

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

## Fakulta strojní

Studijní program M2301 – Strojní inženýrství

Strojírenská technologie

Zaměření strojírenská metalurgie

Katedra strojírenské technologie

Oddělení strojírenské metalurgie

**Sledování dilatačních vlastností slévarenských slitin při brzděném smršťování  
odlitků**

**Monitoring of dilatation properties of foundry alloys at delayed shrinking of  
casts**

**Luboš Novák**

**KSP – SM – 555**

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Iva Nová, CSc. – *TU v Liberci*

Konzultant diplomové práce: Ing. Jiří Morávek – *TU v Liberci*

**Rozsah práce a příloh: 76**

**Počet stran: 76**

**Počet tabulek: 30**

**Počet příloh: 0**

**Počet obrázků: 26**

**Datum: 28.5.2010**

**A N O T A C E**  
**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**Fakulta strojní**  
**Katedra strojírenské technologie**  
**Oddělení strojírenské metalurgie**

Studijní program: M2301 – Strojní inženýrství  
Diplomant: Luboš Novák  
Téma práce: Sledování dilatačních vlastností slévárenských slitin při  
brzděném smršťování odlitků  
Monitoring of dilatation properties of foundry alloys at delayed  
shrinking of casts  
Číslo DP: KSP – SM – 555  
Vedoucí DP: prof. Ing. Iva Nová, CSc. – *TU v Liberci*  
Konzultant: Ing. Jiří Morávek – *TU v Liberci*

**Abstrakt:**

Tato diplomová práce je zaměřena na sledování rozměrových změn hliníku čistoty 99,9%, slitiny hliníku s křemíkem a slitiny hliníku s mědí. Diplomová práce je rozdělena na dvě základní části, teoretickou a praktickou. V teoretické části jsou popsány principy výroby hliníku, jeho fyzikální a technologické vlastnosti, druhy používaných slitin a jejich slévárenské a dilatometrické vlastnosti. V praktické části je popsána a vyhodnocena metoda experimentálního měření dilatace v závislosti na čase a teplotě pro hliník čistoty 99,9% a dvou výše uvedených slitin.

**Abstrakt:**

This master thesis is focused on monitoring of dimensional changes of 99.9% aluminium, aluminium-silicon alloy, and aluminium-copper alloy. This master thesis is divided to two basic parts - theoretical and practical. The theoretical part includes specification of aluminium production principles, physical and technological properties of aluminium, types of alloys used, and their foundry and dilatometric properties. The practical part includes specification and assessment of the method for experimental measurement of dilatation depending on time and temperature for 99.9% aluminium and the two above mentioned alloys.

**Místopřísežné prohlášení:**

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 28. května 2010

.....  
Luboš Novák  
Legionářská 968  
289 22 Lysá nad Labem

## **Poděkování**

Děkuji všem, kteří svou pomocí a podporou přispěli k vypracování této diplomové práce, zejména pak paní prof. Ing. Nové, CSc. Dále bych chtěl poděkovat panu Drahoslavu Vinšovi a Ing. Jiřímu Morávkovi za pomoc při provádění experimentů. Také děkuji svým rodičům za morální a hmotnou podporu při studiu.

V Liberci 28. května 2010

.....  
Luboš Novák  
Legionářská 968  
289 22 Lysá nad Labem

## OBSAH

|  |           |
|--|-----------|
| SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....               | 8         |
| <b>1. ÚVOD .....</b>                                   | <b>9</b>  |
| <b>2. TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE .....</b>                  | <b>10</b> |
| 2.1 Charakteristika hliníku .....                      | 10        |
| 2.2 Výroba a zpracování hliníku .....                  | 20        |
| 2.3 Slitiny hliníku .....                              | 27        |
| 2.4 Slévárenské vlastnosti hliníku a jeho slitin ..... | 31        |
| 2.5 Rozdělení slitin hliníku .....                     | 34        |
| 2.6 Dilatační vlastnosti slitin hliníku .....          | 37        |
| <b>3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE .....</b>              | <b>41</b> |
| 3.1 Charakteristika měřicího zařízení .....            | 41        |
| 3.2 Navržená metodika měření .....                     | 44        |
| 3.3 Charakteristika použitých slitin .....             | 45        |
| 3.4 Charakteristika prováděných experimentů .....      | 47        |
| 3.5 Vyhodnocení experimentů .....                      | 63        |
| <b>4. DISKUSE VÝSLEDKŮ .....</b>                       | <b>70</b> |
| <b>5. ZÁVĚR .....</b>                                  | <b>72</b> |
| <b>6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>              | <b>74</b> |

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

|                       |  |
|-----------------------|--|
| $R_m$ -               | mez pevnosti v tahu [MPa]                            |
| $Re_{02}$ -           | mez kluzu v tahu [MPa]                               |
| $A_{02}$ -            | tažnost [%]  |
| HB -                  | tvrdost podle Brinella                               |
| $\Delta T$ -          | změna teploty [K]                                    |
| $\alpha$ -            | součinitel délkové teplotní roztažnosti [ $K^{-1}$ ] |
| $t_l$ -               | teplota liti [K]                                     |
| $t_l$ -               | teplota likvidu slitiny [K]                          |
| $l_p, l_0$ -          | počáteční rozměr odlitku [m]                         |
| $l_v$ -               | rozměr odlitku po volné dilataci [m]                 |
| $\Delta l$ -          | změna délky [m]                                      |
| $\varepsilon_{tek}$ - | objemové smrštění v tekutém stavu [-]                |
| $\varepsilon_{tuh}$ - | objemové smrštění při tuhnutí [-]                    |
| $\varepsilon_s$ -     | objemové smrštění v tuhém stavu [-]                  |
| $\varepsilon_{cel}$ - | celkové smrštění [-]                                 |

## 1. ÚVOD

V současné době je velká pozornost věnována hliníku a jeho slitinám. Slitiny hliníku, mají čím dál větší uplatnění jako konstrukční materiál pro výrobu dílů automobilového průmyslu. Ze slitin hliníku jsou vyráběny nejen karoserie automobilů, ale především značné uplatnění mají odlitky, které jsou v rozsáhlé míře využívány zejména z důvodu jejich nízké hmotnosti a snadnému zpracování. Nevýhodu těchto slitin jsou poměrně velké objemové změny a smršťování při výrobě odlitků resp. jejich tuhnutí. Z tohoto důvodu je nutné odlitky gravitačně odlévané nálitkovat. Slévárenství slitin hliníku se zaměřuje na jeho výzkum především v oblasti různých vlastností, mezi které patří např. brzděné smršťování odlitků, sledování součinitele teplotní roztažnosti nebo smrštivosti. Využívání poznatků ze sledování těchto jevů je následně využíváno pro konstrukční navrhování a technologické zpracování odlitků, tak abychom v konečné fázi dostali odlitky s požadovanou pevností, přesnými rozměry, odolností proti vysokým teplotám atd. Hliník je lehký kov, s dobrou tepelnou a elektrickou vodivostí, odolávající atmosférické korozi a snadno zpracovatelný všemi technologiemi. Pro výrobu odlitků jsou rozhodující slévárenské vlastnosti použitých hliníkových slitin, především jejich sklon ke stahování a lineárnímu smršťování a s tím související změny rozměrů a vznik možných defektů. Změny rozměrů jsou charakterizovány součinitelem lineární smrštivosti, který je v literatuře uváděn pro různé typy slitin jako střední hodnota. Experimentální stanovení hodnot součinitele lineární smrštivosti v celém průběhu tuhnutí odlitku dává možnost využít těchto hodnot pro konstrukci forem konkrétních odlitků, tak aby měly požadované mechanické vlastnosti.

Oblastí výzkumu sledování technologických a fyzikálních vlastností slitin hliníku se v současné době zabývají pracovníci Katedry strojírenské technologie, FS – TU v Liberci. Podobnou problematiku v diplomové práci na tomto pracovišti řešil MORÁVEK [7]. S tímto výzkumem také úzce souvisí má diplomová práce, která je na téma: „Sledování dilatačních vlastností slévárenských slitin při brzděném smršťování odlitků.“

## 2. TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE

### 2.1 Charakteristika hliníku

Hliník (Aluminium - Al) je neušlechtilý, stříbřitě šedý, nestálý kujný kov, velmi dobře elektricky vodivý. V periodické soustavě prvků, viz tabulka 2.1, zaujímá třetí periodu – skupina III. A. Protonové číslo je 13, relativní atomová hmotnost 26,98, elektronová konfigurace  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$ .

Tabulka 2.1 Schéma periodické soustavy prvků s vyznačením polohy hliníku [4]

**Periodická tabulka chemických prvků**

|                      |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |     |     |     |
|----------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1                    | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  |
| H                    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |     |     | He  |
| Li                   | Be |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     | B   | C   | N   | O   | F   | Ne  |
| Na                   | Mg |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     | Al  | Si  | P   | S   | Cl  | Ar  |
| K                    | Ca | Sc | Ti | V  | Cr | Mn | Fe | Co | Ni | Cu | Zn  | Ga  | Ge  | As  | Se  | Br  | Kr  |
| Rb                   | Sr | Y  | Zr | Nb | Mo | Tc | Ru | Rh | Pd | Ag | Cd  | In  | Sn  | Sb  | Te  | I   | Xe  |
| Cs                   | Ba | *  | Hf | Ta | W  | Re | Os | Ir | Pt | Au | Hg  | Tl  | Pb  | Bi  | Po  | At  | Rn  |
| Fr                   | Ra | ** | Rf | Db | Sg | Bh | Hs | Mt | Ds | Rg | Uub | Uut | Uuq | Uup | Uuh | Uus | Uuo |
| * <i>Lanthanoidy</i> |    |    | La | Ce | Pr | Nd | Pm | Sm | Eu | Gd | Tb  | Dy  | Ho  | Er  | Tm  | Yb  | Lu  |
| ** <i>Aktinoidy</i>  |    |    | Ac | Th | Pa | U  | Np | Pu | Am | Cm | Bk  | Cf  | Es  | Fm  | Md  | No  | Lr  |

Tabulka 2.2 Přehled chemických a fyzikálních konstant čistého hliníku [4]

| Vlastnost  | Hodnota       |
|--|---------------|
| Atomové číslo  | 13            |
| Relativní atomová hmotnost                                 | 26.98         |
| Stabilní izotopy   | 27            |
| Skupenství   | pevné         |
| Teplota tání [°C ; K]                                      | 660 ; 933     |
| Teplota varu [°C ; K]                                      | 2 519 ; 2 792 |
| Elektronegativita (Pauling)                                | 1,61          |
| Hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]                  | 2700          |
| Hustota při teplotě tání [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ] | 2375          |



Čistý hliník krystalizuje v krychlové, prostorově středěné mřížce s těsným uspořádáním atomů a to při teplotě 660 °C. Krystalická struktura čistého hliníku resp. každá jeho elementární buňka je tvořena 14 atomy, z nichž 8 je umístěno v rozích krychle a 6 ve středech ploch. Každý atom je obklopen 12 nejbližšími sousedními atomy. Při teplotách pod 660 °C, kdy je čistý hliník ve stavu pevném a jednotlivé atomy jsou vázány na určitou polohu, je vazba mezi nimi nazývána vazbou kovovou, jejíž podstatou je snadné uvolňování elektronů, kdy rovnováha mezi kladně nabitými zbytky atomů je udržována množinou odtržených elektronů. Tento jev způsobuje dobrou elektrickou a tepelnou vodivost kovu.

Krystalizace hliníku neprobíhá okamžitě, ale vyžaduje určitou dobu. Na křivce chladnutí nebo ohřevu vzniká vlivem uvolňování nebo spotřeby tepla prodleva, jejíž délka je závislá na množství tuhneoucího kovu. Další prodlevy při stálé teplotě se již u čistého hliníku nevyskytují a nemění se ani stavba krystalické mřížky v pevném stavu. U hliníku se tím nevyskytují alotropické změny, jak je tomu u jiných kovů (Fe, Ti, Mn atd.).

Teoreticky lze tedy vypočítat kritické smykové napětí potřebné k vytvoření trvalé deformace dokonalých krystalů, ale ve skutečnosti jsou experimentálně naměřené hodnoty řádově nižší. Příčinou jsou poruchy v krystalové mřížce u technických kovů, které jsou způsobeny tím, že při krystalizaci zůstávají v krystalické mřížce některá místa neobsazená a umožňují pohyb atomů mřížkou, vyvolávají pnutí v mřížce a vedou k její deformaci. Deformace mřížky je způsobena také nečistotami, které jsou obsaženy v základním kovu.

**Fyzikální vlastnosti hliníku** a jeho slitin jsou důležité do jisté míry pro zpracování a také pro predikci užitých vlastností výrobků z jeho slitin. V tabulce 2.3 jsou uvedeny hodnoty vybraných fyzikálních vlastností čistého hliníku.

Tabulka 2.3 Hodnoty vybraných fyzikálních vlastností uvedených v tabulkách platí pro hliník čistoty 99,99% teplotu 20°C [1]

| Parametr                                  | Hodnota                  |
|---|--------------------------|
| Pořadové číslo                            | 13                       |
| Atomová hmotnost                          | 26,98                    |
| Atomový objem [10cm <sup>3</sup> /g-atom] | 10                       |
| Struktura elementární mřížky              | kubická, plošně středěná |

|  |                        |
|--|------------------------|
| <b>Koordinační číslo</b>                                     | 12                     |
| <b>Konstanta mřížky [m]</b>                                  | $4,0496 \cdot 10^{-6}$ |
| <b>Nejmenší vzdálenost atomů [m]</b>                         | $2,8635 \cdot 10^{-6}$ |
| <b>Hustota při 20°C [kg.m<sup>-3</sup>]</b>                  | 2698,9                 |
| <b>Hustota při 660°C v tuhém stavu [kg.m<sup>-3</sup>]</b>   | 2550                   |
| <b>Hustota při 660°C v tekutém stavu [kg.m<sup>-3</sup>]</b> | 2370                   |
| <b>Hustota při 900°C [kg.m<sup>-3</sup>]</b>                 | 2300                   |
| <b>Zmenšení objemu při tuhnutí [%]</b>                       | 7                      |
| <b>Lineární smrštění mezi 660 a 20°C [%]</b>                 | 1,8                    |
| <b>Měrný elektrický odpor [m]</b>                            | $2,654 \cdot 10^{-4}$  |
| <b>Teplotní součinitel elektrického odporu [m/°C]</b>        | $1015 \cdot 10^{-6}$   |
| <b>Počáteční teplota supravodivosti [K]</b>                  | 1,14                   |
| <b>Tepelná vodivost [W/m*K]</b>                              | 237                    |
| <b>Povrchové napětí mezi 700 a 820°C [dyn/cm]</b>            | $5 \cdot 10^{-2}$      |
| <b>Teplo hoření (1g Al) [J/g]</b>                            | $30,98 \cdot 10^3$     |

V tabulce 2.4 jsou uvedeny fyzikální vlastnosti vybraných slitin hliníku.

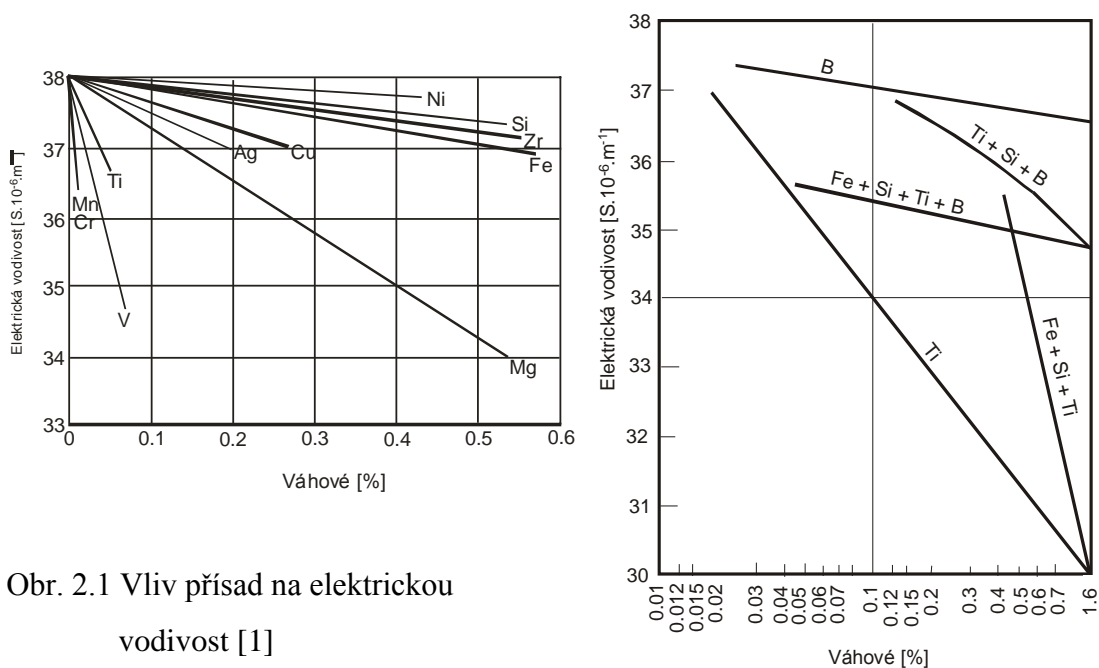
Tabulka 2.4 Fyzikální vlastnosti vybraných slitin hliníku [1]

| <b>Typ materiálu</b> | <b>Hustota [kg.m<sup>-3</sup>]</b> | <b>Rozsah teplot tuhnutí [°C]</b> | <b>Elektrická vodivost [S.10<sup>-6</sup>]</b> | <b>Tepelná vodivost [W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>]</b> |
|----------------------|------------------------------------|-----------------------------------|--|---|
| <b>AlMn</b>          | 2,730                              | 645 - 655                         | 24 – 25  | 154,9 – 188,4   |
| <b>AlMg1</b>         | 2,690                              | 630 - 650                         | 24 - 28  | 167,5 – 188,4   |
| <b>AlMg2</b>         | 2,680                              | 620 - 650                         | 23 - 26  | 125,6 – 167,5   |
| <b>AlMg3</b>         | 2,66                               | 610 - 640                         | 20 - 23  | 125,6 – 167,5   |
| <b>AlMg4</b>         | 2,65                               | 600 - 635                         | 18 - 21  | 104,7- 146,5  |
| <b>AlMg5</b>         | 2,64                               | 575 - 630                         | 15 - 18  | 104,7 – 146,5   |
| <b>AlMgSi</b>        | 2,69                               | 590 - 640                         | 30 a více                                      | 167,5 – 209,3   |
| <b>AlMgSi1</b>       | 2,7                                | 585 - 650                         | 24 - 32  | 163,3 – 167,5   |
| <b>AlZnMgTi</b>      | 2,75                               | 625 - 650                         | 19 - 21  | 104,7 – 146,5   |
| <b>AlCuMg0,5</b>     | 2,74                               | 510 - 650                         | 18 - 28  | 154,9   |

|                 |      |           |         |               |
|-----------------|------|-----------|---------|---------------|
| <b>AlCuMg1</b>  | 2,8  | 512 - 650 | 18 - 28 | 125,6 – 167,5 |
| <b>AlCuMg2</b>  | 2,77 | 505 - 640 | 18 - 28 | 125,6 – 167,5 |
| <b>AlSi12</b>   | 2,65 | 575 - 585 | 18 - 22 | 159,1         |
| <b>AlSi12Cu</b> | 2,65 | 570 - 585 | 16 - 20 | 154,9         |
| <b>AlSi10Mg</b> | 2,65 | 575 - 620 | 17 - 20 | 154,9         |
| <b>AlSi5Cu1</b> | 2,75 | 550 - 620 | 17 - 20 | 154,9         |
| <b>AlMg3</b>    | 2,7  | 580 - 650 | 18 - 21 | 125,6 – 146,5 |
| <b>AlMg5</b>    | 2,6  | 560 - 630 | 15 - 18 | 104,7 – 125,6 |
| <b>AlMg10</b>   | 2,6  | 510 - 610 | 10 - 12 | 83,7 – 92,1   |

*Elektrická vodivost* - u atomů prvků s kovovou vazbou se elektrony v pevném stavu uvolňují a rovnováha mezi kladně nabitými zbytky atomů je udržována množinou elektronů tzv. elektronovým plynem. Tato pohyblivost elektronů je příčinou dobré elektrické vodivosti. Nepůsobí-li na kov elektrický proud, je pohyb elektronového plynu ve všech směrech stejný. Působení elektrického pole se pohyb elektronů zrychlí směrem ke kladnému pólu.

Dobrou elektrickou vodivost hliníku nepříznivě ovlivňuje přítomnost cizích atomů legujících prvků v mřížce, které tvoří se základním kovem tuhý roztok a k její zlepšení je třeba slitiny hliníku žíhat. Vliv přísad na elektrickou vodivost čistého hliníku je znázorněn v grafech na obr. 2.1.



Obr. 2.1 Vliv přísad na elektrickou vodivost [1]

Elektrická vodivost hliníku se zhoršuje tvářením za studena (její zhoršení je úměrné velikosti deformace), dále podstatně klesá s rostoucí teplotou. Snížením teploty na 1,14 [K] se hliník dostává do stavu supravodivosti.

*Tepelná vodivost* - úzce souvisí s vodivostí elektrickou a její poměr u materiálů je téměř konstantní. Tepelnou vodivost hliníku ovlivňují stejné atributy jako u vodivosti elektrické. V tabulkách 2.5 a 2.6 jsou uvedeny hodnoty tepelné vodivosti různých slitin hliníku při teplotě 300 [K].

Tabulka 2.5 Tepelná vodivost tvářených slitin hliníku při 300 [K] [1]

| Typ materiálu        | Stav                     | Tepelná vodivost [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ] |
|----------------------|--------------------------|---|
| <b>AlMgSi0,5</b>     | měkký                    | 217,7136  |
|                      | vytvrzený za studena     | 188,406   |
|                      | vytvrzený za tepla       | 196,7796  |
| <b>AlMgSi1</b>       | měkký                    | 205,1532  |
|                      | vytvrzený za studena     | 163,2852  |
|                      | vytvrzený za tepla       | 171,6588  |
| <b>AlCu4,5Si1</b>    | měkký                    | 192,5928  |
|                      | vytvrzený za studena     | 121,4172  |
|                      | vytvrzený za tepla       | 154,9116  |
| <b>AlCu4,5Mg1,5</b>  | měkký                    | 188,406   |
|                      | vytvrzený za studena     | 121,4172  |
| <b>AlCu4Ni2Mg1,5</b> | vytvrzený za tepla       | 154,9116  |
| <b>AlZn5,5Mg2,5</b>  | vytvrzený za tepla       | 121,4172  |
| <b>AlSi12Mg1Cu1</b>  | měkký                    | 154,9116  |
|                      | vytvrzený za tepla       | 138,1644  |
| <b>AlMn1,2</b>       | měkký                    | 192,5928  |
|                      | po homogenizačním žíhání | 159,0984  |

Tabulka 2.6 Tepelná vodivost slévárenských slitin hliníku při 300 [K] [1]

| Typ materiálu | Stav                     | Tepelná vodivost [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ] |
|---------------|--------------------------|---|
| AlSi5         | po odlití                | 142,3512  |
|               | po odstranění pnutí      | 163,2852  |
| AlSi5,5Cu4,5  | po odlití                | 142,3512  |
| AlSi12Ni2,5Mg | po odlití vytvrzený      | 117,2304  |
| AlCu4Si3      | po odlití                | 121,4172  |
|               | po odstranění pnutí      | 146,538   |
| AlMg4         | po odlití                | 138,1644  |
| AlMg10        | po homogenizačním žíhání | 87,9228   |

*Tepelná roztažnost* – je závislá na teplotě, s rostoucí teplotou roste rozkmit atomů kolem rovnovážných poloh a mění se struktura kovu a zvětšuje se jeho objem. U hliníku, který krystalizuje v krychlové soustavě je ve třech, na sobě kolmých směrech, stejná. Tepelná roztažnost je charakterizována lineárním součinitelem tepelné roztažnosti závislým na teplotě (jak je uvedeno v tabulce 2.7), rozměrech atomů a také na změnách struktury, vnitřním pnutí v materiálu po lití, tváření za studena a tepelném zpracování kovu.

Tabulka 2.7 Střední hodnoty lineárního součinitele tepelné roztažnosti [1]

| Hliník    | 20 - 100 | 20 - 200 | 20 - 300 | 20 - 400 | 20 - 500 | [°C]                       |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------------------------|
| Al 99,996 | 23,86    | 24,58    | 25,45    | 26,46    | 27,68    | $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ |
| Al 99,5   | 24       | 24,9     | 25,8     | 26,8     | 27,9     | $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ |

*Vnitřní tlumení* - vystavíme-li materiál střídavému mechanickému namáhání, nastane po jeho odstranění utlumení kmitů, jehož příčinou je vnitřní útlum. Při tlumení se uplatňují pružné i plastické deformace.

Při pružných deformacích jsou atomy vlivem zatížení vychylovány z rovnovážných poloh, pohyb atomů zmenšuje energii kmitavého pohybu a vede k jeho utlumení. Tlumení je závislé na frekvenci, nikoliv na amplitudě kmitů.

Ke vzniku plastických deformací dochází při překročení meze úměrnosti materiálu dynamickým namáháním. Toto má za následek utlumení energie kmitavého pohybu.

Na velikost vnitřního tlumení hliníku má vliv jeho čistota, chemické složení, velikost deformace za studena, teplota a modul pružnosti. Největší útlum vykazuje čistý hliník a s jeho zušlechťováním útlum klesá.

*Modul pružnosti* - střední hodnota modulu pružnosti hliníku a jeho slitin je  $E = 6\,700$  MPa. Tato hodnota je ovlivňována čistotou hliníku, druhem a množstvím legujících prvků, velikostí deformace za studena, teplotou a napětím. Zatím co zvyšující se napětí modul pružnosti snižuje, ostatní vlivy způsobují jeho zvyšování.

*Chování v elektrickém a magnetickém poli* - magnetické vlastnosti hliníku jsou na intenzitě vnějšího pole nezávislé a ani vliv železa ve slitině do obsahu 2,4% je příliš neovlivňuje. Významný vliv na magnetické vlastnosti nemá ani teplota a velikost deformace za studena.

***Mechanické vlastnosti hliníku a jeho slitin*** charakterizují odolnost materiálů proti mechanickému zatěžování. Pro její stanovení se uvádějí tyto vlastnosti: mez pevnosti v tahu, mez průtažnosti, tažnost, kontrakce, tvrdost, vrubová houževnatost. V tabulce 2.8 jsou uvedeny informativní hodnoty mechanických vlastností čistého hliníku a hliníkových slitin. Nejčastější udávanou hodnotou, charakterizující materiál, je mez pevnosti v tahu. Přesnější charakteristikou je však mez průtažnosti, která udává skutečné napětí, kterým lze materiál zatížit, než dojde k jeho trvalé deformaci.

Tabulka 2.8 Informativní hodnoty mechanických vlastností čistého hliníku a hliníkových slitin [1]

| Typ materiálu | Stav | R <sub>p02</sub> [MPa] | R <sub>m</sub> [MPa] | A <sub>02</sub> [%] | HBS |
|---------------|------|------------------------|----------------------|---------------------|-----|
| Al 99,99      | m    | 39 - 50                | 40 - 50              | 35 - 45             | 15  |
|               | t    | 70 - 100               | 90 - 120             | 4 - 6               | 25  |
| Al 99,9       | m    | 15 - 25                | 45 - 55              | 35 - 45             | 16  |
|               | t    | 80 - 120               | 100 - 140            | 4 - 6               | 28  |
| Al 99,7       | m    | 20 - 30                | 60 - 70              | 30 - 45             | 18  |
|               | t    | 110 - 150              | 130 - 170            | 2 - 5               | 35  |
| Al 99,5       | m    | 20 - 30                | 70 - 90              | 25 - 45             | 20  |
|               | pt   | 80 - 120               | 120 - 150            | 4 - 6               | 30  |
|               | t    | 120 - 160              | 140 - 180            | 2 - 4               | 40  |
| Al 99,0       | m    | 30 - 40                | 80 - 100             | 40 - 50             | 22  |
|               | pt   | 110 - 130              | 130 - 150            | 3 - 6               | 32  |
|               | t    | 140 - 160              | 160 - 200            | 2 - 3               | 40  |
| AlMn 1        | m    | 50 - 60                | 90 - 120             | 22 - 24             | 25  |
|               | pt   | 90 - 110               | 120 - 160            | 6 - 8               | 40  |
|               | t    | 140 - 160              | 180 - 200            | 2 - 5               | 50  |
| AlMg 1        | m    | 50 - 60                | 100 - 130            | 20 - 22             | 35  |
|               | pt   | 100 - 120              | 140 - 180            | 5 - 8               | 45  |
|               | t    | 140 - 160              | 180 - 210            | 2 - 4               | 60  |
| AlMg 2        | m    | 80 - 120               | 150 - 180            | 18 - 22             | 55  |
|               | pt   | 160 - 190              | 200 - 220            | 6 - 8               | 75  |
| AlMg 3        | m    | 80 - 100               | 180 - 220            | 15 - 20             | 55  |
|               | pt   | 170 - 200              | 240 - 260            | 8 - 10              | 75  |
| AlMg 4        | m    | 100 - 120              | 200 - 240            | 18 - 20             | 55  |
|               | pt   | 180 - 220              | 260 - 300            | 8 - 10              | 85  |
| AlMg 5        | m    | 130 - 160              | 240 - 280            | 18 - 22             | 55  |
|               | pt   | 200 - 240              | 280 - 320            | 8 - 10              | 90  |
| AlMgSi 1      | l    | 80 - 100               | 150 - 180            | 16 - 20             | 50  |
|               | k    | 100 - 130              | 200 - 240            | 16 - 20             | 70  |
|               | z    | 220 - 260              | 280 - 320            | 10 - 12             | 90  |
| AlCuMg 1      | m    | 150 - 170              | 230 - 250            | 16 - 18             | 70  |
|               | z    | 280 - 300              | 430 - 470            | 10 - 14             | 110 |

Poznámka: Stav: m - měkké l - lisované  
pt - polotvrdé k - vytvržené za studena  
t - tvrdé z - vytvržené za tepla

*Únava materiálu při mechanickém namáhání hliníku a jeho slitin* - při namáhání materiálu střídavým napětím dojde k lomu materiálu i tehdy, je-li napětí menší než mez kluzu. Lom je bez větších deformací a má vzhled křehkého lomu a nazývá se únavový lom.

O únavovém lomu hovoříme, dojde-li při střídavém namáhání u některých vůči zatěžovací síle příznivě orientovaným krystalům k posuvům krystalových rovin, přičemž se materiál zpevňuje a zmenšuje se jeho tvárnost. Při pokračování namáhání vzniknou submikroskopické trhliny, působící jako vrub, kolem nich se hromadí napětí a submikroskopické trhliny se rozšiřují na makrotrhliny. Dosáhne-li makrotrhlina dostatečného rozměru dojde k úplnému lomu namáhaného materiálu. Únavový lom se skládá ze dvou odlišných ploch – plochy s nestejným lomem, kde může dojít i k deformaci materiálu a z plochy hladké, které zvláště při kombinovaném střídavém namáhání po sobě kloužou a vyhlazují se. Počet cyklů do únavového lomu je závislý na způsobu a druhu namáhání, vlastnostech materiálu, jakosti povrchu, homogenitě a tvaru namáhané součásti. Počet cyklů do okamžiku lomu je nepřímo úměrný napětí při střídavém zatěžování a v praxi je charakterizován tzv. Wöhlerovou křivkou, která udává vztah mezi uvedenými veličinami. Při rostoucím počtu cyklů klesá zatížení a při určitém zatížení začne křivka probíhat vodorovně. Tento bod udává napětí, při kterém materiál snese nekonečný počet cyklů a nazývá se mez únavy materiálu. Charakteristickou hodnotou pro konkrétní součást je hodnota tvarové pevnosti, která je stanovena zkouškou pro uvedenou součást. Mez únavy je nepříznivě ovlivňována i uměle vytvořenými vruby (zápichy, vyvrtané otvory, sváry, nýtované spoje, vnitřní vady materiálu a povrchová jakost).

*Tečení hliníku a jeho slitin* - tečením materiálu (hliníku) se nazývá deformace materiálu při dlouhodobém zatížení a mez tečení je definována jako napětí, za jehož trvalého působení při dané teplotě se materiál deformuje v závislosti na čase a je definována rychlostí deformace (tečení) nebo velikostí deformace. Jako příklad tečení hliníku lze uvést zmenšování průměru drátu zatíženého dotažením šroubu ve svorkovnicích elektrických rozvodů, kde časem dojde k uvolnění těchto spojů.



**Technologické vlastnosti** charakterizují hliník a jeho slitiny z pohledu jeho zpracování různými technologiemi.

V oblasti slévárenství je u hliníku a jeho slitin rozhodující jeho slévateľnost, která je ovlivněna vlastnostmi, jako je měrné teplo, skupenské teplo tání, tepelná vodivost, tepelná roztažnost, teplota tavení, viskozita, způsob tuhnutí, druh formy a její tepelná vodivost. Dobrou slévateľnost vykazují kovové slitiny, které tuhnou při určité teplotě. Tuto podmínku nejlépe splňují eutektické slitiny, které jsou málo viskózní, tím dobře zabíhají do formy, dokonale ji vyplňují a vlivem tuhnutí při jedné teplotě vykazují malé smrštění. Příkladem jsou slitiny AlSi s obsahem 10 až 13 % Si. S klesajícím obsahem Si se slévateľnost zhoršuje. Hliník vysoké čistoty (Al 99,9) je slévateľný dobře, ale vzhledem k vysokému povrchovému napětí má špatnou zabíhavost ve formě.

*Tváření hliníku* - lze provádět za tepla nebo za studena lisováním, válcováním a tažením. Tvárnost hliníku je charakterizována spotřebou energie a jakostí výrobku – trhliny v kovu závislé na pevnosti a u tváření za studena zpevnění.

Za tepla je nejlépe tvárný hliník vysoké čistoty a nízkolegované slitiny. Tvárnost za studena vykazuje nejlepší hliník vysoké čistoty a slitiny AlMn a AlMgSi. Naopak těžko tvárné jsou slitiny Al s obsahem Mg nad 4%. Vliv na chování kovu při tváření za studena má i velikost zrna – zejména při hlubokém tažení.

*Obrobiteľnost hliníkových materiálů* - je velmi dobrá při vysokých řezných rychlostech dosahujících 100 až 200 m/min. Aby se při obrábění netvořila souvislá tříška, legují se slitiny olovem, vizmutem nebo kadmíem. Takovéto slitiny se nazývají automatové.

*Korozivzdornost hliníku a jeho slitin* - je velmi dobrá. Vysokou odolnost proti atmosférické korozi způsobuje rychlé potažení hliníku tenkou ovšem velmi přilnavou vrstvou Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Tato vrstva však není odolná proti působení kyselin a zásad. Koroze je definována jako rozpad kovu nebo slitiny vlivem chemického nebo elektrochemického působení okolního prostředí.

Podle působení se druhy koroze dělí na korozi *rovnoměrnou* - kov je rozrušován rovnoměrně na celém povrchu – materiál se zeslabuje rovnoměrně a na

vzduchu se po určité době zastavuje v důsledku vzniku nepropustné vrstvy oxidu, *místní* - vyskytuje se v podobě *skvrn* - nepravidelně rozmístěné po povrchu, *důlků* - vznik malých, ale hlubokých důlků vyplněných zplodinami koroze, *bodů* - podoba teček rozptýlených po povrchu, *korozí podpovrchová* - korodovaná místa se nacházejí těsně pod povrchem a jsou s ním spojena pouze úzkým kanálem, kterým do dutiny proniká korozní prostředí, *korozí mezikrystalická* - proniká do hloubky podél hranic krystalů, *korozí vrstvá* - působení korozivního prostředí podél směru tváření, *korozí pod napětím* - druh mezi krystalické koroze kovu pod napětím.

## 2.2 Výroba a zpracování hliníku

Výskyt hliníku v přístupné části zemské kůry představuje co do množství 8 váhových procent a zaujímá tak 3 místo, hned za kyslíkem a křemíkem. Vyskytuje se pouze ve sloučeninách, z nich nejvýznamnější jsou tzv. bauxitické suroviny, které jsou na bázi hydroxidu hlinitého a obsah hliníku vyjádřený kyslíčnickem hlinitým je 40 – 45%. Běžnými příměsy jsou oxidy křemíku, železa, titanu a vápníku.

Při výrobě se nejdříve z bauxitu získává oxid hlinitý převážně alkalickými metodami (Bayerova, spékací, kombinovaná). Použití metody je závislé na obsahu křemíkových složek.

Metoda Bayerova používá rozpouštění oxidu hlinitého obsaženého v bauxitu vodným roztokem hydroxidu sodného. Oxid hlinitý se rozpouští ve formě rozpustného hlinitanu sodného, přičemž ostatní složky bauxitu jsou v louhu nerozpustné. Následuje oddělení hydroxidu hlinitého od matečného louhu, zahušťování, filtrace a kalcinace hydroxidu hliníku na kyslíčnick hlinitý.

Podstatou metody spékání je zahřívání drceného bauxitu se sodou a vápnem na vysokou teplotu v rotačních pecích. Oxid hlinitý přechází na hlinitan sodný. Spečenec se vylouhuje vodou a získaný hlinitanový roztok se po vyčištění rozkládá pomocí oxidu uhličitého na hydroxid hlinitý. Dále se postupuje jako u metody Bayerovy.

*Výroba vlastního hliníku* se provádí elektrolýzou v elektrolyzních vanách, kdy se z taveniny předem přečištěného bauxitu a kryolitu (bílá krystalická látka - jedna z těžených surovin pro výrobu hliníku – snižuje teplotu tání bauxitu) o teplotě cca 950°C na katodě vylučuje elementární hliník, na grafitové anodě vzniká kyslík,

který ihned reaguje s materiálem elektrody za vzniku oxidu uhelnatého. Takto vyrobený hliník dosahuje čistoty 99,0 až 99,9% Al.

Všechny druhy hliníku obsahují menší nebo větší množství nečistot, které se do něho dostávají při prvovýrobě z elektrod, pomocných materiálů a především ze základní suroviny, oxidu hlinitého. Jedná se o Fe, Si, Cu, Mg, Mn, V, Ti, Zn. Vysoce čistý hliník o obsahu 99,999% Al se vyrábí metodou třívrstvé elektrolýzy a hliník o čistotě 99,999 – 99,999 99% Al způsobem pásmové rafinace.

*Zpracování surového hliníku* spočívá ve výrobě polotovarů pro další zpracování ve formě ingotů. Tavení hliníku se provádí v pecích, do kterých se zavážejí vsázkové suroviny.

*Hlavní složky vsázky* jsou surové čisté kovy, přísadové slitiny, odpady a legovací soli - v podobě surových čistých kovů se do vsázky přidávají kromě hliníku hlavně zinek a hořčík a to ve formě housek.

- *přísadové slitiny*, přidávané do vsázky společně se surovinami v podobě čistého kovu musí mít nízkou teplotu tavení, musí se snadno rozpouštět v tavenině, musí být stejnorodé a v rámci možnosti křehké (snadné drcení na malé kusy). Způsob přidávání přísadových slitin se určuje dle jejich rovnovážných diagramů a na jejich základě je určeno, zda do roztaveného hliníku přidávat přísadovou slitinu v tuhém stavu nebo naopak do roztavené přísadové slitiny přidávat hliník ve stavu tuhém popřípadě tavit hliník a přísadové slitiny odděleně a obě složky následně mísit v tekutém stavu. Přísadové slitiny se vyrábějí kromě metody tavení, také aluminotermicky (pro přísadové slitiny s Ti, Cr, Mo, V apod.) nebo elektrolýzou v roztaveném kryolitu, která dává slitinu vysoké čistoty.

- *odpadové suroviny* jsou získávány přímo z hutí (odřezky ingotů, vyřazené ingoty, třísky po obrábění ingotů, strusky, okuje, stěrky), dále odpad ze strojírenského zpracování polotovarů (třísky, odřezky, výseky, zmetky apod.) a suroviny získané sběrem (vyřazené hliníkové výrobky, vymontované součásti atd.).

- *legovací soli* se k legování používají v případě, že do slitiny je potřeba dodat malé množství legujícího prvku, popř. tam, kde přísada solí má další účinek – zejména odplynění slitiny. Legovací soli se používají zejména k legování bóru, sodíku, zirkonia, titanu apod.

*Tavící pece používané pro zpracování hliníku* se rozdělují do dvou základních skupin:

- *pece plamenné* - vytápěné tuhým palivem (uhlí, koks), tekutým palivem (olej, nafta) nebo plynem. Vanové plamenné pece jsou stavěny stabilní nebo sklopné a jejich kapacita je 30 – 100t vsázky. S tavící pecí úzce souvisí pec ustalovací a zařízení pro odlévání ingotů a housek. Kov z tavící pece se pomocí uzavřeného žlabu nebo sifonu postupně přelévá do pece ustalovací a obdobným způsobem se přivádí k odlévacímu stroji nebo k zařízení pro plynulé lití. Kromě uvedených nástějových pecí jsou používány pece rotační, ve kterých dochází k rychlejšímu tavení vsázky a tavenina se dobře promíchává. Jejich kapacita je 0,5 – 20t vsázky.

- *elektrické pece odporové vanové* – používají se stacionární nebo sklopné. Topné prvky jsou umístěny ve zvlášť tvarovaných elementech vyzdívky a jejich kapacita je v rozmezí 1 - 20t vsázky. Vanové elektrické pece se používají zejména jako pece ustalovací a licí zejména proto, že je u nich možno dosáhnout velmi přesné regulace a tím spolehlivého udržování požadované teploty taveniny. Provozně levnější jsou pece plamenné popř. indukční.

- *elektrické pece indukční* – pracují na principu indukčního ohřevu pomocí transformátoru. Jádro a primární cívky transformátoru jsou umístěny v žáruvzdorné vyzdívce pece.

- *kanálové indukční pece* mají jádro transformátoru s primárními cívkami umístěno ve dnu pece v žáruvzdorné vyzdívce, ve které jsou svislé tavící a vodorovné propojovací kanály. Nevýhodou je, že tyto pece vyžadují při každém uvedení do provozu zahřátí kanálů a pracovního prostoru na provozní teplotu a naplnění tekutým kovem v dostatečném množství, aby se mohl indukovat sekundární proud. Při odstavení pece je nutno tekutý kov vypustit. Tavící kanály se rychle zanášejí oxidy, karbidy a jinými nečistotami a je třeba je často čistit. Kanálové indukční pece jsou konstrukčně provedeny jako jednokomorové - s přímými svislými a vodorovnými kanály v provedení sklopném nebo stacionárním s připojením na jednofázový nebo třífázový proud, dvoukomorové - s přímými vodorovnými kanály nebo se sklonem 0° až 45°, v provedení sklopném nebo stacionárním, bubnové - sklopné pece s výměnnými jednofázovými induktory, se šikmými nebo vodorovnými kanály.

- *bezkanálové (kelímkové) pece* - oproti kanálovým pecím mohou být uvedeny do provozu se ztuhlou vsázkou a vsázku je možno nechat v peci opětovně ztuhnout.

*Tavení vsázky* probíhá následujícím způsobem:

*Příprava pece* - před vsázením surovin je nezbytné pec očistit od zbytků kysličníků, solí apod. z předcházející tavby.

*Sázení surovin* - pořadí sázení surovin je podmíněno tvarem vsázkových materiálů, váha jednotlivých složek vsázky a teplota tavení jednotlivých složek. Obvyklý postup sázení je: housky hliníku, popř. kusový materiál stejného složení jako požadovaná slitina (odpad). Po roztavení cca 1/3 vsázky se do lázně přidávají přísady a lázně se promíchá. Naposledy se přidávají legovací kovy, které se do vsázky dodávají ve formě čistého kovu (např. Zn, Mg).

*Proces tavení* – reakcí vsázky mezi atmosférou pece a vyzdívkou dochází ke ztrátám kovu - propalu. Se vzrůstající teplotou probíhá oxidace hliníku zpočátku rychle, ale se zvětšující se vrstvou oxidu hlinitého se zpomaluje. Oxid hlinitý vytváří na povrchu roztaveného kovu nepropustnou vrstvu pro unikající plyny a tím dochází k naplynění taveniny. Zdrojem plynů v tavenině může být i použití zaolejovaného a vlhkého odpadu, použití surového hliníku s vysokým obsahem vodíku. Dalším zdrojem plynů je palivo, kouřové zplodiny nebo vlhká vyzdívka. Nejškodlivější pro hliník jsou vodík, vodní pára a kyslík. Uvedené plyny způsobují při krystalizaci pórovitost odlitků a proto se při tavení hliníku a jeho slitin používá krycích solí – tavidel, které odstraňují plyny a oxidy z taveniny.

*Tavidla* - organické soli, jejichž podstatnou složkou je kryolit rozpouštějící oxid hlinitý, ale jelikož jeho teplota tavení je 1 000°C používá se ve směsi s chloridem sodným a draselným, snižující jeho teplotu tavení na 700 – 600°C. Při tavení vodík rozpuštěný v hliníku proniká do bublinek chloridů z tavidla a spolu s nimi prchá do atmosféry. Množství tavidla závisí na charakteru a jakosti vsázky. Při zpracování čistého kusového materiálu bývá od 2%, při zpracování znečištěného odpadového materiálu výrazně stoupá na 50 – 100%. Používají se tavidla krycí – chrání taveninu před stykem s atmosférou tj. před povrchovou oxidací a zamezují naplynění (např.  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ), tavidla čistící a odplyňovací – užívají se k odstranění pevných vměstků a k odplynění, ke kterému dochází reakcí tavidel s Al za vzniku  $\text{AlCl}_3$ , jenž taveninu čistí (např. NaCl, KCl, NaF,  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ) a tavidla očukující, modifikující a legující - uvolňují malá množství modifikačních nebo legujících prvků (např.  $\text{K}_2\text{TiF}_6$ ,  $\text{KBF}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{ZrF}_6$ , NaCl, KCl, NaF,  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ,  $\text{ZnCl}_2$ ,  $\text{MnCl}_2$ ).

Dalšími způsoby odplynování jsou chlorování – profukování taveniny chlorem nebo provádění chlorace organickými solemi, profukování taveniny

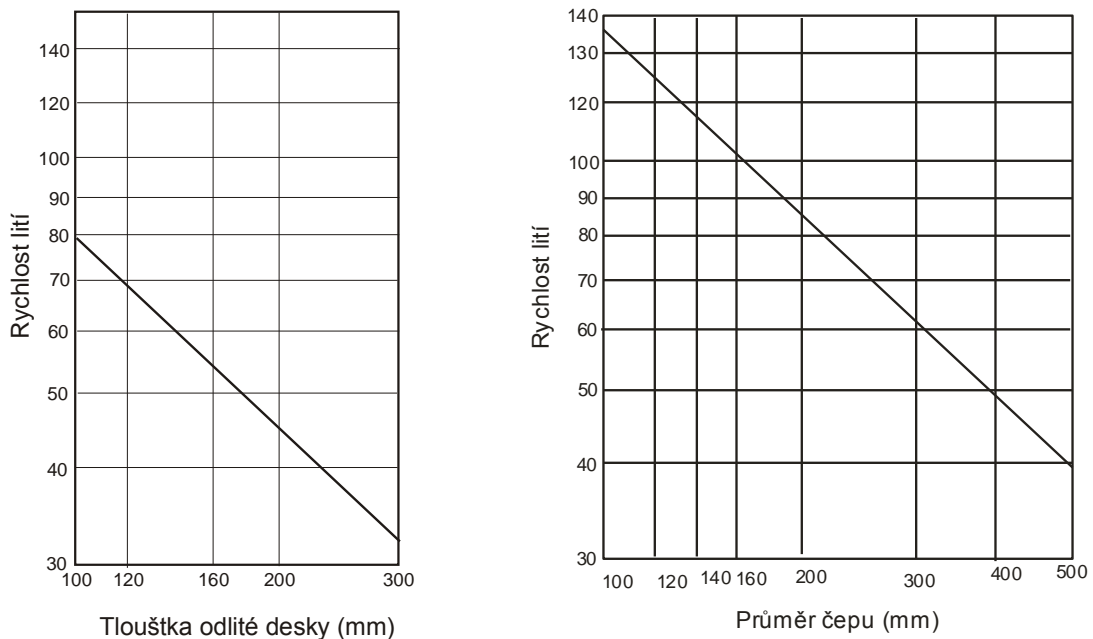
neutrálními plyny – např. dusíkem. Vodík obsažený v hliníku proniká do bublinek dusíku a spolu s ním odchází na povrch taveniny (max. do 800°C – při vyšší teplotě se dusík v hliníku rozpouští).

Dalším způsobem odplynění a zároveň odstranění nekovových vměstků je rafinace odstáním taveniny. S klesající teplotou taveniny klesají parciální tlaky plynů a snižuje se jejich rozpustnost v kovech. Pro odstranění oxidů z tekutého hliníku a jeho slitin je používána mechanická filtrace přes drť z magnezitových cihel nebo přes síta ze skleněných tkanin.

*Metody odlévání ingotů* musí zajistit, aby odlitý ingot byl bez pórů, trhlin, zavalenin, nekovových vměstků a pokud jde o chemické složení a krystalickou stavbu musí být homogenní. Používají se metody:

*Svislé poloplynulé lití ingotů* – metoda spočívá v lití hliníku nebo jeho slitiny do vodou chlazené prstencové kokily (krystalizátor, výška 80 – 120 mm, s regulovatelnou šterbinou, do níž je přivedena tlaková voda), umístěné nad vodní nádrží s pohyblivým pístem ve dně nádrže. Při počátku lití je krystalizátor zdola uzavřen dnem umístěným na pohybujícím se pístu. Kov přivedený žlábkem z pece ztuhne v krystalizátoru vlivem působení tlakové vody, která je do něho přivedena. Zároveň začne klesat píst a s ním i ingot na něm postavený a ponořuje se do vody. Rychlost lití je závislá na chemickém složení odlévané slitiny a na průměru odlévaného ingotu. Rychleji lze odlévat ingoty z čistého hliníku a eutektické slitiny. Závislost rychlosti lití na průměru resp. tloušťce odlévaného ingotu je znázorněna v grafech obr. 2.2.

*Vodorovné lití ingotů* – metoda obdobná lití svislému. U tohoto způsobu je osa krystalizátoru ve vodorovné poloze a kov je do něho dodáván pod tlakem z lící nálevky. Tím se snižuje oxidace ingotu a lépe se odstraňují plyny, které se uvolňují z taveniny.



Obr. 2.2 Závislost rychlosti lití na průměru resp. tloušťce ingotu [1]

*Tuhnutí ingotu* - kovy a jejich slitiny při přechodu z tekutého do tuhého stavu vždy krystalizují – nikdy netuhnou amorfně. Průběh krystalizace zásadně ovlivňuje vlastnosti ztuhlého materiálu a schopnost dalšího zpracování.

Ke krystalizaci dochází při poklesu teploty taveniny pod bod tuhnutí. První se musí v tavenině vytvořit jádro - krystalizační zárodek – a z něho pak roste krystal ve všech směrech. Krystalizační zárodky se nejnáze tvoří v místě styku s krystalizátorem tj. v místě podchlazení. Počet tvořených zárodků nejvíce ovlivňuje rychlost ochlazování taveniny. Pomalým ochlazováním vzniká málo zárodků a tedy i krystalů, které rostou do velkých rozměrů a tvoří tak hrubozrnnou strukturu. Naopak rychlým ochlazováním se docílí struktury jemnozrnné. Vznik zárodků urychluje i přítomnost drobných částic cizích těles v tavenině (oxidy, karbidy apod.) nebo se přímo přidávají očkovací přísady (titan), které zvýší počet heterogenních krystalizačních zárodků v tavenině. Očkování se uplatňuje u slitin, kde ve struktuře převažuje podíl dendritů nebo krystalů primární fáze nad podílem eutektika a výsledkem je zjemnění struktury. Růst krystalů z krystalizačních zárodků je ovlivněn směrem odvodu tepla a přednostní růst v určitých krystalografických směrech je základem vzniku dendritické struktury. Dendrity jsou stromečkové útvary, které se tvoří vznikem hlavních os a dalších, na ně kolmých. U kubické soustavy, ve které hliník a jeho slitiny krystalizují, narůstá krystal rychleji ve směru tří hlavních os a prostor mezi se vyplňuje kovem až dodatečně. Délka sloupových

krystalů roste se zmenšováním intervalů tuhnutí slitiny. Dendritická krystalizace je zdrojem nehomogenního chemického složení a u některých slitin vlivem této nerovnoměrnosti dochází k praskání za vyšších teplot. Při odlévání kovu do kokily je u její stěny velmi vysoké podchlazení, tím vzniká mnoho krystalizačních zárodků a tvoří se tenká vrstva jemných rovnoosých krystalů. Z této vrstvy teprve vyrůstají sloupkovité krystaly. Ztuhlá povrchová vrstva mírní intenzitu chlazení, takže ve střední části ingotu rostou opět většinou rovnoosé krystaly. Při tuhnutí dochází ke změně rozpustnosti plynů v kovu a ke smršťování tj. zmenšování rozměrů odlitku. Smrštění způsobuje vznik mikropórů, staženin a vnitřního pnutí. Mikropórovitost vzniká u materiálů tvořících při tuhnutí dendrity, protože při tuhnutí narůstající větve dendritů uzavírají zbylou taveninu s nízkým bodem tuhnutí a znemožňují tak krytí objemových ztrát okolní taveninou. Nedostatečným dosazováním tekutého materiálu při tuhnutí mohou vzniknout i větší dutiny – staženiny. U ingotů litých plynule a poloplynule staženiny nevznikají, protože v krystalizátoru je dostatek taveniny, která eliminuje dosazováním tekutého kovu objemové změny při tuhnutí hliníku. Při tuhnutí ingotu dochází vlivem rozdílu teplot mezi povrchem a vnitřkem ingotu a rozdílným průběhem smršťování rovněž ke vzniku vnitřního pnutí. Při odlévání odlitků dochází k tzv. odměšování (segregaci) tj. obohacení určitých částí odlitku snadněji tavitelnou složkou slitiny, což způsobuje nestejnorodost slitiny v oblasti jejích fyzikálních a fyzikálně chemických vlastností.

Druhy odměšování:

*gravitační* - vlivem měrných hmotností stoupají snadněji tavitelné složky slitiny vzhůru

*dendritické* - během tuhnutí je snadněji tavitelná složka slitiny zadržena mezi dendrity

*pásmové* - vzniká u slitin, kde má tavenina široké rozmezí teplot tuhnutí

*přímé* - snadněji tavitelné složky slitiny se vyskytují uprostřed odlitku

*opačné* - snadno tavitelné složky slitiny jsou při nebo na povrchu odlitku - projeví se, když vlivem hydrostatického tlaku nebo smrštění pronikne snadno tavitelná složka slitiny, nacházející se uprostřed odlitku, do neúplně ztuhlé větve dendritů nebo pronikne až na povrch odlitku.



*Vady ingotů* – vznikají při chladnutí ingotu a jejich hlavní příčinou jsou nejčastěji:  
*Nevyhovující chemické složení* – příčina – špatně vypočítaná vsázka, nesprávný pochod tavení, použití nevhodných odpadů apod.

*Staženiny, pórovitost a řediny* – odstranitelné při následujícím zpracování za tepla nebo za studena s následným žiháním.

*Studené spoje (svary)* – vznik – ve styku dvou nebo více proudů taveniny – vlivem oxidických filmů na povrchu se vlivem nízké rychlosti odlévání proudy dokonale nespojí.

*Bubliny* – vznik turbulentním prouděním tekutého kovu při velké rychlosti odlévání, kdy odlévaný hliník mechanicky strhává vzduch při současném tvoření pěny. K turbulentnímu proudění nedochází u poloplynulého a plynulého lití.

*Mezikrystalická pórovitost* – vznik při poloplynulém a plynulém lití, zvláště při velkých rychlostech lití za nedostatečného chlazení, kdy má odlévaná slitina velký interval tuhnutí.

*Příčné trhliny* – vznik na povrch ingotů v důsledku opačného odměšování.

*Podélné trhliny* – vznik – vnitřním pnutím. Vnější vrstvy ingotů, plynule nebo poloplynule litých, mají napětí tlaková a vnitřní tahová. Osová napětí jsou vlivem osového odvádění tepla menší, než radiální čímž vznikají podélné trhliny.

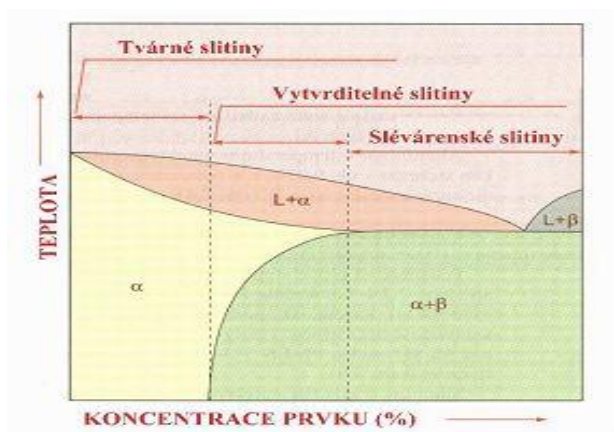
*Rýhy a záděry* – vznik – ulpíváním částic oxidického povlaku na vnitřním povrchu krystalizátoru, jeho mechanickým poškozením nebo vytvořením spečenin maziva.

*Cizí vměstky* – dostávají se do ingotu z pece při nedostatečné filtraci. Jedná se o strusku, oxidy, zbytky tavidla, částice vyzdívky pece, písek apod.

### **2.3 Slitiny hliníku**

Čistý hliník je kov, jehož mřížka je tvořena převážně atomy jednoho druhu. Jeho mechanické vlastnosti jsou však takové, že jej nelze vždy využít pro konstrukční účely a proto jsou do něho přidávány úmyslně legující přísady, a to kovové i nekovové. Přidáním přísady k hliníku může vzniknout tuhý roztok. Slitiny ve tvaru tuhých roztoků jsou pevnější než čisté kovy a při této zvýšené pevnosti zůstává i velmi dobrá tvárnost. Nebo přísady nejsou v základním kovu rozpuštěny vůbec nebo jsou rozpuštěny jen částečně a ve struktuře základního kovu se vylučují jako samostatná fáze, oddělená od základní struktury hraničními plochami. Tuhá směs dvou látek, jejichž krystaly se vytvářely při tuhnutí společně, se nazývá

*eutektikum*. Čisté eutektikum vzniká v takovém míšicím poměru dvou složek, při kterém je teplota tuhnutí směsi nejnižší. Z hlediska eutektika rozdělujeme slitiny hliníku na *podeutektické* – tuhá fáze je tvořena směsí eutektika a krystalů jedné složky a *nadeutektické* – tuhá fáze je tvořena směsí eutektika a krystalů druhé složky. Slitiny hliníku se dělí na slitiny pro tváření a na slitiny pro slévání, viz obr. 2.3.



Obr. 2.3 Schéma rovnovážného binárního diagramu s vyznačením slitin pro tváření, odlévání a tepelné zpracování – vytvrzování PÍŠEK [2]

Slitiny hliníku mohou být binární nebo ternární. Mezi binární slitiny se řadí slitiny typu Al-Si, Al-Cu, Al-Mg, Al-Mn, Al-Mg. Nejpoužívanější binární slévárenské slitiny hliníku jsou uvedeny v tabulce 2.9 a v tabulce 2.10 jsou uvedeny slitiny pro tváření.

Tabulka 2.9 Přehled slévárenských slitin [1]

| Typ slitiny | Si %    | Cu %    | Mg %     | Mn %     | Zn % | Ni % | Poznámka       |
|-------------|---------|---------|----------|----------|------|------|----------------|
| AlSi        | 10-13   |         |          | 0,3-0,5  |      |      | nevytvrditelná |
|             | 7-11    |         |          | 0,2-0,5  |      |      | nevytvrditelná |
|             | 9-10    |         | 0,2-0,4  | 0,3-0,45 |      |      | vytvrditelná   |
|             | 6-8     |         | 0,25-0,4 |          |      |      | vytvrditelná   |
|             | 4,5-5,5 | 1-1,5   | 0,4-0,6  |          |      |      | vytvrditelná   |
|             | 4,5-6   | 2-3     |          |          |      |      | nevytvrditelná |
|             | 5-6,5   | 2-3     |          | 0,2-0,6  |      |      | nevytvrditelná |
|             | 11,5-13 | 0,8-1,3 | 0,85-1,3 | 0,3-0,5  |      | 1-2  | vytvrditelná   |

|             |         |          |          |         |       |           |                |
|-------------|---------|----------|----------|---------|-------|-----------|----------------|
| <b>AlCu</b> |         | 3,75-4,5 | 1,3-1,75 |         |       |           | vytvrditelná   |
|             | 3-6     | 3-7      |          |         | 1-2,5 | 1,75-2,25 | nevytvrditelná |
|             |         | 6-8      |          |         |       |           | nevytvrditelná |
|             | 0,5-1   | 7,5-8,5  |          |         |       | 1-1,6%Fe  | nevytvrditelná |
| <b>AlMg</b> | 0,6-1,5 |          | 4,6-5,6  | 0,1-0,5 |       |           | nevytvrditelná |
|             |         |          | 7,1-10,1 | 0,2-0,6 |       |           | nevytvrditelná |
|             |         |          | 9,6-11,6 |         |       |           | nevytvrditelná |

Tabulka 2.10 Vybrané slitiny určené pro tváření [1]

| Typ slitiny     | Mg<br>%  | Si<br>% | Cu<br>% | Zn<br>% | Mn<br>%   | Ni<br>% | Poznámka       |
|-----------------|----------|---------|---------|---------|-----------|---------|----------------|
| <b>AlMn</b>     |          |         |         |         | 1-1,6     |         | nevytvrditelná |
| <b>AlMg</b>     | 1,4-2,7  |         |         |         |           |         | nevytvrditelná |
|                 | 2,5-4    |         |         |         |           |         | nevytvrditelná |
|                 | 4,5-5,5  |         |         |         |           |         | nevytvrditelná |
| <b>AlMgSi</b>   | 0,7-1,2  | 0,7-1,2 |         |         |           |         | vytvrditelná   |
| <b>AlZnMgCu</b> | 1,8-2,8  |         | 1,4-2   | 5-7     | 0,2-0,6   |         | vytvrditelná   |
|                 |          |         |         |         | 0,1-0,2Cr |         | vytvrditelná   |
| <b>AlCu</b>     | 0,4-0,8  |         | 3,8-4,8 |         | 0,4-0,8   |         | vytvrditelná   |
|                 | 1,2-1,8  |         | 3,8-4,9 |         | 0,3-0,9   |         | vytvrditelná   |
|                 | 0,2-0,5  |         | 2,2-3   |         |           |         | vytvrditelná   |
|                 | 0,4-0,8  | 0,7-1,2 | 1,8-2,6 |         | 0,4-0,8   | Cr      | vytvrditelná   |
|                 | 0,15-0,3 |         | 3,9-4,5 |         | 0,3-0,35  | Ti      | vytvrditelná   |
|                 | 1,4-1,6  |         | 1,9-2,5 | 1-1,5   | Ni        | Ti      | vytvrditelná   |
|                 | 0,4-1,5  |         | 3-5     | 1-2,5   | Pb        |         | vytvrditelná   |

Na bázi binárních systémů se užívají slitiny:

Al-Si eutektikum obsahuje 12,5 hm.% Si

Al-Cu eutektikum obsahuje 32 hm.% Cu

Al-Mg eutektikum obsahuje 34 hm.% Mg

Vzájemnými kombinacemi uvedených slitin získáme základní slitiny na bázi ternárních systémů – Al-Si-Mg, Al-Si-Cu, Al-Cu-Si, Al-Mg-Si.

*U slitin Al-Si* je křemík vždy přítomen ve vyšším množství než odpovídá rozpustnosti křemíku v hliníku v tuhém stavu.

*Podeutektické slitiny* (obsah do 12,5 hm.% Si) – ve slitině převažují dendrity hliníku. Používají se převážně na odlitky středně namáhané a dekorativní. Mají nižší zabíhavost do forem a jsou vhodné pro lití tvarově jednoduchých odlitků do pískových forem. Primární krystalizaci u těchto slitin lze ovlivnit očkovaním, nejčastěji Ti, případně v kombinaci s B a Zr.

*Eutektické slitiny* (obsah 12,5 hm.% Si) – slitiny mají výbornou zabíhavost do forem, používají se pro tvarově komplikované a tenkostěnné odlitky odlévané tlakovým nebo kokilovým litím. Struktura je tvořena eutektikem a pro dosažení maximálních užitných vlastností odlitků je třeba ovlivňovat morfologii křehkých částic Si. Tu lze zlepšit aplikací tzv. modifikačních přísad. Modifikování slitin Al-Si je metalurgická operace, při které dochází k zvýšení houževnatosti, pevnosti v tahu a tažnosti slitiny převodem zrnité eutektické struktury na strukturu lamelární nebo jemně vláknitou. Na rozdíl od očkování se nejedná o změnu počtu zárodků, ale pouze o změnu tvaru a rychlosti růstu eutektického křemíku. Provádí se:

- *kovem* – čistým nebo předslitinou – nejúčinnějším činidlem je sodík (popř. stroncium, antimon, draslík, baryum atd.), který se přidá do taveniny v množství 0,05 – 0,1 hm.% při teplotě 750 – 760°C
- *solemi* – uvolňují potřebný kov – na povrch taveniny se vsype sůl (účinná látka ve směsi je NaF) v množství 1 – 2 hm.% soli při teplotě 780 – 790°C, nechá se cca 10min. reagovat, vmíchá se do taveniny a stáhnou se stěry
- *kombinací kov + sůl* – nejprve se modifikuje solí (0,25 hm.% při 740 – 760°C), následuje stažení stěrů a přísada 0,75 hm.% soli. Po cca 10 min. se přidá kovový sodík v množství 0,03 – 0,06 hm.%, který se společně se solí vmíchá do taveniny a po dalších cca 10 min. se stáhnou stěry.

*Nadeutektické slitiny* (obsah nad 12,5 hm.% Si) – struktura slitiny je tvořena eutektickou maticí a primárními krystaly křemíku. Vyznačují se nízkým koeficientem tepelné roztažnosti a vysokou odolností proti abrazivnímu působení – vhodné pro odlitky pracující za vysokých teplot.

*Slitiny Al-Cu* se užívají v základních typech Al-Cu-Mg (duraly), Al-Cu-Si, Al-Cu-Ni s případnými dalšími přísadovými prvky (Mn, Ti, Zn, Co) s obsahem mědi do 12 hm.% a slévárenské vlastnosti se často vylepšují přísadou křemíku do 6 hm.%, čímž se zvyšuje množství eutektika, ale částečně se zhoršují mechanické vlastnosti.

## 2.4 Slévárenské vlastnosti hliníku a jeho slitin

Vhodnost slitin pro výrobu tvarových odlitků je definována slévárenskými vlastnostmi slitiny:

*Zabíhavost* – tj. schopnost tekutého kovu dobře vyplnit formu, je závislá nejen na vlastnostech použité slitiny, ale i na licích podmínkách, vlastnostech formy, uspořádání vtokové soustavy a vlastní konstrukci odlitku. Zabíhavost lze kladně ovlivnit zvýšením lící teploty a z toho důvodu se u tenkostěnných a tvarově složitějších odlitků používá vyšší lící teplota než u odlitků silnostěnných. Při neúměrném zvyšování teploty však může dojít k tomu, že odlitky jsou pórovité a nekvalitní. Zabíhavost lze příznivě ovlivnit při lití do kovových forem jejich předehřátím u pískových forem použitím forem sušených místo syrových a u obou použití vhodné vtokové soustavy umožňující vyšší metalostatický tlak. Z hliníkových slitin mají nejlepší zabíhavost slitiny s přibližně eutektickým složením (AlSi12, AlSi10Mg, AlSi12CuNiMg). Slitiny s nižším obsahem Si a slitiny s Mg mají zabíhavost menší.

*Stahování* – nejméně příznivé jsou staženiny rozptýlené po celém průřezu odlitku. K jejich eliminaci se užívá systémů vhodných nálitků, které se po odlití odstraní. Nejmenší staženiny vznikají u slitin s eutektickým složením (AlSi12, AlSi10Mg), větší naopak u slitin s nižším obsahem Si (AlSi7, AlSi8Cu4, AlSi5Cu2). Na velikost staženin má rovněž vliv technologie tavení a konstrukce odlitku.

*Smršťování* – tj. rozměrové změny odlitku vznikající jeho tuhnutím. Při lití do pískových forem se pohybuje podle druhu slitiny v rozmezí 1 – 1,5%, při lití do kokil 0,5 – 1% a u tlakového lití 0,4 – 0,7 %.

*Sklon k trhlinám* – trhliny se tvoří pouze v průběhu tuhnutí, kdy vedle sebe existuje současně tuhá i tekutá fáze kovu. Sklon ke vzniku trhlín se zmenšuje s kratším intervalem tuhnutí slitiny a jemnějším zrnem, tzn. čistý hliník a eutektické slitiny mají malý sklon k trhlinám.

*Sklon k prasklinám* - praskliny vznikají při teplotách výrazně nižších než trhliny v důsledku prnutí v odlitku během chladnutí. Lze je eliminovat zpomalením chladnutí odlitku, jeho souměrnou konstrukcí a usnadnění deformace.

Z výše uvedeného vyplývá, že z hlediska slévárenského jsou nejvhodnější slitiny eutektické, s malým intervalem tuhnutí. Z konstrukčního a technologického hlediska je výběr vhodné slitiny ovlivňován dalšími požadavky, jako je svařitelnost, odolnost proti korozi, mechanické vlastnosti, zejména za vyšších teplot atd. Z toho důvodu je mnohdy volena pro určitý odlitek slitina s horšími slévárenskými vlastnostmi, ale splňující jiné požadované vlastnosti.

K odlévání tvarových odlitků ve slévárnách se používá převážně kelímkových, plynem nebo olejem vytápěných pecí nebo pecí indukčních menších obsahů. Při tavení slitin je používáno již výše popsaných postupů s využitím rafinace a očkování. Slitiny hliníku lze odlévat do písku, do kokil nebo pod tlakem, přičemž volba způsobu lití je volena dle velikosti série odlévaných kusů. Lití do písku se využívá pro kusovou a malosériovou výrobu, kokily pro středně sériovou výrobu a tlakové lití pro velkosériovou výrobu. S vyšším stupněm způsobu lití roste i cena potřebných forem a také kvalita odlitků. Např. odlitky zhotovené tlakovým litím vykazují podstatně lepší mechanické vlastnosti, hladký povrch nevyžadující další obrábění a odlitky mohou být tenkostěnné. Hliník a jeho slitiny se odlévají do pískových forem, kokil, odstředivým litím popř. jinými zvláštními způsoby.

*K lití do písku* se používají pískové formy, které se zhotovují podle modelů (dřevěné, kovové, plastové) s příslušnými úkosy a přídavky na smrštění při chladnutí kovu z přirozených písků nebo syntetických směsí. Správné plnění forem tekutým kovem zajišťuje vtoková soustava, která sestává z vtokové jamky, vtokového kanálku, odstruskovače a zářezů. Do vtokové soustavy se vkládají sítky, která zachycují nečistoty – hlavně oxidy. Pro lití do pískových forem se používá plnění odlitku spodem a na horní části odlitku v nejtlustší části se umísťují nálitky, pomocí nichž se dosazuje roztavený kov při stahování odlitku během tuhnutí. Kov nesmí ztuhnout mezi nálitkem a odlitkem dříve než odlitek ztuhne v celém průřezu. K chlazení tepelných uzlů na odlitku, který nelze nalitkovat, se používá chladítek z litiny s lupínkovým grafitem, slitin hliníku nebo mědi a slouží k chlazení určitých částí odlitku. Vhodná lící teplota roztaveného kovu se stanovuje v závislosti na druhu slitiny a zejména na konstrukci odlitku. U tenkostěnných odlitků s tloušťkou stěny do

5 mm je licí teplota v rozmezí 730 – 750 °C, u odlitků s tloušťkou stěny nad 8 mm se pohybuje v rozmezí 660 – 680 °C.

*Formy pro lití do kokil* se vyrábějí nejčastěji ze šedé litiny s nízkým obsahem fosforu a síry. Jejich životnost je cca 10 000 – 30 000 odlitků. Rozměrnější formy jsou vyráběny z oceli – mají delší životnost než litinové, ale vyšší cenu. Nejlevnější jsou formy vyráběné z hliníkových slitin, ale mají malou životnost cca 500 – 1000 odlitků. Jádra se zhotovují nejčastěji z oceli, popř. z šedé litiny a členitá jádra z pískových formovacích směsí. Uspořádání vtokové soustavy je obdobné jako u forem pískových a opět se využívá způsobu lití spodem. Usměrnování tuhnutí odlitku se provádí pomocí ochranných nátěrů v dutině formy, která tvoří odlitek, přehříváním nálitků nebo naopak chlazením vodou v místech, kde je potřeba urychlit tuhnutí kovu. Forma je před litím ohřátá na 200 – 300°C.

*Lití pod tlakem* se provádí na speciálních strojích s hydraulickým pohonem. Stroj zajišťuje 2 základní funkce – zavírání, otevírání formy a vstříknutí taveniny do dutiny formy. Pro odlévání hliníku a jeho slitin se používají stroje se studenou tlakovou komorou a to vertikální nebo horizontální. Vertikální komora je tvořena plnicím válcem, jehož dno tvoří spodní pohyblivý píst. Při dosednutí vstřikovacího pístu na kov se ve spodním pístu otevře vstřikovací tryska a kov je vysokým tlakem vstříknut do formy. Po dokončení vstřiku vyjede vstřikovací píst nahoru, spodní píst oddělí zbytek kovu v plnicím válci od vtoku a svým pohybem jej vysune z plnicího válce. Do horizontální komory se tekutý kov vlévá do válce speciálním otvorem a kov je do dutiny forma vtlačován vstřikovacím pístem. Po ukončení plnění formy se forma otevře. Licí teploty při tomto způsobu lití se používají u slitin AlSi v rozmezí 680 – 720°C, u slitin AlMg 580 – 620°C a vhodná teplota přehřátí formy je 200 – 250°C. Uvedený způsob lití je používán pro odlitky s tloušťkou stěny 2 – 3mm.

Mezi zvláštní způsoby lití patří:

*odstředivé lití* – roztavený kov se vlévá do kokily, která se otáčí kolem své osy a odstředivá síla zajišťuje zabíhání kovu.

*zalévání součástí do odlitku* – zalévané součásti musí být upraveny tak, aby zajišťovaly pevné spojení s odlitkem (drážky, rybiny, u rotačních součástí plošky zamezující jejich pootočení) a musí být před litím přehřáté. Takto upravené součásti se vkládají do formy způsobem, který zajistí, že během odlévání nedojde k jejich posunutí nebo pootočení.

## 2.5 Rozdělení slitin hliníku

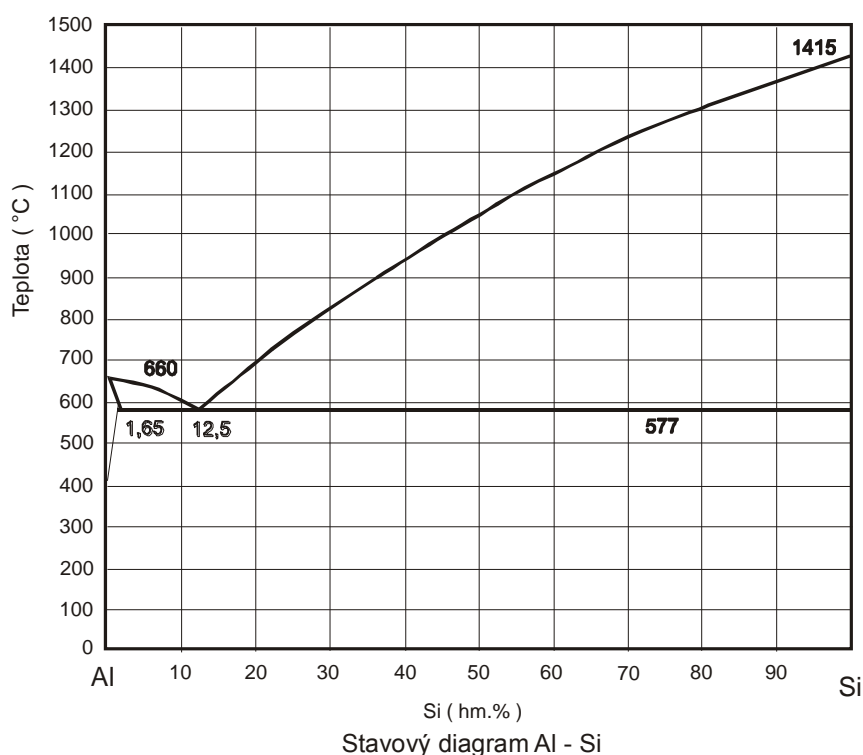
Slévárenské slitiny hliníku se používají s přísadami Si, Cu, Mg, Zn, Ni a Mn, přičemž celkový obsah přísad se pohybuje v rozmezí 4 – 25%.

*Slitiny hliníku s křemíkem (siluminy)* patří k nejdůležitějším slévárenským slitinám.

Podle obsahu Si se dělí na:

- pondeutektické – obsahují 4,5 - 10%Si
- eutektické – obsahují 10 - 13% Si
- nadeutektické – obsah nad 13% Si

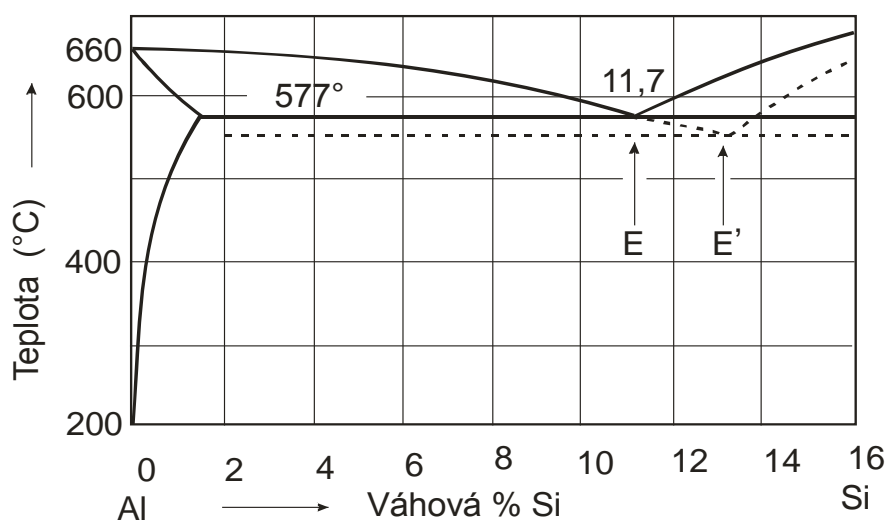
Jednotlivé stavy jsou graficky znázorněny v rovnovážném diagramu obr. 2.4



Obr. 2.4 rovnovážný diagram Al-Si [2]



Slitiny hliníku s křemíkem ležící blízko eutektického bodu dobře vyplňují dutiny forem, mají malou smrštitivost, dobře zabíhají a nejsou náchylné k tvoření trhlin za tepla. Z uvedených důvodů jsou předurčeny k lití do kokil nebo pod tlakem. Pro lití do písku s výrobou tvarově jednodušších odlitků jsou vhodné slitiny podeutektické – mají nižší zabíhavost. Slitiny nadeutektické se vyznačují významně nižším součinitelem roztažnosti. Pro dosažení optimálních vlastností je nutno siluminy očkovat sodíkem. Křemík v obecné slitině AlSi krystalizuje při menším podchlazení než hliník a eutektikum se tvoří jen v omezené míře, což způsobuje křehkost slitiny. Sodíkem se sníží krystalizační schopnost křemíku a vzniká jemné eutektikum a zlepšují se mechanické vlastnosti slitiny, zejména tažnost. Posun eutektického bodu po očkování je znázorněn v rovnovážném diagramu obr. 2.5.



Obr. 2.5 Posun eutektického bodu po očkování [2]

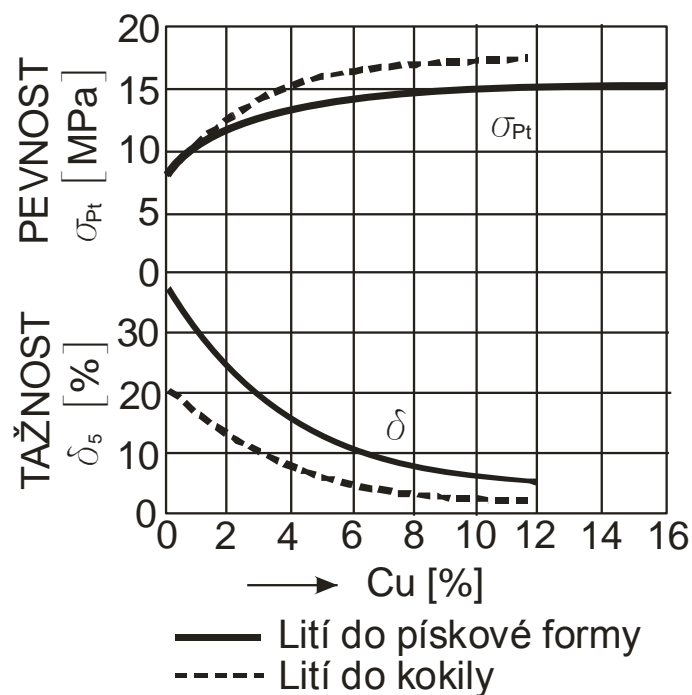
Podeutektické slitiny lité do kokil a pod tlakem se neočkují, protože rychlé ochlazení způsobí přechlazení obou fází, jejich krystalizace probíhá prakticky současně a vzniká jemnozrnné eutektikum. Shodného výsledku lze dosáhnout přehřátím taveniny před litím.

Do základní slitiny AlSi se pro zlepšení vlastností přidávají další přísady: *AlSiCu* – určené především pro lití pod tlakem, vykazují dobré slévárenské vlastnosti, nemají sklon k tvoření trhlin za tepla, netvoří staženiny a pohlcují při tavení málo plynů. Cu zlepšuje vlastnosti za vyšších teplot, ovšem snižuje odolnost proti korozi.

*AlSiMg* – dobré slévárenské vlastnosti, je určena pro odlévání složitých a rozměrných odlitků. Odlitky z této slitiny jsou dobře obrobitelné a tavně svařitelné. *AlSiCuNi* - přísad a Ni předurčuje tento typ slitin pro náročné odlitky, které jsou trvale vystaveny vysokým teplotám.

*Slitiny hliníku s hořčíkem* - obsah Mg se u používaných slitin pohybuje od 3 do 11%. Z hlediska mechanických vlastností patří k nejdůležitějším slitinám hliníku a dále vynikají vysokou odolností proti korozi, nízkou měrnou vahou a dobrou leštitelností. Z pohledu slévárenských vlastností vykazuje tato slitina vzhledem k velkému intervalu tuhnutí sklon k tvoření staženin a při vyšším obsahu Mg náchylnost k intenzivnímu oxidování během tavení a lití, které je nutno eliminovat přísadou Be (0,005 – 0,02%). Berylium však způsobuje zhrubnutí zrna, které se odstraňuje přísadou Ti (0,05 – 0,1%). Slévárenské vlastnosti se zlepšují i přísadou Si (0,1 – 1,3%). Křemík však zhoršuje povrchové a vzhledové vlastnosti odlitku.

*Slitiny hliníku s mědí* - měď ve slitině s hliníkem zvyšuje pevnost slitiny a současně snižuje tažnost jak ukazuje diagram na obr. 2.6. Z hlediska slévárenského má tato slitina špatnou zabíravost do forem, kterou je nutno zvyšovat přísadou Si až do výše 6%. Slitiny AlCuSi vykazují dobrou odolnost proti opotřebení a vyšší tvrdost (výroba pouzder ložisek, řemenic), další přísadou Ni se získá slitina vhodná pro odlitky pracující za vyšších teplot (písty, hlavy válců).



Obr. 2.6 Vliv mědi na mechanické vlastnosti slitiny hliníku s mědí [2]

*Slitiny hliníku se zinkem* - Binární slitiny hliníku se zinkem vykazují nepříznivé slévárenské a mechanické vlastnosti. Proto se používají ve slitinách s dalšími přísadami Cu, Si a Mg. Obecnou nevýhodou slitin hliníku se zinkem je její snížená odolnost proti korozi. Praktické využití mají slitiny AlZnMg a AlZnSiMg, kde obsah Zn je v rozmezí 3 - 8%, obsah Mg 1 - 3%. Zrno slitin je zjemňováno přísadou Ti a Cr.

## 2.4 Dilatační vlastnosti slitin hliníku

Objem kovů je při normálním tlaku funkcí teploty. Přírůstek objemu v závislosti na stupni zvýšení teploty je charakterizován koeficientem objemové roztažnosti  $\gamma$ . Při odlévání kovů dochází v závislosti na snižování teploty k úbytku objemu neboli smršťování. Smršťování lze sledovat ve všech fázích stavu kovu, tzn. v kapalném stavu, při změně skupenství a v tuhém stavu. První fáze nemá velký význam, druhá fáze vyvolává staženiny a řediny, třetí fáze způsobuje změnu rozměrů odlitku proti rozměrům dutiny formy. Proto se modely vyrábějí vždy větší o tzv. procento smrštění, které je pro různé slitiny odlišné a závisí též na použité technologii lití.

*Smršťování v tekutém stavu* – nastává při chladnutí taveniny z teploty lití do teploty počátku tuhnutí. V této fázi smrštění dochází k zmenšení pouze jediného rozměru odlitku tj. snížení hladiny tekutého kovu, která klesá, dokud se u stěn formy nevytvoří vrstva ztuhlého kovu. Od tohoto okamžiku dochází k postupnému propadání hladiny postupně ke středu odlitku. Hodnota smrštění v kapalném stavu je přímo úměrná přehřátí taveniny nad teplotu tání a z toho vyplývá, že při výrobě odlitků lze smrštění v kapalném stavu ovlivňovat regulací teploty lití. Smrštění taveniny se vyjadřuje jako relativní úbytek objemů [% .°C<sup>-1</sup>] v pozorovaném rozmezí teplot ( t<sub>1</sub> – t<sub>2</sub> ) a je tím vyšší, čím větší má tavenina tepelný obsah při lití, čím větší je její součinitel smrštění a čím je intenzivnější odvádění tepla formou. Objemové smrštění lze matematicky vyjádřit vztahem:

$$\varepsilon_{\text{tek}} = \alpha_1 * ( t_2 - t_1 ), \quad (2.1)$$

kde značí:  $\alpha_1$  - střední objemový součinitel smrštění tekuté slitiny vyjadřující změnu objemu slitiny při poklesu o jeden stupeň,

t<sub>2</sub> - teplotu lití [°C],

t<sub>1</sub> - teplotu likvidu slitiny [°C].

Ze vztahu (2.1) vyplývá, že smrštění slitiny v tekutém stavu roste se zvyšováním jejího přehřátí.

*Smršťování odlitků při tuhnutí* – začíná vznikem prvních tuhých částic v tavenině a to nejdříve na stěnách formy a končí ztuhnutím taveniny v tepelné ose odlitku. Při tuhnutí taveniny se vyskytují všechny druhy objemových změn za současného vzniku staženiny, která se začíná vytvářet v okamžiku, kdy na celé ploše formy ztuhne souvislá vrstva kovu uzavírající uvnitř taveninu. Staženiny se vytváří vlivem gravitačních sil v horní části odlitku a při správné konstrukci vtokové soustavy zůstávají staženiny v nálitku, který se následně oddělí. K tomuto procesu dochází při odlévání čistého kovu nebo eutektických slitin. Většina používaných slitin však tuhne dvoufázově. Při dvoufázovém tuhnutí se stahování projevuje nejen celistvými staženinami a ředinami, ale současně i rozptýlenou pórovitostí vnitrodendritovou a mezidendritovou.

*Vnitrodendritové smrštění* – v odlitku vedle sebe existují dendrity a tavenina, která mezi tuhými smršťujícími se osami tuhne a smršťuje se. Pokud je meziosová tavenina ve spojení s ostatní taveninou její úbytek vznikající při smršťování se nahradí. Je-li při složitější stavbě dendritů mezi osami uzavřen ostrůvek taveniny,

tzn. je přerušeno spojení s okolní taveninou, vytvoří se mezi osami dendritu staženina submikroskopického charakteru.

*Mezidendritové smrštění* – dochází k němu při přerušení spojení mezidendritové taveniny a taveniny volné. Dalším tuhnutím a smršťováním ostrůvků mezidendritové taveniny se vytvoří staženina charakteru mikroskopického – ředina. Sklon k tvorbě mikrostaženin u slitin hliníku je tím větší, čím širší má dvoufázové pásmo tuhnutí. Objemové smrštění slitin při tuhnutí je vyjádřeno vztahem:

$$\varepsilon_{tuh} = \alpha_2 \cdot (t_1 - t_s), \quad (2.2)$$

kde značí:  $\alpha_2$  – součinitel objemového smrštění, je konstantní veličina charakterizující objemové smrštění v intervalu teplot likvidus – solidu.

*Smršťování odlitku při ochlazování* – projevuje se změnou rozměru odlitku a označuje se jako lineární smrštění resp. tepelná dilatace. Je charakterizována souhrnnou změnou objemu tuhé fáze kovu v závislosti na teplotě při chladnutí resp. při ohřevu. Toto smrštění určuje míru zmenšení odlitku oproti rozměrům formy a ovlivňuje velikost vnitřního napětí v odlitku. Smrštění v tuhém stavu je vyjádřeno vztahem:

$$\varepsilon_s = \frac{l_p - l_v}{l_p} \cdot 100 \quad [\%], \quad (2.3)$$

kde značí:  $l_p$  - počáteční rozměr odlitku, který je roven rozměru slévárenské formy [m],

$l_v$  - rozměr odlitku po volné dilataci při teplotě okolního prostředí [m].

*celkové smrštění odlitku* – odpovídá součtu smrštění v jednotlivých fázích:

$$\varepsilon_{cel} = \varepsilon_{tek} + \varepsilon_{tuh} + \varepsilon_s \quad (2.4)$$

*Průvodní jevy smršťování a stahování* – vzhledem k tomu, že slitina tepelně dilatuje – mění svůj objem se změnou teploty, dochází ve formě k mechanickému a tepelnému brzdění dilatací. Čím silnější je brzdění dilatací, tím větší je pnutí v těch částech odlitků, kde je dilatace bržděna. Dojde-li k převýšení hodnoty napětí (v tahu nebo střihu) nad pevnost materiálu v dané části odlitku a při dané teplotě nastane

porušení materiálu. Mechanické brzdění smršťování převládá u tenkostěnných odlitků s velkými dutinami a výstupky, naopak tepelné brzdění smršťování převládá u odlitků s velkými tloušťkami stěn. Průvodními jevy smršťování a stahování jsou trhliny, praskliny a deformace. Na jejich tvorbě se podílí vlastnosti materiálu, vlastnosti a konstrukce formy.

*Deformace* – vzniká účinkem pnutí způsobeného brzděním, které nepřekročí pevnost materiálu a nedojde k porušení souvislosti odlitku. Vzniká pouze zborcení nebo pokřivení odlitku.

*Trhliny* – vznikají, pokud síly překročí pevnost materiálu v určitém údobí při teplotách kolem solidu. Trhlina se začíná tvořit v pásmu rozmezí tuhnutí a po podkročení solidu se nové trhliny již netvoří, pouze se mohou pod solidem již vzniklé trhliny rozšiřovat a prodlužovat.

*Praskliny* – vznikají porušením souvislosti odlitku při nižších teplotách než trhliny. Začínají se nejčastěji tvořit při teplotách, za kterých vstupuje chladnoucí odlitek do oblasti převažujících pružných deformací. Nemůže-li se smršťující odlitek deformovat a překročí-li tahová nebo stříhová síla pevnost materiálu dochází k jeho prasknutí.

### 3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

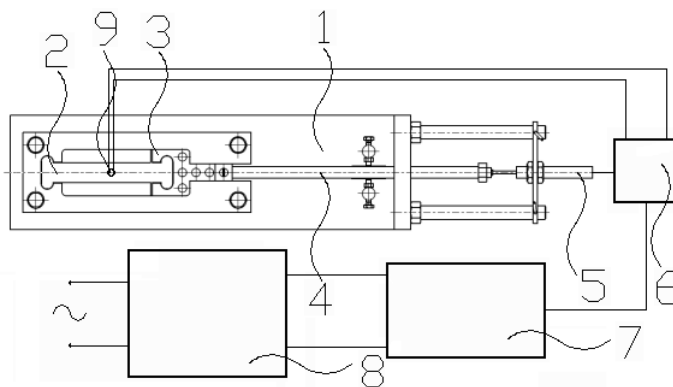
Úkolem experimentální části této práce bylo provedení dilatometrických měření vybraných slitin hliníku. K tomuto účelu byly použity slitiny čistého hliníku, slitina AlCu4MgTi a slitina AlSi12. Při jejich tuhnutí a chladnutí popsat jejich rozměrové změny. Dilatometrická měření byla provedena na zařízení v poloprovozu Katedra strojírenské technologie, FS – TU v Liberci.

#### 3.1 Charakteristika měřicího zařízení

Měřicí zařízení bylo zkonstruováno na pracovišti katedry, skládá se z měřicího rámu, jehož součástí je otevřená dutina slévárenské formy jednoduchého tvaru, jejíž jednu část vymezuje pohyblivá čelist, která je prostřednictvím táhla spojena s indukčním snímačem. Indukční snímač a termočlánkový vodič pro měření teploty v odlité tavenině jsou propojeny se sběrnicí naměřených dat, která je součástí dilatometru CRYSTALDIGRAM PC – 4T2L, spolu s A/D převodníkem a počítačem. Dále je součástí měřicího zařízení regulátor vstupního napětí. Měřicí rám je tvořen základovou deskou obdélníkového tvaru. K základové desce je přišroubovaná tvarová deska, která je na jedné straně opatřena tvarovým výřezem a na druhé straně opatřena drážkou, která je souměrná stejně jako tvarový výřez s podélnou osou desky. Do části tvarové desky je usazena pohyblivá čelist a drážka v desce slouží k jejímu vedení a současně umožňuje její pohyb ve vodorovném směru. Dále mohou být do části tvarové desky zrcadlově umístěny dvě ocelové příložky nebo tento prostor může být vyplněn upěchovanou formovací směsí. Tvarové příložky spolu s pohyblivou čelistí a částí tvarové desky vymezují prostor, který tvoří dutinu slévárenské formy, sloužící pro odlévání taveniny příslušné slévárenské slitiny, u které je sledováno brzdné smršťování, resp. smršťování vzniklého odlitku.

Pohyblivá tvarová čelist, vyrobená z oceli je napevno spojena s táhlem z křemenné trubičky. Z důvodu menší hmotnosti je čelist odlehčená. Druhý konec táhla je opatřen tenkou kruhovou destičkou z feromagnetické oceli, která slouží pro umístění magnetické spojky. Tento konec táhla je veden pomocí dvou stavitelných, souměrně uložených ocelových hrotů, ustavených v čepech základové desky a ve vertikálním směru je táhlo podloženo ocelovým hrotem připevněným k základové

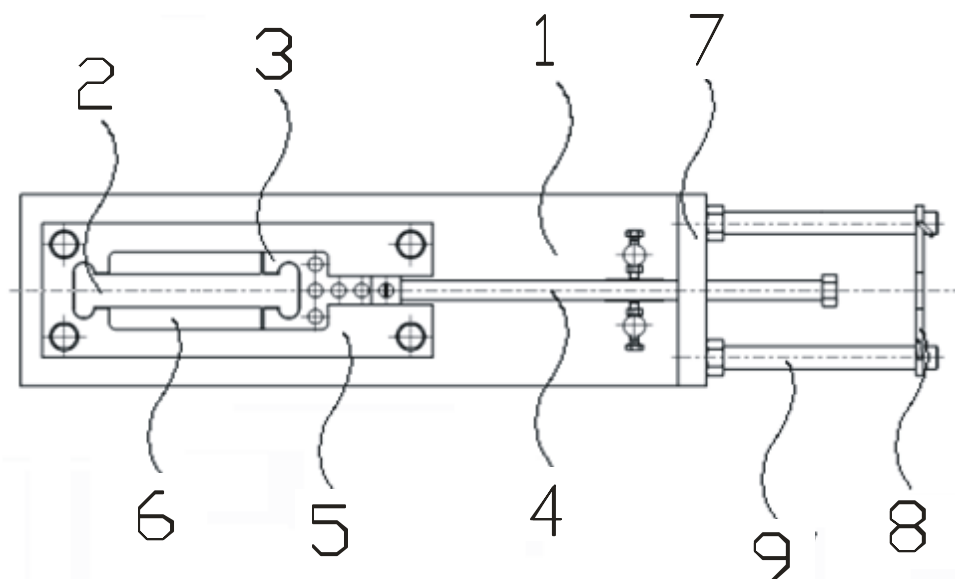
desce měřicího zařízení. Táhlo dále prochází otvorem v přílozce základové desky. K přílozce základové desky jsou rovnoběžně ve vodorovném směru se základovou deskou přišroubovány dva držáky kruhového průřezu souměrně umístěné, které slouží prostřednictvím ocelové objímky deskového tvaru k uchycení indukčního snímače. Indukční snímač je s táhlem spojen pomocí magnetické spojky (permanentní magnet). Měření teploty v odlité, resp. tuhnoucí a chladnoucí tavenině je realizováno pomocí vertikálně ustaveného termočláňkového vodiče (NiCr–Ni) do místa předpokládané tepelné osy odlitku. Výstup hodnot analogového signálu z indukčního snímače, získaných změnou rozměrů (dilatací) odlitku v dutině formy je přes sběrnici dat CRYSTALDIGRAM PC – 4T2L, spolu s A/D převodníkem, který je vybaven řídicím programem a propojen s počítačem opatřeným monitorem. Též analogový signál z termočláňkového vodiče je zpracováván CRYSTALDIGRAM PC – 4T2L s A/D převodníkem a jeho řídicím programem. Počítač je vybaven jednotkou pro grafickou interpretaci zjištěných závislostí, a to dilatace (resp. změny lineárních rozměrů tuhnoucího odlitku) v závislosti na čase a teploty v tepelné ose odlitku v závislosti na čase. Schéma zapojení měřicího zařízení – viz obr. 3.1 a blokové schéma uspořádání konstrukčních prvků měřicího zařízení obr. 3.2



Obr. 3.1 Schéma zapojení měřicího zařízení

1 – základová deska měřicího rámu ; 2 – dutina formy; 3 – pohyblivá čelist  
 4 – táhlo; 5 – indukční snímač; 6 – CRYSTALDIGRAM PC – 4T2L s A/D převodníkem a sběrnici dat; 7 – PC; 8 – regulátor vstupního napětí; 9 – teplotní čidlo



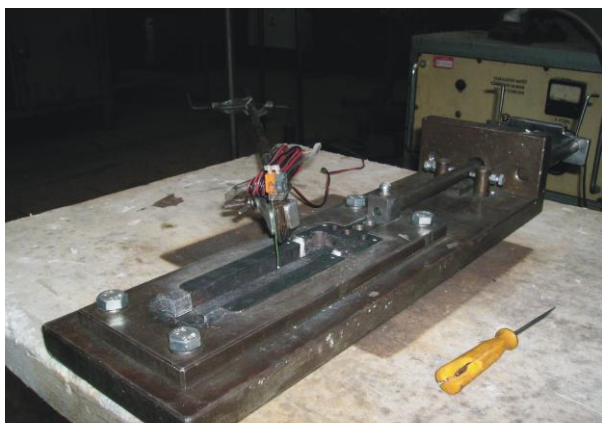


Obr. 3.2 Blokové schéma uspořádání konstrukčních prvků měřicího zařízení

(měřicí rám, indukční snímač, sběrnice dat, A/D převodník, PC)

1 – základová deska měřicího rámu; 2 – otevřená dutina slévárenské formy; 3 – pohyblivá čelist; 4 – táhlo čelisti; 5 – tvarová deska; 6 – vyměnitelná příložka; 7 – příložka základové desky; 8 – objímka indukčního snímače; 9- kruhová vodící tyč.

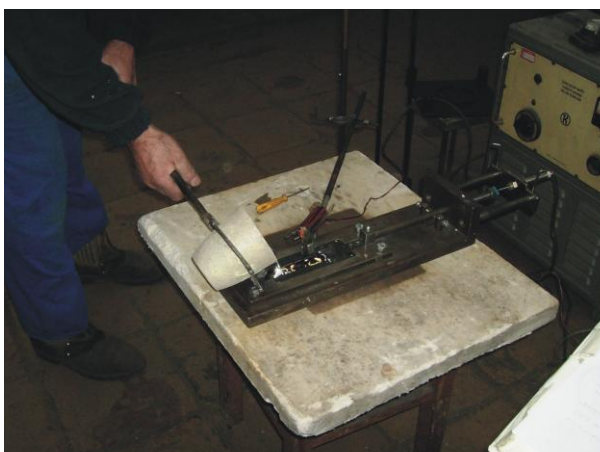
Forma, která je ustavena na měřicím rámu, slouží k odlití zkušební vzorku, tvaru „I“ je sestavená ze základní ocelové desky, dvou pevných a jedné pohyblivé příložky. Pohyblivá příložka byla vzdálena od pevných ve vzdálenosti větší než předpokládané smrštění a oba prostory mezi pevnými a pohyblivou příložkou byly vyplněny stlačitelnou žáruvzdornou hmotou, tak aby v počáteční fázi měření, kdy kov byl v roztaveném stavu, nedošlo k jeho úniku mimo formu. Celé kompaktní zařízení bylo umístěno na žáruvzdorné podložce. Připravená forma pro měření je zobrazena na obr. 3.3.



Obr. 3.3 Pohled na měřicí rám s otevřenou dutinou formy tvaru „I“

### 3.2 Navržená metodika měření

Prováděná měření byla vedena na základě připravené a odzkoušené metodiky. Po sestavení a zapnutí měřicího zařízení byla zkontrolována funkce délkového a teplotního čidla. Byla vymezena nulová poloha pro měření dilatace. Pak byla odlita do formy připravená tavenina, měření dilatace probíhalo cca po dobu 800 [s]. Měření bylo prováděno na třech vzorcích – hliník čistoty 99,9 % a dvě slitiny na bázi mědi a křemíku. První experimenty byly odlévány do studené formy o teplotě 20 °C, další experimenty byly prováděny s předehřátou formou o teplotě 200 °C. Tavenina pro experimenty byla připravována z housek příslušného složení a objemu. Tavení jednotlivých vzorků bylo provedeno v grafitovém kelímku, v elektrické odporové peci PEK – 1 nastavené na teplotu tak, aby bylo dosaženo teploty taveniny 725°C. Vzorek slitiny Si byl navíc po natavení rafinován solí T3, která plní rafinační i modifikační funkci. Po vyjmutí kelímku s roztaveným kovem bylo provedeno měření teploty roztaveného kovu kontaktním digitálním teploměrem a v okamžiku, kdy teplota kovu v kelímku dosahovala požadované lící teploty 720 až 725 °C byla tavenina okamžitě odlita do připravené nepřehřáté formy. Průběh lití zachycen na obr. 3.4.



Obr. 3.4 Odlévání roztaveného materiálu do formy měřicího zařízení

Při odlévání do studené formy (20°C), došlo k částečnému poklesu teploty taveniny, jehož příčinou bylo vyrovnání teplot formy a taveniny. Tato část teplotního náběhu nebyla při vyhodnocování naměřených výsledků brána v úvahu. Měření dilatace bylo zahájeno po vyrovnání teplot a ustálení ostatních vlivů při teplotě vzorku 550°C. Zařízení bylo nastaveno tak, aby automaticky odečítalo

a zaznamenávalo hodnoty po časovém intervalu 1,2 s. Zaznamenávanými hodnotami byla teplota vzorku a odpovídající smrštění. Zaznamenávání hodnot bylo automaticky odstaveno po dosažení teploty vzorku 80°C a měření bylo ukončeno. Po ukončení měření byl odlitek vyjmut, zařízení očištěno a sestaveno na další měření. Výstupem programu PC byl soubor hodnot charakterizující jednotlivé vzorky v uvedené oblasti. Získané hodnoty byly graficky zpracovány a vytvořeny křivky závislosti velikosti smrštění na čase, resp. teplotě. Na obr. 3.5 je pohled na odlitý vzorek.



Obr. 3.5 Odlitý měřený vzorek

### 3.3 Charakteristika použitých slitin

K prováděným experimentům byly vybrány různé slitiny hliníku, které doplňují spektrum zjišťovaných hodnot součinitele teplotní smrštivosti, které je součástí výzkumu prováděného na Katedře strojírenské technologie v rámci řešení výzkumného záměru MSM 4674788501.

Měření bylo provedeno na vzorku hliníku čistoty 99,9 %, jehož hodnoty teplotní smrštivosti, resp. teplotní roztažnosti jsou tabelovány ve fyzikálních tabulkách. Dále byla použita slitina AlCu4MgTi a slitina AlSi12. Slitina AlSi12 – eutektická slitina hliníku s křemíkem, která patří k nejpoužívanějším slévárenským slitinám hliníku a jsou známy pod názvem silumin, její bližší charakteristika je v kapitole 2.5. V tabulce 3.1 je uvedena základní charakteristika vybraných slitin.

Tabulka 3.1 Přehled mechanických vlastností použitých slitin [6]

| Slitina                    | Stav | Na odděleně litých tyčích Ø 30 mm |                            |                          |     |                          |                            |                          |     |
|----------------------------|------|-----------------------------------|----------------------------|--------------------------|-----|--------------------------|----------------------------|--------------------------|-----|
|                            |      | Odléváno do pískové formy         |                            |                          |     | Odléváno do kovové formy |                            |                          |     |
|                            |      | R <sub>m</sub><br>[MPa]           | R <sub>p0,2</sub><br>[MPa] | A <sub>50mm</sub><br>[%] | HBS | R <sub>m</sub><br>[MPa]  | R <sub>p0,2</sub><br>[MPa] | A <sub>50mm</sub><br>[%] | HBS |
| AlCu4MgTi<br>EN AC-21000   | T4   | 300                               | 200                        | 5                        | 90  | 320                      | 200                        | 8                        | 95  |
| AlSi12 (b)<br>EN AC-44100  | F    | 150                               | 70                         | 4                        | 50  | 170                      | 100                        | 1                        | 75  |
| AlSi12 (Cu)<br>En AC-47000 | F    | 150                               | 80                         | 1                        | 50  | 170                      | 90                         | 2                        | 55  |

Poznámka: Stav: F v odlitém stavu

T4 po rozpouštěcím žihání a přirozeném stárnutí

*AlCu4Mg Ti* – slitina s obsahem 4 % mědi zařazená do skupiny slitin hliníku vhodné pro tváření a vytvrzování a patří k nejpoužívanějším hliníkovým slitinám pro tváření. Slitina AlCu4MgTi (EN AC 21000), jejíž chemické složení je uvedeno v tabulce 3.2. V tabulce 3.3 jsou mechanické vlastnosti této slitiny v souladu, jak uvádí EN 1706. Typické fyzikální vlastnosti této slitiny jsou uvedeny v tabulce 3.4.

Tabulka 3.2 Chemické složení slitiny hliníku AlCu4MgTi [6]

| Obsah prvků ve slitině hliníku [%] |      |      |       |        |        |       |         |
|------------------------------------|------|------|-------|--------|--------|-------|---------|
| Al                                 | Si   | Cu   | Mn    | Mg     | Fe     | Cr    | Zn      |
| 94,43                              | 0,15 | 4,3  | 0,10  | 0,24   | 0,29   | 0,01  | 0,1     |
| Ti                                 | Ni   | Zr   | Ca    | Na     | Bi     | Sb    | Ostatní |
| 0,2                                | 0,05 | 0,08 | 0,009 | 0,0057 | 0,0014 | 0,001 | 0,03    |

Tabulka 3.3 Mechanické vlastnosti slitiny AlCu4MgTi [6]

| Metoda odlévání                    | Mez kluzu<br>R <sub>p0,2</sub><br>[MPa] | Mez pevnosti<br>R <sub>m</sub><br>[MPa] | Prodloužení<br>[%] | Tvrdość<br>[HB] | Tepelné zpracování |
|------------------------------------|---|---|--------------------|-----------------|--------------------|
| Písková forma                      | 200-270                                 | 300-400                                 | 5-15               | 90-110          | T4                 |
|                                    | 240-350                                 | 350-420                                 | 3-10               | 95-125          | T6                 |
| Gravitační lití<br>do kovové formy | 210-300                                 | 320-420                                 | 8-18               | 90-115          | T4                 |
|                                    | 260-390                                 | 350-440                                 | 3-14               | 100-130         | T6                 |

Poznámka: T4 – umělé vytvrzování; T6 – stabilizační ohřev

Tabulka 3.4 Vybrané fyzikální vlastnosti slitiny AlCu4MgTi [6]

| Fyzikální vlastnosti slitiny AlCuMgTi      |                           |   |  |                                 |  |
|--|---------------------------|---|--|---------------------------------|--|
| Hustota<br>(20 °C)<br>[kg.m <sup>3</sup> ] | Youngův<br>modul<br>[MPa] | Teplotní<br>roztlačnost<br>[K <sup>-1</sup> ] | Tepelná<br>vodivost<br>[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ] | Teplota<br>krystalizace<br>[°C] | Elektrická<br>vodivost<br>[m.Ω <sup>-1</sup> .mm <sup>-2</sup> ] |
| 2770                                       | 72000                     | 24,0.10 <sup>-6</sup>                         | 150  | 640 -550                        | 23   |

### 3.4 Charakteristika prováděných experimentů

Na základě výše uvedené metodiky byly provedeny experimenty, při kterých byla sledována časová závislost dilatace a časová závislost teploty při tuhnutí a chladnutí odlévané taveniny do formy, která je součástí měřicího zařízení. Celkem bylo provedeno 15 experimentů se 3 výše uvedenými slitinami. Při řešení této diplomové práce bylo na základě statistických zásad rozhodnuto, že bude použito méně slitin, ale bude provedeno více experimentů s jedním typem vybraných slitin. Taveniny pro odlévání byly připraveny standardním způsobem, tak jak je uvedeno v kapitole 3.2. Funkce měřicího zařízení byla pro každý experiment pečlivě překontrolována a po ustavení měřicího čidla (termočlánek NiCr-Ni) do tepelné osy odlitku byla tavenina odlita do formy. V tabulce 3.5 je uveden přehled prováděných experimentů.

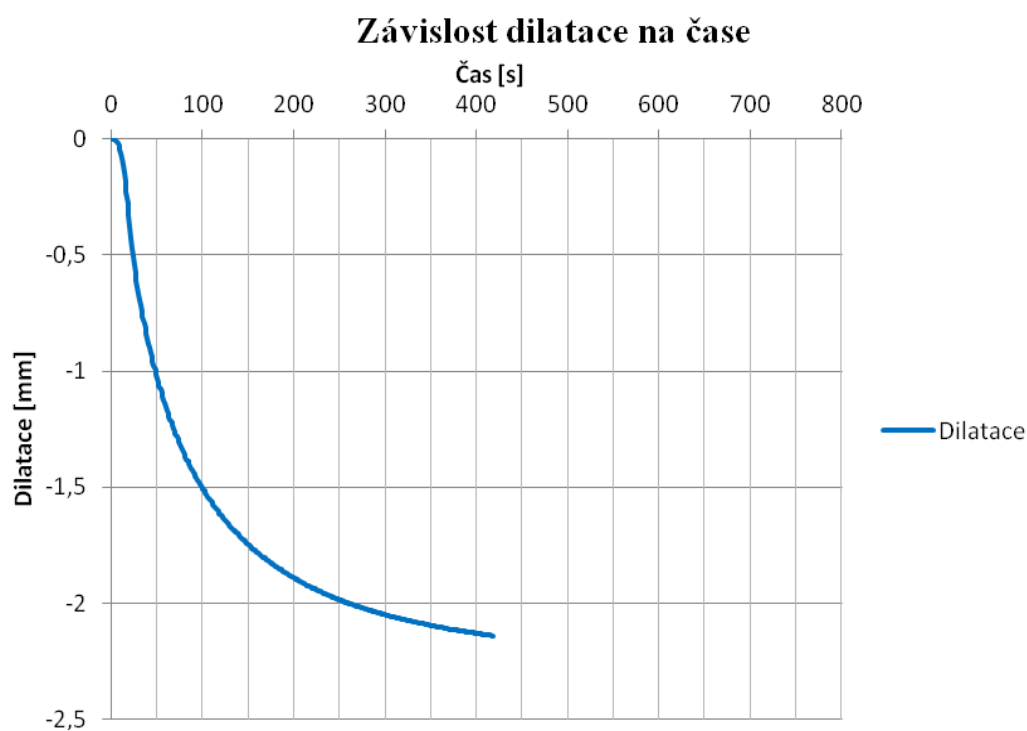
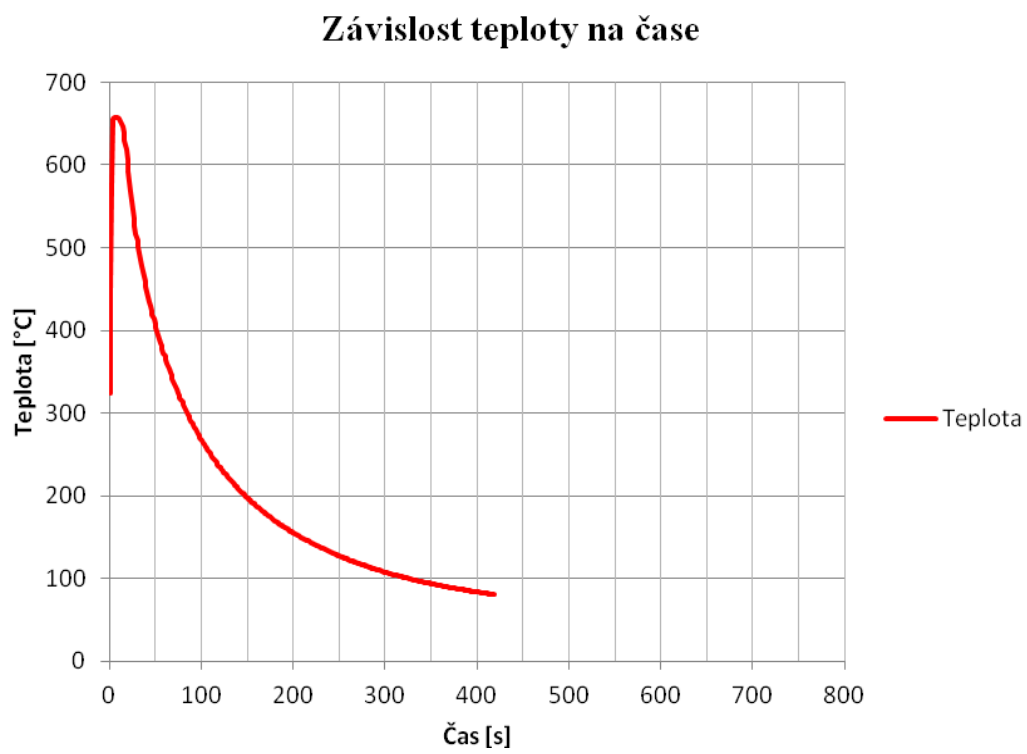
Tabulka 3.5 Přehled prováděných experimentů

| Označení skupiny experimentů | Číslo měření | Typ slitiny | Hodnota smrštění [mm] |
|------------------------------|--------------|-------------|-----------------------|
| <b>I.</b>                    | 1.           | Al 99,9     | 2,139                 |
|                              | 2.           |             | 2,1981                |
|                              | 3.           |             | 2,0981                |
|                              | 4.           |             | 1,727                 |
|                              | 5.           |             | 2,0794                |
| <b>II.</b>                   | 1.           | AlCu4MgTi   | 2,0106                |
|                              | 2.           |             | 2,1967                |
|                              | 3.           |             | 2,0172                |
|                              | 4.           |             | 2,003                 |
|                              | 5.           |             | 2,3374                |
| <b>III.</b>                  | 1.           | AlSi12      | 1,5454                |
|                              | 2.           |             | 1,6675                |
|                              | 3.           |             | 1,5997                |
|                              | 4.           |             | 1,4522                |
|                              | 5.           |             | 2,0106                |

Získané časové závislosti dilatace a teploty pro jednotlivé experimenty, resp. měření jsou uvedeny na obr. 3.6 až 3.20

## Skupina experimentů I. – čistý hliník

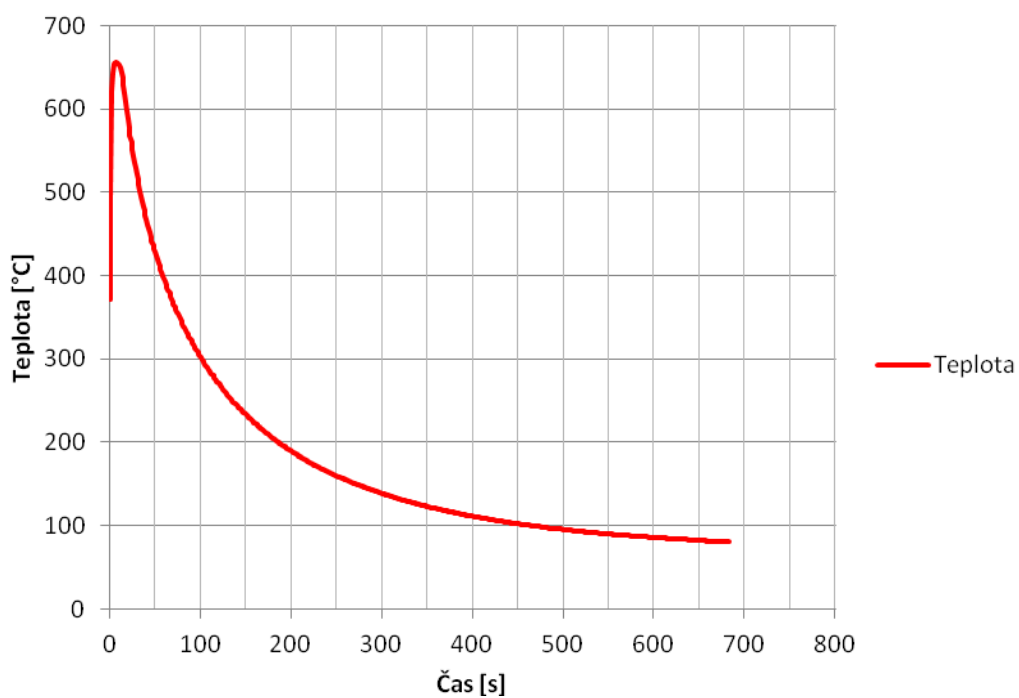
### Měření č. 1



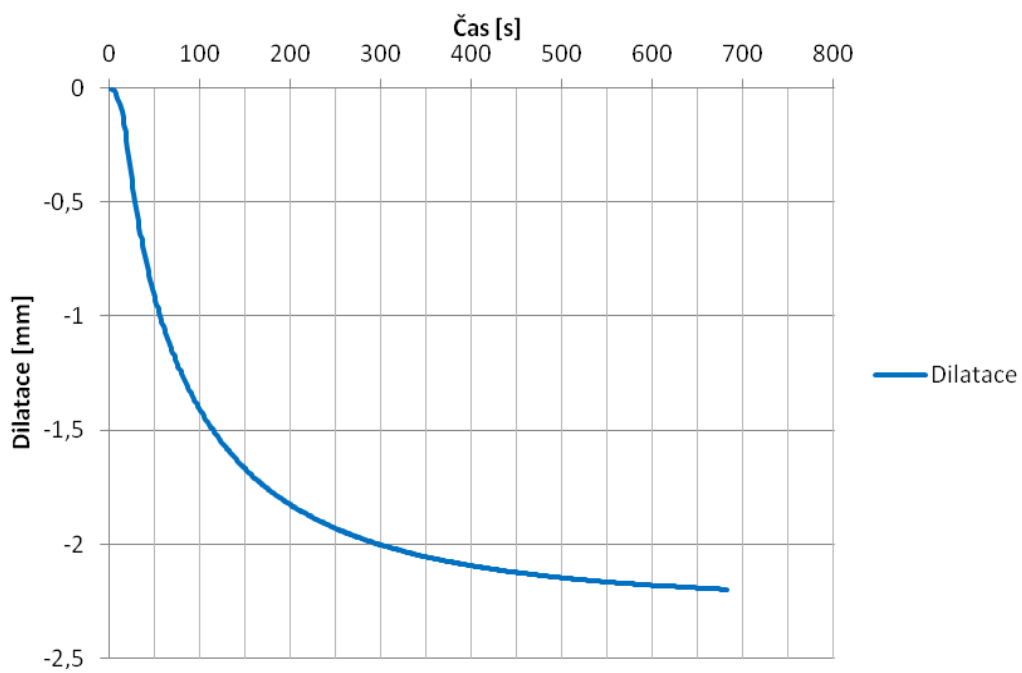
Obr. 3.6 Časové závislosti teploty a dilatace, měření č. 1 – hliník 99,9 %

## Měření č. 2

### Závislost teploty na čase

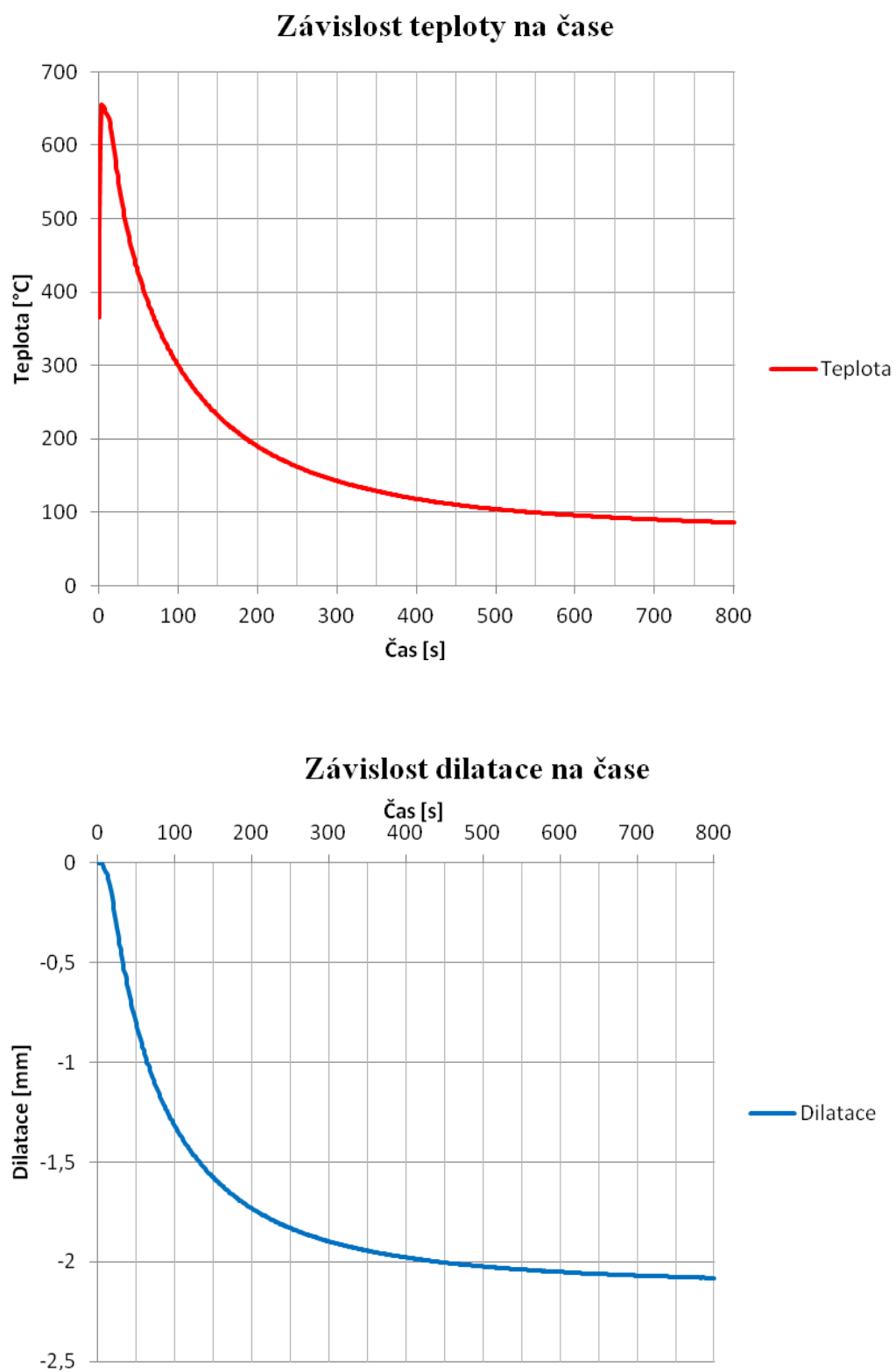


### Závislost dilatace na čase



Obr. 3.7 Časové závislosti teploty a dilatace, měření č. 2 – hliník 99,9 %

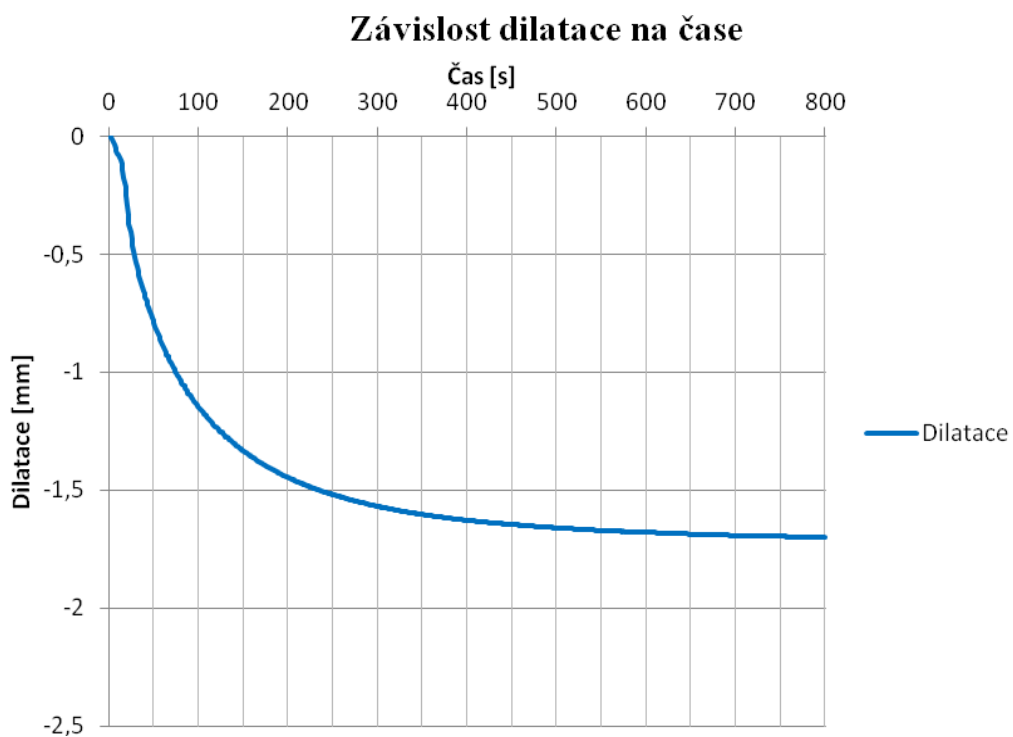
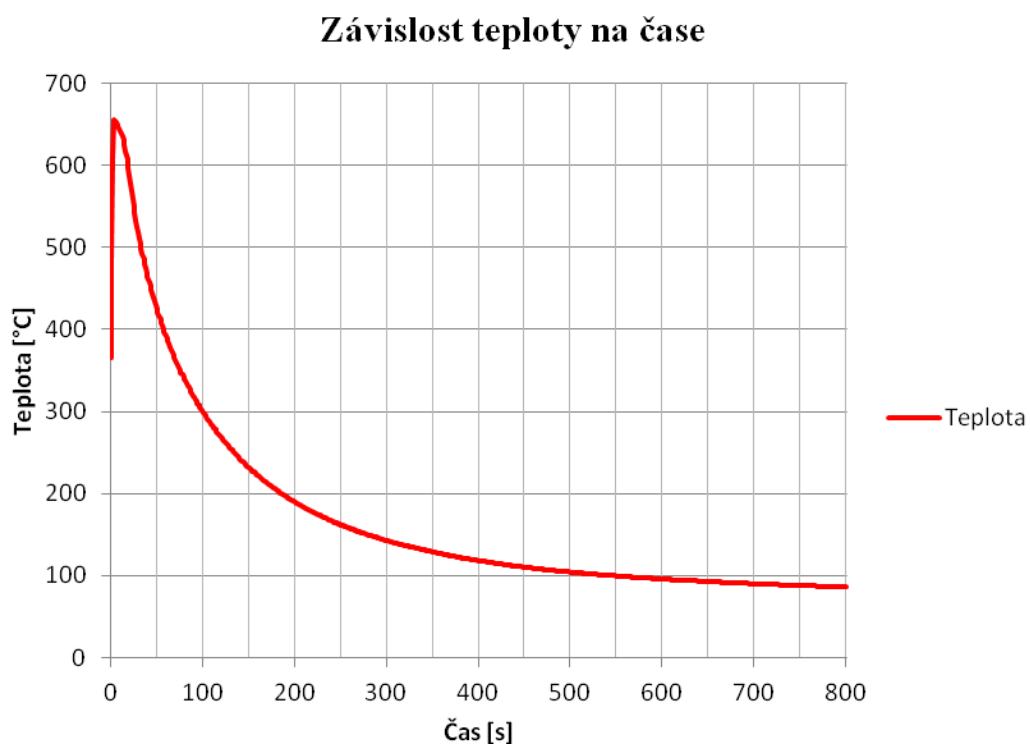
### Měření č. 3



Obr. 3.8 Časové závislosti teploty a dilatace, měření č. 3 – hliník 99,9 %



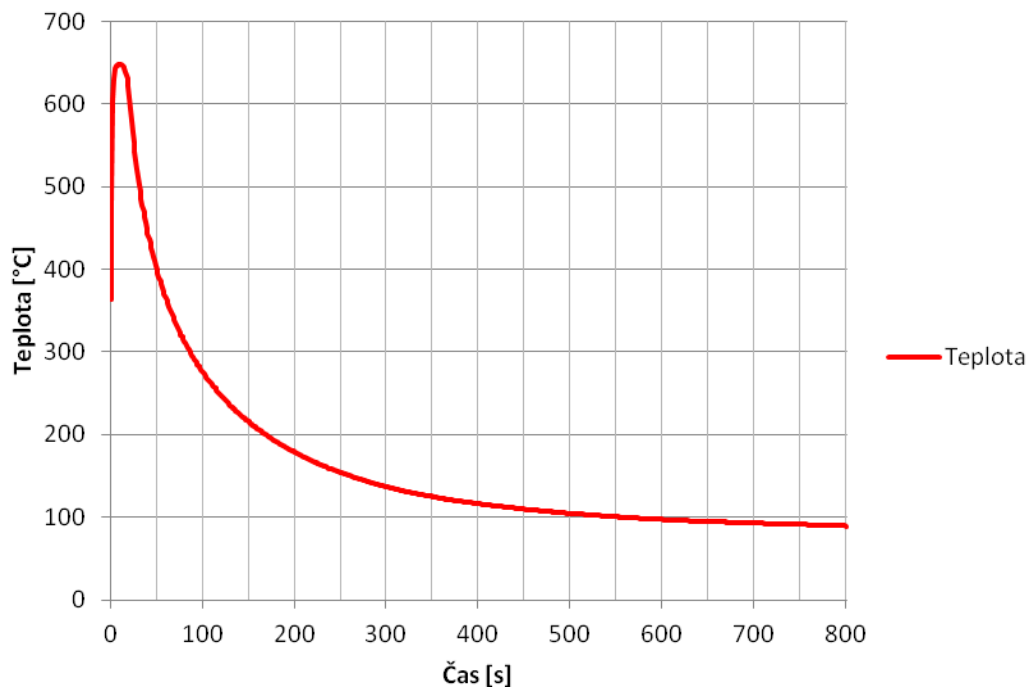
## Měření č. 4



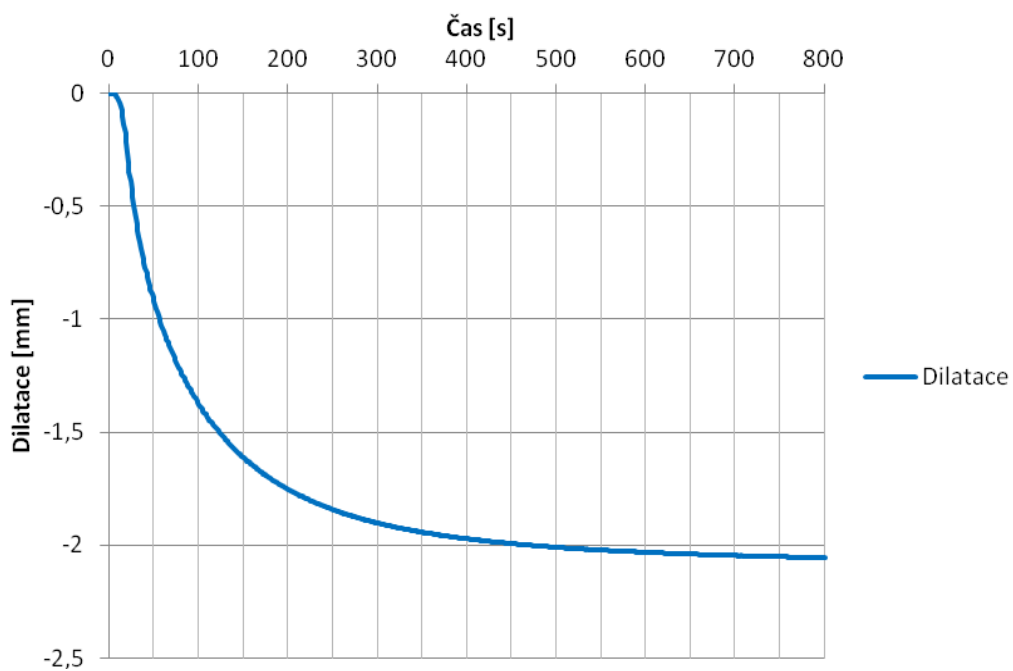
Obr. 3.9 Časové závislosti teploty a dilatace, měření č. 4 – hliník 99,9 %

## Měření č. 5

### Závislost teploty na čase



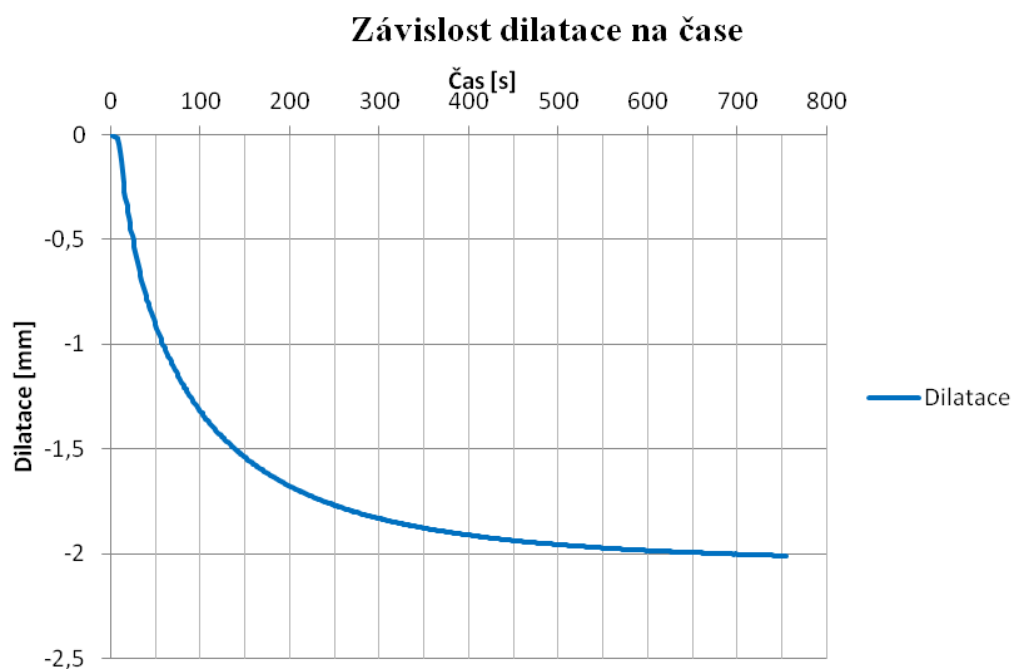
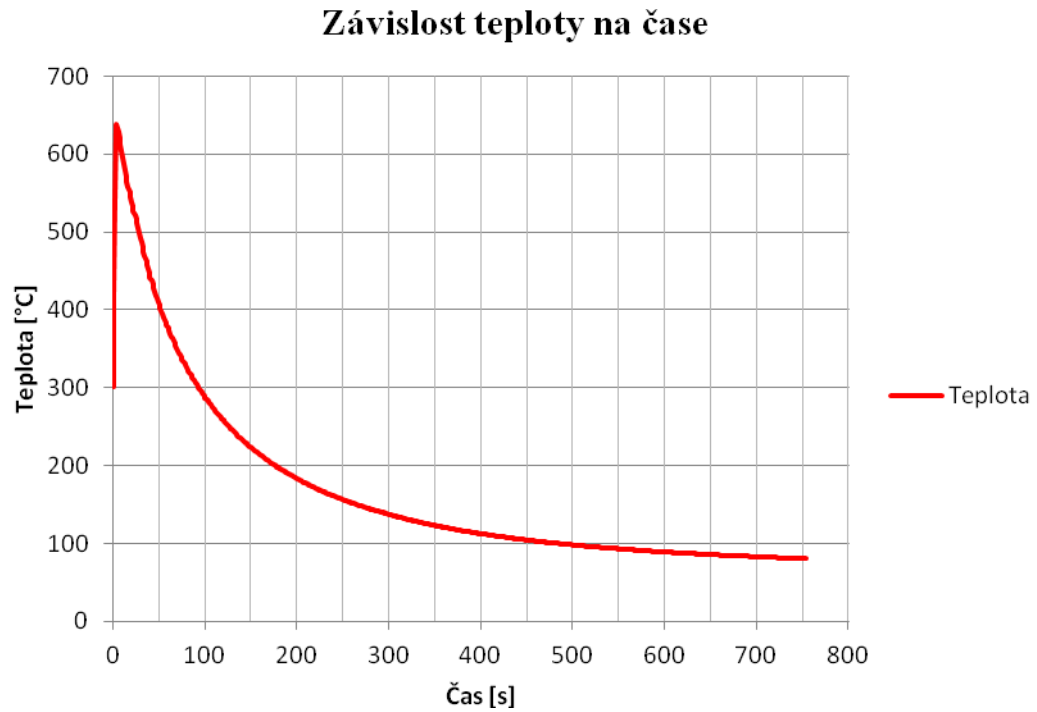
### Závislost dilatace na čase



Obr. 3.10 Časové závislosti teploty a dilatace, měření č. 5 – hliník 99,9 %

## Skupina experimentů II. – AlCu4MgTi

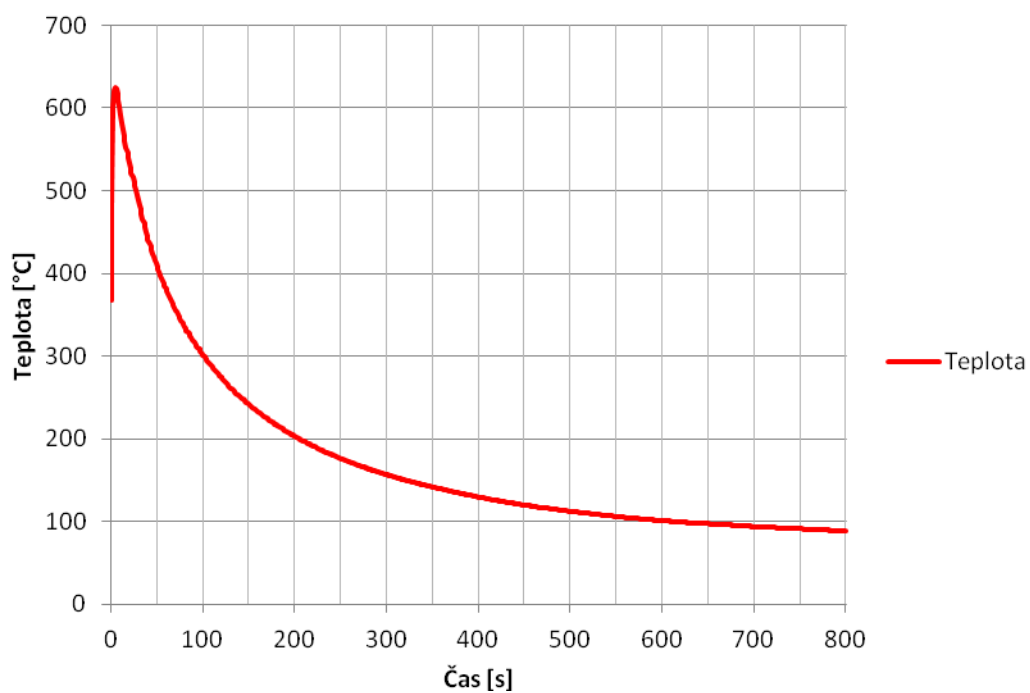
### Měření č. 1



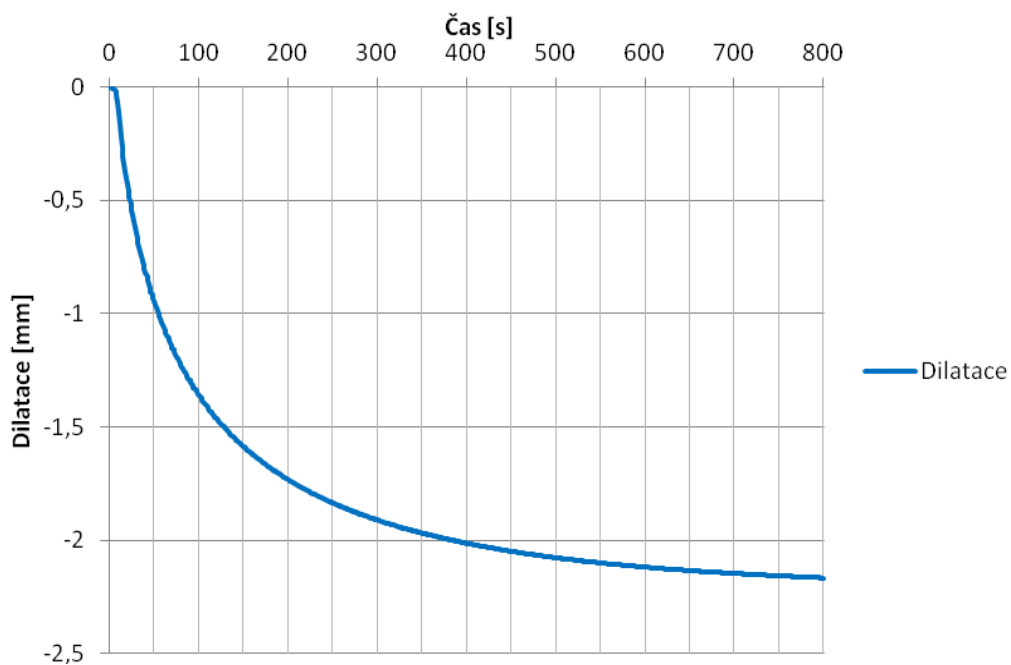
Obr. 3.11 Časové závislosti teploty a dilatace, měření č. 1 – AlCu4MgTi

## Měření č. 2

### Závislost teploty na čase

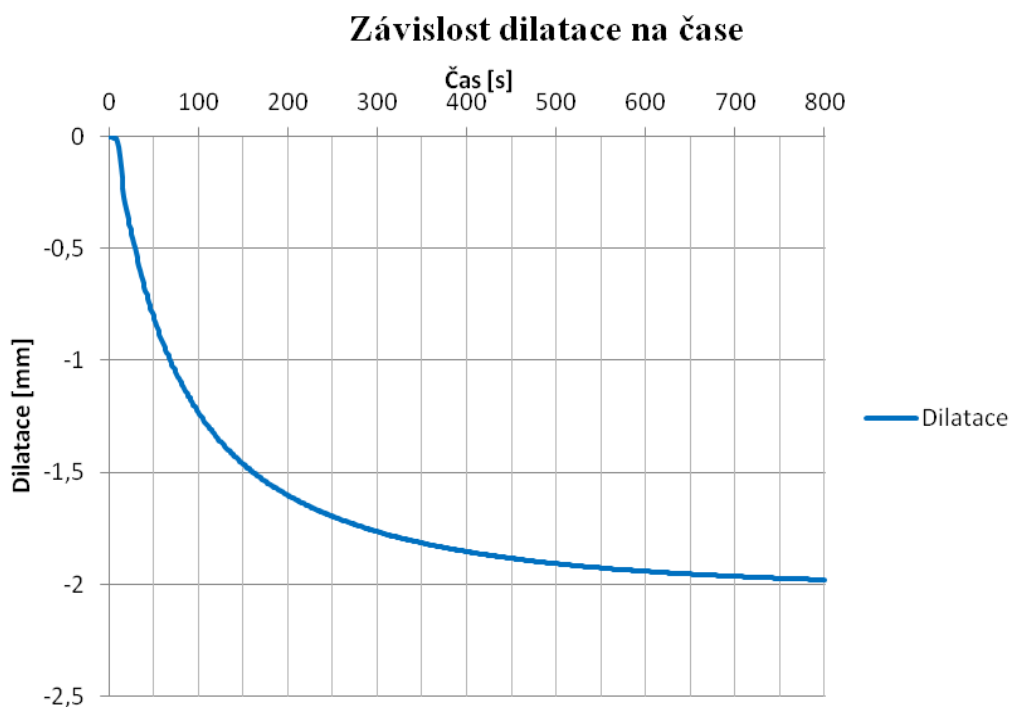
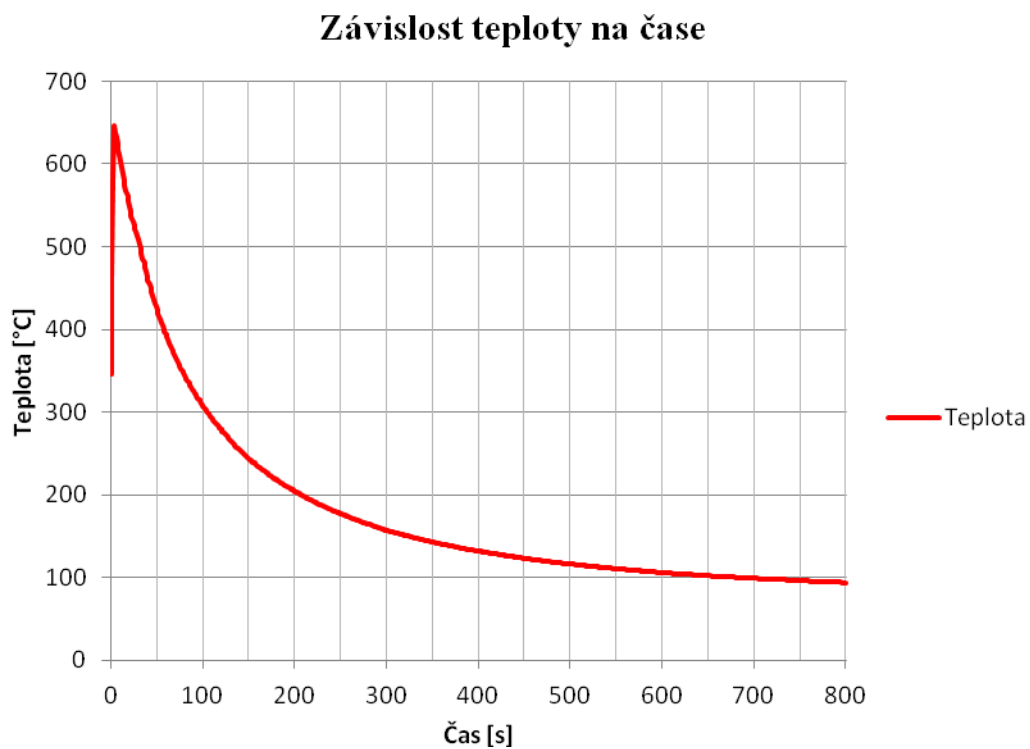


### Závislost dilatace na čase



Obr. 3.12 Časové závislosti teploty a dilatace, měření č. 2 – AlCu4MgTi

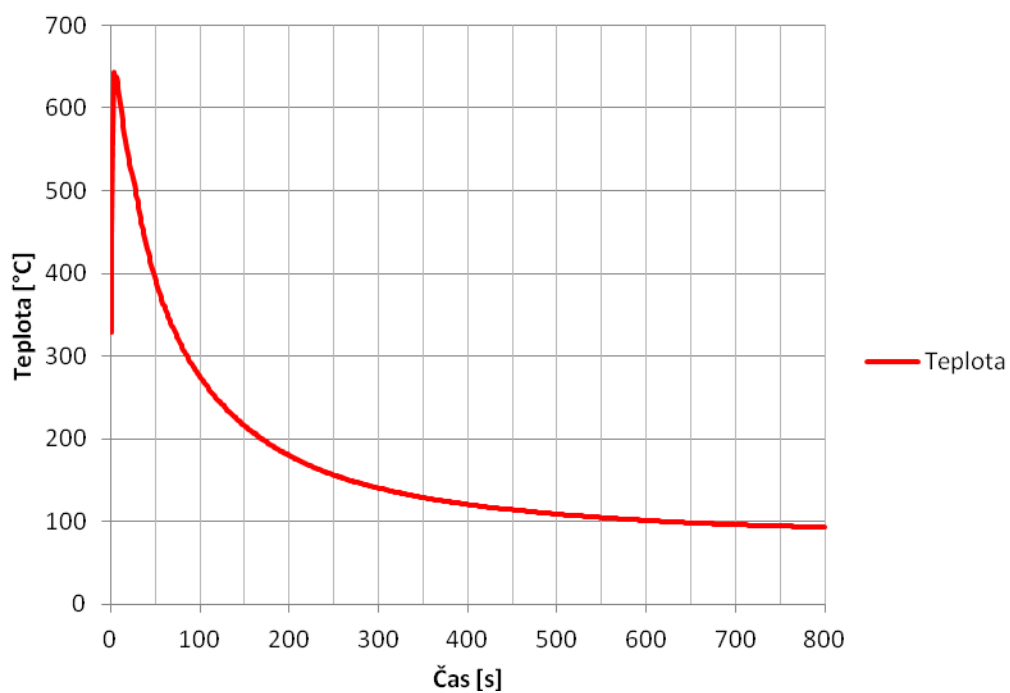
### Měření č. 3



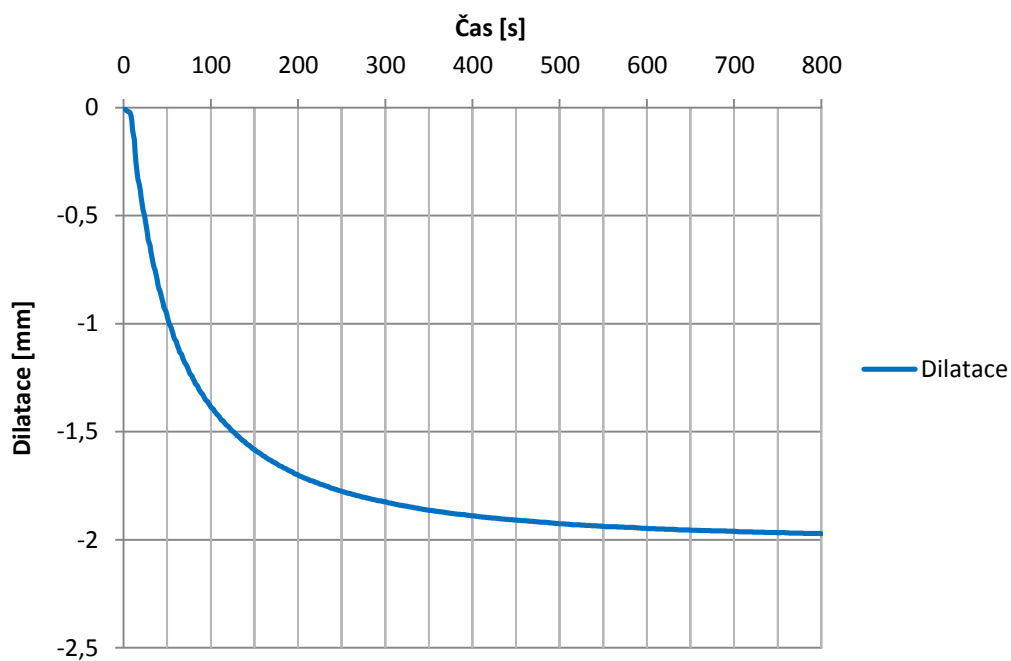
Obr. 3.13 Časové závislosti teploty a dilatace, měření č. 3 – AlCu4MgTi

## Měření č. 4

### Závislost teploty na čase



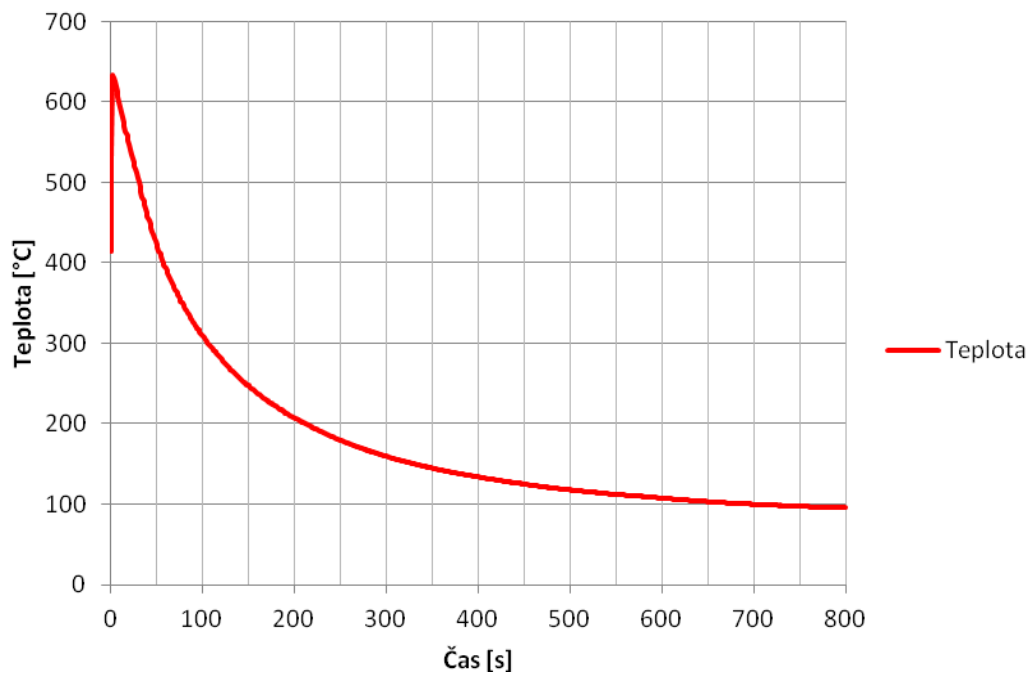
### Závislost dilatace na čase



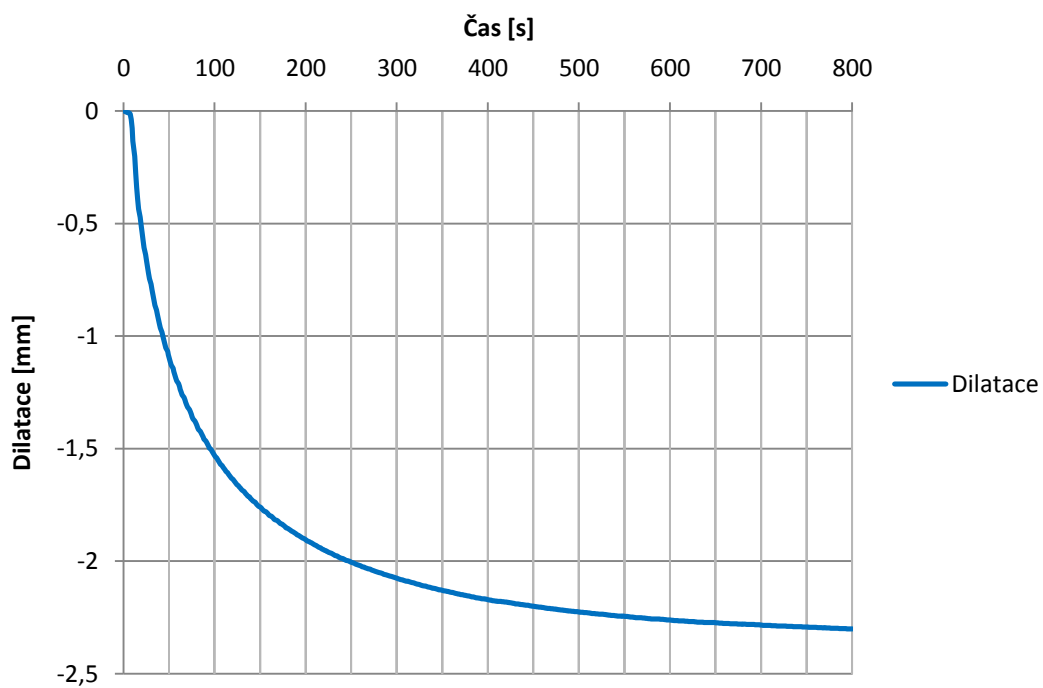
Obr. 3.14 Časové závislosti teploty a dilatace, měření č. 4 – AlCu4MgTi

## Měření č. 5

### Závislost teploty na čase



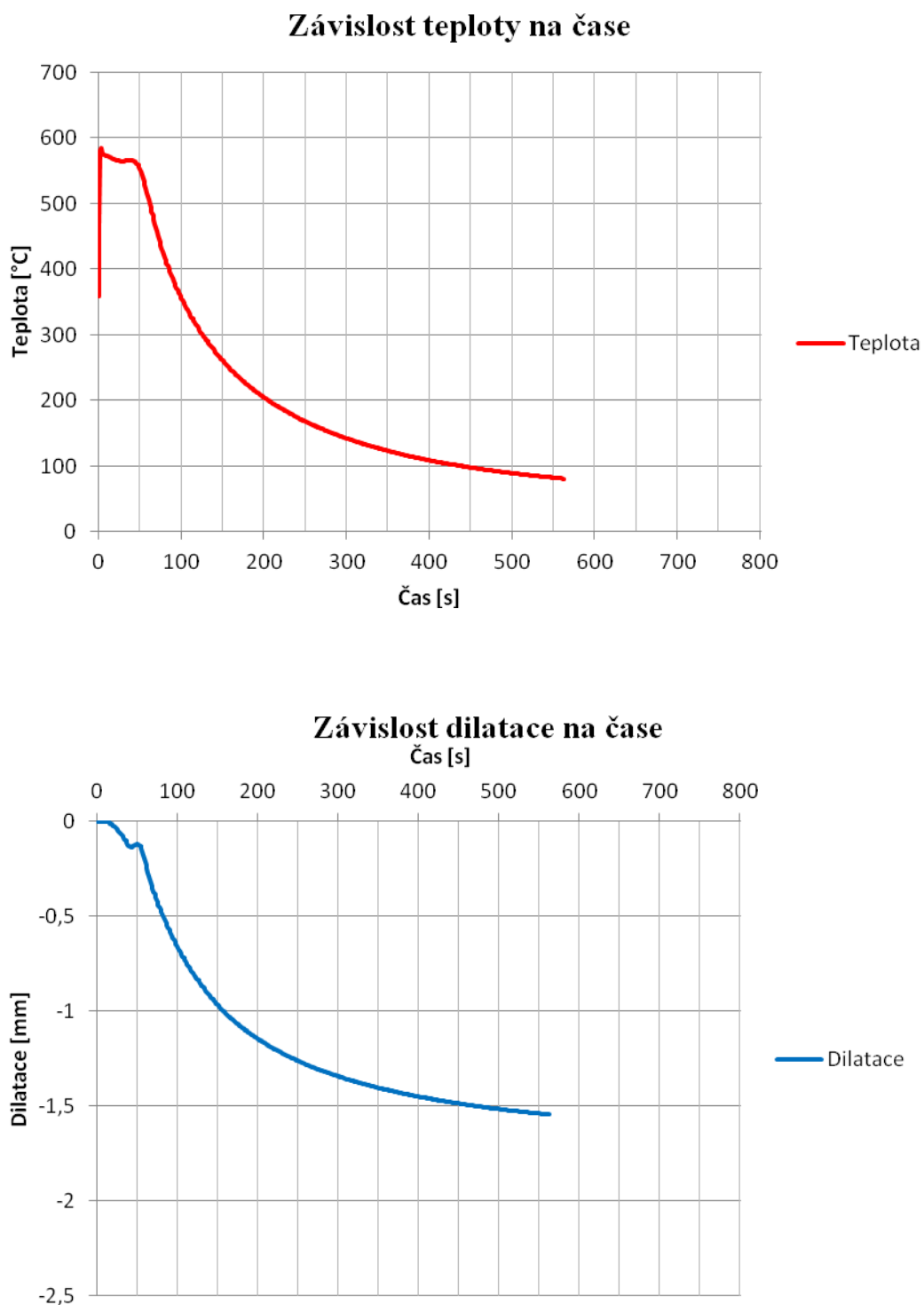
### Závislost dilatace na čase



Obr. 3.15 Časové závislosti teploty a dilatace, měření č. 5 – AlCu4MgTi

## Skupina experimentů III. – AlSi12

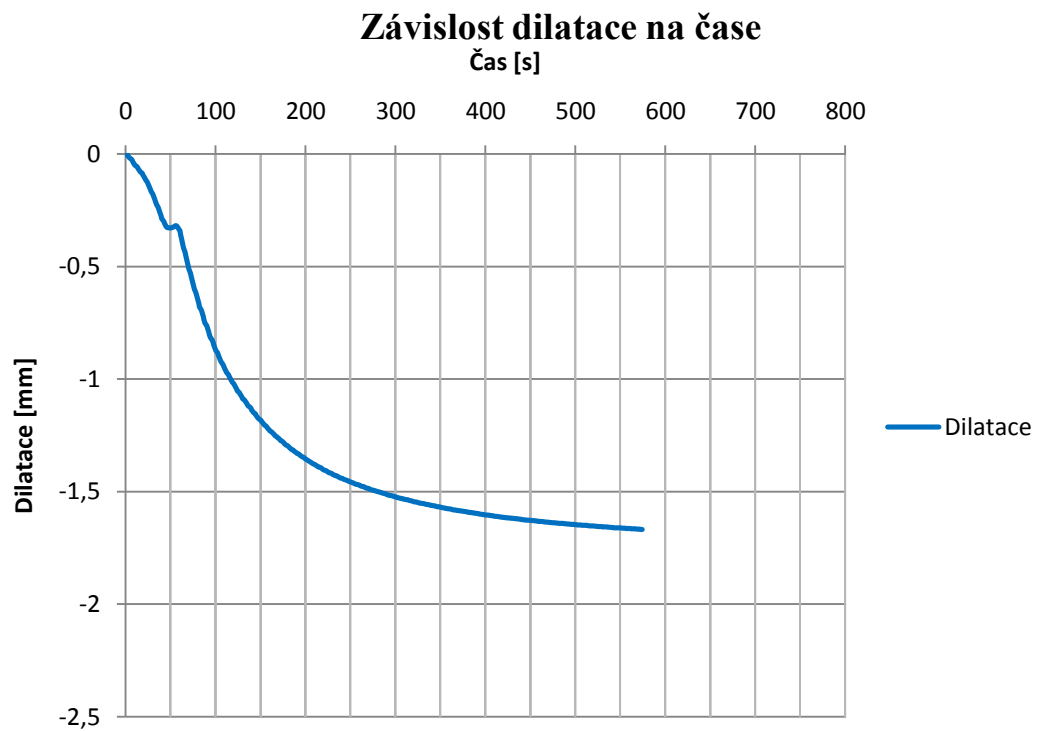
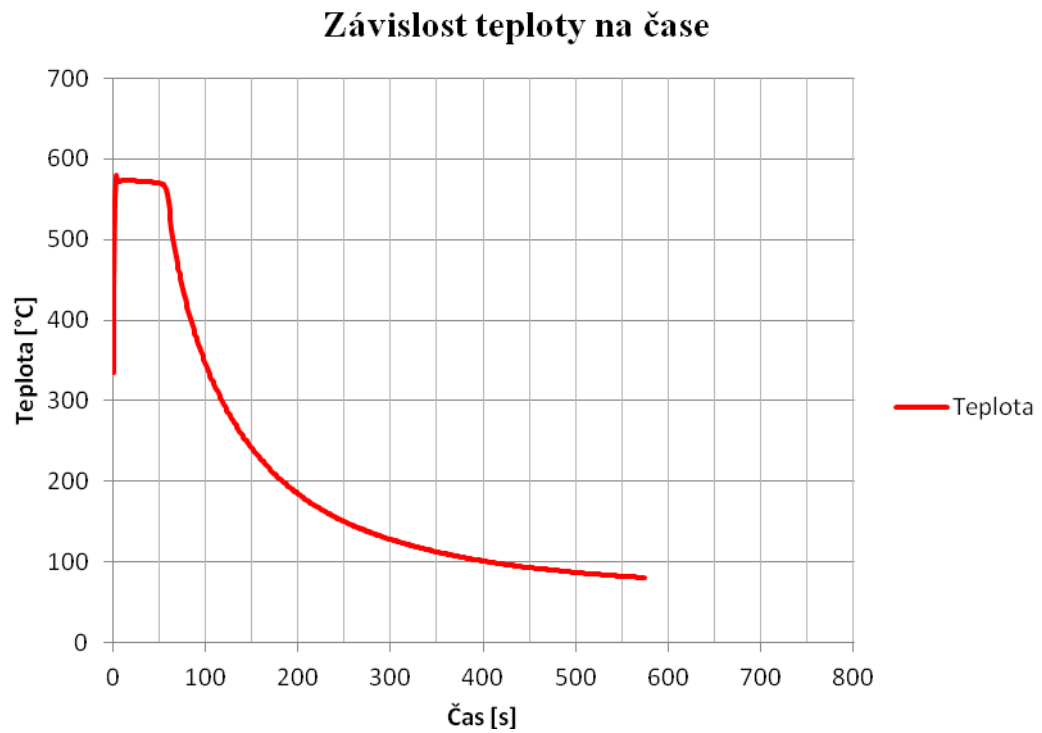
### Měření č. 1



Obr. 3.16 Časové závislosti teploty a dilatace, měření č. 1 – AlSi12



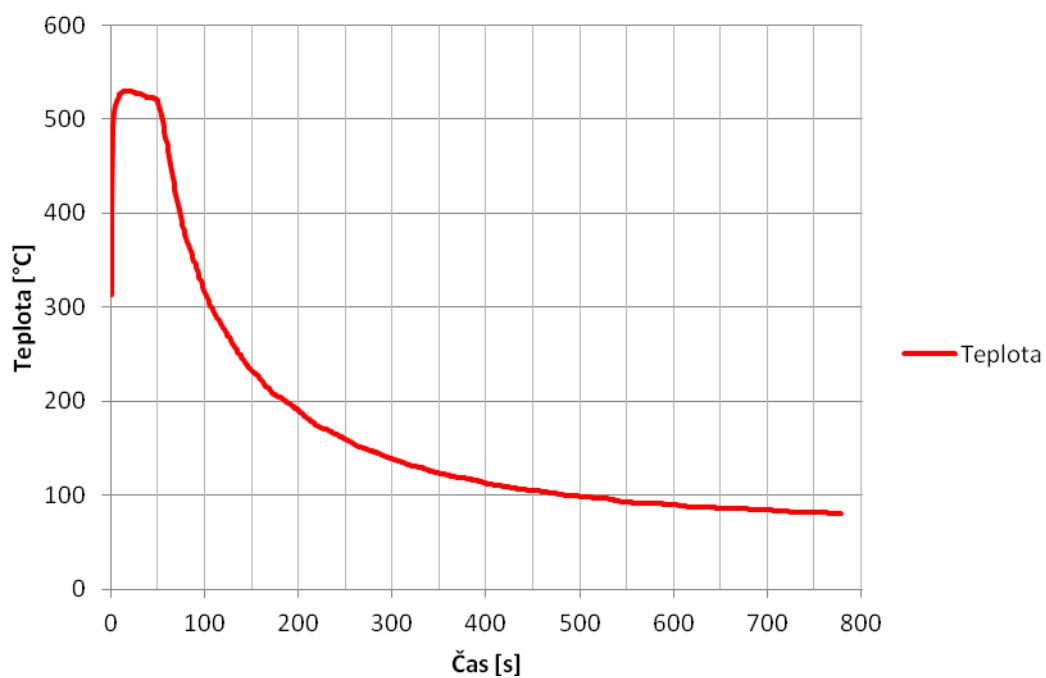
## Měření č. 2



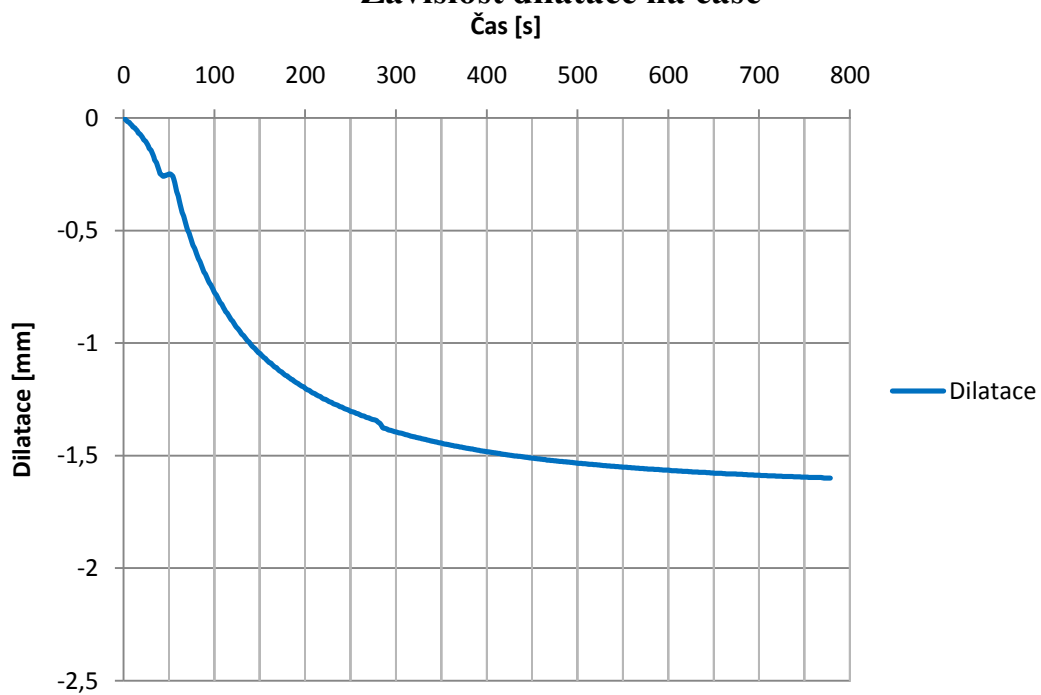
Obr. 3.17 Časové závislosti teploty a dilatace, měření č. 2 – AlSi12

### Měření č. 3

#### Závislost teploty na čase

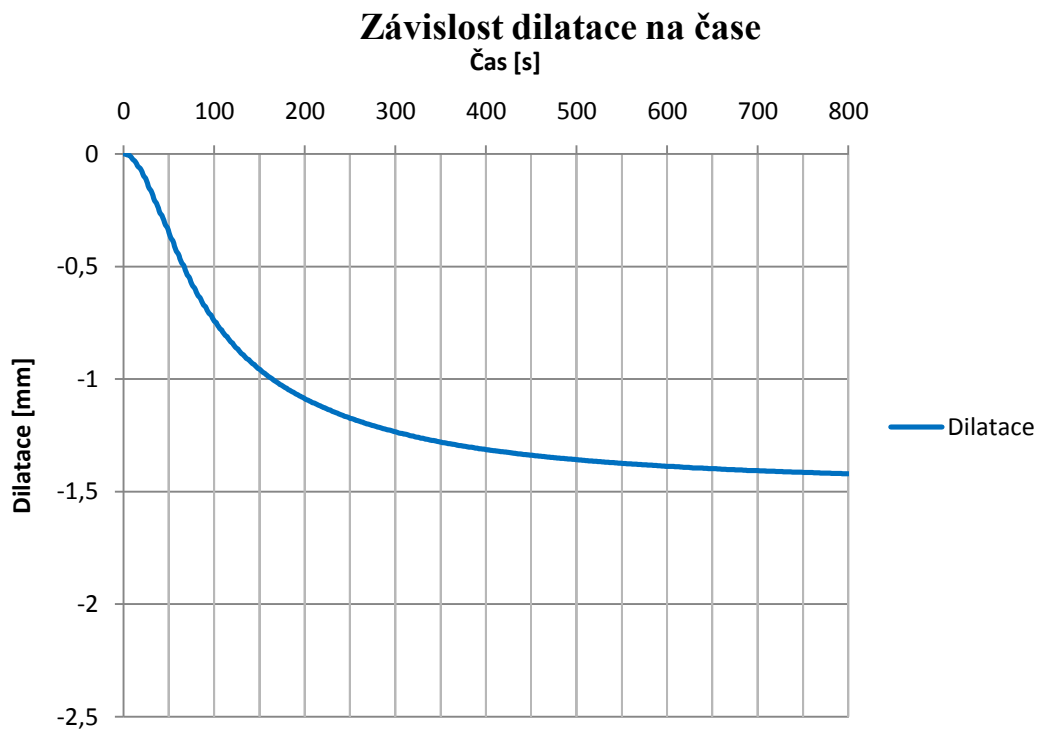
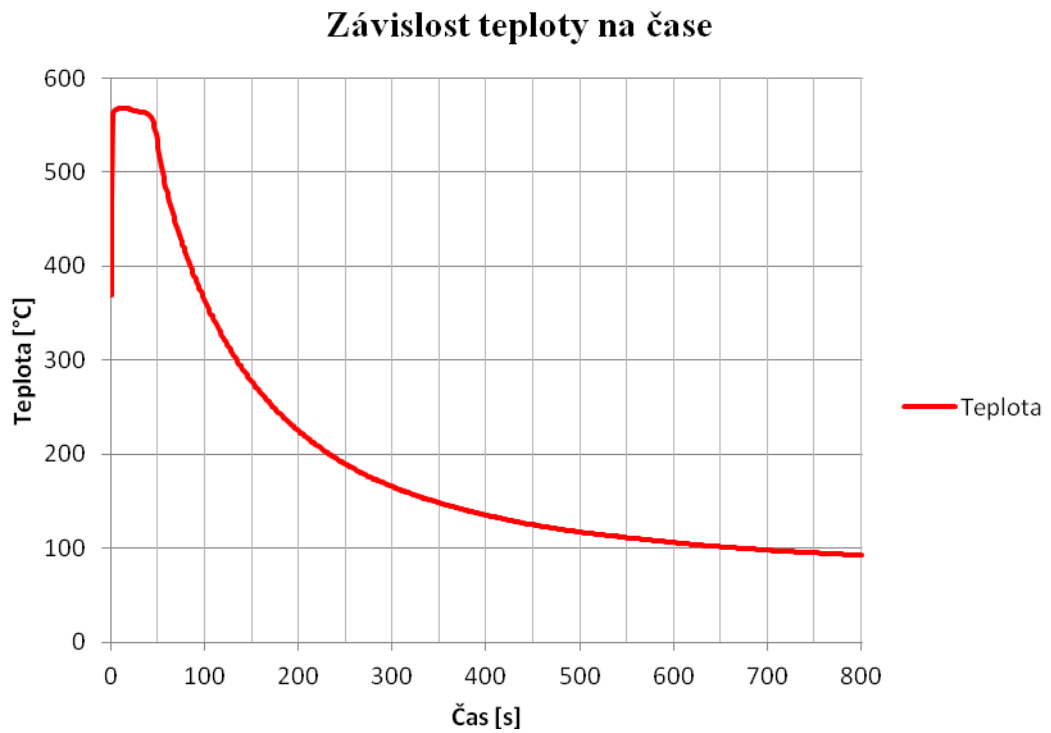


#### Závislost dilatace na čase



Obr. 3.18 Časové závislosti teploty a dilatace, měření č. 3 – AlSi12

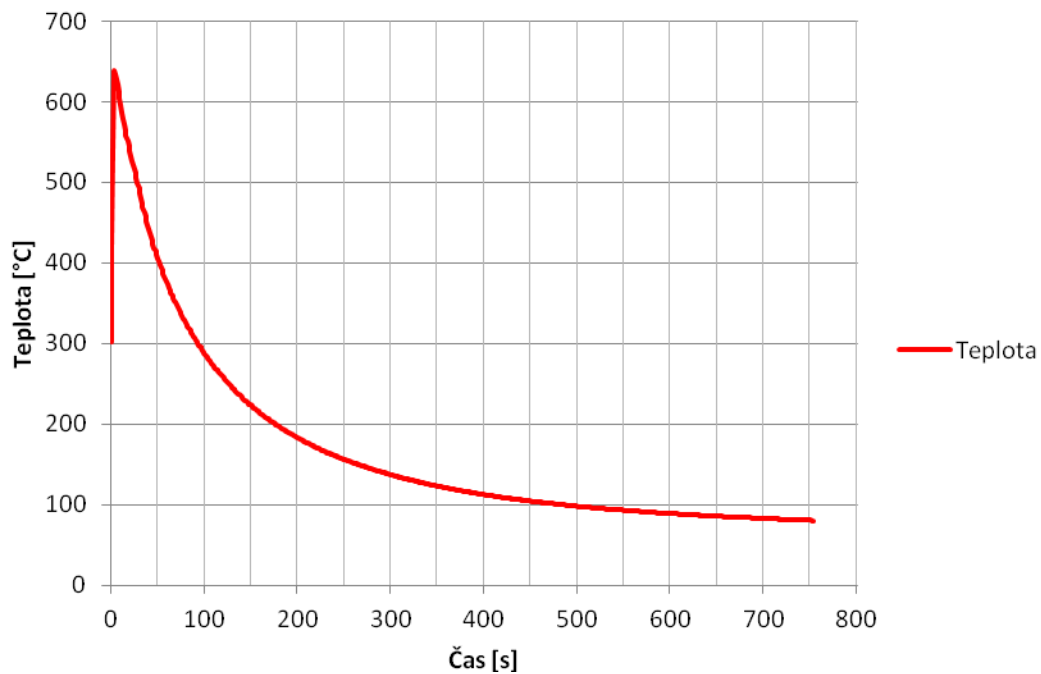
## Měření č. 4



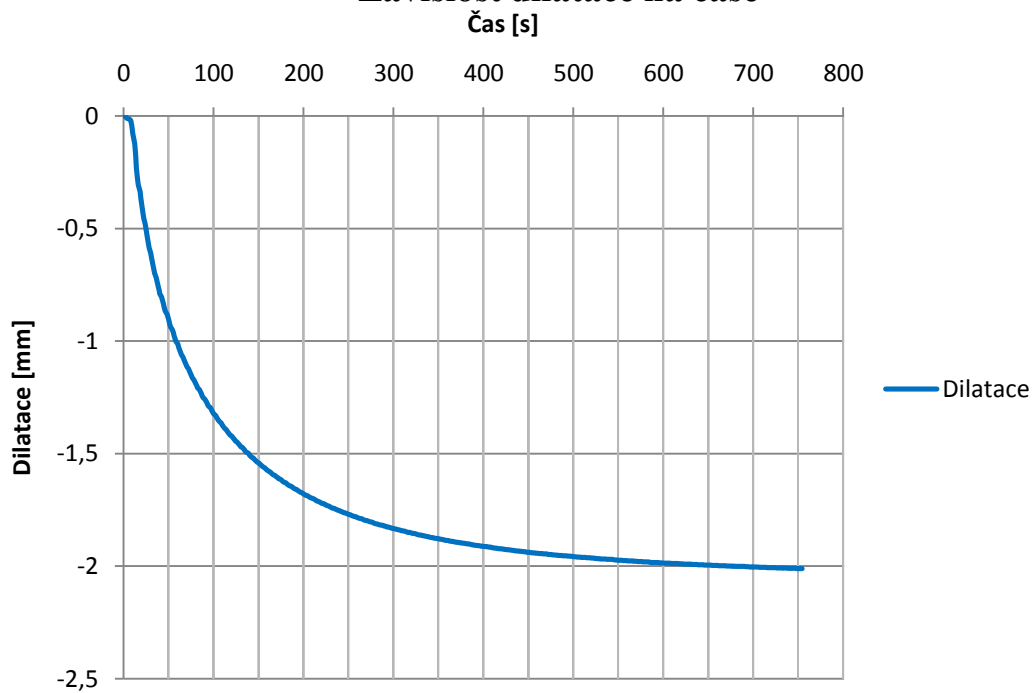
Obr. 3.19 Časové závislosti teploty a dilatace, měření č. 4 – AlSi12

## Měření č. 5

### Závislost teploty na čase



### Závislost dilatace na čase



Obr. 3.20 Časové závislosti teploty a dilatace, měření č. 5 – AlSi12

### 3.5 Vyhodnocení experimentů

Z příslušné naměřené časové závislosti dilatace a teploty byly odečteny příslušné hodnoty, které byly dosazeny do vztahu pro výpočet součinitele teplotní smrštivosti sledovaného materiálu:

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \cdot \Delta T}, \quad (3.1)$$

kde značí:  $\alpha$  – součinitel délkové teplotní roztažnosti [ $K^{-1}$ ],

$l_0$  - počáteční délka [mm],

$\Delta l$  - změna délky [mm],

$\Delta T$  – změna teploty [ $^{\circ}C$ ].

Pro jednotlivá měření byly vypočítané hodnoty součinitele teplotní smrštivosti zpracovány do jednotlivých tabulek, viz tab. 3.6 až 3.20, které jsou níže uvedeny.

Tab. 3.6 Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot součinitele teplotní smrštivosti

| Měření č. 1 – hliník 99,9 %      |  |                             |   |
|----------------------------------|--|-----------------------------|---|
| Počáteční délka $l_0 = 157$ [mm] |  |                             |   |
| Rozsah teplot [ $^{\circ}C$ ]    | Změna teploty $\Delta T$ [ $^{\circ}C$ ] | Změna délky $\Delta l$ [mm] | Součinitel délkové teplotní roztažnosti $\alpha$ [ $K^{-1}$ ] |
| 550 – 500                        | 50                                       | 0,1846                      | 0,0000235159  |
| 500 - 450                        | 50                                       | 0,1672                      | 0,0000212994  |
| 450 - 400                        | 50                                       | 0,1865                      | 0,0000237580  |
| 400 - 350                        | 50                                       | 0,175                       | 0,0000222930  |
| 350 - 300                        | 50                                       | 0,1671                      | 0,0000212866  |
| 300 - 250                        | 50                                       | 0,1771                      | 0,0000225605  |
| 250 - 200                        | 50                                       | 0,1698                      | 0,0000216306  |
| 200 - 150                        | 50                                       | 0,1699                      | 0,0000216433  |
| 150 - 100                        | 50                                       | 0,1669                      | 0,0000212611  |
| 100 - 80                         | 20                                       | 0,0654                      | 0,0000208280  |
| 550 - 80                         | 470                                      | 1,6295                      | 0,0000220829  |

Tab. 3.7 Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot

| Měření č. 2 – hliník 99,9 %      |  |                             |   |
|----------------------------------|--|-----------------------------|---|
| Počáteční délka $l_0 = 157$ [mm] |  |                             |   |
| Rozsah teplot [ $^{\circ}C$ ]    | Změna teploty $\Delta T$ [ $^{\circ}C$ ] | Změna délky $\Delta l$ [mm] | Součinitel délkové teplotní roztažnosti $\alpha$ [ $K^{-1}$ ] |
| 550 - 500                        | 50                                       | 0,2082                      | 0,0000265223  |

|           |     |        |              |
|-----------|-----|--------|--------------|
| 500 - 450 | 50  | 0,2093 | 0,0000266624 |
| 450 - 400 | 50  | 0,2074 | 0,0000264204 |
| 400 - 350 | 50  | 0,1926 | 0,0000245350 |
| 350 - 300 | 50  | 0,1982 | 0,0000252484 |
| 300 - 250 | 50  | 0,1871 | 0,0000238344 |
| 250 - 200 | 50  | 0,1803 | 0,0000229682 |
| 200 - 150 | 50  | 0,1768 | 0,0000225223 |
| 150 - 100 | 50  | 0,1661 | 0,0000211592 |
| 100 - 80  | 20  | 0,0667 | 0,0000212420 |
| 550 - 80  | 470 | 1,7927 | 0,0000242946 |

Tab. 3.8 Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot

| Měření č. 3 – hliník 99,9 %      |                                  |                                |  |
|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--|
| Počáteční délka $l_0 = 157$ [mm] |                                  |                                |  |
| Rozsah teplot<br>[°C]            | Změna teploty<br>$\Delta T$ [°C] | Změna délky<br>$\Delta l$ [mm] | Součinitel délkové teplotní<br>roztáhnutosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ] |
| 550 - 500                        | 50                               | 0,1914                         | 0,0000243822   |
| 500 - 450                        | 50                               | 0,2001                         | 0,0000254904   |
| 450 - 400                        | 50                               | 0,1972                         | 0,0000251210   |
| 400 - 350                        | 50                               | 0,2075                         | 0,0000264331   |
| 350 - 300                        | 50                               | 0,206                          | 0,0000262420   |
| 300 - 250                        | 50                               | 0,1874                         | 0,0000238726   |
| 250 - 200                        | 50                               | 0,1847                         | 0,0000235287   |
| 200 - 150                        | 50                               | 0,1775                         | 0,0000226115   |
| 150 - 100                        | 50                               | 0,162                          | 0,0000206369   |
| 100 - 80                         | 20                               | 0,0637                         | 0,0000202866   |
| 550 - 80                         | 470                              | 1,7775                         | 0,0000240886   |

Tab. 3.9 Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot

| Měření č. 4 – hliník 99,9 %      |                                  |                                |  |
|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--|
| Počáteční délka $l_0 = 157$ [mm] |                                  |                                |  |
| Rozsah teplot<br>[°C]            | Změna teploty<br>$\Delta T$ [°C] | Změna délky<br>$\Delta l$ [mm] | Součinitel délkové teplotní<br>roztáhnutosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ] |
| 550 - 500                        | 50                               | 0,1369                         | 0,0000174395   |
| 500 - 450                        | 50                               | 0,1262                         | 0,0000160764   |
| 450 - 400                        | 50                               | 0,1426                         | 0,0000181656   |
| 400 - 350                        | 50                               | 0,1387                         | 0,0000176688   |
| 350 - 300                        | 50                               | 0,1413                         | 0,0000180000   |
| 300 - 250                        | 50                               | 0,1394                         | 0,0000177580   |
| 250 - 200                        | 50                               | 0,144                          | 0,0000183439   |
| 200 - 150                        | 50                               | 0,1432                         | 0,0000182420   |
| 150 - 100                        | 50                               | 0,1345                         | 0,0000171338   |

|          |     |        |              |
|----------|-----|--------|--------------|
| 100 - 80 | 20  | 0,0449 | 0,0000142994 |
| 550 - 80 | 470 | 1,2917 | 0,0000175051 |

Tab. 3.10 Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot

| Měření č. 5 – hliník 99,9 %      |                                  |                                |   |
|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---|
| Počáteční délka $l_0 = 157$ [mm] |                                  |                                |   |
| Rozsah teplot<br>[°C]            | Změna teploty<br>$\Delta T$ [°C] | Změna délky<br>$\Delta l$ [mm] | Součinitel délkové teplotní<br>roztlačnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ] |
| 550 - 500                        | 50                               | 0,1581                         | 0,0000201401  |
| 500 - 450                        | 50                               | 0,1698                         | 0,0000216306  |
| 450 - 400                        | 50                               | 0,1678                         | 0,0000213758  |
| 400 - 350                        | 50                               | 0,1691                         | 0,0000215414  |
| 350 - 300                        | 50                               | 0,1885                         | 0,0000240127  |
| 300 - 250                        | 50                               | 0,193                          | 0,0000245860  |
| 250 - 200                        | 50                               | 0,2012                         | 0,0000256306  |
| 200 - 150                        | 50                               | 0,1854                         | 0,0000236178  |
| 150 - 100                        | 50                               | 0,1653                         | 0,0000210573  |
| 100 - 80                         | 20                               | 0,0553                         | 0,0000176115  |
| 550 - 80                         | 470                              | 1,6535                         | 0,0000224082  |

Tab. 3.11 Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot

| Měření č. 1 – AlCu4MgTi          |                                  |                                |   |
|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---|
| Počáteční délka $l_0 = 157$ [mm] |                                  |                                |   |
| Rozsah teplot<br>[°C]            | Změna teploty<br>$\Delta T$ [°C] | Změna délky<br>$\Delta l$ [mm] | Součinitel délkové teplotní<br>roztlačnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ] |
| 550 - 500                        | 50                               | 0,2495                         | 0,0000317834  |
| 500 - 450                        | 50                               | 0,1685                         | 0,0000214650  |
| 450 - 400                        | 50                               | 0,1693                         | 0,0000215669  |
| 400 - 350                        | 50                               | 0,1794                         | 0,0000228535  |
| 350 - 300                        | 50                               | 0,1771                         | 0,0000225605  |
| 300 - 250                        | 50                               | 0,1686                         | 0,0000214777  |
| 250 - 200                        | 50                               | 0,1716                         | 0,0000218599  |
| 200 - 150                        | 50                               | 0,1703                         | 0,0000216943  |
| 150 - 100                        | 50                               | 0,1608                         | 0,0000204841  |
| 100 - 80                         | 20                               | 0,0589                         | 0,0000187580  |
| 550 - 80                         | 470                              | 1,674                          | 0,0000226860  |

Tab. 3.12 Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot

| Měření č. 2 – AlCu4MgTi          |                                  |                                |   |
|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---|
| Počáteční délka $l_0 = 157$ [mm] |                                  |                                |   |
| Rozsah teplot<br>[°C]            | Změna teploty<br>$\Delta T$ [°C] | Změna délky<br>$\Delta l$ [mm] | Součinitel délkové teplotní<br>roztlačnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ] |
| 550 - 500                        | 50                               | 0,2519                         | 0,0000320892  |
| 500 - 450                        | 50                               | 0,1933                         | 0,0000246242  |
| 450 - 400                        | 50                               | 0,1869                         | 0,0000238089  |
| 400 - 350                        | 50                               | 0,1971                         | 0,0000251083  |
| 350 - 300                        | 50                               | 0,1908                         | 0,0000243057  |
| 300 - 250                        | 50                               | 0,1924                         | 0,0000245096  |
| 250 - 200                        | 50                               | 0,1901                         | 0,0000242166  |
| 200 - 150                        | 50                               | 0,1929                         | 0,0000245732  |
| 150 - 100                        | 50                               | 0,1861                         | 0,0000237070  |
| 100 - 80                         | 20                               | 0,0728                         | 0,0000231847  |
| 550 - 80                         | 470                              | 1,8543                         | 0,0000251294  |

Tab. 3.13 Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot

| Měření č. 3 – AlCu4MgTi          |                                  |                                |   |
|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---|
| Počáteční délka $l_0 = 157$ [mm] |                                  |                                |   |
| Rozsah teplot<br>[°C]            | Změna teploty<br>$\Delta T$ [°C] | Změna délky<br>$\Delta l$ [mm] | Součinitel délkové teplotní<br>roztlačnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ] |
| 550 - 500                        | 50                               | 0,2122                         | 0,0000270318  |
| 500 - 450                        | 50                               | 0,1634                         | 0,0000208153  |
| 450 - 400                        | 50                               | 0,1715                         | 0,0000218471  |
| 400 - 350                        | 50                               | 0,1856                         | 0,0000236433  |
| 350 - 300                        | 50                               | 0,1777                         | 0,0000226369  |
| 300 - 250                        | 50                               | 0,1826                         | 0,0000232611  |
| 250 - 200                        | 50                               | 0,1767                         | 0,0000225096  |
| 200 - 150                        | 50                               | 0,1723                         | 0,0000219490  |
| 150 - 100                        | 50                               | 0,1703                         | 0,0000216943  |
| 100 - 80                         | 20                               | 0,0557                         | 0,0000177389  |
| 550 - 80                         | 470                              | 1,668                          | 0,0000226047  |

Tab. 3.14 Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot

| Měření č. 4 – AlCu4MgTi          |                                  |                                |   |
|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---|
| Počáteční délka $l_0 = 157$ [mm] |                                  |                                |   |
| Rozsah teplot<br>[°C]            | Změna teploty<br>$\Delta T$ [°C] | Změna délky<br>$\Delta l$ [mm] | Součinitel délkové teplotní<br>roztlačnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ] |
| 550 - 500                        | 50                               | 0,2257                         | 0,0000287516  |
| 500 - 450                        | 50                               | 0,1892                         | 0,0000241019  |
| 450 - 400                        | 50                               | 0,1654                         | 0,0000210701  |



|           |     |        |              |
|-----------|-----|--------|--------------|
| 400 - 350 | 50  | 0,178  | 0,0000226752 |
| 350 - 300 | 50  | 0,1756 | 0,0000223694 |
| 300 - 250 | 50  | 0,1728 | 0,0000220127 |
| 250 - 200 | 50  | 0,1671 | 0,0000212866 |
| 200 - 150 | 50  | 0,1601 | 0,0000203949 |
| 150 - 100 | 50  | 0,1569 | 0,0000199873 |
| 100 - 80  | 20  | 0,0523 | 0,0000166561 |
| 550 - 80  | 470 | 1,6431 | 0,0000222672 |

Tab. 3.15 Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot

| Měření č. 5 – AlCu4MgTi          |                                  |                                |   |
|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---|
| Počáteční délka $l_0 = 157$ [mm] |                                  |                                |   |
| Rozsah teplot<br>[°C]            | Změna teploty<br>$\Delta T$ [°C] | Změna délky<br>$\Delta l$ [mm] | Součinitel délkové teplotní<br>roztlačnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ] |
| 550 - 500                        | 50                               | 0,2874                         | 0,0000366115  |
| 500 - 450                        | 50                               | 0,1888                         | 0,0000240510  |
| 450 - 400                        | 50                               | 0,2022                         | 0,0000257580  |
| 400 - 350                        | 50                               | 0,1916                         | 0,0000244076  |
| 350 - 300                        | 50                               | 0,1852                         | 0,0000235924  |
| 300 - 250                        | 50                               | 0,1848                         | 0,0000235414  |
| 250 - 200                        | 50                               | 0,1854                         | 0,0000236178  |
| 200 - 150                        | 50                               | 0,1768                         | 0,0000225223  |
| 150 - 100                        | 50                               | 0,173                          | 0,0000220382  |
| 100 - 80                         | 20                               | 0,0554                         | 0,0000176433  |
| 550 - 80                         | 470                              | 1,8306                         | 0,0000248082  |

Tab. 3.16 Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot

| Měření č. 1 – AlSi12             |                                  |                                |   |
|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---|
| Počáteční délka $l_0 = 157$ [mm] |                                  |                                |   |
| Rozsah teplot<br>[°C]            | Změna teploty<br>$\Delta T$ [°C] | Změna délky<br>$\Delta l$ [mm] | Součinitel délkové teplotní<br>roztlačnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ] |
| 550 - 500                        | 50                               | 0,1339                         | 0,0000170573  |
| 500 - 450                        | 50                               | 0,1351                         | 0,0000172102  |
| 450 - 400                        | 50                               | 0,1389                         | 0,0000176943  |
| 400 - 350                        | 50                               | 0,1604                         | 0,0000204331  |
| 350 - 300                        | 50                               | 0,1522                         | 0,0000193885  |
| 300 - 250                        | 50                               | 0,1654                         | 0,0000210701  |
| 250 - 200                        | 50                               | 0,1553                         | 0,0000197834  |
| 200 - 150                        | 50                               | 0,1587                         | 0,0000202166  |
| 150 - 100                        | 50                               | 0,1612                         | 0,0000205350  |
| 100 - 80                         | 20                               | 0,0655                         | 0,0000208599  |
| 550 - 80                         | 470                              | 1,4266                         | 0,0000193332  |

Tab. 3.17 Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot

| Měření č. 2 – AlSi12             |                                  |                                |   |
|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---|
| Počáteční délka $l_0 = 157$ [mm] |                                  |                                |   |
| Rozsah teplot<br>[°C]            | Změna teploty<br>$\Delta T$ [°C] | Změna délky<br>$\Delta l$ [mm] | Součinitel délkové teplotní<br>roztlačnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ] |
| 550 - 500                        | 50                               | 0,0757                         | 0,0000096433  |
| 500 - 450                        | 50                               | 0,1317                         | 0,0000167771  |
| 450 - 400                        | 50                               | 0,1451                         | 0,0000184841  |
| 400 - 350                        | 50                               | 0,1572                         | 0,0000200255  |
| 350 - 300                        | 50                               | 0,1536                         | 0,0000195669  |
| 300 - 250                        | 50                               | 0,1507                         | 0,0000191975  |
| 250 - 200                        | 50                               | 0,1492                         | 0,0000190064  |
| 200 - 150                        | 50                               | 0,1516                         | 0,0000193121  |
| 150 - 100                        | 50                               | 0,1494                         | 0,0000190318  |
| 100 - 80                         | 20                               | 0,0623                         | 0,0000198408  |
| 550 - 80                         | 470                              | 1,3265                         | 0,0000179767  |

Tab. 3.18 Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot

| Měření č. 3 – AlSi12             |                                  |                                |   |
|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---|
| Počáteční délka $l_0 = 157$ [mm] |                                  |                                |   |
| Rozsah teplot<br>[°C]            | Změna teploty<br>$\Delta T$ [°C] | Změna délky<br>$\Delta l$ [mm] | Součinitel délkové teplotní<br>roztlačnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ] |
| 550 - 500                        | 50                               | 0,2715                         | 0,0000345860  |
| 500 - 450                        | 50                               | 0,1312                         | 0,0000167134  |
| 450 - 400                        | 50                               | 0,1235                         | 0,0000157325  |
| 400 - 350                        | 50                               | 0,1571                         | 0,0000200127  |
| 350 - 300                        | 50                               | 0,1368                         | 0,0000174268  |
| 300 - 250                        | 50                               | 0,1703                         | 0,0000216943  |
| 250 - 200                        | 50                               | 0,1732                         | 0,0000220637  |
| 200 - 150                        | 50                               | 0,1691                         | 0,0000215414  |
| 150 - 100                        | 50                               | 0,1974                         | 0,0000251465  |
| 100 - 80                         | 20                               | 0,0696                         | 0,0000221656  |
| 550 - 80                         | 470                              | 1,5997                         | 0,0000216791  |

Tab. 3.19 Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot

| Měření č. 4 – AlSi12             |                                  |                                |   |
|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---|
| Počáteční délka $l_0 = 157$ [mm] |                                  |                                |   |
| Rozsah teplot<br>[°C]            | Změna teploty<br>$\Delta T$ [°C] | Změna délky<br>$\Delta l$ [mm] | Součinitel délkové teplotní<br>roztlačnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ] |
| 550 - 500                        | 50                               | 0,0926                         | 0,0000117962  |
| 500 - 450                        | 50                               | 0,1189                         | 0,0000151465  |

|           |     |        |              |
|-----------|-----|--------|--------------|
| 450 - 400 | 50  | 0,1302 | 0,0000165860 |
| 400 - 350 | 50  | 0,1298 | 0,0000165350 |
| 350 - 300 | 50  | 0,1258 | 0,0000160255 |
| 300 - 250 | 50  | 0,1244 | 0,0000158471 |
| 250 - 200 | 50  | 0,1205 | 0,0000153503 |
| 200 - 150 | 50  | 0,1281 | 0,0000163185 |
| 150 - 100 | 50  | 0,1274 | 0,0000162293 |
| 100 - 80  | 20  | 0,0495 | 0,0000157643 |
| 550 - 80  | 470 | 1,1472 | 0,0000155468 |

Tab. 3.20 Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot

| Měření č. 5 – AlSi12             |                                  |                                |   |
|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---|
| Počáteční délka $l_0 = 157$ [mm] |                                  |                                |   |
| Rozsah teplot<br>[°C]            | Změna teploty<br>$\Delta T$ [°C] | Změna délky<br>$\Delta l$ [mm] | Součinitel délkové teplotní<br>roztlačnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ] |
| 550 - 500                        | 50                               | 0,2495                         | 0,0000317834  |
| 500 - 450                        | 50                               | 0,1685                         | 0,0000214650  |
| 450 - 400                        | 50                               | 0,1693                         | 0,0000215669  |
| 400 - 350                        | 50                               | 0,1794                         | 0,0000228535  |
| 350 - 300                        | 50                               | 0,1771                         | 0,0000225605  |
| 300 - 250                        | 50                               | 0,174                          | 0,0000221656  |
| 250 - 200                        | 50                               | 0,1662                         | 0,0000211720  |
| 200 - 150                        | 50                               | 0,1703                         | 0,0000216943  |
| 150 - 100                        | 50                               | 0,1608                         | 0,0000204841  |
| 100 - 80                         | 20                               | 0,0589                         | 0,0000187580  |
| 550 - 80                         | 470                              | 1,674                          | 0,0000226860  |

## 4. DISKUSE VÝSLEDKŮ

Z výše uvedeného je patrné, že hlavním cílem řešení diplomové práce bylo sledování brzděného smršťování odlitků, resp. stanovení součinitele teplotní roztažnosti, resp. smrštivosti vybraných slévárenských slitin. Součinitel teplotní smrštivosti je důležitým materiálovým parametrem slévárenských slitin, v této souvislosti je třeba konstatovat, že tyto hodnoty jsou v literatuře málo uváděny. Některé tabulky uvádí jen hodnoty čistých kovů, popř. nejvíce používaných slitin. ČERNOCH [4] ve své publikaci uvádí pro čistý hliník 99,0 % hodnotu tohoto součinitele  $23,6 \cdot 10^{-6} \text{ [K}^{-1}\text{]}$ , pro AlSi12 hodnotu  $20,4 \cdot 10^{-6} \text{ [K}^{-1}\text{]}$ , AlCu4MgMn je  $23,0 \cdot 10^{-6} \text{ [K}^{-1}\text{]}$  a AlSi12NiMgCu je  $19,0 \cdot 10^{-6} \text{ [K}^{-1}\text{]}$ . Uvedené hodnoty velmi dobře korespondují s hodnotami vypočítanými z naměřených závislostí prováděných v rámci experimentů této diplomové práce. Hodnoty uvedené v experimentální části této diplomové práce zobrazují změny probíhající v hliníku čistoty 99,9% a slitinách hliníku AlCu4MgTi, AlSi12 během procesu tuhnutí resp. chladnutí odlitku při gravitačním odlití do kovové formy. Při experimentu byly sledovány rozměrové změny při tuhnutí resp. chladnutí odlitků tvaru „I“. Do výsledků experimentu nebyla započítána část náběhové křivky, ovlivněná vyrovnáním teplot taveniny a kovové formy. Toto nastalo při teplotě soustavy cca 550°C. K měření bylo použito zvlášť konstruované zařízení – kovová forma s pohyblivým elementem kopírujícím dilataci kovu. Zařízení bylo propojeno s již dříve popsaným měřicím zařízením a s PC vybaveným odpovídajícím softwarem.

Lineární smršťování začíná po vytvoření tuhé souvislé kůry, nikoliv tedy při chladnutí od teploty likvidu, ale od teploty nižší, přičemž v ostatních částech odlitku je ještě současně tekutá fáze. Volná (nebrzděná) tepelná dilatace slitin by probíhala tehdy, jestliže by proti dilatacím nepůsobily odpory, při volném smršťování by se odlitek smrští o hodnotu, která odpovídá fyzikálnímu tepelnému smrštění slitiny. Výsledný rozměr odlitků je proto menší než při smršťování brzděném.

Cílem experimentu bylo stanovit křivky průběhu dilatačních změn probíhajících při tuhnutí materiálu a ze získaných hodnot stanovit výpočtem součinitel lineární roztažnosti  $\alpha$  pro jednotlivá tepelná rozmezí probíhajícího tuhnutí a chladnutí. Experiment byl proveden na pěti vzorcích od každého kovu uvedeného v úvodu této kapitoly. Hodnoty pro jednotlivá měření jsou uvedeny v kapitole 3. Lze konstatovat, že největší délkové změny s průměrnou hodnotou  $\Delta l = 1,734 \text{ mm}$

vykazuje slitina AlCu4MgTi a naopak nejmenší hodnotu  $\Delta l = 1,42$  mm vykazuje slitina AlSi12. Tomu odpovídají i poměry součinitele lineární roztažnosti  $\alpha$ . V průběhu jednotlivých měření bylo zjištěno u většiny vzorků opakující se mírný nárůst součinitele  $\alpha$  v rozmezí teplot 400 až 250 °C. Obecně lze konstatovat, že koeficient  $\alpha$  má v rozmezí teplot 550 až 80 °C klesající tendenci.

Závěrem této části práce je nutno podotknout, že prováděné experimenty jsou náchylné na okolní prostředí, je nutno věnovat značnou pečlivost v přípravě jednotlivých experimentů, včetně přípravy a seřízení měřicího zařízení i v přípravě a metalurgickém ošetření odlévané slitiny, včetně její teploty. Při nedodržení některé zásady, nemůžeme počítat s naměřením odpovídajících hodnot.

## 5. ZÁVĚR

Tématem diplomové práce bylo: „Sledování dilatačních vlastností hliníku a jeho slitin.“

Diplomová práce se skládá z části teoretické a experimentální. Teoretická část uvádí základní poznatky o hliníku a jeho slitinách, počínaje popisem jeho zdrojů základních surovin, výrobu surového kovu a jeho zušlechťování různými přísadami a technologií výroby. Rovněž jsou v této části uvedeny poznatky o jeho struktuře, krystalizaci, vlivu očkujících a legujících prvků, jsou zde popsány vlastnosti, zejména slévárenské, jednotlivých slitin hliníku. Samostatná kapitola se zabývá dilatometrií. Hlavní část diplomové práce – experimentální, popisuje podmínky prováděných experimentů, které byly zaměřeny na sledování časových závislostí smrštění a teploty při odlévání odlitků jednoduchého tvaru „I“ z hliníku čistoty 99,9% a slitin hliníku na bázi křemíku a mědi. Z naměřených závislostí byly získány hodnoty potřebné k výpočtu součinitele teplotního smrštění, resp. teplotní roztažnosti  $\alpha$ . Na základě provedených experimentů lze formulovat tyto dílčí závěry:

1. Navržené a odzkoušené měřicí zařízení, které se skládá ze základové desky měřicího rámu, dutiny formy, pohyblivé čelisti, táhla, indukčního snímače, CRYSTALDIGRAM PC – 4T2L s A/D převodníkem a sběrníci dat, PC, regulátoru vstupního napětí, teplotního čidla, které je vhodné pro sledování experimentů brzděného smršťování odlitků. Při jeho použití je nutná příprava a jeho seřízení, včetně nastavení měřicího programu.

2. Pro prováděné experimenty je nutno dobře připravit taveniny kovů, použít k tavení grafitové kelímky, provést rafinaci taveniny před odléváním pomocí rafinační soli T3 a změření teploty.

3. Odlévání taveniny do dutiny formy je potřeba provést v krátkém časovém okamžiku do 5 sekund.

4. Na základě získaných záznamů je třeba provést správné odečtení příslušné hodnoty dilatace odpovídající danému rozdílu teplot.

5. Na základě výpočtů hodnot sledovaného součinitele teplotní roztažnosti, resp. smrštivosti je z výsledků zřejmé, že zjištěné hodnoty se blíží tabelární hodnotě pro čistý hliník, která činí dle ČERNOCHA [4]  $23,6 \cdot 10^{-6} \text{ [K}^{-1}\text{]}$ . Vypočítané hodnoty pro čistý hliník v teplotním intervalu 550 až 80 °C jsou od  $17,5 \cdot 10^{-6} \text{ [K}^{-1}\text{]}$

do  $24,3 \cdot 10^{-6} [\text{K}^{-1}]$ . U slitiny AlSi12 je tento součinitel od  $18 \cdot 10^{-6} [\text{K}^{-1}]$  do  $22,7 \cdot 10^{-6} [\text{K}^{-1}]$  a u slitiny AlCu4MgTi od  $22,3 \cdot 10^{-6} [\text{K}^{-1}]$  do  $24,8 \cdot 10^{-6} [\text{K}^{-1}]$ .

Z důvodu, že diplomová práce je zaměřena na základní výzkum, není nutné provádět ekonomické hodnocení.

Naměřené výsledky jsou přehledně uspořádány v příslušných grafech a k nim příslušných tabulkách naměřených hodnot. Vždy po pěti vzorcích od každého ze tří kovů. Zpracování těchto výsledků bylo zaměřeno na stanovení součinitele teplotní smrštivosti a sledování hodnot dilatace jednotlivých vzorků v závislosti na druhu slitiny teplotě a čase.

## 6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KOLEKTIV AUTORŮ: Příručka o hliníku. 1. vyd. Praha 1969.
- [2] PÍŠEK, F., JENÍČEK, L., RYŠ, P.: Nauka o materialu I. Nauka o kovech 3. Svazek. 2. Rozšířené a zcela přepracované vydání Praha 1973.
- [3] PLACHÝ, J., PROCHÁZKA, J., PRUDKÝ, J.: Technologie slévání, tváření a svařování. [Skripta] ČVUT Praha 1970.
- [4] ČERNOCH, S.: Strojně technická příručka. 13. upravené vydání Praha 1977.
- [5] VETIŠKA, A.: Teoretické základy slévárenské technologie. 2. upravené vydání Praha 1974.
- [6] MICHNA, Š. a kol.: Encyklopedie hliníku. 1. vyd. Prešov 2005.
- [7] MORÁVEK, J.: Sledování rozměrových změn při tuhnutí a chladnutí odlitků ze slitin hliníku. [Diplomová práce]. KSP – FS, TU v Liberci 2008.



## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nijak nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci, nebo poskytnou licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL, v tomto případě má TUL právo po mně požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do její skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 28.5.2010

Podpis:.....

## **Declaration**

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date: 28.5.2010

Signature:.....