenské formy: ocel, CT směs s křemenným ostřivem a vodním sklem tvrzená  $CO_2$ , písková formovací směs s křemenným ostřivem a bentonitovým pojivem; velikost odlitku resp. tloušťka stěny odlitku: 7, 27, 40, 50, 60 mm) na strukturu odlitků ze slitin AlSi12CuNiMg a AlSi12 a čistého hliníku Al99,5 bylo prováděno na základě parametru DAS. Hodnoty DAS byly pro slitinu AlSi12CuNiMg v ocelové formě 15,58, ve formě z CT směsi 41,86 a v pískové

formě 45,14. U slitiny AlSi12 v kovové formě 13,23, ve formě z CT směsi 53,54 a pískové formě 65,37.

**13.** Struktura resp. chemické složení intermetalických fází, které byly přítomny ve všech zkoumaných odlitcích ze všech zkoumaných materiálů, včetně čistého hliníku, byla zjištěna pomocí EDX analýzy na skenovacím elektronovém mikroskopu. Přítomné intermetalické fáze měly pro slitinu AlSi12CuNiMg následující chemické složení: AlCu<sub>2</sub>, T<sub>NI</sub> (Al<sub>6</sub>Cu<sub>3</sub>Ni), Al<sub>5</sub>SiFe a W (Al<sub>4</sub>CuMg<sub>5</sub>Si<sub>4</sub>), přítomnost fáze AlSiFe nebyla v této slitině na rozdíl od ostatních zjištěna; u slitiny AlSi12: FeAl<sub>3</sub> a FeMnAl<sub>6</sub> a u čistého hliníku Al99,5 AlFeSi. Toto v případě materiálů AlSi12 a Al99,5 vypovídá o pravděpodobně špatné kvalitě housky nebo taveniny znečištěné především železem.

**14.** Tvrdost slitin AlSi12CuNiMg, AlSi12 a čistého hliníku byla sledována v závislosti na parametrech lití odlitků (teplota lití, materiál slévárenské formy a tloušťka stěny odlitku). Nejvyšší tvrdosti bylo dosaženo u odlitků ze slitin AlSi12CuNiMg a AlSi12, které byly zhotoveny s vyššími ochlazovacími rychlostmi. Na tvrdost čistého hliníku nemají podmínky lití žádný vliv. Průměrná hodnota tvrdosti pro slitinu AlSi12CuNiMg byla zjištěna 87 HV, pro slitinu AlSi12 70 HV a nejnižší tvrdost vykazoval čistý hliník Al99,5 s průměrnou hodnotou 25 HV.

## Vlastní přínos práce

Práce shrnuje a rozšiřuje poznatky o vybraných slévárenských materiálech na bázi hliníku; o čistém hliníku, slitině AlSi12 a zejména o slitině AlSi12CuNiMg určené pro výrobu pístů spalovacích motorů z hlediska jejich tepelně-fyzikálních vlastností a zejména dilatačního chování při jejich tuhnutí a chladnutí a při ohřevu.

Za hlavní přínos práce lze považovat ucelený souhrn, srovnání a prozkoumání tepelně-fyzikálních vlastností, především dilatačního chování těchto materiálů během jejich odlévání a ohřevu v závislosti na proměnných parametrech lití a vlivu legujících prvků. Součástí této práce jsou také výpočty termodynamických procesů, tepelné náročnosti tavení slitin a dilatačních změn na základě teoretických znalostí. V práci uvedené výpočty dilatačních změn byly ověřeny a doplněny experimentálními měřeními, na jejichž realizaci byly použity tři druhy měřících zařízení zkonstruovaných na Katedře strojírenské technologie, FS, TU v Liberci. Během prováděných experimentů byla některá

z těchto zařízení inovována a upravována pro dosažení co nejlepších a nejpřesnějších výsledků. Také byla testována zvolená metodika měření do různých druhů slévárenských forem z různých teplot lití do proměnných tlouštěk stěn odlitků různých tvarů. Tato práce byla obohacena o výsledky strukturního zkoumání připravených odlitků na světelném a především elektronovém skenovacím mikroskopu ve spolupráci s univerzitou ve švédském Linköpingu.

Poznatky a závěry uvedené v této disertační práci mohou být použity při vyhodnocování praktických úloh a technologickém řešení různých problémů v oblasti slévárenství při výrobě odlitků ze zkoumaných slitin.

## 13. POUŽITÁ LITERATURA

[1] ŠEVČÍK, J. 43. přehled světové výroby odlitků- rok 2008. Slévárenství vol. 3-4, LVIII, 2010, ISSN 0037-6825.

[2] Aluminium. [online], http://www.tiptheplanet.com/wiki/Aluminium

[3] KOLEKTIV ČESKOSLOVENSKÝCH, MAĎARSKÝCH, NĚMECKÝCH A POLSKÝCH AUTORŮ. *Příručka o hliníku*. 1. vyd. Praha, 1969.

[4] MICHNA, Š. a kol. *Encyklopedie hliníku*. 1. vyd. Prešov, 2005.

[5] MICHNA, Š., VOJTĚCH, D., MAJRICH, P. Problematika odlévání automobilových pístů gravitačním litím. Slévárenství vol. 11-12, LVII, 2009, ISSN 0037-6825.

[6] MICHNA, Š., LUKÁČ, I., BAJCURA, M. Struktura slitiny EN AW 4032 a její vliv na výsledné vlastnosti materiálu. Sborník konference Aluminium 2007, 2007.

[7] KORITTA, J., HOLEČEK, S., FRANĚK, A. Vlastnosti slitin Al-Si používaných pro výrobu pístů. Slévárenství vol. 3-4, XVIII, 1970, ISSN 0037-6825.

[8] BAKER, A.R., GAZZARD, S. *Developments in materials for pistons*. AE group technical symposium 1986, 1986.

[9] MUNRO, R. *Uprating of aluminium alloy diesel pistons by squeeze casting techniques.* 16. Int. Congress of combustion engines, Oslo, 1985.

[10] SMART, R.F., BACON, M.C., COLDRICK, G.M. *Material aspects of piston reliability*. AE technical symposium, 1982.

[11] HAQUE, M.M., MALEQUE, M.A. *Effects of process variables on structure and properties of aluminium-silicon piston alloys.* Elsevier Journal of materials processing technology, 1998.

[12] HAQUE, M.M., SHARIF, A. *Study on wear properties of aluminium-silicon piston alloys.* Elsevier Journal of materials processing technology, 2001.

[13] MABREY, R. *Recent developments in light alloy pistons*. Journal of the institution of production engineers, 1935.

[14] PTÁČEK, L. A KOL. Nauka o materiálu I a II. 1. vyd. Brno, 2001.

[15] KUBÍČEK, L. Krystalizace kovů a slitin. VŠCHT Praha (skripta), 1991.

[16] GRÍGEROVÁ, T., KOŘENÝ, R., LUKÁČ, I. *Zlievarenstvo neželezných kovov.* 1. vyd. Bratislava/Praha, 1988.

[17] CAMPBELL, J. Castings. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2003.

[18] SMIRNOFF, F. *Thermal expansion of aluminium alloys with zinc*. Colective index of transactions, proceedings and abstracts of chemical society. London, 1912.

[19] DEVAUX, H. Measurement and control in liquid metals processing. Netherland, 1987.

[20] *Historie hliníku*. [online], http://www.alinvest.cz/cz/hlinik/historie-hliniku/art\_19160/ historie-hliniku.aspx

[21] In search of aluminium. [online], http://www.riotintoalcan.is/?PageID=121

[22] Historie hliníku. [online], http://www.hlinik.info/zajimavost/historie-hliniku

[23] *Hliník*. [online], http://cs.wikipedia.org/wiki/Hlin%C3%ADk

[24] Příspěvky autora stránek. [online], http://www.stefanmichna.com

[25] CUI-ZUN HE, YONG DU, HAI-LIN CHEN. *Experimental investigation of thermodynamic modeling of the Al-Cu-Si system*. Elsevier Journal of materials processing technology, 2008.

[26] ASM Handbook online. *Aluminium ingot casting and continuos processes*. Volume 15- Casting.

[27] ASM Handbook online. *Aluminium and aluminium alloy castings*. Volume 15-Casting.

[28] BROWN, J. R. Foseco non-ferrous foundryman's handbook. 11th edition, Elsevier Butterworth-Heinemann, 1999.

[29] *Webová prezentace firmy KS Kolbenschmidt*. [online], http://kolben-ustinl.kspg-ag.com/index.php?lang=2

[30] Aluminium Beryllium. [online], http://x-o.blog.cz/en/0912/aluminium-beryllium

[31] *Cast vs. forged pistons.* [online], http://www.motorcycleproject.com/motorcycle/text/ cows-pistons.html

[32] Webová prezentace firmy Vačky Krejbich. [online], http://www.vackykrejbich.cz/

[33] BELOV, N. A., ESKIN, D. G., AVXENTIEVA, N. N. Constituent phase diagrams of the Al-Cu-Fe-Mg-Ni-Si system and their application to the analysis of aluminium piston alloys. Elsevier Journal of materials processing technology, 2005.

[34] RAGHAVAN, V. *Al-Cu-Fe-Mg-Ni-Si* (*Aluminium-Copper-Iron-Magnesium-Nickel-Silicon*). ASM international - Journal of phase equilibria and difusion, 2007.

[35] ASM handbook online. *Thermophysical properties*. Volume 15- Casting.

[36] NOVÁ, I. Teorie slévání I a II. 1. vyd. TU v Liberci (skripta), 2007.

[37] Material properties. [online], http://www.engineeringtoolbox.com

[38] BÁLEK, S. Tepelně technické tabulky a diagramy. HF – VŠB Ostrava (skripta), 1979.

[39] KUCHAŘ, L., DRÁPALA, J. *Tabulky vybraných vlastností kovů*. HF – VŠB Ostrava (skripta), 1964.

[40] HOLUBEC, Z., KULHÁNKOVÁ, J., NOVÁ, I. *Tabulky pro cvičení z předmětu fyzikální chemie metalurgických procesů*. VŠST Liberec (skripta), 1985.

[41] NOVÁ, I. Tepelné procesy ve slévárenských formách. TU v Liberci, 2003.

[42] KAKAS, D., KOVACEVIC, L., TEREK, P. Computer simulation and experimental research of cast piston porosity. Journal of engineering annals, 2007.

[43] Material properties. [online], http://www.propulsora.com

[44] BRANDES, E. A., BROOK, G. B. *Smithells light metals handbook*. Elsevier Butterworth-Heinemann, 1998.

[45] *Webová prezentace firmy Rheinfelden*. [online], http://www.alurheinfelden.com/web/guest;jsessionid=25217E001EBC789673834AC53D34A5FF

[46] *Webová prezentace firmy Honsel*. [online], http://www.honsel.com/uploads/media/ Handbuch\_Gusswerkstoffe.pdf

[47] Material properties. [online], http://www.matbase.com

[48] CHEN, C-L., THOMSON, R. C. *The combined use of EBSD and EDX analyses for the identification of complex intermetallic phases in multicomponent Al-Si piston alloys.* Elsevier Journal of materials processing technology, 2009.

[49] BÄR, J., GUDLANDT, H.-J., ILLY, J. *Influence of fibre reinforcement on the aging behavior of an AlSi12CuNiMg alloy.* Elsevier Journal of materials processing technology, 1997.

[50] MYSLIVEC, T. Fyzikální chemie metalurgických procesů. HF – VŠB Ostrava (skripta), 1969.