

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní



## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

2008

PETR BAŽANT

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program B2341 – Strojírenství

Materiály a technologie  
zaměření strojírenská metalurgie

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení strojírenské metalurgie

**Sledování rozměrových změn odlitků ze slitin hliníku v průběhu jeho  
tuhnutí**

Observation of the dilatation changes of aluminium – base alloys castings  
during their solidification

**Petr Bažant**

KSP – SM – B7

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

Konzultant bakalářské práce: Ing. Zdeněk Hošek – TU v Liberci

**Rozsah práce a příloh**

Počet stran textu: 41

Počet tabulek: 3

Počet příloh: 1

Počet obrázků: 17

Počet vzorců: 5

Datum: 4.1.2008

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych poděkoval vedoucí mé bakalářské práce prof. Ing. Ivě Nové, CSc.  
a konzultantovi Ing. Zdeňku Hoškovi za cenné rady a ochotu při psaní mé  
bakalářské práce.

## **ANOTACE**

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Oddělení strojírenské metalurgie

Studijní program: B2341 Strojírenství  
Diplomant: Petr Bažant  
Téma práce: Sledování rozměrových změn odlitků ze slitin  
hliníku v průběhu jeho tuhnutí

Observation of the dilatation changes of  
aluminium – base alloys castings during their  
solidification

Číslo DP: KSP – SM – B7  
Vedoucí DP: prof. Ing. Iva Nová, CSc – TU v Liberci  
Konzultant: Ing. Zdeněk Hošek – TU v Liberci

### **Abstrakt:**

Bakalářská práce se zabývá sledováním rozměrových změn odlitků z čistého hliníku v průběhu jejich tuhnutí.

Práce byla zaměřena na sledování hodnot dilatace a teplot při tuhnutí a chladnutí taveniny čistého hliníku. Hodnoty byly zaznamenány měřicím zařízením a přeneseny do počítače. Pro tento experiment bylo odlito 10 kusů odlitků z čistého hliníku. Naměřené hodnoty byly zapsány do tabulky a dané závislosti vyneseny do grafů. Poté probíhalo vyhodnocování grafů a naměřených hodnot a zjišťování významných hodnot a závislostí. V závěru práce jsou pak získané poznatky vyhodnoceny.

**Abstract:**

The thesis deals with observation of the dilatation changes of pure aluminium castings during their dilatation.

The paper focuses on the observation of dilatation values, solidification and cooling temperatures of the aluminium melt. The values were recorded by measuring instrument and transmitted into a computer. Ten aluminium castings were used for this experiment. Measured values were written down into a chart and the given dependances recorded in a graph. After that the values and graphs were analysed. The end of the paper deals with the outcomes of the whole experiment.

**Místopřísežné prohlášení:**

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

V Liberci, 4 ledna 2008

.....  
Petr Bažant  
Haratice 146  
468 46 Plavy

## OBSAH

	Str.
Seznam použitých symbolů a zkratek	8
1. ÚVOD	9
2. REŠERŠNÍ ČÁST PRÁCE	10
2.1 Suroviny pro výrobu hliníku	10
2.2 Vnitřní struktura hliníku a jeho slitin	11
2.3 Charakteristika čistého hliníku a jeho slitin	12
2.3.1 Slitiny hliníku	13
2.4 Vlivy na utváření vnitřní struktury	15
2.5 Vlastnosti hliníku a jeho slitin	15
2.6 Tavení hliníku a jeho slitin	18
2.6.1 Vnitřní uspořádání taveniny	19
2.7 Krystalizace hliníku a jeho slitin	20
2.7.1 Mechanismus krystalizace ve formě	21
2.7.2 Postup krystalizace	21
2.7.3 Ovlivňování krystalizace	22
2.8 Tepelné pochody v soustavě kov – forma	23
2.9 Smršťování odlitků	24
2.9.1 Vlivy na smršťování	26
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE	29
3.1 Popis měřicího zařízení	29
3.2 Charakteristika použité slévárenské formy	32
3.3 Tavení a příprava taveniny	33
3.4 Popis průběhu experimentů	33
3.5 Vyhodnocení výsledků	37
4. DISKUZE VÝSLEDKŮ	38
5. ZÁVĚR	39
6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	41
PŘÍLOHA	

## Seznam použitých symbolů a zkratk

$\xi$ - tloušťka ztuhlé vrstvy odlitku.....	[m]
$\delta$ - tloušťka dvoufázového pásma.....	[m]
$\epsilon_{VL}$ - objemové smrštění kovu v tekutém stavu .....	[%]
$\alpha_{VL}$ - součinitele objemového smrštění v tekutém stavu .....	[K <sup>-1</sup> ]
$T_l$ - teplotu lití .....	[°C]
$T_L$ - teplotu likvidu .....	[°C]
$\epsilon_{VK}$ - smrštění při krystalizaci .....	[%]
$\alpha_{VK}$ - součinitele objemového smrštění v intervalu teplot .....	[K <sup>-1</sup> ]
$T_S$ - teplotu solidu.....	[°C]
$V_{st}$ - objem staženiny .....	[m <sup>3</sup> ]
$\beta$ - součinitel stahování.....	[-]
$V_0$ - objem odlitku .....	[m <sup>3</sup> ]
$V_N$ - objem nálitku .....	[m <sup>3</sup> ]
$\epsilon_{VS}$ - objemové smrštění v odlitku v tuhém stavu.....	[%]
$V_1$ - objem odlitku za teploty $t_1$ .....	[m <sup>3</sup> ]
$V_0$ - objem odlitku za teploty $t_0$ .....	[m <sup>3</sup> ]
$\alpha_{VS}$ - součinitele objemového smrštění v tuhém stavu .....	[K <sup>-1</sup> ]
$T_o$ - teplotu okolí .....	[K]
$T_S$ - teplotu solidu .....	[K]
$b_f$ - součinitel tepelné akumulace formy .....	[W.s <sup>1/2</sup> .m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$\lambda_f$ - součinitel tepelné vodivosti materiálu formy .....	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$c_f$ - měrná tepelná kapacita formy .....	[J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$a_f$ -součinitel teplotní vodivosti formy .....	[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]



## 1. ÚVOD

Přestože je hliník v přírodě po kyslíku a křemíku nejrozšířenější prvek (8%), byl objeven teprve na samém počátku 19. stol., v roce 1807 nebo 1808. Je vázán ve sloučeninách bauxitu, kryolitu, korundu atd. Na jeho existenci poukázal Angličan **Humhry Davy**. Izolovat hliník se však podařilo až dánskému chemikovi **Hansu Christianovi Oerstedovi** v roce 1825. Výroba hliníku však byla velmi drahá, což bránilo jeho rozšíření. Teprve v roce 1854 francouzský chemik **Henry Etienne Sainte-Claire Deville** vynalezl způsob, jak průmyslovým způsobem vyrábět hliník levně. Konečně se mohl začít hliník ve větší míře používat a mohlo se tak využít jeho mnohých výhodných vlastností (nízká hustota, tvárnost, odolnost proti korozi, vynikající tepelná a zejména elektrická vodivost). Přesto se dále hledaly způsoby ještě výhodnější výroby. Podařilo se to francouzskému metalurgovi **Paulu Louisu Héroultovi** a nezávisle na něm **Američanu Charlesu Martinovi Hallovi** v roce 1886, kdy objevili způsob průmyslové výroby elektrolýzou. Tento způsob je základem dnešní výroby. V technické praxi se využívají hlavně slitiny hliníku, čistý hliník se využívá velmi málo. Slitiny hliníku se používají pro výrobu automobilových a leteckých dílů. Slitiny hliníku se vyznačují poměrně velkým stahováním, především při odlévání do pískových forem. Tyto odlitky je třeba nálitkovat.

S touto problematikou souvisí i dlouhodobý výzkum tuhnutí odlitků při jejich současné změně rozměrů prováděný na naší Katedře strojírenské technologie, oddělení strojírenské metalurgie, TU v Liberci. V rámci této problematiky je řešena i tato bakalářská práce, která byla započata jako jedna z prvních na toto téma. Sleduje dilatační vlastnosti pouze čistého hliníku při tuhnutí odlitků tvaru válce  $\varnothing 60 \times 70$  mm a je řešena v rámci výzkumného záměru MSM 242100002.

## 2. REŠERŠNÍ ČÁST PRÁCE

### 2.1 Suroviny a výroba hliníku

Hlavní surovinou pro výrobu hliníku je bauxit. Lze ho vyrobit i z jiných surovin jako např. kaolin, leucit atd., ale výroba z těchto surovin je velice nákladná. Bauxit je nerost na bázi hydroxidu hlinitého, jehož obsah hliníku vyjádřen kyslíčnickem hlinitým je větší než 40-45%. Přímá výroba hliníku z bauxitu není možná. Začíná výrobou čistého  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , který se elektrolýzou zpracovává na kovový hliník

Pochody výroby  $\text{Al}_2\text{O}_3$  se dělí na pochody kyselé a zásadité. Kyselých metod se používá ke zpracování nebauxitických surovin. V současné době lze uplatnit tyto metody výroby hliníku:

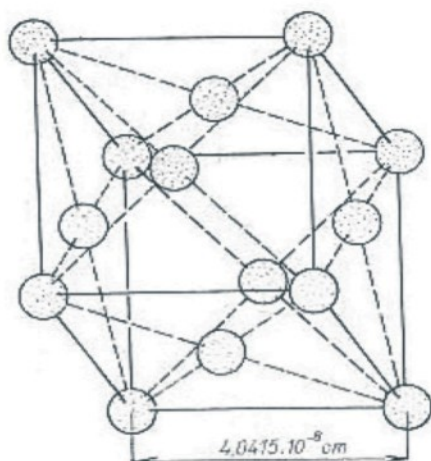
**Metoda Bayerova** - zpracování bauxitu vodným roztokem hydroxidu sodného za vyšších teplot. Tím vzniká hlinitan sodný a zbylé nerozpustné složky rudy. Nerozpustný zbytek se oddělí usazováním a filtrací. Pro urychlení štěpení roztoku kyslíčnicku hlinitého se přidává jako očkovací látka velké množství hotového krystalického hydroxidu hlinitého. Vyloučený hydroxid hlinitý se při  $1200^\circ\text{C}$  kalcinuje na  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

**Spékací metoda** – založena na zahřívání drceného bauxitu se sodou a vápnem na vysokou teplotu v rotačních pecích.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  přechází na hlinitan sodný. Spečenec se vyluhuje vodou, přitom se převážná část  $\text{Al}_2\text{O}_3$  převede do roztoku a nerozpustné části vytvoří kal. Získaný hlinitanový roztok se po vyčištění rozkládá pomocí  $\text{CO}_2$  na hydroxid hlinitý. Dále se postupuje jako u Bayerovy metody. Spékací metoda je vhodná pro zpracování bauxitů s nižším křemíkovým modulem, poměrem  $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{SiO}_2$ .

**Výroba hliníku elektrolýzou** – dnes nejpoužívanější metoda. Spočívá v tom, že kyslíčnick hlinitý, jehož bod tání je přibližně  $2000^\circ\text{C}$ , se rozpouští v roztaveném kryolitu ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ). Elektrolýzou tohoto roztoku se získá na katodě hliník. Na anodě se odděluje kyslík. Elektrolyzní vany pro rozklad  $\text{Al}_2\text{O}_3$  jsou napájeny stejnosměrným proudem velké intenzity.

## 2.2 Vnitřní struktura hliníku a jeho slitin

Hliník krystalizuje v krychlové prostorově středěné soustavě. Každá



Obr. 2-1 Krychlová elementární plošně středěná buňka hliníku.

elementární buňka je tvořena 14 atomy.

Obr. 2-1 zobrazuje elementární buňku.

Při teplotách pod 658 °C je hliník

v pevném stavu a vazba mezi atomy se

nazývá kovová. Tato vazba se vyskytuje

u prvků s málo elektrony ve valenční

vrstvě. Hliník má 3 valenční elektrony.

Podstatou kovové vazby je snadné

uvolňování elektronů. Tento jev

nazýváme elektronový plyn. Elektronový

plyn je charakteristickým znakem

kovových materiálů a vysvětluje dobrou

elektrickou a tepelnou vodivost kovů. Nad teplotou 658 °C je hliník v tekutém

stavu. V tomto stavu jsou jeho atomy dokonale neuspořádané a jsou

v neustálém pohybu. Čím vyšší je teplota, tím vyšší je rychlost pohybu

atomů.

Dokonalá struktura se ve skutečnosti nevyskytuje. Skutečná krystalová mřížka obsahuje vady.

Vady dělíme dle rozsahu na:

- a) bodové – prázdná místa v krystalové mřížce (vakance), přítomnost cizích atomů
- b) lineární – malý rozsah ve dvou směrech, protáhlé ve třetím směru
- c) plošné – tvar tenké plochy
- d) objemové – vznikají z vad uvedených výše

Při krystalizaci zůstávají některá místa v krystalické mřížce neobsazena. Prázdná místa umožňují pohyb atomů mřížkou, vyvolávají pnutí a vedou k deformaci mřížky. Deformace mřížky může být také způsobena nečistotami, které jsou obsaženy v základním kovu a to substitučně či interstiticky. Tato deformace mřížky je znázorněna na obr. 2-2.

U krystalových mřížek technických kovů se mohou vyskytovat též kombinace různých vad. Vady a jejich kombinace mají podstatný vliv na mechanické hodnoty hliníku a jeho slitin.



Obr. 2-2 Deformace mřížky přítomností cizích atomů

- a) atomy nečistot mají větší průměr než atomy základního kovu
- b) mřížka bez deformace
- c) atomy nečistot mají menší průměr než atomy základního kovu

### 2.3 Charakteristika čistého hliníku a jeho slitin

Kovy, jejichž mřížka je tvořena převážně atomy jediného druhu, se nazývají čisté kovy. Jejich mechanické vlastnosti nejsou však vždy dobré, proto se k čistým kovům přidávají legury (příspěvky). Kovový materiál, který je z chemického hlediska složen ze dvou či více prvků se nazývá slitina

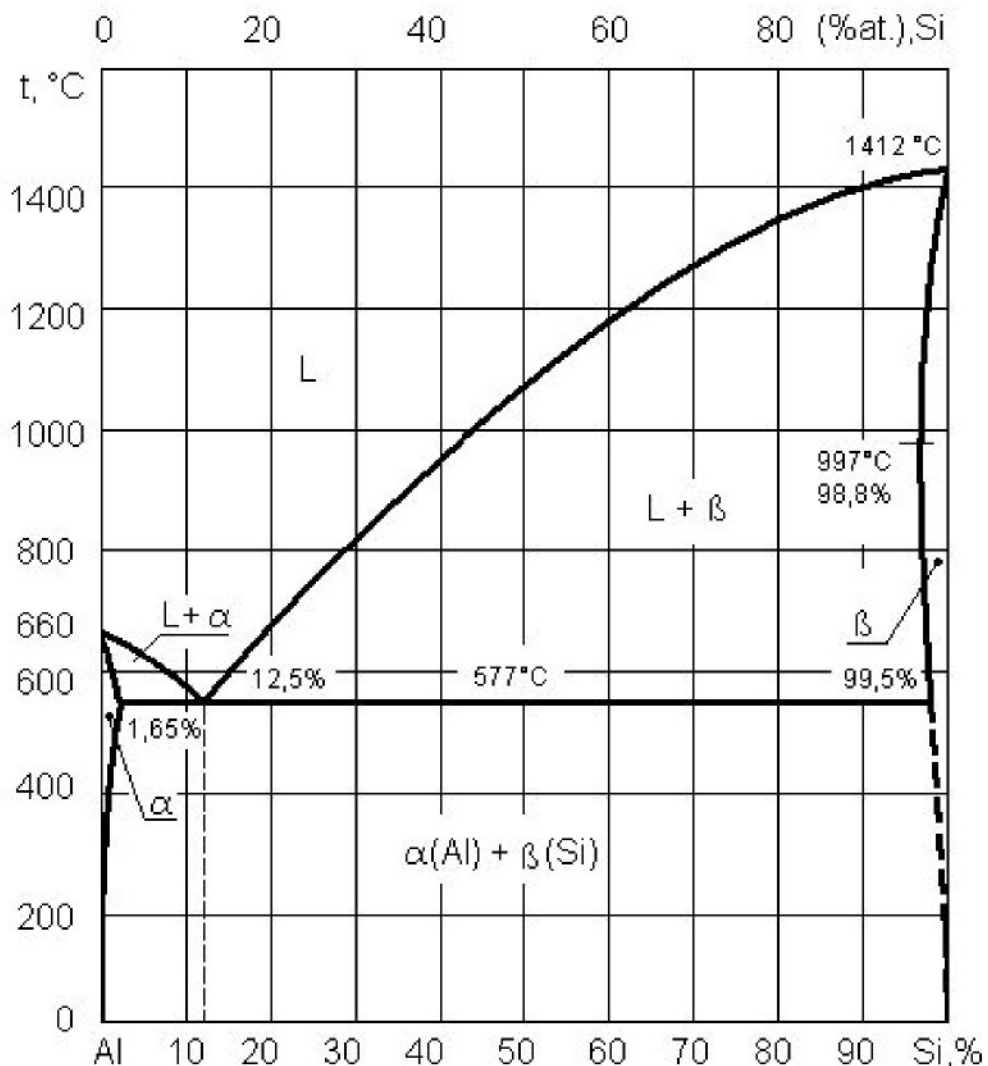
Hliník se využívá jako čistý kov i jako slitina. Největší podíl hliníku je vyráběn v čistotách od 90% do 99,9% Al. V této čistotě se používá pro běžné účely. Hliník vyšších čistot se používá pro speciální účely v elektrotechnice. Všechny druhy hliníku obsahují určité procento nečistot, které však značně ovlivňují jeho vlastnosti. V hliníku se vyskytují především tyto nečistoty: Fe, Si, Cu, Mg, Mn.

Pro zlepšení některých mechanických či jiných vlastností čistého hliníku se záměrně přidávají některé legující prvky. Slitin hliníku byl doposud objeven velký počet. Používá se však pouze několik základních typů: Al – Cu, Al – Mg, Al – Zn, Al – Si, Al – Mn. Podle způsobu použití se hliníkové slitiny dělí na slévárenské slitiny a slitiny pro výrobu tvářených polotovarů. Z hlediska metalurgického se Al slitiny dělí na vytvrditelné a nevytvrditelné.

### 2.3.1 Slitiny hliníku

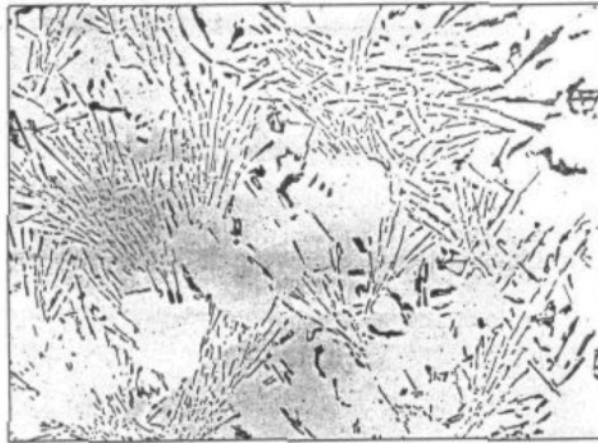
Slitiny hliníku využíváme z důvodu zlepšení vlastností oproti čistému hliníku. Jedná se hlavně o změnu mechanických vlastností a to zvýšení tvrdosti, pevnosti či odolnosti proti opotřebení. Další vlastnosti, které legující prvky ovlivňují jsou tvářitelnost, slévatelnost a svařitelnost. Legujícími prvky můžeme docílit i zlepšení užitných vlastností, mezi které patří odolnost proti korozi, či leštitelnost a elektrická vodivost. Mezi nejběžnější legující prvky hliníku patří křemík a hořčík, dále pak měď, mangan a zinek.

**Slitiny hliníku typu Al – Si** - binární slitiny Al-Si označujeme siluminy.

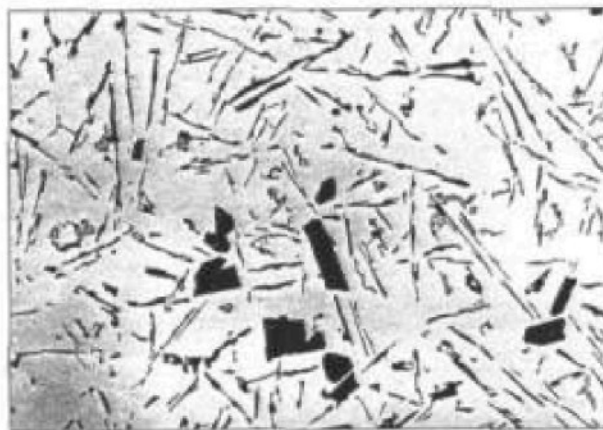


Obr. 2-3 Rovnovážný diagram Al-Si

Obr. 2-3 znázorňuje jejich rovnovážný diagram. Z obrázku je zřejmé, že siluminy dělíme na podeutektické, viz. obr. 2-4, eutektické a nadeutektické, viz. obr. 2-5. Podeutektické slitiny obsahují 4,5-10% křemíku, eutektické mají 10-13% obsahu křemíku. Slitiny s obsahem křemíku vyšším než 13% jsou nadeutektické. Pro slévárenské slitiny jsou nejvhodnější siluminy eutektického či mírně podeutektického složení.



Obr. 2-4 Struktura podeutektické slitiny Al - Si



Obr. 2-5 Struktura nadeutektické slitiny Al – Si

Tyto slitiny mají všestranné využití – od lití do písku až po přesné lití. Nadeutektické slitiny se využívají k odlévání pístů motorů. V současné době mají značné uplatnění i ternární slitiny Al-Si-Cu a Al-Si-Mg, které se využívají především pro výrobu odlitků v automobilovém průmyslu.

**Slitiny hliníku typu Al – Mg** - řadíme mezi nejkvalitnější slévárenské slitiny hliníku. Nevýhodou těchto slitin je sklon k tvorbě staženin, nízká zabíhavost a vysoká smršťivost.

## 2.4 Vlivy na utváření vnitřní struktury

Rychlost chlazení má vliv zejména na krystalizaci roztaveného kovu a na velikost krystalů. Pro rovnovážný stav dle rovnovážných diagramů je nutná pomalá rychlost ochlazování, přibližně  $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . Na krystalizaci roztaveného kovu a na velikost krystalů má největší vliv rychlost ochlazování. Krystalizace je závislá na krystalizační schopnosti, která je závislá na počtu zárodků, jež se vytvoří v  $1\text{ cm}^3$  za 1s, a na rychlosti růstu krystalu vyjádřené v  $\text{cm}/\text{s}$ . Tyto veličiny jsou závislé na stupni podchlazení roztaveného kovu. Na rychlosti ochlazování není příliš závislý lineární růst krystalu. Rychlost ochlazování roste do určité hodnoty, která se pak ustálí a na teplotě přestane být závislá. Na rychlosti ochlazování je však závislá krystalizační schopnost, proto při malé rychlosti ochlazování vzniká jen malý počet krystalizačních zárodků a ty pak rostou do velkých rozměrů. Při velké rychlosti ochlazování vzniká velké množství krystalizačních zárodků, z čehož vyplývá vznik jemné struktury litého materiálu.

Mimo rychlosti ochlazování má na výslednou strukturu vliv směr odvodu tepla. Kovy krystalizují dendriticky (tedy i hliník), to znamená, že zárodek roste ve směru hlavních os krystalu a vytváří se tak stromečkovitý útvar. Až později tuhne kov i mezi žebry dendritu. Tato orientace struktury ve směru odvodu tepla se nazývá licí struktura. Licí strukturu neodstraníme vysokou rychlostí ochlazování, neboť je závislá i na čistotě kovu.

K nerovnovážnému stavu může vést i náhlé ochlazení již ztuhlého kovu při vyšších teplotách, a to i tehdy, pokud tuhnutí probíhalo pomalu podle podmínek rovnováhy.

## 2.5 Vlastnosti hliníku a jeho slitin

Hliník je lesklý kov o hustotě  $2700\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  při teplotě  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Teplota tání čistého hliníku je  $660\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Elektrická vodivost je závislá na čistotě a pohybuje se v rozmezí 30 až 38  $\text{m}/\Omega$ . Součinitel tepelné roztažnosti je

přibližně  $24 \times 10^{-6}$  pro teploty 20 až 100 °C. Modul pružnosti v tahu hliníku je 70 000 MPa.

Technologické vlastnosti jsou takové, které ukazují na vhodnost materiálu pro zpracování určitou výrobní metodou (lití, tváření, obrábění) na polotovary nebo hotový výrobek, mezi ně patří:

### **Slévateľnosť hliníku a jeho slitin**

Slévateľnosť je ovplyvnená mnoha vlastnosťami. Najdôležitejšie z nich sú merné teplo, tepelná vodivosť, teplota tavenia, spôsob tuhnutia, povrchové napätia, líciová teplota kovu, druh a teplota formy.

Čistý hliník je dobre slévateľný (má malé smršťenie, tuhne pri jednej teplote, není náchylný k praskaniu), ale díky vysokému povrchovému napätiu má špatnú zabíhavosť.

Velmi dobrou slévateľnosť majú slitiny, ktoré tuhnu pri určitej teplote. Tieto podmienky najľahšie vyhovujú eutektickým slitinám. Sú málo viskózne a preto dobre zabíhajú a dobre vyplňujú formu. Pretože tuhnu pri jednej teplote, je i smršťenie malé. Príkladom eutektickej slitiny je Al-Si s obsahom Si 10 – 13%. S klesajúcim obsahom Si sa slévateľnosť zhoršuje. Slitina typu Al-Mg s obsahom Mg 5% a viac patrí medzi obtížne slévateľné. Vykazuje veľký interval teplot pri tuhnutí, ale hlavným dôvodom špatnej slévateľnosti je tvorba oxidov na povrchu roztaveného kovu.

### **Tvárnosť hliníku a jeho slitin**

Tvárenie je proces, ktorý sa provádí za tepla alebo za studena lisovaním, válcovaním alebo ťažením. Dobrá tváriteľnosť je charakterizovaná malou spotrebou energie a vysokým výrobkom. K dosadeniu výrobku dobrej kvality bez trhlin musí byť použitý materiál dostatočnou pevnosťou. Pri tvárení za studena značí dobrú tvárnosť malé zpevnenie.

Z hliníkových materiálov je za tepla najľahšie tvárny čistý hliník a nízkolegované slitiny. Najhoršie sa tvária slitiny, v ktorých sú legujúce prvky obsažené v tuhých roztokoch. Najľahšie tvárny za studena je čistý hliník a slitiny Al-Mn a Al-Mg-Si. Je-li množstvo legur vyššie než 8% je tvárnosť veľmi špatná.



## **Slévárenské vlastnosti slitin hliníku**

Tavení a odlévání hliníku a jeho slitin je důležitým technologickým postupem pro výrobu tvarových odlitků. Vhodnost slitin pro výrobu tvarových odlitků je dána slévárenskými vlastnostmi, především zabíhavostí, stahováním, smršťováním a sklonem k trhlinám a prasklinám.

### **a) Zabíhavost**

Při odlévání musí kov dobře vyplnit formu, musí dobře zabíhat. Zabíhavost závisí na vlastnostech slitiny, lících podmínkách, vlastnostech formy, vtokové soustavě a konstrukci odlitku. Změnou lící teploty zabíhavost velmi ovlivníme. Pro odlitky se slabou stěnou volíme vyšší lící teplotu a pro odlitky s tlustší stěnou volíme nižší lící teplotu. Nemůžeme však volit neúměrně vysokou lící teplotu, protože ta negativně ovlivňuje kvalitu odlitku. Zabíhavost pozitivně ovlivní předehřátí kovové formy a vysušení pískových forem. Z hliníkových slitin nejlépe zabíhají slitiny přibližně s eutektickým složením. Slitiny s nižším obsahem křemíku a slitiny s obsahem hořčíku mají zabíhavost horší.

### **b) Stahování**

Nedostatečným dosazováním materiálu při tuhnutí vznikají dutiny – staženiny. K odstranění staženin se používá vhodných nálitků. Hliník a jeho slitiny stahují více než jiné kovy. Nejmenší staženiny mají přibližně eutektické slitiny hliníku. Slitiny s větším intervalem tuhnutí mají sklon tvořit rozptýlené staženiny, ale slitiny s menším intervalem tuhnutí tvoří soustředěné staženiny. Velikost staženin ovlivňuje i konstrukce odlitku a technologie tavení.

### **c) Smršťování**

Smršťováním se označují rozměrové změny odlitku, které se projeví po ztuhnutí odlitku. Při lití do pískových forem je smrštění větší než při lití do kokil.

#### **d) Sklon k trhlinám a prasklinám**

Trhliny se tvoří v čase tuhnutí odlitku, pokud existují současně dvě fáze – tekutá a tuhá. Praskliny vznikají za nižších teplot v důsledku prnutí během chladnutí odlitků. Čím menší je interval tuhnutí, tím menší je náchylnost k trhlinám. Proto eutektické slitiny a čistý hliník mají menší sklon k trhlinám. Proti prasklinám působí pomalé chladnutí.

Ze slévárenského hlediska jsou nejvýhodnější slitiny eutektické, které mají malý interval tuhnutí. Výběr vhodných slitin je však ovlivněn kromě slévárenských vlastností také dalšími, mezi které patří svařitelnost a odolnost proti korozi. Z konstrukčních důvodů se často využívají slitiny sice s horšími slévárenskými a jinými vlastnostmi, ale zato s dobrými mechanickými vlastnostmi, zejména za vyšších teplot - například pístové slitiny.

#### **2.6 Tavení hliníku a jeho slitin**

Pro tavení hliníku a jeho slitin se používá pecí různých druhů. Podle způsobu přivádění tepla pece dělíme na tyto dvě hlavní skupiny:

- a) pece plamenné na tuhé palivo (uhlí, koks) a pece na plynné a tekuté palivo (olej, nafta a plyn)
- b) pece elektrické, a to odporové nebo indukční. Indukční pece dělíme na kanálkové a bezkanálkové.

Hlavní složky vsázky jsou čisté kovy, přísadové slitiny a odpady (vratný, zůstatkový a zpracovatelský). Jako čisté kovy se do vsázky přidává mimo čistého hliníku ještě zinek a hořčík. Ty se dodávají ve formě housek. Z přísadových slitin se legují kovy jejichž použití v čistém stavu je obtížné (vysoká teplota tavení, velké ztráty propalem). Vratný odpad vzniká při obrábění a při tváření. Zůstatkový (výrobní) je odpad hutní. Jsou to strusky, okuje. Zpracovatelský odpad vzniká při zpracovávání polotovaru ve strojírnách. Jsou to třísky, odřezky zmetky. Některé prvky se do vsázky legují pomocí solí ( $\text{KBF}_4$ ,  $\text{NaF}$ ,  $\text{TiCl}_4$ ).

Pořadí sázení surovin do pece je ovlivněno mnoha činiteli. Nejdůležitějšími jsou tvar vsázkových materiálů, váha jednotlivých materiálů a jejich teplota tavení. Během tavení dochází ke ztrátám kovu (propalu) a to reakcí s atmosférou pece a reakcí s vyzdívkou. Se vzrůstající teplotou probíhá oxidování hliníku. Na povrchu taveniny vzniká kysličník hlinitý a

ten okysličování zpomaluje. Nejškodlivější pro hliník jsou vodík, vodní pára a kyslík. Zdrojem plynů v tavenině může být palivo, vlhká vyzdívka a špinavý či vlhký odpad. K odstranění kysličníku z taveniny se používají organické soli, jejichž podstatnou složkou bývá kryolit.

Roztavený kov má stálý objem, a jeho tvar je dán formou. Stálý objem ukazuje na to, že mezi atomy taveniny působí meziatomové síly určující jejich soudržnost. Soudržnost klesá za vysokých teplot.

Fyzikální vlastnosti tavenin v oblasti bodu tání potvrzují strukturní podobnost tuhého a roztaveného kovu. Jsou to především: nízké měrné skupenské teplo tání, malé rozdíly v hustotě taveniny a kovu, malé rozdíly v elektrické vodivosti, tepelné roztažnosti a měrném teple.

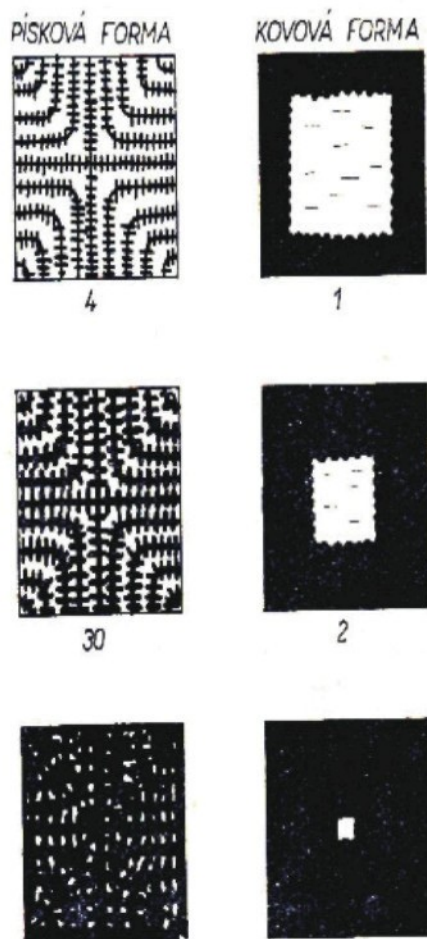
### **2.6.1 Vnitřní uspořádání taveniny**

Vnitřním uspořádáním částic v tavenině se zabývá teorie rojů. Dle této teorie se v tavenině vyskytují různě velké skupiny částic, které mají podobné uspořádání jako krystalová mřížka v tuhém stavu. Skupiny částic jsou různě uspořádány v objemu taveniny, mohou měnit velikost a své uspořádání.

Na teorii rojů navazuje dírová teorie struktury taveniny (teorie J. Frenekela). Dle této teorie za teplot blízkých bodu tání dochází ke zvětšení vzdálenosti mezi ionty, která vyvolává poruchy (mezery, díry) v uspořádání mřížky. Vazebná pevnost zůstává zachována. Vzdalování jednotlivých iontů, při uchování vazby s mnoha jinými ionty, je připodobňováno k vytváření děr v tavenině. Takto vznikající mezery v tavenině během okamžiku zanikají, zatímco vznikají nové, obdobného typu v jiných místech.

## 2.7 Krystalizace hliníku a jeho slitin

Krystalizace je fázovou změnou, při níž přechází tekutá fáze v tuhou. Čisté kovy krystalizují za určité stálé teploty a slitiny hliníku krystalizují



Obr. 2-6 Porovnání tuhnutí hliníku v pískové a kovové formě

v určitém rozmezí teplot. Během krystalizace se uvolňuje skupenské teplo tuhnutí. Příčinou krystalizace je snaha kovu či slitiny dosáhnout při změně teploty stabilního stavu. Krystalizace je difúzní pochod s postupným vznikem zárodků a jejich růstem. Rozlišujeme dva typy vzniku zárodků. První typ je spontánní krystalizace, kdy nová fáze vzniká bez pomoci cizích zárodků v tavenině. Druhý typ je, když tuhá fáze krystalizuje na cizích zárodcích.

Postup tuhnutí čistého hliníku je ovlivněn jejich vysokou tepelnou vodivostí. Při tuhnutí čistého hliníku dochází k růstu dendritů. Dendrity rostou

pomalou během tuhnutí, dokud se nezačnou vzájemně ovlivňovat. Tavenina, která zůstane uzavřena mezi dendrity, může vytvořit ojedinělé staženiny, které jsou rozptýleny po celém objemu odlitku. Toto tuhnutí je charakteristické pro pískové formy. V kovové formě je úzké krystalizační pásmo, což snižuje nebezpečí vzniku vnitřních staženin. Porovnání je znázorněno na obr. 2-6.

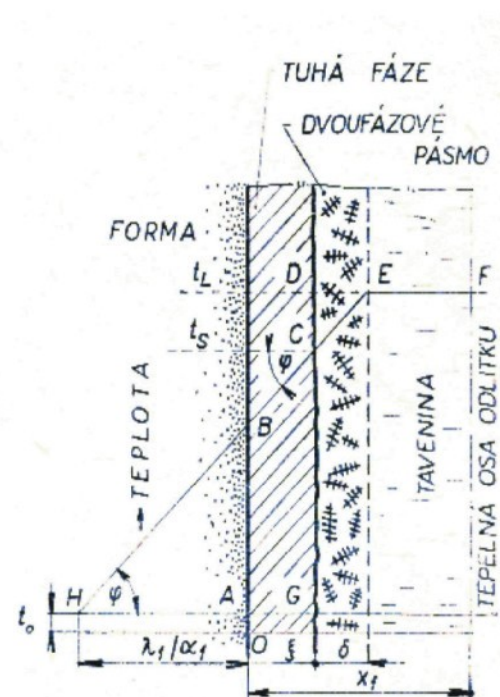
### 2.7.1 Mechanismus krystalizace ve formě

Při krystalizaci čistého kovu postupuje krystalizace od stěn formy, kde jsou lepší podmínky pro vznik krystalizačních zárodků, a uvolňující se teplo je odváděno krystalickou fází do formy.

Při krystalizaci slitin rozlišujeme tři různé charakteristiky:

- Z homogenní taveniny může krystalizovat několik fází.
- Krystalizace většinou probíhá v rozmezí teplot.
- Krystalická fáze má jiné složení, než měla původní tavenina.

### 2.7.2 Postup krystalizace



Obr. 2-7 Dvojfázové pásmo během tuhnutí slitiny ve stěně odlitku

Po poklesu teploty slitiny u stěny formy pod teplotu likvidu začíná v této oblasti krystalizace. Pokud tuhne slitina v intervalu teplot, jsou v oblasti tuhnutí přítomny dvě fáze (tuhá a tekutá fáze). Po poklesu teploty pod hodnotu solidu ztuhnou zbytky tekuté fáze. Během tuhnutí vedle sebe mohou existovat tři pásma:

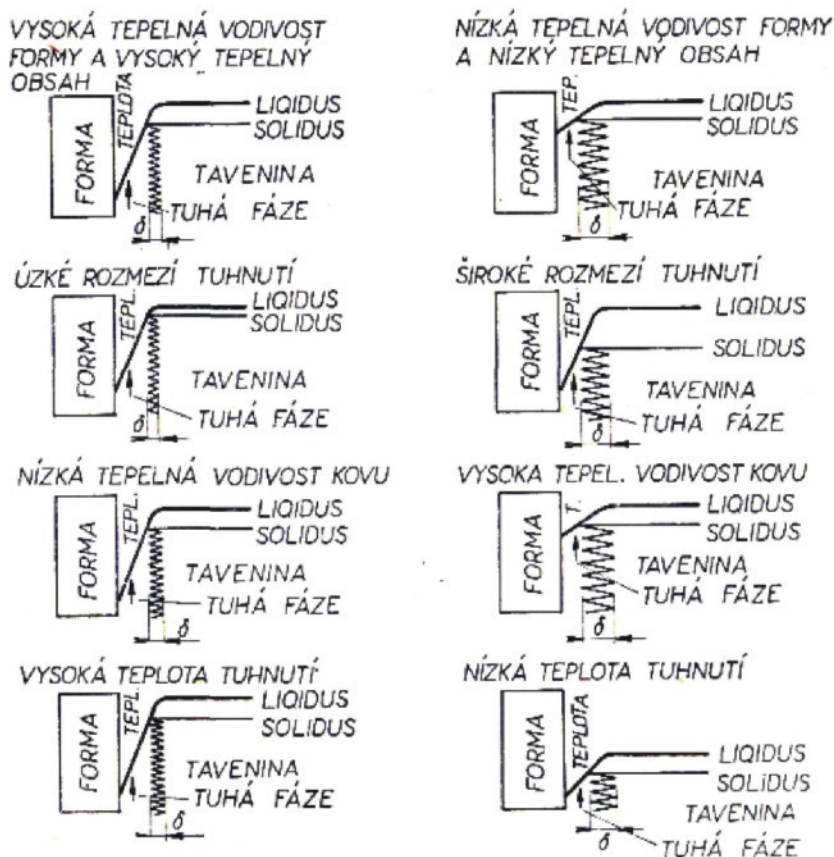
- pásmo tuhého kovu - jeho tloušťka se s postupem času zvětšuje.
- dvoufázové pásmo - jeho tloušťka závisí na intervalu teplot tuhnutí.
- pásmo taveniny - jež se zmenšuje.

Rozložení jednotlivých pásem znázorňuje obr. 2-7. U čistých kovů se nevyskytuje dvoufázové pásmo.

Vlivy na šířku dvoufázového pásma:

- interval tuhnutí slitiny – s rostoucím intervalem tuhnutí roste též šířka dvoufázového pásma
- příčný teplotní gradient – závisí na tepelné akumulaci formy

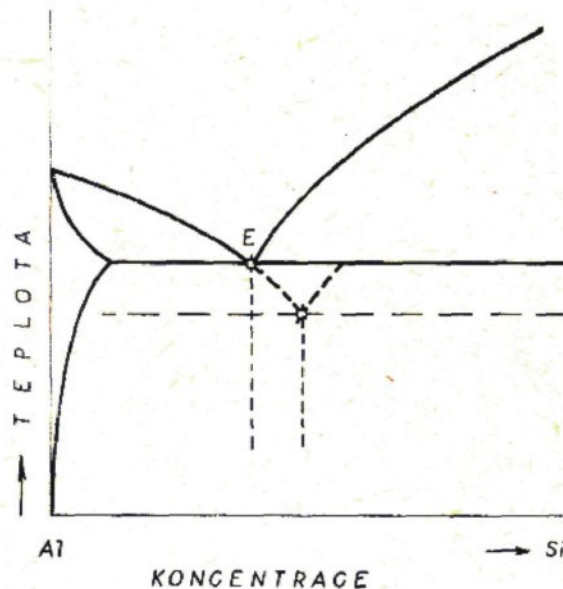
Obr. 2-8 zobrazuje základní vlivy na šíři dvoufázového pásma.



Obr. 2-8 Základní vlivy na šířku dvoufázového pásma

### 2.7.3 Ovlivňování krystalizace

Nejrozšířenější metodou ovlivňování krystalizace je očkování, což je ovlivnění na základě zjemnění zrna. U neželezných slitin se používá profukování taveniny před litím pro odstranění plynů v tavenině a pro odstranění vměstků. Očkování hliníku a jeho slitin je nejúčinnější, použijeme titan. Předpokládá se, že skutečnými nukleačními zárodky tu jsou karbidy nebo nitridy titanu. Ke zjemnění zrn slitin typu Al-Si lze použít i další metody, a to modifikaci. Jedná se o vnášení zárodků do taveniny (např. sodíku). Viz obr. 2-9, vliv modifikace sodíkem na teplotu krystalizace eutektika.



Obr. 2-9 Posunutí eutektické slitiny Al – Si modifikací

## 2.8 Tepelné pochody v soustavě kov – forma

### Rozbor tuhnutí a chladnutí kovu ve formě

Při styku formy s taveninou odvádí forma z kovu teplo. Teplota formy stoupá a teplota kovu klesá. Při poklesu teploty kovu na teplotu tuhnutí nastává změna kapalného skupenství na tuhé. Kov tuhne postupně od stěny formy směrem k tepelné ose odlitku. Čím vyšší rychlost odvodu tepla formou, tím větší rychlost krystalizace kovu. Rychlost krystalizace se projeví ve vlastnostech odlitku. Rychlost tuhnutí odlitku je limitována fyzikálními a geometrickými vlastnostmi formy. Při odlévání se určitou dobu uskutečňuje přechod tepla forma – kov stykem formy s tekutým kovem. Poté se však u stěny formy vytvoří vrstva tuhého kovu. Brzy po vzniku tuhé vrstvy, v důsledku jejího smršťování se mezi formou a tuhovou vrstvou vytvoří mezera. Poté tedy odvod tepla z taveniny do formy probíhá přes tuhovou vrstvu kovu a přes vzniklou mezeru. Z důvodu nižší tepelné vodivosti vzniklé mezery se sníží intenzita odvodu tepla z taveniny.

## Průběh tuhnutí a chladnutí kovu ve formě

Tuhnutím označujeme vznik souvislé tuhé kovové vrstvy a její postup směrem k tepelné ose odlitku. Při tuhnutí přibývá tuhé fáze a ubývá tekuté fáze. V okamžiku vymizení tekuté fáze tuhnutí končí.

Taveninu odléváme vždy s určitým přehřátím nad teplotu likvidu. Tavenina nezačíná tuhnout v okamžiku dotyku s formou, ale zůstává určitou dobu po odlití v tekutém stavu. Tato doba je závislá na množství akumulovaného tepla v tavenině a fyzikálních vlastnostech formy

### 2.9 Smršťování odlitků

Podstatou smršťování jsou objemové změny tekuté a tuhé fáze kovu s poklesem teploty a objemové změny při fázových přeměnách. Projevují se změnami v odlitku. Zmenšují se celkové rozměry odlitku, nebo se v něm vytvářejí staženiny a dochází k vnitřnímu pnutí.

Proces smršťování můžeme rozdělit do tří částí: smršťování tekuté fáze, smršťování při krystalizaci a smršťování při tuhnutí.

#### Smršťování v tekutém stavu

Po odlití začíná odvod tepla z kovu do formy. Současně probíhá smršťování taveniny, které skončí jejím ztuhnutím. Projeví se poklesem hladiny kovu ve formě. Rozsah smrštění je přímo úměrný teplu přehřátí. Objemové smršťování taveniny probíhá nad teplotou likvidu a v menší míře v intervalu tuhnutí. Objemové smrštění v tekutém stavu vzrůstá s přehřátím.

$$\varepsilon_{VL} = \alpha_{VL} \cdot (T_I - T_L) \cdot 100 \quad (1.0)$$

kde značí:  $\varepsilon_{VL}$  - objemové smrštění kovu v tekutém stavu [%];

$\alpha_{VL}$  - součinitele objemového smrštění v tekutém stavu [ $K^{-1}$ ];

$T_I$  - teplotu lití [ $^{\circ}C$ ];

$T_L$  - teplotu likvidu [ $^{\circ}C$ ].



## Smršťování při krystalizaci

V intervalu tuhnutí (mezi likvidem a solidem) probíhá změna fáze tekuté na fázi tuhou. Díky vnitřní stavbě taveniny bude mít tuhá fáze při stejné teplotě menší objem. Ubude volných prostor mezi krystalickými elementy. Toto je projev smrštění při krystalizaci.

$$\varepsilon_{VK} = \alpha_{VK} \cdot (T_L - T_S) \cdot 100 \quad (1.1)$$

kde značí:  $\varepsilon_{VK}$  – smrštění při krystalizaci [%],

$\alpha_{VK}$  – součinitele objemového smrštění v intervalu teplot [ $K^{-1}$ ],

$T_L$  – teplotu likvidu [ $^{\circ}C$ ],

$T_S$  – teplotu solidu [ $^{\circ}C$ ].

Následkem zmenšování objemu při krystalizaci dochází ke smršťování kapalně fáze a smršťování již ztuhlé fáze se zmenšuje. Tento proces se projeví vznikem staženiny.

Pro objem staženiny používáme následující vztah:

$$V_{st} = \beta \cdot (V_0 + V_N) \quad (1.2)$$

kde značí:  $V_{st}$  – objem staženiny [ $m^3$ ],

$\beta$  – součinitele stahování,

$V_0$  – objem odlitku [ $m^3$ ],

$V_N$  – objem nálitku [ $m^3$ ].

## Smršťování v tuhém stavu

Dochází ke změnám lineárních rozměrů odlitků. Jedná se především o délkové smrštění.

$$\varepsilon_{lin} = \left[ \frac{l_1 - l_2}{l_1} \right] \cdot 100 \quad (1.3)$$

kde značí:  $\varepsilon_{lin}$  – lineární smrštění [%],

$l_1$  – rozměr odlitku při teplotě solidu [m],

$l_2$  – rozměr ochlazovaného odlitku [m].

Objemové smrštění pro odlitek v tuhém stavu ( $\epsilon_{vs}$ ) vyjádříme vztahem:

$$\epsilon_{vs} = \alpha_{vs} \cdot (T_s - T_o) = \frac{V_1 - V_0}{V_0} \cdot 100 \quad (1.4)$$

kde značí:  $V_1$  - objem odlitku za teploty  $t_1$  [ $m^3$ ],

$V_0$  - objem odlitku za teploty  $t_0$  [ $m^3$ ],

$\alpha_{vs}$  - součinitele objemového smrštění v tuhém stavu [ $K^{-1}$ ],

$T_o$  - teplotu okolí [K],

$T_s$  - teplotu solidu [K].

Pro teplotní závislost změny objemu kovů použijeme vztah: :

$$V_1 = V_0 \cdot [1 - \alpha_{vs} \cdot (T_s - T_o)] \quad (1.5)$$

kde značí:  $V_1$  - objem odlitku za teploty  $t_1$  [ $m^3$ ],

$V_0$  - objem odlitku za teploty  $t_0$  [ $m^3$ ],

$\alpha_{vs}$  - součinitele objemového smrštění v tuhém stavu [ $K^{-1}$ ],

$T_o$  - teplotu okolí [K],

$T_s$  - teplotu solidu [K].

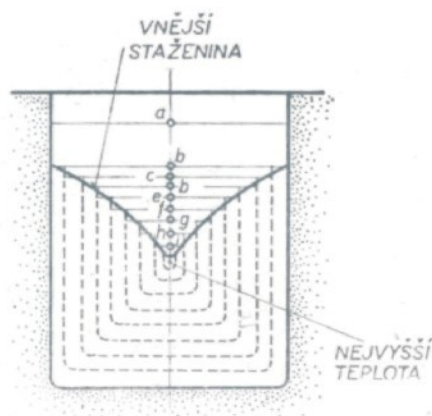
### 2.9.1 Vlivy na smršťování

#### Vliv tvaru odlitku

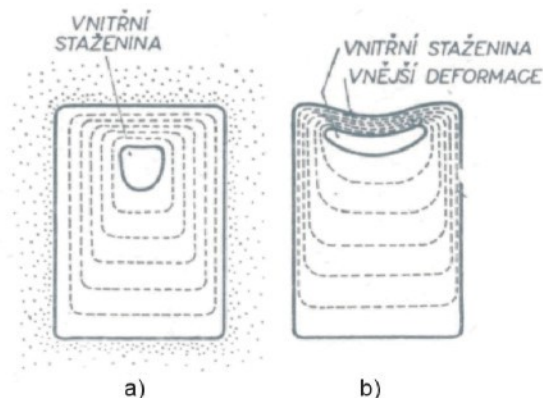
Tuhnutí tavenin začíná podél stěn a postupuje do tepelného středu odlitku. Negativní vliv na kvalitu odlitku mají: rozdílné tloušťky stěn, vnitřní rohy a kouty. Toto jsou místa kde se může teplo koncentrovat. Ideální stav by byl, kdyby odlitek ztuhnul současně ve všech stěnách. To se řeší vnějšími zásahy buď urychlením nebo zpomalením tuhnutí.

## Tvorba staženin

Dutiny vznikají v místech, kde tuhnou poslední zbytky taveniny. Vnější staženiny vzniknou během tuhnutí, kdy se nově krystalizující vrstvy připojují na vrstvy již ztuhlé. Viz. obr. 2-10. Vnitřní staženina je vnitřní dutina vzniklá při tuhnutí odlitku. V některých případech může dojít i k prohnutí horní stěny odlitku směrem ke staženině vlivem podtlaku v dutině. Viz. obr. 2-11.



Obr. 2-10 Postup vzniku vnější staženiny



Obr. 2-11 Postup vzniku vnitřní staženiny

## Nálitkování

Jestliže tuhnutí kovu probíhá dostatečně dlouho projeví se gravitační působení a staženina je vytlačena do horní části odlitku. Vznik staženin v odlitku je vyvolán nedostatkem kovu v izolované části tuhnoucího odlitku uzavřené ztuhlým kovem a obsahující uvnitř ještě tekutou fázi. K dosažení kvalitních odlitků je třeba odlitky konstruovat tak, aby staženiny buď nevznikaly, nebo aby byly v místech, kde z kvalitativního hlediska nevadí.

Nálitok je vlastně nádrž tekutého kovu pro doplňování do míst nebezpečných z hlediska vzniku dutiny. Nálitok musí vyhovovat těmto podmínkám :

- musí mít dostatečný objem, aby byl přebytek kovu k doplňování
- musí mít vhodný tvar, aby měl malé tepelné ztráty a tuhl až po ztuhnutí odlitku.

Mezi vhodné tvary nálitků patří koule, válce či komolé kužele, které tuhnou pomaleji a splňují podmínku pozdějšího tuhnutí nálitku.

## **Vliv podmínek ochlazování ve formě**

Rychlost ochlazování výrazně ovlivňuje velikost odlitku a jeho smrštění. Při odlévání do pískových forem vzniká větší staženina při lití za vysokých teplot než při lití za nízkých teplot. Odlitek je náchylný na stahování v místech, kde je zpomalené chladnutí oproti okolí. Jedná se o místa v blízkosti vtoku, nálitku nebo v přechodech tloušťek stěn. Tepelná kapacita  $\lambda_f$  a tepelná vodivost formy ovlivňují rychlost tuhnutí a chladnutí odlitku. Součinitel tepelné akumulace  $b_f$  charakterizuje ochlazující účinek formy. Kokily velmi účinně ochlazují odlitek. Písková forma má ve srovnání s kovovou formou malou tepelnou vodivost. S přenosem tepla v pískových formách pomáhají plyny a páry, které se ve formě vytvářejí účinkem tepla. Kovové formy pak mají vysokou tepelnou vodivost, díky které jsou schopné akumulovat velké množství tepla v krátké době.

Na konečné rozměry formy a velikost vnitřní staženiny má významný vliv tvrdost formy. Po nalití kovu do dutiny formy probíhají dva protichůdné jevy:

- a) negativní dilatace (smršťování) stěny formy následkem ztráty vlhkosti
- b) pozitivní dilatace (expanze) formy následkem celkové dilatace a krystalické modifikace křemenného ostřiva (vzniká krystobalit)

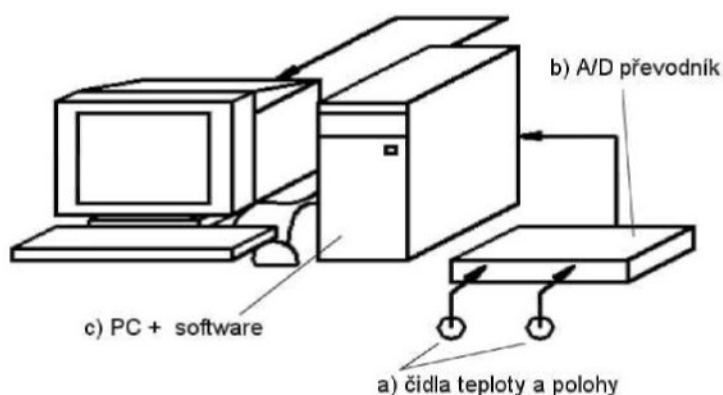
### 3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

Experimenty obsažené v této bakalářské práci byly zaměřeny na sledování dilatačních vlastností čistého hliníku při jeho tuhnutí a chladnutí ve slévárenské formě z CT směsi.

Experimenty prováděné v rámci této bakalářské práce byly prováděny v laboratořích Katedry strojírenských technologií TU v Liberci. Celkem bylo provedeno 10 experimentů, tj. tavenina čistého hliníku byla odlita do 10 forem z CT směsi.

#### 3.1 Popis měřícího zařízení

Měřící zařízení pro sledování dilatace a změny teploty bylo zkonstruováno na Katedře strojírenské technologie TU v Liberci. Skládá se z následujících částí: měřícího rámu s čidly teploty a dilatace, převodníku A/D – dilatometru CRYSTALDIAGRAPH PC-4T2L a PC s programovým vybavením. Zařízení je zobrazeno na obr. 3-1.



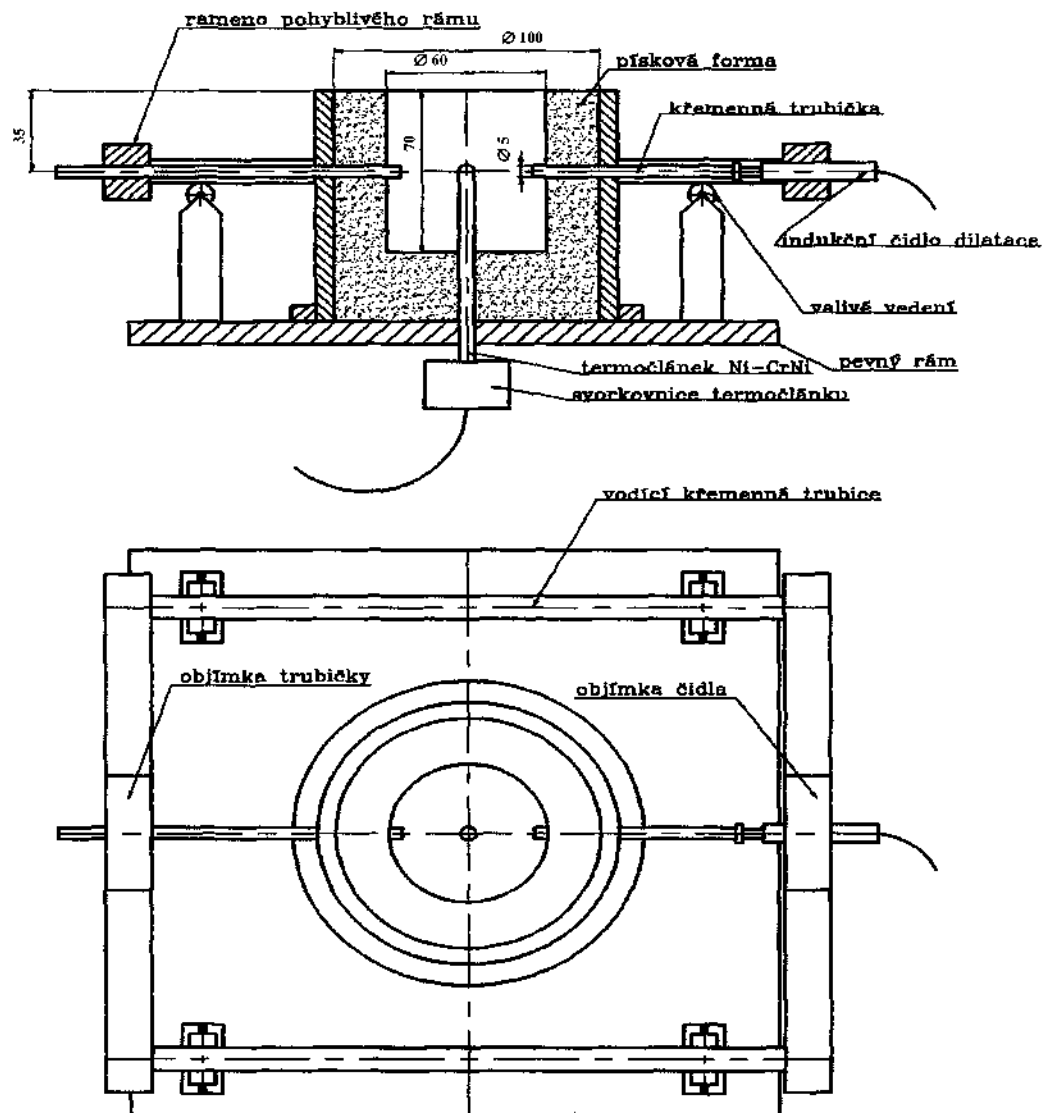
Obr. 3-1 Schéma zapojení měřícího zařízení

**Měřící rám** je položen na ocelových válečkách, které měřící rám vedou v horizontálním směru. Tímto je zajištěno vedení rámu rovnoběžně s deskou základního stojanu. Na desce je umístěn kovový kruhový rám pro formu o vnitřním průměru 100 mm a výšce 100 mm. Do rámu je vložena forma o vnitřním průměru 60 mm a délce 70 mm. V polovině výšky formy jsou naproti sobě dva otvory. Osa děr je kolmá k ose odlitku. Při měření jsou do děr zasunuty křemenné trubičky o průměru 5 mm. Trubičky přesahují do vnitřního průměru válce o zhruba 5 mm. Ve dně formy je zaformována další

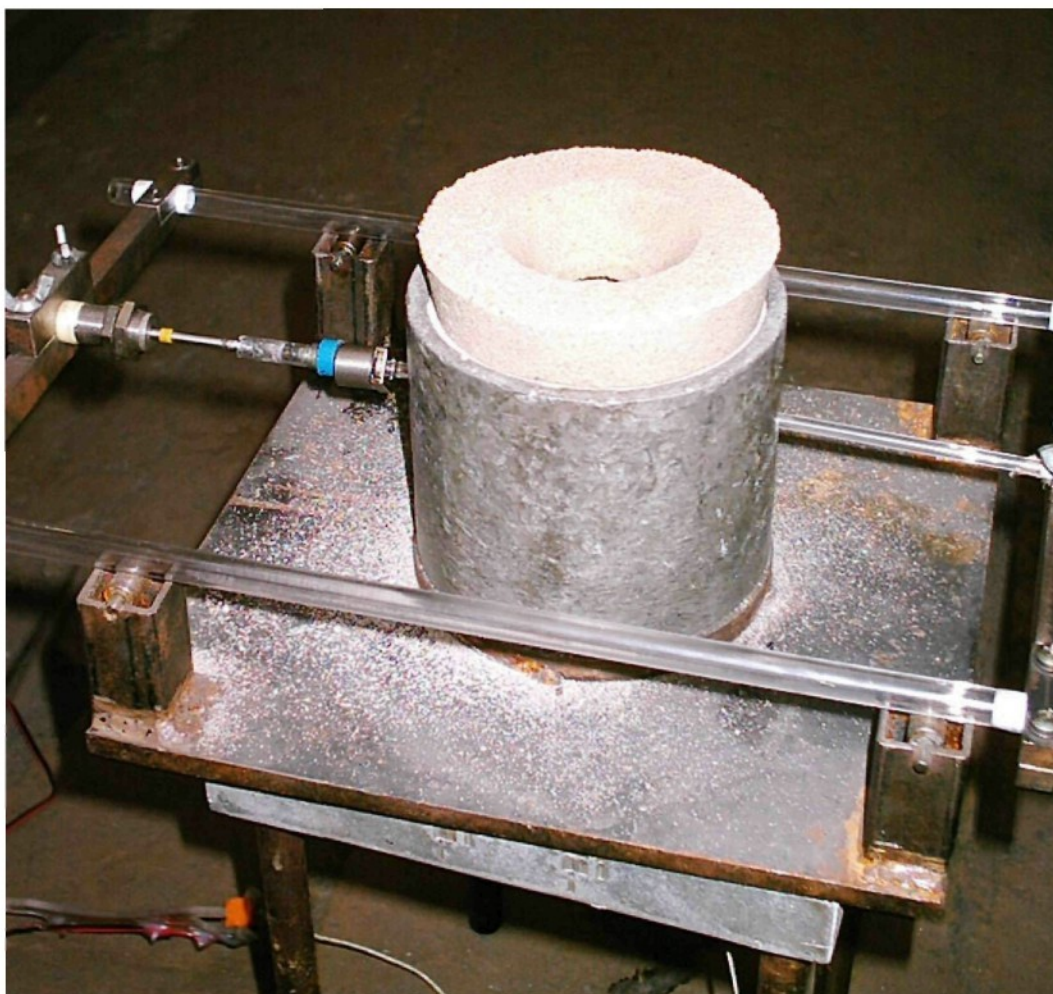
3 mm křemenná trubička s termočlánkem. Teplotu měříme ve výšce trubiček pro měření dilatace.

Měřicí rám se skládá z ocelových ramen a dvou křemenných trubic o průměru 10 mm. Tyto trubice slouží k vedení pohyblivé části rámu a zajišťují jeho tuhost.

Na jednom rameni je napevno přichycena křemenná trubička o průměru 5 mm. Na druhém rameni je pomocí magnetu přichycen indukční snímač polohy. Pružina uvnitř snímače zajišťuje držení snímače v nulové výchylce. Pohyblivý dotyk snímače je opřen o konec pohyblivé křemenné trubičky. Schéma měřicího rámu je na obr. 3-2, obr. 3-3 je pak reálný pohled na něj.



Obr. 3-2 Schéma měřicího rámu



Obr. 3-3 Pohled na měřicí rám s uloženou formou z CT směsi

**Popis A/D převodníku** – slouží k převodu analogového signálu na digitální. Elektrické napětí vzniklé na indukčním snímači pohybem křemenných trubiček a napětí na termočlánku jsou přenášeny do A/D převodníku (CRYSTALDIGRAPH PC-4T2L). Na tomto zařízení je možné zaznamenávat čtyři hodnoty z čidel teploty a až dvě hodnoty z čidel pro dilataci. Teplotu snímáme pomocí NiCr-Ni článku.





Tabulka 3-1 Vlastnosti formovací CT směsi

Použitá směs	Charakteristika směsi	Hustota [kg.m <sup>3</sup> ]	Pevnost v tlaku [MPa]	Prodyšnost [j.p.SI]	d <sub>50</sub> [mm]
CT-SiO <sub>2</sub>	4% vodního skla (m=2,4), křemenný písek Střeleč T2S, vytvrzeno CO <sub>2</sub>	1500	0,78	460	0,27
Použitá směs	b <sub>F</sub> [W.s <sup>1/2</sup> .m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]	λ <sub>F</sub> [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	c <sub>F</sub> [J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	a <sub>F</sub> [m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]	
CT-SiO <sub>2</sub>	1168	1,06	861,8	8,20E-07	

### 3.3 Tavení a příprava taveniny

Z ryze experimentálních důvodů byl pro experimenty použit čistý hliník (čistota 99,7%) z housek dodávaných firmou METAL TRADE COMAX, a.s. Velvary, jehož teplota tání je 660 ± 1 °C. Pro tavbu byla využita komorová pec, do které byla vkládána vsázka potřebné hmotnosti v grafitových kelímcích. Na ovládacím panelu pece byla nastavena teplota 780 °C. Po natavení byla tavenina metalurgicky ošetřena rafinační solí T3. Rafinační sůl (předem odvážené množství) byla nasypána na povrch taveniny a vmíchána do taveniny. Pak byla stažena struska z hladiny. Na 1kg Al byly použity 4g soli. Tavenina byla odlévána z teploty 740 °C.

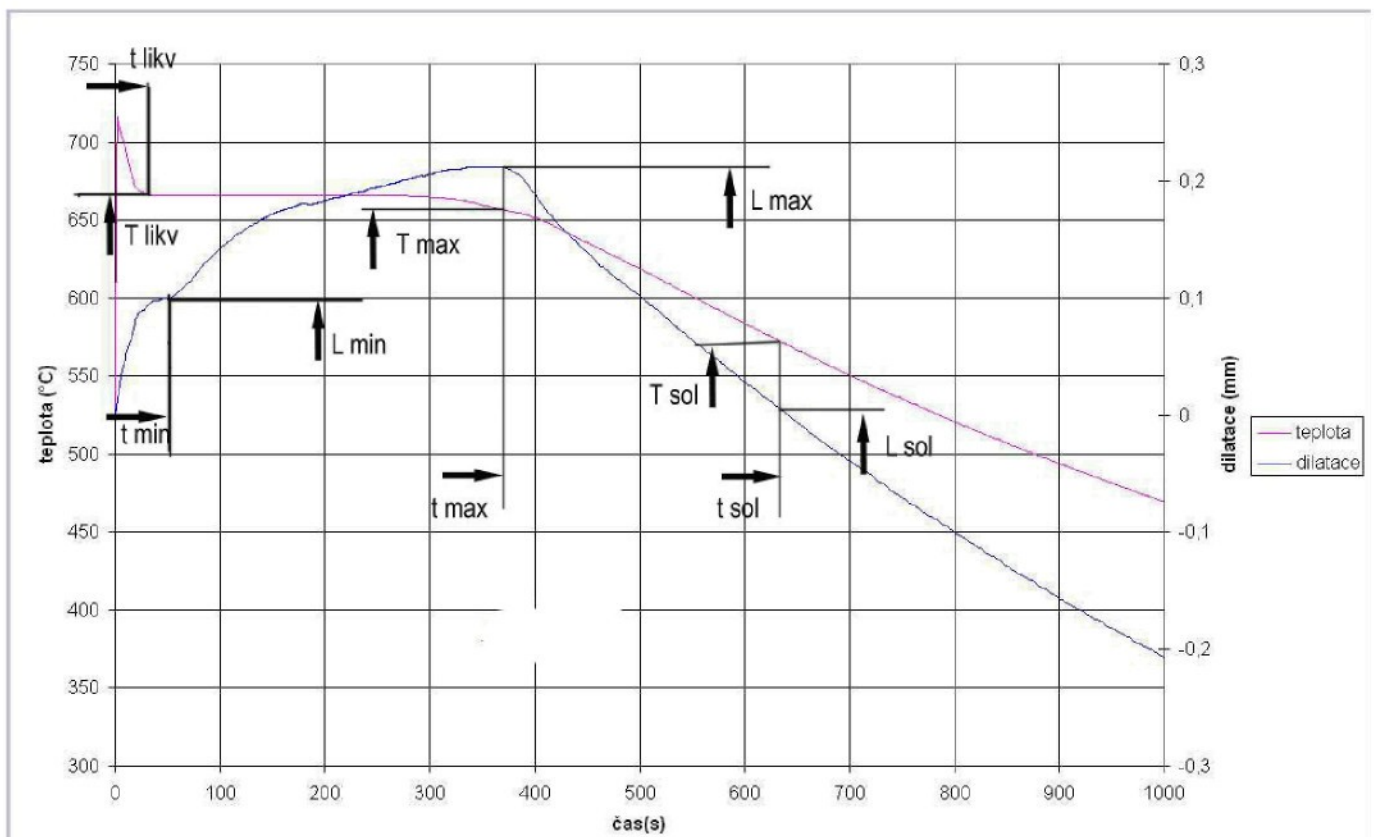
### 3.4 Popis průběhu experimentů

Před sledováním každého experimentu byla CT forma pečlivě vložena do měřicího rámu. Byla komplexně zkontrolována funkce měřicího zařízení včetně vloženého termočlánku pro měření teploty (byl použit plášťovaný termočlánek NiCr – Ni o průměru vodičů 0,3 mm, který registroval teplotu v tepelné ose odlitku). Záznam hodnot dilatace a teploty započal po odlití při překročení teploty 500°C. Záznamové zařízení zobrazovalo v reálném čase do grafu průběh teploty. Měření končilo dosažením teploty 450°C.

Získané hodnoty (teplota, dilatace, poměrná dilatace a okamžitý průměru vzorku.) byly programem uloženy do souboru ve formátu \*.dat.

Data byla exportována do programu MS Excel a zde byly vytvořeny grafy závislostí teploty a dilatace na času, tak jak odpovídalo jednotlivým experimentům.

Na obr. 3-5 je uveden záznam dilatace a teploty s vyznačením důležitých oblastí, které byly vyčteny z jednotlivých křivek příslušejících danému experimentu. V tabulce 3-2 jsou tyto hodnoty uvedeny.



Obr. 3-5 Záznam průběhu dilatace s vyznačením odečtu významných bodů

Tabulka 3-2 Přehled hodnot významných bodů

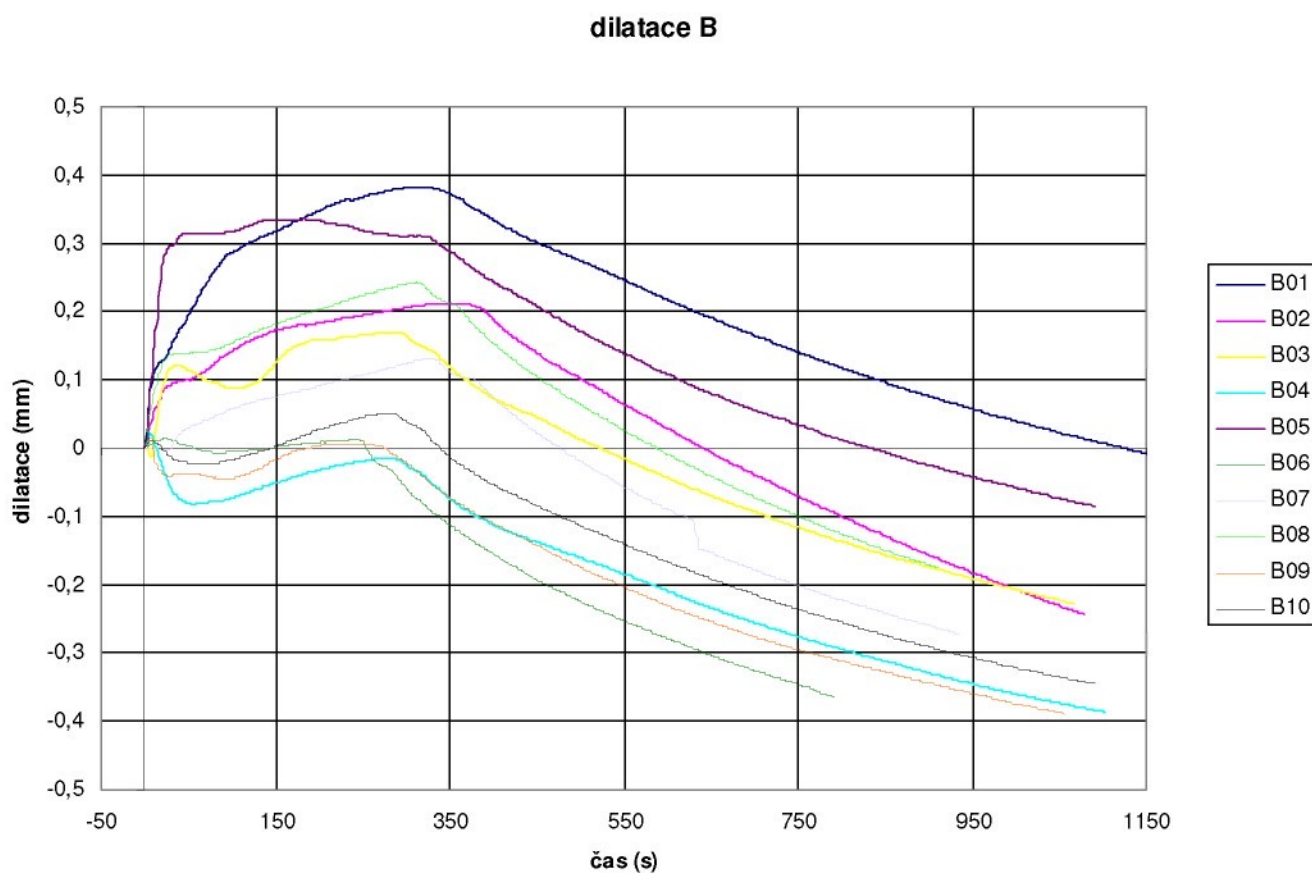
Číslo měření	Významné hodnoty dilatačních křivek při odlévání odlitků Ø 60 x 70 mm z čistého hliníku (99,7%) z teploty lití 740 °C									
	L <sub>max</sub> [mm]	T <sub>max</sub> [°C]	t <sub>max</sub> [s]	L <sub>min</sub> [mm]	t <sub>min</sub> [s]	T <sub>likv</sub> [°C]	t <sub>likv</sub> [s]	T <sub>sol</sub> [°C]	t <sub>sol</sub> [s]	L <sub>sol</sub> [mm]
1	0,3827	660,39	315,6	0	0	665,76	30	641,25	410,4	0,326
2	0,2123	657,6	361,2	0	0	665,71	55,2	645,8	418,8	0,166
3	0,1694	660,47	291,6	-0,012	7,2	664,49	52,8	642,6	360	0,108
4	-0,0145	662,08	272,4	-0,082	54	665,21	26,4	639,84	357,6	-0,081
5	0,3553	665,81	194,4	0	0	665,21	26,4	623,77	434,4	0,219
6	0,0138	666,12	26,4	-0,008	85,2	665,99	33,6	626,93	332,4	-0,095
7	0,1317	666,11	328,8	-0,003	25,2	666,89	39,6	662,78	342	0,121
8	0,2425	667,89	312	0	0	668,5	36	641,54	390	0,165
9	0,0054	663,5	225,6	-0,045	88,8	662,01	21,6	641,99	331,2	-0,055
10	0,0512	659,38	283,2	-0,025	64,8	664,63	22,8	643,28	346,8	-0,01

Tabulka 3-3 Přehled hodnot maximální dilatace

Hodnoty maximálního smrštění při teplotě 450 °C										
Číslo měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
L [mm]	-0,0078	-0,2427	-0,2278	-0,3863	-0,085	-0,3635	-0,2721	-0,1757	-0,3885	-0,345

V tabulce 3-3 jsou uvedeny hodnoty maximální dilatace pro jednotlivá měření.

Na obr. 3-6 jsou uvedeny všechny získané křivky dilatací při odlévání čistého hliníku do formy z CT směsi. V příloze této práce jsou uvedeny křivky zvlášť pro jednotlivé experimenty



Obr. 3-6 Průběhy dilatace pro experimenty 1 až 10

### 3.5 Vyhodnocení výsledků měření

Ze souhrnného obrázku získaných dilatačních křivek je zřejmý značný rozptyl sledovaných hodnot, i když byl odléván čistý hliník z teploty 740 °C. Pokud sledujeme hodnoty jednotlivých veličin (viz tab. 3-2), je možno konstatovat, že se jednotlivé veličiny pohybují v tomto rozmezí:  $L_{\max}$  : -0,0145 až 0,3827 [mm];  $T_{\max}$  : 657,6 až 667,89 [°C];  $L_{\min}$  : -0,082 až 0 [mm];  $T_{\text{likv}}$  : 662,01 až 666,89[°C];  $T_{\text{sol}}$  : 623,77 až 662,78 [°C];  $L_{\text{sol}}$  : -0,095 až 0,326 [mm]. Hodnoty absolutní dilatace (maximálního smrštění)  $L$  byly v rozmezí -0,00788 až -0,3885.

#### 4. DISKUSE VÝSLEDKŮ

Výsledky obsažené v této bakalářské práci dávají první informace o dilatačních změnách při tuhnutí a chladnutí odlitků  $\varnothing 60 \times 70$  mm z čistého hliníku odlévaných do formy z CT směsi  $\varnothing 100 \times 100$  mm. Bohužel, výsledky experimentů prováděných při stejných podmínkách, vykazují velký rozptyl hodnot a je velmi náročné zjištěné rozdíly vysvětlit na základě fyzikálních, popř. fyzikálně-metalurgických dějů. Některé tyto rozdíly je možno vysvětlit teprve vývojem a hledáním vhodné metodiky měření, včetně správného zavedení křemenných trubiček do dutiny formy, prostřednictvím kterých je snímána změna rozměrů tuhoucích a chladnoucích odlitků. Postupem času byla tato problematika vyřešena, avšak v rámci prací, které byly řešeny později. Z některých křivek je patrný nárůst dilatace, především v počátku tuhnutí odlitku. To lze vysvětlit tím, že ve formě z CT směsi, která má hodnotu součinitele  $b_F = 1168 \text{ [W}\cdot\text{s}^{1/2}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$ , tuhne odlietek pomalu. Tím vzniká tenká ztuhlá vrstva odlitku, která je v počátku tuhnutí odlitku zahřívána velkým množstvím tepla uvolňovaného tekutou částí odlitku. Toto teplo ohřívá tenkou ztuhlou vrstvu odlitku, která dilatuje ve prospěch zvětšení rozměru. Teprve v okamžiku, kdy je ztuhlá větší vrstva odlitku a střední tekutá partie odlitku již nevykazuje takové množství tepla, které by způsobilo ohřátí ztuhlé vrstvy a též její dilatace ve prospěch zvětšení rozměrů, je na záznamu dilatace patrné zmenšování rozměrů.

Protože experimenty s čistým hliníkem nepřinesly očekávané výsledky postupně se začaly na KSP – FS TU v Liberci provádět experimenty se slitinami hliníku s křemíkem.

## 5. ZÁVÉR

Bakalářská práce řeší problematiku sledování dilatačních změn odlitků tvaru válce  $\varnothing 60 \times 70$  mm z čistého hliníku odlévaného z teploty  $740\text{ }^{\circ}\text{C}$  do formy z CT směsi  $\varnothing 100 \times 100$  mm.

Práce je rozdělena do dvou hlavních částí. V části rešeršní jsou shrnuty základní poznatky o hliníku a slitinách hliníku, jejich tavení, rafinaci a odlévání a i o jejich vlastnostech. Hlavní část - experimentální je zaměřena na sledování rozměrových změn při tuhnutí a chladnutí odlitku. Protože tato práce byla první v této oblasti experimentů, měla za úkol vytvořit potřebnou metodiku pro sledování experimentů tohoto druhu, především v souvislosti výběru a instalace křemenných trubiček do dutiny formy. Při vlastních experimentech jsem se setkal s mnoha problémy, které jsem musel operativně řešit, především z toho důvodu, že získané výsledky vykazovaly při odlévání stejného materiálu a stejné teploty značné rozdíly. Přesto lze na základě experimentů lze vyslovit tyto dílčí závěry:

1. Zkonstruované měřicí zařízení splňuje požadavky na sledování dilatačních vlastností při odlévání odlitků jednoduchých tvarů, především ze slitin neželezných kovů.
2. Použitá metodika měření byla dostačující, především bylo dbáno na to, aby slitiny hliníku pro jednotlivé experimenty byly odebrány z jedné housky. Současně byla po natavení neustále pečlivě měřena teplota, která pro odlévání byla volena  $740\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
3. Chemické složení čistého hliníku bylo sledováno na kvantometru ve firmě ŠKODA Auto a byl zjištěn tento obsah stopových prvků:  $0,07\text{ }\%$  Si;  $0,001\text{ }\%$  Mg;  $0,025\text{ }\%$  Cu;  $0,0008\text{ }\%$  Na;  $0,002\text{ }\%$  Zn. Čistý hliník odpovídal předepsané čistotě  $99,7\text{ }\%$ .
4. Při přípravě čistého hliníku pro odlévání je nutné dbát na správné množství rafinační a modifikační soli. V těchto experimentech se používalo množství  $4\text{ g}$  rafinační soli T3 na  $1\text{ kg}$  taveniny čistého hliníku.
5. Bylo předpokládáno, že experimenty přinesou větší shodu získaných hodnot dilatace čistého hliníku při jeho tuhnutí a chladnutí. Naopak získané výsledky vykazují vysoký rozptyl hodnot získaných hodnot dilatace:  $L_{\max}$  : -  $0,0145$  až  $0,3827$  [mm];  $T_{\max}$  :  $657,6$  až  $667,89$  [ $^{\circ}\text{C}$ ];  $L_{\min}$  :  $-0,082$  až  $0$  [mm];

$T_{\text{likv}} : 662,01$  až  $666,89 [^{\circ}\text{C}]$ ;  $T_{\text{sol}} : 623,77$  až  $662,78 [^{\circ}\text{C}]$ ;  $L_{\text{sol}} : -0,095$  až  $0,326$  [mm].

6. Hodnoty absolutní dilatace (tj. 0 až  $\pm$ dilatace) se také pro jednotlivé experimenty lišily. Pro jednotlivé experimenty byly :  $-0,0078$  ;  $-0,2427$  ;  $-0,2278$  ;  $-0,3863$  ;  $-0,085$  ;  $-0,3635$  ;  $-0,2721$  ;  $-0,1757$  ;  $-0,3885$  ;  $-0,345$ .

7. Závěrem je nutno konstatovat, že experimenty sledování dilatace jsou velmi náročné, je třeba pečlivě kontrolovat nastavení měřícího zařízení, včetně ustavení měřícího rámu i křemenných trubiček a také vlastního odlévání taveniny do dutiny formy.

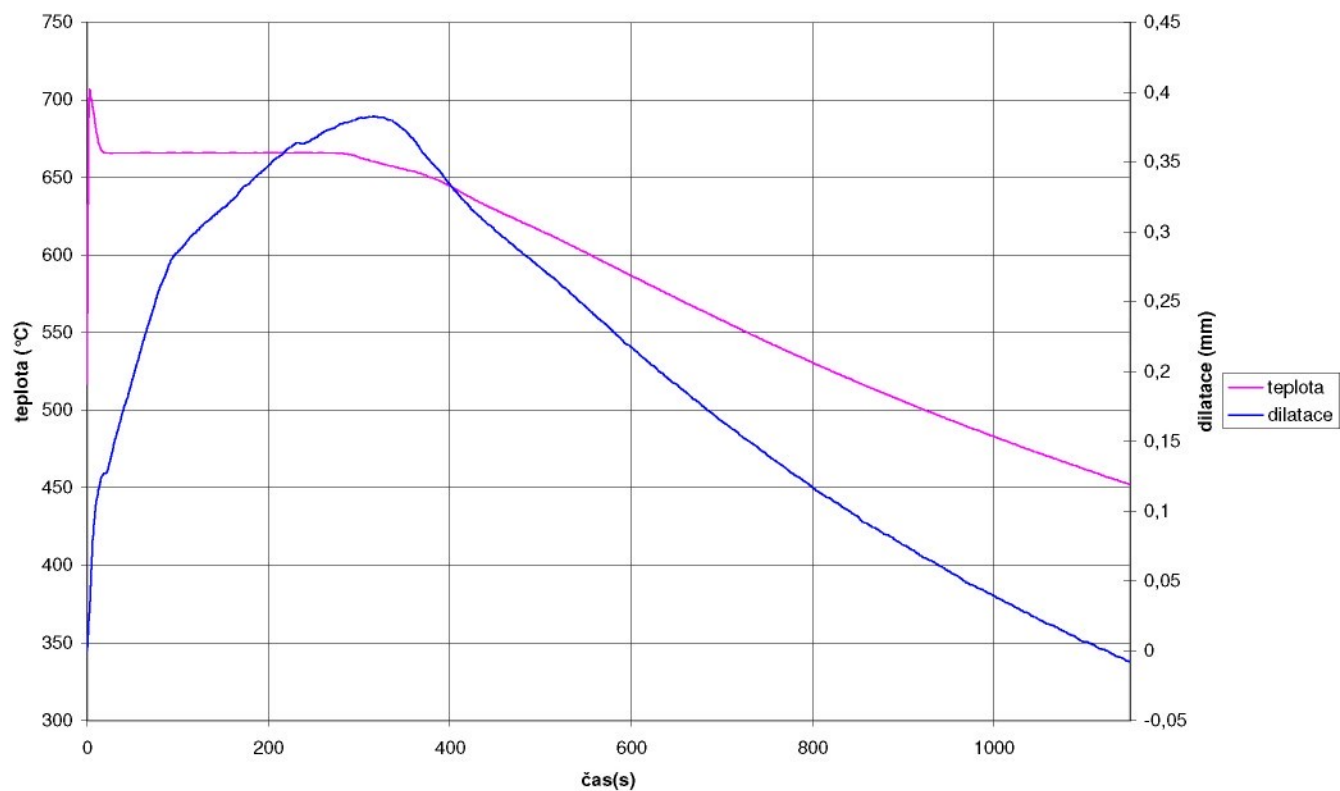


## 6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

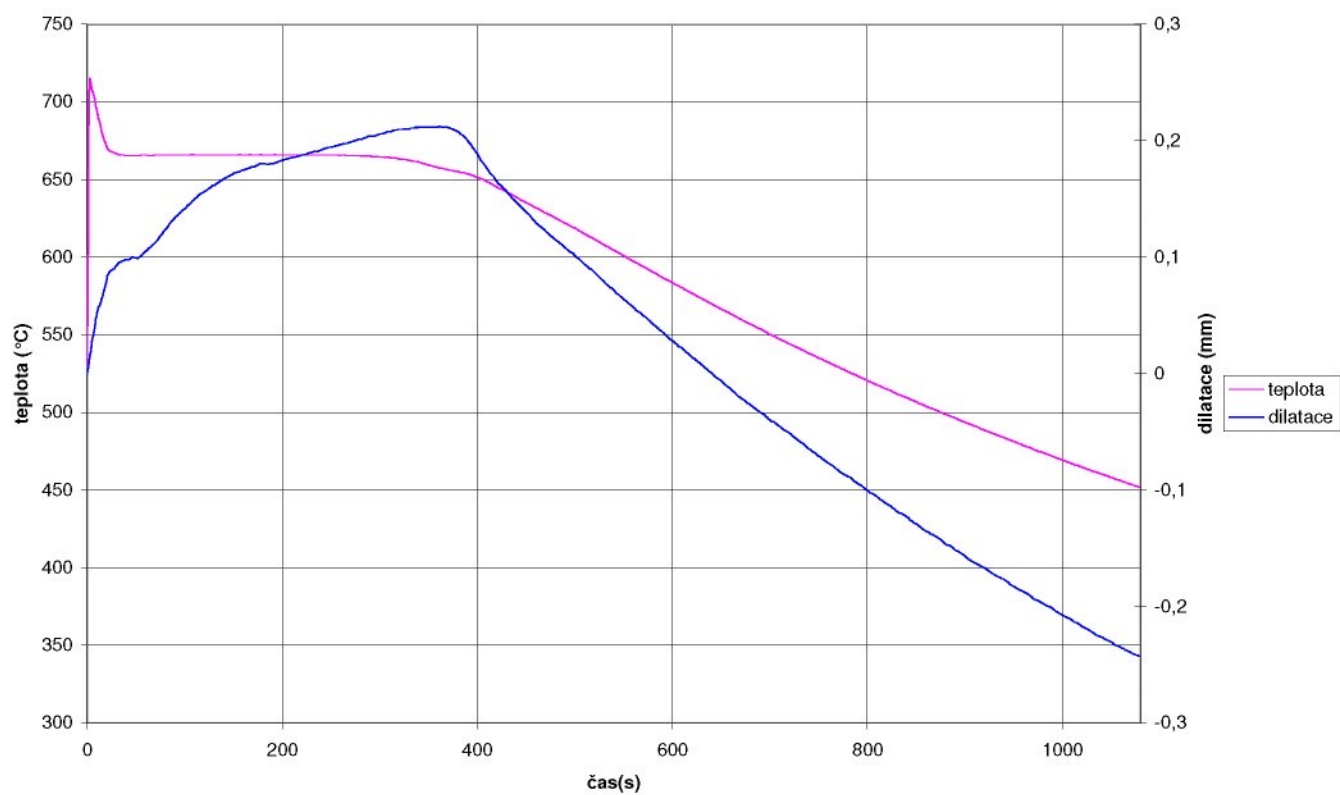
- [1] Kolektiv Československých, Maďarských, Německých a Polských autorů: Příručka o hliníku.
- [2] Pižl, J.: Vliv dilatačních procesů při tuhnutí odlitků na tvorbu jejich staženin. [Diplomová práce]. TU –FS – KSM, Liberec 2004.
- [3] Hošek, Z.: Rozměrové změny při tuhnutí grafitických litin. [Diplomová práce]. TU FS Liberec.
- [4] Vetiška, A.: Teoretické základy slévárenské technologie. 2. upravené vydání, Praha 1974
- [5] Sedláček, V.: Neželezné kovy a slitiny, 1. vydání, Praha 1973
- [6] Nová, I.: Technologie I. Slévání a svařování, 1. vydání, Liberec 2006

# PŘÍLOHA

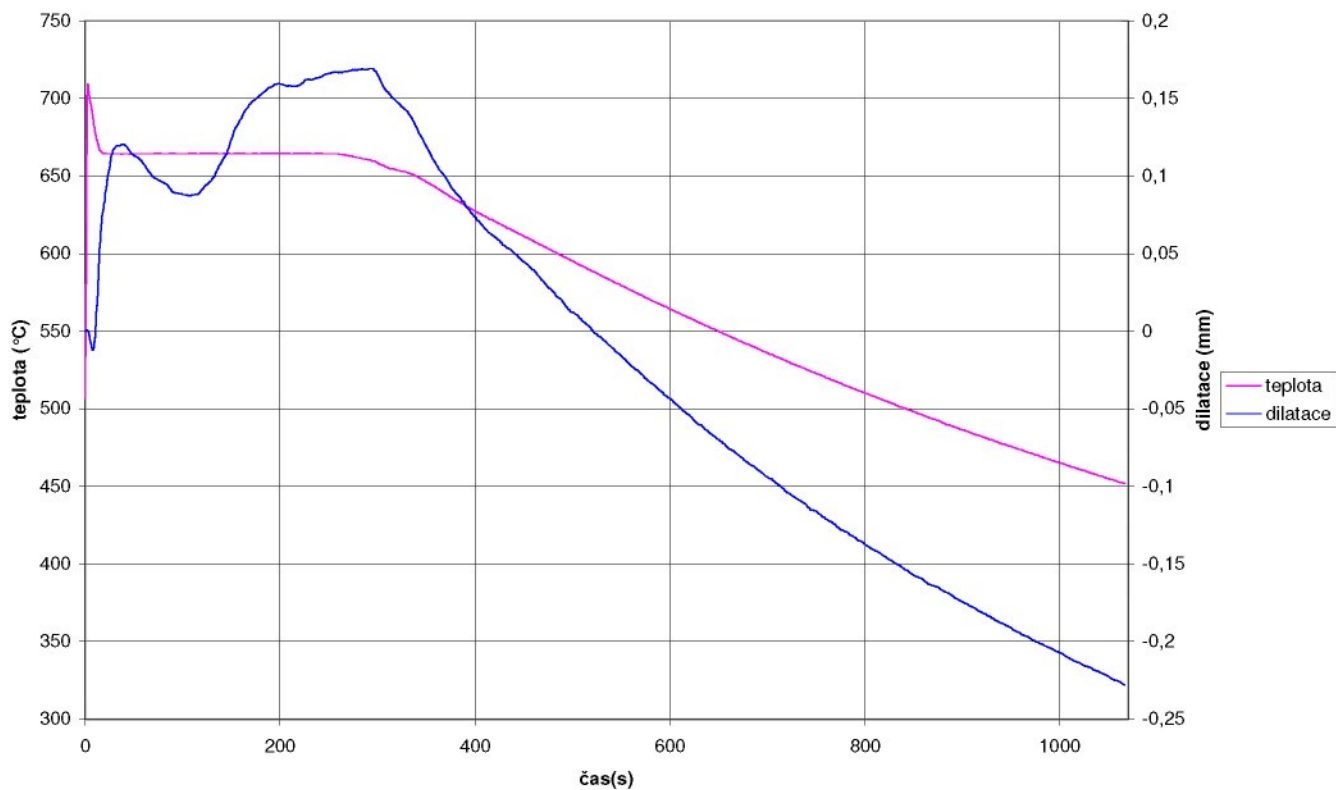
## Vzorek 1



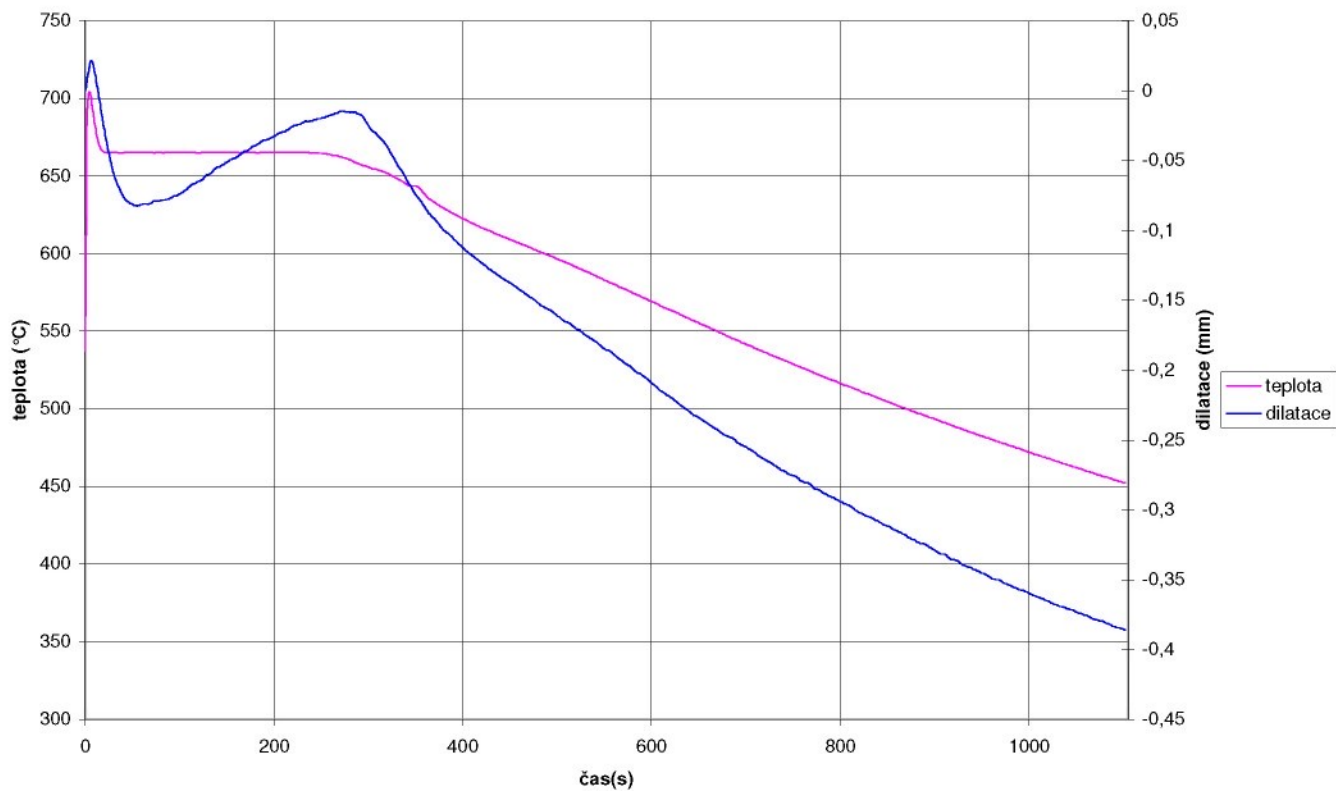
## Vzorek 2



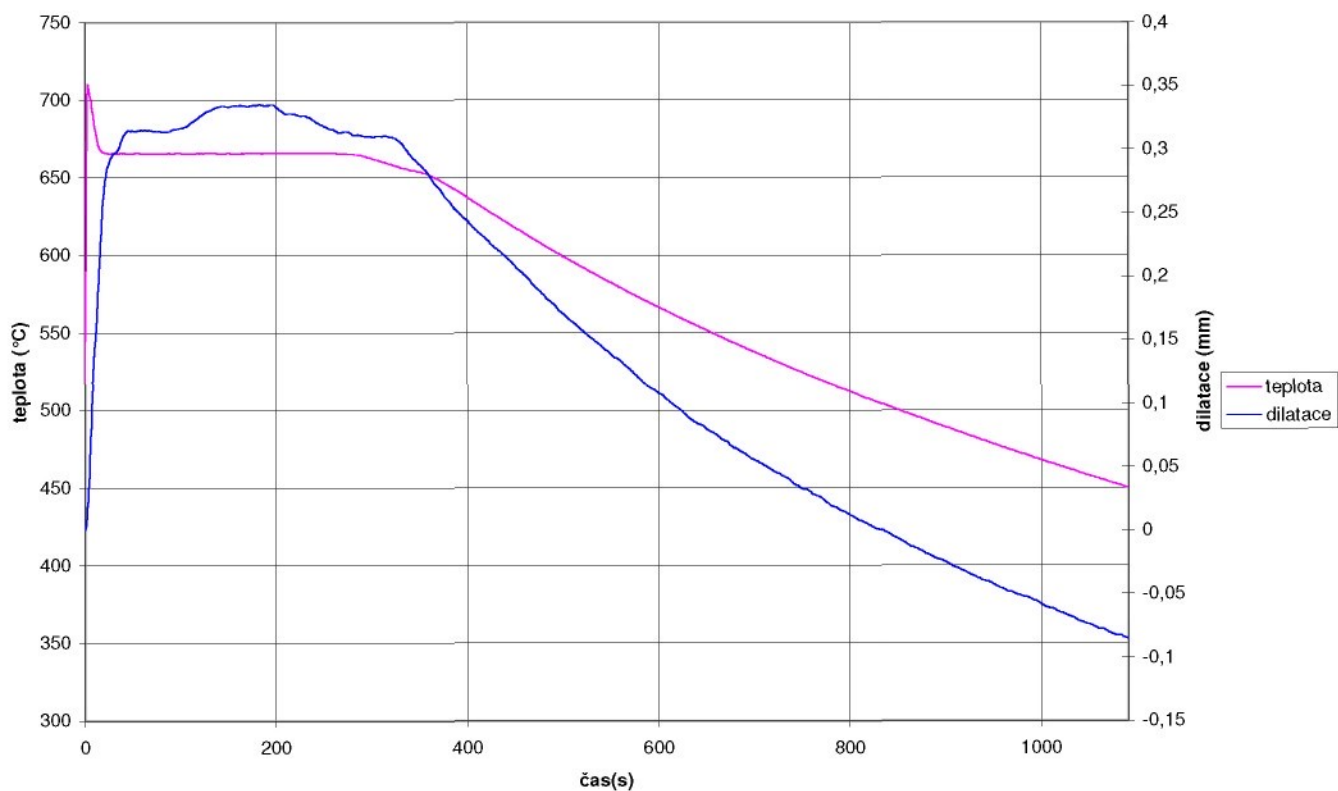
### Vzorek 3



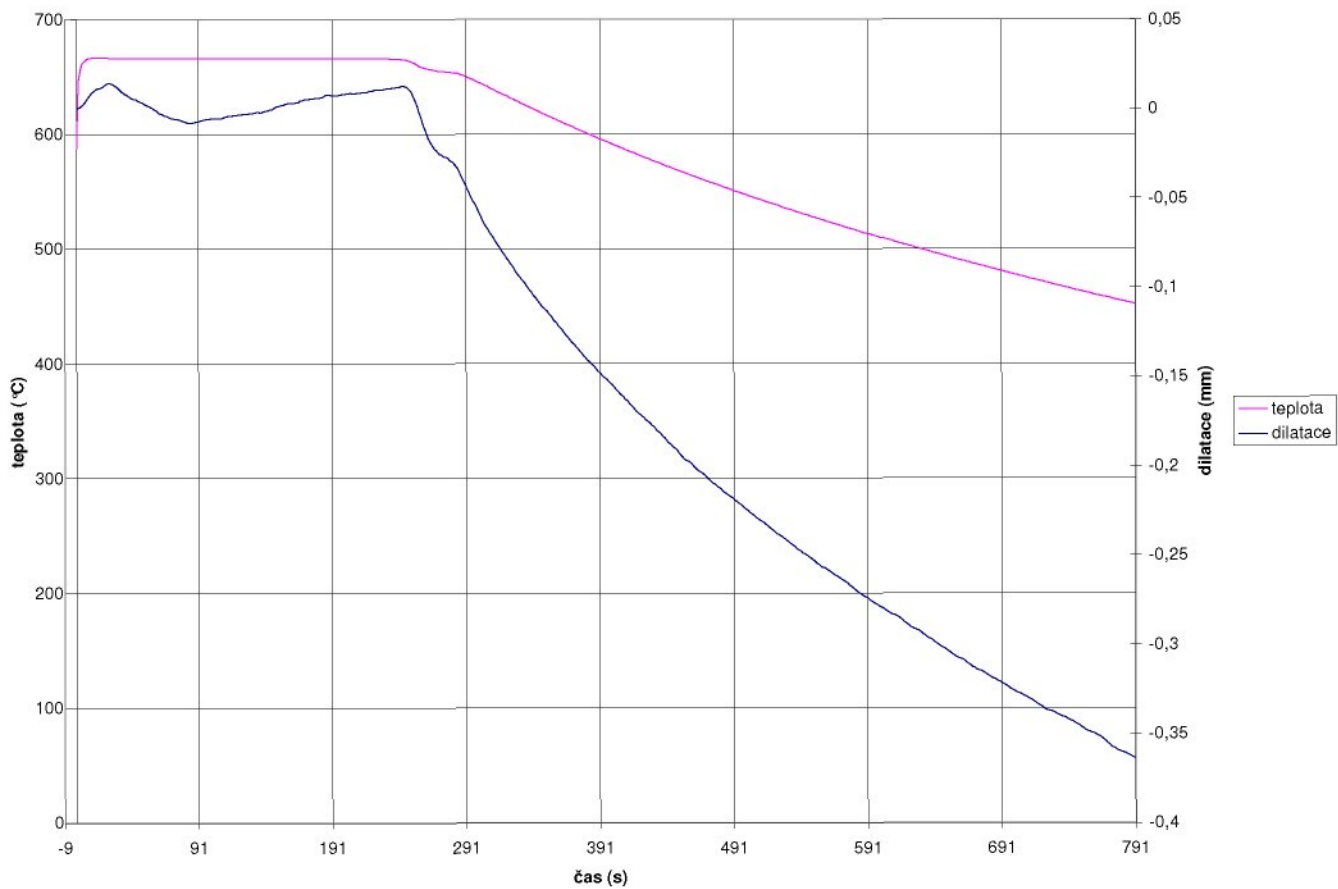
### Vzorek 4



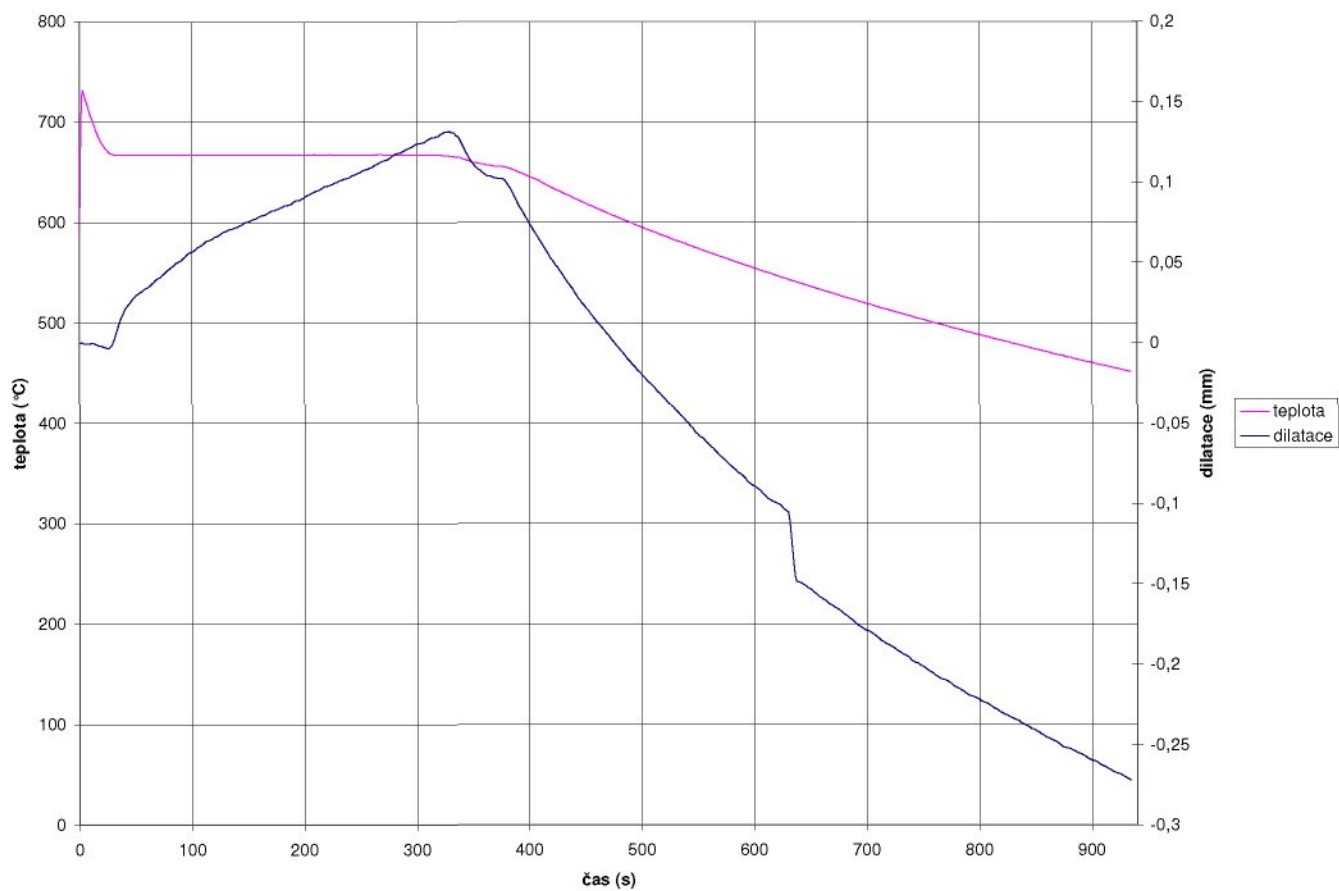
### Vzorek 5



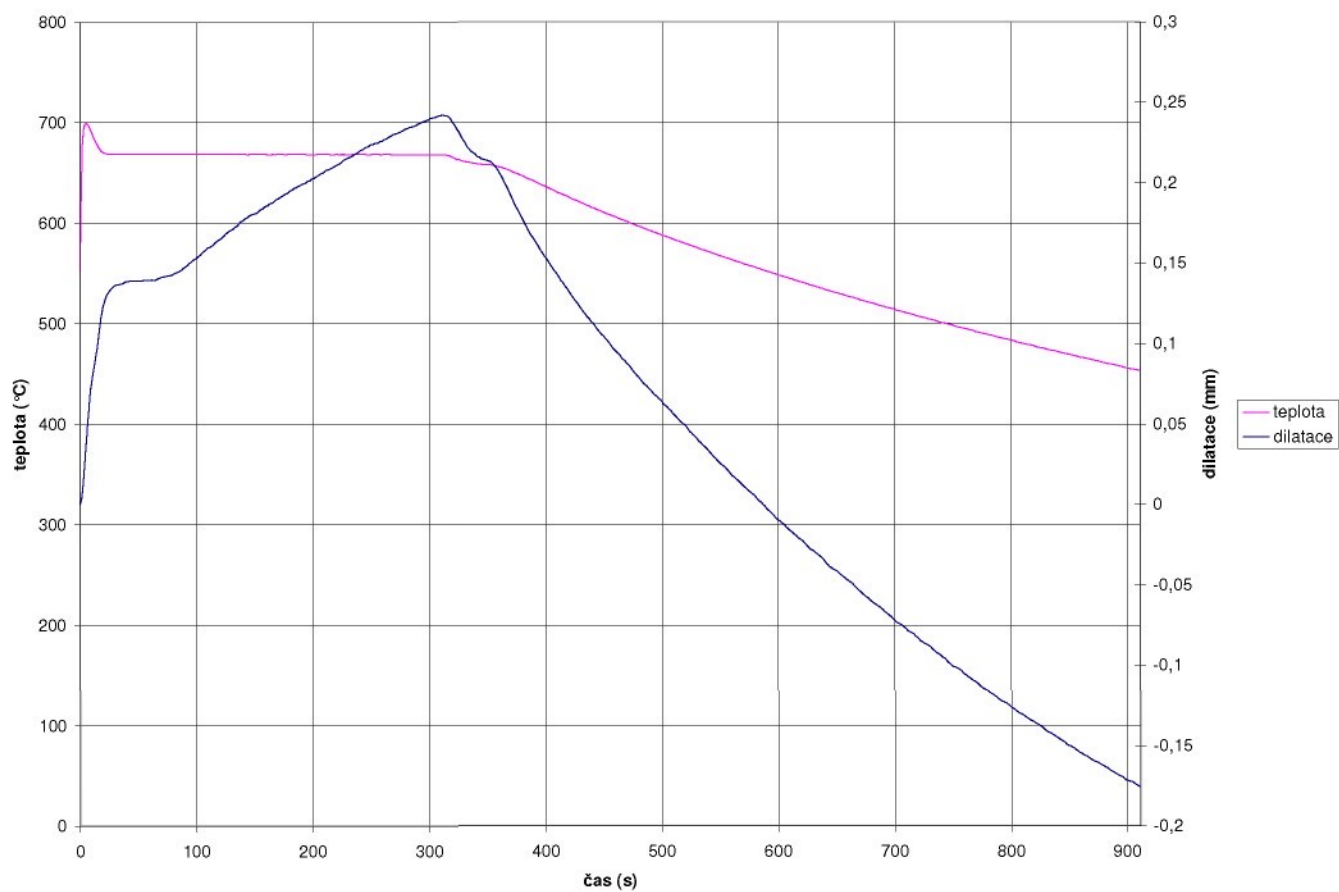
### Vzorek 6



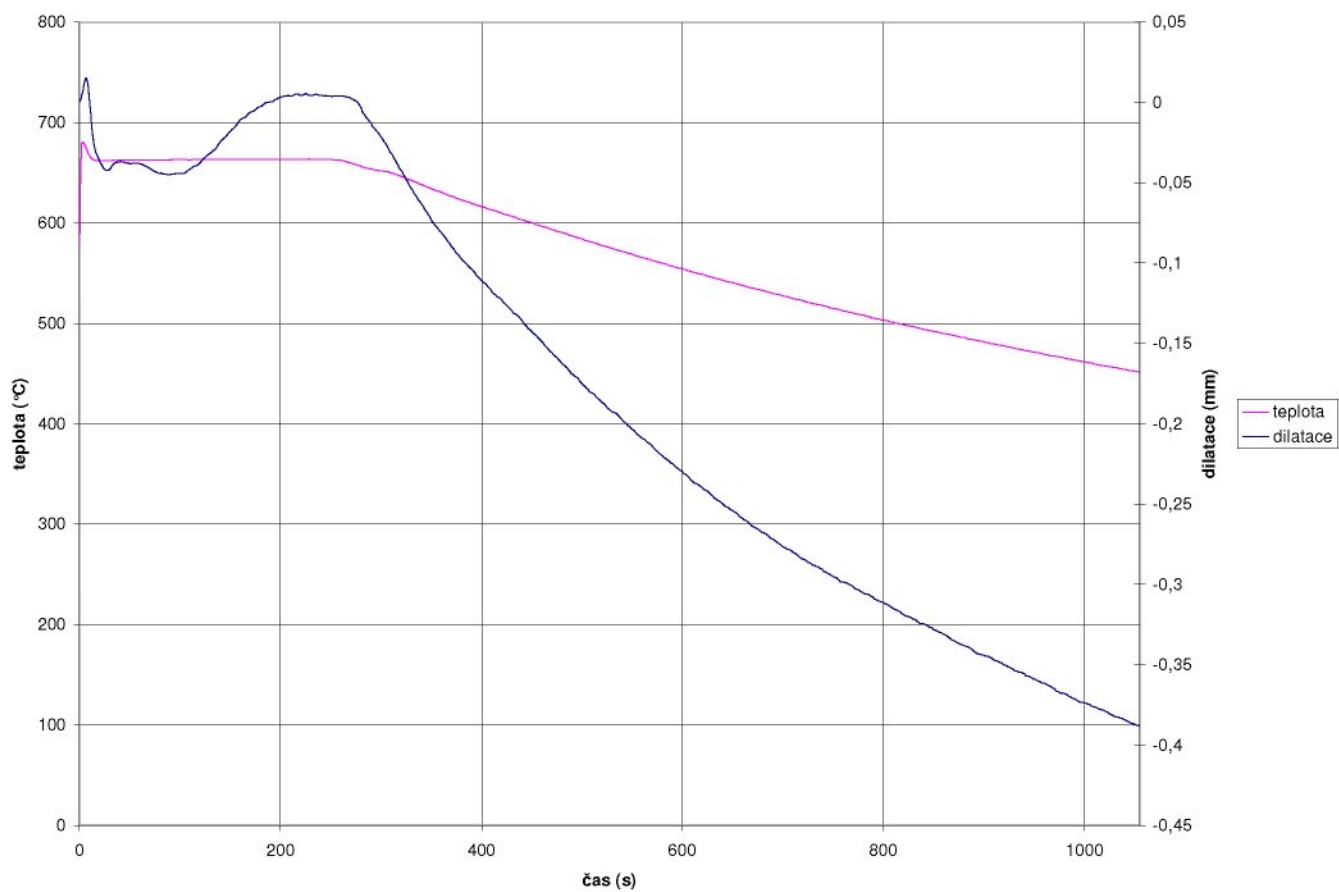
### Vzorek 7



### Vzorek 8



### Vzorek 9



### Vzorek 10

