

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

## FAKULTA STROJNÍ

Katedra strojírenské technologie



Studijní program **P 2303** Strojírenská technologie

Studijní obor **2303V002** Strojírenská technologie

Zaměření

Slévárenství

SLEDOVÁNÍ VLASTNOSTÍ SLITIN ZINKU PRO VÝROBU ODLITKŮ

MONITORING PERFORMANCE FOR THE PRODUCTION OF ZINC  
ALLOY CASTINGS

[Doktorská disertační práce]

Autor: Ing. Pavel Pěnička

Školitelka práce: Prof. Ing. Iva Nová, CSc.

Vedoucí katedry: Prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld

Liberec, 2011

## Anotace

Disertační práce je zaměřena na sledování slévárenských vlastností čistého zinku a slitin zinku pro výrobu odlitků. V této práci byly zkoumány slévárenské a mechanické vlastnosti čistého zinku a slitin zinku. Jejich hodnoty byly vyneseny do příslušných grafů a tabulek.

Disertační práce je rozdělena do dvou hlavních kapitol. Jedná se o rešeršní a experimentální část práce. Obě tyto části se zabývají problematikou slévárenských vlastností čistého zinku a jeho slitin.

**Rešeršní část práce** se zabývá vlastnostmi čistého zinku a jeho slitin při tvorbě slévárenských odlitků včetně popisů a způsobů. Dále jsou zde popsány některé slévárenské, fyzikální a tepelně-fyzikální vlastnosti tavenin.

**Experimentální část práce** se zabývá sledováním slévárenských vlastností čistého zinku a jeho slitin. Nejprve byl vypracován výpočet některých termodynamických veličin pro čistý zinek a jeho slitiny (změny molární entropie a entalpie při tavení čistého zinku, změna Gibbsovy energie při tavení). V další fázi byly sledovány dilatační vlastnosti tuhnuoucích a chladnoucích odlitků z čistého zinku a jeho slitin pomocí dilatometru. Byly porovnány dilatační vlastnosti čistého zinku a jeho slitin v různých typech slévárenských forem (písek, CT směs, kovová forma nechlazená a chlazená) a byl vypočítán součinitel teplotní roztažnosti (smrštivosti) čistého zinku a jeho slitin. Další kapitola této disertační práce je zaměřena na sledování mechanických vlastností čistého zinku a jeho slitin (zkouška tahem, zkouška vrubové houževnatosti, zkouška tvrdosti dle Brinella). Další část disertační práce je věnována ohřevu zinku a jeho slitin v elektrické odporové peci, kde byla sledována roztažnost jednotlivých materiálů. V poslední části této práce je porovnání struktur čistého zinku a jeho slitin – velikost zrna (metalografické výbrusy). Ze všech těchto měření budou vyhodnoceny a porovnány výsledky jednotlivých zkoušek.

**Klíčová slova:** zinek, slitina, mechanické vlastnosti, teplotní roztažnost, trhací zkouška, chlazená forma.

**Annotation:**

Doctoral thesis is focused on monitoring of metallurgy properties of pure zinc and zinc alloys for casting. In this work were examined metallurgy and mechanical properties of pure zinc and zinc alloys, and their values were plotted in the graphs and tables.

Doctoral thesis is divided into two main Gross - search and experimental work. Both parts deal with the metallurgy properties of pure zinc and its alloys.

**Searching part of the work** deals with the properties of pure zinc and its alloys in the creation of metallurgy castings, including descriptions and methods. Additionally there is described some metallurgy, physical and thermo-physical properties of melts.

**Experimental section** deals with monitoring of metallurgy properties of pure zinc and its alloys. The first step was prepared by calculating some thermodynamic quantities for pure zinc and its alloys (changes in molar entropy and enthalpy of melting of pure zinc, the change of Gibbs energy during melting). In the next phase were monitored dilatometers curing properties and the cooling of castings of pure zinc and its alloys using dilatometer. Comparison of the expansion properties of pure zinc and its alloys in various types of casting forms (sand, CT compound, uncooled and cooled metallic form) and calculated the coefficient of thermal expansion of pure zinc and its alloys. Another part of this thesis is aimed at monitoring the mechanical properties of pure zinc and its alloys (tensile test, Charpy hammer, hardness test Brinell). The next part of the thesis is dedicated to heating of zinc and its alloys in the electric oven where we watched the expansion of materials. The last part Furthermore following the comparison of the structures of pure zinc and its alloys - grain size (metallographic cuts). From all these measurements were evaluated and compared results of individual tests.

**Keywords:** zinc alloy, mechanical properties, thermal expansion, blind test, cooled form.



**Poděkování:**

*Děkuji Prof. Ing. Ivě Nové,CSc. a slévačskému mistrovi panu Drahoslavu Vinšovi za pomoc při tvorbě doktorské práce. Také bych chtěl poděkovat mé rodině, která mě celou dobu podporovala při studiu na tomto zaměření.*



**OBSAH**

|                                                                                                                                                                    |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Seznam zkratk a symbolů .....</i>                                                                                                                               | <i>7</i>  |
| <b>1. Úvod.....</b>                                                                                                                                                | <b>8</b>  |
| 1.1. Historický vývoj zinku .....                                                                                                                                  | 10        |
| 1.2. Cíle disertační práce .....                                                                                                                                   | 13        |
| 1.3. Publikace autora k disertační práci .....                                                                                                                     | 14        |
| <b>2. Charakteristika zinku a jeho slitin .....</b>                                                                                                                | <b>16</b> |
| 2.1.1. Zinek a jeho slitiny .....                                                                                                                                  | 16        |
| 2.1.2. Slitiny zinku.....                                                                                                                                          | 17        |
| 2.2. Charakteristika technologických vlastností .....                                                                                                              | 22        |
| 2.3. Rozměrové změny při tuhnutí odlitku.....                                                                                                                      | 24        |
| 2.3.1. Objemové změny .....                                                                                                                                        | 25        |
| 2.3.2. Základní fyzikálně chemické vlastnosti.....                                                                                                                 | 32        |
| <b>3. TERMODYNAMICKÉ VÝPOČTY PRO ČISTÝ ZINEK.....</b>                                                                                                              | <b>35</b> |
| 3.1. Použité výpočty pro stanovení podmínek tání a krystalizace čistého zinku.....                                                                                 | 35        |
| 3.1.1. Výpočet změny molární entropie při tavení čistého zinku .....                                                                                               | 35        |
| 3.1.2. Výpočet změny molární entalpie při tání čistého zinku .....                                                                                                 | 37        |
| 3.1.3. Výpočet změny Gibbsovy energie při tavení čistého zinku v závislosti na teplotě při konstantním tlaku 101 325 Pa.....                                       | 39        |
| 3.1.4. Výpočet změny Gibbsovy energie při tavení čistého zinku v závislosti na tlaku při konstantní teplotě 692,5 K.....                                           | 40        |
| 3.1.5. Výpočet změny Gibbsovy energie při tavení čistého zinku v závislosti na teplotě a tlaku .....                                                               | 42        |
| <b>4. EXPERIMENTÁLNÍ SLEDOVÁNÍ VYBRANÝCH VLASTNOSTÍ SLITIN ZINKU.....</b>                                                                                          | <b>45</b> |
| 4.1. Měření dilatačních vlastností vybraných slitin zinku pro porovnání optického a mechanického měření.....                                                       | 46        |
| 4.1.1. Charakteristika použitého zařízení .....                                                                                                                    | 46        |
| 4.1.2. Vlastní měření dilatace .....                                                                                                                               | 49        |
| 4.1.3. Porovnání dilatačních křivek z obou měřicích zařízení.....                                                                                                  | 50        |
| 4.2. Měření dilatačních vlastností vybraných slitin zinku a stanovení hodnot součinitele teplotní smrštivosti (odléváných materiálů do různých typů přílozek)..... | 51        |
| 4.2.1. Charakteristika použitého zařízení .....                                                                                                                    | 51        |
| 4.2.2. Vyhodnocení prováděných experimentů .....                                                                                                                   | 54        |
| A. Hodnocení měření dilatace .....                                                                                                                                 | 67        |
| B. Vypočítané hodnoty součinitele teplotní smrštivosti .....                                                                                                       | 70        |
| 4.2.3. Zhodnocení měření dilatačních změn při odlévání do různých typů forem.....                                                                                  | 81        |
| 4.3. Zkoušky zabíhavosti daných materiálů dle Curryho spirály .....                                                                                                | 82        |
| 4.3.1. Vyhodnocení délky získaných spirál .....                                                                                                                    | 84        |



|                      |                                                                                     |            |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>4.4.</b>          | <b>Mechanické zkoušky daných materiálů slitin zinku.....</b>                        | <b>85</b>  |
| 4.4.1.               | Zkouška tahem.....                                                                  | 85         |
| 4.4.2.               | Zkouška vrubové houževnatosti .....                                                 | 87         |
| 4.4.3.               | Zkouška tvrdosti dle Brinella.....                                                  | 90         |
| <b>4.5.</b>          | <b>Měření teplotní roztažnosti tělísek Ø 8 x 50 mm vybraných slitin zinku .....</b> | <b>92</b>  |
| <b>4.6.</b>          | <b>Metalografické hodnocení struktury daných materiálů .....</b>                    | <b>96</b>  |
| 4.6.1.               | Charakteristika použitého zařízení a popis metody .....                             | 96         |
| <br>                 |                                                                                     |            |
| <b>5.</b>            | <b>DISKUSE VÝSLEDKŮ .....</b>                                                       | <b>101</b> |
| <br>                 |                                                                                     |            |
| <b>6.</b>            | <b>ZÁVĚR.....</b>                                                                   | <b>104</b> |
| <br>                 |                                                                                     |            |
| <b>7.</b>            | <b>Seznam literatury .....</b>                                                      | <b>107</b> |
| <br>                 |                                                                                     |            |
| <b>PŘÍLOHY .....</b> |                                                                                     | <b>109</b> |

**Seznam zkratk a symbolů**

|                   |                                                                                 |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| C                 | Měrná tepelná kapacita, $[\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}]$                         |
| $R_m$             | Mez pevnosti, [MPa]                                                             |
| $\Phi$            | Tažnost, [%]                                                                    |
| $\lambda_F$       | Součinitel tepelné vodivosti, $[\text{W}/\text{m.K}]$                           |
| $M_m$             | Molární hmotnost $[\text{Kg}/\text{kmol}]$                                      |
| $l_t$             | Měrné teplo $[\text{J}/\text{kg}]$                                              |
| P                 | Tlak, [Pa]                                                                      |
| S                 | Plocha, $[\text{m}^2]$ ,                                                        |
| T                 | Čas, [s]                                                                        |
| T                 | Absolutní teplota, [K]                                                          |
| $T_F$             | Teplota formy, $[\text{°C}]$ , [K]                                              |
| $T_L$             | Teplota likvidu $[\text{°C}]$ , [K]                                             |
| $T_{\text{lití}}$ | Teplota lití, $[\text{°C}]$ , [K]                                               |
| $T_S$             | Teplota solidu, $[\text{°C}]$ , [K]                                             |
| $T_{z.l.s}$       | Teplota začátku lineárního smrštění, $[\text{°C}]$ , [K]                        |
| V                 | Objem, $[\text{m}^3]$                                                           |
| $V_0$             | Počáteční objem, $[\text{m}^3]$                                                 |
| $T_{\text{tav}}$  | Teplota tavení $[\text{°C}]$                                                    |
| $T_{\text{var}}$  | Teplota varu $[\text{°C}]$                                                      |
| $\Delta T$        | Teplotní změna, [K]                                                             |
| $\Delta V$        | Objemová změna, $[\text{m}^3]$                                                  |
| $\alpha$          | Součinitel teplotní roztažnosti (smrštivosti) $[\text{K}^{-1}]$                 |
| $l_0$             | Délka „piškoty“ [mm]                                                            |
| $\Delta l$        | Změna lineárního rozměru sledovaného tělesa [mm]                                |
| P                 | Hustota, $[\text{kg.m}^{-3}]$                                                   |
| $\rho_F$          | Hustota materiálu formy, $[\text{kg.m}^{-3}]$                                   |
| $l_v$             | rozměr odlitku po volné dilataci, [m]                                           |
| $l_z$             | Počáteční rozměr odlitku při teplotě, $T_{z.l.s}$ [m]                           |
| $T_{kr}$          | Teplota krystalizace $[\text{°C}]$ , [K]                                        |
| $T_O$             | Teplota okolí, [K]                                                              |
| $T_{op}$          | Teplotu okolního prostředí, [K]                                                 |
| $V_d$             | Objem dendritické pórovitosti, $[\text{m}^3]$                                   |
| $V_{md}$          | Objem mezidendritické pórovitosti, $[\text{m}^3]$                               |
| $V_{st}$          | Objem soustředné staženiny, $[\text{m}^3]$                                      |
| $V_{vd}$          | Objem vnitrodendritické pórovitosti, $[\text{m}^3]$                             |
| $\Delta V_L$      | Objemová změna odlitku v kapalném stavu, $[\text{m}^3]$                         |
| $\Delta V_{L-S}$  | Objemová změna mezi teplotami $T_L$ a $T_S$ , $[\text{m}^3]$                    |
| $\Gamma$          | Součinitel objemového smrštění, $[\text{K}^{-1}]$                               |
| $\gamma_s$        | průměrná hodnota $\gamma$ v teplotním intervalu $T_L - T_S$ , $[\text{K}^{-1}]$ |
| $\Delta$          | Šířka pórovitého pásma odlitku, [m]                                             |
| $\varepsilon_v$   | Poměrná volná dilatace, [ - ]                                                   |
| $\varepsilon_B$   | bržděná tepelná dilatace, [ - ]                                                 |

## 1. Úvod

V dnešní době se čím dál více uplatňující slitiny neželezných kovů, především to jsou slitiny hliníku, zinku a dalších kovů (mědi, titanu atd.). Tyto slitiny mají značné uplatnění při výrobě nejrůznějších konstrukčních dílů. Pokud se jedná o automobilový průmysl, nacházejí zde značné uplatnění slitiny zinku. Slitiny hliníku již našly uplatnění dříve (výroba pístů, bloků spalovacích motorů, hlav motorů, atd.). Zde byla využita především malá hustota ( $2700 \text{ kg.m}^{-3}$ ), vysoká tepelná vodivost ( $207 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) i dobré slévárenské vlastnosti.

Dále slitiny zinku mají nízkou teplotu tavení (méně než 420°C ) a dobře se odlévají, i když vykazují vyšší hustotu cca 7200 kg.m<sup>-3</sup>. Hlavními technologiemi odlévání obou těchto materiálů a jejich slitin je vysokotlaký způsob výroby odlitků. Tato technologie zabezpečuje vysokou rozměrovou přesnost a hladkost odlitků. Při gravitačním lití do kovových forem odlitky ze slitin zinku vykazují hutnost bez vnitřních vad (unášeče zahradních sekaček a motocyklové karburátory).

Hlavní výhodou, proč slitiny zinku našly značné uplatnění v automobilovém průmyslu, je především v jejich nízké teplotě tání a malým cenovým nárokům při tavení. Slitiny zinku se vyznačují výbornými slévárenskými vlastnostmi a v současné době jejich použití je při výrobě drobných odlitků v automobilovém průmyslu, viz obr. 1-1, obr. 1-2.



Obr. 1-1 Ukázky odlitků ze slitin zinku , vlastní snímky



Obr. 1-2 Ukázka možných dílů u automobilu ze zinku [9]

Světová výroba odlitků z neželezných kovů je uvedena v tabulce 1.1.

**Tabulka 1.1 Světová výroba odlitků ze slitin neželezných kovů v roce 2011**

| <b>Množství spotřeby jednotlivých druhů materiálů v produkci [ miliony tun]</b> |           |           |           |                                   |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------------------------------|
| <b>Zn</b>                                                                       | <b>Al</b> | <b>Mg</b> | <b>Cu</b> | <b>Ostatní<br/>neželezné kovy</b> |
| 0,4                                                                             | 10        | 0,15      | 1,3       | 0,47                              |

Z toho připadá na slitiny zinku 0,4 milionů tun odlitků. Na slitiny hliníku 10 milionů tun, slitiny hořčíku 0,15 milionů tun, slitiny mědi 1,3 milionů tun a ostatní neželezné kovy 0,47 milionů tun odlitků.

Především rozvoj automobilového průmyslu, letectví a astronautiky přispívá k rozvoji nových druhů slitin a také nových metod. Dnes se objevují ve sléváreství nové slitiny hliníku s hořčíkem a manganem (AlMg5Si2Mn), které mají obchodní označení Magsimal a jejich hlavní přednost je, že se dají vyrábět odlitky s vysokou tažností a pevností. Pokud se jedná o slitiny zinku, zde byla vyvinuta slitina Superalloy, která se používá pro odlévání tlakovým způsobem na strojích s teplou komorou. Tato slitina má výborné mechanické a slévárenské vlastnosti. Pokud potřebujeme slitinu, kterou lze precipitačně vytvrzovat, jednalo by se o slitinu Beric. Slitina obsahuje 4 % Al a 4% Cu. Slévárny pro odlévání hořčíkových slitin se spíše objevují v zahraničí. Odlévají se slitiny AM50, AM60, AZ91 je nejpoužívanější. Jejich hmotnost je velmi nízká, a proto se používají na odlévání automobilových volantů a výztuh sedaček závodních automobilů. V odvětví slitin mědi je velmi často používaná cínová a hliníková bronz (CuSn12 a CuAl10Ni2Mn) nebo mosaz (CuZn31MnAl1).

Množství výroby odlitků ve Spojených státech amerických je uveden v tabulce 1.2.

**Tabulka 1.2 Množství výroby tun odlitků v USA**

| <b>Množství spotřeby jednotlivých druhů materiálů v USA produkci [tuny]</b> |               |               |               |               |                |               |
|-----------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|---------------|
| <b>Rok</b>                                                                  | <b>1985</b>   | <b>1990</b>   | <b>1995</b>   | <b>2000</b>   | <b>2005</b>    | <b>Rok</b>    |
| <b>Zn</b>                                                                   | 686,6         | 630           | 1599,00       | 901,5         | 955,7          | <b>Zn</b>     |
| <b>Al</b>                                                                   | 5176,8        | 3490,6        | 5765          | 7620,4        | 8348,1         | <b>Al</b>     |
| <b>Mg</b>                                                                   | 61            | 69,7          | 47,7          | 362,2         | 415,3          | <b>Mg</b>     |
| <b>Cu</b>                                                                   | 1133,50       | 852,9         | 1036,6        | 970,7         | 789,4          | <b>Cu</b>     |
| <b>Celkem</b>                                                               | <b>7057,9</b> | <b>5043,2</b> | <b>8448,3</b> | <b>9854,8</b> | <b>10508,5</b> | <b>Celkem</b> |

V dnešní době se velmi využívá odlitků z neželezných kovů. Jedná se především o slitiny hliníku, mědi, olova, cínu, zinku a dalších neželezných kovů. Odlévání těchto slitin se provádí gravitačně do pískových forem ( kusová výroba ) a kovových forem, nebo tlakovým litím do kovových forem ( hromadná a sériová výroba ). V ČR je poměrně hodně malých sléváren. Velké slévárny se zde již moc neobjevují. Ve světě je ročně vyrobeno 80 milionů tun odlitků.

### 1.1. Historický vývoj zinku

Již v minulosti byl zinek používán především pro lékařské účely. Ve starověkém Egyptě byl používán ve slitině s mědí jako mosaz kolem roku **1450 př.n.l** – Homérova doba. Nejstarší známá zinková ruda byla označována jako kalamín, dle starých Řeků označována jako kadmia.

Čistý zinek se poprvé podařilo získat kolem **13. století** v Indii. Odtud pomocí mořeplavectví byly zkušenosti z touto rudou přeneseny do Číny kolem roku **1370 až 1644** za období dynastie Ming. V tomto období se začala tato ruda používat jako platidlo (výroba mincí ). V Evropských zemích výroba zinku nebyla příliš známá, a proto ze zinek dovážel z Číny pomocí mořeplavecké nizozemské společnosti. První počátky výroby zinku v Evropě započaly kolem **18. století** v Anglii, dále pak v Belgii a Slezsku. Mnozí vědci se domnívají, že původ slova zinek pochází z německého slova Zinke, což znamená v překladu hrot, ozub. Tento překlad je vzhledem k jeho struktuře po zlomení, jelikož zinek má osobitou skladbu krystalů.

#### Stručnější historický vývoj:

**1000 až 200 let př.n.l** – V období kolem **1000 let př.n.l** byl objeven obraz, který obsahoval 88 % zinku. Byl objeven v Transilvanii. Mosaz byla používána na mince, ozdoby a zbraně. Byla objevena slitina zinku v Řecku. Lesklé stříbřité náhrdelníky byly nalezeny na ostrově Rhodos a jsou na bázi zinku. Výroba mosazi v Římě a dále tavení zinečnatých rud s mědí. Římané byli schopni pouze vyrobit mosaz smícháním a ohříváním mědi v nístějových pecích. Zinek se v této době jako čistý nepodařilo objevit.

**Kolem 13 a 14. století** se začínají objevovat první zmínky o výrobě čistého zinku. **Ze 14. století** pochází popis kondenzace par v kapalných kovech. Významný indický vědec Nagarjuna popisuje tuto metodu výroby zinku jako nový kov, který se vyrábí nepřímým ohřevem kalamínu s organickou látkou v kryté peci vybavenou kondenzátorem. Zinečnatá

pára byla získána a ochlazována v kondenzátoru pod krytou pecí. **V roce 1374** byl zinek uznán jako nový kov. Zinek se tady začal používat pro výrobu mosazi a jeho oxid v lékařství.

**15. a 16. století** – dochází k přesunu zinku z Indie do Číny. Číňané používali zinek především k výrobě mincí a různých ozdob či váz. Dále zde byl popis výroby mosazi, jak kalamín (kysličník zinečnatý) byl smíchán s malými kousky mědi, a dále pokapaný práškovým sklem a zahříván v peci po dobu 20 hodin. Kolem roku **1600** si vědci v Evropě uvědomovali existenci zinku a jeho odlišné vlastnosti od ostatních kovů.

**17. století** – v tomto období vzniká nový proces výroby, a to pomocí galvanizace. Jako první na tento proces výroby přišel italský fyzik Luigi Galvanim. Tímto způsobem se dnes pokovují ocelové plechy. Galvanickým pokovováním se chápe nanášení zinku na ocelový povrch, kde zinek tvoří ochrannou vrstvičku a chrání ocelový materiál proti okolním vlivům. **V roce 1743** probíhala výroba zinku v retortách (destilace ve speciální hliněné nádobě za určité teploty). Detailně tento způsob popisuje Wiliam Champion, kapacita výroby byla kolem 220 tun/rok. Určité množství kalamínu a uhlíku bylo uzavřeno do jílového tavicího kelímku s otvorem ve dnu. Ten byl vsunut na železnou trubku a tato trubka vsunuta pod kelímkovou pec do chladírny pod pecí. Uzavřený konec železné trubky seděl v kádi vody a zde byl soustředěn kovový zinek. Destilace trvala okolo 75 hodin a za tuto dobu bylo získáno 400 kg kovu. Zde se poprvé začal průmyslově získávat zinek. **V roce 1746** německý chemik Andrea Sigismundem Meggraff separoval zinek jako samostatný kov. Prováděl tento pokus tak, že ohříval zinkovou rudu s dřevěným uhlím v uzavřené retortě a byl z nich získán kovový zinek. Vyvinul experimentální postup prvního technického postupu pro tepelnou rafinaci zinku.

**V roce 1798** v německém horním Sasku byla postavena první tavírna na tavení zinku. Tuto tavírnu vybudoval vědec Johann Rubergem. Využil retorty, které byly upevněny horizontálně v peci, což dovoľovalo tyto retorty nechladit, tím se zvýšila jejich účinnost. **V roce 1810** byla postavena největší továrna, která se později stala největším výrobcem zinku na světě. Rok 1814 představuje Jonse Jackoba Berzeliuse švédského technika, který navrhl přidat tento prvek do Mendělejevovy tabulky prvků s označením Zn. **V roce 1836** bylo ve Francii zavedeno žárové zinkování jako antikorozní proces.

Velká naleziště byla objevena v USA v roce 1850, a tím se USA stává předním výrobcem v produkci zinku. **V roce 1907** světová produkce zinku byla kolem 737 500 tun/rok. Další významný pokrok nastal **v roce 1915** Francouzem Léonem Letrangem, kde byl zinek získáván elektrolyticky – elektrolýzou.

Využití tohoto způsobu bylo použito při první světové válce. V **polovině 20. století** se začal zinek získávat pomocí rychlého chlazení pece plynem a odvodem zinkových par do roztoku tekutého olova. Tento způsob výroby umožňovala speciální vysoká pec, která se stala hlavním metalurgickým zařízením pro výrobu zinku.

Největší naleziště zinkové rudy je v Rusku, u nás je to okolí Příbrami.

První publikace o slitinách zinku se začaly objevovat kolem šedesátých let minulého století. Známým průkopníkem byl Cope [20], který představil základ vývoje technologie tlakového lití pro slitiny zinku. V devadesátých letech minulého století se Takach [21] věnoval charakteristice tlakových spojů pro odlévání slitin zinku. Roku 1992 byla pozornost věnována tlakově litým odlitkům a jejich korozi Cowie [23]. V roce 2000 se zde objevuje Herman [27], který uvádí všechny zásady výroby tlakově litých odlitků ze slitin zinku. Průmyslovou výrobou zinku v USA se zabýval Norris [22]. Ve Velké Británii popsali historii zinku a vývoj výroby vědci Cocks a Walsers [24]. V ČR zinek popisují autoři Ptáček a Ustohal [26], kteří objasnili rozdělení slitin zinku dle druhu použité technologie odlévání. Dalším autorem, který porovnává uplatnění slitin zinku se slitinami hořčíku a hliníku, je Hrabánek [25]. Výrobu odlitků z neželezných kovů popisuje Otáhal [8]. Mnoho informací bylo popsáno především s využitím zinku v mosazi a ve slitinách hliníku, to popisují v publikaci Fabián a Balibruchová [13].

I když je dnes velký zájem o zinek a slitiny zinku v různých průmyslových odvětvích, téměř v žádné publikaci nejsou shromážděny a porovnány vlastnosti zinku a jeho slitin. Proto jsem se touto problematikou začal zabývat ve své disertační práci.



## 1.2. Cíle disertační práce

Experimentální část byla zaměřena na sledování slévárenských a mechanických vlastností slitin zinku. V rámci tohoto řešení byly sledovány tyto dílčí cíle.

### 1. Sledování dilatometrických vlastností tuhnutí a chladnutí slitin zinku pomocí dilatometru a optických kamer

Na principu mechanickém, tak i na principu optickém. Do formy tvaru „piškotu“ byly odlévány různé druhy slitin. A na základě tohoto odlévání bylo sledováno chladnutí a dále smrštění těchto odlitků.

### 2. Sledování smršťování odlévaných materiálů do různých typů příložek

V další části práce byly porovnány rozdíly mezi různými typy forem (různé materiály). Po odlití všech druhů slitin zinku, které zde máme na katedře strojírenské technologie TU v Liberci k dispozici. Pro všechny materiály byly také vypočítány součinitele teplotní smrštivosti (roztlačnosti)  $\alpha$  a jeho hodnoty zaznamenány do tabulek.

### 3. Zkoušky zabíhavosti daných materiálů dle Curryho spirály

V další fázi byla porovnána zabíhavost jednotlivých materiálů pomocí Curryho spirály.

### 4. Mechanické zkoušky daných materiálů

Další část této práce byla zaměřena na mechanické zkoušky materiálů (tahová zkouška, Charpyho kladivo (zkouška vrubové houževnatosti), zkouška tvrdosti dle Brinella).

### 5. Zkoušky roztlačnosti daných materiálů

V poslední fázi byly odlévány tyčky do formy válcového tvaru viz. Obr. 4-58, které se nechaly vychladnout až do teploty okolí. Po určité době došlo opětovně k jejímu zahřátí ve speciálně upravené peci, abych zjistil, jak se bude daná slitina chovat při ohřevu.

## 6. Sledování struktury daných materiálů

Z každého odlitého materiálu byl odebrán vzorek a pomocí optického mikroskopu zhotoveny fotky vnitřní struktury materiálu (metalografické výbrusy).

## 7. Závěr této práce

Pro každou zkoušku byly vypracovány náležité grafy a tabulky, ve kterých jsou zaznamenány naměřené hodnoty. Tyto hodnoty byly zaznamenány tak, aby se mezi sebou daly porovnávat.

### 1.3. Publikace autora k disertační práci

- [1] Pěnička P. MONITORING OF DILATATION CHANGES ALUMINIUM ALLOYS AND ZINC ALLOYS IN FOUNDRY., Mitech 2009-Proceedings, ISBN 978-80-213-1931-8.
- [2] Pěnička P. FOLLOWING BRAKE RETRACTION CASTS FROM ALLOYS ALUMINIUM AND ZINC., sborník Thomson Reuters
- [3] Machuta, J. - Pěnička, P. MONITORING OF DILATATION PROPERTIES OF CASTINGS BY SOLIDIFICATION FOUNDRY ALLOYS, sborník XV. Mezinárodní konference Spolupráce 2009, str. 237-242. 2009, Luhačovice, ISBN 978-80-248-1991-4, ISSN 0474-8484.
- [4] Nováková, I – Pěnička, P. PREDICTION OF THE IMPERFECTION OF PRESSURE DIE CASTINGS BASED ON THE SIMULATION CALCULATIONS, SBORNÍK VĚDECKÝCH PRACÍ Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava číslo 2, rok 2009, ročník LII, řada hutnická, článek č. 1506, str. 255 – 260. ISBN 978-80-248-1991-4 ISSN 0474-8484.
- [5] Pěnička, P. – Nováková, I. FOLLOWING BRAKE RETRACTION CASTS FROM ALLOYS ALUMINIUM AND ZINC. sborník konference Metal 2009, Hradec nad Moravicí, 19.5 - 21.5.2009 příspěvků. ISBN 978-80-87294-03-1.



- [6] Nová, I. - Pěnička, P. MONITORING OF SHRINKAGE AND LINEAR CONTRACTION OF CASTINGS IN THE PROCESS OF SOLIDIFICATION AL AND ZN ALLOYS. 2.Zlievarnské sympóziu, Strojnícka fakulta Žilinskej univerzity, 1.10.-3.10.2008, ISBN 978-80-8070-899-3.
  
- [7] Pěnička, P. MONITORING OF DILATATION CHANGES DURING SOLIDIFICATION OF CASTINGS FROM ZINC AND ZINC ALLOYS, sborník příspěvků. WTF, Brno, ISBN 978-80-214-3871-2.
  
- [8] Pěnička, P. MONITORING OF LINEAR CHANGES DURING SHRINKING OF CAST FROM ZINC ALLOY, 7. Mezinárodní PhD konference, 47.Slévárenské dny. 23. - 24.června 2010,Sborník příspěvků ISBN - 978-80-904020-6-5.
  
- [9] Pěnička, P. CHECK OF METHODOLOGY FOR MONITORING OF DILATATION CHANGES DURING SOLIDIFICATION OF THE CASTINGS FROM ZINC ALLOYS, 3.Mezinárodní konference ICTKI 2010, 20. - 21.1.2010,Sborník příspěvků ISBN 978-80-7414-204-8.
  
- [10] Pěnička, P. SLEDOVÁNÍ A POROVNÁNÍ DILATAČNÍCH ZMĚN PŘI TUHNUTÍ ODLITKŮ ZE SLITIN ZINKU, Slévárenství ročník LIX . 2011 číslo 5 – 6 ISSN 0037-6825.

## 2. Charakteristika zinku a jeho slitin

### 2.1.1. Zinek a jeho slitiny

Ve slévárenství se zinek jako samostatný kov nepoužívá, ale používají se jeho slitiny, neboť zinek nevykazuje nejlepší mechanické vlastnosti a pro výrobu strojních součástí se nepoužívá. Těchto vlastností dosáhne až s příměsmi s ostatními kovy, jako např. s hliníkem a mědí. Zinek se řadí do skupiny těžkých neželezných kovů s nízkou tavicí teplotou (420 °C). Krystalizuje v hexagonální krystalické soustavě. Zinek je modrobílý, lesklý, měkký a lehce tavitelný kov. Využívání jeho slévárenských vlastností se již projevuje od starověku. Jeho používání není jen ve slévárenství, ale je také nezbytným prvkem pro správný vývoj organismu. Zinek se také využívá při výrobě galvanických článků (baterie). Je označován jako zinko-uhlíkový článek. I když dnes je již nahrazován novou technologií (lithium, li-pol, li-fe). V tabulce 2.1 jsou uvedeny základní fyzikální vlastnosti zinku.



Obr. 2-1 Struktura čistého zinku (lom čistého zinku), vlastní snímek

**Tabulka 2.1** Přehled fyzikálních vlastností zinku

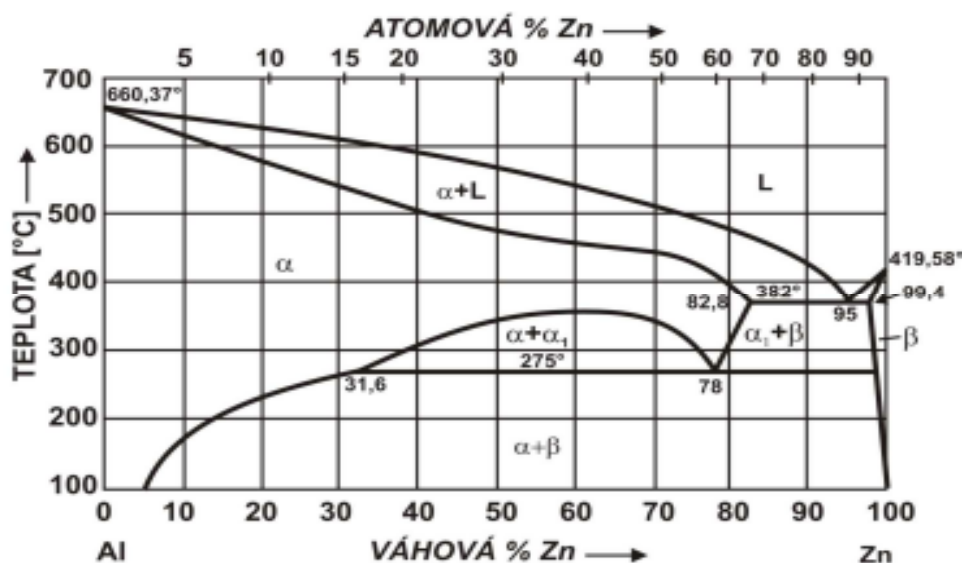
| Vlastnost              | Hodnota                                     |
|------------------------|---------------------------------------------|
| hustota                | 7130 [kg.m <sup>-3</sup> ]                  |
| teplota tavení         | 419 °C                                      |
| teplota varu           | 906 °C                                      |
| molární hmotnost       | 65,37                                       |
| tepelná vodivost       | 113 [W.m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]    |
| Měrná tepelná kapacita | 0,39 [kJ.kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ] |
| latentní teplo tání    | 100 [kJ.kg <sup>-1</sup> ]                  |

### 2.1.2. Slitiny zinku

Slitiny zinku se používají především pro výrobu odlitků. Díky přísadovým prvkům ( hliník, měď, hořčík atd.) získávají slitiny lepší mechanické vlastnosti. Mezi hlavní přísadový prvek patří hliník, dále je to měď, hořčík či křemík. I když tyto přísadové prvky mají také značný význam, největší vliv má hliník. Podle množství hliníku rozlišujeme různé druhy těchto slitin.

Slitiny zinku se ve světovém měřítku označují různě. Bud' se značí dle ASTM nebo dle ČSN. Ve slévárenství označována pod zahraničním názvem jako ZAMAK (Zinek, Aluminium, Magnesium, Kupfer) dle německého původu. Tyto slitiny mají vynikající slévárenské vlastnosti a jejich složení přísadových prvků je přesně dáno.

Základem pro tyto slitiny je rovnovážný diagram systému Zn-Al, viz obr. 2-2, je typem diagramu s primární fází s omezenou rozpustností přísadového prvku a se vznikem eutektika. Eutektikum je tvořeno fází Zn-ZnAl. Eutektická teplota systému Zn-Al je rovna 382 °C při koncentraci 5,5% Al. Obsah hliníku v normalizovaných slitinách se pohybuje v rozmezí 4 až 27% Al.



Obr. 2-2 Rovnovážný binární diagram Al-Zn [1]

Díky obsahu 4% hliníku mají slévárenské slitiny zinku eutektické až nadeutektické složení. Tuhnutí obvykle začíná vylučování primární fáze α-Al. Nejnižší tavící teplotu a nejužší interval tuhnutí mají přibližně eutektické slitiny s obsahem kolem 4 až 5% Al. Čím vyšší je obsah hliníku, tím vyšší je teplota likvidu a také je širší pásmo tuhnutí. Jako vedlejší přísadové prvky zde můžeme použít především měď a hořčík. Přehled slitin zinku, které jsou k dispozici na našem, jsou uvedeny v tabulce 2.3

*Měď* - má především za úkol zjemnit zrna, zvýšit mechanické vlastnosti slitiny, zvláště pevnost, tažnost a rázovou houževnatost a zlepšuje zabíhavost slitin. Při obsahu nad 0,7% Cu se zlepšuje odolnost vůči korozi. Ve slitinách se obvykle vyskytuje obsah mědi v rozmezí 0,5% až 3%.

*Hořčík* - ve velmi malém množství nám zvyšuje pevnost a kompenzuje škodlivý vliv cínu, olova a kadmia. Obsah hořčíku bývá 0,01% až 0,03% Mg. Podle základních prvků se často tyto slitiny označují zkratkou ZAMAK. (Zinek, Magnezium, Měď, Kupfer).

Nečistotami jsou zvláště železo, olovo, kadmium a cín. Tyto nečistoty především podporují vznik interkrystalické koroze a jejich obsah nesmí překročit řádově tisícinu procenta. Z tohoto důvodu se při výrobě slitin musí vycházet z velmi čistého základního kovu s obsahem 99,995% Zn. Pro výrobu odlitků se používají zejména slitiny s obsahem 8, 12 a 27% Al. Chemické složení je uvedeno v tabulce 2.1. V dnešní době se pro tlakové lití používá skupina slitin s obsahem kolem 4% Al, označována dle obsahu Al, Cu a Mg jako Z400, Z410, Z430 a Z 810. Tyto slitiny mají nižší mechanické vlastnosti a rychlejší pokles pevnosti za zvýšených teplot. Přehled fyzikálních vlastností slitiny Zamak je uveden v tabulce 2.2

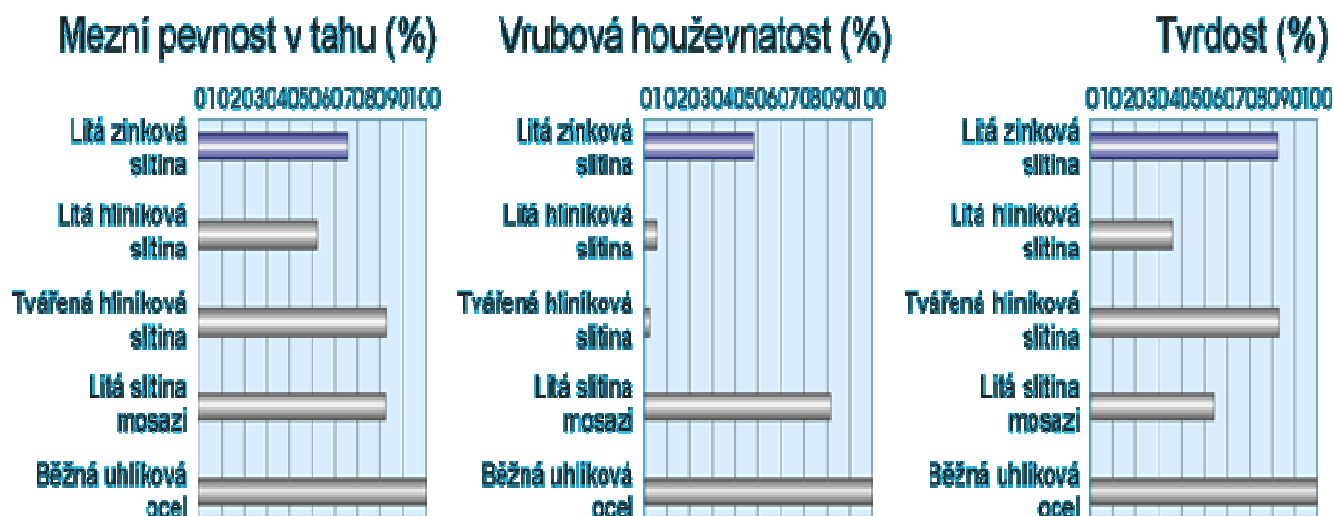
**Tabulka 2.2** Přehled fyzikálních vlastností slitiny ZAMAK

| Vlastnost      | Hodnota                    |
|----------------|----------------------------|
| hustota        | 7000 [kg.m <sup>-3</sup> ] |
| teplota tání   | cca 380 °C                 |
| pevnost v tahu | cca 350 MPa                |
| tažnost        | cca 3 %                    |
| tvrdost        | cca 100 HB                 |

Specifikace - těžký neželezný kov, korozivzdorný v prostředí slabě kyselém i zásaditém, snadno obrobitelný, leštitelný, charakterem podobný šedé litině.

Typické chemické složení: 2 % Al, 2 % Cu, 0,04 % Mg, 0,07 % Fe, 0,004 % Pb+Sn+Cd, zbytek Zn.

Na obr. 2-3 je schéma vlastností slitin zinku s dalšími vybranými materiály.



Obr. 2 – 3 Srovnání vlastností lité zinkové slitiny s dalšími slévárenskými materiály [28]

V tabulce 2.3 je uvedeno chemické složení slitin zinku Zn-Al

### Tabulka 2.3 Chemické složení slitin Zn-Al

|                        |                 | Zn-Al 8    | Zn-Al 12   | Zn-Al 27  |
|------------------------|-----------------|------------|------------|-----------|
|                        | Obsah prvků [%] |            |            |           |
| <b>Přísadové prvky</b> | Al              | 8,0-8,8    | 11,0-11,5  | 25,0-28,0 |
|                        | Cu              | 0,8-1,3    | 0,5-1,25   | 2,0-2,5   |
|                        | Mg              | 0,015-0,03 | 0,015-0,03 | 0,01-0,02 |
| <b>Nečistoty</b>       | Fe              | <0,10      | <0,075     | <0,10     |
|                        | Pb              | <0,004     | <0,004     | <0,004    |
|                        | Cd              | <0,003     | <0,003     | <0,003    |
|                        | Sn              | <0,002     | <0,002     | <0,002    |

V tabulce 2.4 jsou uvedeny fyzikální a mechanické vlastnosti slitin Zn-Al při gravitačním lití do pískových a do kovových forem a při tlakovém lití, vztaženo k teplotě 20 °C.

**Tabulka 2.4 Přehled fyzikálních a mechanických vlastností Zn-Al**

| Vlastnost                     | Hodnoty vybraných vlastností odlitků ze slitin zinku odlévaných různými způsoby |         |                           |          |          |                         |          |          |                        |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|---------|---------------------------|----------|----------|-------------------------|----------|----------|------------------------|
|                               | Zn-Al 8                                                                         | Zn-Al 8 | Zn-Al 8                   | Zn-Al 12 | Zn-Al 12 | Zn-Al 12                | Zn-Al 27 | Zn-Al 27 | Zn-Al 27               |
|                               | Písek                                                                           | Kokila  | Tlak.lití*)<br>tepl. kom. | Písek    | Kokila   | Tlak.lití**) stud. kom. | Písek    | Kokila   | Tlak.lití**) stud.kom. |
| R <sub>m</sub> [MPa]          | 248-275                                                                         | 220-255 | 360-385                   | 275-310  | 310-345  | 390-415                 | 400-440  | 310-325  | 405-440                |
| R <sub>p0,2</sub> [MPa]       | 193-200                                                                         | 190-200 | 280-300                   | 206-213  | 213-220  | 310-330                 | 338-345  | 310-325  | 360-380                |
| A <sub>5</sub> [%]            | 1-2                                                                             | 1-2     | 5-10                      | 1-3      | 2-5      | 4-7                     | 3-6      | 8-11     | 1-2                    |
| HB                            | 85-90                                                                           | 85-90   | 95-105                    | 105-125  | 105-125  | 95-105                  | 110-120  | 90-100   | 110-120                |
| E [MPa]                       | 85000                                                                           | -       | -                         | 82500    | -        | -                       | 75000    | -        | -                      |
| Nárazová práce [Nm]           | 17-24                                                                           | -       | -                         | 23-30    | -        | -                       | 34-54    | 47-74    | -                      |
| Hustota [kg.m <sup>-3</sup> ] | 6,3                                                                             | -       | -                         | 6,0      | -        | -                       | 5,0      | -        | -                      |
| Tavicí teplota [°C]           | 375-404                                                                         | -       | -                         | 375-432  | -        | -                       | 375-487  | -        | -                      |

Poznámka: \*) tlakové lití s teplou komorou, \*\*) tlakové lití se studenou komorou  
písek - tepelné zpracování pro snížení vnitřního pnutí odlitku  
3 hodiny při 320°C pomalé ochlazování v peci

Z tabulky 2.4 vidíme, že slitiny zinku mají výborné mechanické vlastnosti za normálních teplot. Dynamické vlastnosti jsou také velmi dobré. Díky velmi značné tvrdosti u slitiny ZnAl<sub>4</sub>Cu<sub>3</sub> po vytvrzení jsou odlitky odolné vůči opotřebení. Značnou nevýhodou slitin zinku je především to, že je zde prudký pokles mechanických vlastností při vyšších teplotách. Maximální provozní teplota by neměla přesáhnout 120 °C. Také při nízkých teplotách asi tak pod -20 °C dochází ke zhoršení mechanických vlastností především rázové houževnatosti.

*Slévárenské vlastnosti* - slitiny zinku se vyznačují velmi dobrými slévárenskými vlastnostmi. Převážně slitiny - Zn-Al 8 a Zn-Al 11 mají úzké pásmo tuhnutí. Dobré je především to, že nedochází ke vzniku mikrostaženin a pórovitosti a proto mají odlitky z těchto slitin vynikající těsnost. (Slitina s 27% Al má velmi široké pásmo tuhnutí a proto větší sklon ke vzniku pórovitosti (mikroporosity)).

Teploty lití jsou závislé především na typu slitiny a technologii odlévání. Nejčastěji se používají teploty 455 °C až 610 °C. Při těchto teplotách dochází pouze k malému namáhání forem. V pískových formách vzniká velmi málo plyných složek, proto nejsou kladeny ani velké nároky na žáruvzdornost a prodyšnost. Díky tomu jsou kovové formy málo tepelně namáhané čím vykazují vysokou životnost. Slitiny zinku mají výbornou zabíhavost. Díky zabíhavosti lze odlévat tenkostěnné a tvarově komplikované odlitky. Při tlakovém lití lze vyrábět odlitky o tloušťce stěny od 0,3mm a při gravitačním lití nad 1mm.



Slitiny zinku výborně vyplňují dutinu formy. Pokud použijeme tlakové lití, tak se podaří předlít otvory o průměru 1mm. Při tlakovém lití malých odlitků je reálná přesnost od  $\pm 0,03\text{mm}$  (IT10) , u velkých odlitků s rozměry kolem 500mm přesnost  $\pm 0,2\text{mm}$  (IT11) . Proto mnoho odlitků můžeme odlévat bez nutnosti následného opracování. Při obrábění jsou nutné malé přídavky. Odlitky mají kvalitní povrch s malou drsností.

*Tavení* - probíhá buď v plynových nebo elektrických pecích. Tepelný obsah tavenin zinku při lící teplotě je nízký, což je díky poměrně nízké hodnotě latentního tepla. To znamená, že pro tavení dostačuje poměrně nízký instalovaný výkon pecí a náklady na tavení jsou taky velmi nízké. Při tavení musíme také zamezit možné kontaminaci škodlivými prvky. Doporučené tavení je v kelímcích z SiC (co se zásadně nedoporučuje tavit v kovových kelímcích). Kelímek má být používán výhradně pro tavení slitin zinku. Hlavně nesmí být použity kelímky, kde jsme v předchozí době tavily mosaz nebo slitiny mědi. To právě díky těm škodlivým prvkům. Zde nemusíme provádět rafinaci ani odplynění. Nepoužíváme žádné tavící přípravky. Pokud tavíme na běžné teploty, tak nám nevzniká kouř a ani žádné jiné výpary.

*Technologie odlévání* - tyto slitiny zinku můžeme odlévat všemi běžnými slévárenskými metodami, především však převažuje metoda tlakového lití. Pokud odléváme 8 až 12% Al je možno používat stroje s teplou komorou, tak i se studenou tlakovou komorou. Ošetřovací nástřik se neprovádí po každém cyklu, ale až po několika odlití. Nehrozí zde spojení odlitku s lícem formy. Slitiny označené Zn-Al27 mají již poněkud vyšší lící teplotu, při které může docházet ke kontaminaci se železem z formy. Tudíž odléváme na strojích, které mají studenou komoru, kde máme teplotu formy nižší.

Tlakovým litím se převážně vyrábí drobné a středně velké odlitky do rozměrů 300 až 400mm s vysokou sériovostí. Nejvíce běžné odlitky jsou skříně, víka, rámy, tělesa tepelných výměníků atd.

Lití do pískových forem se používá hlavně pro kusovou výrobu. Převážně se jedná o větší odlitky. Také zde můžeme odlévat do sádrových forem. Velmi technicky zajímavá a progresivní metoda je lití do pryžových forem tzv. TEKCAST. Nevýhoda je především v tom, že pryž nevydrží moc velkou teplotu a mohlo by dojít k degradaci. Formy se jednoduše vyrábí - lisováním speciální pryžové hmoty na připravené modely a následnou vulkanizací. Operace se provádí přímo ve slévárně. Do vulkanizované formy se ručně vyříznou vtoky, případně odvětrávací systém.

Odlévá se odstředivým litím na zařízení se svislou osou rotace. Životnost pryžových forem pro slitiny zinku dosahuje několika set odlití. Metoda se hodí především pro výrobu drobnějších předmětů, jako jsou například šperky, nábytkové kování, bižuterie, viz obr. 2-4.



Obr. 2-4 Ukázky odlitků ze slitin zinku odlévaných odstředivým litím do pryžové formy

## 2.2.Charakteristika technologických vlastností

**Zabíhavost** - je schopnost taveniny vyplnit co nejrychleji a nejlépe danou formu. Některé parametry ovlivňující zabíhavost jsou především teplota lití, hustota dané slitiny a druh formy.

**Tekutost** – je charakterizována dobrým tokem taveniny. Je zde malé vnitřní tření částic taveniny a je reciprokou hodnotou dynamické viskozity. Pokud bychom chtěli dosáhnout rychlejšího toku taveniny, je nutno odlévat pod tlakem.

**Tavitelnost** – je schopnost materiálu se proměnit v taveninu. Materiály podle jejich tavení se dělí do tří skupin na: nízko tavitelné, středně tavitelné a vysoko tavitelné. Nejlépe tavitelné jsou slitiny o eutektickém složení, malým skupenským teplem, nízkou teplotou tavení a malým měrným teplem. Pokud se jedná o tavení čistých kovů je to většinou náročný proces.

**Doba tuhnutí, trhliny a praskliny** – sledujeme tuhnutí určitých slitin, závisí tato skutečnost především na temperančním systému formy (jak je daná forma schopna odvádět určité množství tepla). Tuhnutí probíhá vždy od stěny ke střední partii. Výpočtem ztuhlé vrstvy odlitku se zabýval Nikolaj Chvorinov, uznávaný ruský odborník na metalurgii a tuhnutí materiálů, který odvodil vztah pro výpočet ztuhlé tloušťky odlitku:

$$\xi = k * \sqrt{t} , \quad (2.11)$$

kde je:  $k$  – konstantu tuhnutí [ $\text{m.s}^{-1/2}$ ];  
 $t$  – dobu tuhnutí [s].

**Konstantu tuhnutí k lze určit:** pomocí metody vylévací zkoušky. Do formy válcového tvaru se odlévá tavenina, která se nechá ztuhnout vždy jen určitý časový okamžik. Zbytek taveniny se vždy vyklopí ven a ztuhlá vrstvička se změří. Tento postup se opakuje pro další časové okamžiky 0, 15, 30, 45, 50, 55 [s].

**Dilatační vlastnosti slitin** – jsou závislé na tuhnutí a chladnutí či ohřevu dané slitiny. V určitém časovém okamžiku se nám dilatace mění. Její hodnota se může zvětšovat či zmenšovat. Pokud tedy dochází k poklesu teploty, kdy roste čas, roste nám také dilatace. Můžeme ji tedy charakterizovat jako délkovou změnu určité slitiny při chladnutí či ohřevu oproti původnímu rozměru. Pro tento účel byl vypočítán součinitel teplotní roztažnosti dle vztahu:

$$\Delta l = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (2.12)$$

kde je:  $\Delta l$  – změnu lineárního rozměru sledovaného tělesa [mm];

$\alpha$  - součinitel teplotní roztažnosti (smrštivosti) [ $K^{-1}$ ];

$\Delta T$  – změnu teplot [ $^{\circ}C$ ],

výpočet součinitele teplotní smrštivosti  $\alpha$ .  $\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \cdot \Delta T} [K^{-1}]$ , hodnota  $l_0 = 157$  mm.

Při tuhnutí odlitků může dojít ke vzniku trhlin. To značí střední partie v odlitku tvaru piškoty. Tento jev je rozdělen do základních tří časových pásem.

- I. časový okamžik – Teplota střední partie je v oblasti teplot likvidu a teplot solidu. V této oblasti se objevuje skupenská přeměna, ve které dochází k růstu dendritů. Konce odlitku jsou již ztuhlé a začínají se smršťovat. Dále dochází k brzděnému smrštění a vzniká tahové napětí střední partie odlitku. Toto tahové napětí je velmi malé a nahrazuje se taveninou, která ještě neztuhla.
- II. časový okamžik – Teplota střední partie již klesla pod teplotu solidu. Zde je největší pravděpodobnost vzniku trhlin. Tavenina v této oblasti zhoustla a na povrchu dendritů vytvořila slabé filmy. Nyní zde probíhají nerovnoměrná tahová napětí ve střední partii odlitku. Soudržnost materiálu je zde velmi malá. Mezi filmem a dendritem jsou velmi malé adhezní síly a v důsledku větších tahových napětí dochází k porušení materiálu za vzniku trhlin.

- III. časový okamžik – mezidendritické filmy jsou v oblasti taveniny a pokud se zde objeví trhlina, je zaplavena taveninou. Což je z hlediska odlévání dobré. Dojde v celém objemu k zacelení odlitku, a tak odolávání tahových napětí. Můžeme tedy říci, že pro odlévání jsou slitiny zinku ideální, odpovídají teplotám horní oblasti pružných deformací a mají malý interval teplot tuhnutí.

V tabulce 2.5 jsou vypsané všechny slitiny, které budeme používat pro jednotlivé experimenty

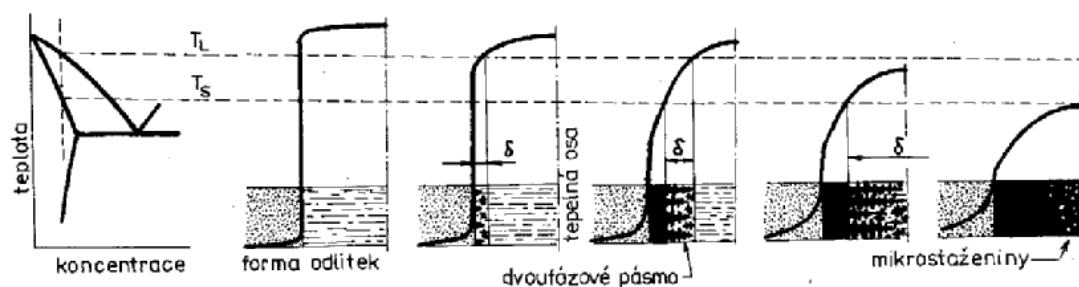
**Tabulka 2.5 Slitiny, které máme k dispozici na našem pracovišti pro odlévání**

| Značení dle složení | Značení technické | Zahraniční název |
|---------------------|-------------------|------------------|
| Zn                  | Zn                | Zn               |
| ZnAl4               | Zn400             | ZAMAK3           |
| ZnAl4Cu1            | Zn410             | ZAMAK5           |
| ZnAl4Cu3            | Zn430             | ZAMAK 2          |
| ZnAl8Cu1            | Zn810             | -                |

### 2.3. Rozměrové změny při tuhnutí odlitku

Během tuhnutí a chladnutí odlitků probíhají fyzikální jevy, které ovlivňují konečný tvar i homogenitu odlitku. Je to především smršťování kovu při poklesu teploty, které jednak mění výsledné vnější rozměry odlitku, jednak vyvolává podmínky k vytváření vnitřních dutin. Zároveň s poklesem teploty se snižuje rozpustnost plynů v kovu a uvolňující se plyny mohou rovněž ovlivnit homogenitu odlitku.

Tuhnutím odlitků se rozumí vytváření souvislé vrstvy tuhé fáze na úkor fáze tekuté. Postup tuhnutí je určován teplotním polem v soustavě odlitek - forma, které závisí na charakteristice odlitku a fyzikálně-tepelných vlastnostech slitiny a formy. Tuhnutí odlitků probíhá v dvoufázovém pásmu, tj. oblastí mezi izolikvidou a izosolidou (izotermami spojujícími místa, s teplotou likvidy, resp. solidy). Takovéto tuhnutí je označováno jako tuhnutí neprogresivní (dvoufázové), obr. 2-5.



Obr.2-5 Postup tuhnutí odlitku

U čistých kovů a eutektických slitin probíhá tuhnutí při určité teplotě ve velmi úzkém pásmu. Toto tuhnutí se označuje jako progresivní (vrstevnaté).

široké dvoufázové pásmo je nepříznivé pro jakost odlitků. Mezi rostoucími krystaly tu zůstávají uzavřeny ostrůvky taveniny, po jejichž ztuhnutí zbudou mikrostaženiny. Jejich výskyt je nejvyšší v okolí tepelné osy odlitku, tj. v místech, které tuhnou naposledy.

Šířka dvoufázového pásma  $\delta$  je závislá především na:

- rozdílu mezi teplotou likvidu a solidu slitiny,
- teplotní vodivosti slitiny,
- rychlosti přestupu tepla z odlitku do formy,
- tvaru a tloušťce stěny odlitku,
- licí teplotě.

Široké dvoufázové pásmo mají především tlustostěnné odlitky ze slitin se širokým intervalem tuhnutí lité do pískových forem.

### 2.3.1. Objemové změny

Podstatou smršťování jsou objemové změny tekuté a tuhé fáze kovu s poklesem teploty a objemové změny při fázových přeměnách. Projevují se charakteristickými změnami v odlitku, při nichž se jeho celkové rozměry zmenšují, popř. se v něm vytvářejí staženiny a dochází k vnitřnímu pnutí. Posuzujeme-li konečný rozměr odlitku z hlediska komplexních vlivů, musíme k základním vlivům počítat nejen dilatace vázané na druh použité slitiny, ale i dilatace formy, do níž se odlévá, a vliv tvaru odlitku.

Objem kovu je při dané teplotě a tlaku konstantní. Při normálním tlaku je objem funkcí teploty.

Měřidlem přírůstku objemu na stupeň zvýšení teploty je koeficient objemové roztažnosti:

$$\gamma = \frac{1}{V_0} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta T}, \quad (2.1)$$

kde je:  $\gamma$ ...součinitel objemové roztažnosti (smrštění) [ $K^{-1}$ ],

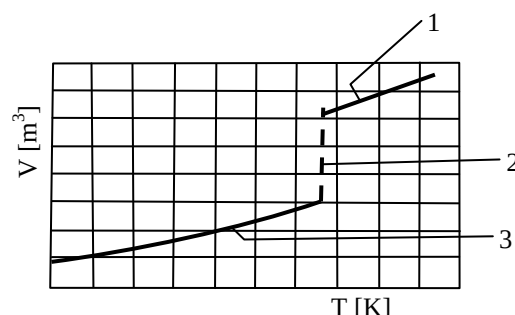
$V_0$ ... počáteční objem [ $m^3$ ],

$\Delta V$ ...změna objemu [ $m^3$ ],

$\Delta T$ ...změna teploty [ $K$ ].

S rostoucí teplotou se plynule mění objem kovu a zároveň dochází k poklesu jeho hustoty. Je to dáno tím, že se zvětšuje parametr krystalové mřížky, tím klesá její hustota a přestože je krystalická stavba kovu v podstatě stejná, mění se meziatomové vzdálenosti. Určité teplotě tedy odpovídá určitá meziatomová vzdálenost. Při zahřívání se zvětšuje, při chladnutí naopak zmenšuje. Pokud se tyto vzdálenosti nemohou v důsledku nějakého vnějšího zásahu měnit, vznikají v mřížce pnutí. Při změně skupenství se pak mění objem skokem s dalším plynulým přírůstkem v tekutém stavu obr. 2-6. Fyzikální proces změny objemu při změně teploty je vratný, tudíž objem zvětšující se při ohřevu se při ochlazování vrací do původní velikosti. Úbytek objemu při snížení teploty se nazývá smrštění. Křivka změny specifického objemu kovu v závislosti na teplotě je zobrazena na obr. 2-6.

- 1 - smrštění v tekutém stavu,
- 2 - smrštění při změně skupenství,
- 3 - smrštění v tuhém stavu.



Obr.2-6 křivka změny specifického objemu kovu v závislosti na teplotě

U slitin tuhnuoucích při konstantní teplotě je průběh závislosti změny objemu na teplotě stejný, jako u čistých kovů. U slitin tuhnuoucích v teplotním intervalu nastává velká změna mezi  $T_L$  a  $T_S$ .

Smrštění odlitku vyrobeného z určité slitiny není stejné jako smrštění této slitiny. Smrštění slitiny je fyzikální vlastnost, kterou určuje fyzikální úbytek objemu při snížení teploty. Smrštění odlitku závisí na smrštění slitiny a také závisí na technologických

podmínkách výroby odlitku, jako jsou teplota a čas lití, intenzita odvodu tepla a konstrukce odlitku. Změny objemu odlitku charakterizuje technologický úbytek objemu. Objemové změny při tuhnutí a chladnutí odlitku se dělí dle teplotního intervalu na:

objemové změny v tekutém stavu ( interval teplot  $T_{lití} - T_L$  )

objemové změny v intervalu tuhnutí (  $T_L - T_S$  )

objemové (lineární) změny v tuhém stavu (  $T_{zls} - T_{op}$ , teplota začátku lineárního smrštění - teplota okolního prostředí).

**Objemové změny v tekutém stavu** - ihned po odlití taveniny do formy začíná odvod tepla z kovu, tavenina chladne a dochází ke smršťování v tekutém stavu, které probíhá od teploty lití  $T_{lití}$  až do teploty likvidu  $T_L$ . Objemové změny se v tomto teplotním intervalu projevují poklesem hladiny taveniny vlivem gravitační síly. Tuto fázi smrštění v tekutém stavu charakterizuje úbytek objemu  $\Delta V'_L$ .

Hladina klesá do té doby, než se na stěnách odlitku vytvoří souvislá vrstva tuhého kovu až k povrchu hladiny. Od tohoto okamžiku začne klesající hladina zužovat svůj průměr a zvýší se rychlost jejího klesání. V tomto čase nastává úbytek objemu  $\Delta V''_L$ .

Hodnota celkové změny objemu odlitku v kapalném stavu:

$$\Delta V_L = \Delta V'_L + \Delta V''_L = \gamma_L \cdot (T_{lití} - T_L) \cdot V_0 \quad (2.2)$$

kde je:

$V_0$  ...počáteční objem taveniny;

$\gamma_L$ ...průměrná hodnota součinitele objemového smrštění v teplotním

intervalu  $T_{lití} - T_L$  [ $K^{-1}$ ].

Z tohoto vztahu vyplývá, že hodnota  $\Delta V_L$  je přímo úměrná teplotě přehřátí taveniny nad teplotou likvidu, že míru smrštění můžeme ovlivnit regulací teploty lití.

Nejúčinnějším prostředkem proti smrštění je co nejnižší lící teplota. Tu lze nejlépe dosáhnout při lití pod tlakem.

**Objemové změny v intervalu tuhnutí** - v intervalu tuhnutí probíhá změna tekuté fáze ve fázi tuhhou. Podle teoretických úvah o vnitřní stavbě taveniny lze očekávat, že po ztuhnutí bude mít krystalická fáze při téže teplotě menší objem, neboť ubude volných prostor mezi krystalovými elementy, které jsou pro roztavený kov charakteristické. Takto se smrštění v intervalu tuhnutí projevuje u čistých kovů. U komplexních slévarenských slitin může být průběh smršťování ovlivněn vylučováním několika tuhých fází.

Objemové změny mezi teplotami likvidu a solidu  $\Delta V_{L-S}$ , se projevují vznikem soustředné staženiny, vnitrodendritické a mezidendritické pórovitosti. Rozdělení objemových změn mezi uvedené dutiny závisí na morfologii tuhnutí slitiny a na intenzitě chladnutí odlitku.

Smršťování odlitku při tuhnutí začíná vznikem prvních tuhých částic z taveniny na stěně formy a končí ztuhnutím poslední části taveniny v tepelné ose odlitku. Při tuhnutí se vyskytují všechny druhy objemových změn současně.

Při tuhnutí čistých kovů a slitin, s nulovým rozsahem teplot tuhnutí, tedy při tuhnutí s plynulým postupem souvislé krystalické fronty, vzniká soustředná staženina o objemu  $V_{st}$ . Staženina se začíná vytvářet, když na celé ploše líce formy ztuhne souvislá vrstva kovu, uzavírající uvnitř taveninu. Od tohoto okamžiku plynule probíhá:

- zmenšení objemu taveniny uzavřené mezi stěnami odlitku o hodnotu  $\Delta V''_L$ , což se projeví snížením její hladiny ve formě.
- zvětšení objemu tuhé fáze tzv. narůstáním a její postup k tepelné ose odlitku, přičemž se zároveň zmenšuje objem o hodnotu  $\Delta V_{L-S}$ , protože dochází k fázové přeměně.

$$\Delta V_{L-S} = \gamma_s \cdot (T_L - T_S) \cdot V_0 \quad (2.3)$$

kde je:

$V_0$ ...počáteční objem [ $m^3$ ],

$\gamma_s$ ...průměrnou hodnotou součinitele objemového smrštění v teplotním intervalu

$$T_L - T_S \text{ [} K^{-1} \text{]}.$$

- zmenšení plochy klesající hladiny v důsledku postupu tuhé fáze k tepelné ose odlitku.
- smrštění ztuhlých částí při jejich ochlazování o hodnotu  $\Delta V_S$ , které se projeví změnou lineárních rozměrů. Zmenšení lineárních rozměrů ztuhlých částí ovlivňuje rozměry tvořících se dutin tím, že smršťující se vrstva se vmáčkne do taveniny a tím vyzvedne její hladinu.



Výsledkem uvedených pochodů je soustředná staženina, jejíž výsledný celkový objem pak je:

$$V_{st} = \Delta V_L'' + \Delta V_{L-S} - \Delta V_S \quad (2.4)$$

Při tuhnutí odlitku ze slitiny s intervalem tuhnutí jsou probíhající změny v podstatě stejné, ale úbytek objemu  $\Delta V_L$  se rozdělí mezi soustřednou staženinu  $V_{st}$ , mezidendritickou pórovitost  $V_{md}$  a vnitrodendritickou pórovitost  $V_{vd}$

$$\Delta V_{L-S} = V_{st} + V_{vd} + V_{md} \quad (2.5)$$

Mezidendritické póry se vytváří při tuhnutí taveniny uzavřené mezi dendrity. Vnitrodendritické póry vznikají při tuhnutí taveniny uzavřené mezi větvemi dendritu. Z tohoto můžeme vztah (2.5) zjednodušit na:

$$\Delta V_{L-S} = V_{st} + V_d \quad (2.6)$$

Rozsah dendritické pórovitosti  $V_d$  je přímo úměrný šířce intervalu tuhnutí slitiny. Čím širší je tento interval, tím větší je rozsah dendritické pórovitosti. Tato skutečnost souvisí se schopností slitiny nahradit úbytek vlastního objemu při tuhnutí, tedy přefiltrovat se přes svoje dvojfázové pásmo, protože pokud se mají kompenzovat ztráty objemu při tuhnutí, musí se tavenina profiltrovat do nejhlubší části dvojfázového pásma, a to vždy k souvislému povrchu tuhé fáze. Zvýšením intenzity ochlazování je možné na počátku tuhnutí výrazně zmenšit dvojfázové pásmo a tím i rozsah dendritické pórovitosti.

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

k 1, tím je větší zdravost odlitku. Tento způsob hodnocení je důležitý, protože odstranění dendritické pórovitosti z odlitku, neboli kompenzace objemu  $V_d$ , je složitější než kompenzace objemových ztrát staženiny  $V_{st}$ .

Odlitky ze slitin s úzkým intervalem tuhnutí se složením blízkým eutektickému (hliníkové bronzy, mosazi, siluminy) vytvářejí při tuhnutí soustředěné staženiny velkých rozměrů. U těchto slitin se vytváří pouze úzké dvoufázové pásmo, při kterém téměř nevzniká dendritická pórovitost. Dvoufázové pásmo nabývá na významu při tuhnutí odlitků ze slitin s širokým intervalem tuhnutí (cínové bronzy, slitiny Al – Mg, Al – Cu, Mg – Al). U těchto slitin jsou dány objemové změny staženinou malých rozměrů a poměrně rozsáhlou dendritickou pórovitostí.

Výskyt mikrostaženin nezávisí pouze na intervalu tuhnutí dané slitiny, ale také na dalších činitelích, jakými jsou tepelná vodivost, měrná hmotnost slitiny v tuhém i tekutém stavu, rychlost ochlazování odlitku, teplota lití a velikost doplňovacího tlaku.

**Objemové (lineární) změny v tuhém stavu** - smrštění odlitku v tuhém stavu se projevuje především změnou rozměrů, a proto se označuje jako lineární smrštění nebo také jako tepelná dilatace. Pojem tepelná dilatace znamená souhrnnou změnu objemu (rozměrů) tuhé fáze v závislosti na teplotě, a to při jejím chladnutí i ohřevu. Praktický význam lineárního smrštění je, že určuje míru zmenšení odlitku oproti rozměrům formy a výrazně ovlivňuje velikost napětí v odlitku.

Změna rozměrů při ochlazování začíná v okamžiku vytvořením kostry s určitou pevností navzájem zaklíněných dendritů. Teplota, při které se vytvoří tato kostra, se nachází v teplotním intervalu tuhnutí slitiny a je teplotou začátku lineárního smrštění  $T_{z.l.s.}$ . Po úplném ztuhnutí odlitku se plynule zmenšují rozměry až do vychladnutí na teplotu okolního prostředí  $T_{op}$ . Dilatace odlitku bez působení odporů je volnou tepelnou dilatací. Volná objemová tepelná dilatace  $\Delta V_S^V$  je dána vztahem:

$$\Delta V_S^V = \gamma_s \cdot (T_{z.l.s.} - T_{op}) \cdot V_0 \quad (2.7)$$

kde je:

$V_0$ ...počáteční objem odlitku [ $m^3$ ],

$\gamma_s$ ...průměrnou hodnotou součinitele objemového smrštění v intervalu

teplot  $T_L - T_S$  [ $K^{-1}$ ].

Volná objemová dilatace je spojena se změnou lineárních rozměrů přibližně vztahem:

$$\Delta V_S^V \cong 3\Delta l_v \quad (2.8)$$

kde je:

$\Delta l_v$ ...hodnota úbytku rozměru odlitku.

Rozměr odlitku  $l_V$  po jeho volném smrštění je dán vztahem:

$$l_V = l_Z - \Delta l_V = l_Z - l_Z \cdot (T_{z.l.s} - T_{op}) \quad (2.9)$$

Hodnota relativní (poměrné) volné dilatace  $\varepsilon_V$  je:

$$\varepsilon_V = \frac{l_Z - l_V}{l_Z} \cdot 100 = \alpha \cdot (T_{z.l.s} - T_{op}) \cdot 100 \quad (2.10)$$

kde je:

$l_Z$ ...počáteční rozměr odlitku při teplotě  $T_{z.l.s}$ , který se rovná rozměru formy  $[m]$ ,

$l_V$ ...rozměr odlitku po volné dilataci, tj. při teplotě okolního prostředí  $T_{op}$   $[m]$ ,

$\alpha$ ...průměrná hodnota součinitele volného délkového smrštění v intervalu teplot

$$(T_{z.l.s} - T_{op}) [K^{-1}].$$

Skutečný rozměr odlitku, tj. rozměr naměřený na odlitku po jeho uvolnění z formy, se liší od hodnoty  $l_V$  podle vztahu (2.9) a zpravidla je větší. Vysvětluje se to tím, že po vytvoření kostry dendritů určujících geometrický tvar odlitku, změna rozměrů odlitku a probíhá při překonávání odporů působících proti smrštění. Smrštění odlitku při působení odporů je skutečné smrštění a označuje se jako bržděné smrštění nebo jako bržděná tepelná dilatace  $\varepsilon_B$ , přičemž hodnota  $\varepsilon_B$  není rovna hodnotě volné dilatace  $\varepsilon_V$ . Brždění dilatace je příčinou vzniku napětí v odlitku. Podle charakteru odporů působících proti volné dilataci rozlišujeme smršťovací, tepelné a transformační napětí.

Smršťovací napětí je výsledkem odporu formy a jádra proti volné dilataci odlitku. Toto napětí je vždy tahové a dočasné. Působí pouze po dobu, kdy přetrvává mechanický odpor formy. Smršťovací napětí je příčinou vzniku trhlin.

Tepelné napětí je vyvolané rozdílnou rychlostí chladnutí nebo ohřevu jednotlivých objemů odlitku. Tenké části se ochlazují rychleji než tlustší a to je příčinou neizotermického ochlazování odlitku jako celku. Části odlitku s různou teplotou mají i rozdílné rozměry, a proto si navzájem překážejí při smrštění, což může zapříčinit vznik prasklin. Tepelné napětí může být dočasné nebo zbytkové.

Transformační (fázové) napětí vzniká v chladnoucím odlitku při fázové přeměně spojené se změnou specifického objemu a při neizotermickém chladnutí, tj. tehdy když fázová

přeměna neprobíhá současně v jednotlivých objemech odlitku. Může být dočasné nebo zbytkové.

Uvedené rozdělení umožňuje klasifikaci příčin vyvolávajících napětí v odlitku, i když prvotní příčinou všech napětí je vždy nerovnoměrná změna rozměrů odlitku při jeho ochlazování. Každé napětí v odlitku se může projevit deformací nebo porušením celistvosti. Deformace mohou být pružné (dočasné) nebo plastické (trvalé).

### 2.3.2. Základní fyzikálně chemické vlastnosti

Za normální teploty je zinek křehký, v rozmezí teplot 100 až 150 °C je tažný a dá se válcovat na plech a vytahovat na dráty, nad 200 °C je opět křehký a dá se rozetřít na prach. Zinek má velmi dobré tavící schopnosti, a proto jeho náklady na tavení jsou poměrně malé. Teplota tání zinku je 419°C až 420°C. Ve sloučeninách se vyskytuje pouze v mocenství  $Zn^{+2}$ .

Rozpustnost zinku se provádí v silných minerálních kyselinách za přítomnosti plynného vodíku, nebo v roztocích hydroxidů. Pokud necháme zinek volně ležet v prostředí, jeho povrch se potáhne malou vrstvičkou oxidů. Tato vrstvička ho chrání proti vlivu okolí (korozi). Pokud je zinek téměř zcela čistý, jeho rozpustnost je velmi pomalá.

Při zahřátí zinku na určitou teplotu dojde k hoření a jeho plamen má modrozelenou barvu, kde vzniká oxid zinečnatý  $ZnAl_2$ . Pokud při ohřevu docílíme červené barvy, začíná oxidická reakce vodní parou a oxidem uhličitým, kdy vzniká redukce na oxid uhelnatý. Za určité teploty se zinek slučuje se sírou a fosforem, ale s dusíkem, uhlíkem a vodíkem jeho sloučitelnost není žádná. Můžeme tedy říci, že zinek s mnoha prvky tvoří slitiny a s některými je schopen vytvořit i sloučeniny. V tabulce 2.6 a 2.7 jsou vlastnosti vybraných kovů.

Pro tepelné výpočty zinku a jeho slitin jsou potřebné nejrůznější fyzikální a tepelné – fyzikální vlastnosti, které zásadním způsobem charakterizují zinek a jeho slitiny při různých výzkumných aplikacích, např. při výrobě odlitků. V tabulce 2.6 jsou uvedeny hustoty vybraných čistých kovů.

**Tabulka 2.6 Hodnoty hustot vybraných čistých kovů**

| Kov    | Hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ] | Teplota tání [ $^{\circ}\text{C}$ ] |
|--------|-------------------------------------------|-------------------------------------|
| Zinek  | 7140                                      | 420                                 |
| Hliník | 2720                                      | 660                                 |
| Hořčík | 1740                                      | 650                                 |
| Měď    | 8960                                      | 1083                                |
| Mosaz  | 8400 až 8750                              | 900                                 |
| Mangan | 7460                                      | 2620                                |
| Titan  | 4500                                      | 1668                                |
| Bronz  | 8200 až 8800                              | 900                                 |
| Nikl   | 8900                                      | 1450                                |
| Cín    | 7298                                      | 232                                 |
| Olovo  | 11 340                                    | 327                                 |

**Pozn:** *hustota* – je definována jako objemová hmotnost látky při určité teplotě – např. při  $20^{\circ}\text{C}$ .

### Měrné skupenské teplo tání látek

Měrné skupenské teplo tání je teplo, které přijme 1 kilogram pevné látky, jestliže se za teploty tání celý přemění na kapalinu téže teploty. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty měrného skupenského tepla tání neželezných kovů a slitin kovů. V tabulce 2.7 je uvedeno skupenské teplo tání.

V tabulce 2.7 jsou hodnoty měrného skupenského tepla tání pro jednotlivé kovy

**Tabulka 2.7 Měrné skupenské teplo tání**

| Kov           | Měrné skupenské teplo tání [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ] |
|---------------|--------------------------------------------------------------|
| <b>Zinek</b>  | 113 000                                                      |
| <b>Hliník</b> | 394 000                                                      |
| <b>Hořčík</b> | 197 000                                                      |
| <b>Měď</b>    | 209 000                                                      |
| <b>Mosaz</b>  | 184 00                                                       |
| <b>Mangan</b> | 221 000                                                      |
| <b>Nikl</b>   | 264 000                                                      |
| <b>Cín</b>    | 58 600                                                       |
| <b>Olovo</b>  | 25 100                                                       |

***Teplota tání zinku a její vztah k různým vlastnostem***

Teplota tání je teplota, při které kov prodělává fázovou přeměnu. Při ohřevu je to teplota tání a při ochlazování je to teplota tuhnutí. Teplota tuhnutí nebo tání je doprovázena určitým tepelným efektem. Uvolňuje se nebo naopak při tání se spotřebovává tavenina. Latentní teplo tuhnutí. Studium vlastností kovů se ukazuje, že kovy v kapalném stavu se neliší od kovů v tuhém stavu. To platí také u zinku a jeho slitin. Také např. změna objemu při tání je přibližně  $10 \text{ [J.kg}^{-1}\text{]}$ , latentní teplo tání je přibližně 30 až 50 krát menší než je latentní teplo sublimace, tepelná kapacita roztaveného kovu je přibližně stejná jako u kovů ztuhlého.

Dnes považujeme kapalné kovy především v blízkosti teploty tání za soubor atomů s větším či menším uspořádáním. V kapalných kovech lze nalézt malé oblasti se zcela stejnou strukturou jako ve stavu tuhém, tedy jakési mikrokristaly, jejichž velikost je asi 50 až 1000 atomů. Proto můžeme na kapalný kov nahlížet jako na kov s velmi porušenou krystalickou mřížkou. I když jsou tyto představy moderní, vytváří jejich základy LINDENMANN v roce 1910. Předpokládal, že tavení je rozrušení tepelné mřížky. K tomuto rozrušení dojde tehdy, pokud amplituda tepelných kmitů atomů dosáhne určité hodnoty ve srovnání s mřížkovou konstantou.

### 3. TERMODYNAMICKÉ VÝPOČTY PRO ČISTÝ ZINEK

Pro výpočty daných veličin bylo nutné se seznámit s problematikou termodynamických vztahů pro odlévání. Nejdůležitější částí, kterou jsem se zabýval, byla fázová přeměna při tání a tuhnutí kovů. Na základě těchto poznatků jsem začal počítat Gibbsovu energii pro tání kovů ze vztahu:  $\Delta G_{\text{tání}} = \Delta H_{\text{tání}} - T \cdot \Delta S_{\text{tání}}$ .

Kde  $\Delta H_{\text{tání}} > 0$  označuje nám latentní teplo tání, ( $T_{\text{tání}}$ ) teplota tání a  $\Delta S_{\text{tání}}$  značí molární entropii. Všeobecně pro tání kovu platí podmínka,  $\Delta G_{\text{tání}} = 0$ . Na základě těchto podmínek lze vypočítat změnu entropie při tání, (3.1), (3.2).

#### 3.1. Použité výpočty pro stanovení podmínek tání a krystalizace čistého zinku

Výpočet změny Gibbsovy energie:

1. Výpočet změny molární entropie při tavení čistého zinku.
2. Výpočet změny molární entalpie při tavení 1 molu čistého zinku z teploty 298 K na teplotu 692,5 K. Zároveň byla stanovena tepelná energie potřebná při tavení 1 kg čistého zinku.
3. Výpočet změny Gibbsovy energie při tavení čistého zinku v závislosti na teplotě při konstantním tlaku 101 325 Pa.
4. Výpočet změny Gibbsovy energie při tavení čistého zinku v závislosti na tlaku při konstantní teplotě 692,5 K.
5. Výpočet změny Gibbsovy energie při tavení čistého zinku v závislosti na teplotě a tlaku.

Při řešení fyzikálního procesu tavení čistého zinku byly použity termodynamické hodnoty, které jsou uvedeny v tabulce 3-4.

##### 3.1.1. Výpočet změny molární entropie při tavení čistého zinku

Výpočet změny molární entropie při tavení čistého zinku dle vztahu:

$$\Delta S^0_{\text{tání}} = \frac{\Delta H_{\text{tání}}}{T_{\text{tání}}}, \quad (3.1)$$

Kde je:  $\Delta S^0_{\text{tání}}$  - změna entropie při tání

$\Delta H_{\text{tání}}$  - změna entalpie při tání

$T_{\text{tání}}$  - teplota tání čistého zinku (419,6 °C).

Po dosazení hodnot uvedených v tabulce 3.4 do rovnice (3.1) je získána výsledná změna entropie pro 1 mol čistého zinku:

$$\Delta S_{\text{tání}} = 9,64 \text{ [J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{]}.$$

Přepočít 1 kg na 1 mol je podle rovnice:

$$n = \frac{m}{M} \quad (3.2)$$

kde je:  $m$  - hmotnost v [g];

$M$  - molovou hmotnost.

Pro čistý zinek dosadíme do rovnice (3.2) hodnotu molové hmotnosti uvedenou v tabulce 3.4:

$$n = \frac{1 \cdot 10^3}{65,37}$$

$$n = 15,298 \text{ molů}$$

Změna entropie pro tání 1 kg čistého zinku:

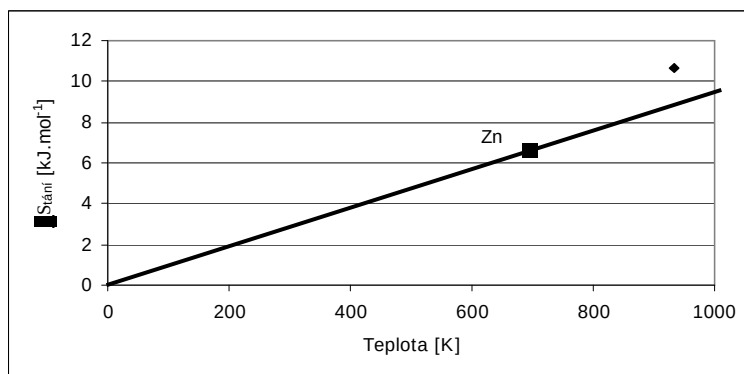
$$\Delta s = \Delta S_{\text{tání}} \cdot n = 9,64 \cdot 15,298$$

$$\Delta s = 147,473 \text{ [J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{]}$$

Rovnici (3.1) lze vyjádřit pro výpočet změny entalpie čistého zinku nebo jiných kovů při teplotě tání:

$$\Delta H_{\text{tání}} = \Delta S_{\text{tání}} \cdot T_{\text{tání}} \quad (3.3)$$

Rovnice (3.3) vyjadřuje přímku. Tato přímka prochází počátkem a její směrnice pro čistý zinek je  $\Delta S_{\text{tání}} 9,64 \text{ [J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{]}$ .



Obr. 3-1 Grafická závislost změny entropie na teplotě



### 3.1.2. Výpočet změny molární entalpie při tání čistého zinku

Teplotní závislost přírůstku molární entalpie tekutého čistého zinku je známa z tabulky 3.4:

$$\Delta H_T = H_T - H_{298} = 31,43 \cdot T - 4280 \quad (3.4)$$

$$\Delta H = 17\,485,275 \text{ [J.mol}^{-1}\text{]}$$

Z rovnice (3.4) je možné provést výpočet množství tepelné energie, které je potřeba dodat na ohřev 1 kg čistého zinku z teploty 298 K na teplotu tání čistého zinku 692,5 K (419,5 °C).

*Pro 1 kg čistého zinku platí:*

$$\Delta h = h_{692,5} - h_{298} = 15,298 \cdot (31,43 \cdot 692,5 - 4280)$$

$$\Delta h = 267\,489,737 \text{ [J]}$$

Výpočet molární entalpie čistého zinku při tavení je vypočítán integrací Kirchhoffovy rovnice, která vyjadřuje teplotní závislost změny molární entalpie za konstantního tlaku:

$$\left( \frac{d(\Delta H)}{dT} \right)_p = \Delta C_p, \quad (3.5)$$

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

$dT$  – je diferenciál teploty

$\Delta C_p$  - je změna molární tepelné kapacity látky za konstantního tlaku

Molární tepelná kapacita pro tuhý čistý zinek je známa z tabulky:

$$\text{Zn (s): } C_p = 22,42 + 10,06 \times 10^{-3} \cdot T - 0 \times 10^5 \cdot T^{-2} \text{ [J.mol}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{]}$$

a platí pro teplotní interval <298 až 692,5 K>. Současně je také známa konstanta  $d$ , která pro čistý zinek v tuhém stavu činí -7127 [J.mol<sup>-1</sup>]. Tuto hodnotu lze vypočítat tak, jak je uvedeno níže.

Na základě hodnoty molární tepelné kapacity pro tuhý stav čistého zinku lze docílit obecné rovnice pro rozdíl molárních entalpií ( $H_T - H_{298}$ ):

$$H_T - H_{298} = 22,42 \cdot T + \frac{10,06}{2} \cdot 10^{-3} \cdot T^2 - 0 \cdot 10^5 \cdot T^{-1} + d \quad (3.6)$$

$$d = -22,42 \cdot 298 - \frac{10,06}{2} \cdot 10^{-3} \cdot 298^2 - 0 \cdot 10^5 \cdot 298^{-1} = -7127 \text{ [J.mol}^{-1}\text{]}.$$

Rovnici (3.6) lze zjednodušit do tvaru:

$$H_T - H_{298} = 22,42 \cdot T + 5,03 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 - 7127 \quad (3.7)$$

Dosazení do rovnice (3.7) za teplotu  $T = 692,5 \text{ K}$  lze stanovit hodnotu změny molární entalpie pro teplotní interval  $<298 \text{ až } 692,5 \text{ K}>$ , můžeme tedy psát:

$$H_{692,5} - H_{298} = 22,42 \cdot 692,5 + 5,03 \cdot 10^{-3} \cdot 692,5^2 - 7127.$$

$$H_{692,5} - H_{298} = \mathbf{10\,811,018 \text{ [J.mol}^{-1}\text{]}}$$

K tomuto výsledku je třeba připočítat molární entalpii tání ( $\Delta H_{\text{tání}}$ ), která je pro čistý zinek  $6676 \text{ [J.mol}^{-1}\text{]}$ .

Pro roztavení 1 molu čistého zinku je potřeba **17 487,018 [J]**.

Při přepočtu stanovení entalpie na roztavení 1 kg čistého zinku můžeme tedy psát:

$$17487,018 \cdot 15,298 = \mathbf{267\,516,401 \text{ [J]}}.$$

Molární tepelná kapacita pro tekutý čistý zinek je opět známa z tabulky 3.4:

$$\text{Zn (l): } C_p = 31,43 \text{ [J.mol}^{-1}\text{.K}^{-1}\text{]}$$

a platí pro teplotní interval  $<692,5 \text{ až } 1200 \text{ K}>$ . Současně je také známa z tabulky konstanta  $d$ , která pro tekutý čistý zinek činí  $-4280 \text{ [J.mol}^{-1}\text{]}$ . Na základě rovnice (3.6) lze stanovit rovnici pro změnu molární entalpie, platí pro teploty vyšší, než je teplota tání čistého zinku  $692,5 \text{ K}$ :

$$H_T - H_{298} = 31,43 \cdot T + d. \quad (3.8)$$

Z této rovnice lze stanovit změnu molární entalpie, např. pro teplotu přehřátí taveniny čistého zinku na teplotu  $550 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $823 \text{ K}$ ). Po dosazení za teplotu  $T = 823 \text{ [K]}$ , lze psát:

$$H_{823} - H_{298} = 31,43 \cdot 823 - 4280.$$

$$H_{823} - H_{298} = \mathbf{21\,586,89 \text{ [J.mol}^{-1}\text{]}}$$

Získanou hodnotu změny molární entalpie lze přepočítat pro 1 kg čistého zinku a jeho přehřátí na teplotu  $550 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $823 \text{ K}$ ), můžeme tedy psát:

$$21586,89 \cdot 15,298 = \mathbf{330\,236,243 \text{ [J]}}.$$

### 3.1.3. Výpočet změny Gibbsovy energie při tavení čistého zinku v závislosti na teplotě při konstantním tlaku 101 325 Pa

Tání zinku lze vyjádřit na základě rovnice:

$$\left(\frac{\partial G_T}{\partial T}\right)_p = -S_T. \quad (3.9)$$

Integrací rovnice (3.9) lze získat závislost  $\Delta G_{\text{tání}} = f(T)$  při konstantním tlaku:

$$\Delta G_{\text{tání}} = \int -\Delta S_{\text{tání}} \cdot dT. \quad (3.10)$$

Pro konstantní změnu molární entropie po integraci lze získat vztah pro změnu Gibbsovy energie pro tavení:

$$\Delta G_{\text{tání}} = -\Delta S_{\text{tání}} \cdot T + C \quad (3.11)$$

kde je: C - integrační konstantu, kterou lze určit z podmínky  $\Delta G_{\text{tání}} = 0$  při teplotě 692,5K.

Dosazením do rovnice (3.11) můžeme psát:

$$0 = -9,64 \cdot 692,5 + C$$

a je možno určit konstantu C:

$$C = 6675,7$$

$$\Delta G_{\text{tání}} = -9,64 \cdot T + 6675,7 \quad (3.12)$$

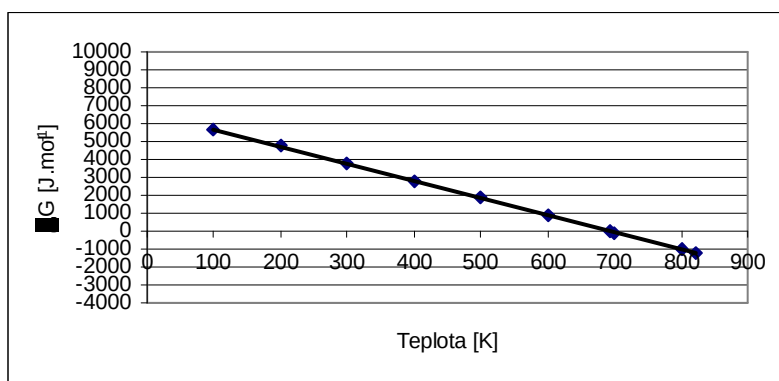
Stanovení hodnoty  $\Delta G_{\text{tání}}$  zinku při celkovém tlaku 101 325 Pa a pro různé teploty, pro 1 mol a 1 kg čistého zinku je v tabulce 3.1.

Na obr. 3-2 je uvedena závislost změny Gibbsovy energie na teplotě při tavení čistého zinku. V tabulce 3.1 jsou hodnoty  $\Delta G_{\text{tání}}$  čistého zinku při běžném tlaku a při rozdílných teplotách.

**Tabulka 3.1** Hodnoty  $\Delta G_{\text{tání}}$  čistého zinku při běžném tlaku a různých teplotách

| Teplota [K] | Hodnota $\Delta G$                                                          |                       |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
|             | $\Delta G_{\text{tání}} = -9,64 \cdot T + 6675,7$<br>[J.mol <sup>-1</sup> ] | [J.kg <sup>-1</sup> ] |
| 100         | 5711,7                                                                      | 87331,9               |
| 200         | 4747,7                                                                      | 72592,3               |
| 300         | 3783,7                                                                      | 57852,8               |
| 400         | 2819,7                                                                      | 43113,2               |
| 500         | 1855,7                                                                      | 28373,7               |
| 600         | 891,7                                                                       | 13634,1               |
| 692,5       | 0                                                                           | 0                     |
| 700         | -72,3                                                                       | -1105,5               |
| 800         | -1036,3                                                                     | -15845,0              |
| 823         | -1258,02                                                                    | -19245,2              |

**Pozn:** 1 kg čistého zinku = 15,29 molů



Obr. 3-2 Závislost změny Gibbsovy energie na teplotě při tavení zinku

### 3.1.4. Výpočet změny Gibbsovy energie při tavení čistého zinku v závislosti na tlaku při konstantní teplotě 692,5 K

V závislosti na předchozích výpočtech změny Gibbsovy energie, v závislosti na teplotě při konstantním tlaku jsem začal počítat změny Gibbsovy energie při tavení zinku v závislosti na tlaku při konstantní teplotě 692,5 K.

Tato závislost vychází z předpokladu, že při teplotě tání čistého zinku (692,5 K) dochází ke změně molového objemu, která je  $0,346 \cdot 10^{-6} \text{ [m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}]$ . Také předpokládám, že změna molového objemu  $\Delta V$  zinku nezávisí na tlaku.

Pro tání čistého zinku platí, že  $\text{Zn (s)} = \text{Zn (l)}$ , pak pro izotermický děj ( $dT = 0$ ) lze odvodit vztah pro stanovení změny Gibbsovy energie:

$$dG_T = V \cdot dP. \quad (3.13)$$

Po integraci lze zapsat závislost  $\Delta G_{\text{tání}}$  na tlaku pro konstantní teplotu:

$$\Delta G_{\text{tání}} = \int \Delta V \cdot dP. \quad (3.14)$$

Pro konstantní hodnotu  $\Delta V$  a po integraci (3.14) dostaneme vztah:

$$\Delta G_{\text{tání}} = \Delta V \cdot P + C \quad (3.15)$$

kde je:  $\Delta V$  - změnu molárního objemu, který není závislý na tlaku;

$P$  - tlak;

$C$  - integrační konstantu, jsem stanovil z podmínky  $\Delta G_{\text{tání}} = 0$  při teplotě 692,5 K.

Dosazením do rovnice (3.15):

$$0 = 0,346 \cdot 10^{-6} \cdot 101325 + C$$

Nyní určíme konstantu  $C$ :

$$C = -0,03505845$$

Gibbsova energie v závislosti na tlaku:

$$\Delta G_{\text{tání}} = 0,346 \cdot 10^{-6} \cdot P - 0,03505845$$

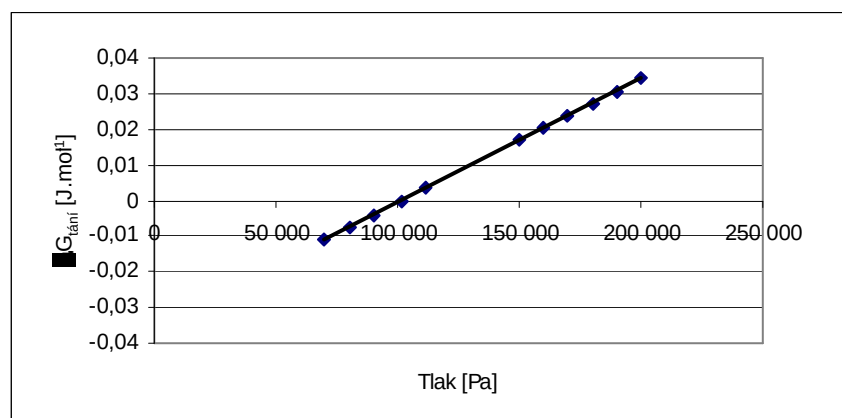
kde je: P - tlak působící při tavení zinku [Pa].

Směrnice přímky na obr. 3-3 se rovná změně molového objemu čistého zinku při tání. Pokud dojde ke zvýšení tlaku, způsobí tuhnutí taveniny zinku a jeho slitin a při snížení tlaku dojde k jeho tavení. V tabulce 3.2 je výpočet Gibbsovy energie v závislosti na tlaku, ale pouze při jedné teplotě.

**Tabulka 3.2 Výpočet změny Gibbsovy energie v závislosti na tlaku při konstantní teplotě tání**

| Tlak [MPa] | Hodnota $\Delta G$                                                                         |                       |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
|            | $\Delta G_{\text{tání}} = 0,346 \cdot 10^{-6} \cdot P - 0,03505845$ [J.mol <sup>-1</sup> ] | [J.kg <sup>-1</sup> ] |
| 70         | -0,01083845                                                                                | -0,165806608          |
| 80         | -0,00737845                                                                                | -0,112875528          |
| 90         | -0,00391845                                                                                | -0,059944448          |
| 101,325    | 0                                                                                          | 0                     |
| 150        | 0,01684155                                                                                 | 0,257642031           |
| 160        | 0,02030155                                                                                 | 0,310573111           |
| 170        | 0,02376155                                                                                 | 0,363504191           |
| 180        | 0,02722155                                                                                 | 0,416435271           |
| 190        | 0,03068155                                                                                 | 0,469366351           |
| 200        | 0,03414155                                                                                 | 0,522297431           |

**Pozn:** Tlak je roven  $p = p_0 \pm \Delta p$ ;  $p_0 = 101\,325$  [Pa].



Obr. 3-3 Závislost změny Gibbsovy energie čistého zinku na tlaku při konstantní teplotě tání (692,5 K)

### 3.1.5. Výpočet změny Gibbsovy energie při tavení čistého zinku v závislosti na teplotě a tlaku

Tento výpočet lze provést za předpokladu, že změna molového objemu čistého zinku je  $0,346 \cdot 10^{-6} [\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}]$  při teplotě tání  $692,5 [\text{K}]$  a změna molární entropie je  $9,64 [\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}]$ .

Tání čistého zinku  $\text{Zn(s)} = \text{Zn(l)}$ .

Závislost změny Gibbsovy energie na teplotě a tlaku:

$$d\Delta G_{\text{tání}} = \Delta V_{\text{tání}} \cdot dP - \Delta S_{\text{tání}} \cdot dT. \quad (3.16)$$

Po integraci rovnice (3.16) podle tlaku a teploty dostaneme:

$$\Delta G_{\text{tání}} = \Delta V_{\text{tání}} \cdot P - \Delta S_{\text{tání}} \cdot T + C. \quad (3.17)$$

kde je:  $\Delta V_{\text{tání}}$  - změnu objemu čistého zinku při tání;

$P$  - tlak;

$\Delta S_{\text{tání}}$  - změnu entropie čistého zinku při tání;

$T$  - teplotu;

$C$  - integrační konstantu, kterou lze vypočítat z podmínky  $\Delta G_{\text{tání}} = 0$  při teplotě tání  $692,5 \text{ K}$  a tlaku  $101\,325 \text{ Pa}$ .

Dosazením příslušných hodnot veličin do rovnice (3.17) dostaneme:

$$0 = 0,346 \cdot 10^{-6} \cdot 101325 - 9,64 \cdot 692,5 + C$$

a určíme konstantu  $C$ :

$$C = 6\,675,664942$$

Závislost změny Gibbsovy energie  $\Delta G_{\text{tání}}$  v závislosti na teplotě a tlaku má tvar:

$$\Delta G_{\text{tání}} = 0,346 \cdot 10^{-6} \cdot P - 9,64 \cdot T + 6675,664942 [\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}] \quad (3.18)$$

Na základě této rovnice lze zkontrolovat, při jaké teplotě a tlaku se taví čistý zinek.

Procesu tání odpovídá podmínka  $\Delta G_{\text{tání}} = 0$ .

**Pozn:** Uvažujeme tlak  $101\,325 [\text{Pa}]$  a teplotu  $692,5 \text{ K}$ . Pokud by se jednalo o jiný tlak, nebo jinou teplotu vypočítané hodnoty by byly jiné.

Teplotu tání čistého zinku lze vypočítat dosazením do rovnice (3.17) pro tlak  $= 101\,325 [\text{Pa}]$ :

$$0 = 0,346 \cdot 10^{-6} \cdot 101325 - 9,64 \cdot T + 6675,664942$$

$$T_{\text{tání}} = T = \frac{6675,7}{9,64} = 692,5 [\text{K}]$$

Tlak tání čistého zinku lze vypočítat dosazením do rovnice (3.18) pro teplotu 692,5 [K]:

$$0 = 0,346 \cdot 10^{-6} \cdot P - 9,64 \cdot 692,5 + 6675,664942$$

$$P_{\text{tání}} = P = \frac{0,03505845}{0,346 \cdot 10^{-6}} = 101325 [\text{Pa}]$$

Současně lze vypočítat i velikost tlaku působícího při tavení čistého zinku, pokud bychom chtěli teplotu tání zinku zvýšit na hodnotu 823 K.

$$0 = 0,346 \cdot 10^{-6} \cdot P_1 - 9,64 \cdot 823 + 6675,664942$$

$$P_1 = \frac{1258,055058}{0,346 \cdot 10^{-6}} = 3635997277 [\text{Pa}]$$

$$3635997277 - 101325 = \mathbf{3\ 635\ 895\ 952} [\text{Pa}]$$

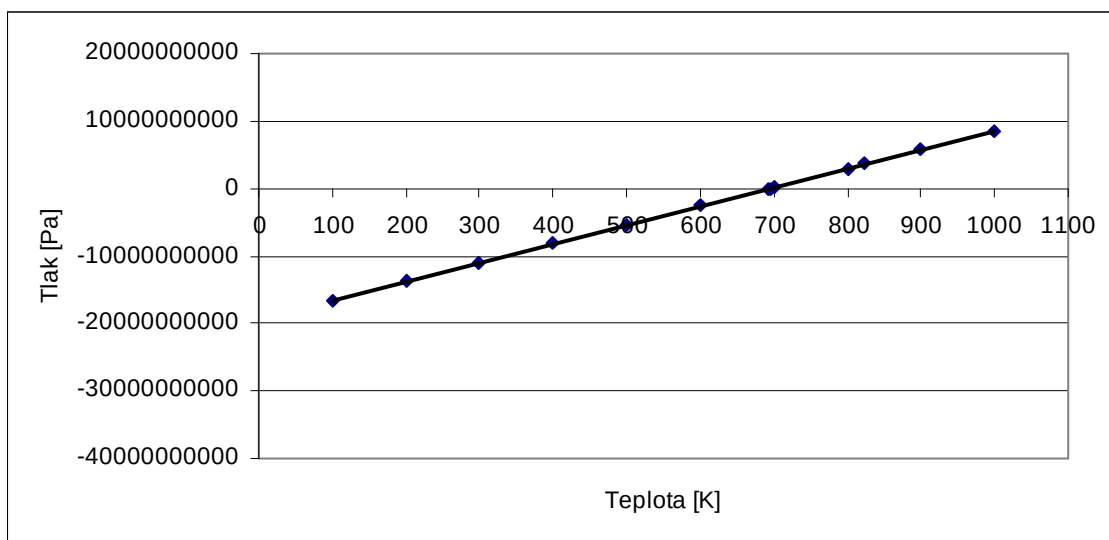
Čistý zinek se bude tavit při teplotě 823 [K], pokud začneme působit tlakem 3 635 997 277 [Pa], ( zvýšíme tlak o 3 635 895 952 [Pa] ).

Na obr. 3-4 je uvedena závislost změny Gibbsovy energie na teplotě a tlaku při tavení čistého zinku. V tabulce 3.3 jsou uvedeny hodnoty tlaku, kterým odpovídají hodnoty teploty tavení čistého zinku.

**Tabulka 3.3 Hodnoty tlaku odpovídající různým teplotám tavení čistého zinku**

| Teplota tání<br>zinku [K] | $P_1$<br>Hodnota tlaku<br>[Pa] | $P^0$<br>Hodnota<br>atmosférického tlaku<br>[Pa] | $\Delta p$<br>Zvýšení tlaku<br>působícího na tání<br>zinku |
|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| <b>100</b>                | -16507702145                   | 101 325                                          | -16 507 803 470                                            |
| <b>200</b>                | -13721574977                   | 101 325                                          | -13 721 676 302                                            |
| <b>300</b>                | -10935447809                   | 101 325                                          | -10 935 549 134                                            |
| <b>400</b>                | -8149320642                    | 101 325                                          | -8 149 421 967                                             |
| <b>500</b>                | -5363193474                    | 101 325                                          | -5 363 294 799                                             |
| <b>600</b>                | -2577066306                    | 101 325                                          | -2 577 167 631                                             |
| <b>692,5</b>              | 101325                         | 101 325                                          | 0                                                          |
| <b>694</b>                | 41893231,21                    | 101 325                                          | 41 791 906                                                 |
| <b>700</b>                | 209060861,3                    | 101 325                                          | 208 959 536                                                |
| <b>800</b>                | 2995188029                     | 101 325                                          | 2 995 086 704                                              |
| <b>823</b>                | 3635997277                     | 101 325                                          | 3 635 895 952                                              |
| <b>900</b>                | 5781315197                     | 101 325                                          | 5 781 213 872                                              |
| <b>1000</b>               | 8567442364                     | 101 325                                          | 8 567 341 039                                              |

**Pozn:**  $P_1 = P^0 + \Delta P$ ;  $P^0 = 101\ 325$  [Pa]



Obr. 3-4 Závislost změny Gibbsovy energie na teplotě a tlaku při tavení čistého zinku

V tabulce 3.4 jsou vypsány hodnoty čistého zinku pro stav pevný a kapalný

**Tabulka 3.4 Termodynamických hodnot čistého zinku pro stav pevný a kapalný**

| Prvek,<br>sloučenina | Atomová,<br>molekul.<br>hmotnost | Tání                      |                                                    | Konstanty pro tepelnou kapacitu<br>$C_p = a + bT + cT^{-2}$ [J.mol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]<br>a slučovací entalpii<br>$H_T - H_{298} = a.T + (b/2).T^2 - c.T^{-1} + d$ [J.mol <sup>-1</sup> ] |          |             |        |                      | Slučovací<br>entalpie<br>( $\Delta H_{298}^0$ ) <sub>sl</sub><br>[J.mol <sup>-1</sup> ] | Slučovací<br>entropie<br>$S_{298}^0$<br>[J.mol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ] |
|----------------------|----------------------------------|---------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|-------------|--------|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
|                      |                                  | $T_{\text{tání}}$<br>[°C] | $\Delta H_{\text{tání}}$<br>[J.mol <sup>-1</sup> ] | a                                                                                                                                                                                                      | $10^3.b$ | $10^{-5}.c$ | d      | Rozsah<br>teplot [K] |                                                                                         |                                                                                 |
| <b>Zn (s)</b>        | 65,37                            | 419,5                     | 6 676                                              | 22,40                                                                                                                                                                                                  | 10,06    | -           | -7 127 | 298 –<br>692,5       | -                                                                                       | 41,65                                                                           |
| <b>Zn (l)</b>        | -                                | -                         | -                                                  | 31,43                                                                                                                                                                                                  | -        | -           | -4 280 | 692,5 –<br>1200      | -                                                                                       | -                                                                               |



## 4. EXPERIMENTÁLNÍ SLEDOVÁNÍ VYBRANÝCH VLASTNOSTÍ SLITIN ZINKU

Experimenty prováděné při řešení této doktorské disertační práce byly zaměřeny do několika oblastí, které jsou důležité při aplikaci zinku a jejich slitin při výrobě odlitků a příp. následnou simulaci jejich tuhnutí a chladnutí. Nebo při konstrukci jader a dutin slévárenských forem. Základem prováděných experimentů bylo měření dilatačních vlastností slitin zinku a následné stanovování součinitele teplotní smrštivosti. Pro měření dilatačních vlastností bylo navrženo a odzkoušeno měřicí zařízení, které je popsáno dále a viz obr. 4-1, 4-2, 4-3. Jeho měřicí jednotka pracuje s použitím indukčního vysílače (snímače) a AD převodníku spolu s PC. Současně pro měření dilatačních změn bylo pro informaci využito další měřicí zařízení, které je k dispozici také na našem pracovišti – Katedra strojírenské technologie – FS, TU v Liberci. Toto zařízení pracuje na základě snímání polohy bodů optického systému. Další součástí řešení doktorské práce byly zkoušky zabíhavosti vybraných slitin zinku, které jsou citlivé nejen na přípravu slévárenské formy, ale také na tekutost slitiny a vlivu okolí. Dále byly sledovány mechanické vlastnosti odlitků (zkouška tahem, zkouška vrubové houževnatosti a zkoušky tvrdosti) z vybraných slitin zinku odlévaných při různých technologických podmínkách. Též na získaných vzorcích slitin zinku byly prováděny experimenty, týkající se jejich ohřevu s ohledem na stanovení délkové změny v souvislosti s výší teploty ohřevu. Pro získání komplexního poznatku o slitinách zinku bylo prováděno i jejich metalografické pozorování.

V tabulce 4.1 jsou uvedeny slitiny, které byly použity při experimentálním sledování výše uvedených měření. Přesné chemické složení slitin zinku bylo součástí housek, které jsou na katedře strojírenské technologie v Liberci k dispozici.

**Tabulka 4.1 Zinek a slitiny zinku, které byly použity pro jednotlivé experimenty**

| Druh slitin     | Chemické složení vyjádřené v hmotnosti [%] |     |     |      |       |
|-----------------|--------------------------------------------|-----|-----|------|-------|
|                 | Zn                                         | Al  | Cu  | Mg   | Fe    |
| <b>Zn</b>       | 99,9                                       | -   | -   | -    | -     |
| <b>ZnAl4</b>    | 95,780                                     | 4,0 | 0,1 | 0,05 | 0,070 |
| <b>ZnAl4Cu1</b> | 94,885                                     | 3,9 | 1,1 | 0,04 | 0,075 |
| <b>ZnAl4Cu3</b> | 93,070                                     | 3,9 | 2,9 | 0,05 | 0,080 |
| <b>ZnAl8Cu1</b> | 90,785                                     | 8,0 | 1,1 | 0,04 | 0,075 |

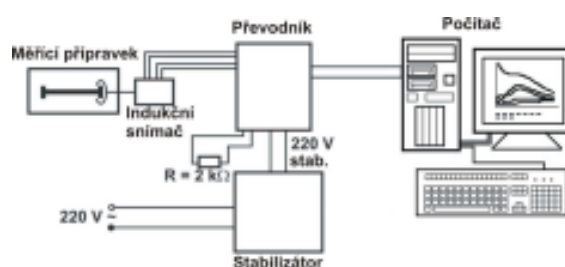
**Poznámka:** Přesné chemické složení bylo součástí materiálového listu. Tavení čistého zinku a slitin zinku bylo vždy prováděno v odporové peci, kde byla nastavena teplota přehřátí 450[°C]. Tato teplota byla nastavena pro všechny experimenty stejná.

#### **4.1. Měření dilatačních vlastností vybraných slitin zinku pro porovnání optického a mechanického měření**

Tavení slitiny zinku ZnAl8Cu1 (810) bylo provedeno v odporové peci dle obr. 6-9, viz příloha 6. Použitý materiál byl taven v grafitovém kelímku a byl přehřátý na teplotu 450°C, i když jeho teplota tavení čistého zinku je 420°C. Především byl brán zřetel na manipulaci s touto taveninou a k určitému poklesu teploty během manipulace. Experimenty byly provedeny v okamžiku, kdy byla dosažena teplota taveniny 450°C a bylo zkontrolováno a připraveno zařízení na měření dilatačních vlastností. Teplota odlévané taveniny byla měřena pomocí digitálního měřidla (GTH 1100 – Digitalthermometer, -50 do 1100 °C; provenience, SRN). Ověření funkčnosti měřících přístrojů, jak mechanického dilatometru s příslušným softwarem, tak i rychlostních kamer s příslušným softwarem, bylo několikrát odzkoušeno před samotným litím taveniny do dutiny formy. Velmi obtížné bylo nastavení obou přístrojů v tom, že jsme je museli zapnout ve stejném časovém okamžiku.

##### **4.1.1. Charakteristika použitého zařízení**

Experimenty byly prováděny nejen za účelem sledování dilatačních změn bržděného smršťování chladnoucích a tuhoucích odlitků z různých slitin zinku, ale také za účelem zjištění hodnoty teplotní smrštivosti odlitků při různých teplotách. K měření dilatací byla použita dvě odlišná měřící zařízení. Jedno je na principu indukčního vysílače, druhé na principu optického snímání pohybujících se bodů. Měřící zařízení s indukčním vysílačem se skládá z rámu, na kterém jsou dvě čelisti, které se podílí na vytváření dutiny formy pro odlitek tvaru písmena „I“. Jedna čelist je pevná opatřena různými typy příložek, druhá je kovová, pohyblivá. Tato kovová čelist je spojena s indukčním vysílačem, který vysílá signál změny délky odlitku v důsledku jeho tuhnutí a chladnutí. Tento analogový signál je veden do AD převodníku a příslušným software je zpracováván do grafické interpretace časových závislostí sledovaných veličin (dilatace, teplota), které jsou registrovány a ukládány do paměti PC. Teplota tuhnutí odlitku je měřena v jeho tepelné ose. Prostřednictvím tohoto zařízení lze sledovat závislost dilatace a teploty na čase. Pro měření teploty byly použity termočlánky NiCr-Ni. Schéma tohoto měřícího zařízení je na obr. 4-1 a na obr.4-2 je pohled na zařízení. Na obr. 4-3 je pohled na dutinu formy, kde byly odlévány specifické tvary odlitků.



Obr. 4-1 Skupinové schéma zařízení pro měření brzděného smršťování odlitku



Obr. 4-2 Měřicí zařízení s dilatometrem polské provenience

Střední partie dutiny slévárenské formy pro odlitek tvaru „I“ může být vymezena různým typem materiálu (např. formovací směsí, ocelovými příložkami o různé tloušťce). Funkci měřicího zařízení je nutno před každým experimentem odzkoušet. Výsledkem každého experimentu je získání závislosti dilatace a teploty na čase, jejich zobrazení je možno vidět přímo na monitoru počítače.



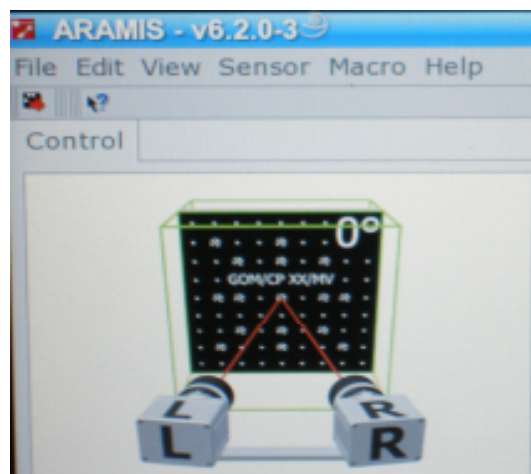
Obr. 4-3 Ukázka rozdělení formičky

Jak bylo již výše uvedeno, sledování dilatace chladnoucího a tuhnoucího odlitku bylo v jednom případě současně prováděno rychlostními kamerami na zařízení (ARAMIS v6.2.0-3 se zobrazovacím software IVIEW – v6.2.0-3), které jsou na obr. 4-4. Pro snímání dilatace pomocí zařízení ARAMIS, typ v 6.2.0-3 je nutno upravit pevnou a pohyblivou část měřicího zařízení dilatace (na povrchu se vytvoří malé bílé kruhové tečky). Snímání pomocí rychlostních kamer je založeno na snímání pohybujících se bodů, které se od sebe vzhledem

k smrštění přibližují (oddalují). V našem případě šlo o snímání 4 bodů na pevné části a 4 bodů na posuvné části. Měření pomocí optiky - při provádění experimentů byly použity dvě optické rychlostní kamery s obchodním názvem Aramis, které pracují se software IVIEW – V6.20-3. Tyto kamery také registrují měřenou změnu délky tuhného a chladnoucího odlitku. Měření rychlostními kamerami bylo provedeno s přesností na 0,003mm. Optické kamery byly velmi ovlivněny sálajícím teplem a občas se nám stalo, že při sálajícím teplu jsme ztráceli zaměřený bod. Proto jsme snímali více bodů najednou. Pokud by došlo ke ztrátě jednoho bodu, stále byly snímány další body v okolí. Před samotným snímáním bylo nutné rychlostní kamery kalibrovat do jednoho středu pomocí kalibrační desky viz obr. 4-4. Vzhledem k velkému sálajícímu teplu byly optické kamery použity pouze pro jeden experiment. Při více experimentech by mohlo dojít k poškození optických čoček a poničení těchto velmi drahých přístrojů.



A) Mechanická kalibrace do středního pásma



B) Softwarová kalibrace do středního pásma

Obr. 4-4 Kalibrace rychlostních kamer



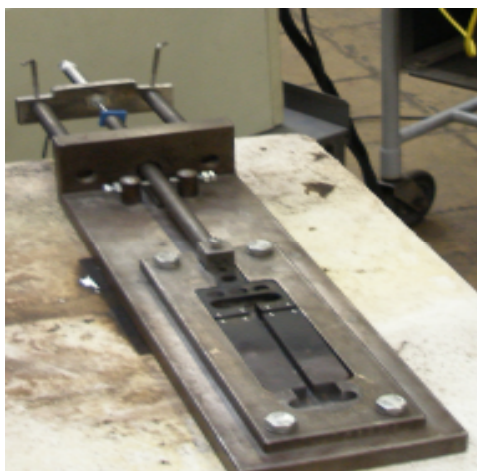
A) vysoko rychlostní kamery



B) kamery při snímání dilatace

Obr. 4-5 Zařízení ARAMIS, typ v6.2.0-3 se software IVIEW-v6.2.0-3

Pro experimenty byla použita tavenina slitiny zinku ZnAl8Cu1, která byla přehřátá na teplotu 530°C. Na obr. 4-6a) je připravená forma k odlévání a na obr. 4-6b) je forma po odlití.



A) forma připravená k odlití

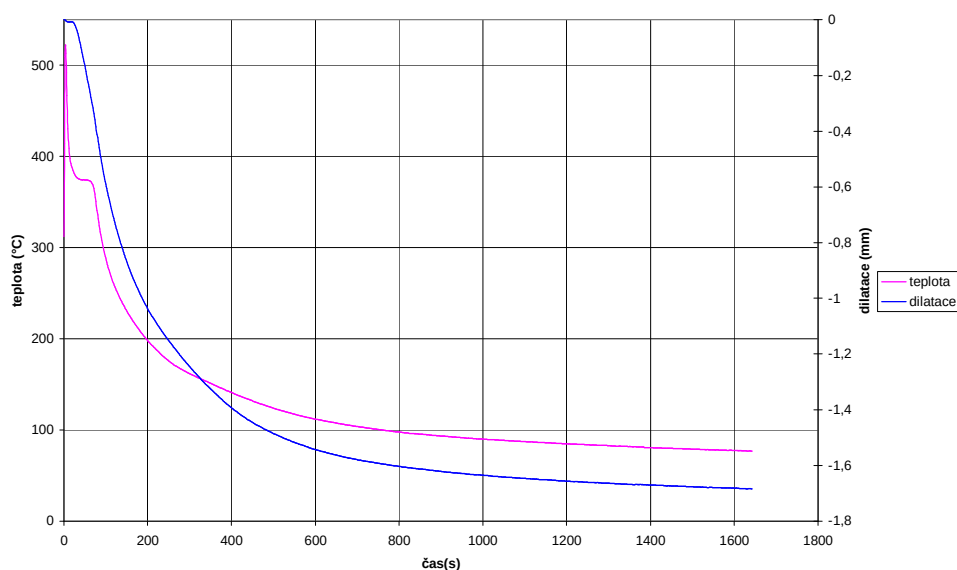


B) forma po odlití

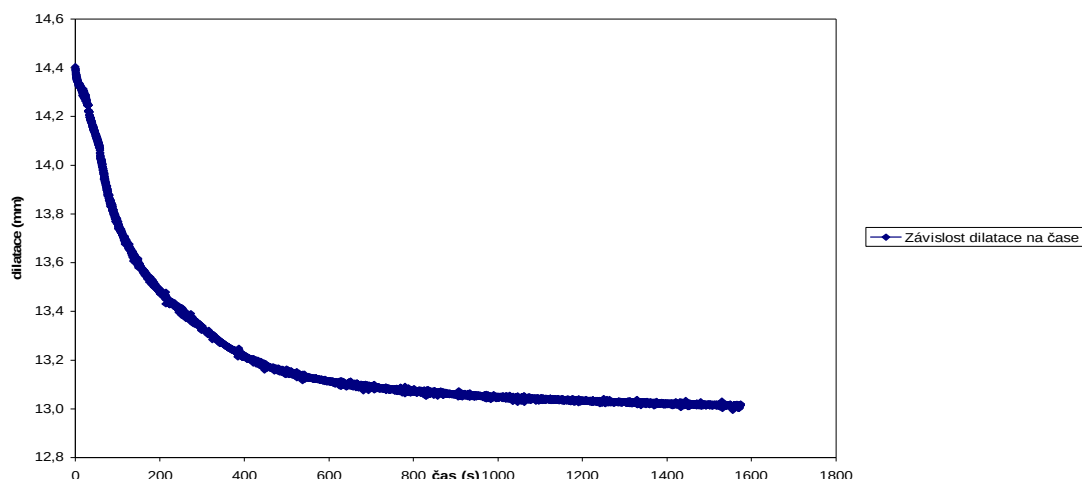
Obr. 4-6 Pohled na formičku kde dochází ke sledování dilatačních změn

#### 4.1.2. Vlastní měření dilatace

Na základě výše uvedeného postupu byly po odlití taveniny do dutiny slévárenské formy získány časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku závislosti na čase, viz obr. 4-7. Dilatační křivka na obr. 4-7 byla získána na měřicím zařízení s dilatometrem a na obr. 4-8 je dilatační křivka získaná pomocí zařízení ARAMIS v6.2.0-3 se zobrazovacím software IVIEW –v6.2.0-3.



Obr. 4-7 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku specifického tvaru délky 157 mm ze slitiny zinku (ZnAl8Cu1), odlévaného z teploty 450 °C, měřeno dilatometrem polské výroby



Obr. 4 -8 Závislosti časové změny a změny rozměru odlitku specifického tvaru délky 157 mm ze slitiny zinku (ZnAl8Cu1), odlévaného z teploty 450 °C, měřeno zařízením ARAMIS

#### 4.1.3. Porovnání dilatačních křivek z obou měřicích zařízení

Z grafické závislosti na obr. 4 - 7 je patrné, že dilatace probíhala v rozmezí hodnot od 0 do -1,6844 [mm], z toho je zřejmé, že docházelo ke smrštění, což pro tuhnutí a chladnutí odlitku je typické. Absolutní hodnota dilatace činí 1,6844 [mm]. Ze závislosti na obr. 4 - 8 je zřejmé, že dilatace probíhala v rozmezí 14,3945 až 13,0161 [mm], zde opět docházelo ke smrštění odlitku. Absolutní hodnota dilatace v tomto případě činí 1,3784 [mm]. Rozdíl v měření mohl vzniknout díky nepřesné kruhovitosti měřených bodů, které jsou nutné pro snímání zařízením ARAMIS. Z porovnání výsledků dilatací z obou metodik (měření dilatometrem a rychlostními kamerami) je patrné, že oba výsledky se liší. Měření pomocí rychlostních kamer není tak přesné jako měření s použitím dilatometru polské výroby. Měření pomocí kamer je závislé na přesnosti vytvoření registračních bodů a dále je nutno chránit optiku kamery proti tepelnému sálání. Dalším značným problémem je vytvoření dostatečné kruhovitosti měřených bodů a dále, aby obě měřicí zařízení začala měřit dilataci ve stejném časovém okamžiku. Tyto nedostatky nás tedy vedou k tomu, abychom měřili hodnoty dilatace nadále pomocí mechanického dilatometru. Při porovnání těchto dvou měření bylo zjištěno, že mechanický dilatometr lépe vyhovuje měření délkových smrštivosti materiálu. Toto zařízení umožňuje sledování a registraci dilatačních změn během chladnutí a tuhnutí odlitku. Jedním z výsledků prováděných experimentů je porovnání dosažených hodnot dilatace. Rozdíly obou měření se liší o 0,309 [mm], tj 22,2 [%].



## 4.2. Měření dilatačních vlastností vybraných slitin zinku a stanovení hodnot součinitele teplotní smrštivosti (odlévaných materiálů do různých typů přílozek)

Experimenty, které jsou popsány v této kapitole, byly zaměřeny na sledování dilatačních vlastností ve slévárenské formě, viz obr. 4-6, kde byl měněn materiál, který vytváří dutinu formy. Z konstrukčního hlediska se jedná o tzv. „příložky“, které vymezují šířku dutiny, jak je patrné z obr. 4-11 až 4-15.

### 4.2.1. Charakteristika použitého zařízení

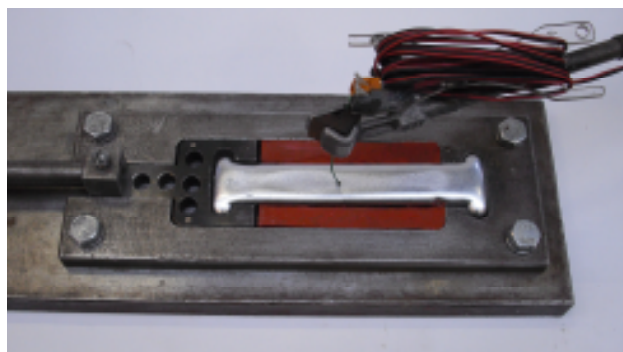
Pro experimentální měření sledovaných dilatací slitin zinku ve formách s různými příložkami bylo použito stejné měřicí zařízení jako v předchozí podkapitole (4.2), jehož blokové schéma je na obr. 4-1. Na obr. 4-9 je PC se software pro sledování dilatací a AD převodník měřicího zařízení.

Na obr. 4-10 je ukázka vložených pryžových přílozek do dutiny formy. Na obr. 4-11 je ukázka vložených kovových přílozek. Na obr. 4-12 je ukázka vložených pískových přílozek. Na obr. 4-13 je ukázka kovových chlazených přílozek. Na obr. 4-14 je ukázka zúžených kovových přílozek. Na obr. 4-2 je kompletní zařízení pro měření dilatačních změn, jak v pohledu na mechanickou část, tak i na část spojení s PC systémem.

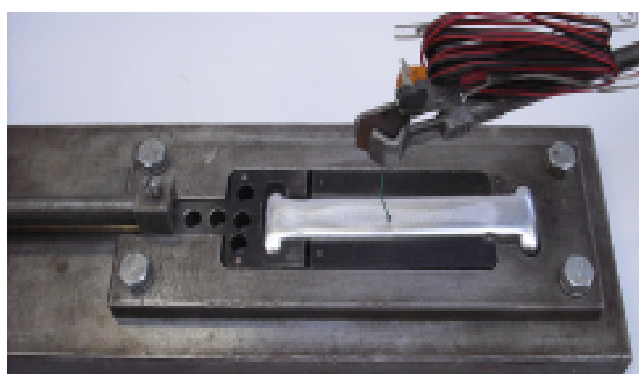


Obr. 4-9 PC záznamovým zařízením

Na obr. 4-10, 4-11, 4-12, 4-13, 4-14 je ukázáno zařízení opatřené různými typy přílozek, které jsou umístěné v pevné části měřicího rámu.



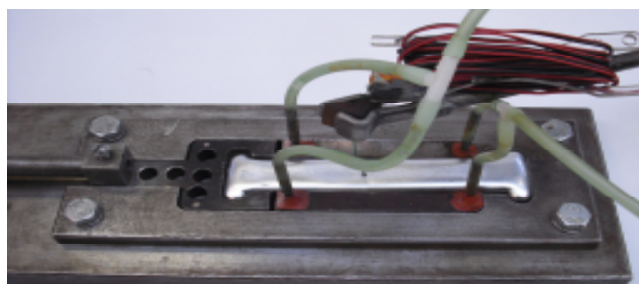
Obr. 4-10. Měřicí zařízení s pryžovými příložkami



Obr. 4-11 Měřicí zařízení s kovovými příložkami



Obr. 4-12 Měřicí zařízení s pískovými příložkami

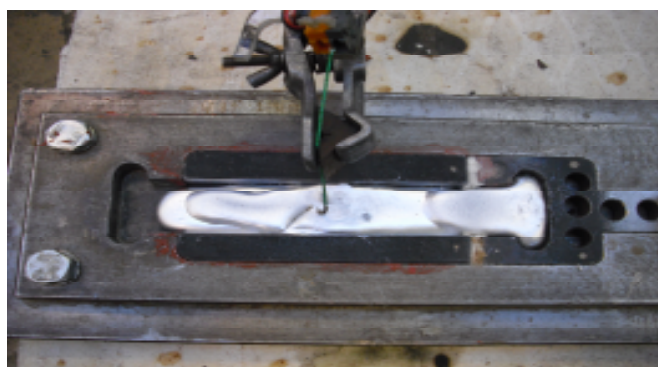


Obr. 4-13 Měřicí zařízení s kovovými chlazenými příložkami





Obr. 4-14 Měřicí zařízení se zúženými kovovými příložkami



Obr. 4-15 Ukázka odlití zinkové slitiny při nedosažení lící teploty 419°C

V tabulce 4.2 je souhrn materiálů použitých pro odlévání do různých typů příložek

**Tabulka 4.2 Souhrn materiálů, které budeme používat pro odlévání do různých typů příložek**

|                                               | Šířka použitých příložek a druh příložek |                                   |                                   |                                           |                                  |
|-----------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------|
|                                               | Normální šířka (kovové příložky)         | Normální šířka (pískové příložky) | Normální šířka (pryžové příložky) | Normální šířka (kovové chlazené příložky) | Zmenšená šířka (kovové příložky) |
| <b>Druhy použitých materiálů pro odlévání</b> | Zn                                       | Zn                                | Zn                                | Zn                                        | Zn                               |
|                                               | ZnAl4                                    | ZnAl4                             | ZnAl4                             | ZnAl4                                     | ZnAl4                            |
|                                               | ZnAl4Cu1                                 | ZnAl4Cu1                          | ZnAl4Cu1                          | ZnAl4Cu1                                  | ZnAl4Cu1                         |
|                                               | ZnAl4Cu3                                 | ZnAl4Cu3                          | ZnAl4Cu3                          | ZnAl4Cu3                                  | ZnAl4Cu3                         |
|                                               | ZnAl8Cu1                                 | ZnAl8Cu1                          | ZnAl8Cu1                          | ZnAl8Cu1                                  | ZnAl8Cu1                         |

**Pozn:** Normální šířka je rozměr štěrbinu pro odlévání 14 mm

Zmenšená šířka je rozměr štěrbinu pro odlévání 7 mm

Experimenty byly prováděny v okamžiku, kdy byly připraveny taveniny slitin zinku pro odlévání. Současně byla zkontrolována funkce měřicího zařízení a toto zařízení bylo připraveno k měření. Čistý zinek a jeho slitiny byly odlévány při teplotě 450°C.

Před odléváním byla teplota taveniny vždy změřena, abychom zabezpečili stejné podmínky experimentů. Tato série prováděných experimentů obsahovala 125 měření, tj. pro jeden typ slitiny zinku bylo provedeno 25 měření, která byla statisticky zpracována a z tohoto zpracování jsou průměrné hodnoty, které jsou uvedeny na následujících obr. 4-16 až 4-40.

#### 4.2.2. Vyhodnocení prováděných experimentů

V návaznosti na výše uvedené konstatování byly z těchto grafických závislostí (viz obr. 4-16 až 4-40) utvořeny dílčí závěry, které se týkají hodnocení maximálních hodnot dilatace tak, jak byly získány pro jednotlivé experimenty. Dále byly z těchto grafických závislostí vypočítány součinitele teplotní smrštivosti (roztažnosti)  $\alpha$  podle tohoto vztahu:

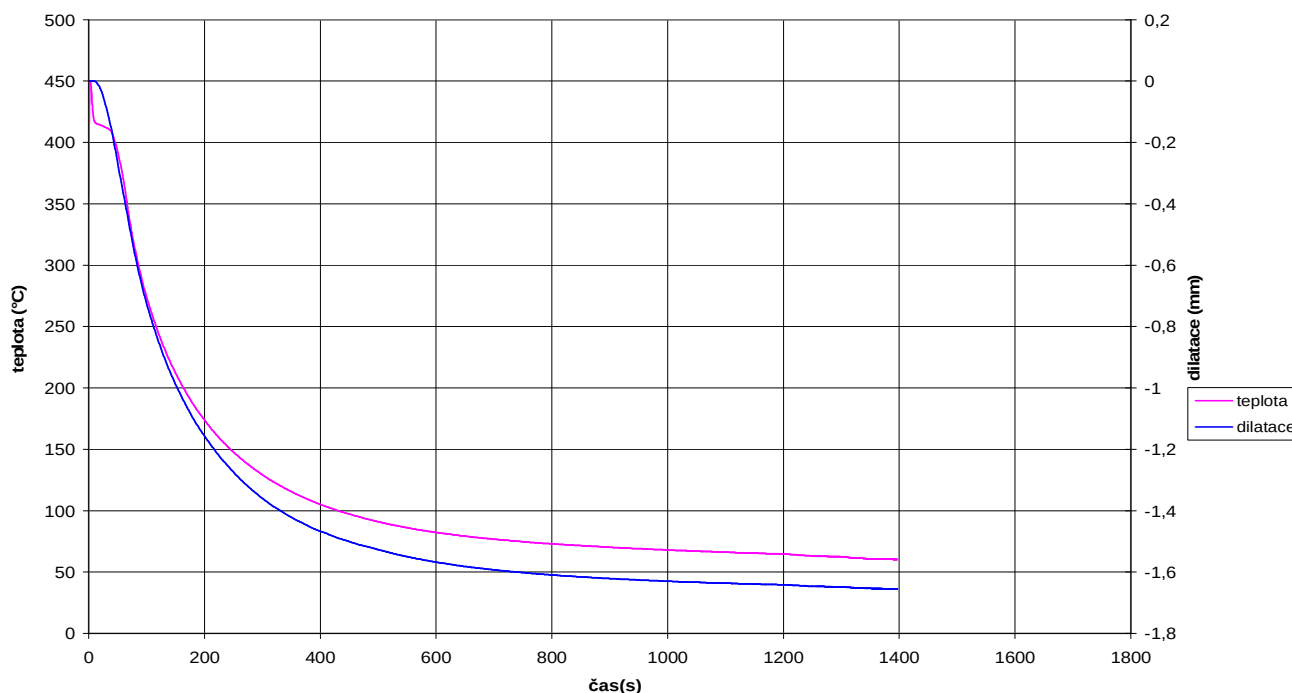
$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \cdot \Delta T} \quad (4.1)$$

kde je:  $\Delta l$  – změnu délky sledovaného tělesa [mm];

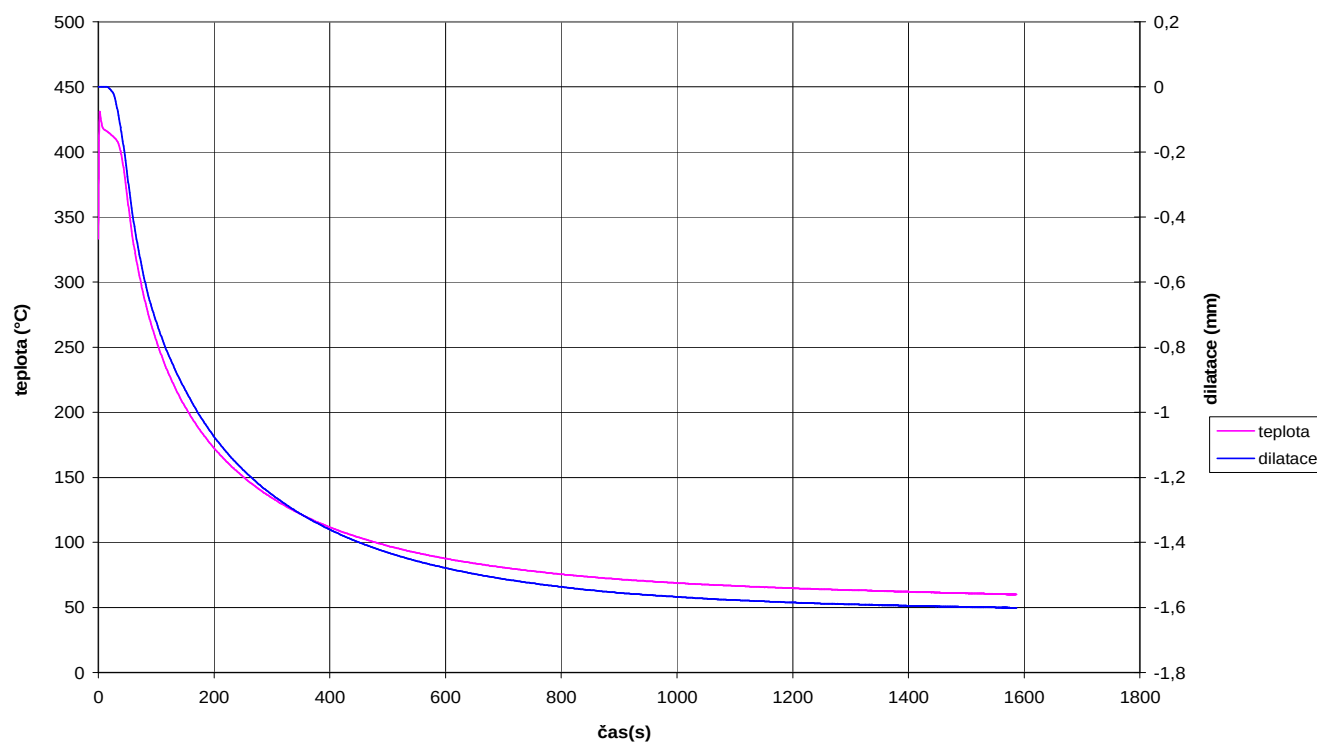
$l_0$  – počáteční délka odlitku (157 mm);

$\Delta T$  – rozdíl teplot sledované dilatace [°C].

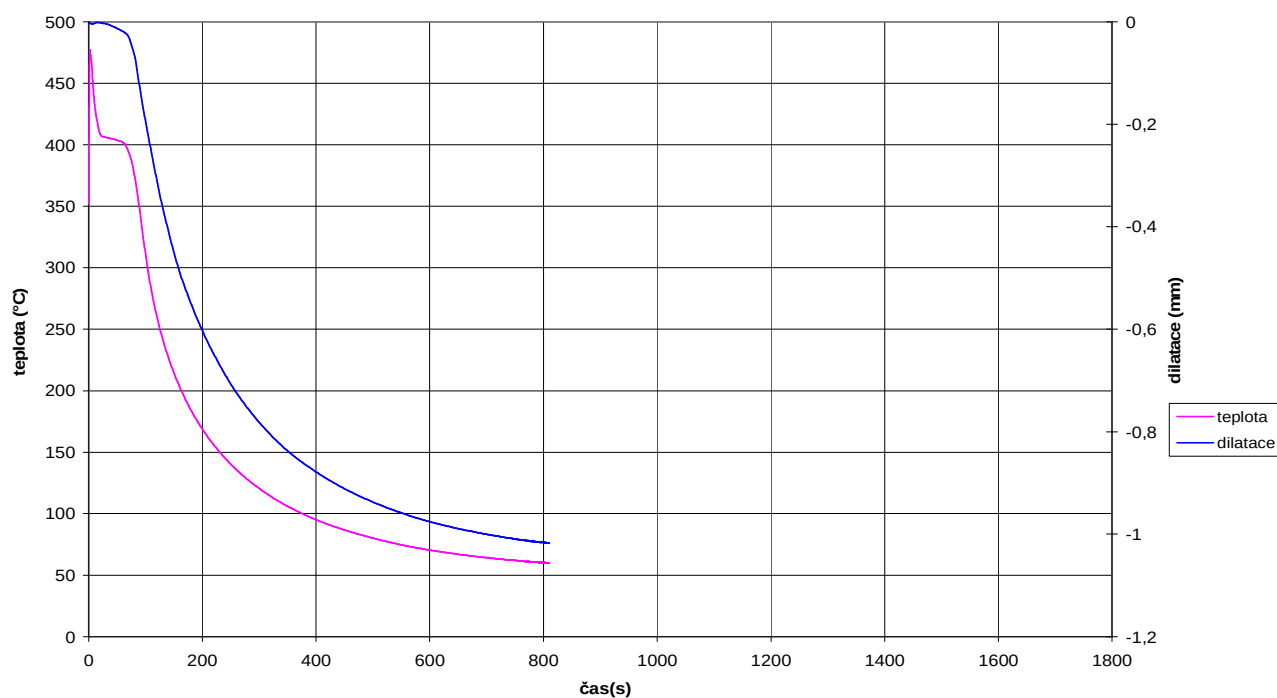
Vypočítané hodnoty součinitele teplotní smrštivosti ( $\alpha$ ) pro jednotlivé experimenty, dle vztahu (4.1), jsou zaznamenány v tabulkách 4-8 až 4-32.



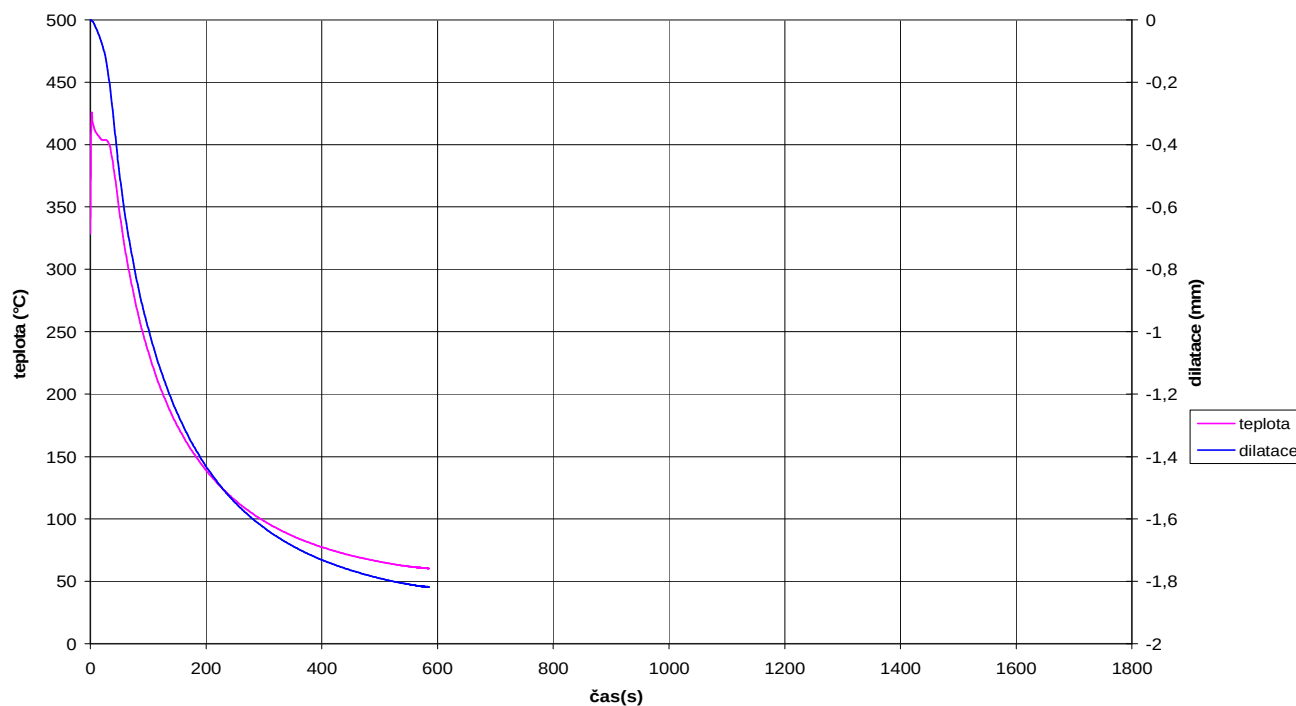
Obr. 4-16 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „I“ délky 157 mm z čistého zinku (Zn), odlévaného z teploty 450 °C do pryžových přílohek, měřeno dilatometrem polské provenience



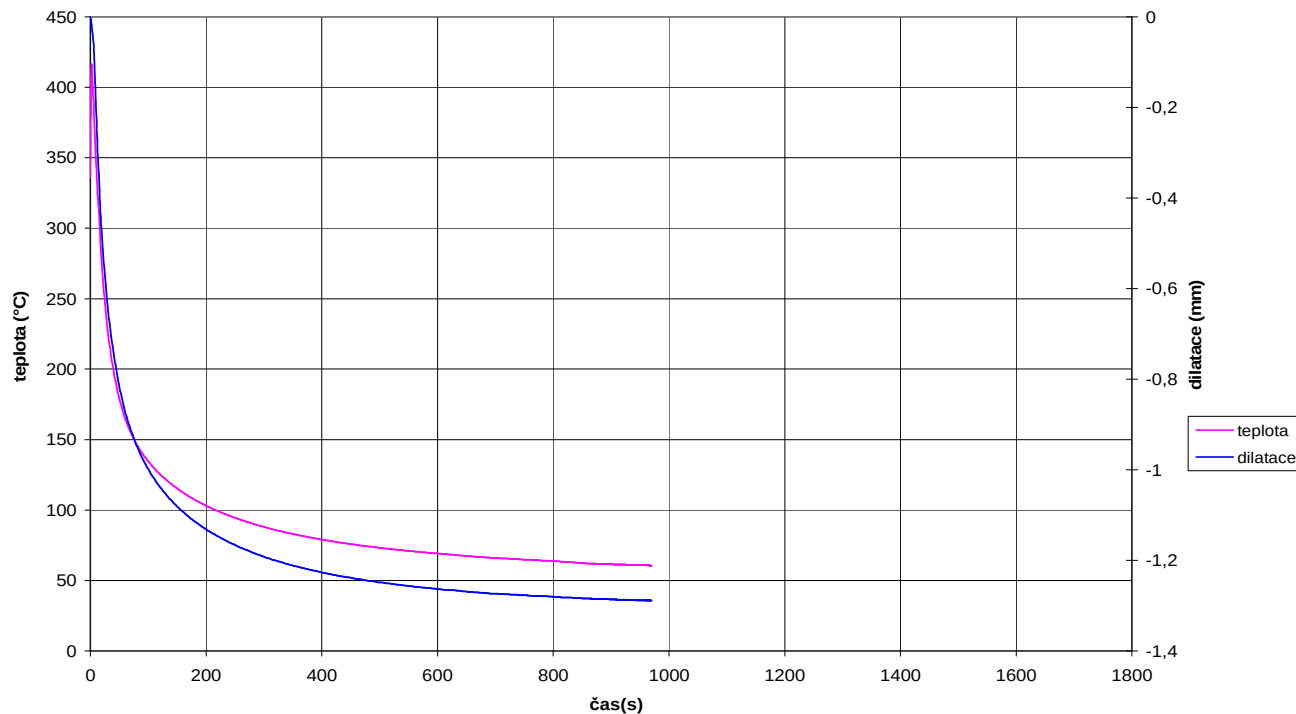
Obr. 4-17 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „I“ délky 157 mm z čistého zinku (Zn), odlévaného z teploty 450 °C do kovových příložek, měřeno dilatometrem polské koncepce



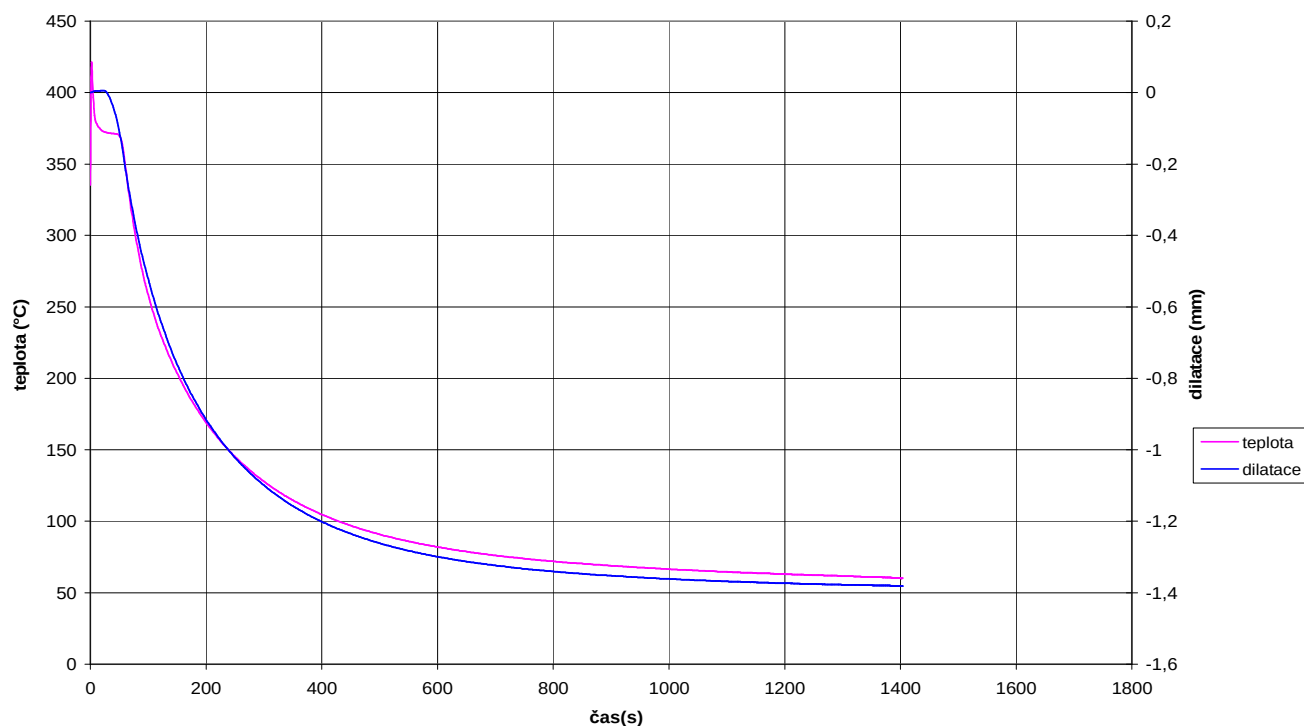
Obr. 4-18 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „I“ délky 157 mm z čistého zinku (Zn), odlévaného z teploty 450 °C do pískových příložek, měřeno dilatometrem polské koncepce



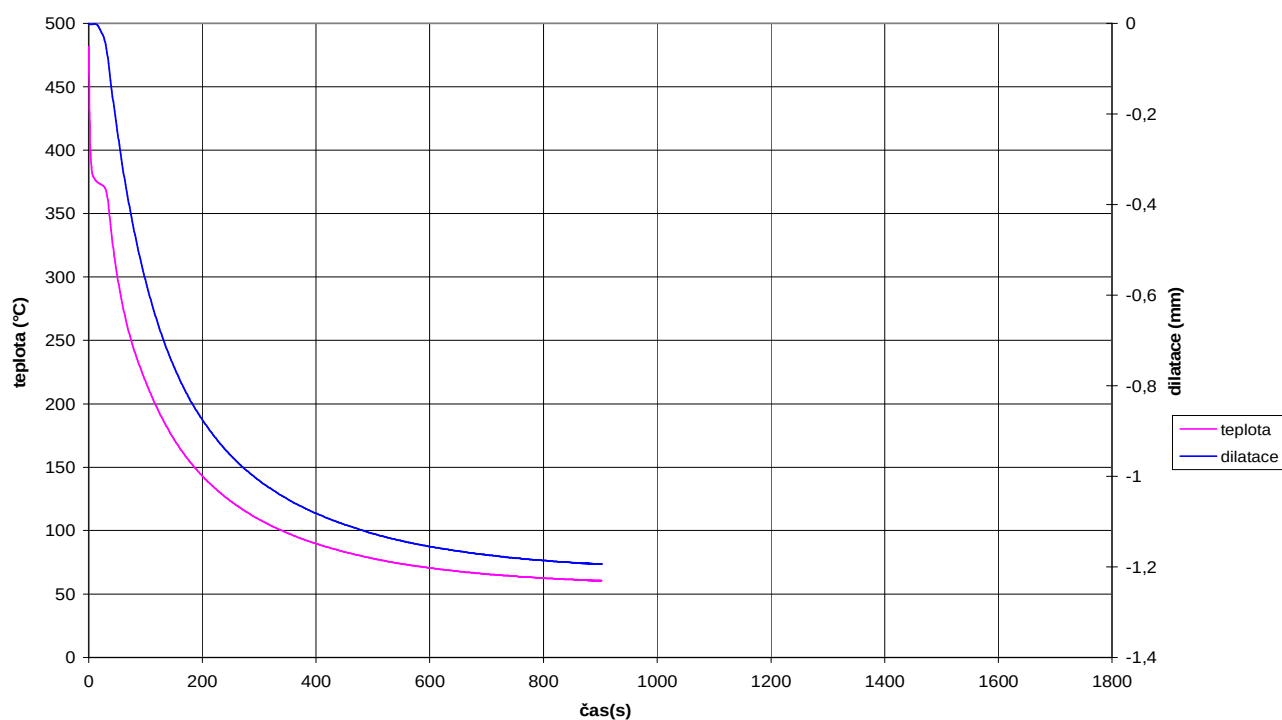
Obr. 4-19 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „I“ délky 157 mm z čistého zinku (Zn), odlévaného z teploty 450 °C do kovových chlazených příložek, měřeno dilatometrem polské koncepce



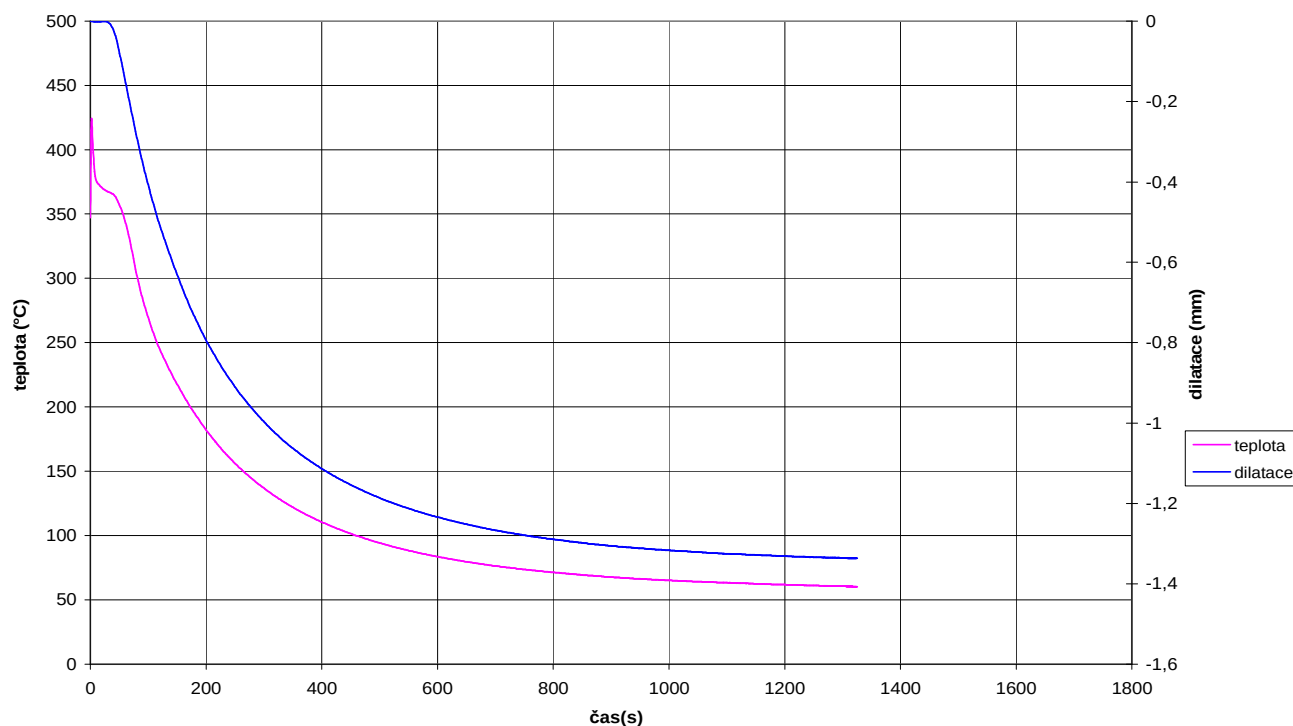
Obr. 4-20 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „I“ délky 157 mm z čistého zinku (Zn), odlévaného z teploty 450 °C do zúžených kovových příložek, měřeno dilatometrem polské koncepce



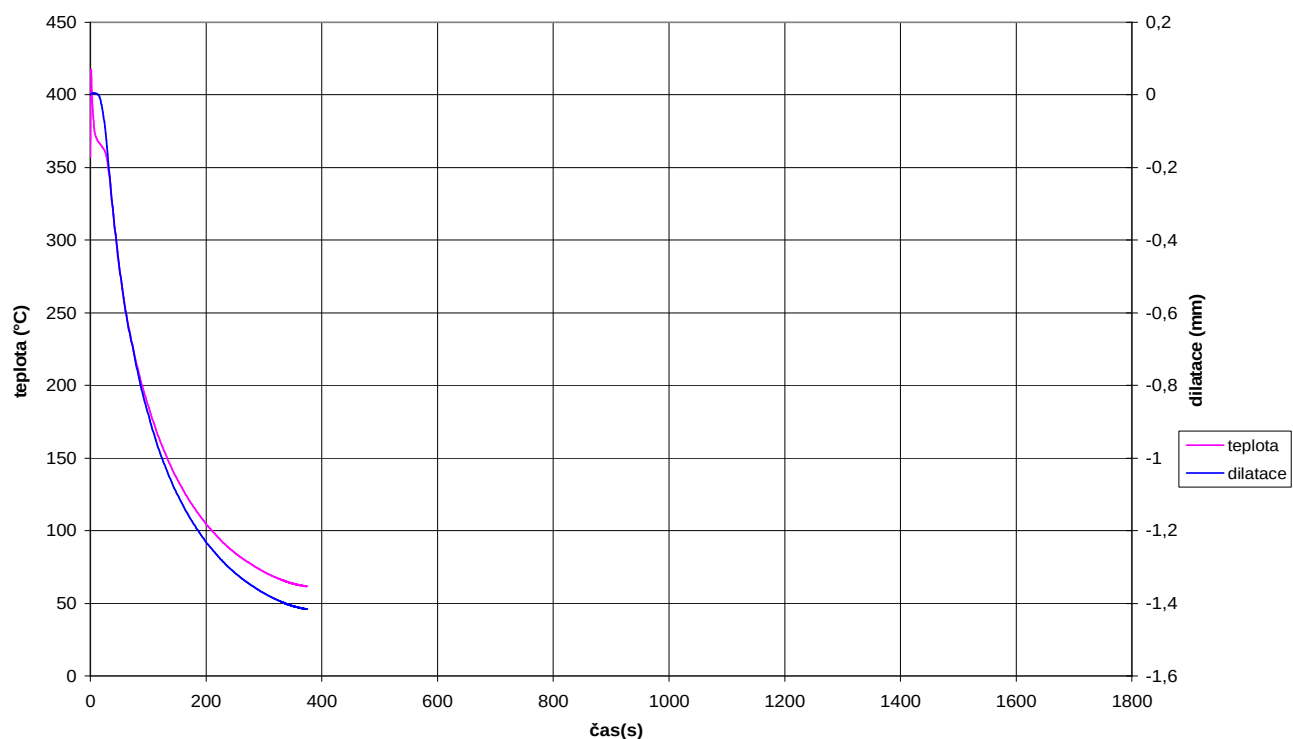
Obr. 4-21 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „I“ délky 157 mm ze slitiny zinku (ZnAl4), odlévaného z teploty 450 °C do pryžových přílozek, měřeno dilatometrem polské koncepce



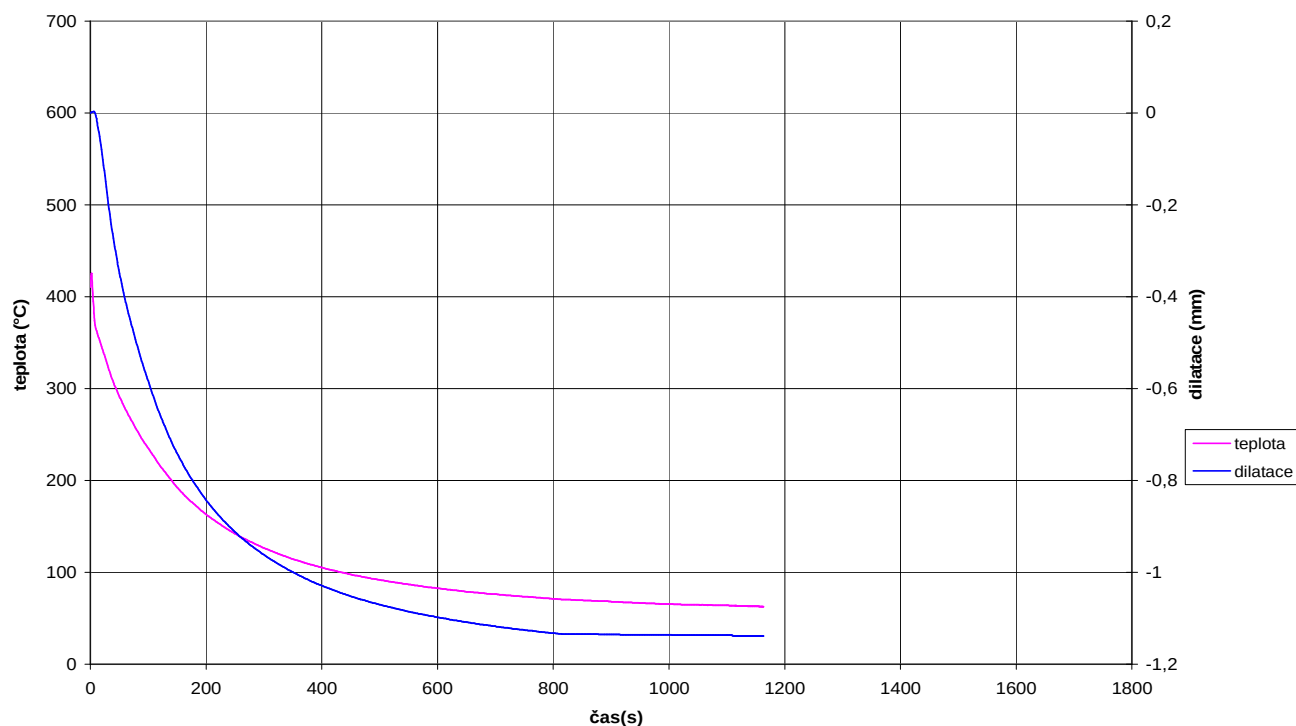
Obr. 4-22 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „I“ délky 157 mm ze slitiny zinku (ZnAl4), odlévaného z teploty 450 °C do kovových přílozek, měřeno dilatometrem polské koncepce



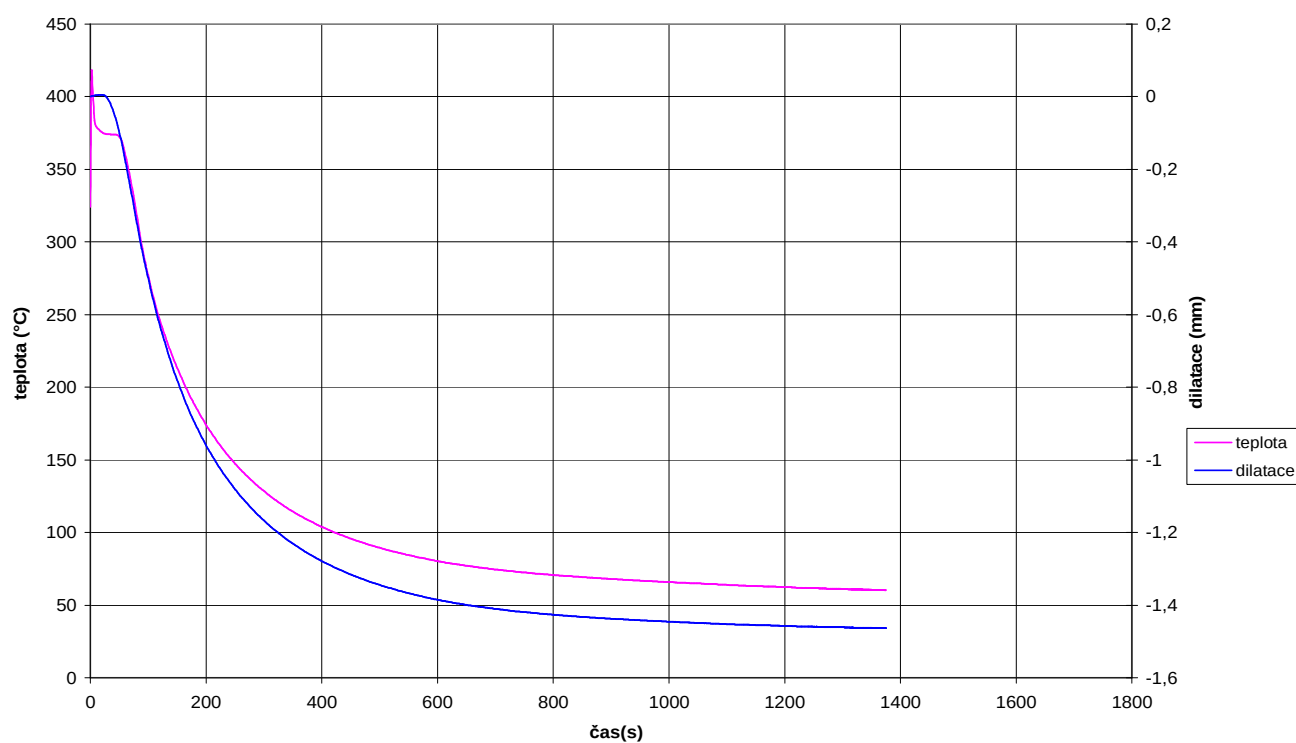
Obr. 4-23 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „I“ délky 157 mm ze slitiny zinku (ZnAl14), odlévaného z teploty 450 °C do pískových příložek, měřeno dilatometrem polské koncepce



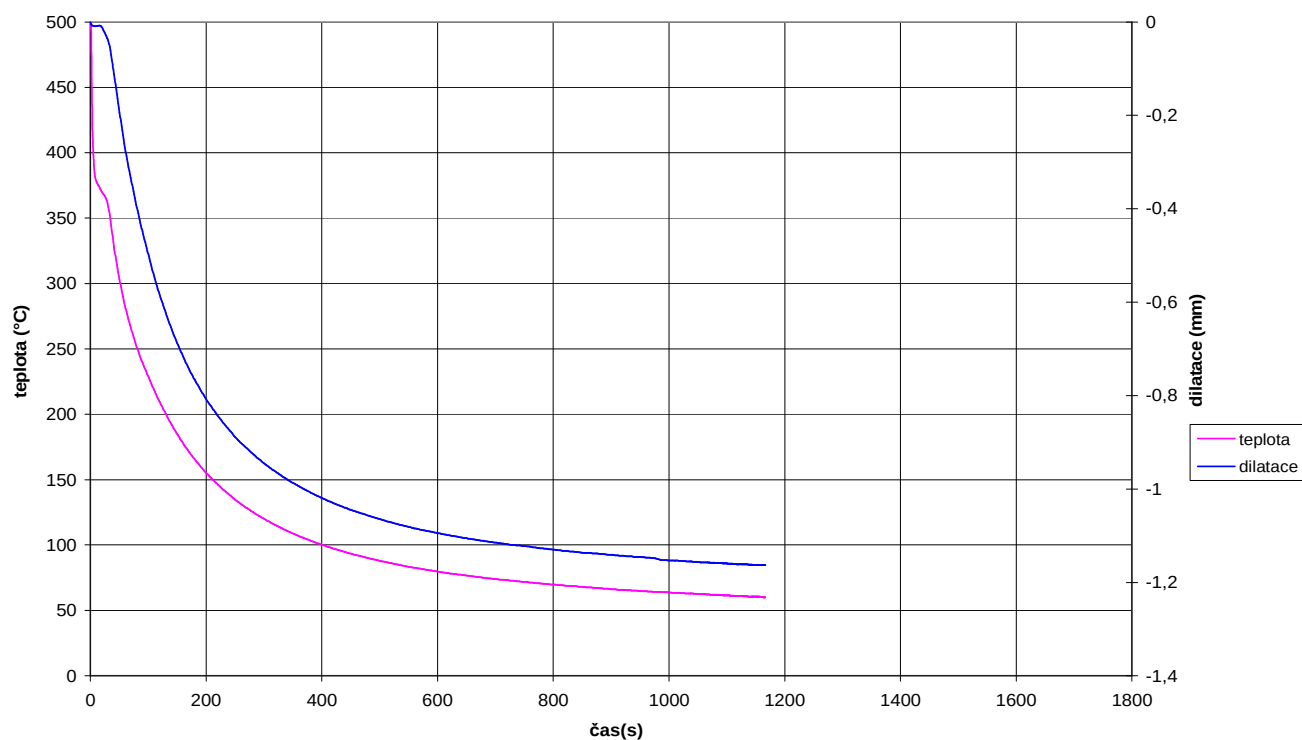
Obr. 4-24 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „I“ délky 157 mm ze slitiny zinku (ZnAl14), odlévaného z teploty 450 °C do kovových chlazených příložek, měřeno dilatometrem polské koncepce



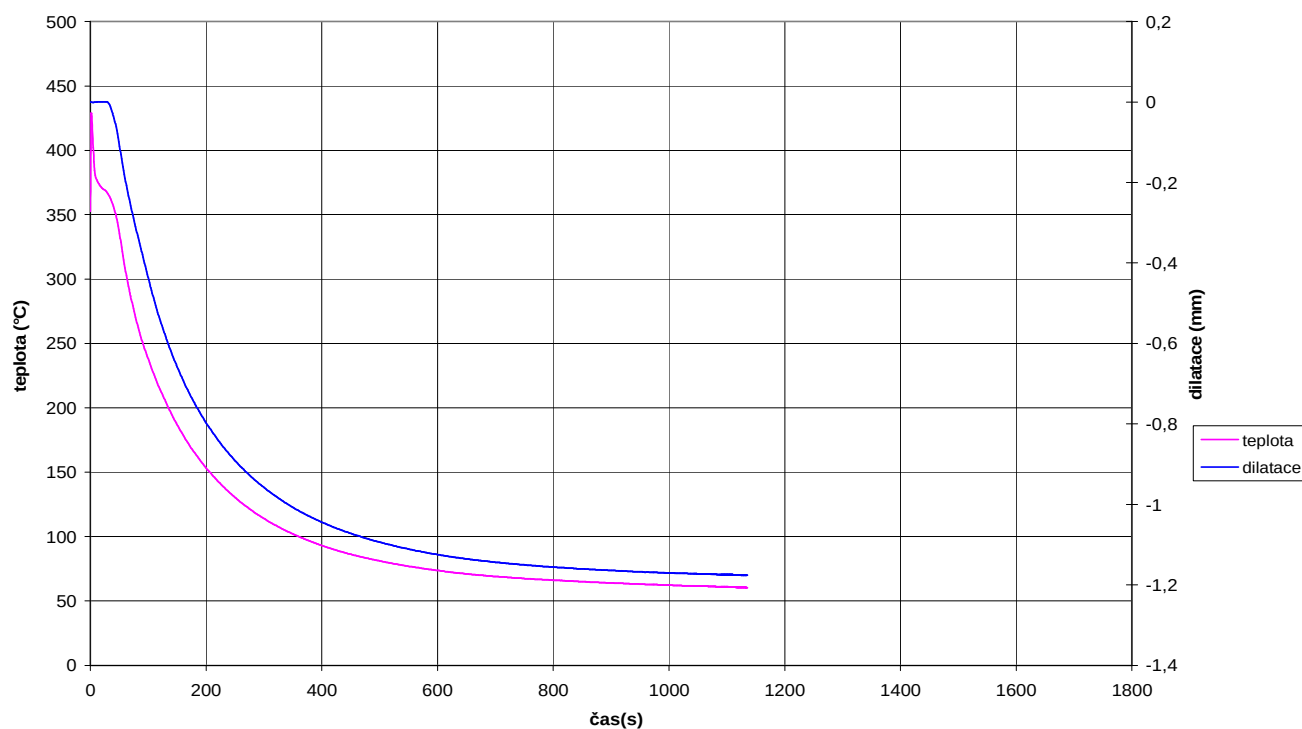
Obr. 4-25 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „I“ délky 157 mm ze slitiny zinku (ZnAl4), odlévaného z teploty 450 °C do zúžených kovových příložek, měřeno dilatometrem polské koncepce



Obr. 4-26 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „I“ délky 157 mm ze slitiny zinku (ZnAl4Cu1), odlévaného z teploty 450 °C do pryžových příložek, měřeno dilatometrem polské koncepce

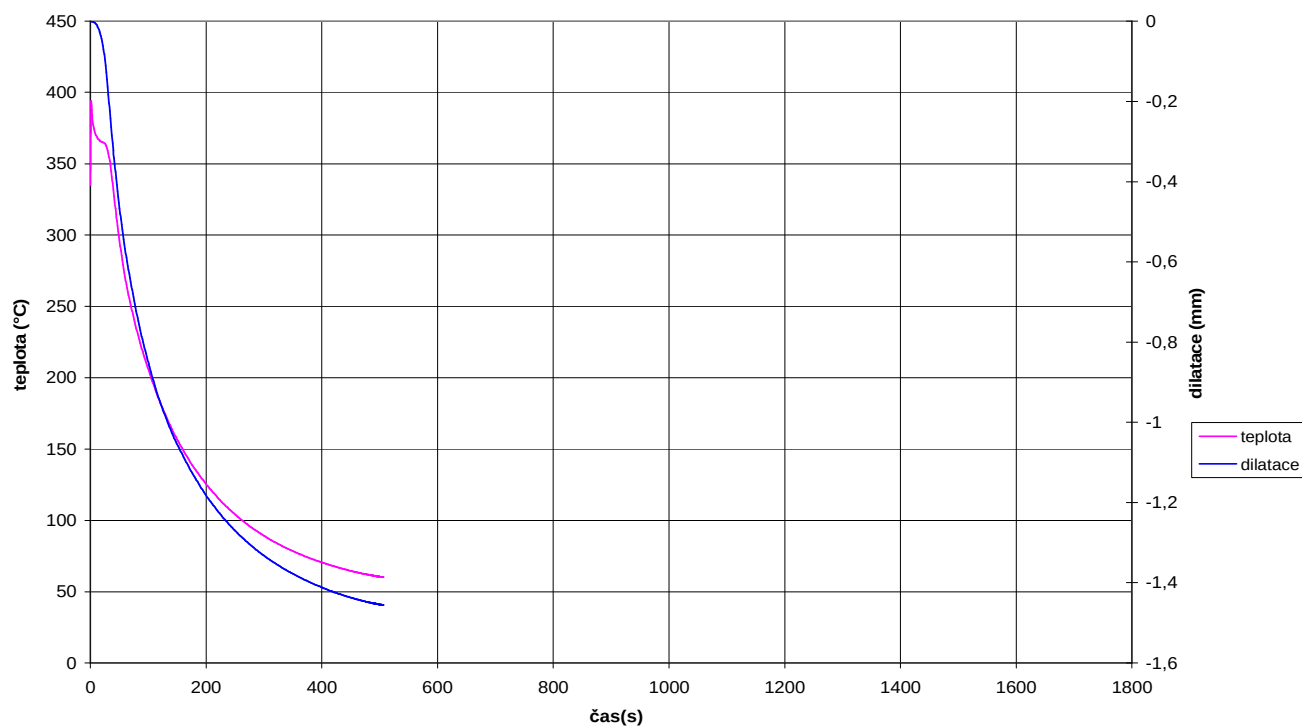


Obr. 4-27 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „I“ délky 157 mm ze slitiny zinku (ZnAl4Cu1), odlévaného z teploty 450 °C do kovových příložek, měřeno dilatometrem polské koncepce

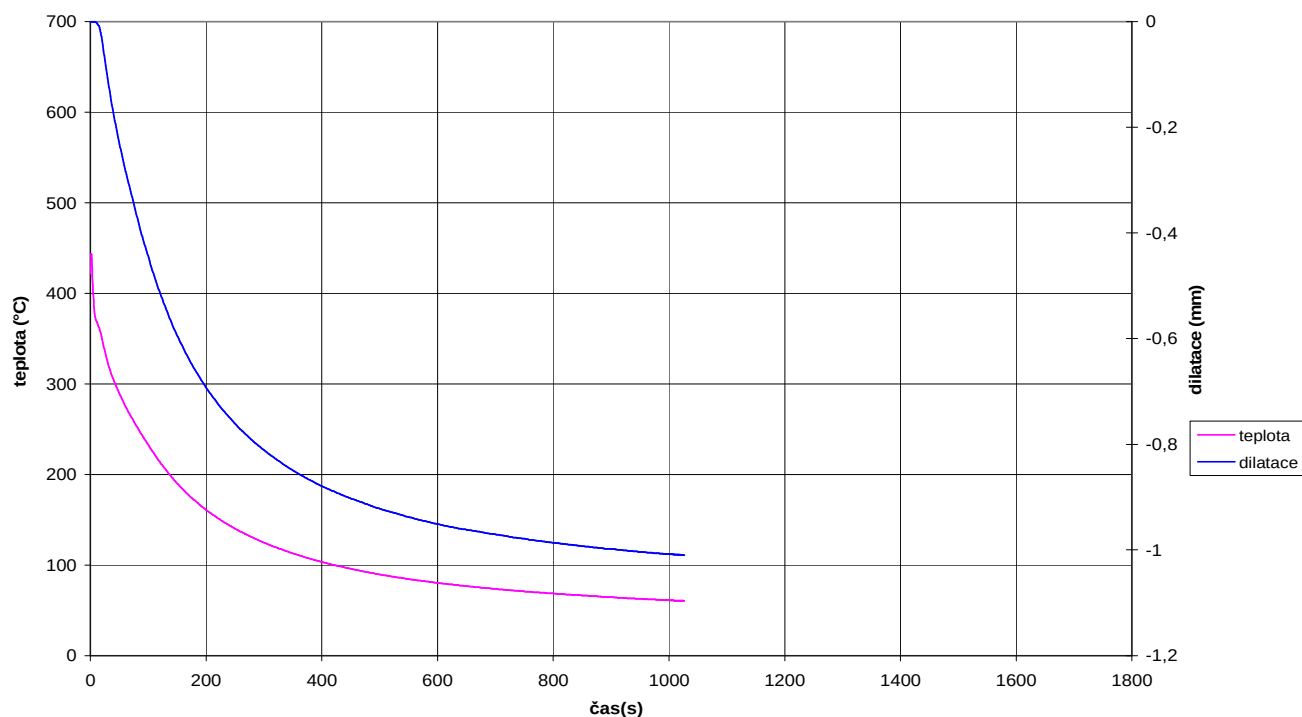


Obr. 4-28 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „I“ délky 157 mm ze slitiny zinku (ZnAl4Cu1), odlévaného z teploty 450 °C do pískových příložek, měřeno dilatometrem polské koncepce

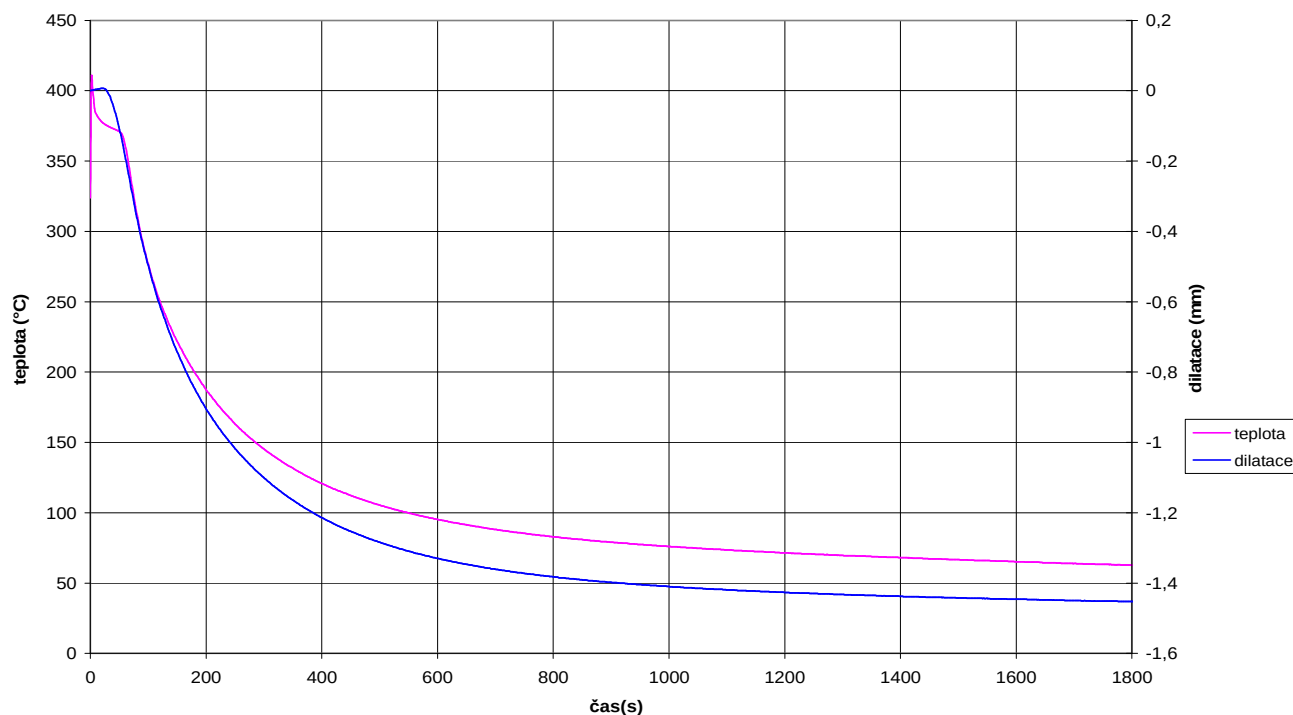




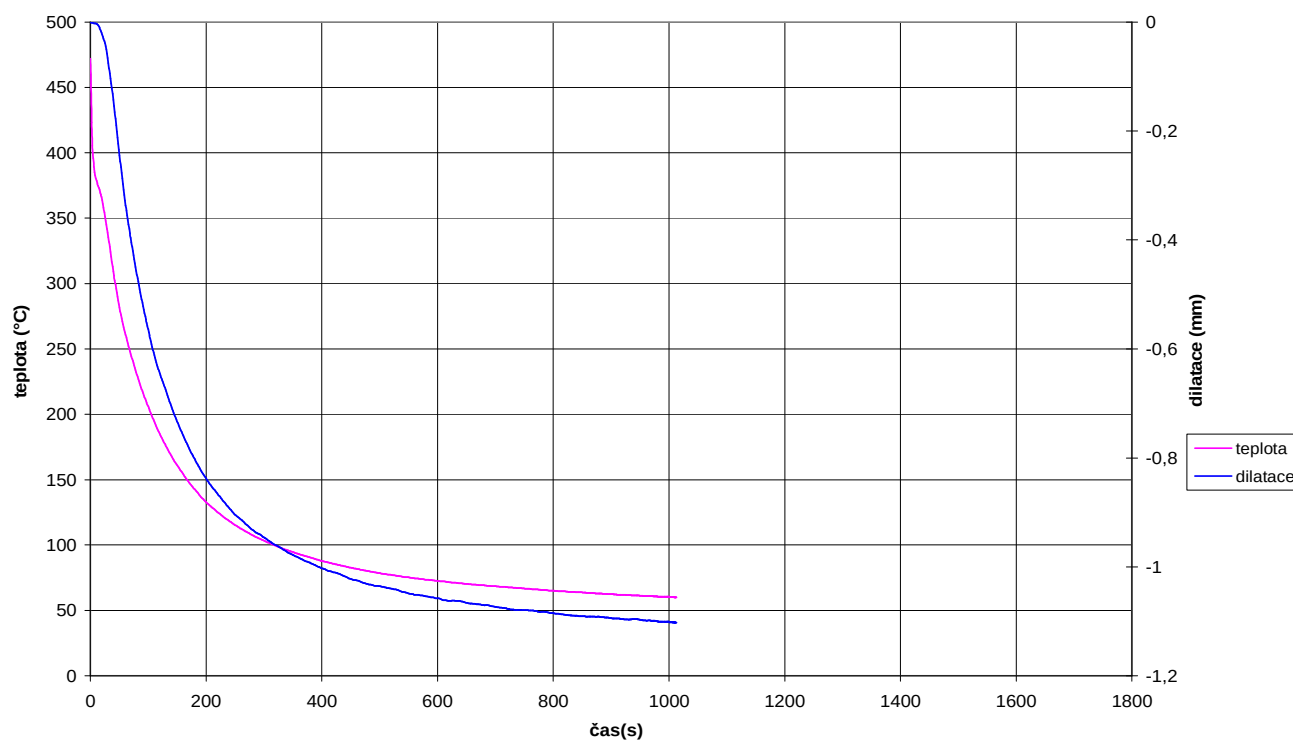
Obr. 4-29 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „I“ délky 157 mm ze slitiny zinku (ZnAl4Cu1), odlévaného z teploty 450 °C do kovových chlazených příložek, měřeno dilatometrem polské koncepce



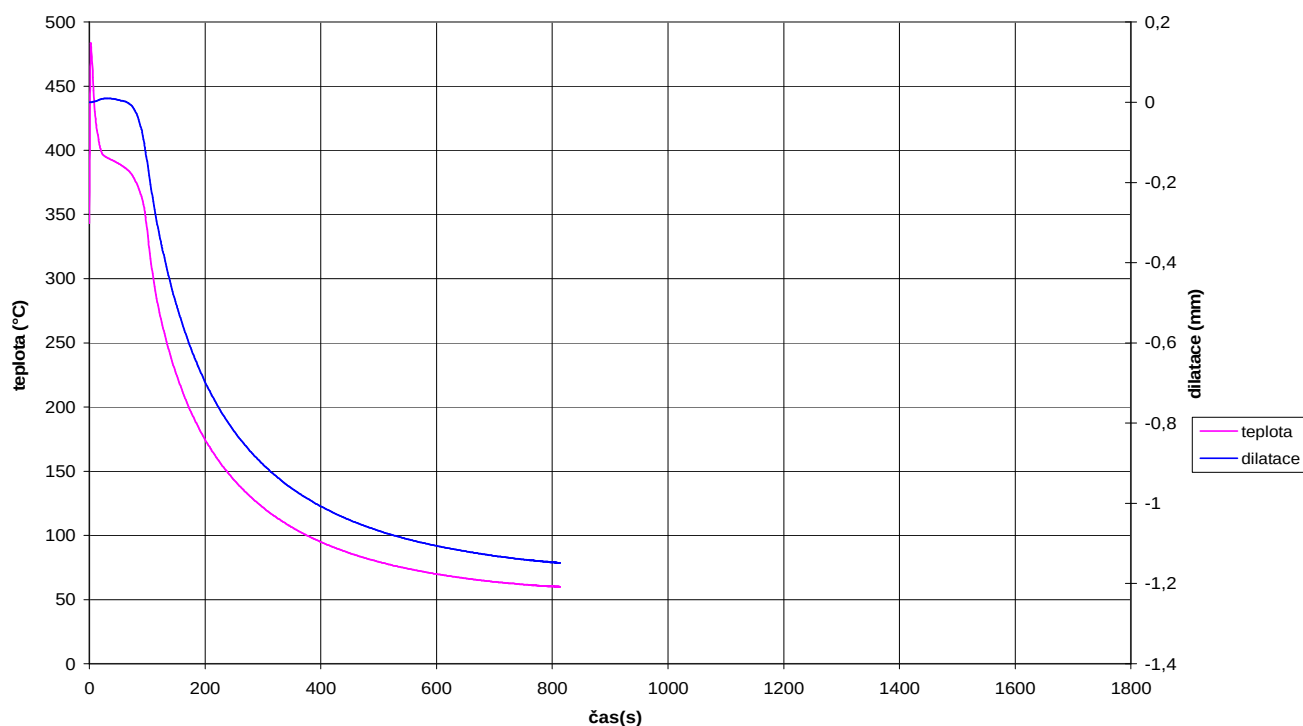
Obr. 4-30 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „I“ délky 157 mm ze slitiny zinku (ZnAl4Cu1), odlévaného z teploty 450 °C do zúžených kovových příložek, měřeno dilatometrem polské koncepce



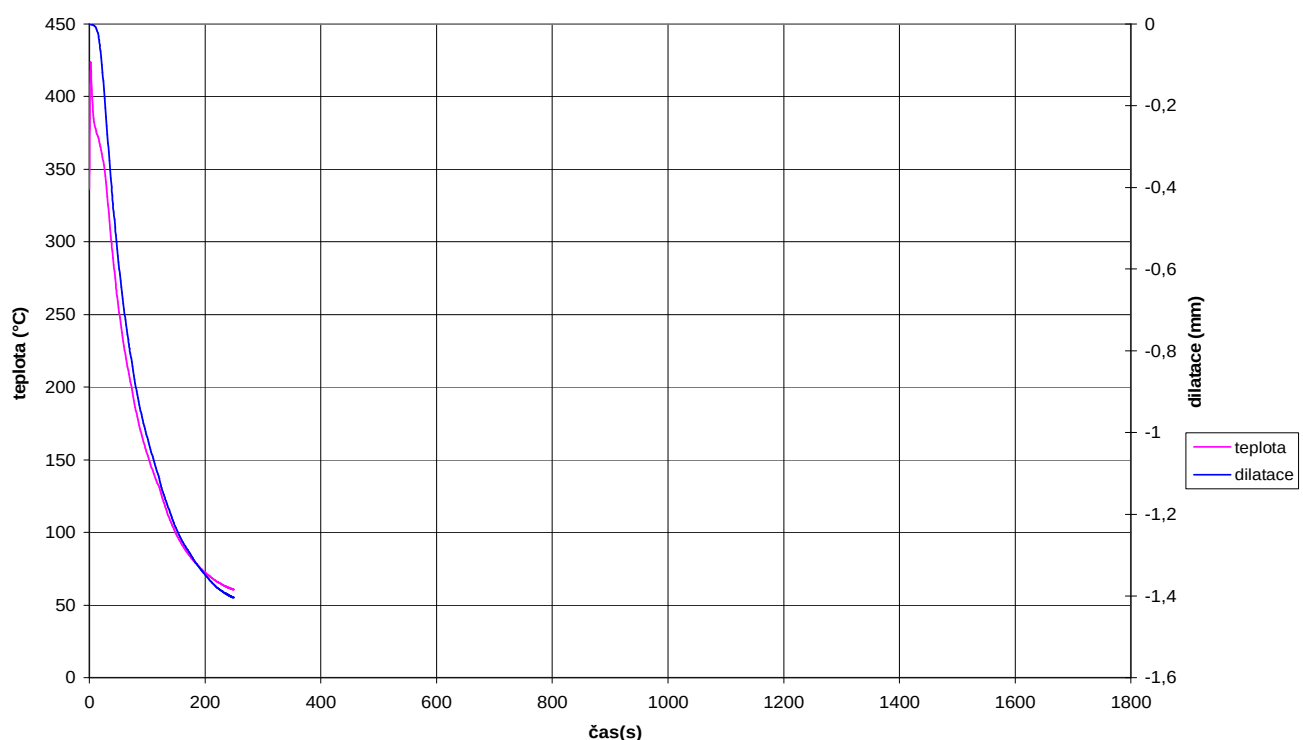
Obr. 4-31 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „I“ délky 157 mm ze slitiny zinku ( $\text{ZnAl}_4\text{Cu}_3$ ), odlévaného z teploty 450 °C do pryžových příložek, měřeno dilatometrem polské koncepce



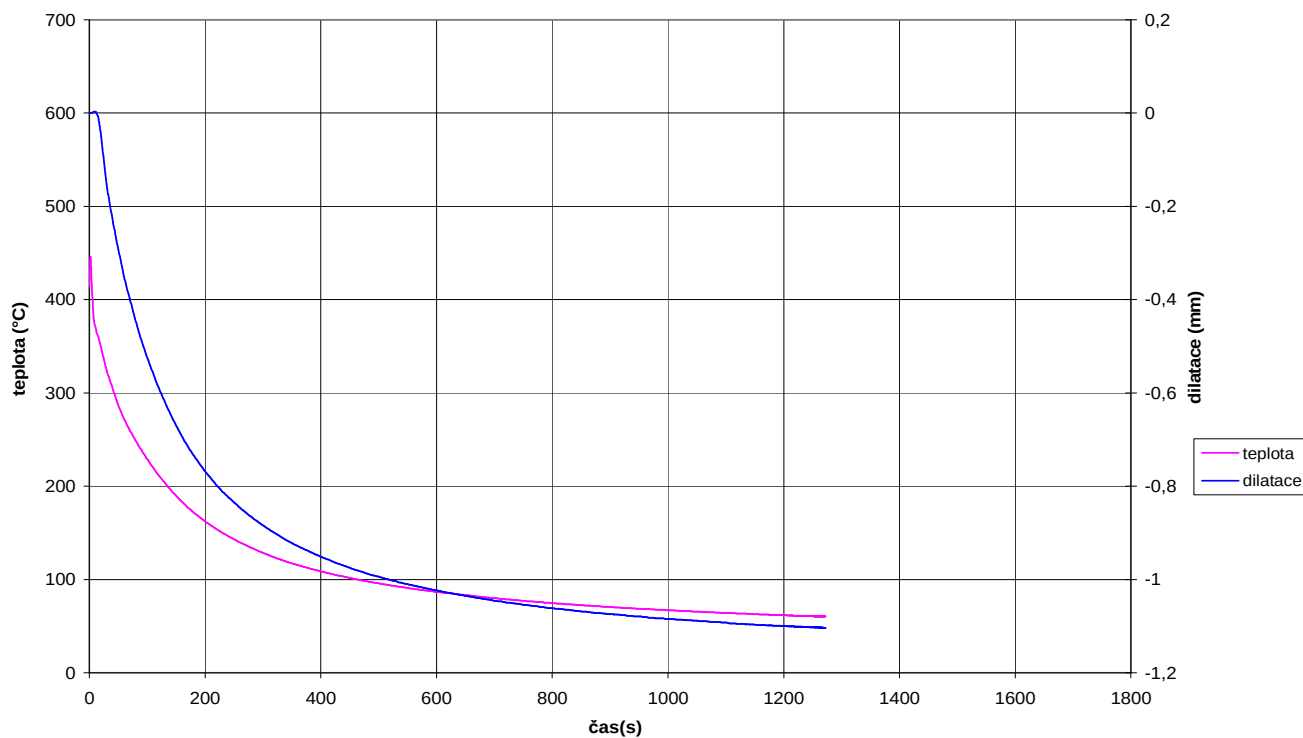
Obr. 4-32 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „I“ délky 157 mm ze slitiny zinku ( $\text{ZnAl}_4\text{Cu}_3$ ), odlévaného z teploty 450 °C do kovových příložek, měřeno dilatometrem polské koncepce



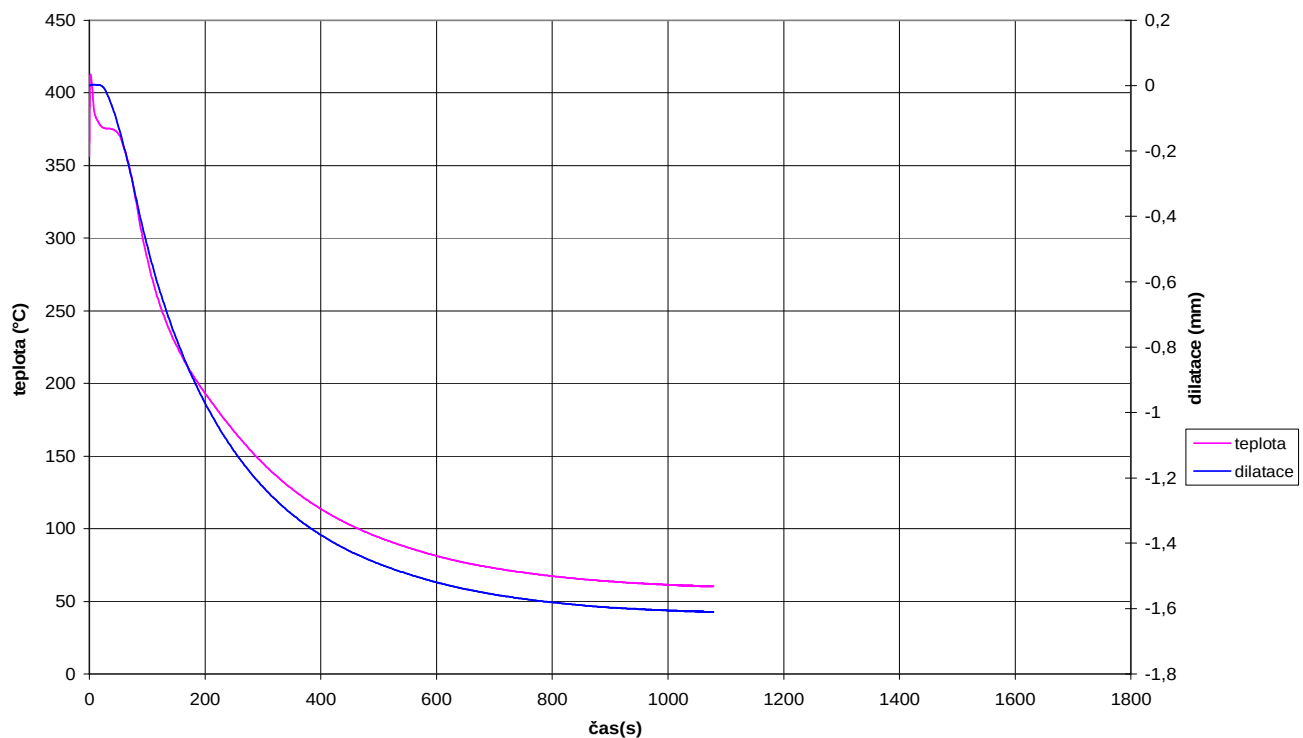
Obr. 4-33 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „I“ délky 157 mm ze slitiny zinku ( $\text{ZnAl}_4\text{Cu}_3$ ), odlévaného z teploty 450 °C do pískových příložek, měřeno dilatometrem polské koncepce



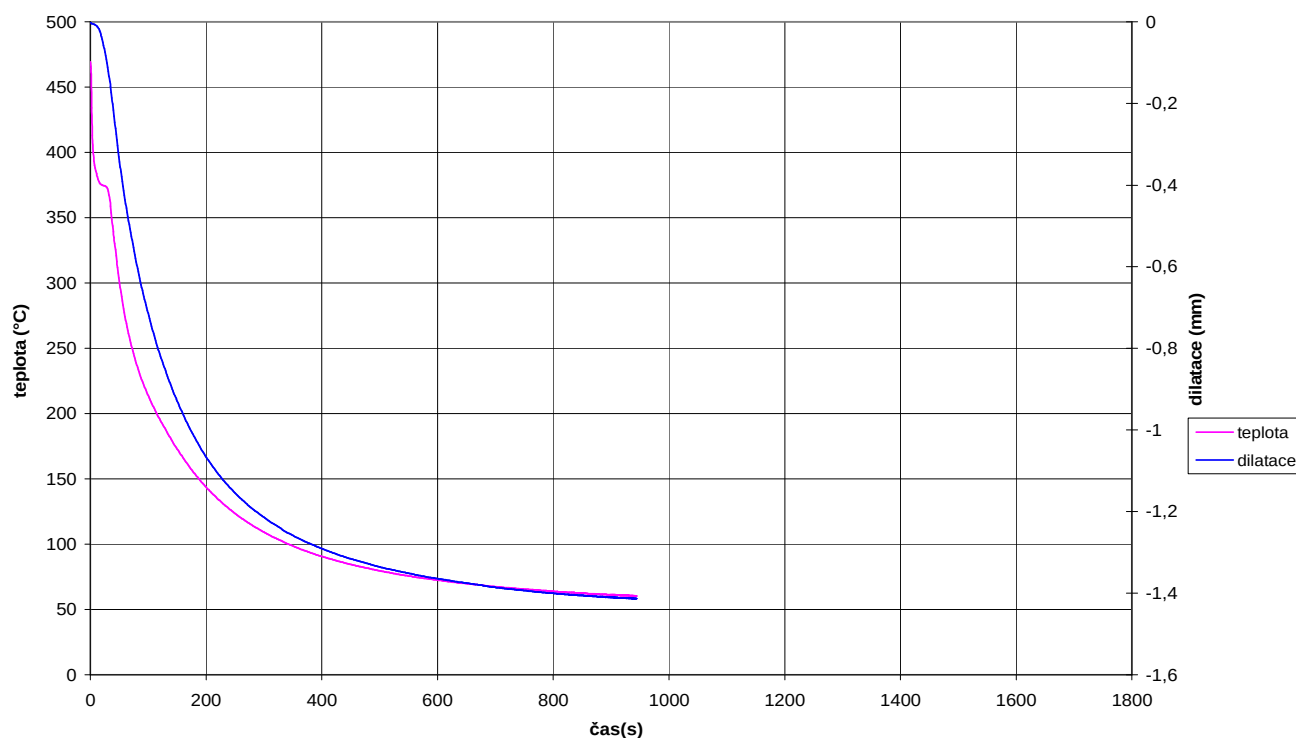
Obr. 4-34 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „I“ délky 157 mm ze slitiny zinku ( $\text{ZnAl}_4\text{Cu}_3$ ), odlévaného z teploty 450 °C do kovových chlazených příložek, měřeno dilatometrem polské koncepce



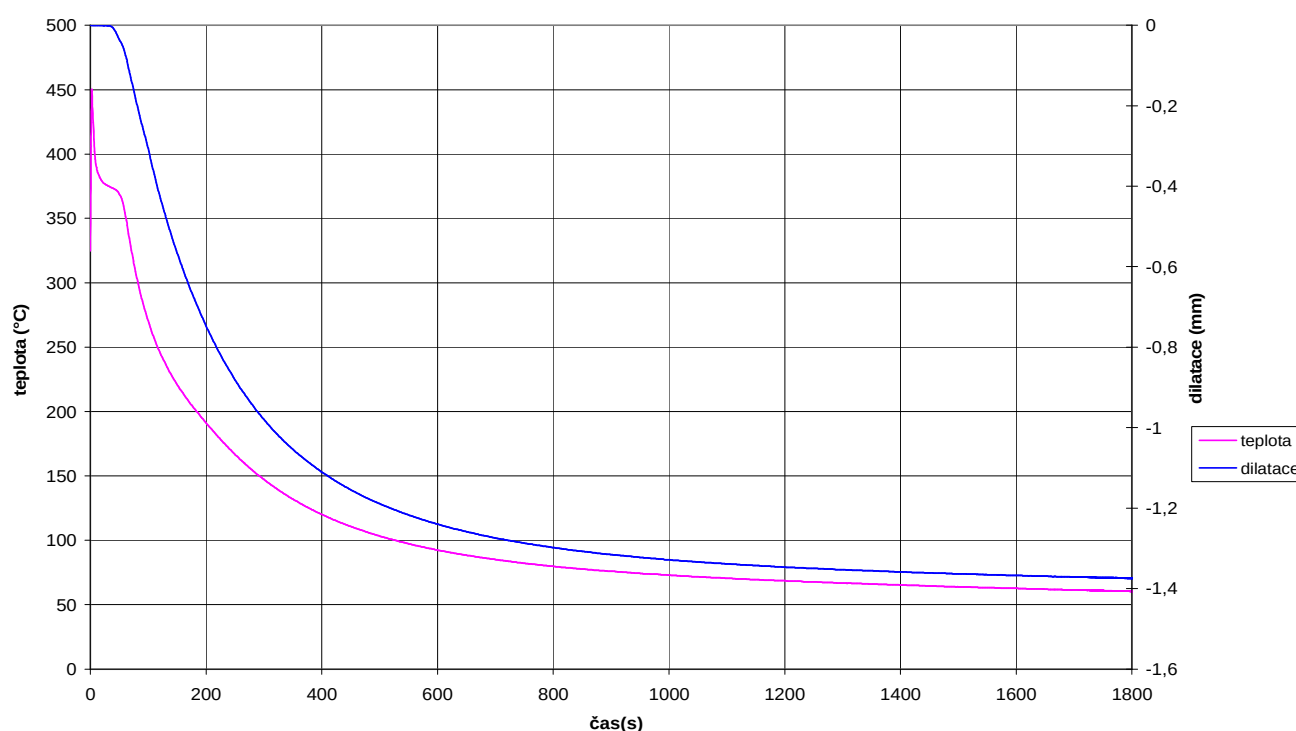
Obr. 4-35 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „I“ délky 157 mm ze slitiny zinku (ZnAl4Cu3), odlévaného z teploty 450 °C do zúžených kovových příložek, měřeno dilatometrem polské koncepce



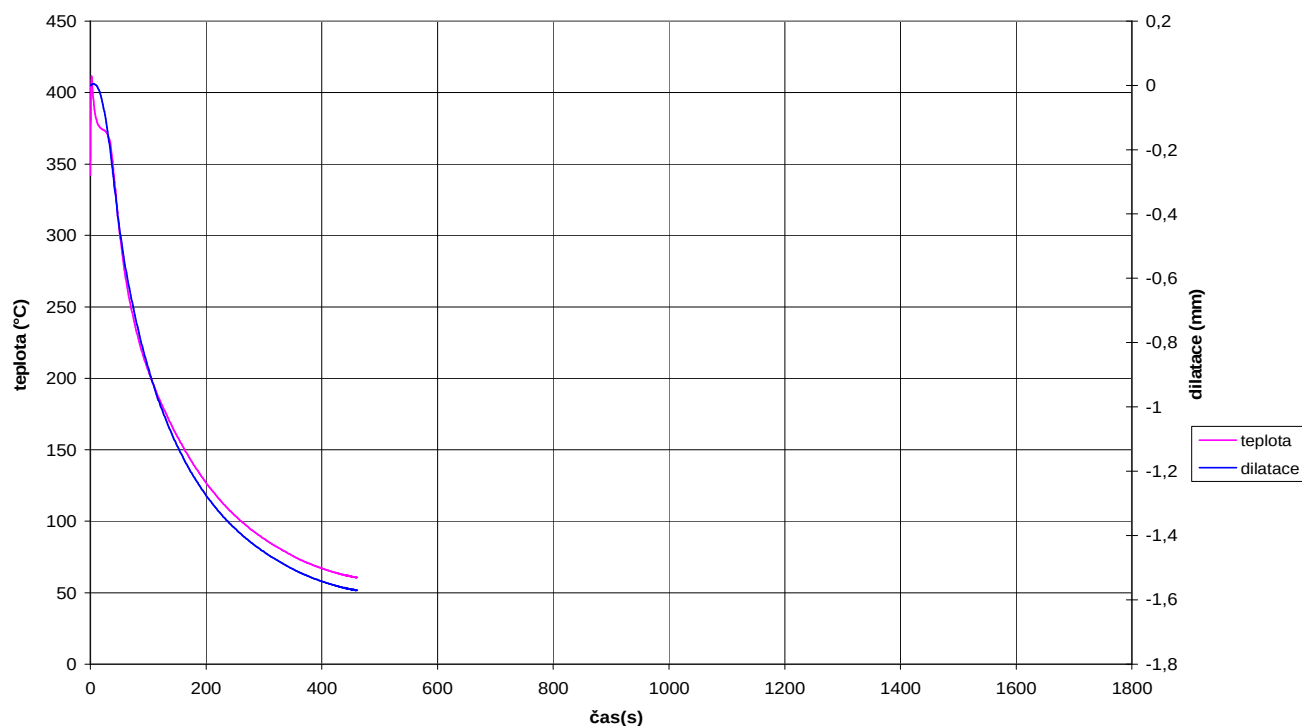
Obr. 4-36 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „I“ délky 157 mm ze slitiny zinku (ZnAl8Cu1), odlévaného z teploty 450 °C do pryžových příložek, měřeno dilatometrem polské koncepce



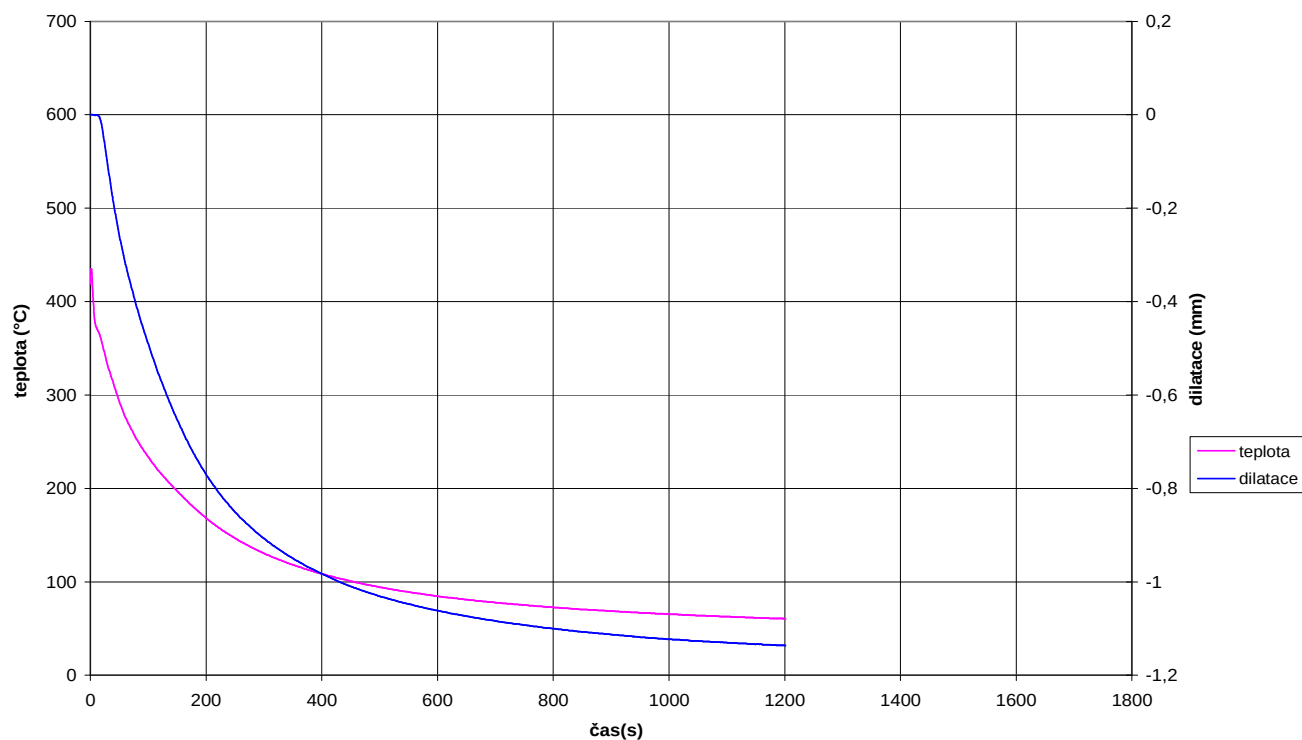
Obr. 4-37 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „I“ délky 157 mm ze slitiny zinku (ZnAl8Cu1), odlévaného z teploty 450 °C do kovových příložek, měřeno dilatometrem polské koncepce



Obr. 4-38 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „I“ délky 157 mm ze slitiny zinku (ZnAl8Cu1), odlévaného z teploty 450 °C do pískových příložek, měřeno dilatometrem polské koncepce



Obr. 4-39 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „I“ délky 157 mm ze slitiny zinku (ZnAl8Cu1), odlévaného z teploty 450 °C do kovových chlazených příložek, měřeno dilatometrem polské koncepce



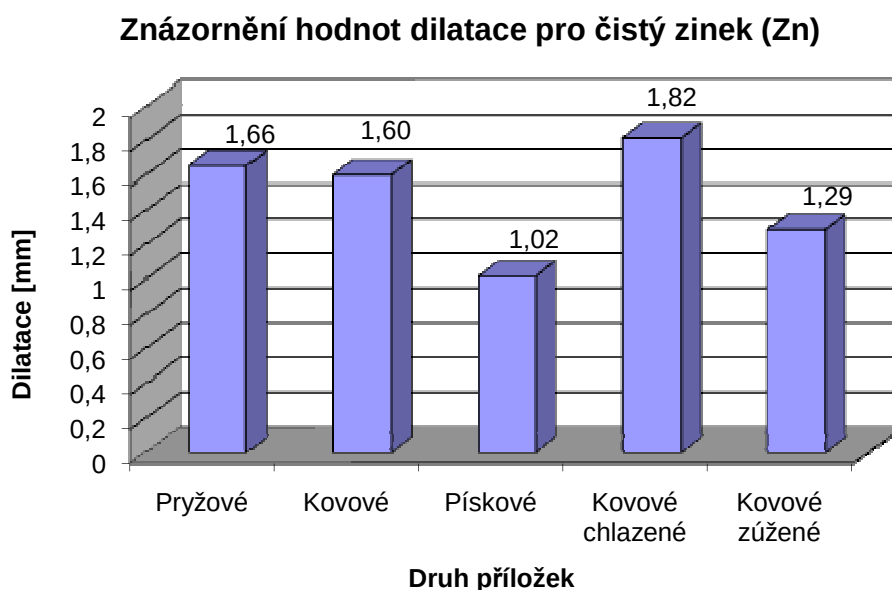
Obr. 4-40 Časové závislosti teploty a změny rozměru odlitku tvaru „I“ délky 157 mm ze slitiny zinku (ZnAl8Cu1), odlévaného z teploty 450 °C do zúžených kovových příložek, měřeno dilatometrem polské koncepce

### A. Hodnocení měření dilatace

Výsledné dilatace pro čistý zinek a jeho slitiny jsou uvedeny v následujících tabulkách. V tabulce 4.3 jsou zobrazeny výsledné hodnoty dilatace čistého zinku (Zn). V tabulce 4.4 jsou zobrazeny výsledné hodnoty dilatace slitiny zinku ZnAl4 (400). V tabulce 4.5 jsou zobrazeny výsledné hodnoty dilatace slitiny zinku ZnAl4Cu1 (410). V tabulce 4.6 jsou zobrazeny výsledné hodnoty dilatace slitiny zinku ZnAl4Cu3 (430). V tabulce 4.7 jsou zobrazeny výsledné hodnoty dilatace slitiny zinku ZnAl8Cu1 (810). Současně tyto hodnoty jsou zpracovány i do sloupcových grafů, viz obr. 4-43 až 4-47).

**Tabulka 4.3 Výsledné hodnoty dilatace pro čistý zinek (Zn)**

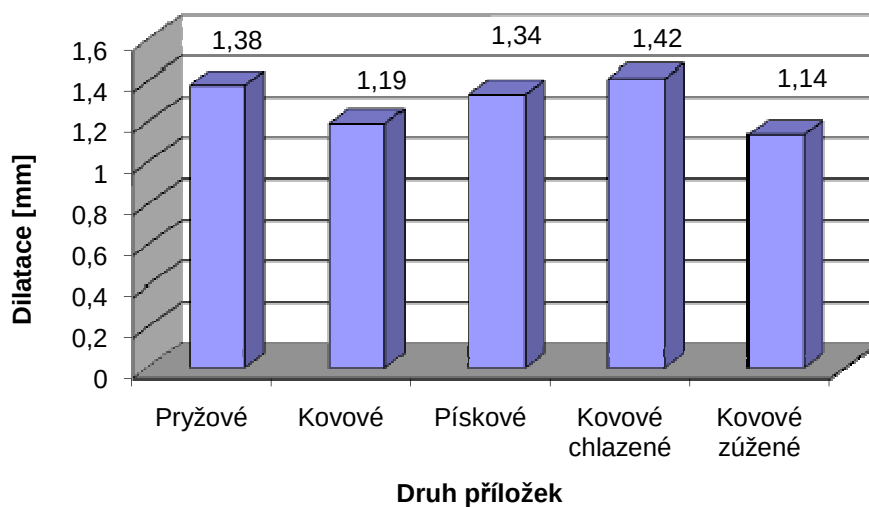
| Výsledné hodnoty měření vyjádřené z grafických závislostí obr. 4-17 až 4-21 pro porovnání hodnot dilatace u čistého zinku Zn |         |        |         |                 |               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|--------|---------|-----------------|---------------|
| Příložky                                                                                                                     | Přýžové | Kovové | Pískové | Kovové chlazené | Kovové zúžené |
| Dilatace [mm]                                                                                                                | 1,66    | 1,60   | 1,02    | 1,82            | 1,29          |



Obr. 4-41 Znázornění hodnot dilatace pro čistý zinek (Zn)

**Tabulka 4.4 Výsledné hodnoty dilatace pro slitinu zinku ZnAl4 (400)**

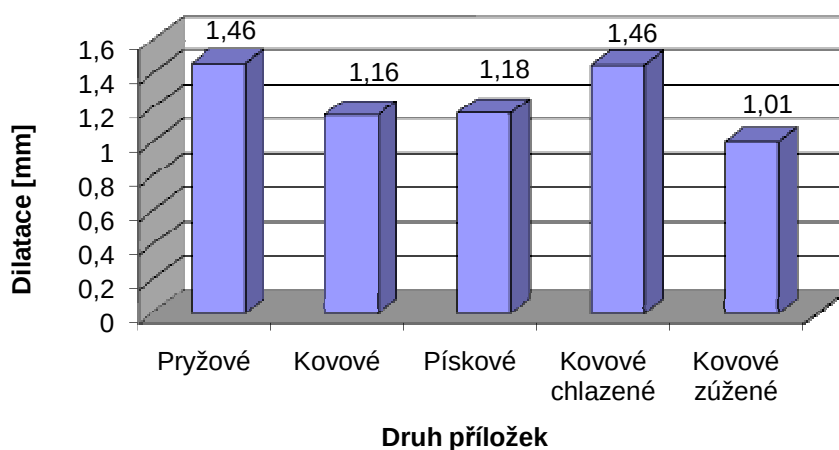
| Výsledné hodnoty měření vyjádřené z grafických závislostí obr. 4-22 až 4-26 pro porovnání hodnot dilatace slitiny zinku ZnAl4 (400) |         |        |         |                 |               |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|--------|---------|-----------------|---------------|
| Příložky                                                                                                                            | Přýžové | Kovové | Pískové | Kovové chlazené | Kovové zúžené |
| Dilatace [mm]                                                                                                                       | 1,38    | 1,19   | 1,34    | 1,42            | 1,14          |

**Znázornění hodnot dilatace pro slitinu zinku (ZnAl4)**


Obr. 4-42 Znázornění hodnot dilatace pro slitinu zinku ZnAl4 (400)

**Tabulka 4.5 Výsledné hodnoty dilatace pro slitinu zinku ZnAl4Cu1 (410)**

| Výsledné hodnoty měření vyjádřené z grafických závislostí obr. 4-27 až 4-31 pro porovnání hodnot dilatace slitiny zinku ZnAl4Cu1 (410) |         |        |         |                 |               |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|--------|---------|-----------------|---------------|
| Příložky                                                                                                                               | Pryžové | Kovové | Pískové | Kovové chlazené | Kovové zúžené |
| Dilatace [mm]                                                                                                                          | 1,46    | 1,16   | 1,18    | 1,46            | 1,01          |

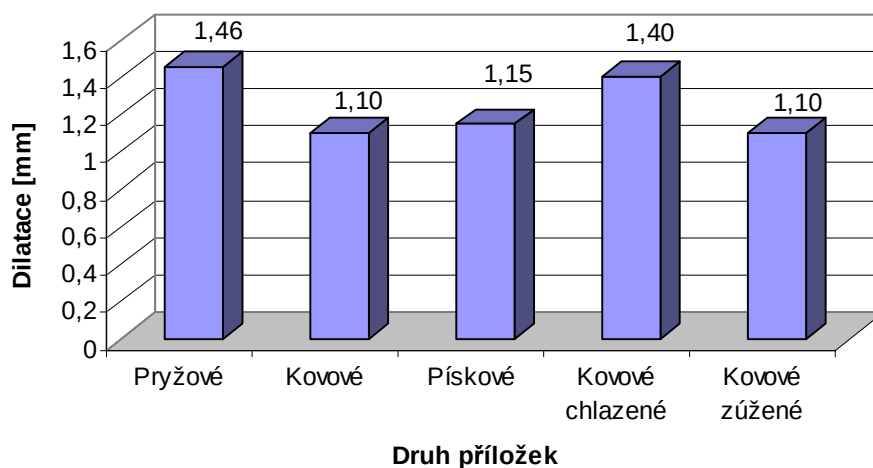
**Znázornění hodnot dilatace pro slitinu zinku (ZnAl4Cu1)**


Obr. 4-43 Znázornění hodnot dilatace pro slitinu zinku ZnAl4Cu1 (410)



**Tabulka 4.6 Výsledné hodnoty dilatace pro slitinu zinku ZnAl4Cu3 (430)**

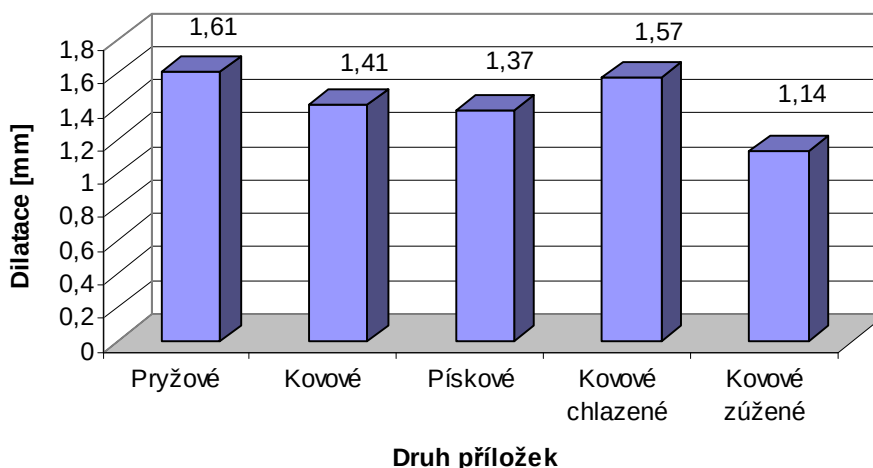
| Výsledné hodnoty měření vyjádřené z grafických závislostí obr. 4-32 až 4-36 pro porovnání hodnot dilatace slitiny zinku ZnAl4Cu3 (430) |         |        |         |                 |               |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|--------|---------|-----------------|---------------|
| Příložky                                                                                                                               | Přýžové | Kovové | Pískové | Kovové chlazené | Kovové zúžené |
| Dilatace [mm]                                                                                                                          | 1,46    | 1,10   | 1,15    | 1,40            | 1,10          |

**Znázornění hodnot dilatace pro slitinu zinku (ZnAl4Cu3)**


Obr. 4-44 Znázornění hodnot dilatace pro slitinu zinku ZnAl4Cu3 (430)

**Tabulka 4.7 Výsledné hodnoty dilatace pro slitinu zinku ZnAl8Cu1 (810)**

| Výsledné hodnoty měření vyjádřené z grafických závislostí obr. 4-37 až 4-41 pro porovnání hodnot dilatace slitiny zinku ZnAl8Cu1 (810) |         |        |         |                 |               |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|--------|---------|-----------------|---------------|
| Příložky                                                                                                                               | Přýžové | Kovové | Pískové | Kovové chlazené | Kovové zúžené |
| Dilatace [mm]                                                                                                                          | 1,61    | 1,41   | 1,37    | 1,57            | 1,14          |

**Znázornění hodnot dilatace pro slitinu zinku (ZnAl8Cu1)**


Obr. 4-45 Znázornění hodnot dilatace pro slitinu zinku ZnAl8Cu1 (810)

## **B. Vypočítané hodnoty součinitele teplotní smrštivosti**

Vypočítané hodnoty součinitelů teplotní smrštivosti odlitku ( $\alpha$ ), dle vztahu (4.1) jsou pro jednotlivé experimenty, viz obr. 4-16 až 4-40, uvedeny v tabulkách 4.8 až 4.33.

V tabulce 4.8 je vypočítán součinitel teplotní smrštivosti (roztažnosti) pro čistý zinek (Zn) odléváný do pryžových přílozek. V tabulce 4.9 je vypočítán součinitel teplotní smrštivosti (roztažnosti) pro čistý zinek (Zn) odléváný do kovových přílozek. V tabulce 4.10 je vypočítán součinitel teplotní smrštivosti (roztažnosti) pro čistý zinek (Zn) odléváný do pískových přílozek. V tabulce 4.11 je vypočítán součinitel teplotní smrštivosti (roztažnosti) pro čistý zinek (Zn) odléváný do kovových chlazených přílozek. V tabulce 4.12 je vypočítán součinitel teplotní smrštivosti (roztažnosti) pro čistý zinek (Zn) odléváný do zúžených kovových přílozek. V tabulce 4.13 je vypočítán součinitel teplotní smrštivosti (roztažnosti) pro slitinu zinku (ZnAl4) odléváný do pryžových přílozek. V tabulce 4.14 je vypočítán součinitel teplotní smrštivosti (roztažnosti) pro slitinu zinku (ZnAl4) odléváný do kovových přílozek. V tabulce 4.15 je vypočítán součinitel teplotní smrštivosti (roztažnosti) pro slitinu zinku (ZnAl4) odléváný do pískových přílozek. V tabulce 4.16 je vypočítán součinitel teplotní smrštivosti (roztažnosti) pro slitinu zinku (ZnAl4) odléváný do kovových chlazených přílozek. V tabulce 4.17 je vypočítán součinitel teplotní smrštivosti (roztažnosti) pro slitinu zinku (ZnAl4) odléváný do zúžených kovových přílozek. V tabulce 4.18 je vypočítán součinitel teplotní smrštivosti (roztažnosti) pro slitinu zinku (ZnAl4Cu1) odléváný do pryžových přílozek. V tabulce 4.19 je vypočítán součinitel teplotní smrštivosti (roztažnosti) pro slitinu zinku (ZnAl4Cu1) odléváný do kovových přílozek. V tabulce 4.20 je vypočítán součinitel teplotní smrštivosti (roztažnosti) pro slitinu zinku (ZnAl4Cu1) odléváný do pískových přílozek. V tabulce 4.21 je vypočítán součinitel teplotní smrštivosti (roztažnosti) pro slitinu zinku (ZnAl4Cu1) odléváný do kovových chlazených přílozek. V tabulce 4.22 je vypočítán součinitel teplotní smrštivosti (roztažnosti) pro slitinu zinku (ZnAl4Cu1) odléváný do zúžených kovových přílozek. V tabulce 4.23 je vypočítán součinitel teplotní smrštivosti (roztažnosti) pro slitinu zinku (ZnAl4Cu3) odléváný do pryžových přílozek. V tabulce 4.24 je vypočítán součinitel teplotní smrštivosti (roztažnosti) pro slitinu zinku (ZnAl4Cu3) odléváný do kovových přílozek. V tabulce 4.25 je vypočítán součinitel teplotní smrštivosti (roztažnosti) pro slitinu zinku (ZnAl4Cu3) odléváný do pískových přílozek. V tabulce 4.26 je vypočítán součinitel teplotní smrštivosti (roztažnosti) pro slitinu zinku (ZnAl4Cu3) odléváný do kovových chlazených přílozek. V tabulce 4.27 je vypočítán součinitel teplotní smrštivosti (roztažnosti) pro slitinu zinku (ZnAl4Cu3) odléváný do zúžených kovových přílozek.

V tabulce 4.28 je vypočítán součinitel teplotní smrštivosti (roztažnosti) pro slitinu zinku (ZnAl8Cu1) odlévaný do pryžových přílozek. V tabulce 4.29 je vypočítán součinitel teplotní smrštivosti (roztažnosti) pro slitinu zinku (ZnAl8Cu1) odlévaný do kovových přílozek. V tabulce 4.30 je vypočítán součinitel teplotní smrštivosti (roztažnosti) pro slitinu zinku (ZnAl8Cu1) odlévaný do pískových přílozek. V tabulce 4.31 je vypočítán součinitel teplotní smrštivosti (roztažnosti) pro slitinu zinku (ZnAl8Cu1) odlévaný do kovových chlazených přílozek. V tabulce 4.32 je vypočítán součinitel teplotní smrštivosti (roztažnosti) pro slitinu zinku (ZnAl8Cu1) odlévaný do zúžených kovových přílozek.

**Tab. 4.8 Součinitel teplotní smrštivosti  $\alpha$  pro čistý zinek ( Zn ) – pryžové příločky**

| Číslo měření | Rozsah teplot [°C] | Dilatace u daných teplot [mm] | Součinitel teplotní roztažnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ] |
|--------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1            | 450 až 400         | -0,00018                      | $2,29 \cdot 10^{-8}$                                        |
| 2            | 400 až 350         | -0,21996                      | $2,80 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 3            | 350 až 300         | -0,42948                      | $5,47 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 4            | 300 až 250         | -0,62234                      | $7,93 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 5            | 250 až 200         | -0,82604                      | $10,52 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 6            | 200 až 150         | -1,03920                      | $13,24 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 7            | 150 až 100         | -1,26487                      | $16,11 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 8            | 100 až 50          | -1,48938                      | $18,97 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 9            | 450 až 50          | -0,82739                      | $10,54 \cdot 10^{-5}$                                       |

**Tab. 4.9 Součinitel teplotní smrštivosti  $\alpha$  pro čistý zinek ( Zn ) – kovové příločky**

| Číslo měření | Rozsah teplot [°C] | Dilatace u daných teplot [mm] | Součinitel teplotní roztažnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ] |
|--------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1            | 450 až 400         | -0,00004                      | $5,10 \cdot 10^{-9}$                                        |
| 2            | 400 až 350         | -0,12478                      | $1,59 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 3            | 350 až 300         | -0,32544                      | $4,15 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 4            | 300 až 250         | -0,53758                      | $6,85 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 5            | 250 až 200         | -0,74227                      | $9,46 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 6            | 200 až 150         | -0,94856                      | $12,08 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 7            | 150 až 100         | -1,17875                      | $15,02 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 8            | 100 až 50          | -1,41849                      | $18,07 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 9            | 450 až 50          | -0,80028                      | $10,19 \cdot 10^{-5}$                                       |

**Tab. 4.10 Součinitel teplotní smrštivosti  $\alpha$  pro čistý zinek ( Zn ) – pískové příložky**

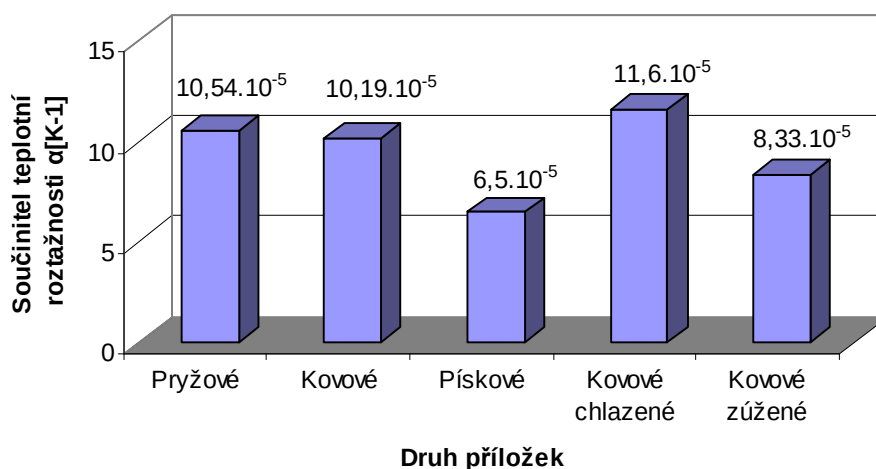
| Číslo měření | Rozsah teplot [°C] | Dilatace u daných teplot [mm] | Součinitel teplotní roztažnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ] |
|--------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1            | 450 až 400         | -0,00414                      | $5,10 \cdot 10^{-7}$                                        |
| 2            | 400 až 350         | -0,02224                      | $2,83 \cdot 10^{-6}$                                        |
| 3            | 350 až 300         | -0,12092                      | $1,54 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 4            | 300 až 250         | -0,21272                      | $2,71 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 5            | 250 až 200         | -0,33807                      | $4,31 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 6            | 200 až 150         | -0,49902                      | $6,36 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 7            | 150 až 100         | -0,67018                      | $8,54 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 8            | 100 až 50          | -0,860265                     | $10,96 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 9            | 450 až 50          | -0,510511                     | $6,50 \cdot 10^{-5}$                                        |

**Tab. 4.11 Součinitel teplotní smrštivosti  $\alpha$  pro čistý zinek ( Zn ) – kovové chlazené příložky**

| Číslo měření | Rozsah teplot [°C] | Dilatace u daných teplot [mm] | Součinitel teplotní roztažnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ] |
|--------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1            | 450 až 400         | -0,00248                      | $3,16 \cdot 10^{-7}$                                        |
| 2            | 400 až 350         | -0,19202                      | $2,45 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 3            | 350 až 300         | -0,47606                      | $6,06 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 4            | 300 až 250         | -0,69458                      | $8,85 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 5            | 250 až 200         | -0,91652                      | $11,68 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 6            | 200 až 150         | -1,14371                      | $14,57 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 7            | 150 až 100         | -1,37894                      | $17,57 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 8            | 100 až 50          | -1,61965                      | $20,63 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 9            | 450 až 50          | -0,91046                      | $11,60 \cdot 10^{-5}$                                       |

**Tab. 4.12 Součinitel teplotní smrštivosti  $\alpha$  pro čistý zinek ( Zn ) – zúžené kovové příložky**

| Číslo měření | Rozsah teplot [°C] | Dilatace u daných teplot [mm] | Součinitel teplotní roztažnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ] |
|--------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1            | 450 až 400         | -0,01838                      | $2,34 \cdot 10^{-6}$                                        |
| 2            | 400 až 350         | -0,03262                      | $4,16 \cdot 10^{-6}$                                        |
| 3            | 350 až 300         | -0,18681                      | $2,38 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 4            | 300 až 250         | -0,38362                      | $4,89 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 5            | 250 až 200         | -0,55482                      | $7,07 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 6            | 200 až 150         | -0,73843                      | $9,41 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 7            | 150 až 100         | -0,93254                      | $11,88 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 8            | 100 až 50          | -1,14388                      | $14,57 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 9            | 450 až 50          | -0,65367                      | $8,33 \cdot 10^{-5}$                                        |



Obr. 4-46 Znázornění hodnot součinitele teplotní smrštivosti  $\alpha$  z tabulek 4.8 až 4.12 pro čistý zinek při teplotě 450°C až 50°C se všemi použitými příložkami

Tab. 4.13 Součinitel teplotní smrštivosti  $\alpha$  pro slitinu zinku ( ZnAl4 )– pryžové příložky

| Číslo měření | Rozsah teplot [°C] | Dilatace u daných teplot [mm] | Součinitel teplotní roztažnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ] |
|--------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1            | 450 až 400         | -0,00082                      | $1,04 \cdot 10^{-7}$                                        |
| 2            | 400 až 350         | -0,00268                      | $3,41 \cdot 10^{-7}$                                        |
| 3            | 350 až 300         | -0,20472                      | $2,61 \cdot 10^{-6}$                                        |
| 4            | 300 až 250         | -0,37161                      | $4,73 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 5            | 250 až 200         | -0,55566                      | $7,08 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 6            | 200 až 150         | -0,77864                      | $9,92 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 7            | 150 až 100         | -0,99979                      | $12,74 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 8            | 100 až 50          | -1,22172                      | $15,56 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 9            | 450 až 50          | -0,69048                      | $8,80 \cdot 10^{-5}$                                        |

Tab. 4.14 Součinitel teplotní smrštivosti  $\alpha$  pro slitinu zinku ( ZnAl4 )– kovové příložky

| Číslo měření | Rozsah teplot [°C] | Dilatace u daných teplot [mm] | Součinitel teplotní roztažnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ] |
|--------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1            | 450 až 400         | -0,00122                      | $1,55 \cdot 10^{-7}$                                        |
| 2            | 400 až 350         | -0,00224                      | $2,85 \cdot 10^{-7}$                                        |
| 3            | 350 až 300         | -0,10048                      | $1,28 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 4            | 300 až 250         | -0,23658                      | $3,01 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 5            | 250 až 200         | -0,42162                      | $5,37 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 6            | 200 až 150         | -0,64315                      | $8,19 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 7            | 150 až 100         | -0,84786                      | $10,80 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 8            | 100 až 50          | -1,04329                      | $13,29 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 9            | 450 až 50          | -0,59764                      | $7,61 \cdot 10^{-5}$                                        |

**Tab. 4.15 Součinitel teplotní smrštivosti  $\alpha$  pro slitinu zinku ( ZnAl4 )– pískové příložky**

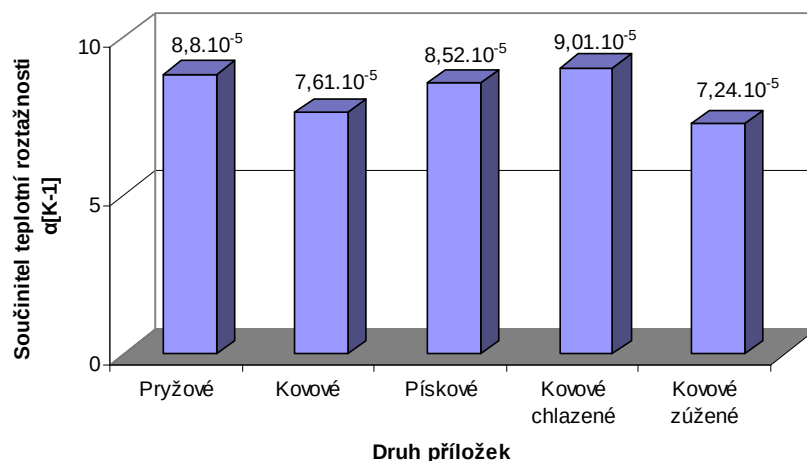
| Číslo měření | Rozsah teplot [°C] | Dilatace u daných teplot [mm] | Součinitel teplotní roztažnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ] |
|--------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1            | 450 až 400         | -0,00048                      | 16,11.10 <sup>-8</sup>                                      |
| 2            | 400 až 350         | -0,00111                      | 1,40.10 <sup>-7</sup>                                       |
| 3            | 350 až 300         | -0,11976                      | 1,53.10 <sup>-5</sup>                                       |
| 4            | 300 až 250         | -0,29776                      | 3,79.10 <sup>-5</sup>                                       |
| 5            | 250 až 200         | -0,48538                      | 6,18.10 <sup>-5</sup>                                       |
| 6            | 200 až 150         | -0,71272                      | 9,08.10 <sup>-5</sup>                                       |
| 7            | 150 až 100         | -0,93798                      | 11,95.10 <sup>-5</sup>                                      |
| 8            | 100 až 50          | -1,16023                      | 14,78.10 <sup>-5</sup>                                      |
| 9            | 450 až 50          | -0,66853                      | 8,52.10 <sup>-5</sup>                                       |

**Tab. 4.16 Součinitel teplotní smrštivosti  $\alpha$  pro slitinu zinku ( ZnAl4 )– kovové chlazené příložky**

| Číslo měření | Rozsah teplot [°C] | Dilatace u daných teplot [mm] | Součinitel teplotní roztažnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ] |
|--------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1            | 450 až 400         | -0,00141                      | 1,78.10 <sup>-7</sup>                                       |
| 2            | 400 až 350         | -0,00288                      | 3,67.10 <sup>-7</sup>                                       |
| 3            | 350 až 300         | -0,18442                      | 2,35.10 <sup>-5</sup>                                       |
| 4            | 300 až 250         | -0,39968                      | 5,09.10 <sup>-5</sup>                                       |
| 5            | 250 až 200         | -0,59631                      | 7,60.10 <sup>-5</sup>                                       |
| 6            | 200 až 150         | -0,81641                      | 10,40.10 <sup>-5</sup>                                      |
| 7            | 150 až 100         | -1,03914                      | 13,24.10 <sup>-5</sup>                                      |
| 8            | 100 až 50          | -1,25186                      | 15,95.10 <sup>-5</sup>                                      |
| 9            | 450 až 50          | -0,70716                      | 9,01.10 <sup>-5</sup>                                       |

**Tab. 4.17 Součinitel teplotní smrštivosti  $\alpha$  pro slitinu zinku ( ZnAl4 )– zúžené kovové příložky**

| Číslo měření | Rozsah teplot [°C] | Dilatace u daných teplot [mm] | Součinitel teplotní roztažnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ] |
|--------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1            | 450 až 400         | -0,00188                      | 2,39.10 <sup>-7</sup>                                       |
| 2            | 400 až 350         | -0,00288                      | 3,67.10 <sup>-7</sup>                                       |
| 3            | 350 až 300         | -0,06042                      | 7,70.10 <sup>-6</sup>                                       |
| 4            | 300 až 250         | -0,30884                      | 3,93.10 <sup>-5</sup>                                       |
| 5            | 250 až 200         | -0,52476                      | 6,69.10 <sup>-5</sup>                                       |
| 6            | 200 až 150         | -0,71661                      | 9,13.10 <sup>-5</sup>                                       |
| 7            | 150 až 100         | -0,88698                      | 11,30.10 <sup>-5</sup>                                      |
| 8            | 100 až 50          | -1,04514                      | 13,31.10 <sup>-5</sup>                                      |
| 9            | 450 až 50          | -0,56856                      | 7,24.10 <sup>-5</sup>                                       |



Obr. 4-47 Znázornění hodnot součinitele teplotní smrštivosti  $\alpha$  z tabulek 4.13 až 4.17 pro slitinu zinku ZnAl4 (400) při teplotě 450°C až 50°C se všemi použitými příložkami

Tab. 4.18 Součinitel teplotní smrštivosti  $\alpha$  pro slitinu zinku (ZnAl4Cu1) – pryžové příložky

| Číslo měření | Rozsah teplot [°C] | Dilatace u daných teplot [mm] | Součinitel teplotní roztažnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ] |
|--------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1            | 450 až 400         | -0,00124                      | $1,58 \cdot 10^{-7}$                                        |
| 2            | 400 až 350         | -0,00252                      | $3,21 \cdot 10^{-7}$                                        |
| 3            | 350 až 300         | -0,22354                      | $2,85 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 4            | 300 až 250         | -0,40851                      | $5,20 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 5            | 250 až 200         | -0,61126                      | $7,79 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 6            | 200 až 150         | -0,84042                      | $10,71 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 7            | 150 až 100         | -1,06884                      | $13,62 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 8            | 100 až 50          | -1,29643                      | $16,51 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 9            | 450 až 50          | -0,73107                      | $9,31 \cdot 10^{-5}$                                        |

Tab. 4.19 Součinitel teplotní smrštivosti  $\alpha$  pro slitinu zinku ( ZnAl4Cu1 )– kovové příložky

| Číslo měření | Rozsah teplot [°C] | Dilatace u daných teplot [mm] | Součinitel teplotní roztažnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ] |
|--------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1            | 450 až 400         | -0,00626                      | $7,97 \cdot 10^{-7}$                                        |
| 2            | 400 až 350         | -0,00842                      | $1,07 \cdot 10^{-6}$                                        |
| 3            | 350 až 300         | -0,05727                      | $7,30 \cdot 10^{-6}$                                        |
| 4            | 300 až 250         | -0,20336                      | $2,59 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 5            | 250 až 200         | -0,40404                      | $5,15 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 6            | 200 až 150         | -0,62512                      | $7,96 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 7            | 150 až 100         | -0,82909                      | $10,56 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 8            | 100 až 50          | -1,02008                      | $13,00 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 9            | 450 až 50          | -0,58468                      | $7,45 \cdot 10^{-5}$                                        |

**Tab. 4.20** Součinitel teplotní smrštivosti  $\alpha$  pro slitinu zinku (ZnAl4Cu1) – pískové příložky

| Číslo měření | Rozsah teplot [°C] | Dilatace u daných teplot [mm] | Součinitel teplotní roztažnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ] |
|--------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1            | 450 až 400         | -0,00024                      | $3,06 \cdot 10^{-8}$                                        |
| 2            | 400 až 350         | -0,00046                      | $5,86 \cdot 10^{-8}$                                        |
| 3            | 350 až 300         | -0,05836                      | $7,43 \cdot 10^{-6}$                                        |
| 4            | 300 až 250         | -0,21638                      | $2,76 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 5            | 250 až 200         | -0,38265                      | $4,87 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 6            | 200 až 150         | -0,60296                      | $7,68 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 7            | 150 až 100         | -0,81112                      | $10,33 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 8            | 100 až 50          | -1,01582                      | $12,94 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 9            | 450 až 50          | -0,58823                      | $7,49 \cdot 10^{-5}$                                        |

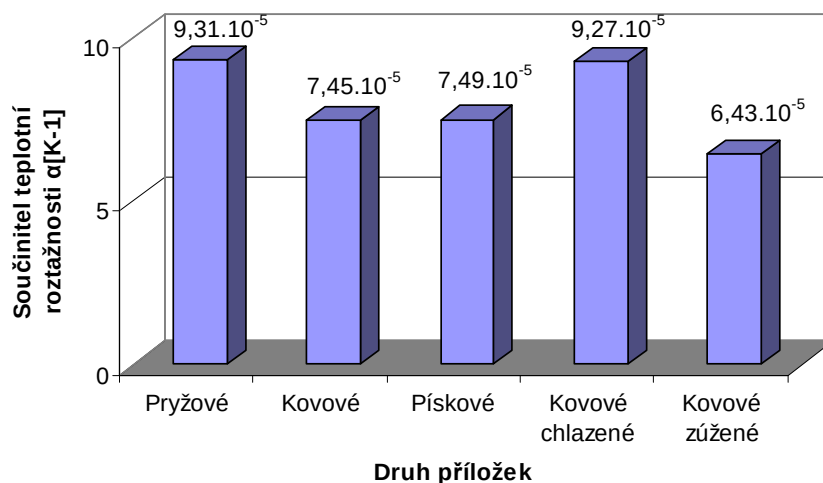
**Tab. 4.21** Součinitel teplotní smrštivosti  $\alpha$  pro slitinu zinku ( ZnAl4Cu1 )– kovové chlazené příložky

| Číslo měření | Rozsah teplot [°C] | Dilatace u daných teplot [mm] | Součinitel teplotní roztažnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ] |
|--------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1            | 450 až 400         | -0,00058                      | $7,39 \cdot 10^{-8}$                                        |
| 2            | 400 až 350         | -0,00108                      | $1,37 \cdot 10^{-7}$                                        |
| 3            | 350 až 300         | -0,24382                      | $3,11 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 4            | 300 až 250         | -0,45252                      | $5,76 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 5            | 250 až 200         | -0,65534                      | $8,35 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 6            | 200 až 150         | -0,87707                      | $11,17 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 7            | 150 až 100         | -1,08234                      | $13,79 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 8            | 100 až 50          | -1,28684                      | $16,39 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 9            | 450 až 50          | -0,72805                      | $9,27 \cdot 10^{-5}$                                        |

**Tab. 4.22** Součinitel teplotní smrštivosti  $\alpha$  pro slitinu zinku ( ZnAl4Cu1 )– zúžené kovové příložky

| Číslo měření | Rozsah teplot [°C] | Dilatace u daných teplot [mm] | Součinitel teplotní roztažnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ] |
|--------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1            | 450 až 400         | -0,00035                      | $4,46 \cdot 10^{-8}$                                        |
| 2            | 400 až 350         | -0,00066                      | $8,41 \cdot 10^{-8}$                                        |
| 3            | 350 až 300         | -0,03626                      | $4,62 \cdot 10^{-6}$                                        |
| 4            | 300 až 250         | -0,19033                      | $2,42 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 5            | 250 až 200         | -0,37858                      | $4,82 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 6            | 200 až 150         | -0,56068                      | $7,14 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 7            | 150 až 100         | -0,72995                      | $9,30 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 8            | 100 až 50          | -0,88968                      | $11,33 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 9            | 450 až 50          | -0,50504                      | $6,43 \cdot 10^{-5}$                                        |





Obr. 4-48 Znázornění hodnot součinitele teplotní smrštivosti  $\alpha$  z tabulek 4.18 až 4.22 pro slitinu zinku ZnAl4Cu1 (410) při teplotě 450°C až 50°C se všemi použitými příložkami

Tab. 4.23 Součinitel teplotní smrštivosti  $\alpha$  pro slitinu zinku ( ZnAl4Cu3 )– pryžové příložky

| Číslo měření | Rozsah teplot [°C] | Dilatace u daných teplot [mm] | Součinitel teplotní roztažnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ] |
|--------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1            | 450 až 400         | -0,00122                      | $1,55 \cdot 10^{-7}$                                        |
| 2            | 400 až 350         | -0,00202                      | $2,57 \cdot 10^{-7}$                                        |
| 3            | 350 až 300         | -0,22598                      | $2,88 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 4            | 300 až 250         | -0,40671                      | $5,18 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 5            | 250 až 200         | -0,61247                      | $7,80 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 6            | 200 až 150         | -0,84654                      | $10,78 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 7            | 150 až 100         | -1,07801                      | $13,73 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 8            | 100 až 50          | -1,30899                      | $16,68 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 9            | 450 až 50          | -0,72909                      | $9,29 \cdot 10^{-5}$                                        |

Tab. 4.24 Součinitel teplotní smrštivosti  $\alpha$  pro slitinu zinku ( ZnAl4Cu3 )– kovové příložky

| Číslo měření | Rozsah teplot [°C] | Dilatace u daných teplot [mm] | Součinitel teplotní roztažnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ] |
|--------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1            | 450 až 400         | -0,00061                      | $7,64 \cdot 10^{-8}$                                        |
| 2            | 400 až 350         | -0,00182                      | $2,32 \cdot 10^{-7}$                                        |
| 3            | 350 až 300         | -0,03924                      | $5,00 \cdot 10^{-6}$                                        |
| 4            | 300 až 250         | -0,17748                      | $2,26 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 5            | 250 až 200         | -0,37998                      | $4,84 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 6            | 200 až 150         | -0,58881                      | $7,50 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 7            | 150 až 100         | -0,77378                      | $9,86 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 8            | 100 až 50          | -0,95852                      | $12,21 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 9            | 450 až 50          | -0,55136                      | $7,02 \cdot 10^{-5}$                                        |

**Tab. 4.25 Součinitel teplotní smrštivosti  $\alpha$  pro slitinu zinku ( ZnAl4Cu3 )– pískové příložky**

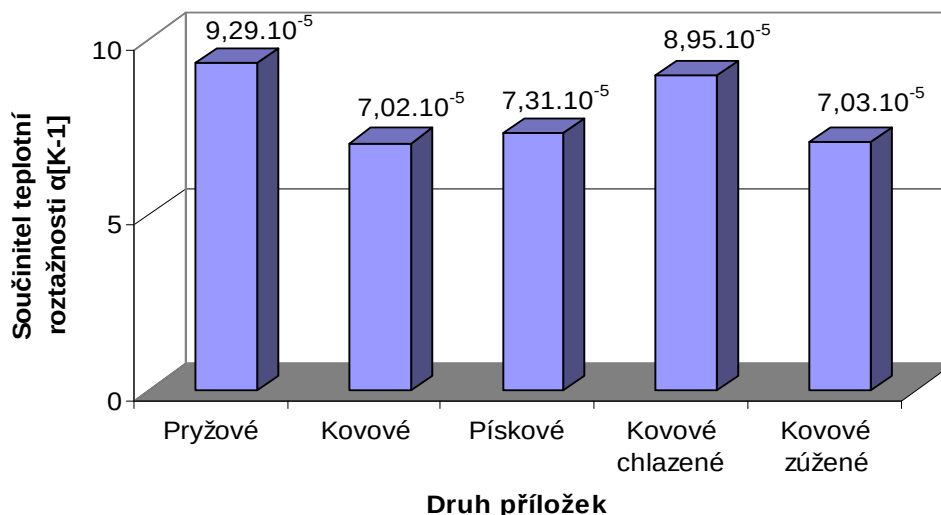
| Číslo měření | Rozsah teplot [°C] | Dilatace u daných teplot [mm] | Součinitel teplotní roztažnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ] |
|--------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1            | 450 až 400         | -0,00098                      | $1,25 \cdot 10^{-7}$                                        |
| 2            | 400 až 350         | -0,00747                      | $9,51 \cdot 10^{-7}$                                        |
| 3            | 350 až 300         | -0,11908                      | $1,52 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 4            | 300 až 250         | -0,24761                      | $3,15 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 5            | 250 až 200         | -0,41432                      | $5,28 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 6            | 200 až 150         | -0,59828                      | $7,62 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 7            | 150 až 100         | -0,79394                      | $10,11 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 8            | 100 až 50          | -0,98762                      | $12,58 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 9            | 450 až 50          | -0,57366                      | $7,31 \cdot 10^{-5}$                                        |

**Tab. 4.26 Součinitel teplotní smrštivosti  $\alpha$  pro slitinu zinku ( ZnAl4Cu3 )– kovové chlazené příložky**

| Číslo měření | Rozsah teplot [°C] | Dilatace u daných teplot [mm] | Součinitel teplotní roztažnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ] |
|--------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1            | 450 až 400         | -0,00098                      | $1,25 \cdot 10^{-7}$                                        |
| 2            | 400 až 350         | -0,00214                      | $2,73 \cdot 10^{-7}$                                        |
| 3            | 350 až 300         | -0,18336                      | $2,34 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 4            | 300 až 250         | -0,39934                      | $5,09 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 5            | 250 až 200         | -0,59922                      | $7,63 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 6            | 200 až 150         | -0,82249                      | $10,48 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 7            | 150 až 100         | -1,02934                      | $13,11 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 8            | 100 až 50          | -1,23054                      | $15,68 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 9            | 450 až 50          | -0,70241                      | $8,95 \cdot 10^{-5}$                                        |

**Tab. 4.27 Součinitel teplotní smrštivosti  $\alpha$  pro slitinu zinku ( ZnAl4Cu3 )– zúžené kovové příložky**

| Číslo měření | Rozsah teplot [°C] | Dilatace u daných teplot [mm] | Součinitel teplotní roztažnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ] |
|--------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1            | 450 až 400         | -0,00014                      | $1,78 \cdot 10^{-8}$                                        |
| 2            | 400 až 350         | -0,00086                      | $1,10 \cdot 10^{-7}$                                        |
| 3            | 350 až 300         | -0,03846                      | $4,90 \cdot 10^{-6}$                                        |
| 4            | 300 až 250         | -0,24571                      | $3,13 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 5            | 250 až 200         | -0,44182                      | $5,63 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 6            | 200 až 150         | -0,63211                      | $8,05 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 7            | 150 až 100         | -0,81128                      | $10,34 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 8            | 100 až 50          | -0,98048                      | $12,49 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 9            | 450 až 50          | -0,55184                      | $7,03 \cdot 10^{-5}$                                        |



Obr. 4-49 Znázornění hodnot součinitele teplotní smrštivosti  $\alpha$  z tabulek 4.23 až 4.27 pro slitinu zinku ZnAl<sub>4</sub>Cu<sub>3</sub> (430) při teplotě 450°C až 50°C se všemi použitými příložkami

Tab. 4.28 Součinitel teplotní smrštivosti  $\alpha$  pro slitinu zinku ( ZnAl<sub>8</sub>Cu<sub>1</sub> )– pryžové příložky

| Číslo měření | Rozsah teplot [°C] | Dilatace u daných teplot [mm] | Součinitel teplotní roztažnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ] |
|--------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1            | 450 až 400         | -0,00138                      | $1,76 \cdot 10^{-7}$                                        |
| 2            | 400 až 350         | -0,00259                      | $3,30 \cdot 10^{-7}$                                        |
| 3            | 350 až 300         | -0,24754                      | $3,15 \cdot 10^{-6}$                                        |
| 4            | 300 až 250         | -0,43634                      | $5,55 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 5            | 250 až 200         | -0,64833                      | $8,26 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 6            | 200 až 150         | -0,93108                      | $11,86 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 7            | 150 až 100         | -1,20274                      | $15,32 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 8            | 100 až 50          | -1,43652                      | $18,30 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 9            | 450 až 50          | -0,80423                      | $10,25 \cdot 10^{-5}$                                       |

Tab. 4.29 Součinitel teplotní smrštivosti  $\alpha$  pro slitinu zinku ( ZnAl<sub>8</sub>Cu<sub>1</sub> )– kovové příložky

| Číslo měření | Rozsah teplot [°C] | Dilatace u daných teplot [mm] | Součinitel teplotní roztažnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ] |
|--------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1            | 450 až 400         | -0,00212                      | $2,70 \cdot 10^{-7}$                                        |
| 2            | 400 až 350         | -0,00534                      | $6,80 \cdot 10^{-7}$                                        |
| 3            | 350 až 300         | -0,18691                      | $2,38 \cdot 10^{-7}$                                        |
| 4            | 300 až 250         | -0,34312                      | $4,37 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 5            | 250 až 200         | -0,53492                      | $6,81 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 6            | 200 až 150         | -0,79264                      | $10,10 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 7            | 150 až 100         | -1,03804                      | $13,22 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 8            | 100 až 50          | -1,25338                      | $15,97 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 9            | 450 až 50          | -0,70771                      | $9,02 \cdot 10^{-5}$                                        |

**Tab. 4.30 Součinitel teplotní smrštivosti  $\alpha$  pro slitinu zinku ( ZnAl8Cu1 )– pískové příložky**

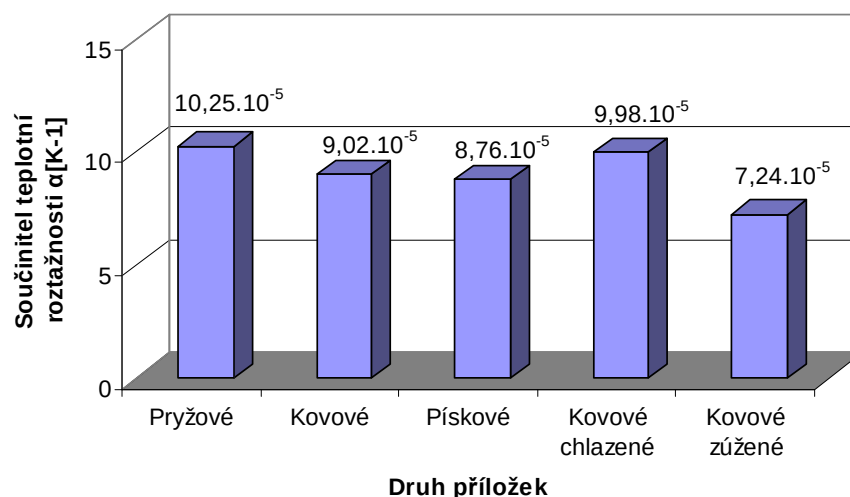
| Číslo měření | Rozsah teplot [°C] | Dilatace u daných teplot [mm] | Součinitel teplotní roztažnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ] |
|--------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1            | 450 až 400         | -0,00031                      | $3,82 \cdot 10^{-8}$                                        |
| 2            | 400 až 350         | -0,00042                      | $5,35 \cdot 10^{-8}$                                        |
| 3            | 350 až 300         | -0,07546                      | $9,61 \cdot 10^{-6}$                                        |
| 4            | 300 až 250         | -0,20682                      | $2,63 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 5            | 250 až 200         | -0,40446                      | $5,15 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 6            | 200 až 150         | -0,69372                      | $8,84 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 7            | 150 až 100         | -0,96647                      | $12,31 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 8            | 100 až 50          | -1,20472                      | $15,35 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 9            | 450 až 50          | -0,68746                      | $8,76 \cdot 10^{-5}$                                        |

**Tab. 4.31 Součinitel teplotní smrštivosti  $\alpha$  pro slitinu zinku ( ZnAl8Cu1 )– kovové chlazené příložky**

| Číslo měření | Rozsah teplot [°C] | Dilatace u daných teplot [mm] | Součinitel teplotní roztažnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ] |
|--------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1            | 450 až 400         | -0,00264                      | $3,36 \cdot 10^{-7}$                                        |
| 2            | 400 až 350         | -0,00432                      | $5,50 \cdot 10^{-7}$                                        |
| 3            | 350 až 300         | -0,26252                      | $3,34 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 4            | 300 až 250         | -0,46004                      | $5,86 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 5            | 250 až 200         | -0,65724                      | $8,37 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 6            | 200 až 150         | -0,90562                      | $11,54 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 7            | 150 až 100         | -1,16774                      | $14,88 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 8            | 100 až 50          | -1,39643                      | $17,79 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 9            | 450 až 50          | -0,78377                      | $9,98 \cdot 10^{-5}$                                        |

**Tab. 4.32 Součinitel teplotní smrštivosti  $\alpha$  pro slitinu zinku ( ZnAl8Cu1 )– zúžené kovové příložky**

| Číslo měření | Rozsah teplot [°C] | Dilatace u daných teplot [mm] | Součinitel teplotní roztažnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ] |
|--------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1            | 450 až 400         | -0,00022                      | $2,80 \cdot 10^{-8}$                                        |
| 2            | 400 až 350         | -0,00081                      | $1,04 \cdot 10^{-7}$                                        |
| 3            | 350 až 300         | -0,04696                      | $5,98 \cdot 10^{-6}$                                        |
| 4            | 300 až 250         | -0,23388                      | $2,98 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 5            | 250 až 200         | -0,42298                      | $5,39 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 6            | 200 až 150         | -0,63916                      | $8,14 \cdot 10^{-5}$                                        |
| 7            | 150 až 100         | -0,83741                      | $10,67 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 8            | 100 až 50          | -1,01238                      | $12,90 \cdot 10^{-5}$                                       |
| 9            | 450 až 50          | -0,56812                      | $7,24 \cdot 10^{-5}$                                        |



Obr. 4-50 Znázornění hodnot součinitele teplotní smrštivosti  $\alpha$  z tabulek 4.28 až 4.32 pro slitinu zinku ZnAl8Cu1 (810) při teplotě 450°C až 50°C se všemi použitými příložkami

#### 4.2.3. Zhodnocení měření dilatačních změn při odlévání do různých typů forem

Z měření je zřejmé, že zkonstruované měřicí zařízení pro sledování dilatací na základě dilatometru polské provenience je vyhovující i s ohledem na vypracovanou metodiku sledování dilatačních změn během tuhnutí a chladnutí odlitků. Velkou předností při ztuhnutí odlitku je dobré vyjímání z různých typů formy. Hodnoty součinitele teplotní smrštivosti ( $\alpha$ ) v teplotním rozsahu 450 až 50 [°C]. Porovnání dilatací jednotlivých měření je zaznamenáno ve výsledcích měření pro jednotlivé typy formy (příložek), a dále zde je vypočítán součinitel teplotní smrštivosti ( $\alpha$ ) opět pro jednotlivé typy formy (příložek). Vždy byl brán jeden materiál, který byl roztaven v odporové peci v grafitovém kelímku. Při dosažení teploty 450°C byl natavený materiál z pece vyndán a odlit do všech použitých příložek, abychom mohli porovnávat, jak se jejich hodnoty liší.

### 4.3. Zkoušky zabíhavosti daných materiálů dle Curryho spirály

V návaznosti na výše uvedené experimenty dilatací byly provedeny i zkoušky zabíhavosti vybraných slitin zinku, tak jak je uvedeno v tabulce 4.2. K tomuto účelu byly použity bentonitové formy, kde byl zaformován model Curryho spirály. Ukázka dělené formy je na obr. 4-51. Model spirály byl opatřen vtokovým kulem s licí jamkou, viz příloha 6, obr. 6-26. Bentonitová formovací směs obsahovala křemenný písek.



Obr. 4-51 Forma otevřena před odléváním

Taveniny odlévaných slitin zinku (čistý zinek, ZnAl4, ZnAl4Cu1, ZnAl4Cu3 a ZnAl8Cu1) byly připraveny analogickým způsobem, jako při sledování dilatací. Taveniny byly odlévány do forem z teploty 450 °C (teplota byla měřena digitálním termometrem (GTH 1100)). Při odlévání všech druhů materiálů bylo dbáno na dodržení, jak stejné rychlost lití pro všechny materiály, tak i stejné podmínky při manipulaci s danou taveninou. Tyto důležité parametry bylo nutné dodržet proto, abych mohl porovnávat materiály za stejných podmínek lití. Na obr. 4-52 je bentonitová forma připravená k odlévání a na obr. 4-53 je forma po odlití.



Obr. 4-52 Forma připravená k odlití Curryho spirály



Obr. 4-53 Forma po odlití slitiny zinku

#### 4.3.1. Vyhodnocení délky získaných spirál

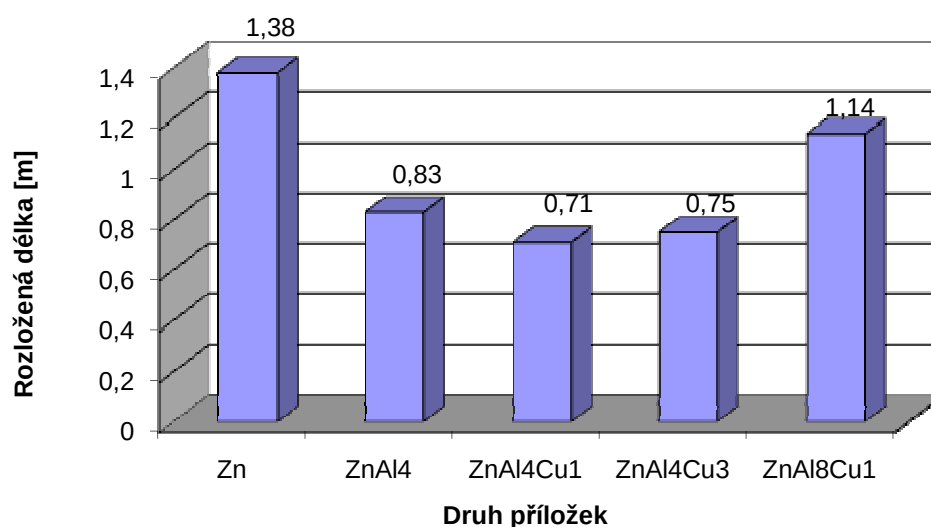
Na obr. 4-54 jsou uvedeny získané spirály, jejichž průměrné hodnoty zabíhavosti pro čistý zinek a slitiny zinku při jedné teplotě odlévání 450 °C jsou uvedeny v tabulce 4.33.



Obr. 4-54 Ztuhlé odlitky vyjmuté z rozebrané formy

**Tabulka 4.33 Průměrné hodnoty zabíhavosti čistého zinku a jeho slitin při jedné teplotě lití (jedná se o rozloženou délku)**

| Teplota<br>[°C] | Zabíhavost [m] |       |          |          |          |
|-----------------|----------------|-------|----------|----------|----------|
|                 | Zn             | ZnAl4 | ZnAl4Cu1 | ZnAl4Cu3 | ZnAl8Cu1 |
| 450 °C          | 1,38           | 0,83  | 0,71     | 0,75     | 1,14     |



Obr.4-55 Grafická závislost výsledných hodnot při zkoušce zabíhavosti (Curryho spirály)

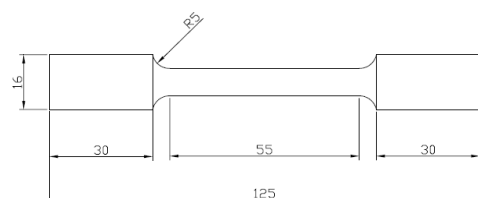


Největší hodnotu zabíravosti vykázal čistý zinek (Zn) 1,38 m, druhá v řadě je slitina zinku ZnAl8Cu1 (810), délka její spirály dosáhla hodnoty 1,14 m, třetí v řadě je slitina ZnAl4 (400), délka spirály činila 0,83 m, čtvrtá v řadě je slitina ZnAl4Cu3 (430), její délka spirály dosáhla hodnoty 0,75 m. Nejmenší zabíhavost vykázala slitina ZnAl4Cu1 (410), délka její spirály dosáhla hodnoty 0,71 m.

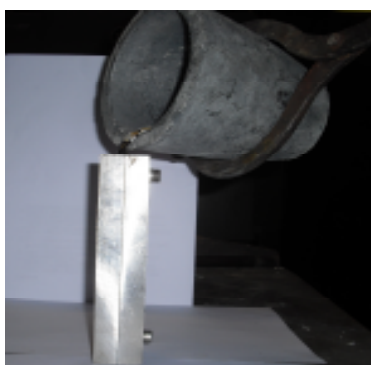
#### 4.4. Mechanické zkoušky daných materiálů slitin zinku

##### 4.4.1. Zkouška tahem

Pro zkoušku tahem byla vyrobena standardní zkušební tělíska, viz obr. 4-56. Tato tělíska byla odlita do kovové slévárenské formy, která byla zhotovena k tomuto účelu. Forma je uvedena na obr. 4-57 A). Odlitky získané z této formy byly osoustruženy na požadované rozměry, viz obr. 4-56.



Obr. 4-56 Tělíska pro zkoušku tahem



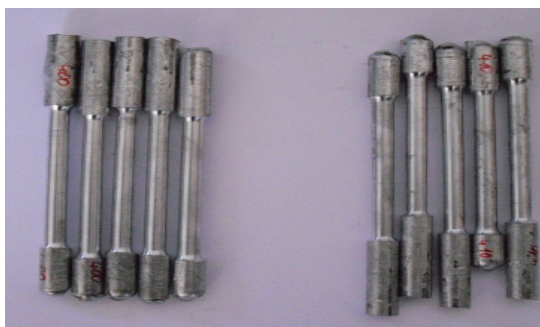
A)



B)

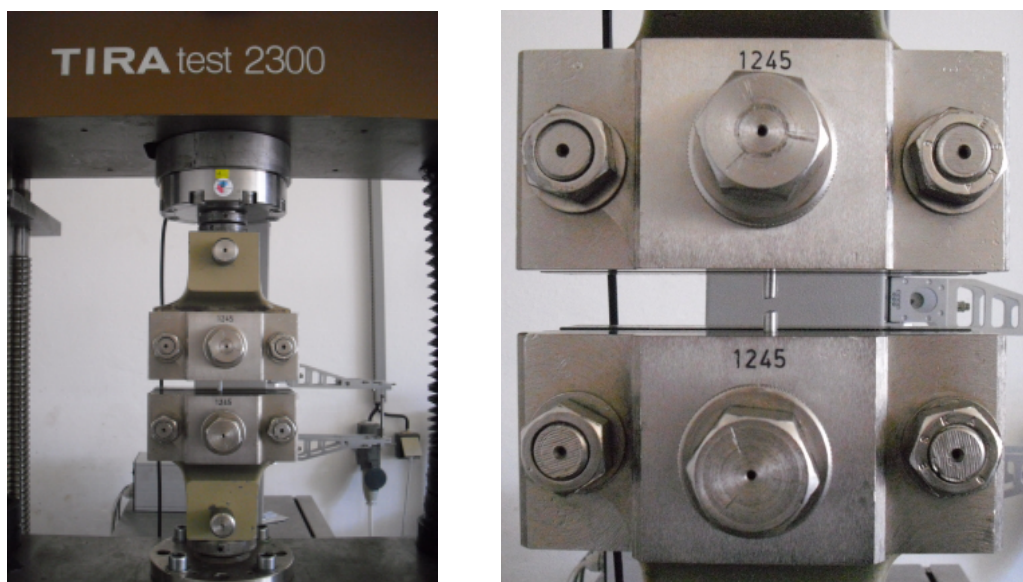
A) – odlévání taveniny do kovové formy; B) – odlitky pro výrobu zkušebních tělísek

Obr. 4-57 Forma a hrubý odlitek pro zhotovení vzorků trhačích tyček



Obr. 4-58 Polotovary vyráběných vzorků pro zkoušku tahem

Nejprve byly odlity postupně čistý zinek a jeho slitiny do předem připravené a předeřáté formy na teplotu 200 °C, viz obr. 4-57A). Po ztuhnutí odlitých materiálů byla forma rozebrána a ztuhlý odlitek vyndán a dále opracován pomocí soustružení, příloha 6, obr. 6-33. Pro zkoušku tahem byl použit trhací stroj TIRA test 2300, viz obr. 4-59, který je k dispozici na našem pracovišti. Výsledky zkoušky tahem byly zaznamenány přímo do protokolu, který byl připraven na měřícím zařízení. Průběh celé zkoušky máme vyobrazen přímo na křivce, která tuto zkoušku popisuje v příslušných hodnotách a vykazuje nám, jaké maximální napětí je schopen daný materiál dosáhnout (především pro praktické využití – namáhání materiálů tahem).

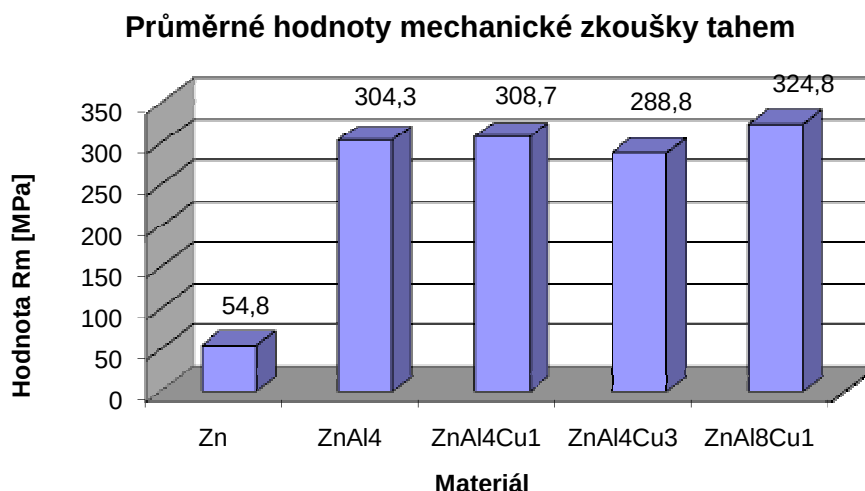


Obr. 4-59 Vzorek upnutý v čelistech trhacího stroje těsně před a po přetržení

Protokoly o provedených zkouškách tahem pro jednotlivé zkoušené materiály jsou v příloze 8. V tabulce 4.44 jsou zaznamenány průměrné hodnoty mezí pevnosti pro zinek a slitiny zinku, které byly získány na základě 5 vzorků pro každé měření. Na obr. 4-60 jsou uvedeny grafické závislosti průměrných hodnot meze pevnosti  $R_m$  pro jednotlivé materiály slitin zinku.

**Tabulka 4.44 Průměrné hodnoty zinku a jeho slitin při zkoušce tahem**

| Hodnoty zkoušky tahem |      |       |          |          |          |
|-----------------------|------|-------|----------|----------|----------|
| Materiál              | Zn   | ZnAl4 | ZnAl4Cu1 | ZnAl4Cu3 | ZnAl8Cu1 |
| Mez Pevnosti [MPa]    | 54,8 | 304,3 | 308,7    | 288,8    | 324,8    |



Obr. 4-60 Grafická závislost výsledných hodnot zkoušky tahem

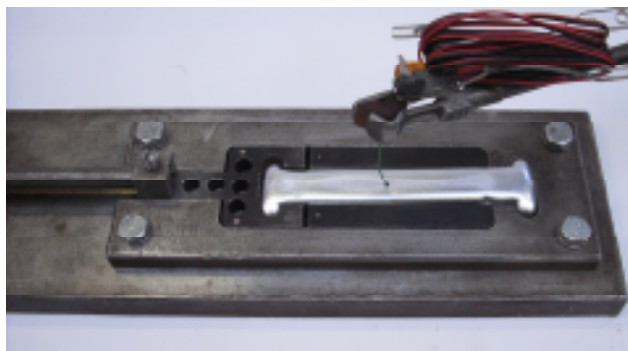
Největší hodnoty meze pevnosti  $R_m$  má slitina zinku ZnAl8Cu1, která dosáhla 324,8 [MPa], druhou největší pevnost má slitina zinku ZnAl4Cu1 (410), která dosáhla 308,7 [MPa], třetí největší pevnost má slitina ZnAl4 (400), která dosáhla 304,3 [MPa], čtvrtou největší pevnost má slitina ZnAl4Cu3 (430), která dosáhla 288,8 [MPa]. Nejmenší hodnotu meze pevnosti v tahu dosáhl čistý zinek 54,8 [MPa].

#### 4.4.2. Zkouška vrubové houževnatosti

Materiály pro výrobu vzorků určených ke zkoušce vrubové houževnatosti jsou uvedeny v tabulce 4.2. Pro výrobu vzorků byly použity odlitky tvaru „I“, viz obr. 4-61, které byly dříve odlity za účelem sledování dilatačních změn. Z těchto odlitků byly frézovány vzorky o rozměrech 10 x 10 a délky 50mm. V příloze 6 na obr.6-38 (řezání) a obr.6-39 (frézování). Dále v této příloze 6 je na obr. 6-40 pohled na Charpyho kladivo.

Snažil jsem se dosáhnout, aby každý vzorek měl shodné vlastnosti, jak v rozměrech, tak i v povrchové drsnosti. Vždy bylo připraveno pět vzorků pro všechny druhy materiálů dle tabulky 4-2. Na obr. 4-62 je pohled na čelisti vloženého vzorku v čelistech Charpyho stroje a na obr. 4-63 jsou vzorky po destrukci.

Hodnoty energie potřebné k přeražení vzorků ze zinku a jeho slitin jsou zaznamenány do tabulky 4.34 a byla vypočítána jejich průměrná hodnota. Na obr. 4-64 jsou uvedeny grafické závislosti průměrných hodnot vrubové houževnatosti sledovaných materiálů.



Obr. 4-61 Odlévání vzorků pro další zpracování



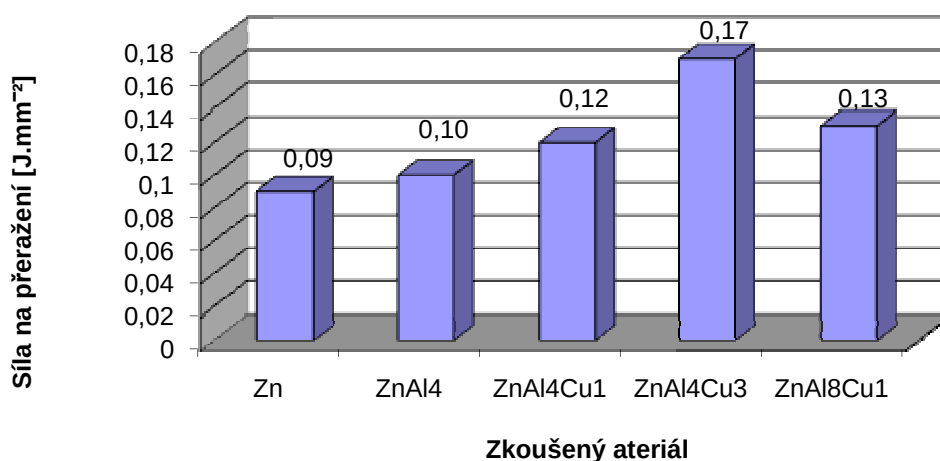
Obr. 4-62 Čelisti na Charpyho kladivu, ve kterých je vložen vzorek připraven k přeražení



Obr. 4-63 Vzorky po přeražení na Charpyho kladivu

**Tabulka. 4.34 Hodnoty naměřené při zkoušce vrubové houževnatosti**

| <b>Vrbová houževnatost - Charpyho kladivo</b>              |             |                 |                 |                 |
|------------------------------------------------------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Vzorky o velikosti 10x10x50mm (vrub 2 mm ve tvaru V)       |             |                 |                 |                 |
| <b>Hodnoty uvedené v [J.mm<sup>-2</sup>]</b>               |             |                 |                 |                 |
| <b>Zn</b>                                                  | <b>ZnAl</b> | <b>ZnAl4Cu1</b> | <b>ZnAl4Cu3</b> | <b>ZnAl8Cu1</b> |
| 0,08                                                       | 0,08        | 0,13            | 0,19            | 0,13            |
| 0,11                                                       | 0,11        | 0,09            | 0,16            | 0,12            |
| 0,08                                                       | 0,13        | 0,14            | 0,21            | 0,13            |
| 0,09                                                       | 0,09        | 0,09            | 0,14            | 0,16            |
| 0,09                                                       | 0,11        | 0,13            | 0,16            | 0,10            |
| <b>Průměrná hodnota všech měření v [J.mm<sup>-2</sup>]</b> |             |                 |                 |                 |
| <b>Zn</b>                                                  | <b>ZnAl</b> | <b>ZnAl4Cu1</b> | <b>ZnAl4Cu3</b> | <b>ZnAl8Cu1</b> |
| 0,09                                                       | 0,10        | 0,12            | 0,17            | 0,13            |

**Hodnoty naměřené při zkoušce vrubové houževnatosti**

**Obr. 4-64 Grafická závislost výsledných hodnot vrubové houževnatosti (Charpyho kladivo)**

Největší hodnoty při zkoušce vrubové houževnatosti měla vytvrditelná slitina zinku ZnAl4Cu3 (430), která dosáhla hodnoty 0,17 [J.mm<sup>-2</sup>], druhou největší hodnotu má slitina ZnAl8Cu1 (810), která dosáhla 0,13 [J.mm<sup>-2</sup>], třetí největší hodnotu má slitina ZnAl4Cu1 (410), která dosáhla 0,12 [J.mm<sup>-2</sup>], čtvrtou největší hodnotu má slitina ZnAl4 (400), která dosáhla 0,10 [J.mm<sup>-2</sup>]. Nejmenší hodnotu vrubové houževnatosti dosáhl čistý zinek (Zn) 0,09 [J.mm<sup>-2</sup>].



#### 4.4.3. Zkouška tvrdosti dle Brinella

Zkouška tvrdosti podle Brinella byla prováděna především za účelem zjištění stavu precipitačního vytvrzování vytvrditelné slitiny zinku  $\text{ZnAl4Cu3}$  (430). Před touto zkouškou byla stanovena metodika vytvrzování této slitiny. Ke sledování procesu precipitačního vytvrzování této slitiny byly použity odlitky tvaru tyče  $\varnothing 15 \times 150 \text{ mm}$ , s nálitkem tvaru komolého kužele, viz obr. 4-65. Tento odlitek tvaru tyče byl volen také z důvodu výroby trhacích zkušebních tyčí.

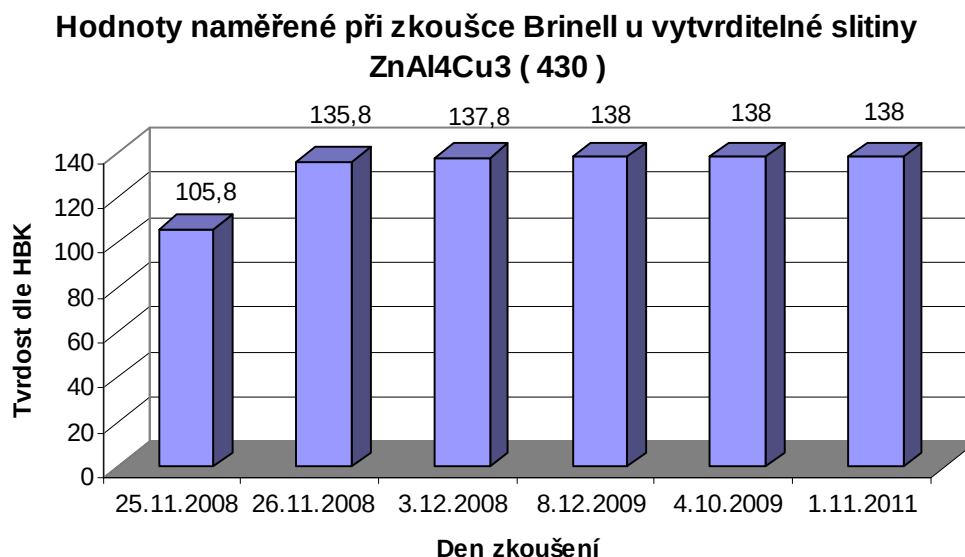


Obr. 4-65 Odlitky, resp. vzorky pro sledování tvrdosti podle Brinella

Při sledování vlivu tvrdosti na precipitační vytvrzování slitiny zinku byla slitina zinku zahřátá v peci na teplotu  $280^\circ\text{C}$ . Homogenizace při této teplotě ohřevu probíhala po dobu 1500 [s] a poté byla ochlazená ve vodě o teplotě  $20^\circ\text{C}$ . Proces precipitačního vytvrzování byl sledován po dobu 28 měsíců. Měřítkem sledovaného precipitačního procesu bylo zjišťování tvrdosti materiálu. K tomuto účelu byla zvolena zkouška podle Brinella, (dle ČSN 420371), indentorem byla kalená ocelová kulička. Průměr kalené ocelové kuličky byl volen 2,5 mm, zátěžná síla byla cca 625 N (62,5 kp). Doba působení kuličky na materiál trvala 60 [s]. Měření tvrdosti bylo provedeno na pěti místech zkoušeného vzorku a k tomuto účelu bylo použito 7 zkušebních tyčí. Tento postup se opakoval po různých časových rozmezích, viz tabulka 4.35, kde jsou zaznamenány průměrné hodnoty tvrdosti podle Brinella zkušebních vzorků ze slitiny zinku  $\text{ZnAl4Cu3}$  (430). Na obr. 4-66 jsou uvedeny grafické závislosti zjištěných hodnot průměrných tvrdostí.

**Tabulka 4.35 Hodnoty naměřené tvrdosti a dle Brinella vzorků slitiny zinku ZnAl4Cu3 (430)**

| Průměrné hodnoty tvrdosti podle Brinella (Ø 2,5 mm, 625 N, 60 s)<br>vzorků slitiny ZnAl4Cu3 (430) |              |              |            |            |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------|------------|------------|------------|
| Sledováno v časovém období                                                                        |              |              |            |            |            |
| 25.11.2008                                                                                        | 30.11.2008   | 3.12.2008    | 8.12.2008  | 4.9.2009   | 1.11.2010  |
| 106                                                                                               | 135          | 138          | 138        | 137        | 141        |
| 105                                                                                               | 136          | 136          | 137        | 138        | 136        |
| 106                                                                                               | 136          | 137          | 138        | 140        | 138        |
| 107                                                                                               | 136          | 138          | 137        | 137        | 138        |
| 105                                                                                               | 135          | 140          | 140        | 138        | 137        |
| Výsledná hodnota                                                                                  |              |              |            |            |            |
| <b>105,8</b>                                                                                      | <b>135,8</b> | <b>137,8</b> | <b>138</b> | <b>138</b> | <b>138</b> |



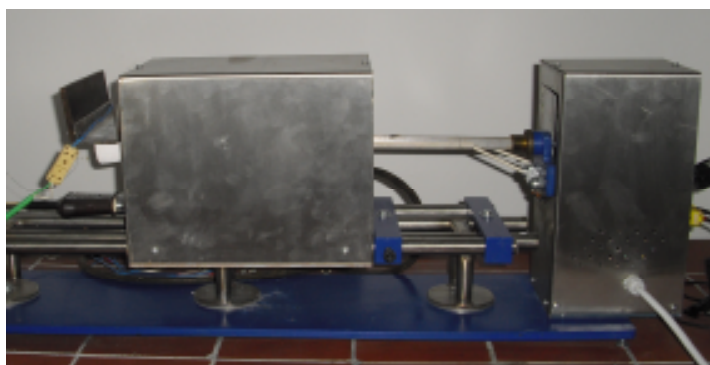
Obr. 4-66 Grafická závislost výsledných hodnot zkoušky tvrdosti (Brinell)

Z uvedených výsledků je patrné, že slitina ZnAl4Cu3 je určena k precipitačnímu vytvrzování. Této skutečnosti také odpovídají hodnoty, které byly v tomto časovém pásmu 28 měsíců naměřeny.

Lze tedy konstatovat, že 5. den po tepelném vytvrzení se hodnota rapidně zvýšila a to z hodnoty HB 2,5/62,5/60 = 105,8 na hodnotu HB 2,5/62,5/60 = 135,8. Dne 3.12.2008 byla naměřena hodnota tvrdosti zkoušeného materiálu HB 2,5/62,5/60 = 137,8. O rok později byla změřena hodnota tvrdosti materiálu HB 2,5/62,5/60 = 138. V dalším časovém období se hodnota tvrdosti neměnila. Výsledný průběh zvyšování tvrdosti materiálu při zkoušce dle Brinella je vidět na obr. 4-66.

#### 4.5. Měření teplotní roztažnosti tělísek Ø 8 x 50 mm vybraných slitin zinku

Analogicky, jako bylo sledování teplotní smrštivosti slitin zinku při odlévání (tuhnutí a chladnutí) odlitků, tak byla sledována i teplotní roztažnost tělísek Ø 8 x 50mm z těchto slitin. Pro měření roztažnosti daných tělísek bylo použito měřící zařízení, viz obr. 4-66, u kterého lze regulovat hodnoty teplot.

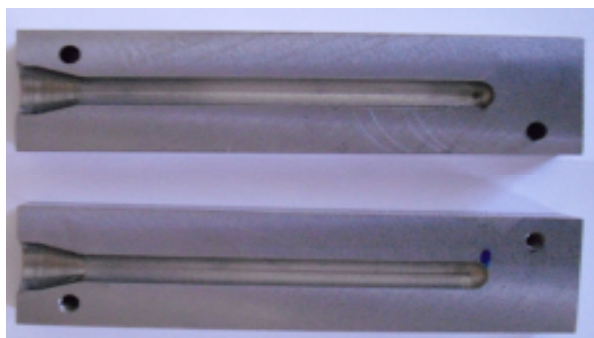


Obr. 4-66 Pohled na měřící zařízení kde budeme měřit roztažnost slitin zinku

Toto zařízení se skládá z odporové pece, která je ustavena na pojezdovém rámu, dále z křemenné trubice, do které se vkládá zkušební vzorek. Jeden konec zkušební vzorku je propojen pomocí tenké křemenné trubičky s čidlem indukčního vysílače (snímače). Součástí zařízení je i regulátor teploty v peci v rozmezí 20 až 1000 °C. Teplota v peci je měřena termočlánkem NiCr – Ni. Také teplota na povrchu zkušební vzorku je měřena termočlánkem tohoto typu. Princip měření spočívá v tom, že do křemenné trubice pece se umístí zkušební vzorek a jeho zahříváním se mění jeho délkový rozměr. Změna této délky je zaznamenávána pomocí čidla indukčního snímače, jehož analogový signál je převodníkem měněn na digitální. Tento digitální signál je zaznamenáván prostřednictvím speciálního software, DAQ View, pomocí PC.

Zkušební vzorky pro sledování teplotní roztažnosti byly vyrobeny ve speciálně zhotovené kovové formě, viz obr. 4-67. Pro experimenty byla použita zkušební tělíska z 5 slitin zinku, včetně čistého zinku, viz tabulka 4.2. Zkušební vzorky pro měření roztažnosti byly vždy vkládány do pece zkušebního zařízení, která vykazovala teplotu 20 °C. Z naměřených hodnot byly od každého vzorku slitiny zkonstruovány dvě grafické závislosti, Naměřené hodnoty dilatací jsou patrné z obr. 4-68 až 4-72.

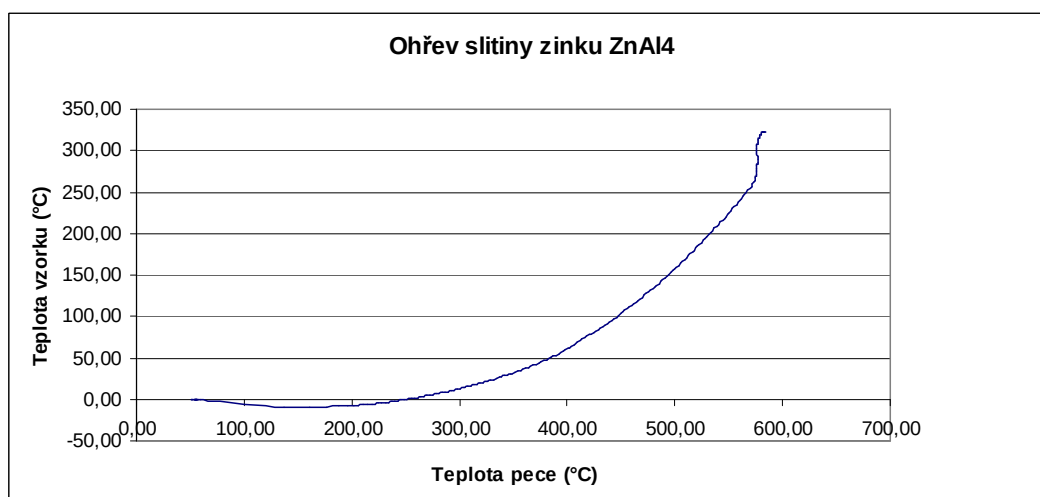




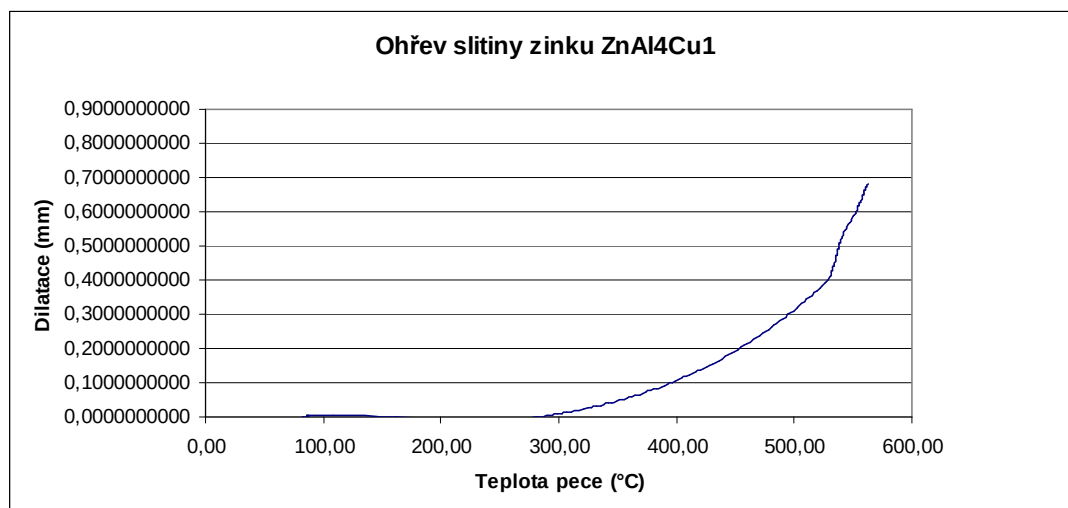
Obr. 4-67 Forma pro odlévání zkušebních tyček pro sledování teplotní roztažnosti slitin zinku



Obr. 4-68 Teplotní závislost dilatace vzorku Ø8 x 50 mm z čistého zinku (99,6%)



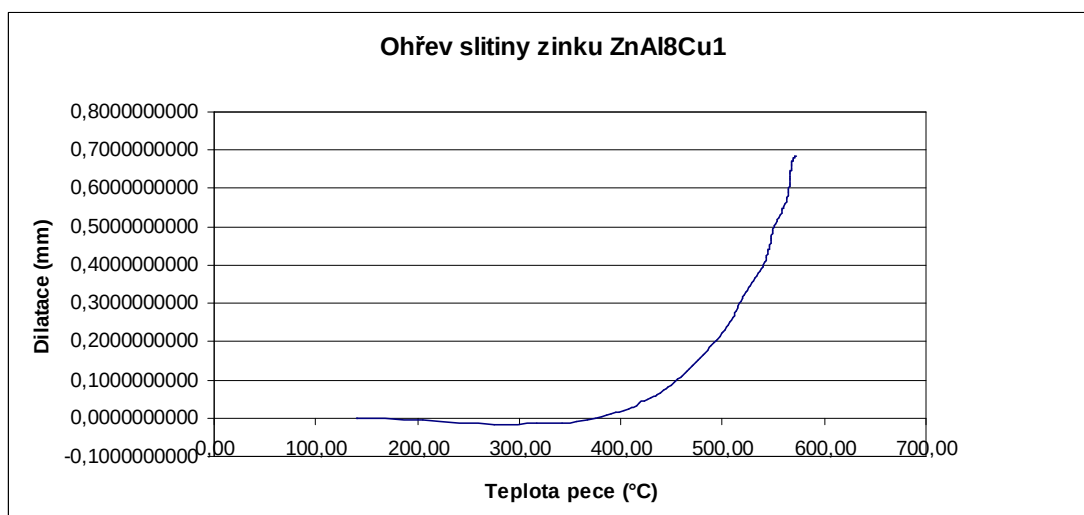
Obr. 4-69 Teplotní závislost dilatace vzorku Ø8 x 50 mm ze slitiny ZnAl4 (400)



Obr. 4-70 Teplotní závislost dilatace vzorku Ø8 x 50 mm ze slitiny ZnAl4Cu1 (410)



Obr. 4-71 Teplotní závislost dilatace vzorku Ø8 x 50 mm ze slitiny ZnAl4Cu3 (430)

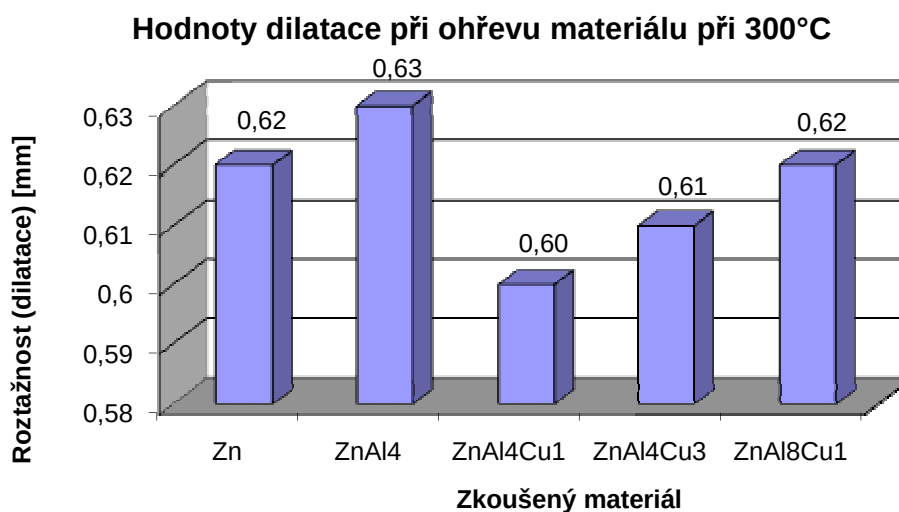


Obr. 4-72 Teplotní závislost dilatace vzorku Ø8 x 50 mm ze slitiny ZnAl8Cu1 (810)

V tabulce 4.36 jsou zaznamenány hodnoty dilatace při ohřevu čistého zinku a jeho slitin při teplotách v peci. Na obr. 4-73 je uvedena grafická interpretace naměřených hodnot dilatace.

**Tabulka 4.36 Maximální průměrné hodnoty dilatace vzorků z čistého zinku a jeho slitin při zahřívání v peci**

| Hodnoty teplotní roztažnosti při teplotě vzorku 300 °C |      |       |          |          |          |
|--------------------------------------------------------|------|-------|----------|----------|----------|
| Materiál                                               | Zn   | ZnAl4 | ZnAl4Cu1 | ZnAl4Cu3 | ZnAl8Cu1 |
| Dilatace [mm]                                          | 0,62 | 0,63  | 0,60     | 0,61     | 0,62     |



Obr. 4-73 Grafická závislost teplotní dilatace vzorků Ø 8x 50 mm ze zinku a jeho slitin uváděná k dosažené teplotě povrchu vzorku 300 °C

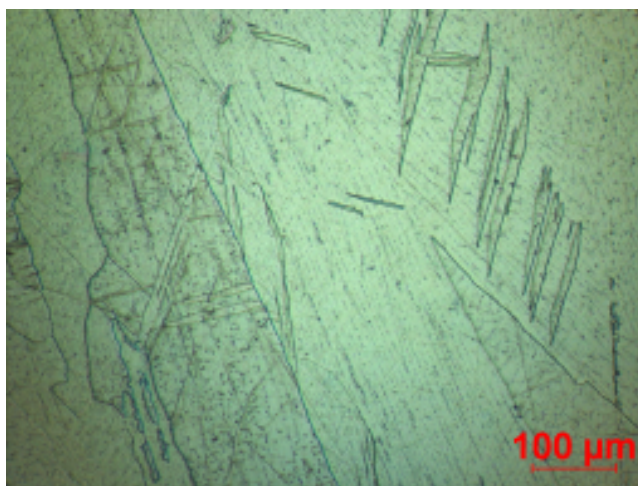
Ze získaných výsledků je patrné, že rozdíly v dilatacích jednotlivých typů slitin nejsou příliš odlišné. Největší roztažnost (dilataci) vykazuje slitina ZnAl4 (400), která je 0,63 mm, stejné hodnoty dosáhl čistý zinek (Zn) a slitina zinku ZnAl8Cu1 (810), která je 0,62 mm, třetí v řadě je slitina ZnAl4Cu3 (430), jejíž dilatace činí 0,61 mm. Nejmenší roztažnost dle měření má slitina ZnAl4Cu1 (410), její hodnota dosáhla 0,60 mm.

## 4.6. Metalografické hodnocení struktury daných materiálů

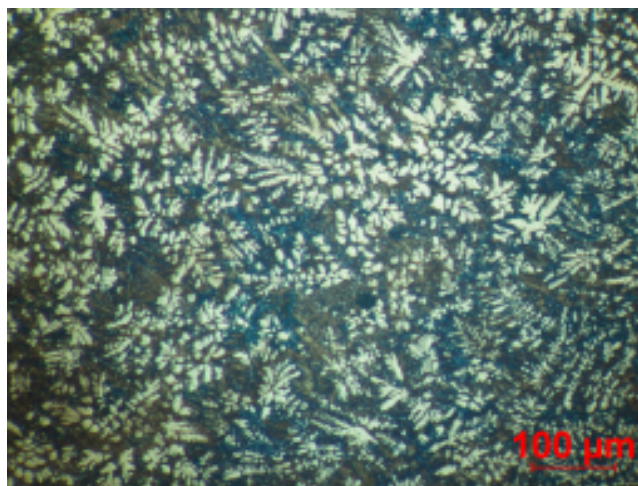
### 4.6.1. Charakteristika použitého zařízení a popis metody

Materiály, které byly odlity pro sledování dilatačních vlastností při tuhnutí a chladnutí odlitků, byly dále použity i pro metalografické pozorování jejich struktury. Vzorky pro metalografické pozorování byly připraveny běžným metalografickým způsobem (zalitý do dentakrylové hmoty, broušeny- brusné papíry 400 až 1200 a leštěny). V příloze 6, obr. 6-82 a obr. 6-83 je uveden stroj pro broušení metalografických vzorků. Leštění vzorků bylo provedeno za pomoci látkového kotouče a leštícího disperzního roztoku s brousícími částicemi o velikosti  $0,1\mu\text{m}$ . Pro zvýraznění struktury bylo použito leptadlo tvořené roztokem oxidu chromového (200 g), síranu sodného (7 g), fluoridu sodného (2 g) a destilované vody (1000 ml). Doba leptání byla velmi krátká cca 2 s. Po naleptání se vzorek opláchl roztokem oxidu chromového (200 g) a destilované vody (1000 ml). Před metalografickým pozorováním byly vzorky vždy vysušeny horkým vzduchem.

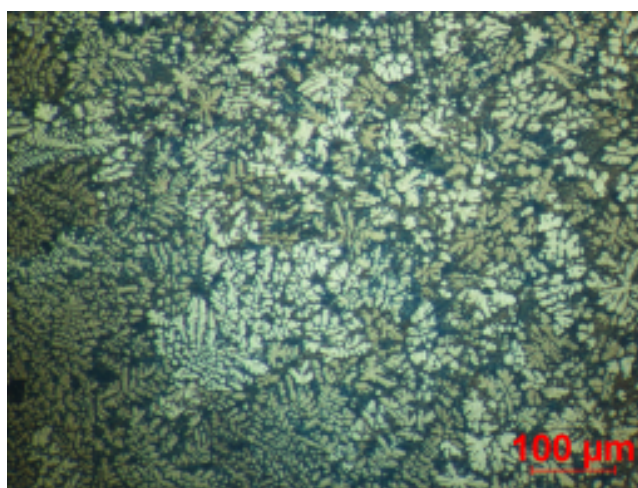
Metalografické pozorování slitin zinku bylo pomocí světelného mikroskopu Neophot 21, výrobce Carl Zeiss Jena a pomocí optické kamery Nikon Epiphot 200. V příloze 6, na obr. 6 – 84 je uveden kompletní optický mikroskop včetně PC systému. Pro metalografické pozorování byly použity tyto materiály: Zn, ZnAl<sub>4</sub>, ZnAl<sub>4</sub>Cu<sub>1</sub>, ZnAl<sub>4</sub>Cu<sub>3</sub> a ZnAl<sub>8</sub>Cu<sub>1</sub>. Zjištěné struktury jsou uvedeny na obr. 4-74 až 4-79.



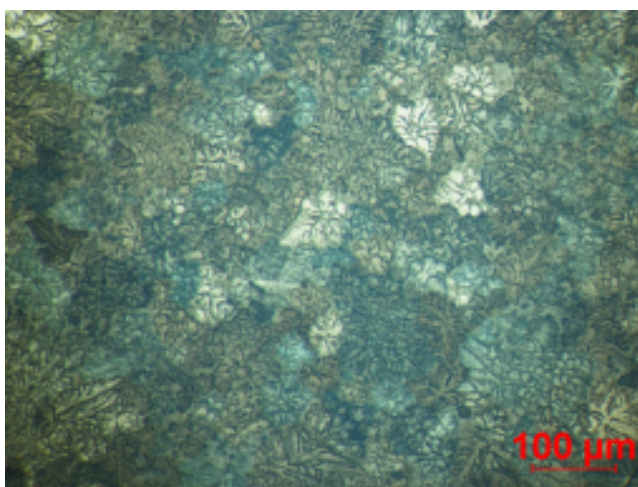
Obr. 4-74 Struktura čistého zinku (Zn 99,6 %)



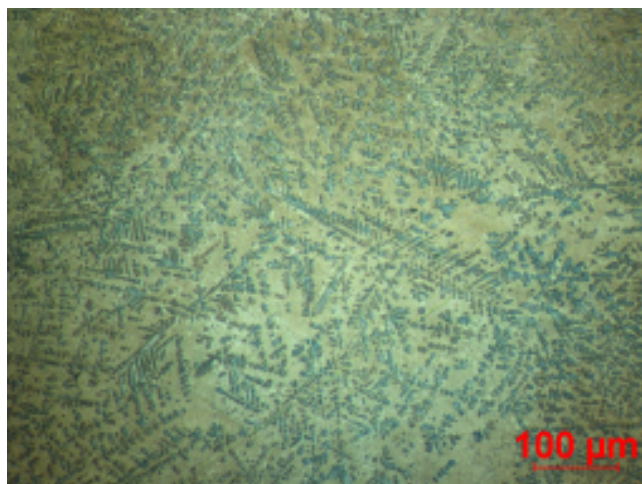
Obr. 4-75 Struktura slitiny zinku ZnAl4 (400)



Obr. 4-76 Struktura slitiny zinku ZnAl4Cu1 (410)



Obr. 4-77 Struktura slitiny zinku ZnAl4Cu3 (430)

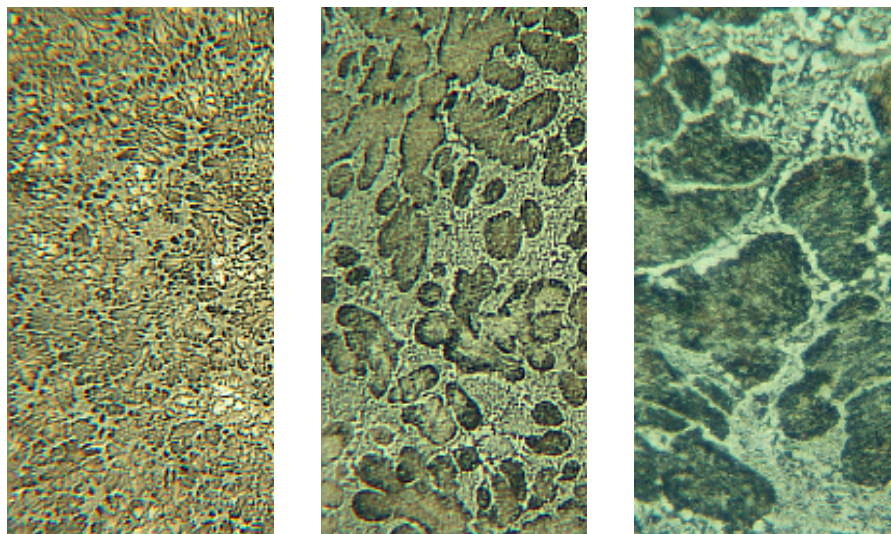


Obr. 4-78 Struktura slitiny zinku ZnAl8Cu1 (810)

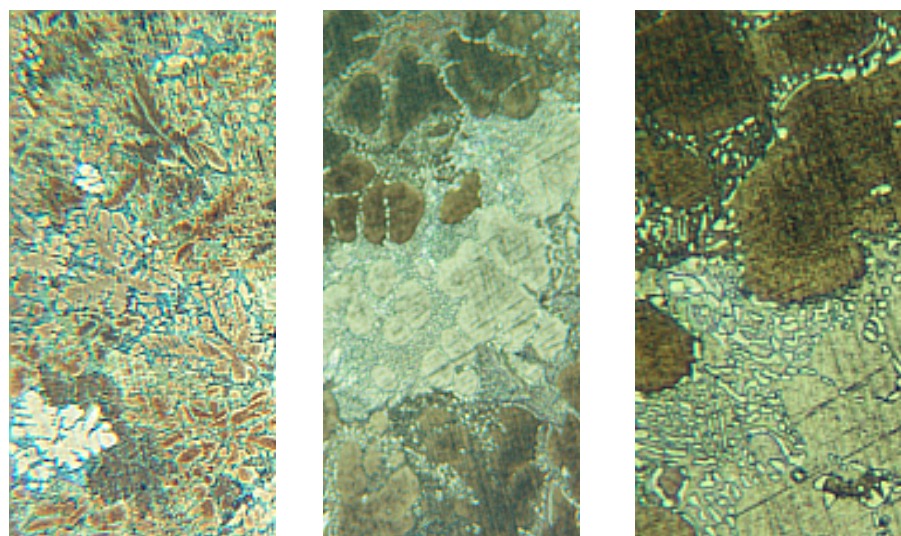
Z výše uvedených obrázků jsou zřejmé odlišnosti struktury jednotlivých druhů slitin zinku. Jak je patrné, čistý zinek neobsahuje žádné vyloučeniny fází. Ze struktury na obr. 4-74 jsou patrné dendrity čistého zinku. Na obr. 4-75 je slitina ZnAl4, tmavá místa tvoří eutektikum a světlé protáhlé dendrity jsou tvořeny  $\eta$  fází (bohatá na zinek). Na obr. 4-76 je struktura slitiny ZnAl4Cu1, kde se nachází určité množství  $\epsilon$  fáze ( $\text{CuZn}_4$ ), dále  $\eta$  fáze (bohatá na zinek) a  $\alpha$  (bohatá na hliník). Struktura na obr. 4-77 je tvořena tj.  $\eta$  fází (bohatá na zinek), dále větším množstvím  $\epsilon$  fáze ( $\text{CuZn}_4$ ) a fáze  $\alpha$  (bohatá na hliník). Na obr. 4-78, slitina ZnAl8Cu1, je struktura tvořena fází  $\alpha$ , dále  $\epsilon$  fází ( $\text{CuZn}_4$ ) a  $\eta$  fází, která je bohatá na zinek.

Dále byla sledována struktura slitiny ZnAl4Cu3, na které bylo provedeno precipitační vytvrzování. Na obr. 4-79 je struktura slitiny ZnAl4Cu3 (leptáno, 100x, 500x, 1000x zvětšení) po odlití, tj. bez tepelného zpracování. Na obr. 4-80 je struktura 5. den po precipitačním vytvrzování.





Obr. 4-79 Struktura slitiny  $\text{ZnAl}_4\text{Cu}_3$  po odlití do kovové formy  
předehřáté na teplotu  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  – bez tepelného zpracování  
(leptáno, 100x, 500x, 1000x zvětšení)



Obr. 4-80 Struktura slitiny  $\text{ZnAl}_4\text{Cu}_3$  po odlití do kovové formy  
předehřáté na teplotu  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  5. den po tepelném zpracování  
(leptáno, 100x, 500x, 1000x)

Vyhodnocení struktury tepelně zpracovaných vzorků je třeba provádět na základě existence ternárního diagramu soustavy Zn-Al-Cu, ze kterého lze odvodit fáze, které jsou typické pro slitinu  $\text{ZnAl}_4\text{Cu}_3$ , tj.  $\eta$  fáze (bohatá na zinek, krystalizující v soustavě hexagonální s těsným uspořádáním), dále  $\varepsilon$  fáze ( $\text{CuZn}_4$ , krystalizující též v soustavě hexagonální s těsným uspořádáním) a fáze  $\alpha$  (bohatá na hliník, krystalizující v kubické soustavě plošně centrované). Tyto fáze jsou stabilní pod eutektoidní teplotou, nad eutektoidní teplotou jsou stabilní fáze  $\beta$ ,  $\eta$  a  $\varepsilon$ .

Na obr. 4-87 je patrná struktura slitiny  $\text{ZnAl}_4\text{Cu}_3$  po odlití do kovové formy. Fáze  $\eta$  je v podstatě čistý zinek, která je vyloučena v protáhlých krystalech tmavé barvy o rozměrech 0,04 až 0,16 mm v podélném směru a 0,03 až 0,07 mm v příčném směru.

Na obr. 4-88 je struktura vzorku slitiny  $\text{ZnAl}_4\text{Cu}_3$ , který byl sledován 5. den po tepelném zpracování – vytvrzování. Je zde  $\eta$  matrice, která ve struktuře vytváří oblé krystalické útvary světlehnědé barvy. Fáze  $\alpha$  (černé drobné vyloučeniny) precipituje v  $\eta$  matici. Dále se mezi dendrity vyskytuje eutektikum tvořené fází  $\beta$  a  $\eta$ . Tmavé útvary zachyceny ve struktuře jsou vyloučeniny fáze  $\varepsilon$  ( $\text{CuZn}_4$ ). Velikost  $\eta$  matrice je v příčném směru 0,05 až 0,15 mm, v podélném směru 0,05 až 0,12 mm.



## 5. DISKUSE VÝSLEDKŮ

Dosažené výsledky této disertační práce vedou k utvoření komplexního pohledu na zinek a zinkové slitiny. Byly zde porovnávány různé druhy přílozek a různé druhy odlévaných materiálů. Dnes a denně se setkáváme se zinkovými odlitky, jak v automobilovém průmyslu, tak i v letectví, či běžném potravinářském průmyslu. Jeho nízká teplota tavení vede k čím dál většímu používání, jelikož nám snižuje náklady na výrobu.

1. Můžeme tedy říci, že zinek a převážně jeho slitiny jsou z hlediska fyzikálního, chemického, mechanického a tepelně-fyzikálního smíchávány s dalšími slévárenskými materiály, jako jsou (hliník, hořčík, měď, cín a další prvky). Můžeme tedy říci, že tyto slitiny jsou nejpoužívanější pro odlévání drobných součástí (zámky automobilů, ochrany stěračů, madla skříní). Dále je nutno konstatovat, že pro slévárenské účely je prioritní především hodnota měrné tepelné kapacity (měrná tepelná kapacita v kapalném stavu je  $502 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ). Čím je tato hodnota nižší, tím se látka rychleji zahřívá a rychleji chladne. Další velkou předností při odlévání zinku a jeho slitin je velmi nízká afinita (slučivost) s kyslíkem. Nevznikají nám v odlitcích oxidy, a tudíž jsou odlitky kvalitnější. Není potřeba rafinovat (čistit) taveninu před samostatným odléváním. Dynamická viskozita a povrchové napětí, které mají vliv na tekutost tavenin, jsou u zinku příznivé. Pokud dojde k přehřátí zinku na vyšší teplotu kolem  $570^\circ\text{C}$ , docílíme vyšší tekutost taveniny. Pokud bychom šli na vysoké teploty kolem  $900^\circ\text{C}$ , došlo by k degradaci (znehodnocení) odlévané taveniny. Pokud odléváme slitiny zinku do pískových forem gravitačně, většinou vznikají staženiny (kolem 5%) a častá bývá i pórovitost odlitků.

Mechanické vlastnosti čistého zinku při pevnosti v tahu jsou mezi 120 až 200 [MPa], pro slitiny zinku se pevnost v tahu pohybuje mezi 200 až 430 [MPa]. Můžeme tedy říci, že mechanické vlastnosti slitin zinku jsou na velmi vysoké úrovni. Jejich mechanické vlastnosti se zhoršují se vzrůstající teplotou a také pokud je teplota pod  $-25^\circ\text{C}$ . Zinek se používá v různých potravinářských odvětvích, i třeba jako ochrana ocelových profilů (zinkování), vrstvička na povrchu se pokryje zásaditým uhličitánem  $4\text{Zn(OH)}_2.\text{CO}_2$ . Tato vrstvička odolává různým vlivům prostředí a převážně ho chrání proti vodě. Proto se odlévají např. karburátory, dříve pro osobní automobily, dnes již pro motocykly. Dobře odolávají benzinům a olejům. Jejich velkou předností je také dobré obrábění. Nepříznivou vlastností zinku i jeho slitin je vysoká hustota, která je  $6570 \text{ kg.m}^{-3}$ , což způsobuje, že se spíše odlévají drobnější součásti. Můžeme také říci, že zinek je 2,4 krát těžší než hliník.

Pro tavení zinku a jeho slitin lze použít litinové nebo grafitové kelímky. Jako topící agregát se většinou používají plynové nebo elektrické pece.

Zinek a jeho slitiny můžeme odlévat všemi různými způsoby. Nutno říci, že pokud je hliníku do 8%, lze využít formu předehřátou cca 200 °C, ale také můžeme použít formu studenou. Slitiny zinku dnes nacházejí také velké uplatnění při výrobě drobné bižuterie, a to při odstředivém lití. Lití se provádí převážně do pryžových forem.

Z chemického hlediska zinek je kov, který se řadí do skupiny II.B, relativní atomová hmotnost zinku je 65,38 a atomové číslo je 30. Teplota tavení čistého zinku je 419 °C při atmosférickém tlaku 101 325 [Pa]. Pro roztavení 1kg čistého zinku spotřebujeme energii 267 516 [J].

**2.** Z naměřených závislostí hodnot lineárního smrštění na čase pro čistý zinek a jeho slitiny jsou patrné tyto hodnoty dilatace: nejvyšší průměrná hodnota dilatace byla u čistého zinku 1,82 mm, u slitiny ZnAl4 byla 1,42 mm, slitina ZnAl4Cu1 vykazovala 1,46 mm, u slitiny ZnAl4Cu3 byla 1,46 mm, a u slitiny ZnAl8Cu1 činila dilatace 1,61 mm.

Nejvyšší hodnoty smrštění se projeví na čistém zinku a také u slitiny ZnAl8Cu1, u ostatních slitin bylo lineární smrštění téměř stejné.

**3.** Bylo potvrzeno, že zabíhavost závisí nejen na teplotě lití, ale také na charakteru taveniny (viskozita, povrchové napětí, hustota) a typu slévárenské formy. Slitiny zinku, díky své poměrně vysoké hustotě (cca 7200 kg.m<sup>-3</sup>), příznivé hodnotě kinematické viskozity (0,539.10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup>) a povrchového napětí (0,72 N.m<sup>-1</sup>, při teplotě 420 °C), příznivě působí na odlévání tenkých stěn odlitku a lze tedy ze slitin zinku odlévat tenkostěnné a tvarově složité odlitky. Též lze předlévat i závity a malé díry cca o průměru 1 mm.

Pokud se jedná o kusovou či malosériovou výrobu, je nutno si nejdříve uvědomit, jakou formu použijí. Jelikož správná volba formy nám zajistí správný odlitek, ale také nám zajistí velkou úsporu finančních prostředků. Pro kusovou výrobu se převážně používají pískové formy, pro sériovou a hromadnou výrobu se uplatňují kovové formy, dnes s tlakovým litím.

**4.** Při odlévání odlitků tvaru „I“, vedle záměru pro stanovení součinitele teplotní smrštivosti, bylo ještě zjištěno, že nejdéle tuhnou střední partie odlitku, která je utvářena za normálních okolností je tvořena bentonitovou směsí. To však je ta partie slévárenské formy, která byla výměnná a za určitých okolností byla tvořena kovovými, pryžovými a vodou chlazenými přílozkami. V tomto místě, jak odlitek tuhnul, bylo též sledováno, zda nedojde k tvorbě trhlin. Ani v jednom případě se trhliny na odlitku neobjevily. Největší obavy ze vzniku trhlin byly u experimentů při výrobě odlitků s tenkým dříkem, tj. při použití širších příložek. Ani v tomto případě trhliny nevznikly. Z těchto závěrů vyplynulo, že zinek a jeho slitiny odolávají tvorbě trhlin při jeho bržděném tuhnutí. To znamená, že tyto materiály mají poměrně velké vnitřní vazebné síly. Do jisté míry k tomu přispívá i jeho příznivá hodnota součinitele teplotní

smrštivosti (roztlačnosti)  $\alpha$  i jeho chemické složení v roztaveném stavu. Při tuhnutí odlitku ze slitin zinku se projevuje nepatrná pružnost materiálu.

5. Při metalografickém pozorování zinku a jeho slitin bylo zjištěno, že pokud odlitek rychleji tuhne, vykazuje jemnozrnnější strukturu. Pokud odlitek tuhne pomaleji, zrna v odlitku dostačují vyrůst a struktura odlitku je hrubozrnnější. Většinou je snaha, aby odlitek měl jemnozrnnou strukturu, tím vykazuje vyšší hodnoty mechanických vlastností. Samozřejmě také záleží, při jakých podmínkách taveninu odléváme do dutiny formy a jakou formu zde používáme. Při těchto experimentech byly použity různé typy přílozek, které do jisté míry zabezpečovaly různou intenzitu odvodu tepla z tuhnoucí taveniny, resp. různou rychlost tuhnutí odlitků. Pokud se použije chlazená kovová forma, pak intenzitu odvodu tepla zvyšuje proudící kapalina. Bylo zjištěno, že při použití kovové nechlazené formy trvalo ochlazení odlitku z teploty 450 °C na 50 °C 3600 [s] a při použití chlazení této formy trvalo snížení teplot (450 °C na 50 °C) 360 [s], to je snížení časů 90 %. V technické praxi však s chlazením jsou do jisté míry technické potíže, neboť je třeba opět použít jen chladnou kapalinu.

6. Při provádění zkoušky tahem čistého zinku a jeho slitin byla prokázána poměrně velká pevnost materiálu, což při vlastní zkoušce souvisí s použitím vhodných čelistí. Na základě těchto výsledků je možno konstatovat, že slitiny zinku naprosto vyhovují tahovým napětím, avšak při zkoušce vrubové houževnatosti tyto slitiny vykazují nízké hodnoty (max. 0,17 [J.mm<sup>-2</sup>], u slitiny po precipitačním vytvrzování) a nejnižší hodnoty dosáhl čistý zinek 0,09 [J.mm<sup>-2</sup>].

7. Při sledování roztlačnosti vzorků Ø 8 x 50 mm ze zinku a jeho slitin byla teplota povrchu vzorků 300 °C, ke které dané hodnoty roztlačnosti jsou stanoveny. Vycházelo se z toho, že výrobky ze slitin zinku v technické praxi nepřekračují při své funkci tuto teplotu. Při vyšších teplotách vzorku již došlo k jeho destrukci, jak vyplývá z následujících hodnot: čistý zinek teplota destrukce 384 °C, byla naměřena roztlačnost 0,79 mm, u slitiny zinku ZnAl<sub>4</sub>, byla max. teplota 323 °C, byla naměřena roztlačnost 0,68 mm, u slitiny zinku ZnAl<sub>4</sub>Cu<sub>1</sub> při max. teplotě 341 °C byla naměřena roztlačnost 0,67 mm, u slitiny zinku ZnAl<sub>4</sub>Cu<sub>3</sub> při max. teplotě 336 °C byla naměřena roztlačnost 0,69 mm, u slitiny Zinku ZnAl<sub>8</sub>Cu<sub>1</sub> při max. teplotě 332 °C byla naměřena roztlačnost 0,68 mm.

Pro teploty vzorků 300 °C byly zjištěny tyto dilatace: čistý zinek dosáhl hodnotu roztlačnosti 0,62 mm, slitina zinku ZnAl<sub>4</sub> dosáhla roztlačnosti 0,63 mm, slitina zinku ZnAl<sub>4</sub>Cu<sub>1</sub> dosáhla roztlačnosti 0,60 mm, slitina zinku ZnAl<sub>4</sub>Cu<sub>3</sub> dosáhla roztlačnosti 0,61 mm, slitina zinku ZnAl<sub>8</sub>Cu<sub>1</sub> 0,62 mm. Z výše uvedených hodnot je patrné, že při teplotě povrchu vzorků 300 °C jsou hodnoty roztlačnosti vzorků slitin zinku nepatrně rozdílné.

## 6. ZÁVĚR

Disertační práci jsem zpracoval na téma: „**Sledování vlastností slitin zinku pro výrobu odlitků**“. V této práci jsem chtěl především ukázat, jak důležitým prvkem je v dnešním průmyslovém světě zinek a především jeho slitiny. Disertační práce má pomoci a ukázat, jaké vlastnosti, ať už mechanické či slévárenské, jsme schopni se zinkem a jeho slitinami docílit. Zajímavostí je, jakých pevnostních hodnot jsou slitiny zinku schopny dosáhnout a všeobecně platí, že pro odlévání drobných součástí převážně v automobilovém průmyslu nemají slitiny zinku konkurenci. Je to především dáno tím, že jsme schopni odlévat velice složité součásti s velkou přesností a kvalitním povrchem.

Práci jsem rozdělil do dvou hlavních kapitol, rešeršní část disertační práce a experimentální část disertační práce. Výsledky této disertační práce lze použít pro dílenskou praxi.

**Rešeršní část práce** je zaměřena na charakteristiku čistého zinku a slitin zinku z hlediska jejich používání ve slévárenství. Je zde zmínka, kde všude je možnost tyto slitiny využít. Zároveň byly popsány některé slévárenské, fyzikální a tepelně-fyzikální vlastnosti tavenin především čistého zinku, které jsou popsány v odborné literatuře a potřebné pro celkové zhodnocení vlastností čistého zinku a slitin zinku. V této části práce byl také proveden výpočet změny Gibbsovy energie.

**Experimentální část práce** je zaměřena na sledování dilatačních vlastností čistého zinku a slitin zinku při odlévání. Toto pozorování bylo provedeno současně dvěma přístroji a to mechanickým dilatometrem a dále zde byly použity rychlostní optické kamery. Posuzoval jsem, jak se od sebe jednotlivé grafy liší a jakých hodnot dosahují. Pro mechanický dilatometr byla docílena absolutní hodnota dilatace 1,68 [mm] a pro optické kamery byla docílena hodnota absolutní dilatace 1,38 [mm]. Nutno tedy říci, že bylo provedeno pouze jedno měření. Velké sálající teplo by mohlo zapříčinit poškození optik rychlostních kamer. Rozdíly obou měření se liší o 0,309 [mm], tj 22,2 [%].

Druhá část byla zaměřena na měření dilatačních vlastností vybraných slitin zinku a čistého zinku a dále stanovení hodnot součinitele teplotní smrštivosti (odlévaných do různých typů přílozek). Dosažené průměrné hodnoty dilatace. Nejvyšší průměrné hodnoty dilatace dosáhl čistý zinek (Zn) 1,82 [mm], slitina zinku ZnAl8Cu1 (810) 1,61 [mm],

slitina zinku ZnAl<sub>4</sub>Cu<sub>1</sub> (410) 1,46 [mm], stejné hodnoty dosáhla i slitina zinku ZnAl<sub>4</sub>Cu<sub>3</sub> (430). Nejnižší průměrné hodnoty dilatace dosáhla slitina zinku ZnAl<sub>4</sub> (400) 1,42 [mm]. K těmto grafickým závislostem a hodnotám byly vypočítány součinitele teplotní smrštivosti (roztlačnosti)  $\alpha$ . Jeho hodnoty jsou uvedeny v tabulkách 4 – 8 až 4 – 32.

Třetí část této práce byla zaměřena na zkoušky zabíhavosti daných materiálů slitin zinku a čistého zinku dle Curryho spirály. Zjišťoval jsem, jak daleko je schopen kov při určité teplotě zaběhnout. Odlévání bylo provedeno při teplotě 450 [°C]. Hodnota zaběhnutí pro čistý zinek (Zn) byla 1,38 [m], pro slitinu zinku ZnAl<sub>8</sub>Cu<sub>1</sub> (810) byla 1,14 [m], pro slitinu zinku ZnAl<sub>4</sub> (400) byla 0,83 [m], pro slitinu ZnAl<sub>4</sub>Cu<sub>3</sub> (430) byla 0,75 [m], pro slitinu zinku ZnAl<sub>4</sub>Cu<sub>1</sub> (410) byla 0,71 [m].

Čtvrtá část experimentální práce byla zaměřena na mechanické zkoušky daných materiálů slitin zinku a čistého zinku. Jednalo se o zkoušku tahem, zkoušku vrubové houževnatosti a zkoušku tvrdosti dle Brinella.

Z měření při zkoušce tahem byly naměřeny tyto hodnoty:

Největší hodnoty meze pevnosti  $R_m$  má slitina zinku ZnAl<sub>8</sub>Cu<sub>1</sub>, dosáhla 324,8 [MPa], slitina zinku ZnAl<sub>4</sub>Cu<sub>1</sub> (410) dosáhla 308,7 [MPa], slitina ZnAl<sub>4</sub> (400) dosáhla 304,3 [MPa], slitina ZnAl<sub>4</sub>Cu<sub>3</sub> (430) dosáhla 288,8 [MPa]. Nejmenší hodnotu meze pevnosti  $R_m$  při zkoušce tahem, dosáhl čistý zinek 54,8 [MPa].

Z měření při zkoušce vrubové houževnatosti byly naměřeny tyto hodnoty:

Největší hodnoty při zkoušce vrubové houževnatosti měla vytvrditelná slitina zinku ZnAl<sub>4</sub>Cu<sub>3</sub> (430), která dosáhla 0,17 [J.mm<sup>-2</sup>], slitina zinku ZnAl<sub>8</sub>Cu<sub>1</sub> (810) dosáhla 0,13 [J.mm<sup>-2</sup>], slitina zinku ZnAl<sub>4</sub>Cu<sub>1</sub> (410) dosáhla 0,12 [J.mm<sup>-2</sup>], slitina zinku ZnAl<sub>4</sub> (400) dosáhla 0,10 [J.mm<sup>-2</sup>]. Nejmenší hodnotu vrubové houževnatosti dosáhl čistý zinek (Zn), který dosáhl 0,09 [J.mm<sup>-2</sup>].

Z měření při zkoušce tvrdosti dle Brinella byly naměřeny tyto hodnoty:

Zkouška použita pouze pro slitinu zinku ZnAl<sub>4</sub>Cu<sub>3</sub> (430), která byla před zkouškou tvrdosti precipitačně vytvrzena. Při prvním měření 25.11.2008 ten den, kdy bylo provedeno tepelné zpracování byla dosažena hodnota HB 2,5/62,5/60 = 105,8. 5. den po tepelném zpracování nám tvrdost zkoušeného materiálu vzrostla na HB 2,5/62,5/60 = 135,8, další týden byla

naměřena hodnota tvrdosti zkoušeného materiálu HB 2,5/62,5/60 = 137,8, po osmi měsících byla naměřena hodnota tvrdosti zkoušeného materiálu HB 2,5/62,5/60 = 138, o rok později byla naměřena hodnota tvrdosti zkoušeného materiálu HB 2,5/62,5/60 = 138. V dalším časovém období se již hodnota neměnila.

Pátá část této práce byla zaměřena na měření teplotní roztažnosti tělísek Ø 8 x 50 mm vybraných slitin zinku a čistého zinku. Ze získaných výsledků je patrné, že rozdíly v dilatacích jednotlivých typů slitin nejsou příliš odlišné. Největší roztažnost (dilataci) vykazuje slitina ZnAl4 (400), která dosáhla 0,63 [mm], stejné hodnoty dosáhl čistý zinek (Zn), slitina zinku ZnAl8Cu1 (810) dosáhla 0,62 [mm], slitina zinku ZnAl4Cu3 (430) dosáhla 0,61 [mm]. Nejmenší roztažnost (dilataci) vykazuje slitina zinku ZnAl4Cu1 (410), která dosáhla 0,60 [mm].

Šestá část této práce byla zaměřena na metalografické hodnocení struktur daných materiálů slitin zinku a čistého zinku.

### **Osobní přínos práce**

Disertační práce je zaměřena na ucelení poznatků o zinku a slitinách zinku. Byly použity všechny materiály, které jsem měl na Katedře strojírenské technologie – FS, TU v Liberci k dispozici. Na těchto materiálech byly provedeny různé druhy zkoušek, které nám ukazují, jak se čistý zinek a jeho slitiny chovají při různých podmínkách. Především se jedná o slévárenské a mechanické vlastnosti čistého zinku a jeho slitin. Pro všechny tyto zkoušky byly zpracovány tabulky a grafy, ve kterých najdeme potřebné hodnoty (za jakých podmínek, se určitá slitina chová). Informace z této disertační práce lze uplatnit ve slévárenské praxi. Tato práce hodnotí čistý zinek a jeho slitiny ze všech možných pohledů. Rád bych získanými výsledky práce přispěl k řešení problémů s materiály čistého zinku a slitin zinku v technickém průmyslu.

## 7. Seznam literatury

- [1] PÍŠEK, F., JENÍČEK, L., RYŠ, P.: Nauka o materiálu I: nauka o kovech. 3. svazek neželezné kovy. 2. rozšířené a zcela přepracované vydání. Praha: Academia, 1973.
- [2] GRÍGEROVÁ, T., LUKÁČ, I., KOŘENÝ, R.: Zliévárstvo neželezných kovov. 1.vydání, Bratislava/Praha 1988.
- [3] NOVÁ, I: Teorie slévání 2.díl. Teoretické základy metalurgie slévárenských slitin. [Skripta], Liberec: FS-TU v Liberci, 2007. ISNB 978-80-7372-185-5.
- [4] NOVÁ, I.: Tepelné procesy ve slévárenských formách. [Skripta] KSP-FS, TU v Liberci, 2003.
- [5] PŘIBYL, J., VETIŠKA, A.: Teorie slévárenství. 1. vyd. Praha, 1974.
- [6] HOŠEK, Z.: Changes of the dimensions during solidification cast iron. [Diploma thesis]. KSP-FS, TU v Liberci, 2001.
- [7] PĚNIČKA P.: Monitoring of the Braced Shrinkage Cooling Casting From Zinc and Aluminium [Thesis]. KSP-FS, TU OF LIBEREC, 2007.
- [8] OTÁHAL, V.: Výroba odlitků z neželezných slitin a jejich uplatnění v jednotlivých oborech Slévárenství č. 2-3, 2001, s.147-156, ISSN 0037-6825.
- [9] KRÝSLOVÁ, S: Sledování slévárenských vlastností slitin zinku pro výrobu odlitků. [Disertační práce] KSP, FS – TU v Liberci, 2008.
- [10] LIPIŃSKI, T.: Temperature at the and of phase  $\alpha$  crystallization after modification by exothermically mixture and structure. PAN Katowice Poland year 2004, Volume 4, N 14, p. 267 – 272. PL ISSN 1642-5308.
- [11] PIŽL, J.: Vliv dilatačních procesů při tuhnutí odlitků na tvorbu jejich staženin. [Diplomová práce]. TU –FS – KSM, Liberec 2004.
- [12] VOTOČEK, J.: Sledování rozměrových změn během tuhnutí odlitků ze slitin zinku. [Diplomová práce]. KSM, FS- TU Liberec, 2006.
- [13] FABIAN, V., BOLIBRUCHOVÁ, D.: Výroba Zn-odliatkov odstředivým liatím do silikonovej gumy. Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava. 2. ročník, 2006. s. 35-42.
- [14] KALOUSEK, J., HOLUBEC, Z., KALOUSKOVÁ, G.: Fyzikální chemie metalurgických procesů. [Skripta], FS- VŠST Liberec 1982.
- [15] VÁVRA, P. a kol.: Strojnické tabulky pro SPŠ. 1. vyd. Praha, 1984.

- [16] STŘEDA, I.: Základy rovnovážné termodynamiky. [Skripta], FS- TU v Liberci, 2001.
- [17] ALAXIN, J.: Fyzikální metalurgie I. [Skripta]. FS-VŠST Liberec, 1987.
- [18] ALAXIN, J.: Fyzikální metalurgie II. [Skripta]. FS – VŠST Liberec, 1986.
- [19] Slévárenství ročník LIX . 2011 číslo 5 – 6 ISSN 0037-6825.
- [20] COPE, M. A.: Zinc pressure die-casting - the metal flow system. 1. edition. Australian Zinc Development Association, 1979.
- [21] TAKACH, B. V.: Die casting knowledge. Australian Die Casting Association, 1990.
- [22] NORRIS, J.D.: History of the American Company. 1. edition. Wisconsin Madison, 1969.
- [23] COWIE, C. O.: Zinc alloys casting - product design and development. Australian Die Casting Association, 1992.
- [24] COCKS, E. J., WALERS, B.: A History of the Zinc Smelting Industry in Britain. 1. edition. London: Harrap, 1968. ISBN 0245593772.
- [25] HRABÁNEK, R.: Uplatnění tlakových odlitků ze slitin zinku v konkurenci se slitinami hliníku a hořčíku. Slévárenství č. 4, 2001, s. 223-225, ISSN 0037-6825.
- [26] PTÁČEK, L., USTOHAL, V.: Slitiny zinku pro odlitky. Slévárenství č. 4, 2001. s. 203 - 207, ISSN 0037-6825.
- [27] HERMAN, E. A.: Dimensional repeatability of the Die Casting Process. Australian Die Casting Association, 2000.
- [28] Propagační materiály firmy Ortmann, odlitky ze zinku ( [www.ortmann.cz](http://www.ortmann.cz))





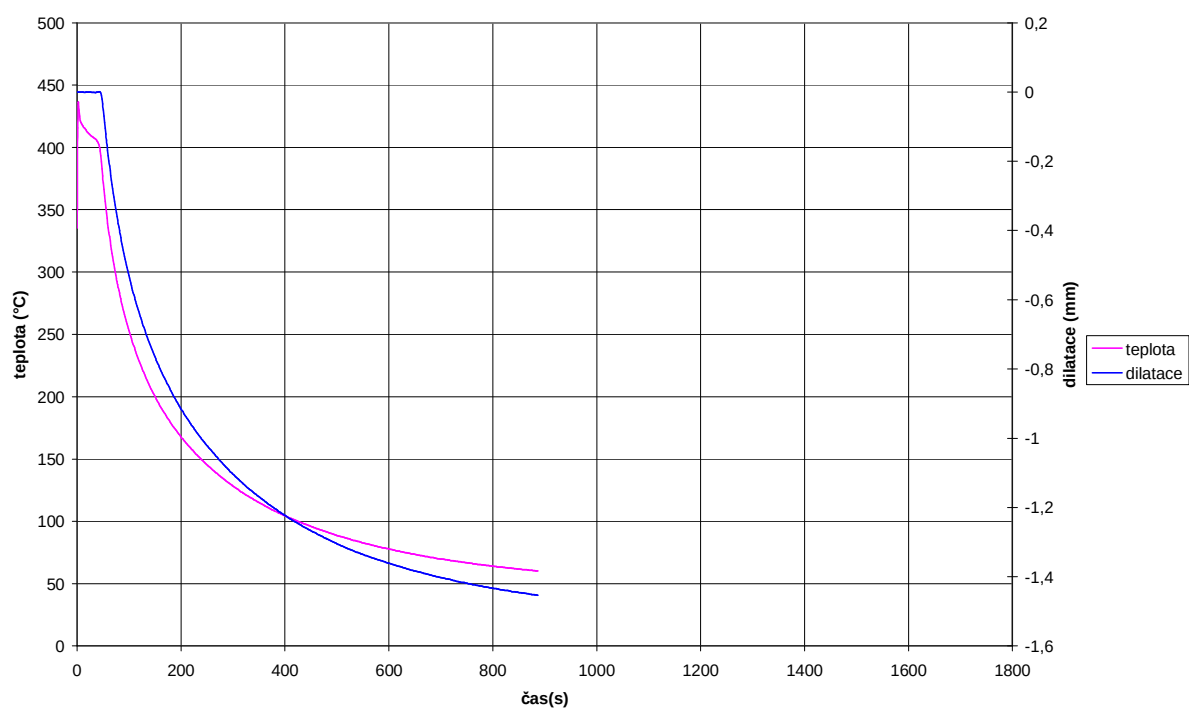
## PŘÍLOHY

## Příloha č. 1

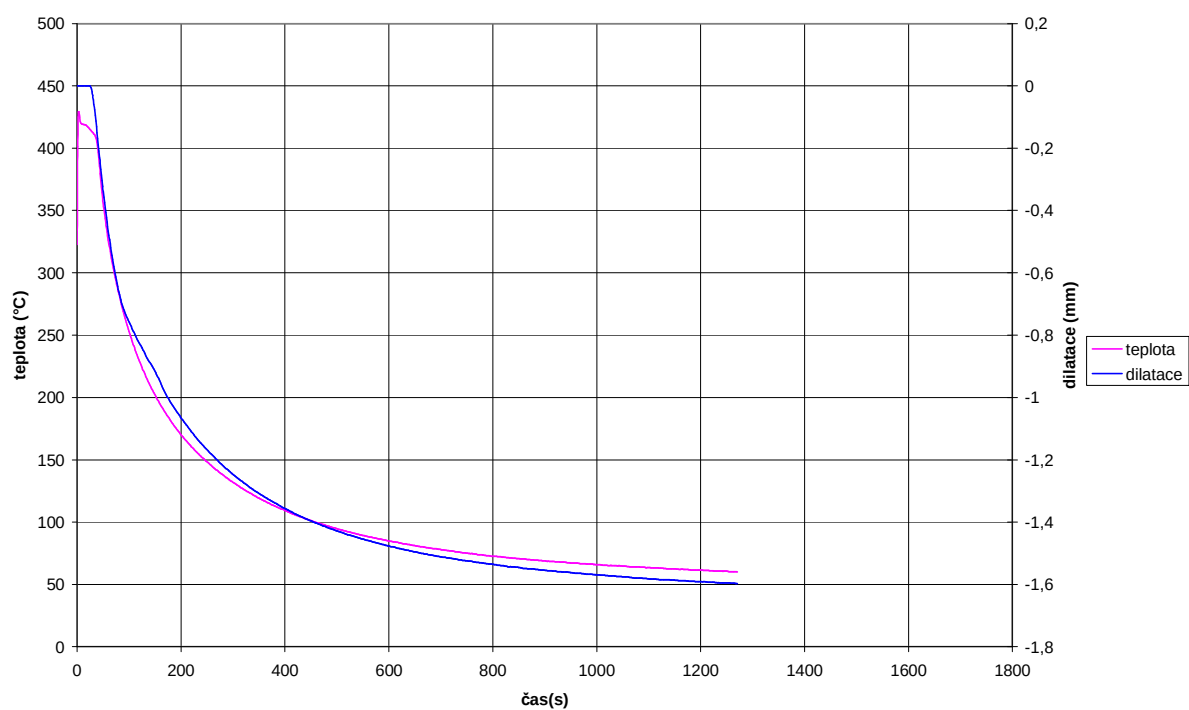
## Normální šířka

## Čistý zinek

1

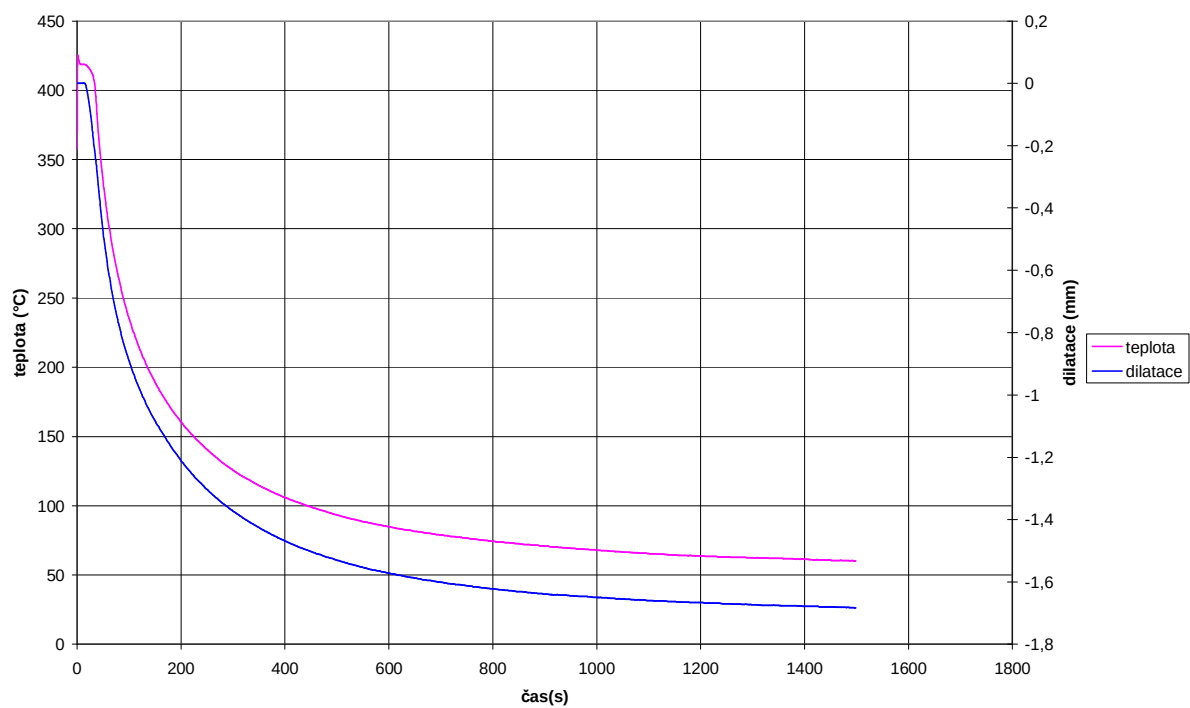


2

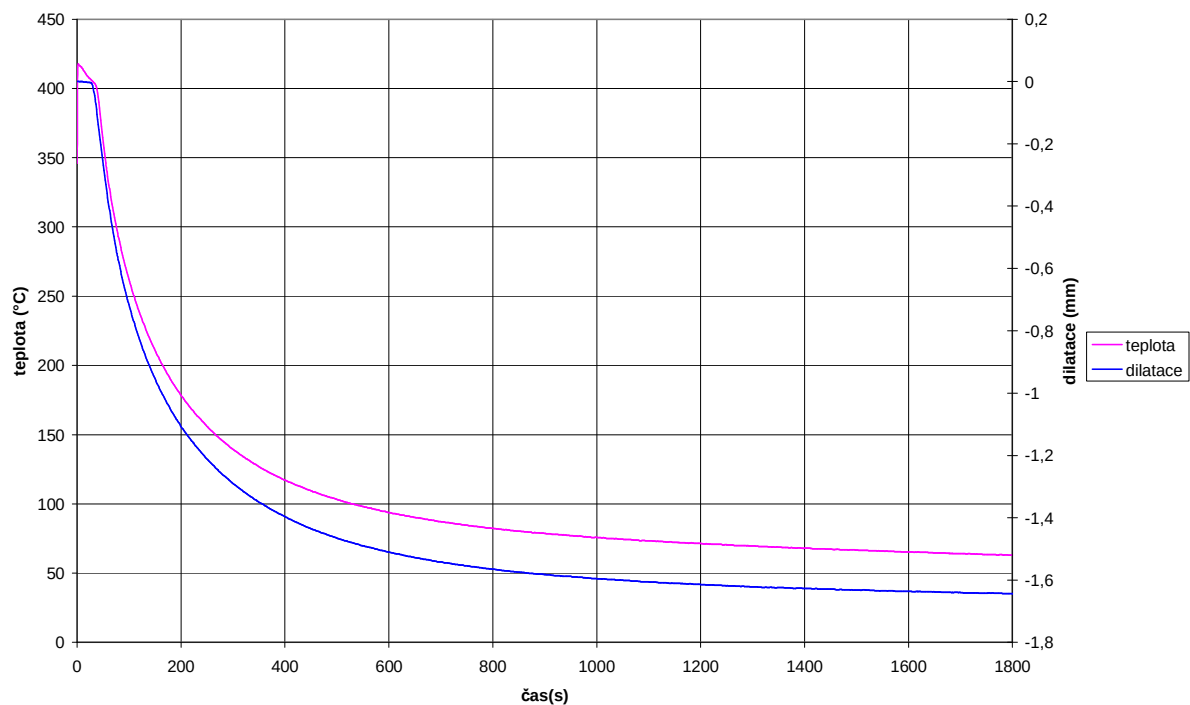


3

## Příloha č.1

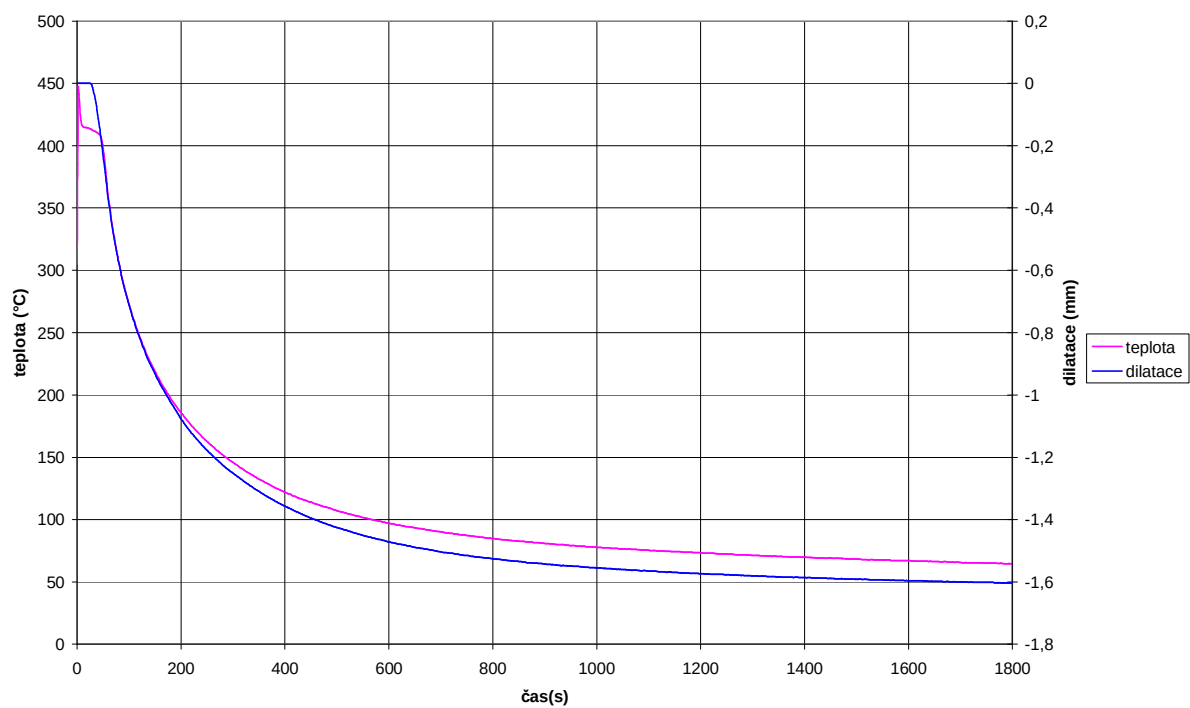


4



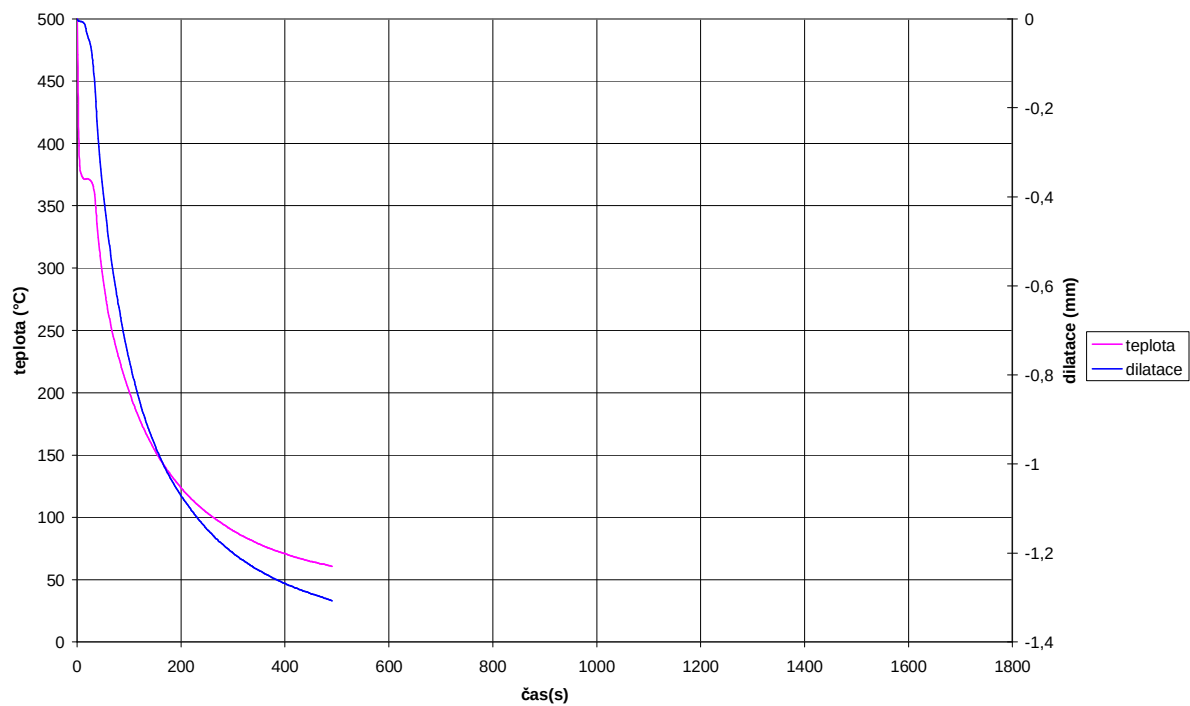
## 5

## Příloha č.1



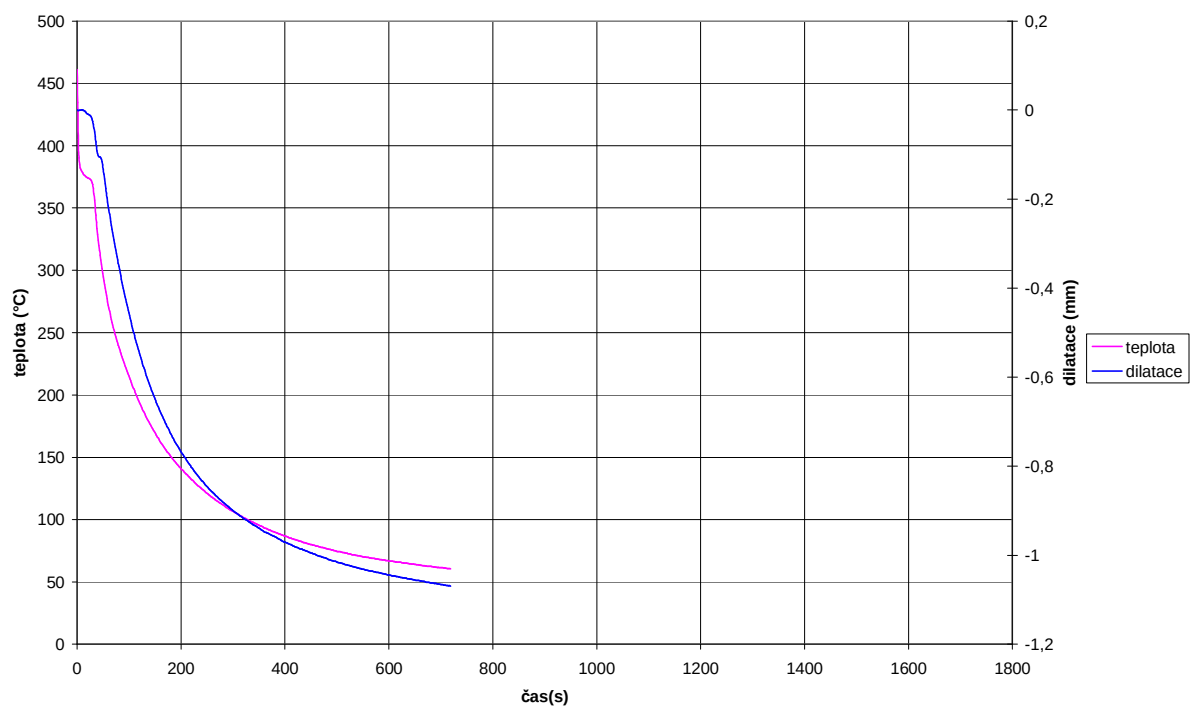
## Zinek 400

## 1

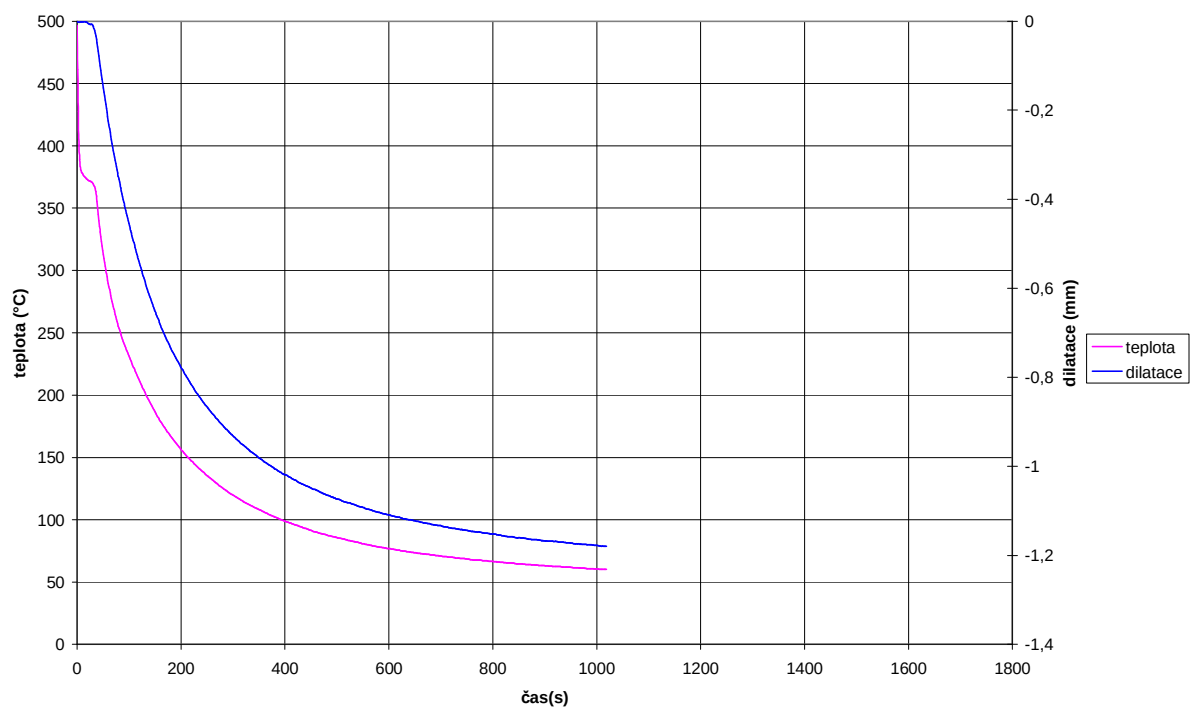


2

## Příloha č.1

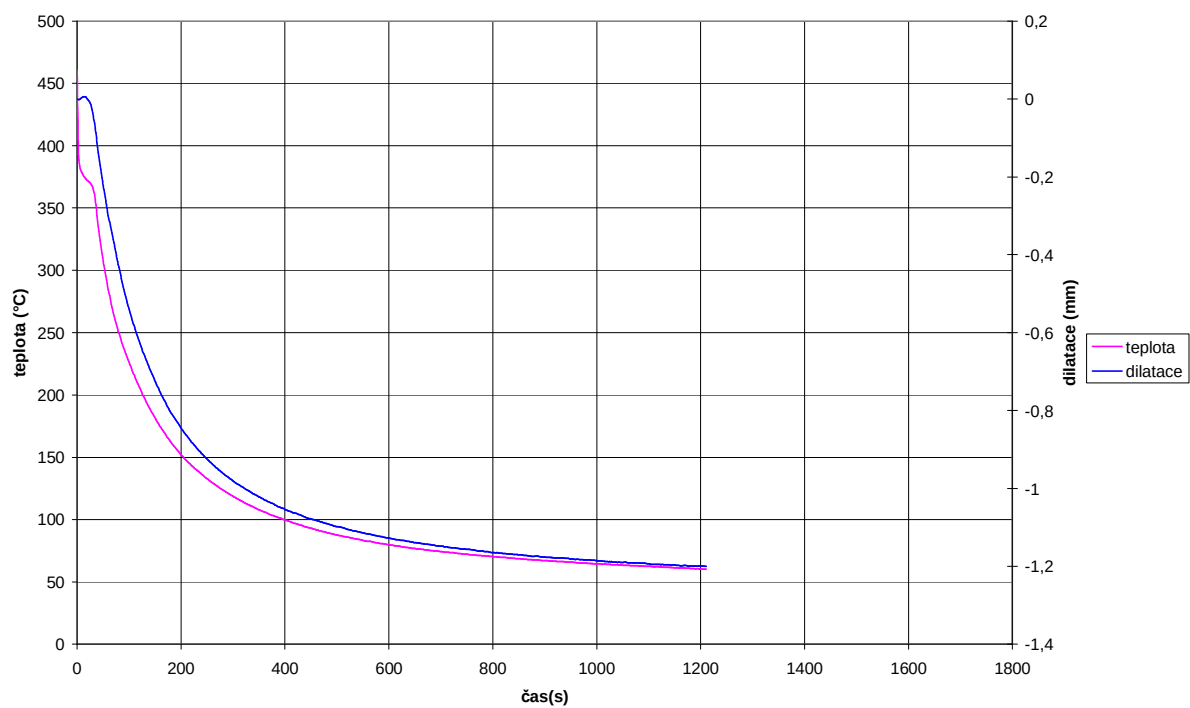


3

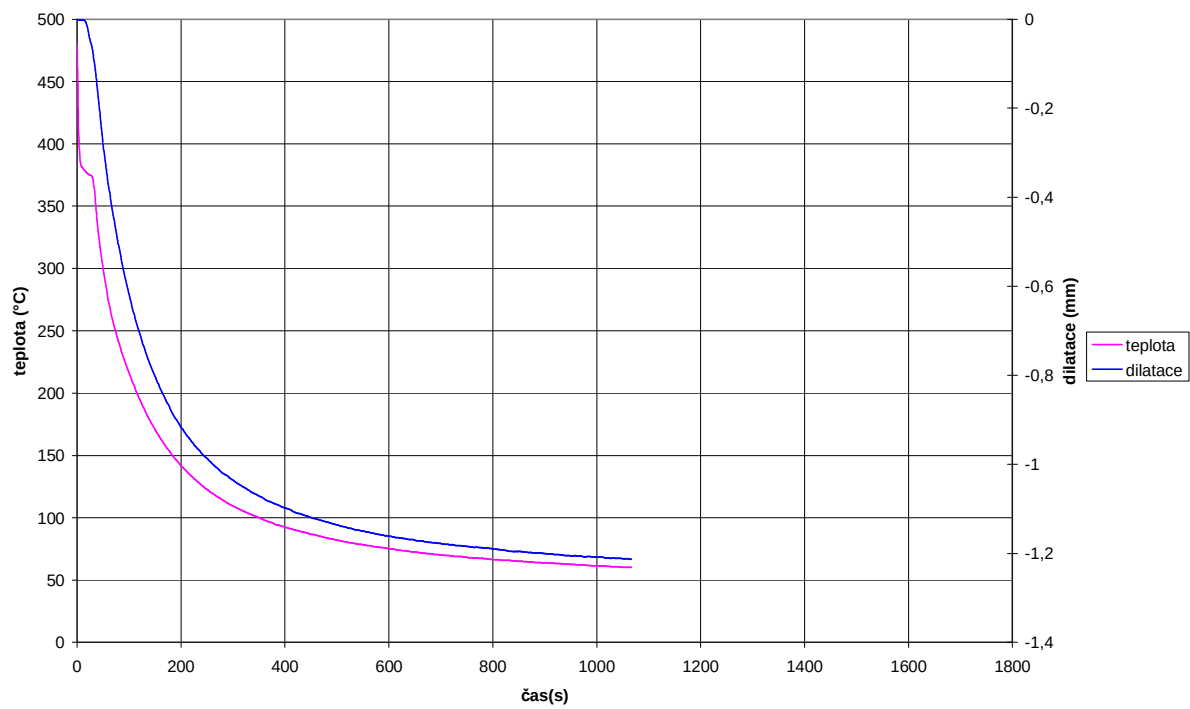


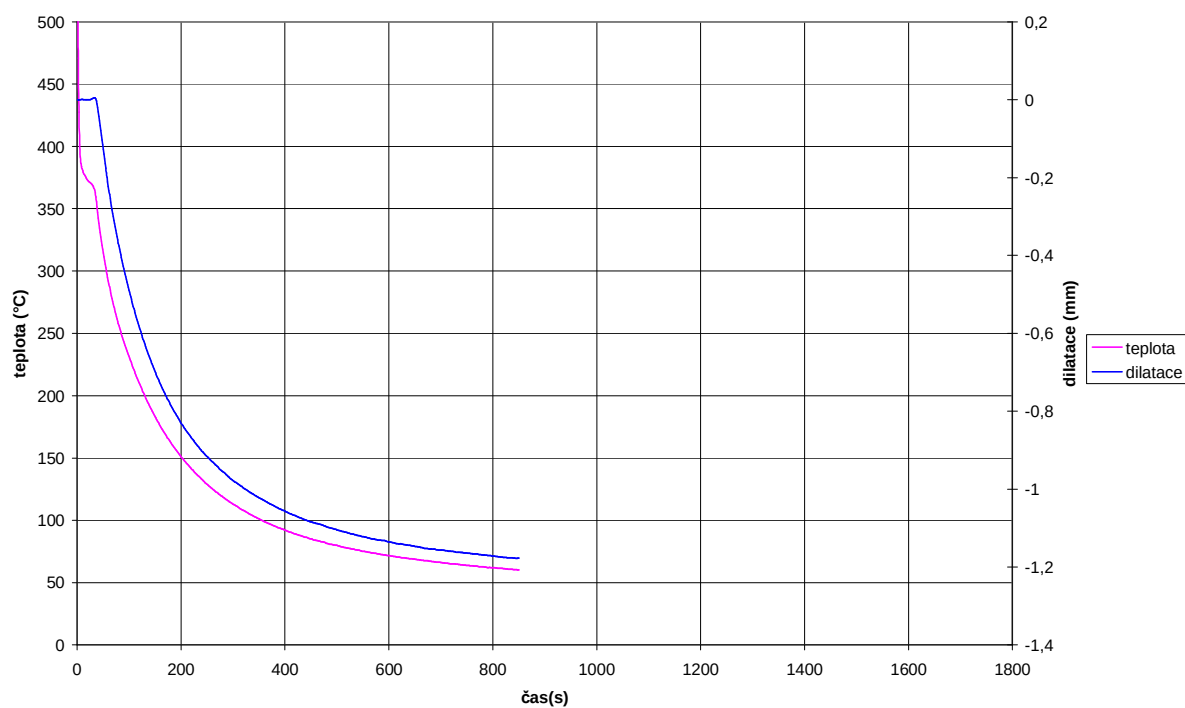
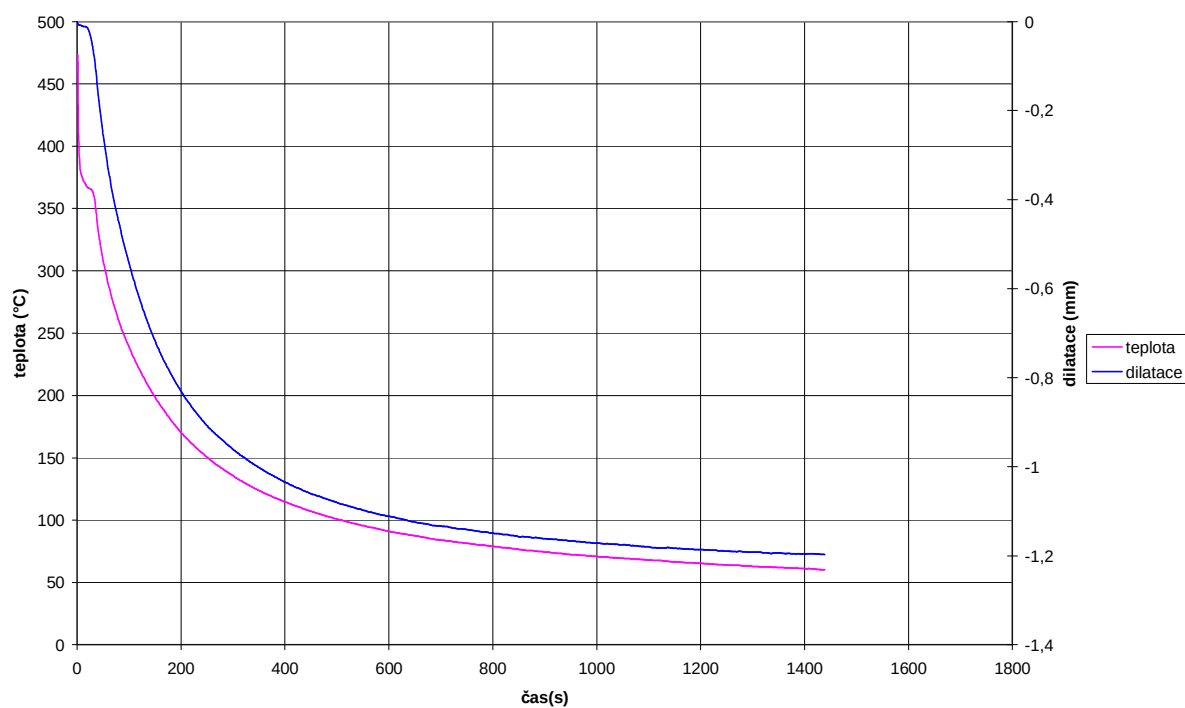
4

## Příloha č.1



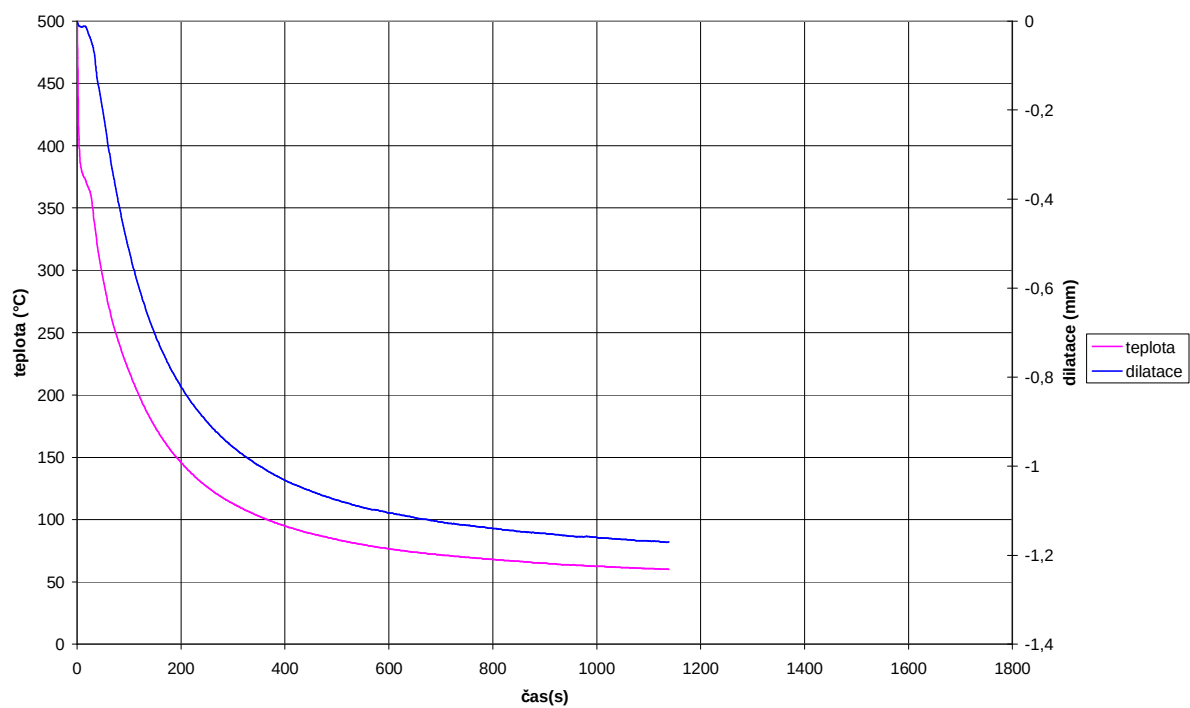
5



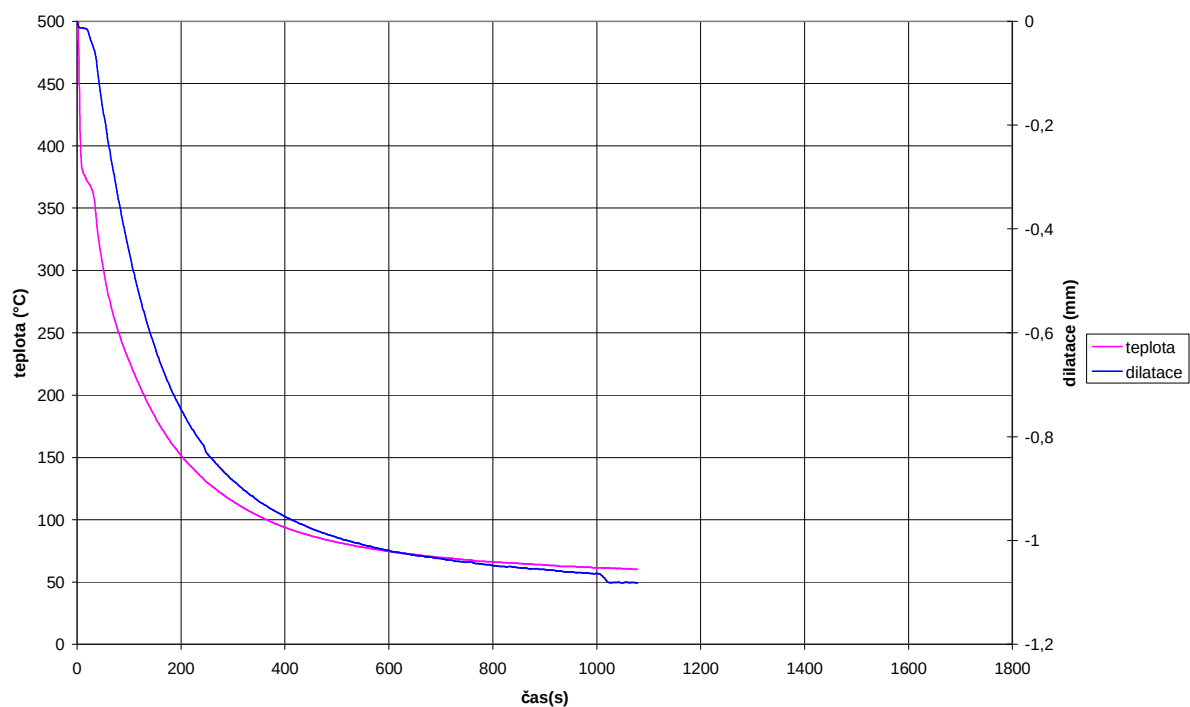
**Zinek 410****1****Příloha č.1****2**

3

## Příloha č.1



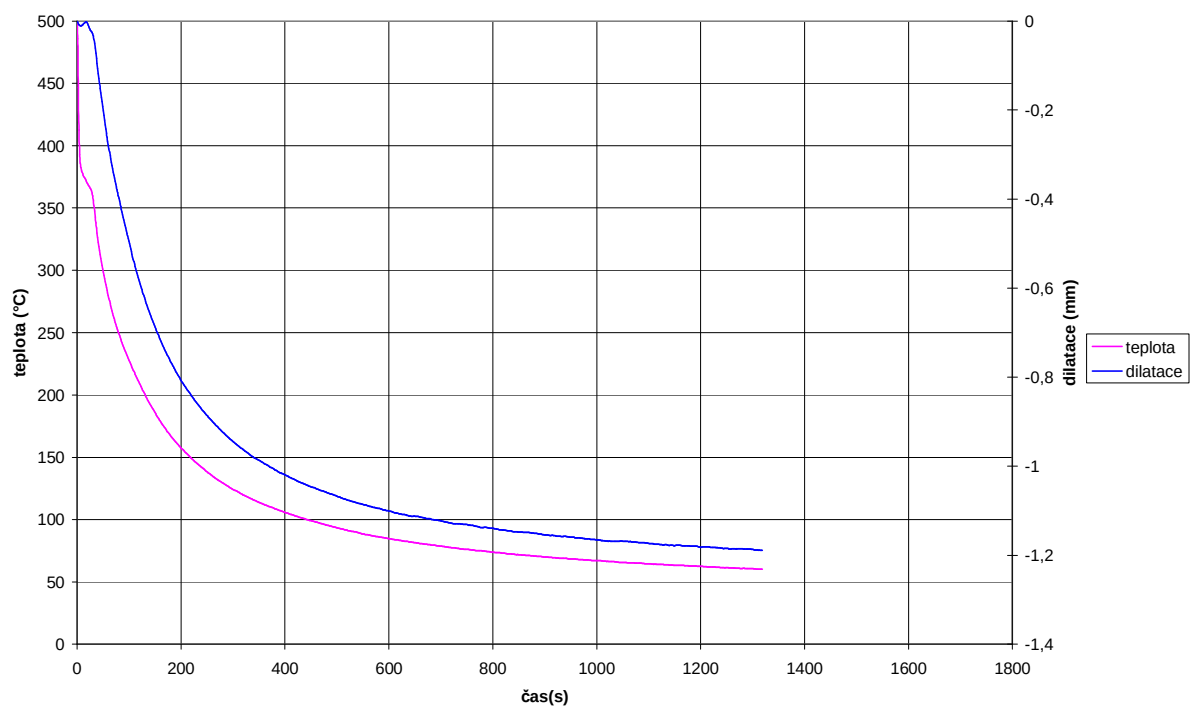
4

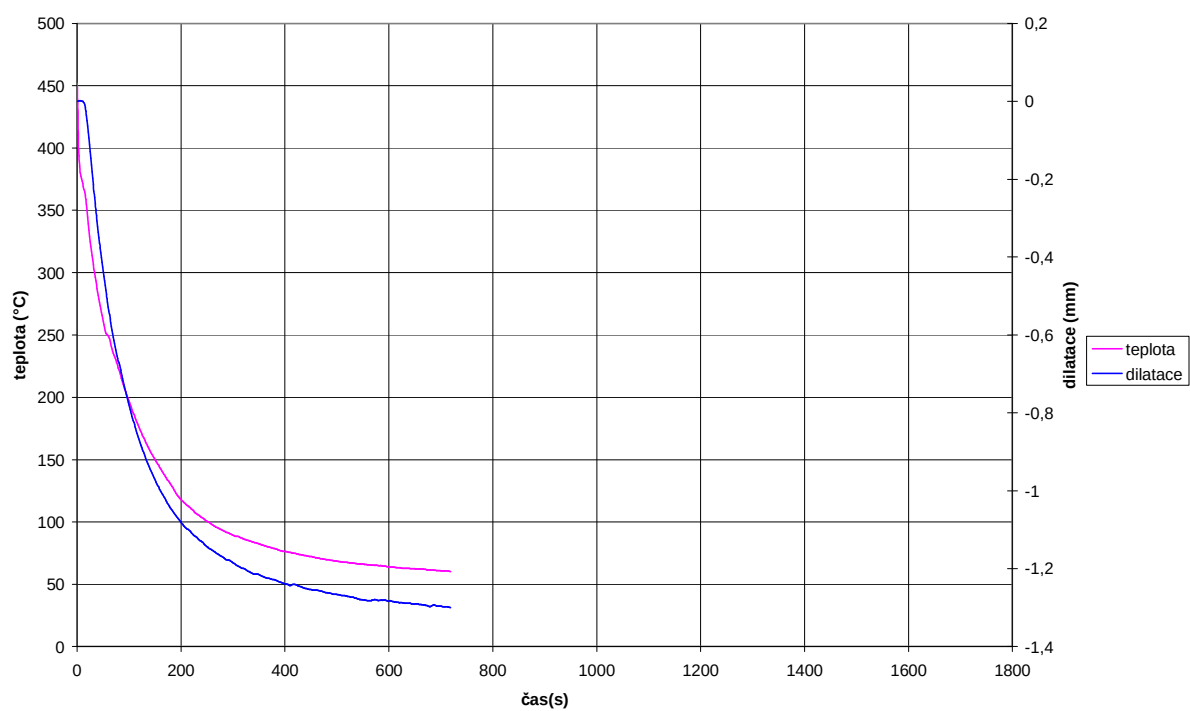
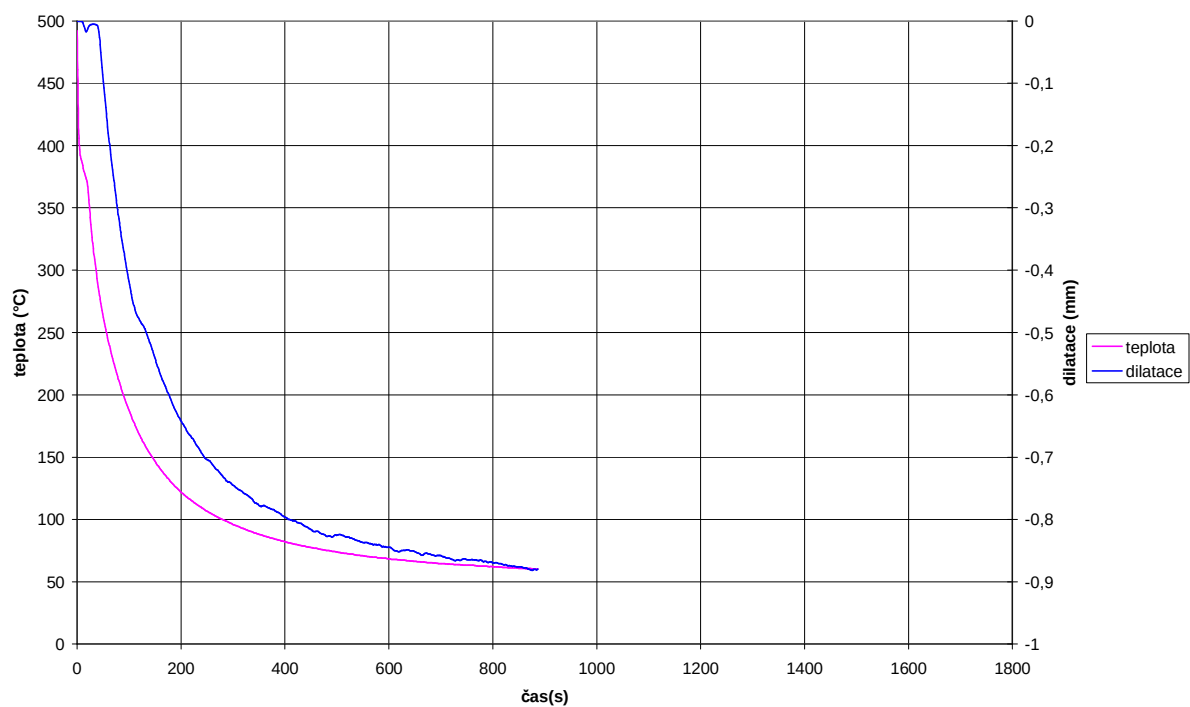




## 5

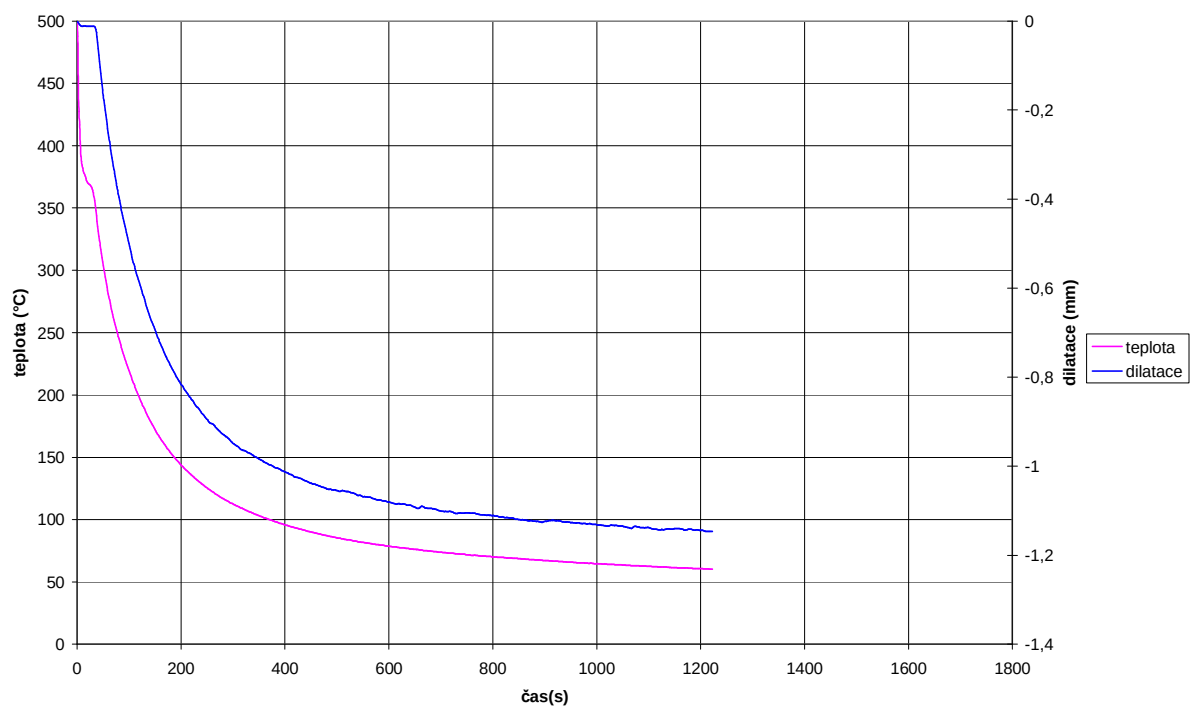
## Příloha č.1



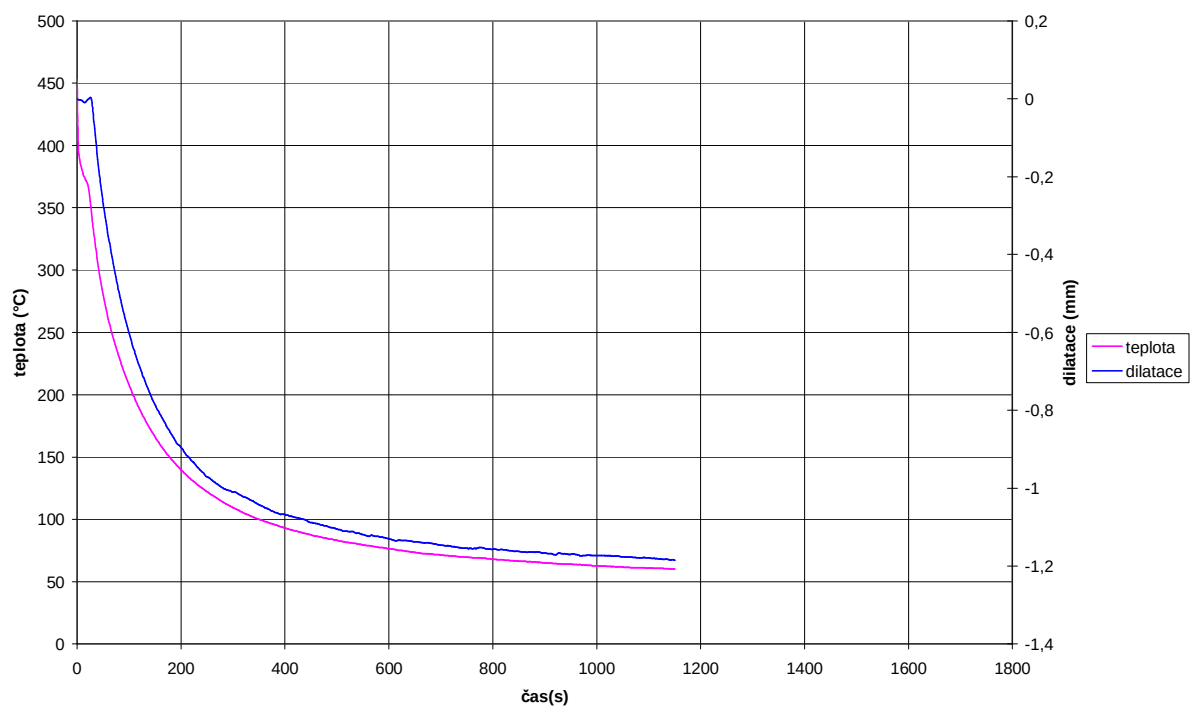
**Zinek 430****1****Příloha č.1****2**

3

## Příloha č.1

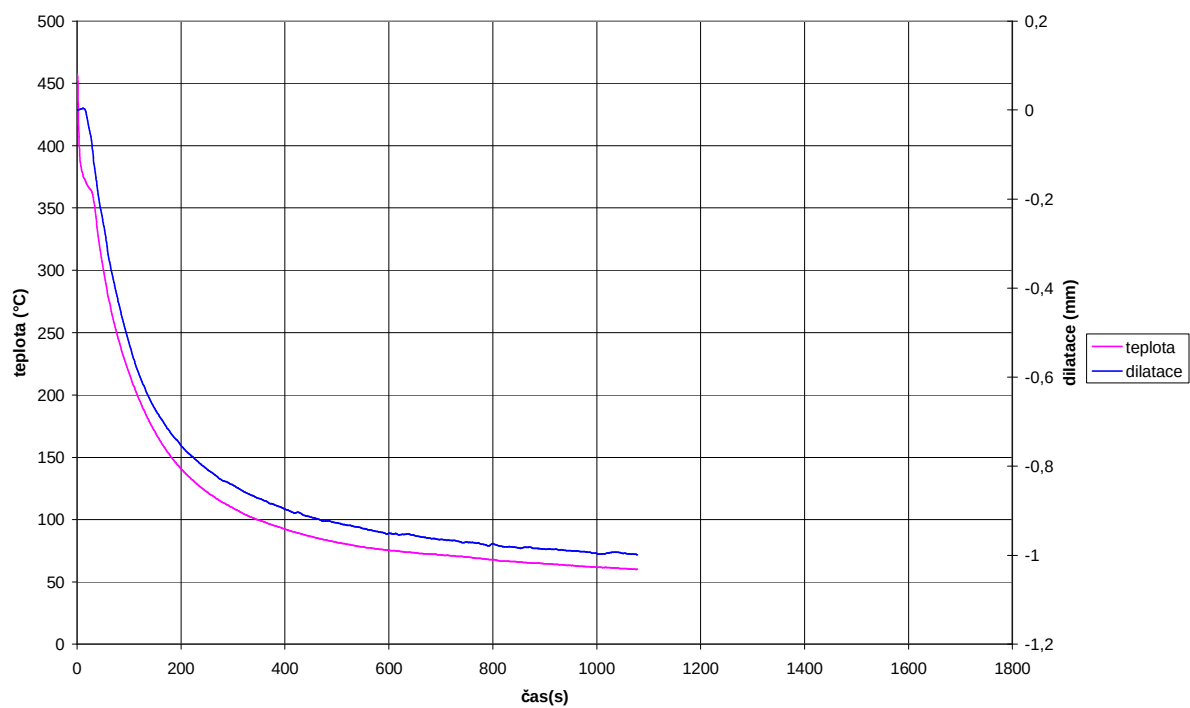


4



## 5

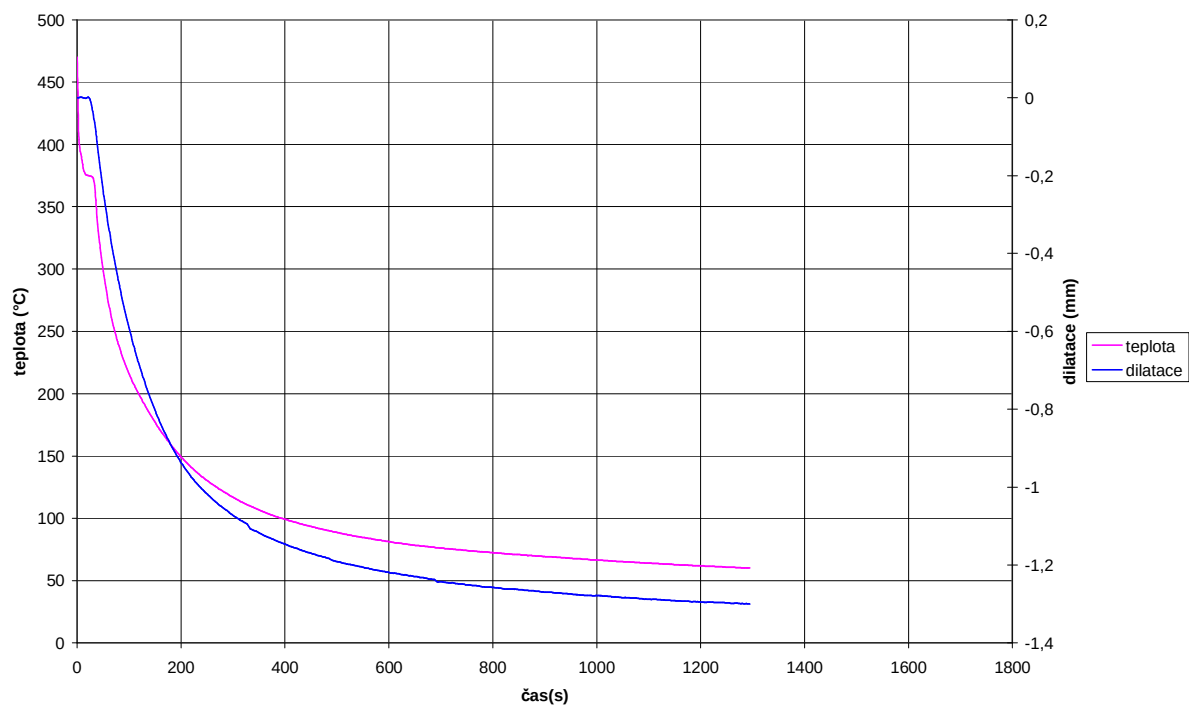
## Příloha č.1



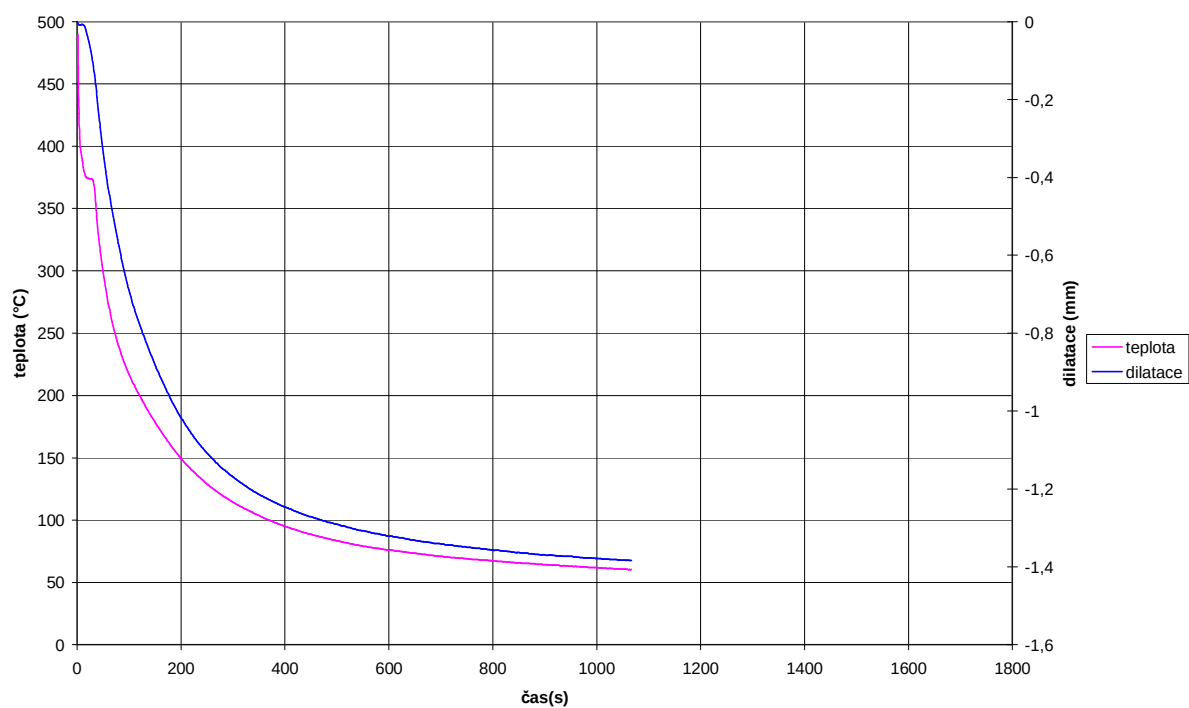
## Zinek 810

1

### Příloha č.1

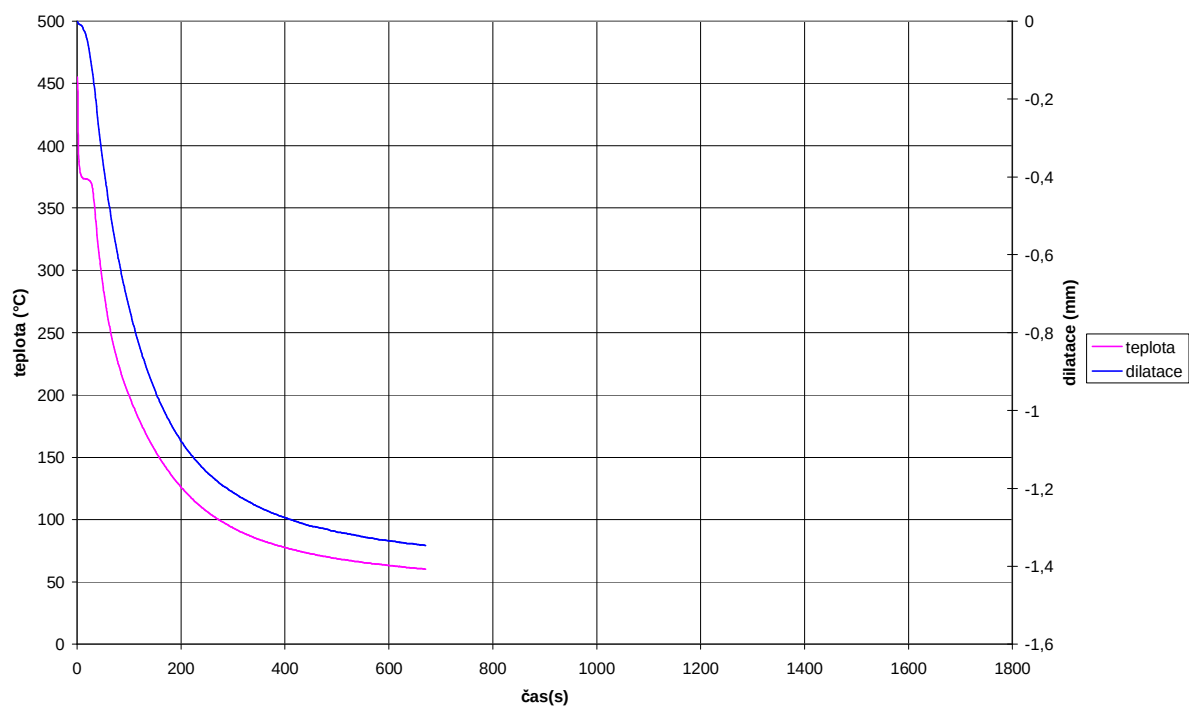


2

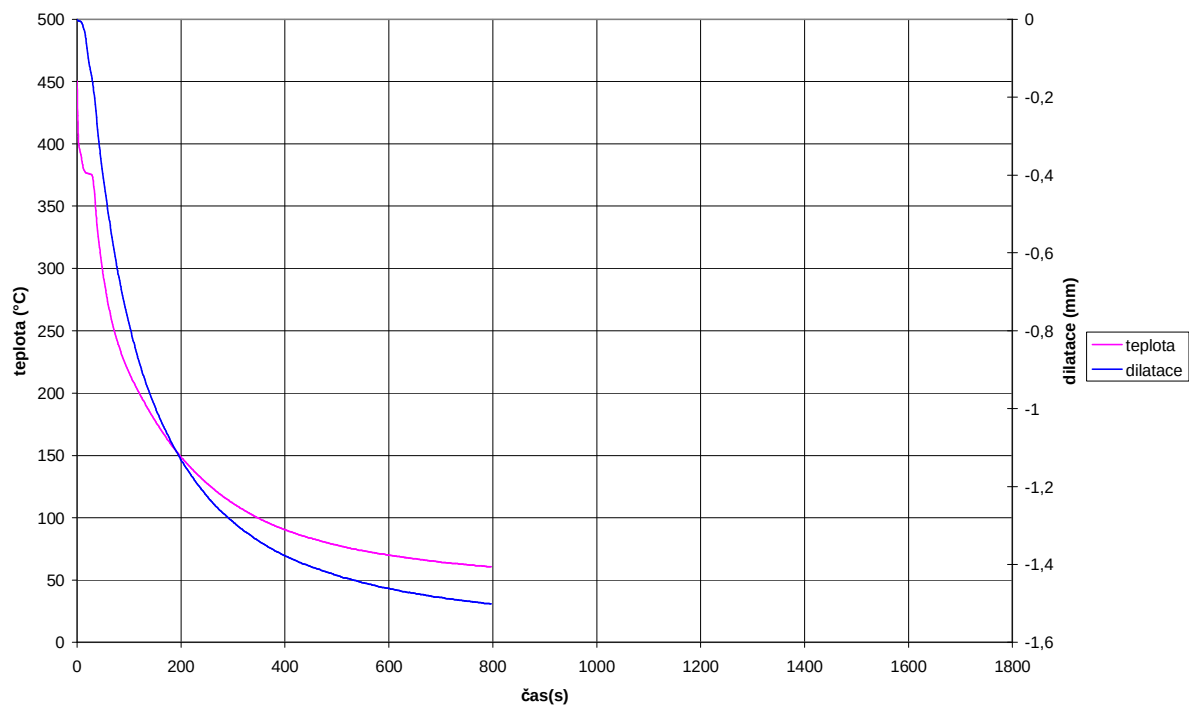


## 3

## Příloha č.1

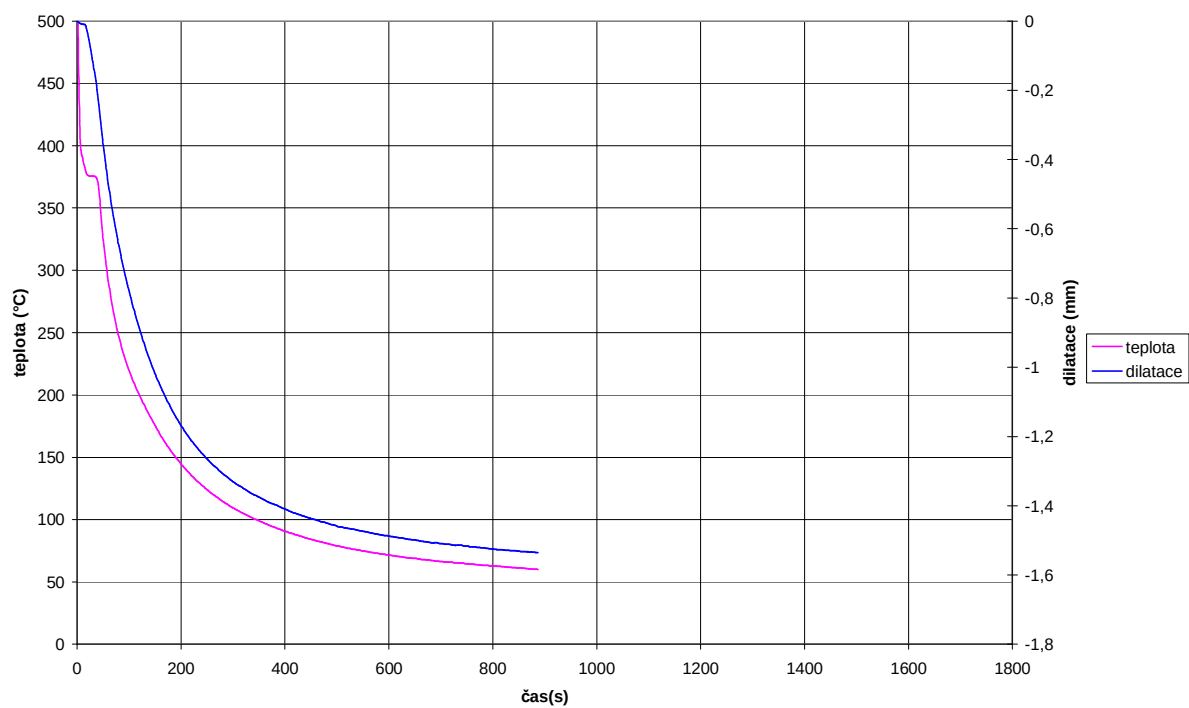


## 4



## 5

## Příloha č.1

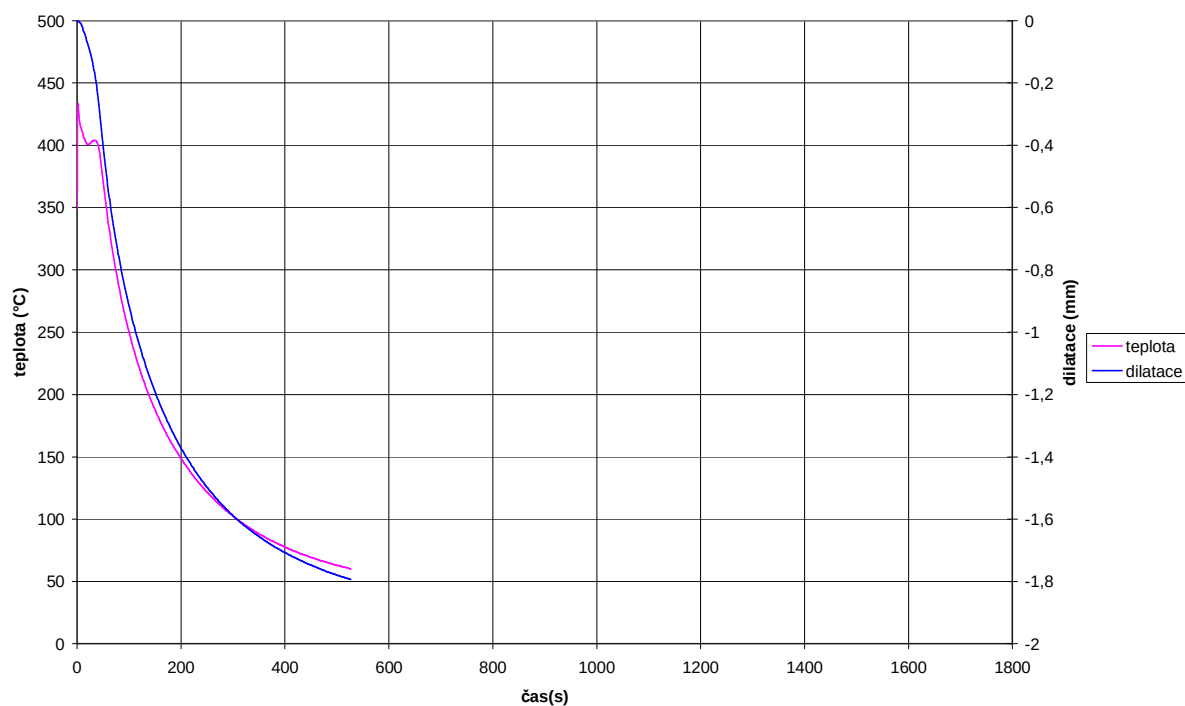


## Příloha č. 2

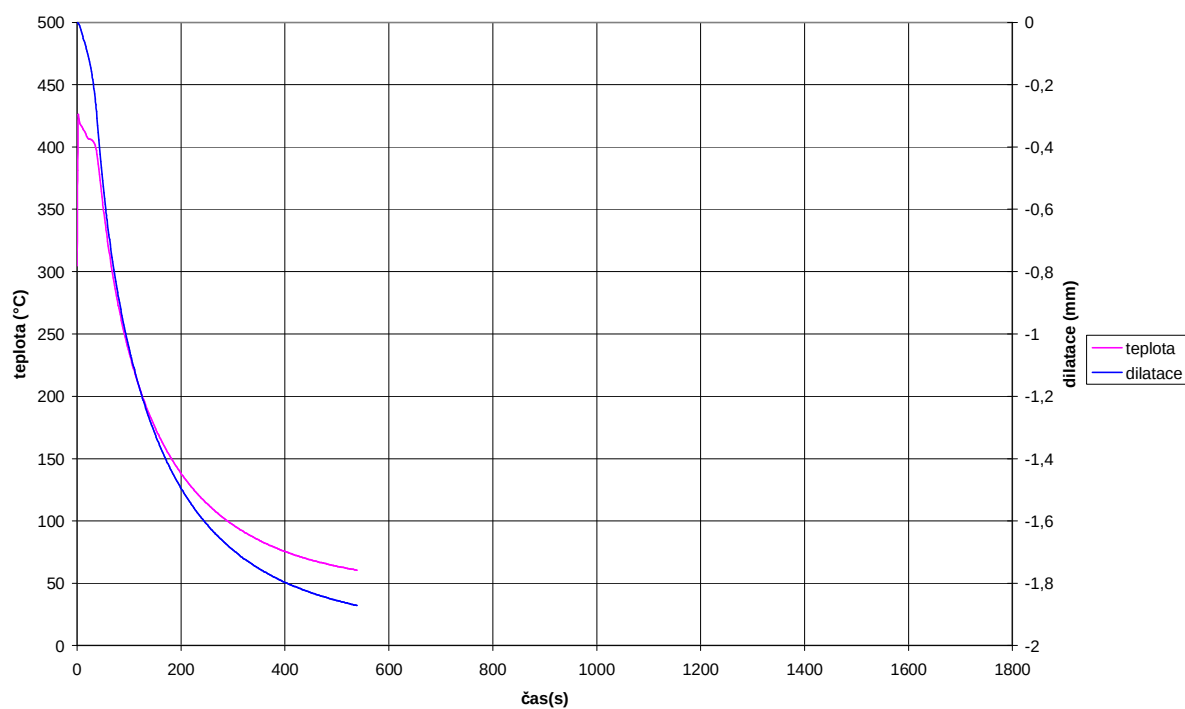
## Normální šířka- chlazená forma

## Čistý zinek

1



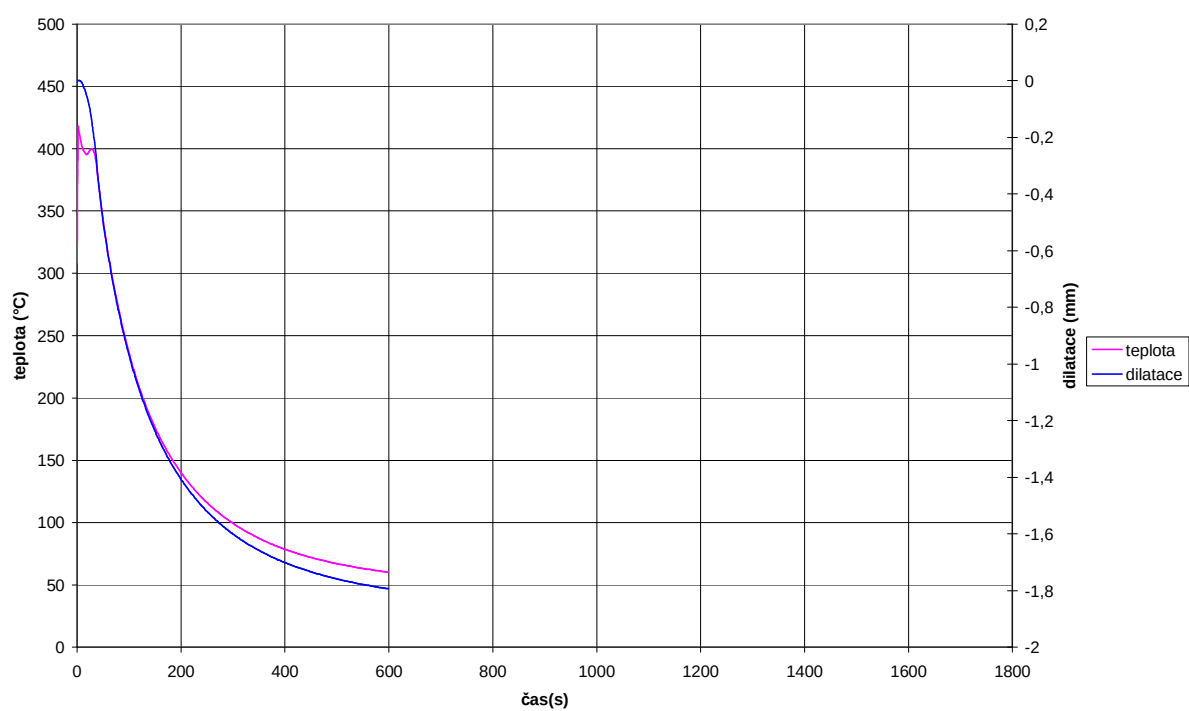
2



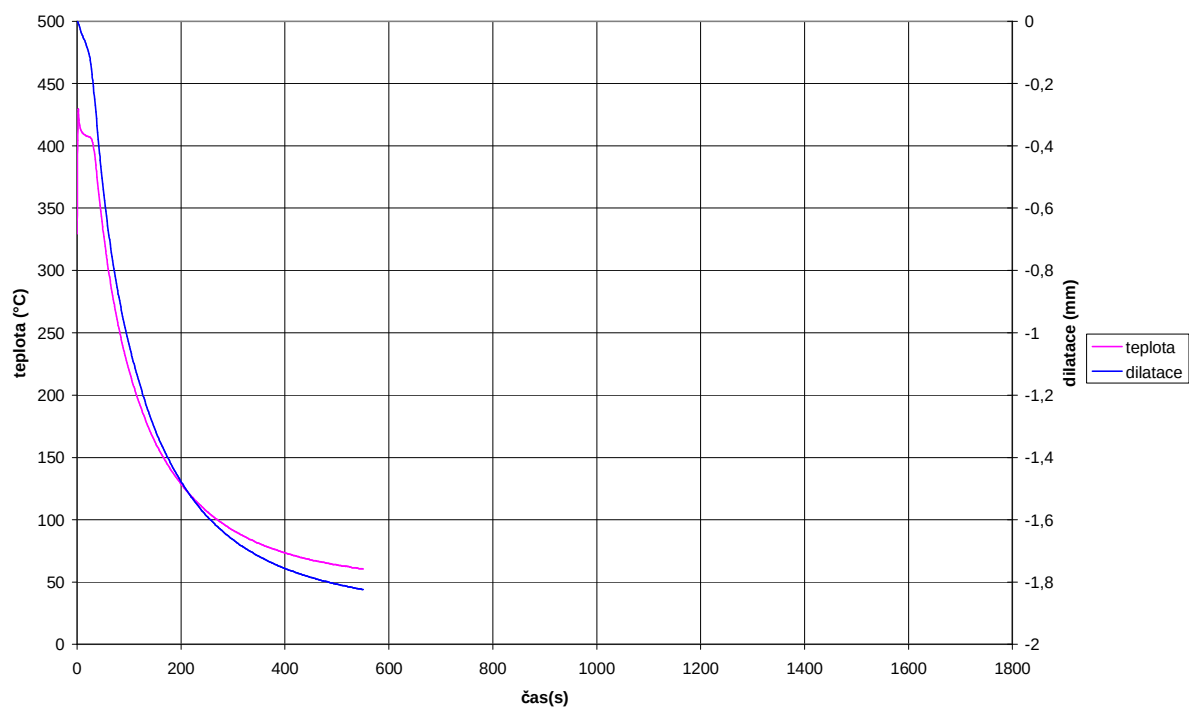


3

## Příloha č.2

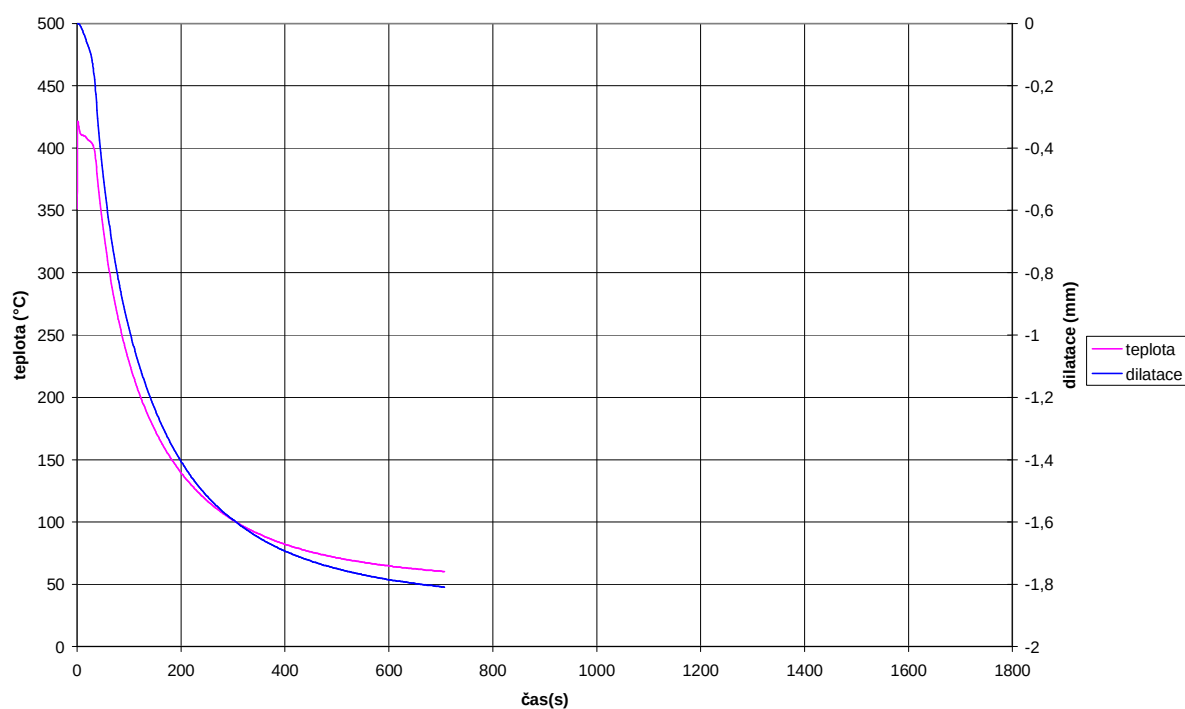


4



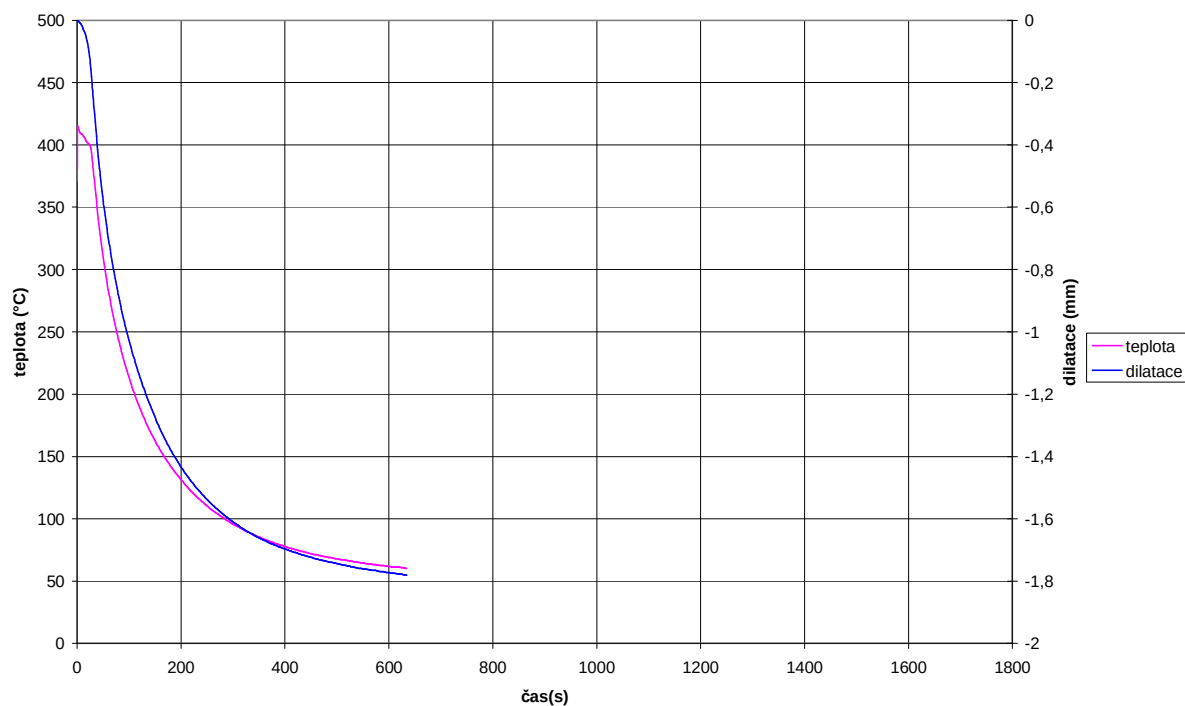
5

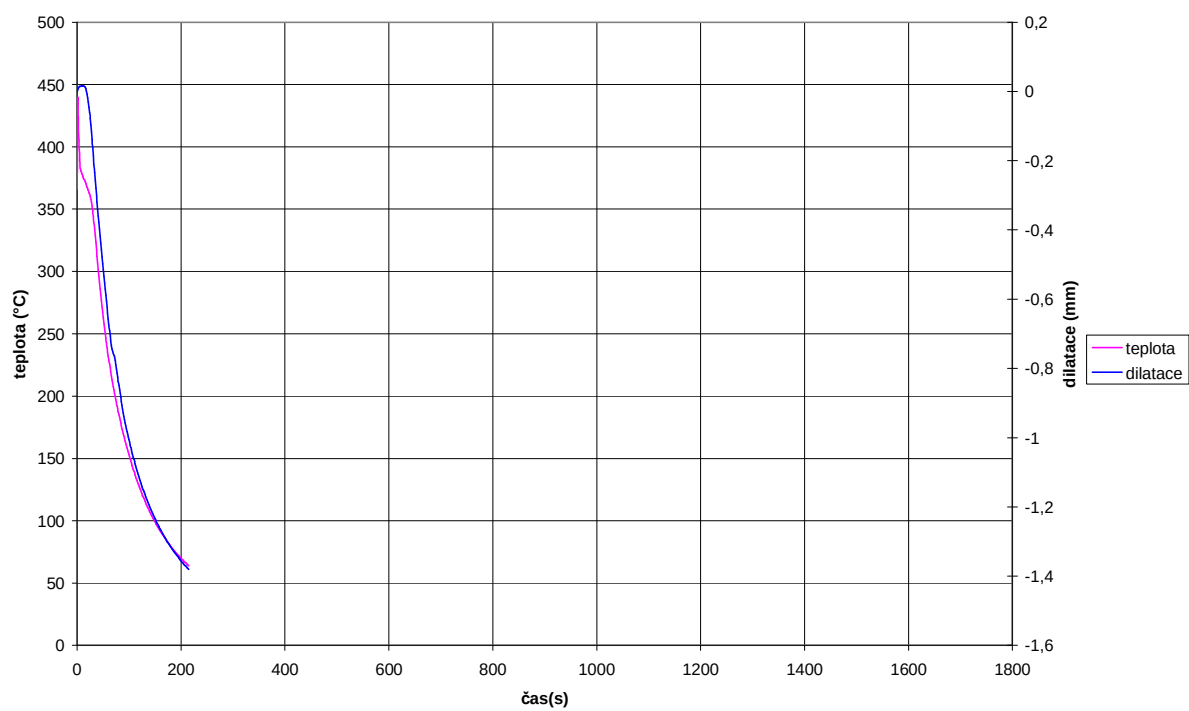
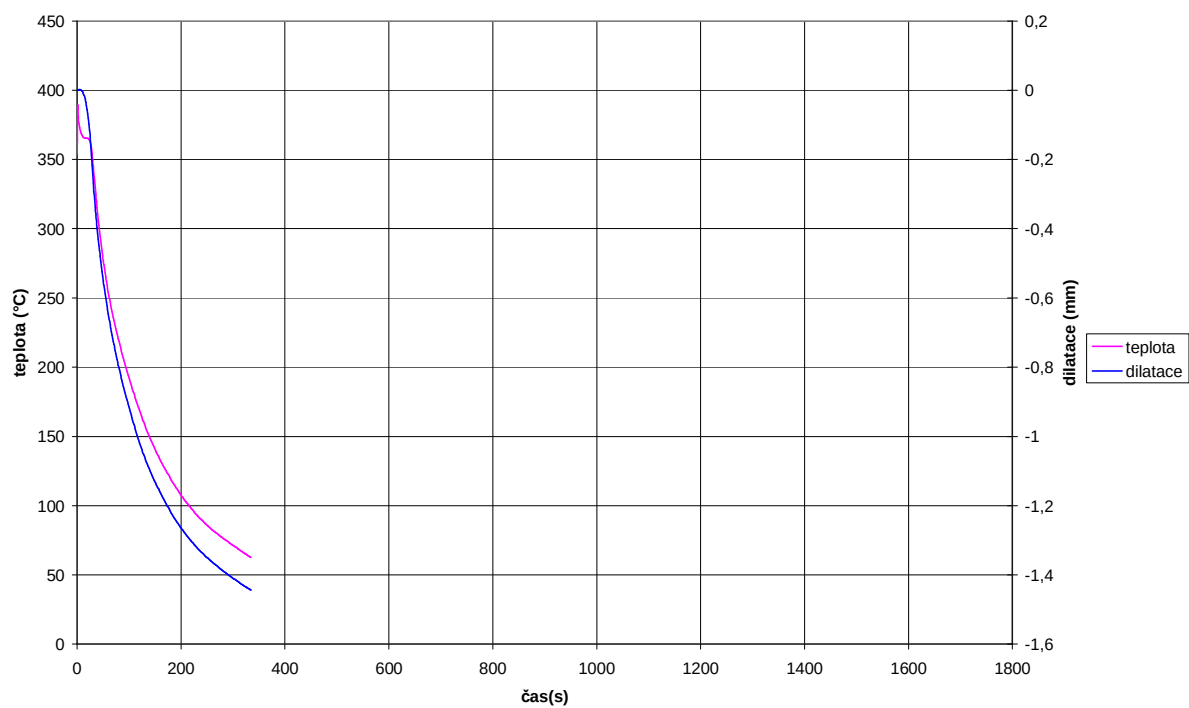
## Příloha č.2



..

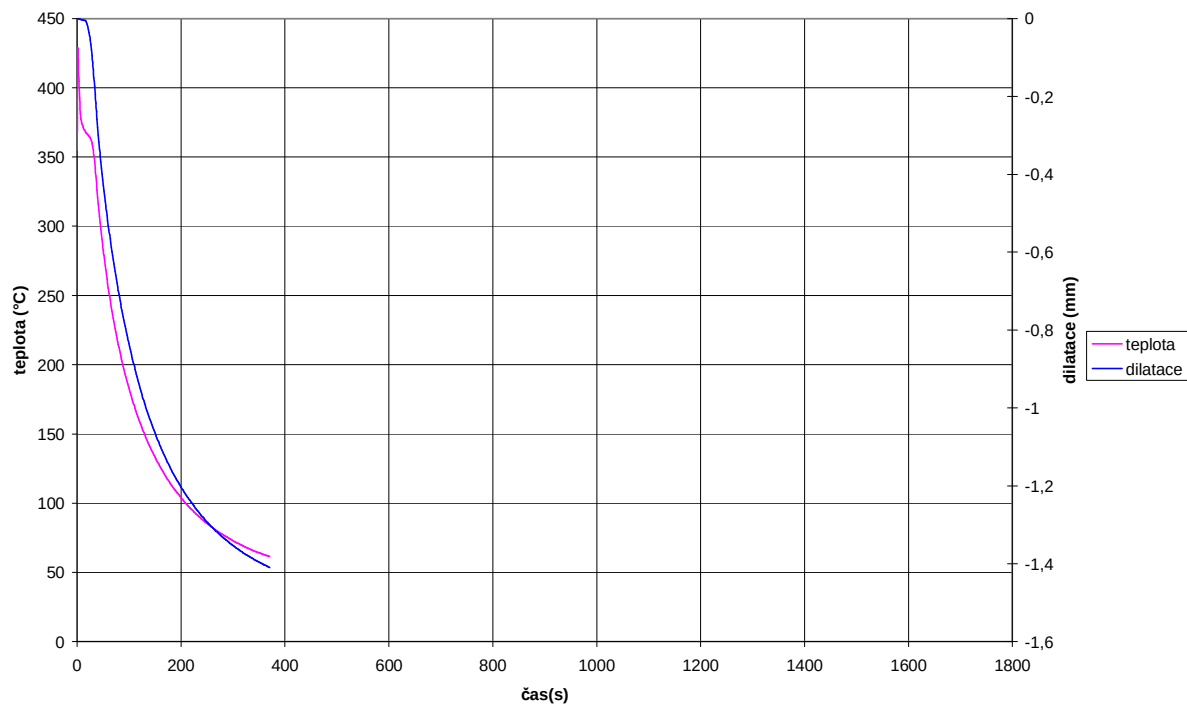
6



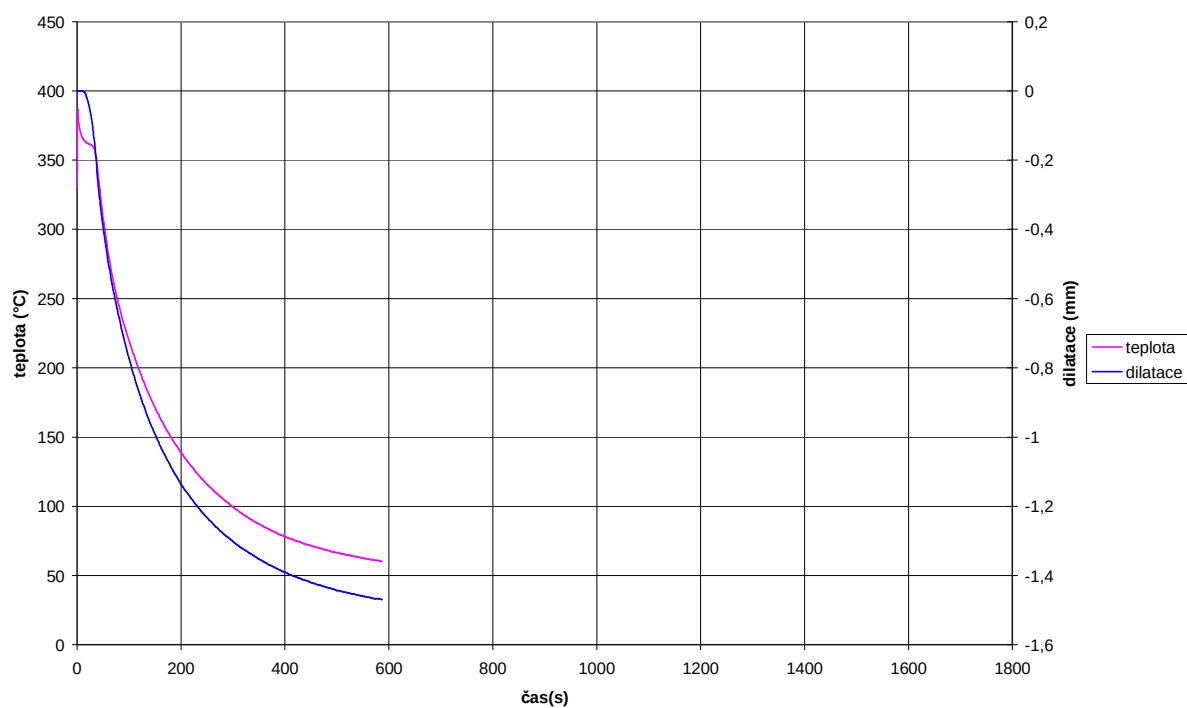
**Zinek 400****1****Příloha č.2****2**

3

## Příloha č.2

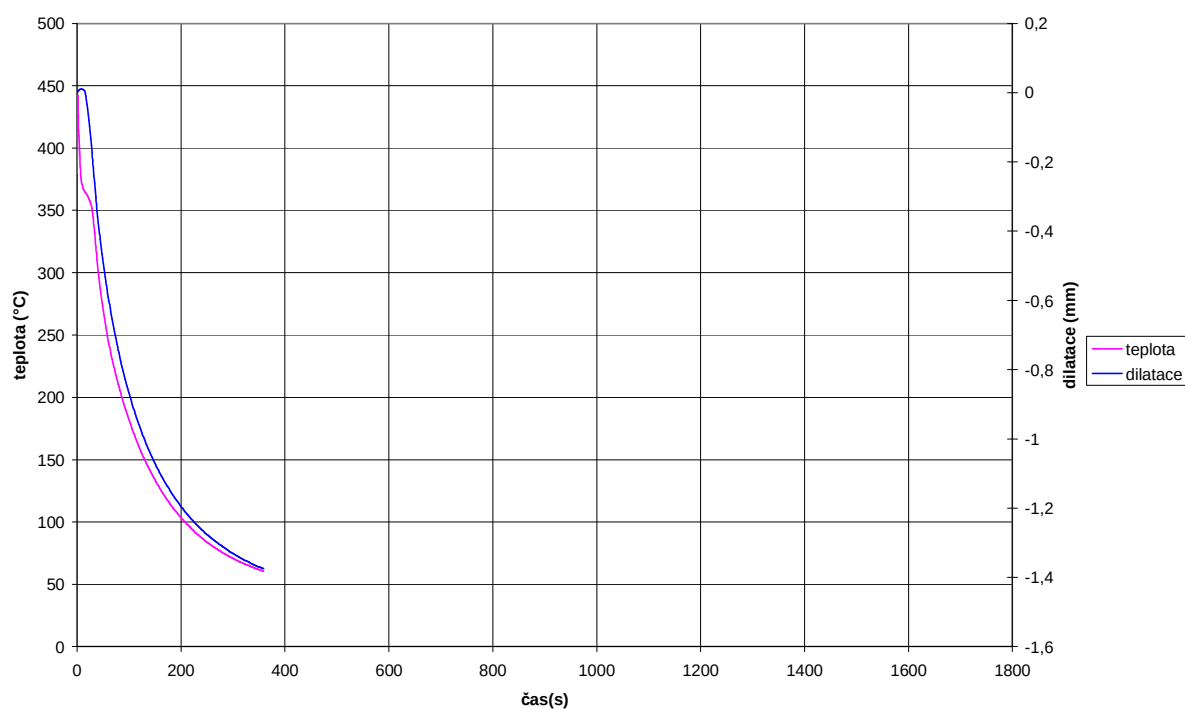


4



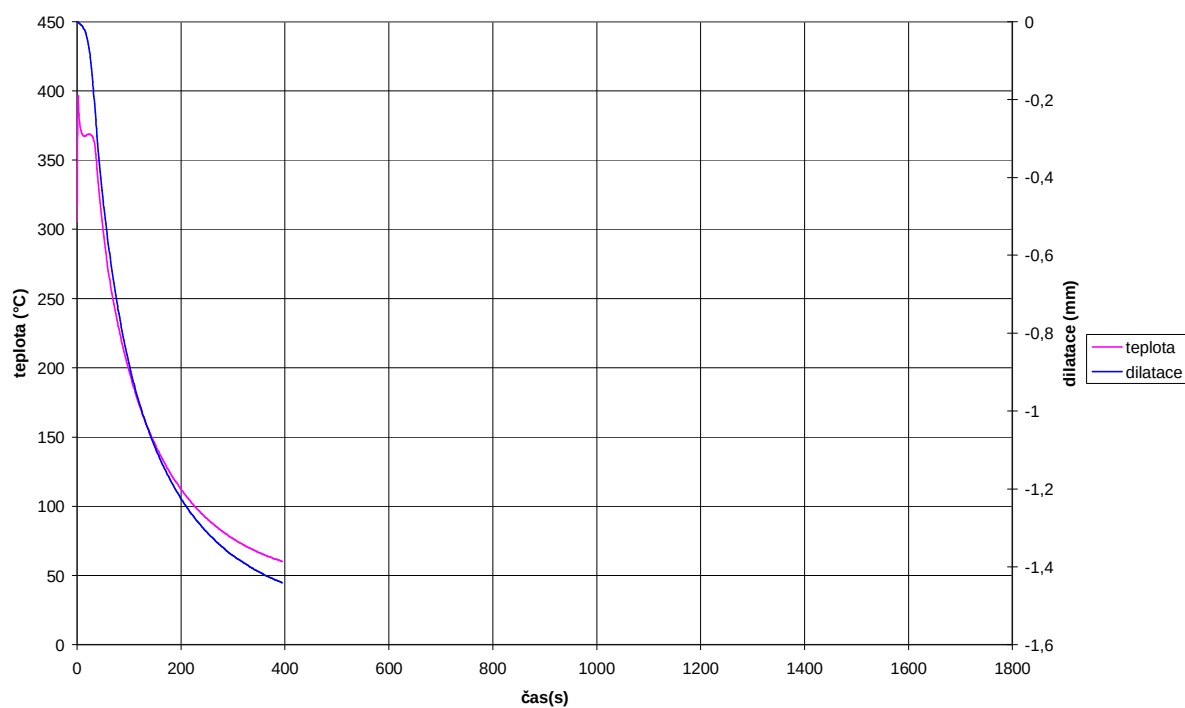
## 5

## Příloha č.2



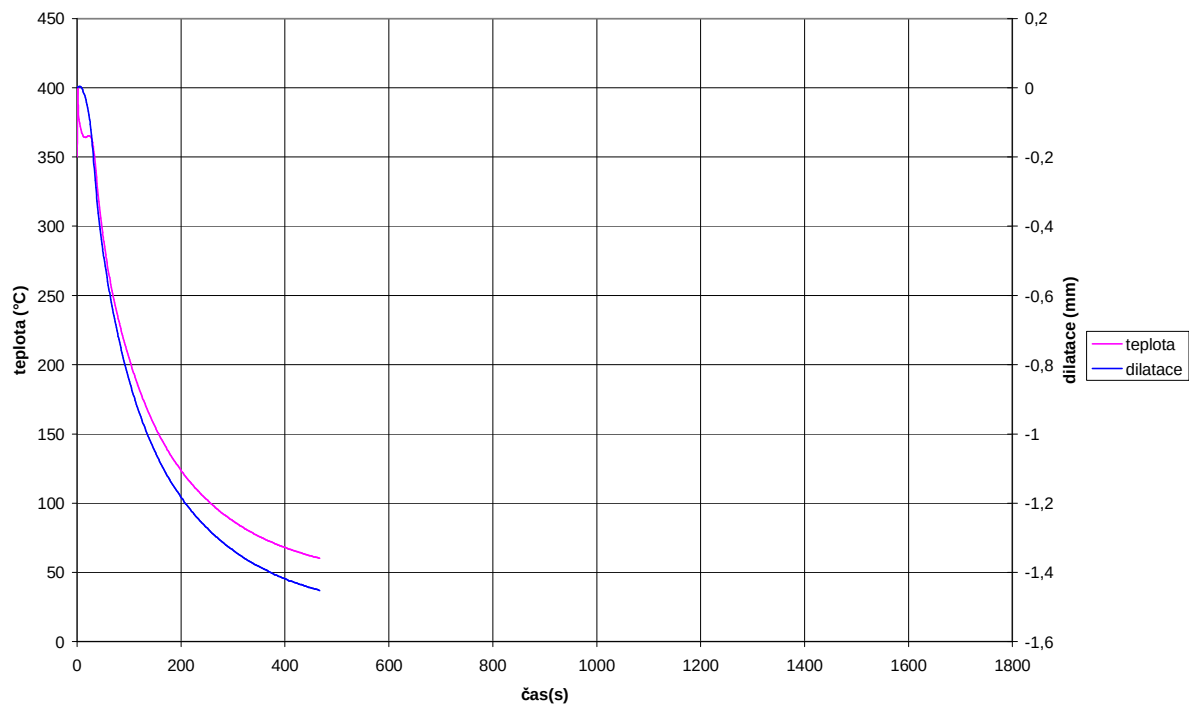
## Zinek 410

## 1

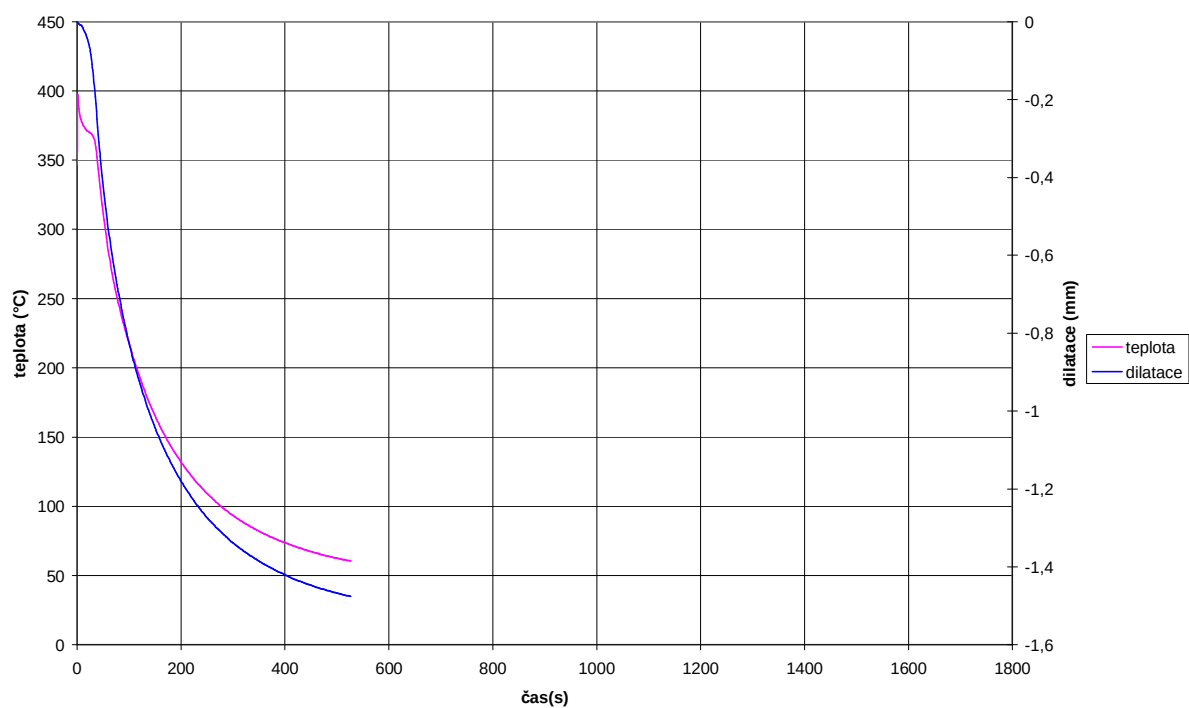


2

## Příloha č.2

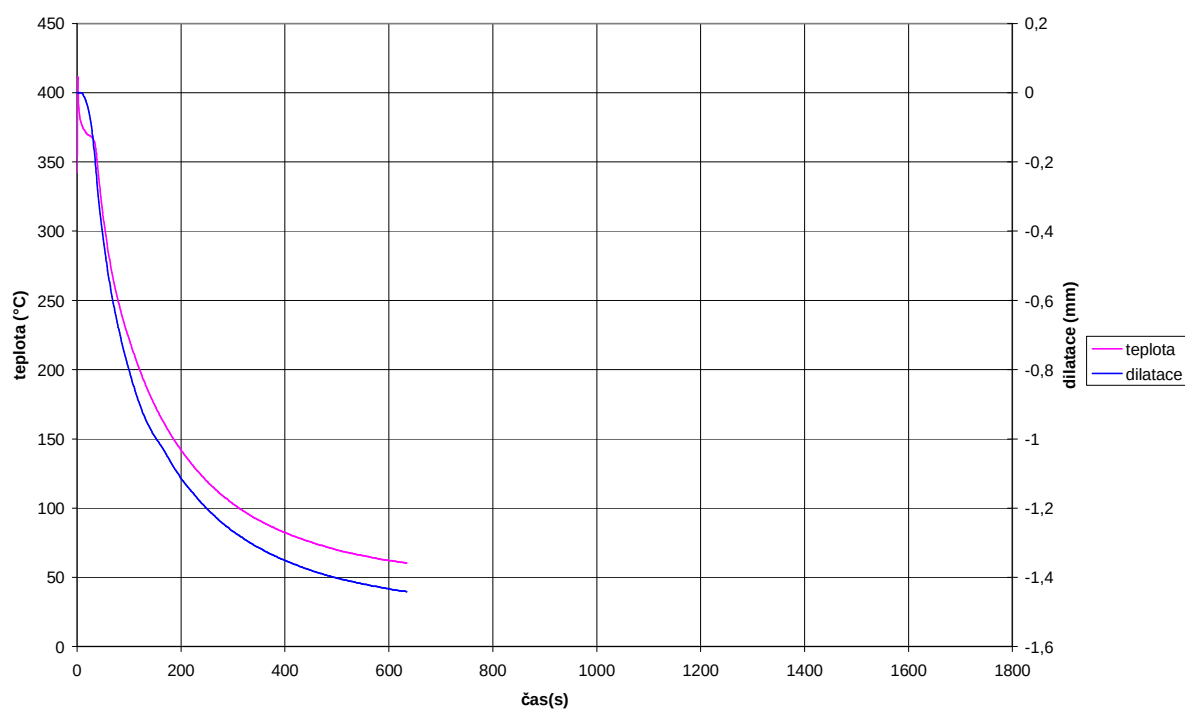


3

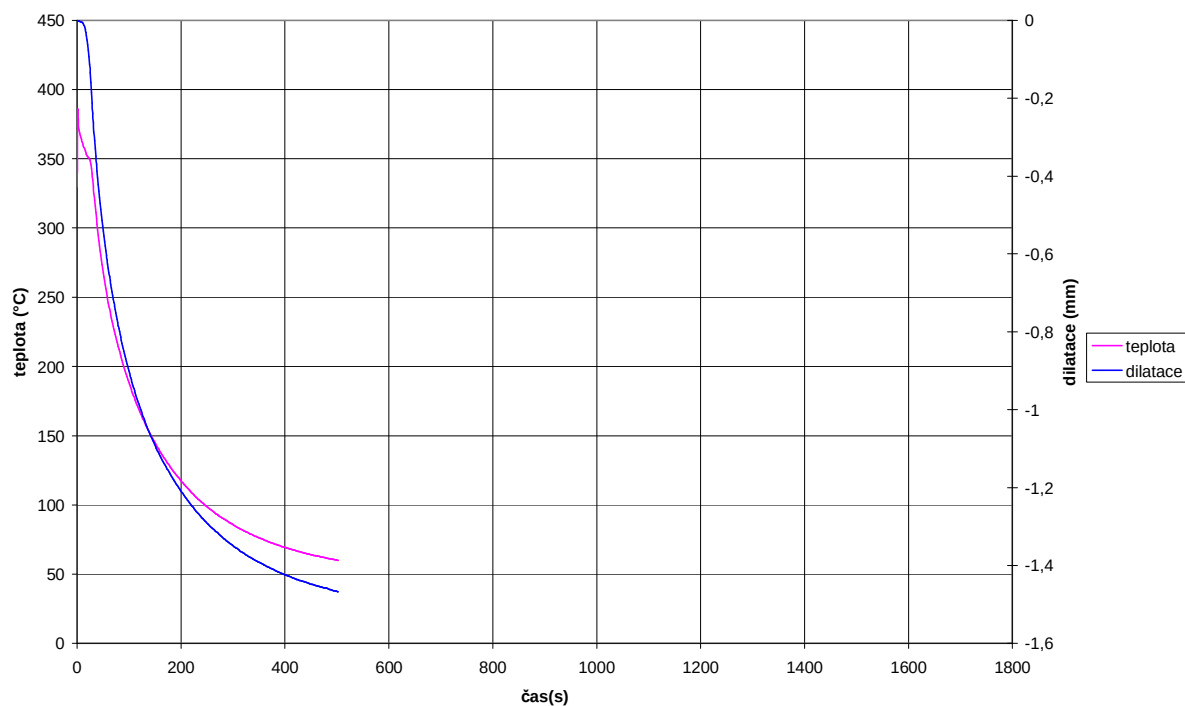


4

## Příloha č.2



5

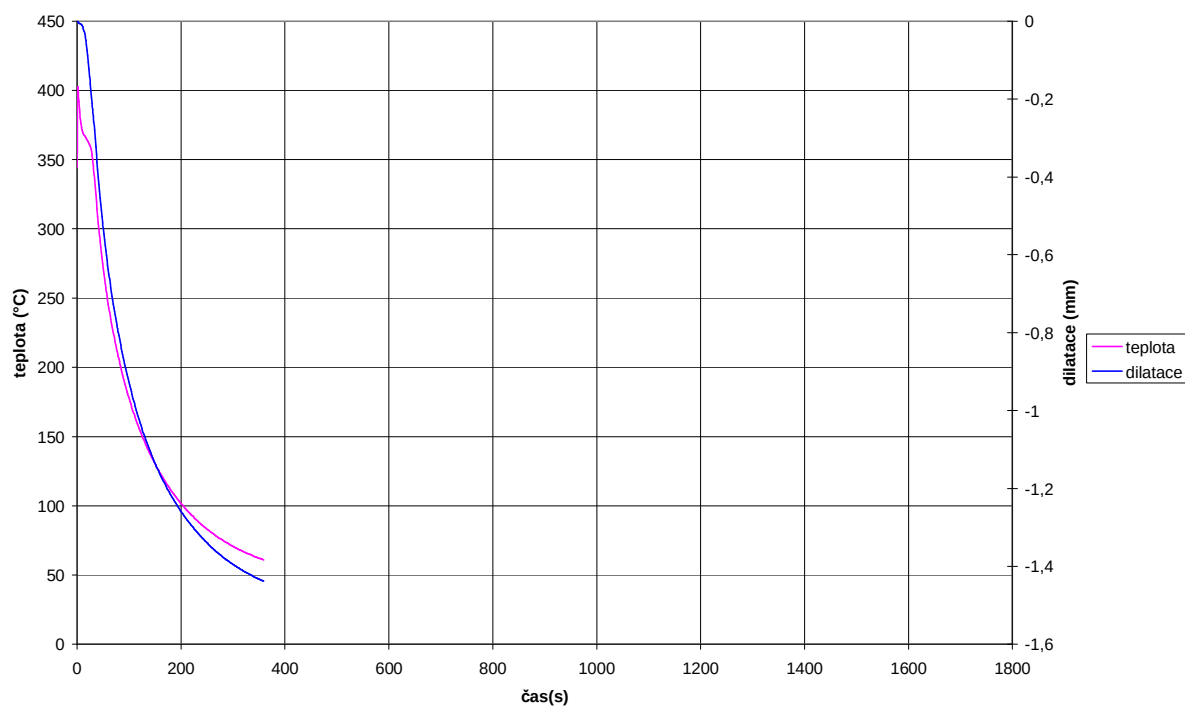




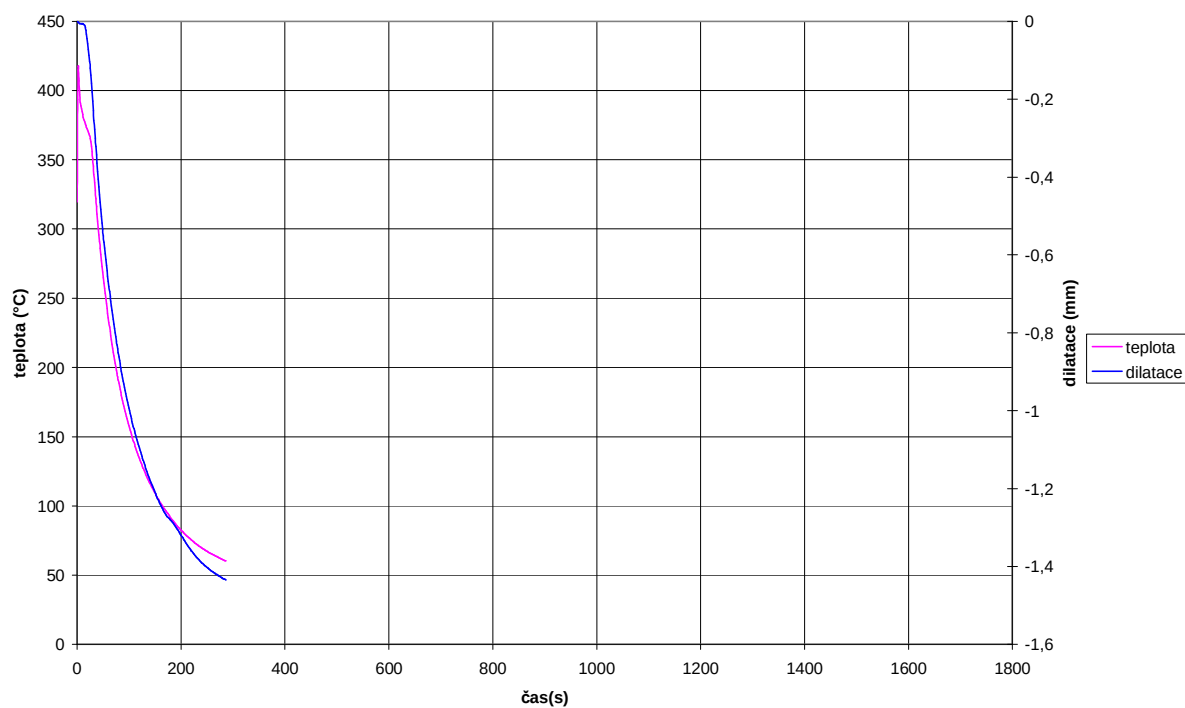
## Zinek 430

1

### Příloha č.2



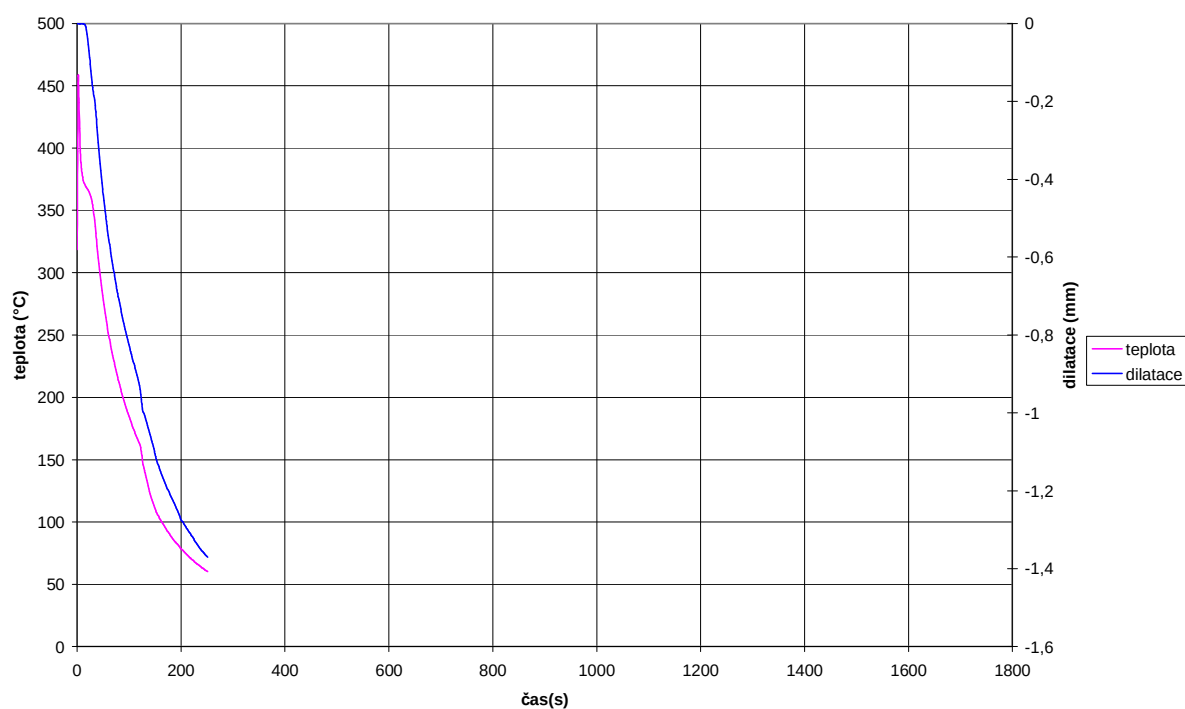
2



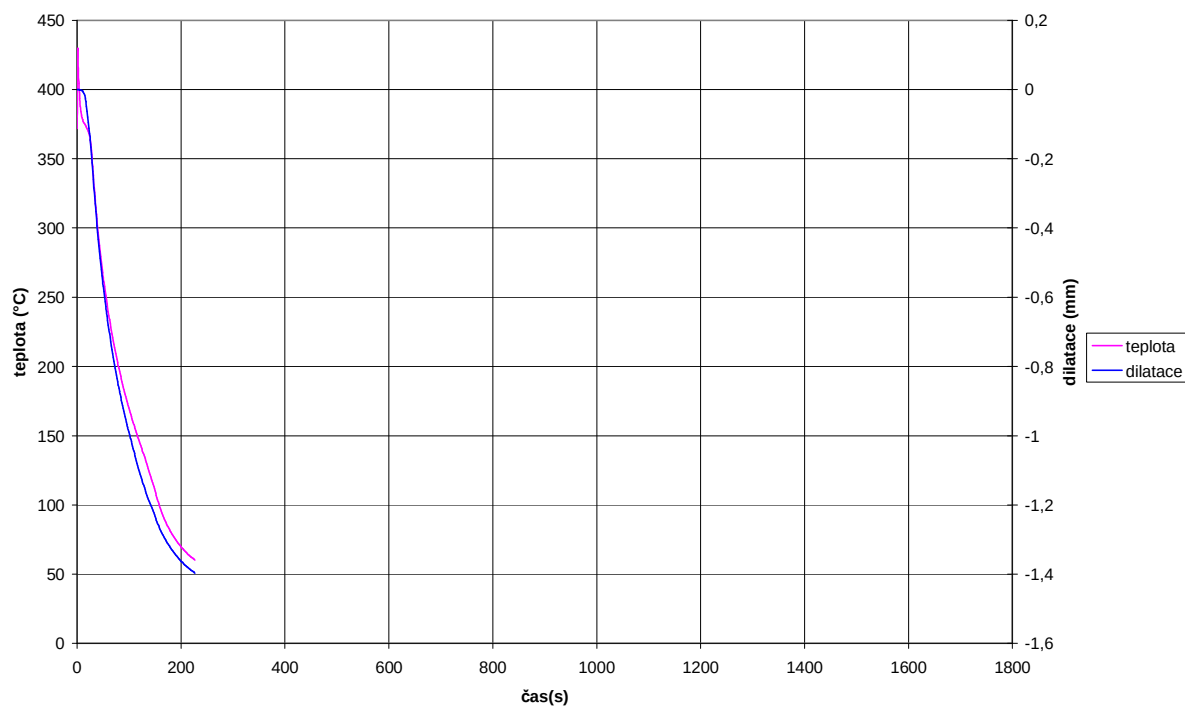


3

## Příloha č.2

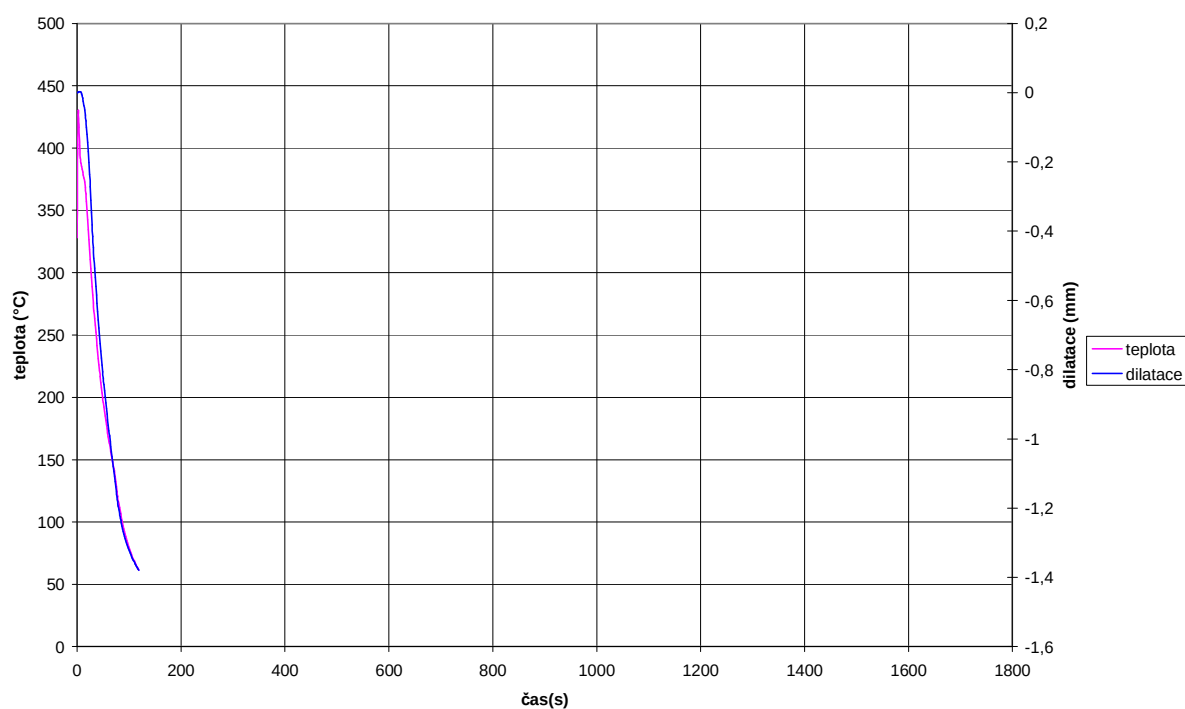


4



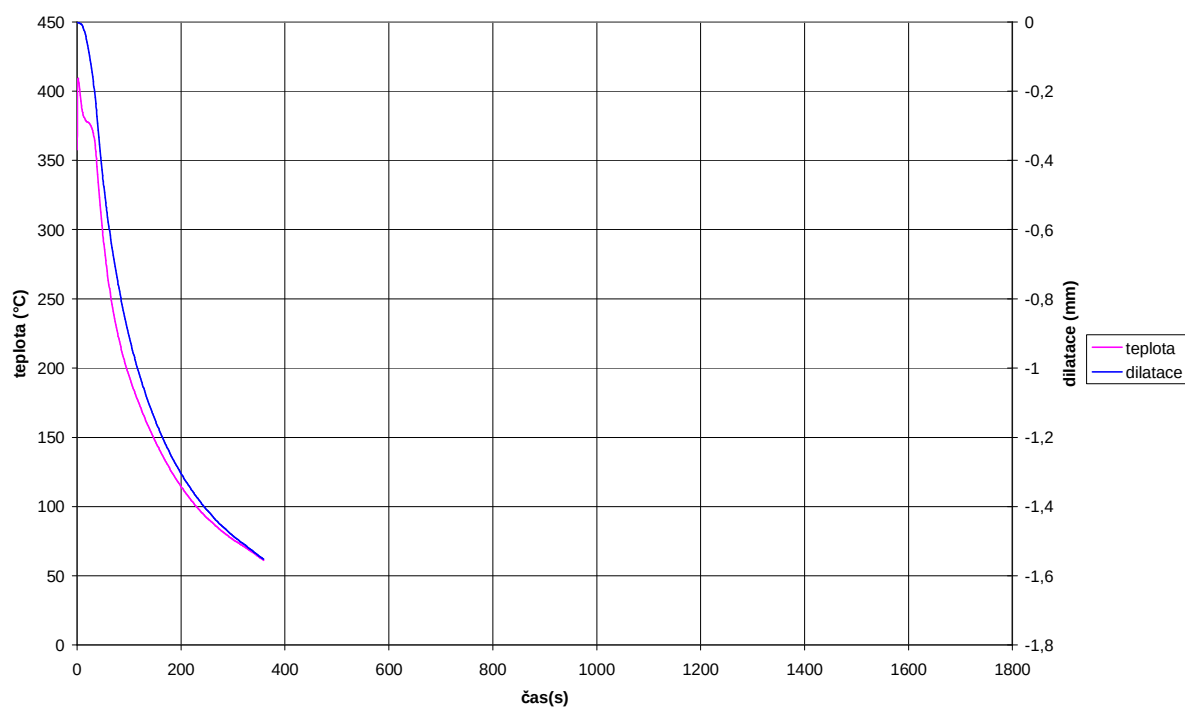
5

## Příloha č.2



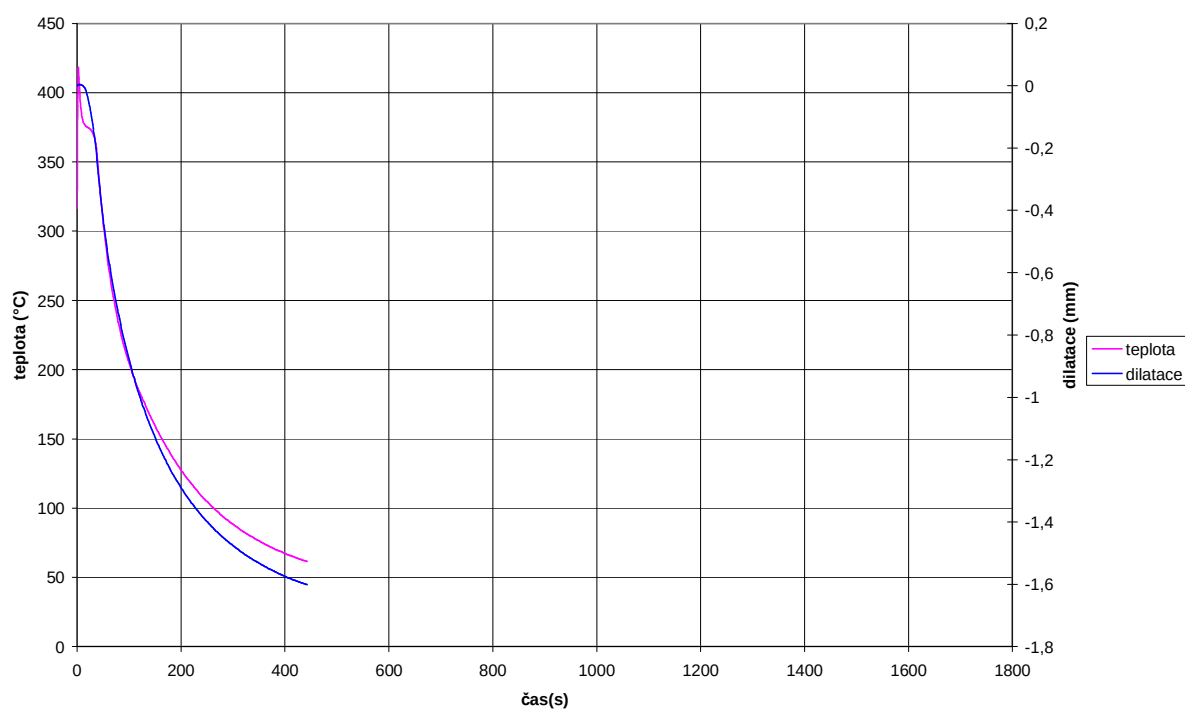
## Zinek 810

1

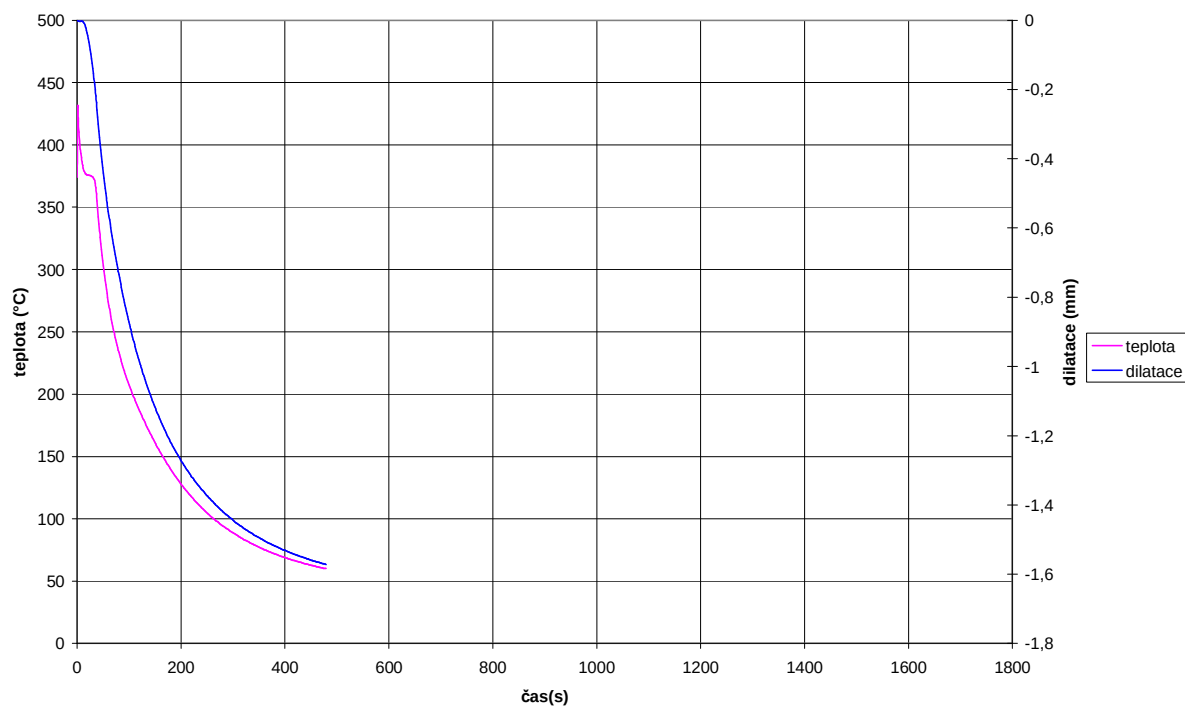


2

## Příloha č.2

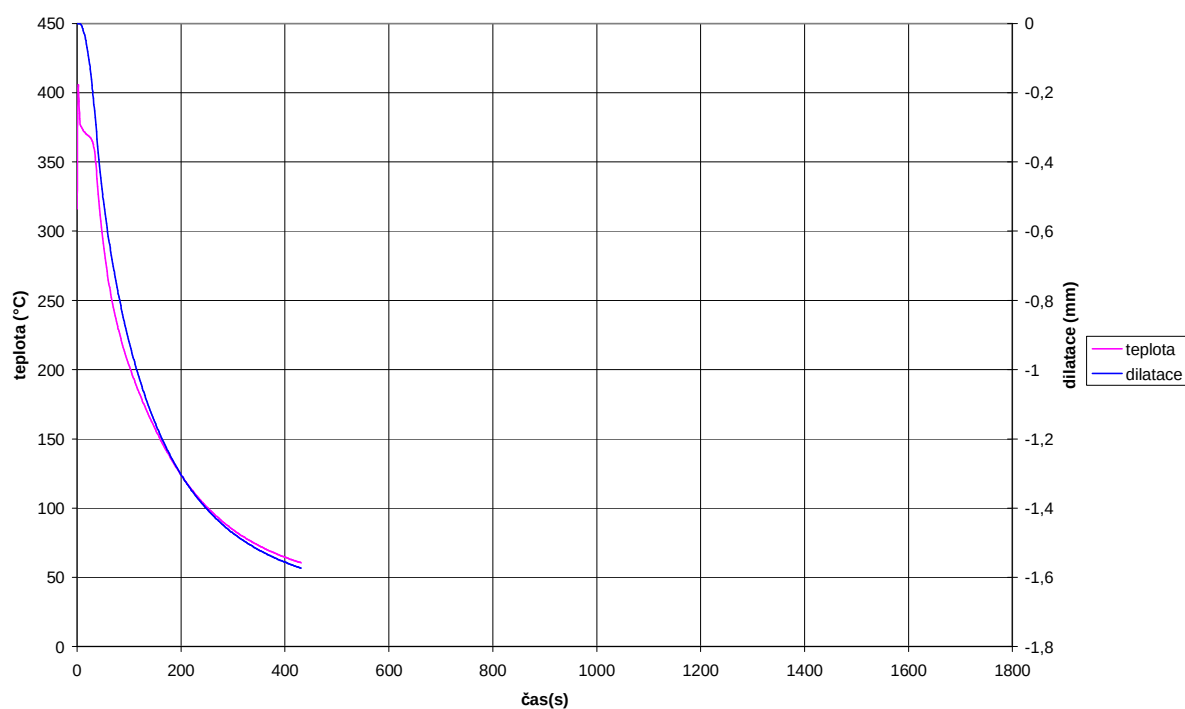


3

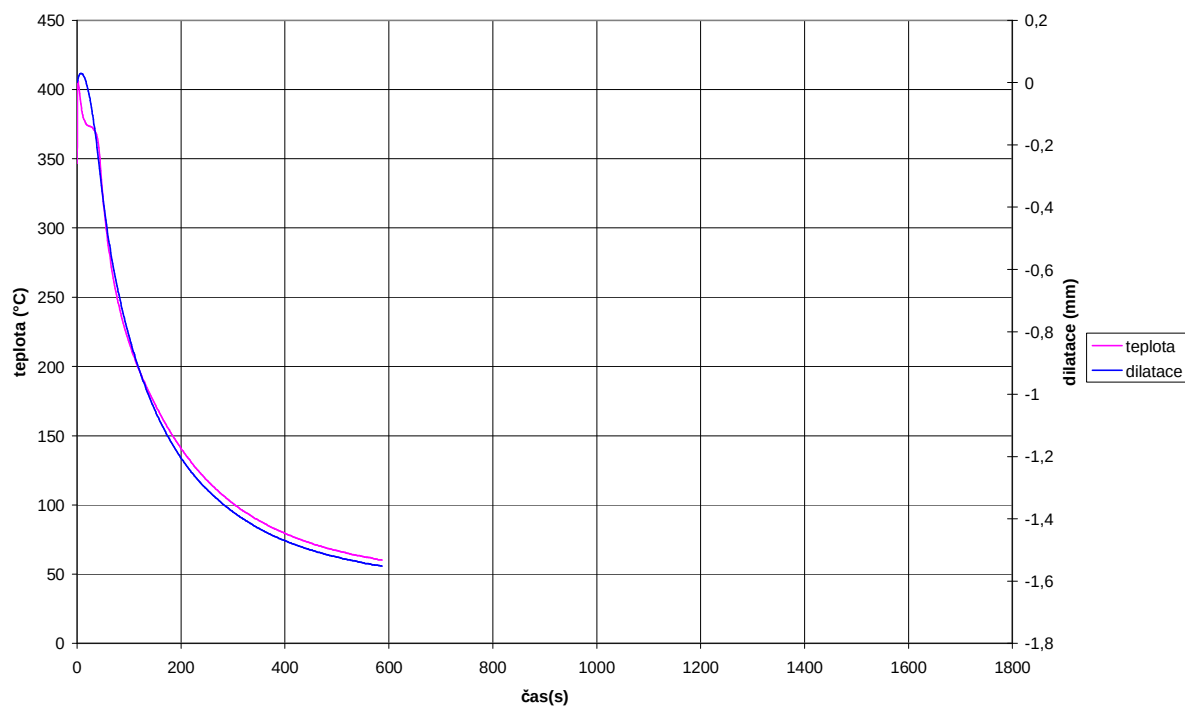


4

## Příloha č.2



5

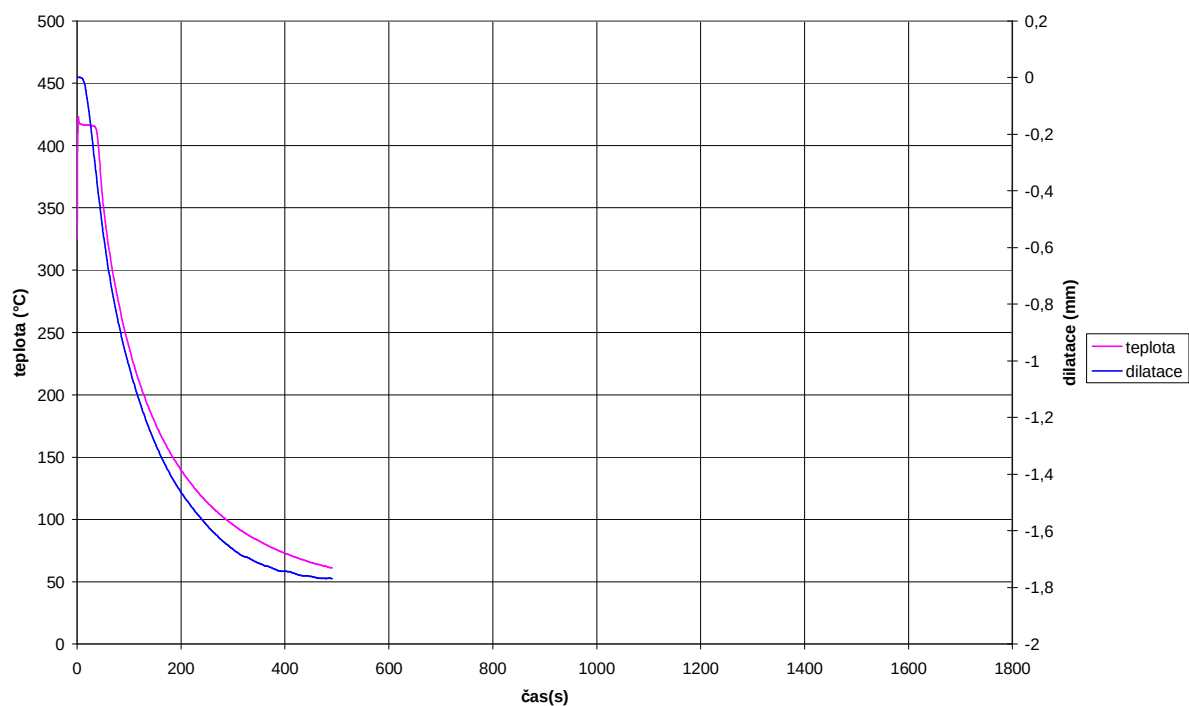


## Příloha č. 3

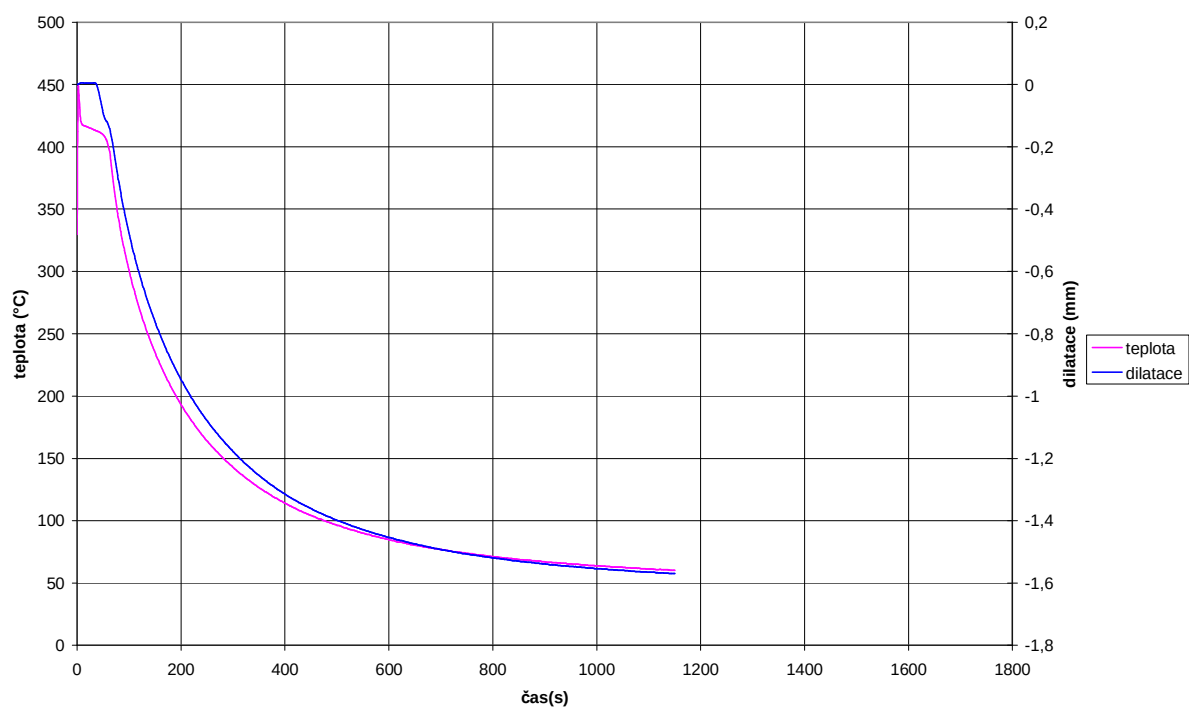
## Normální šířka- pryžové příložky

## Čistý zinek

1

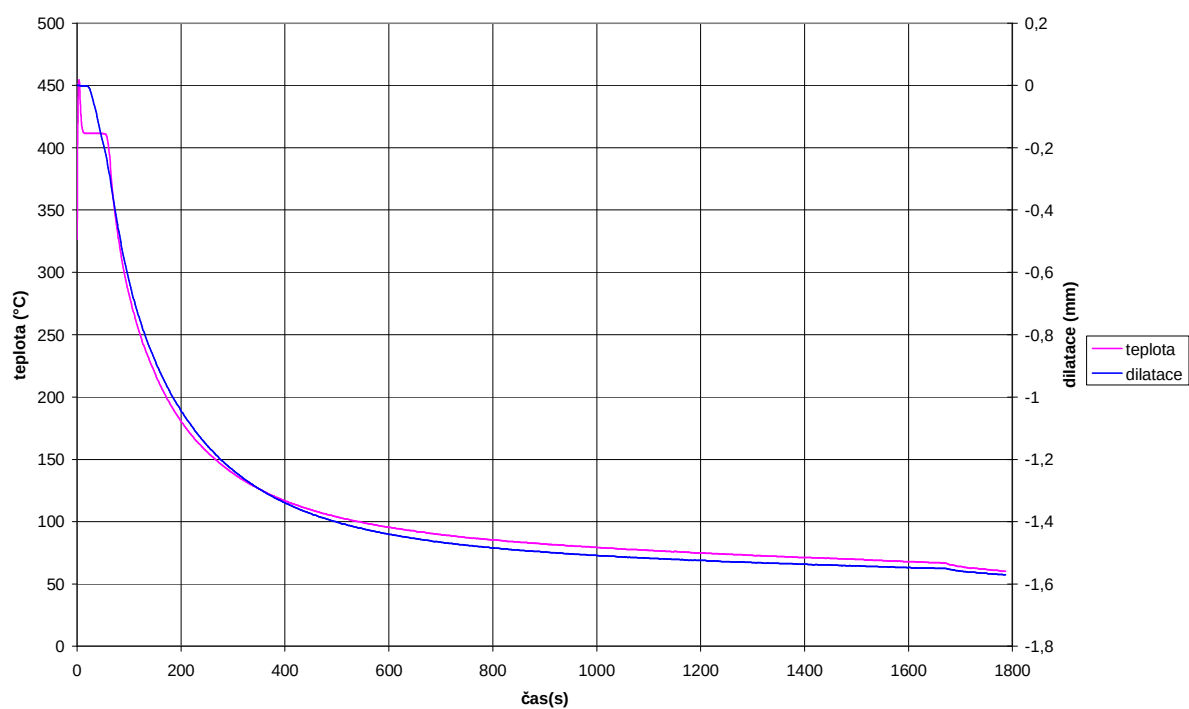


2

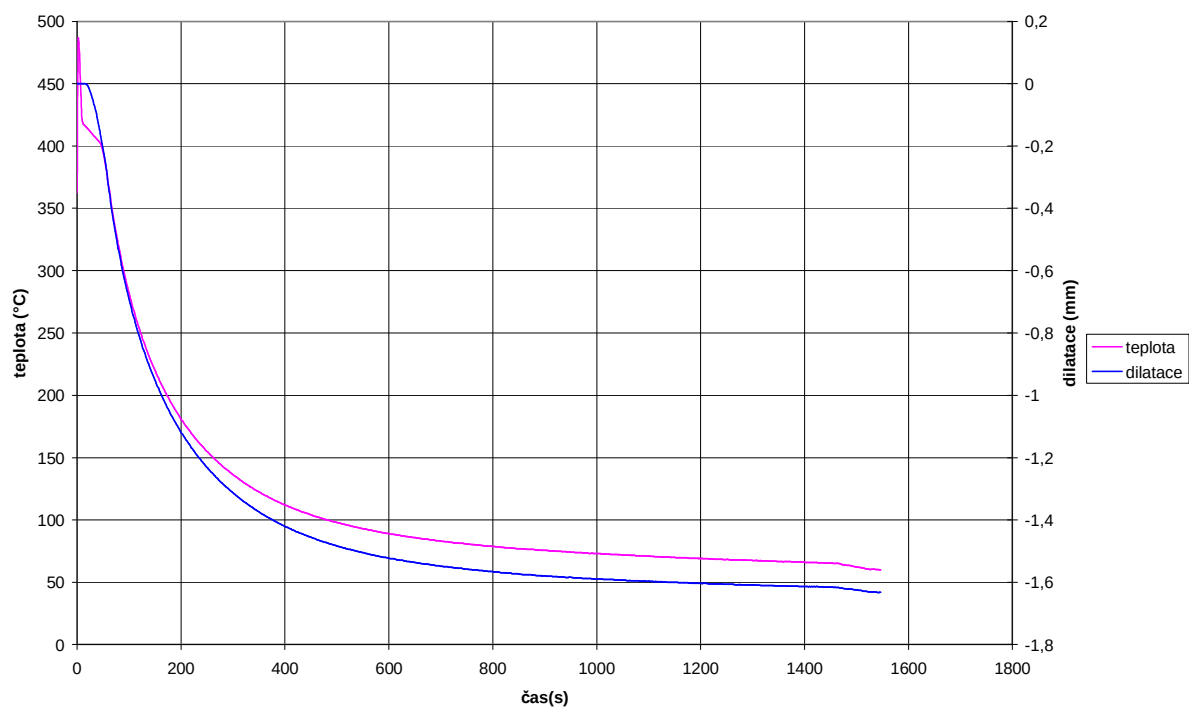


3

## Příloha č.3

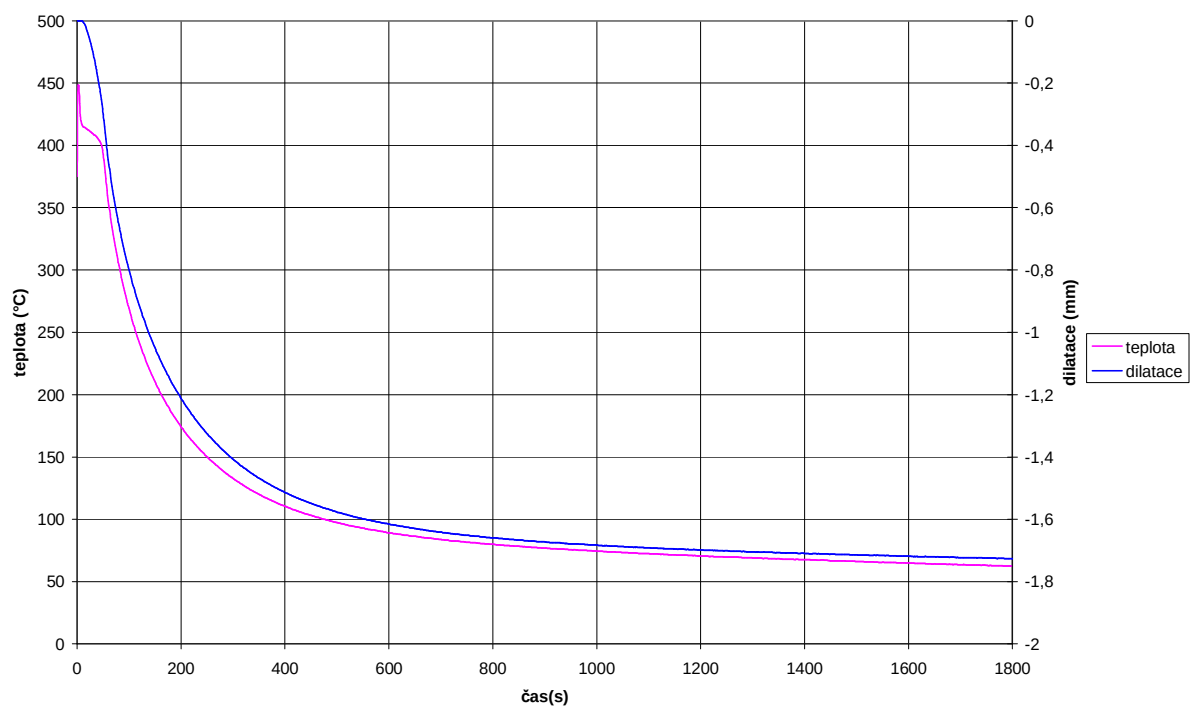


4



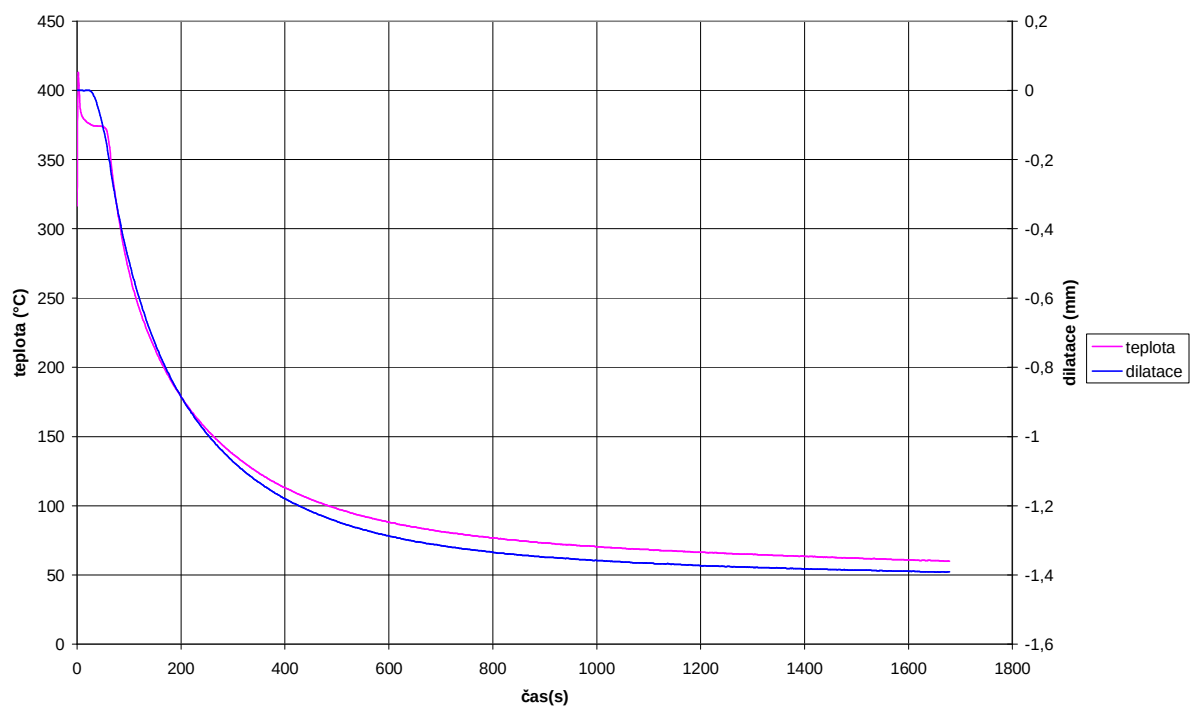
## 5

## Příloha č.3



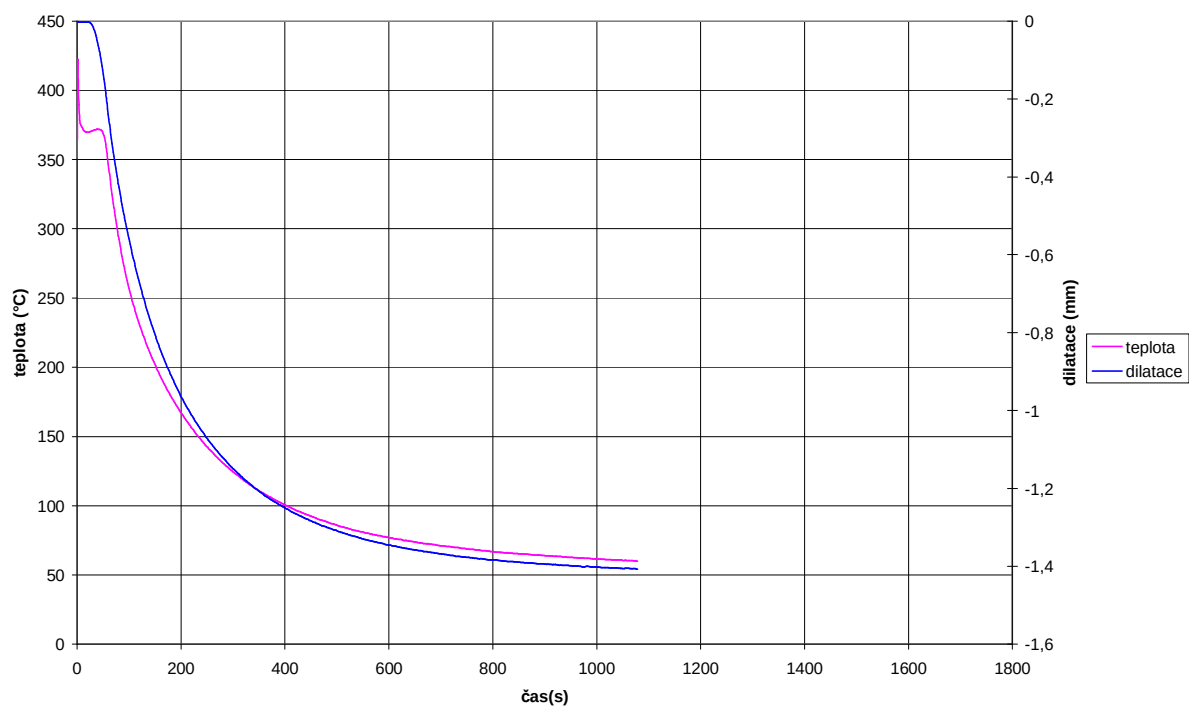
## Zinek 400

## 1

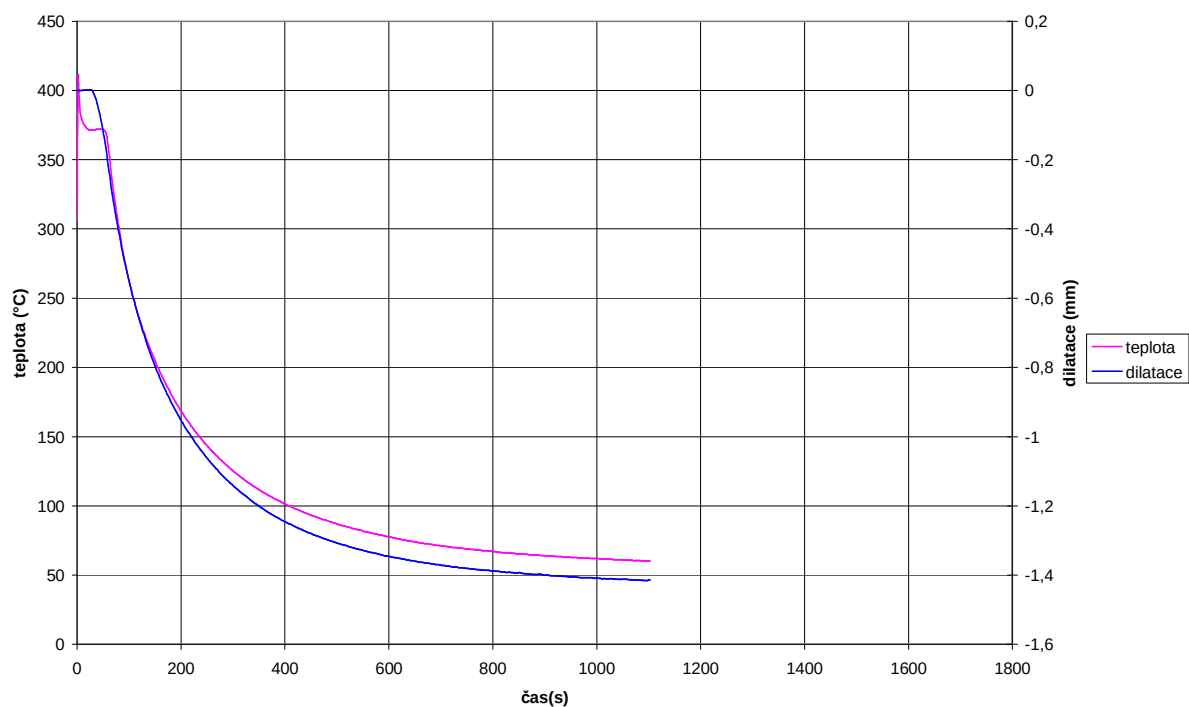


2

## Příloha č.3



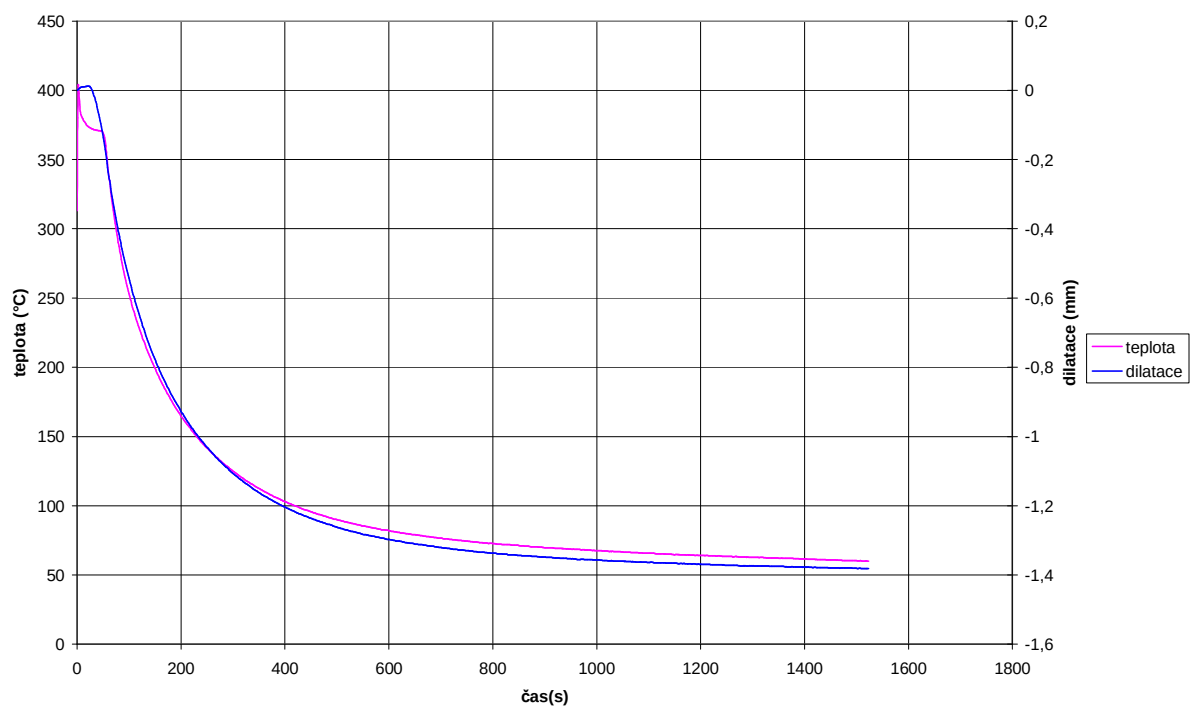
3



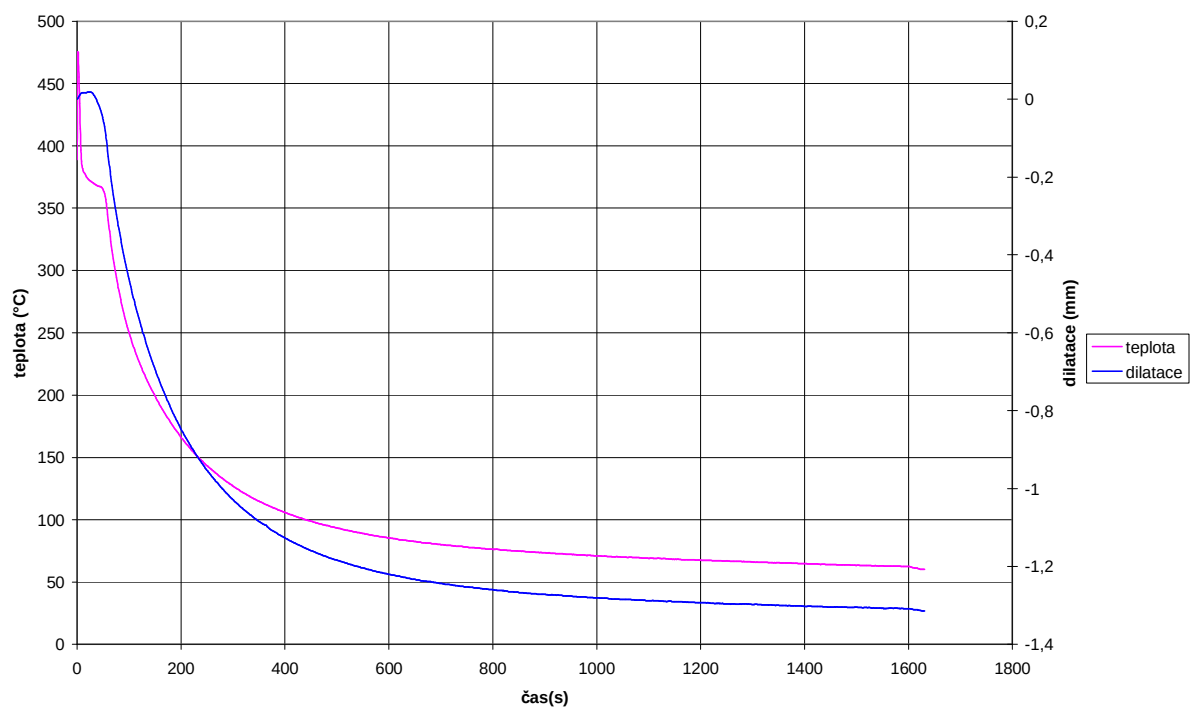


4

## Příloha č.3



5

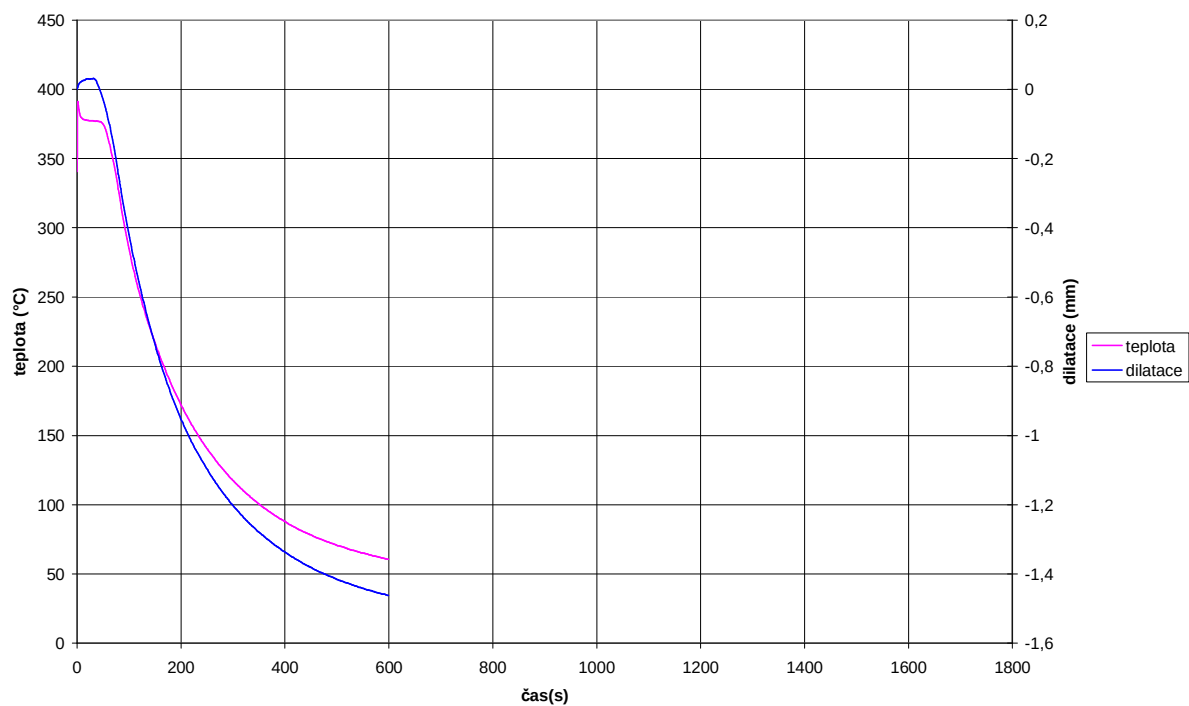




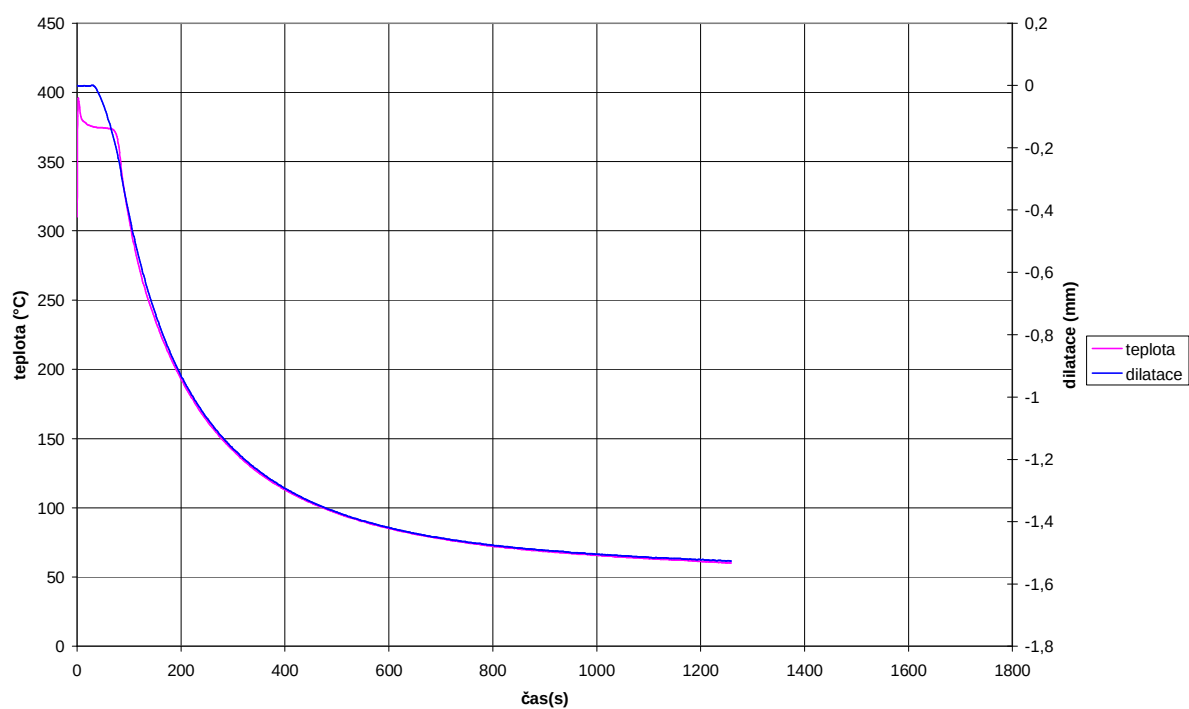
## Zinek 410

1

### Příloha č.3

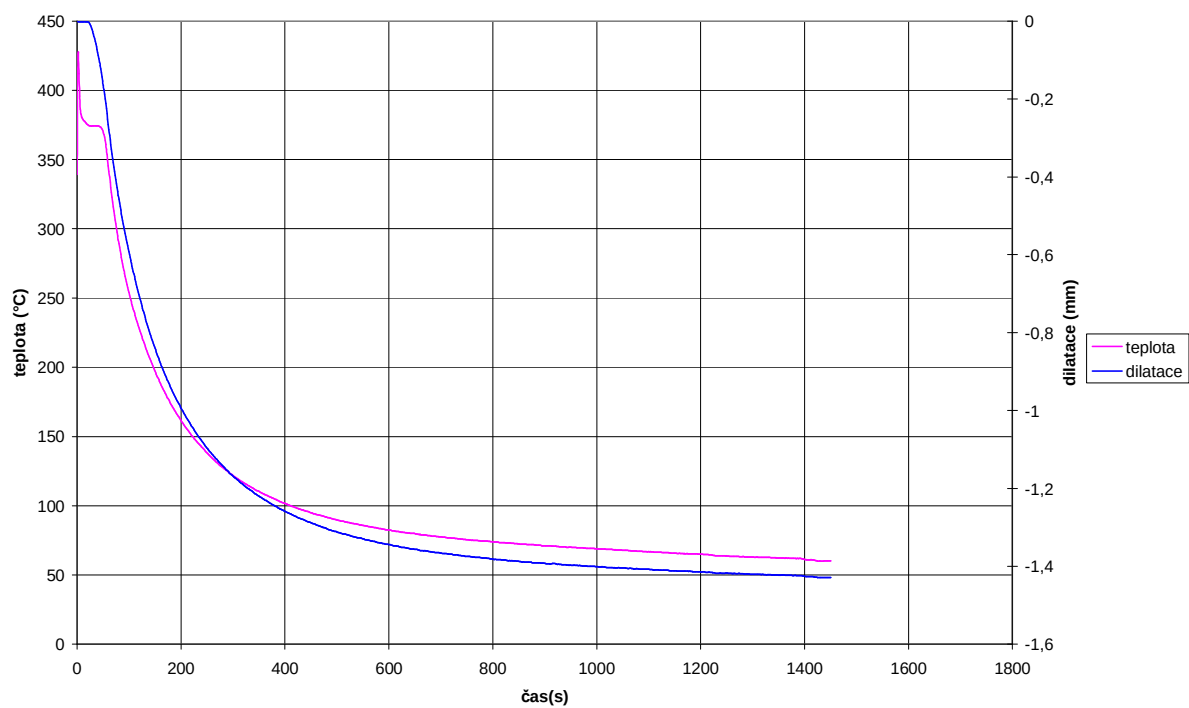


2

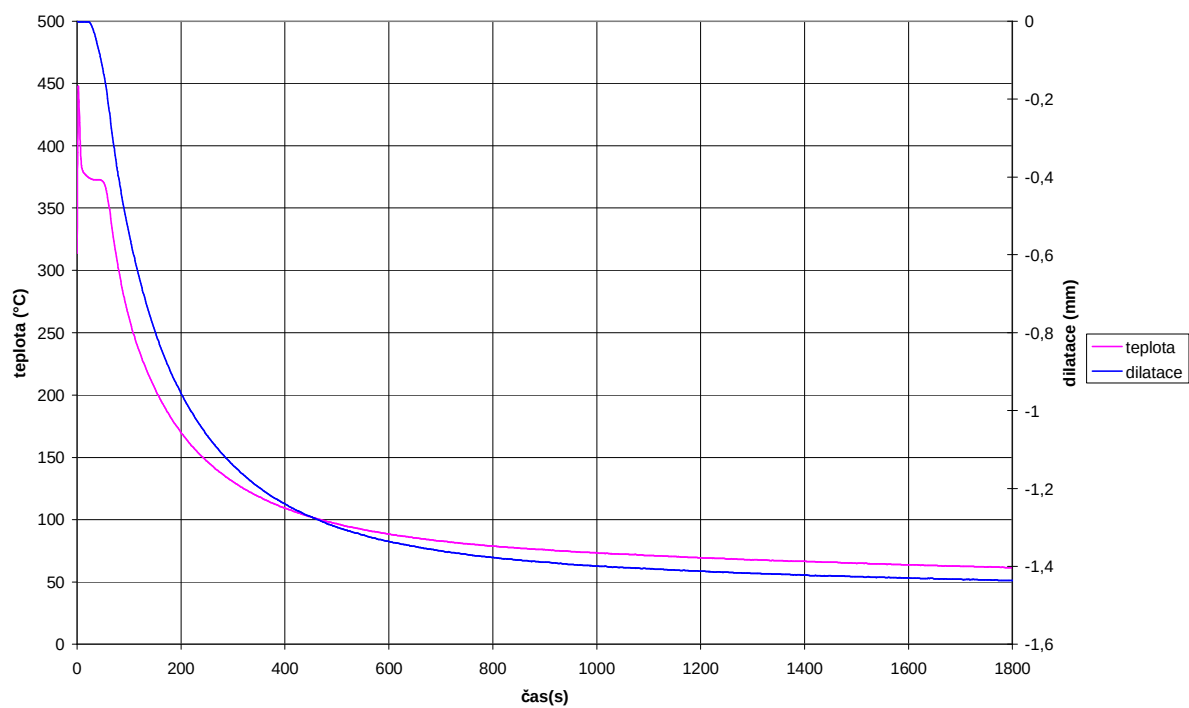


## 3

## Příloha č.3

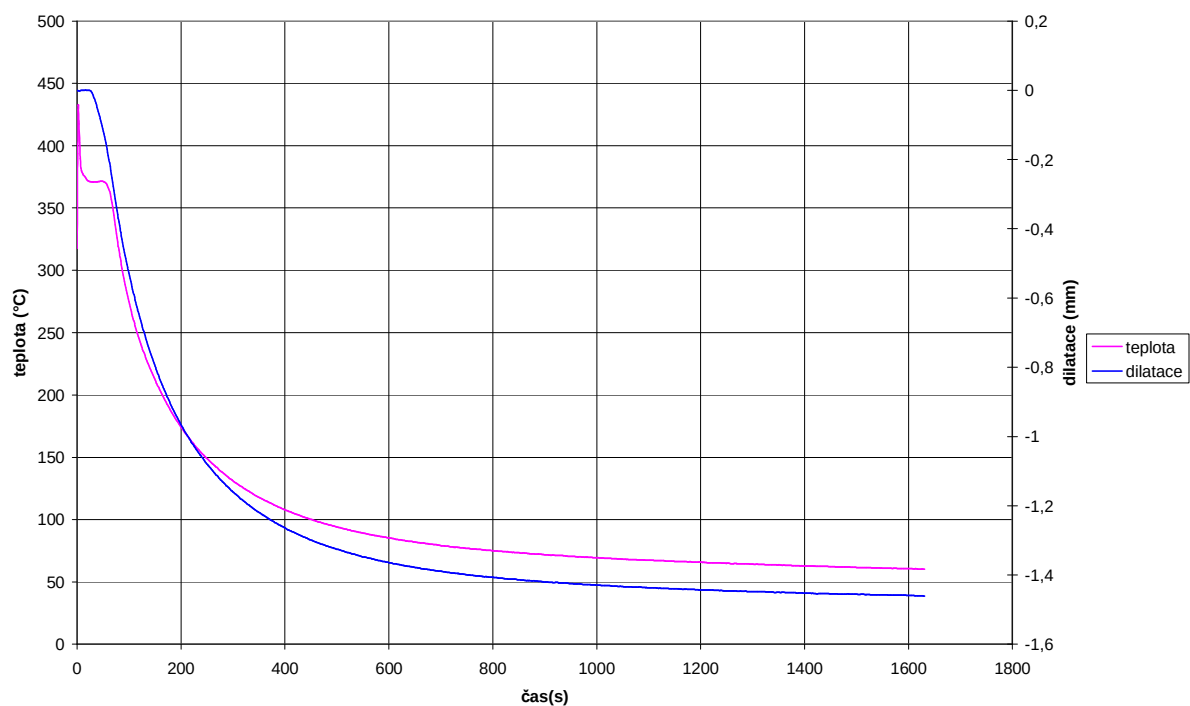


## 4



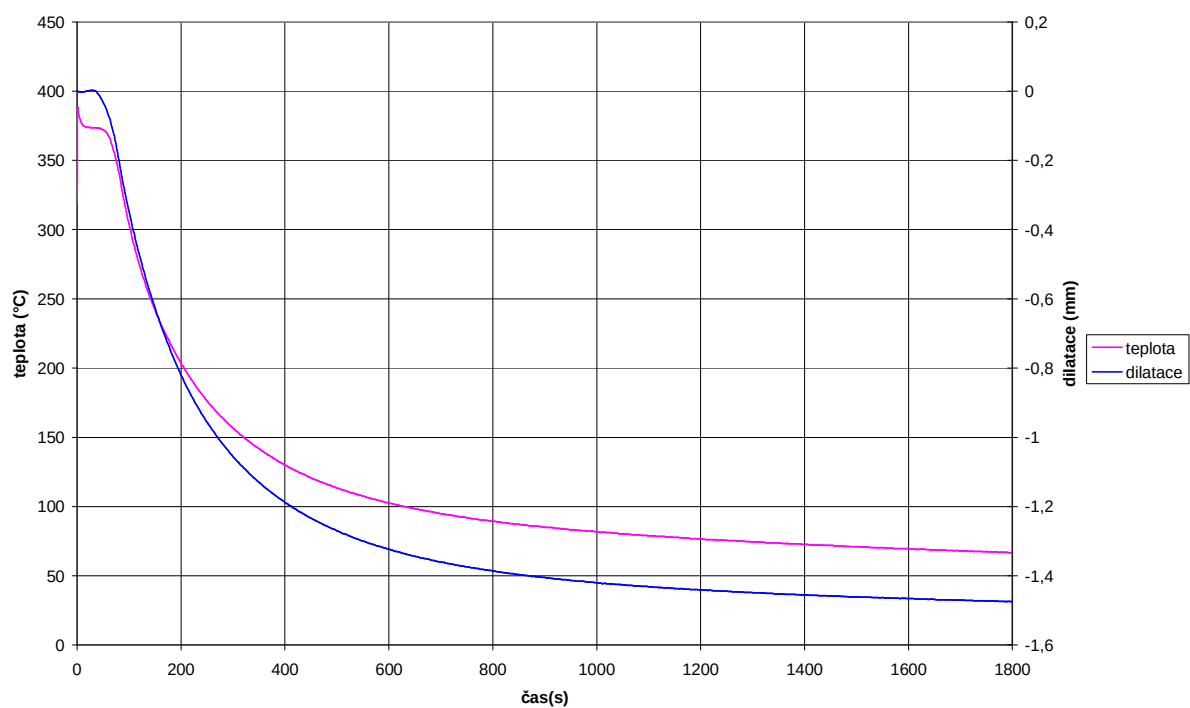
## 5

## Příloha č.3



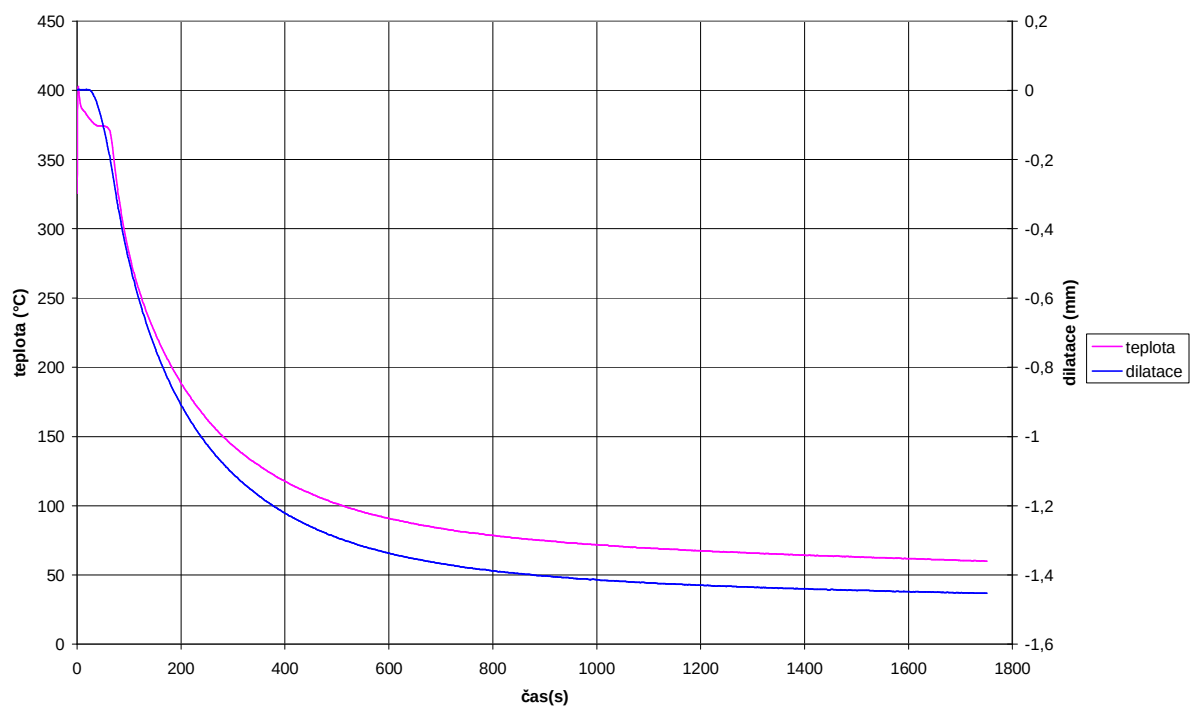
## Zinek 430

## 1

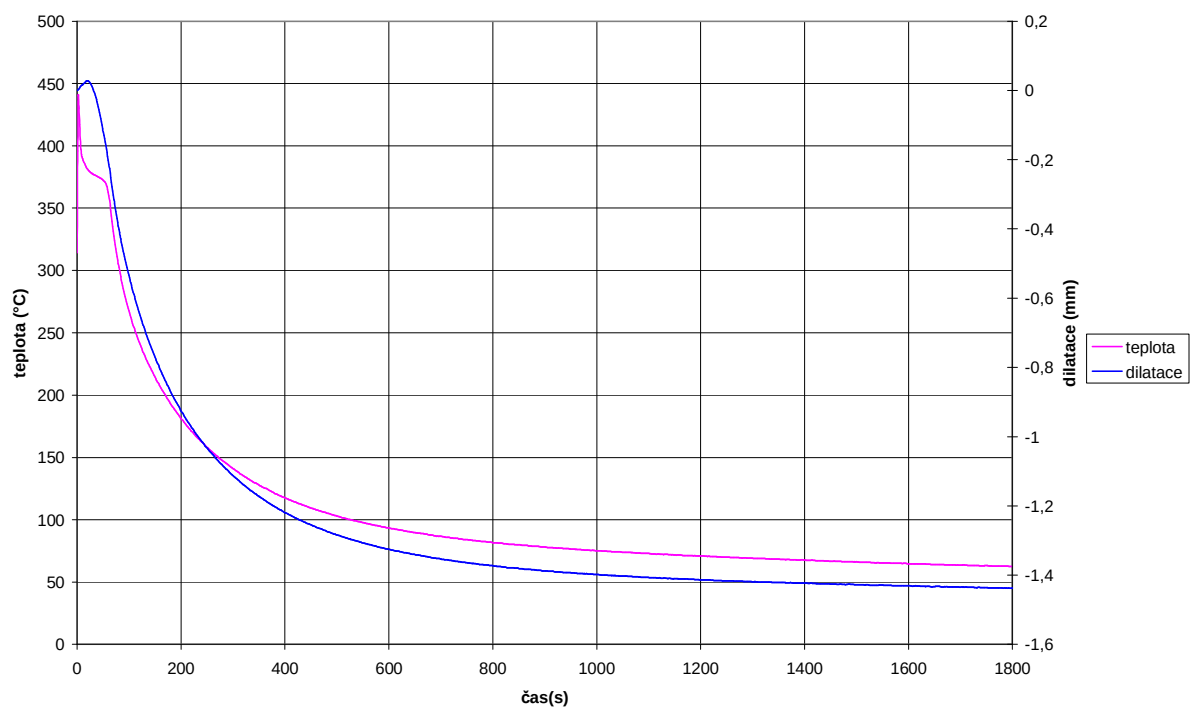


2

## Příloha č.3

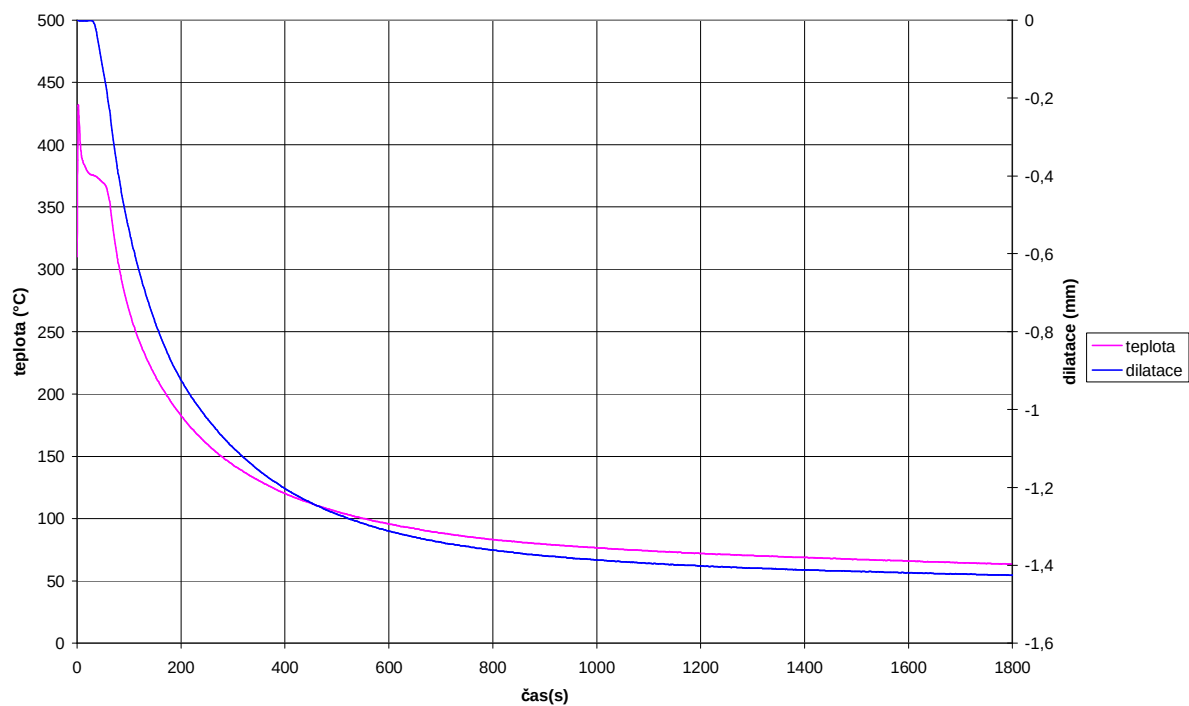


3

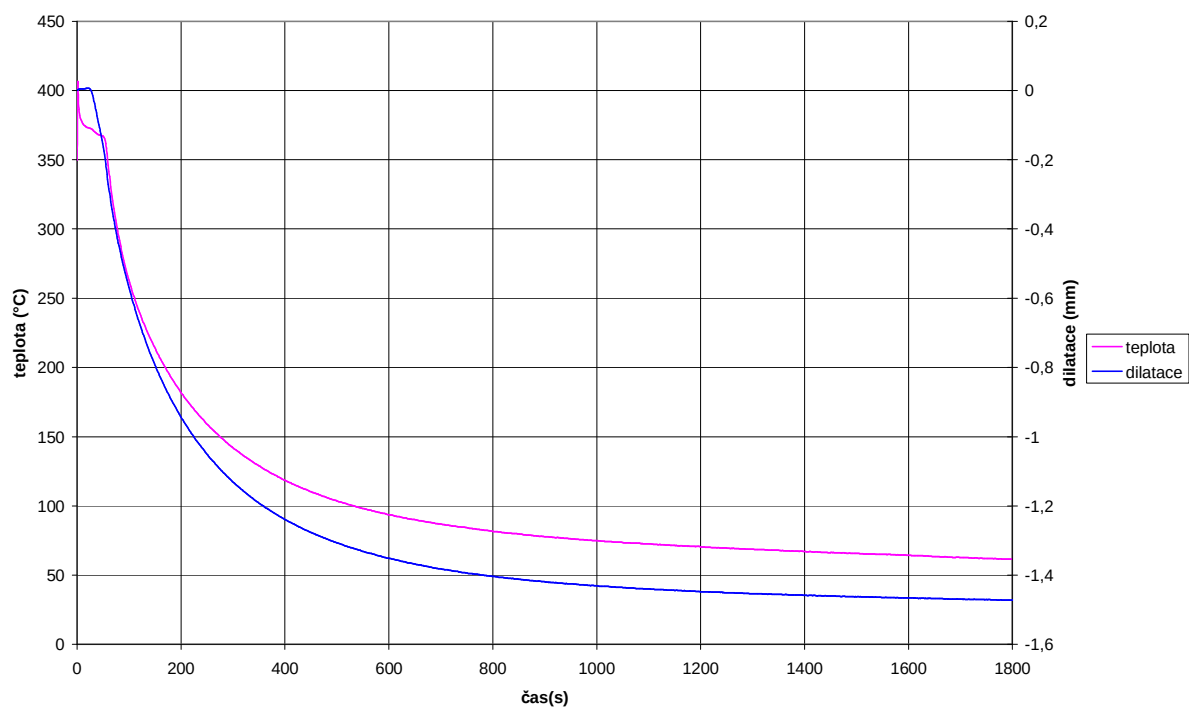


4

## Příloha č.3



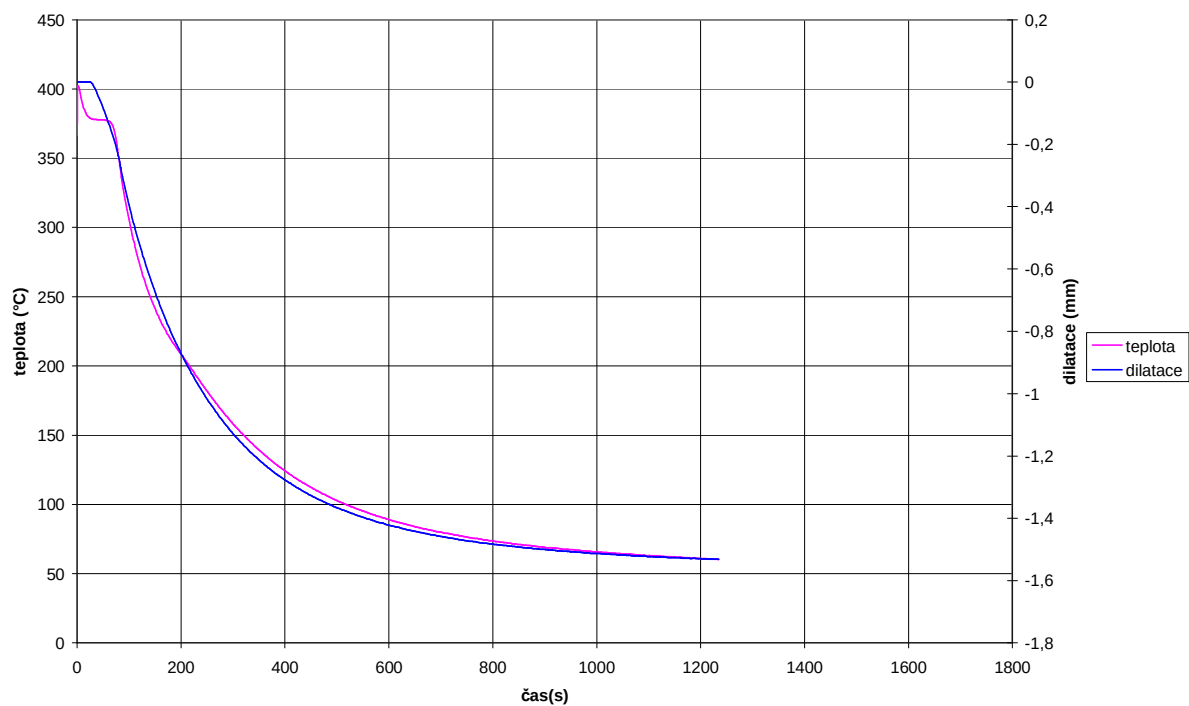
5



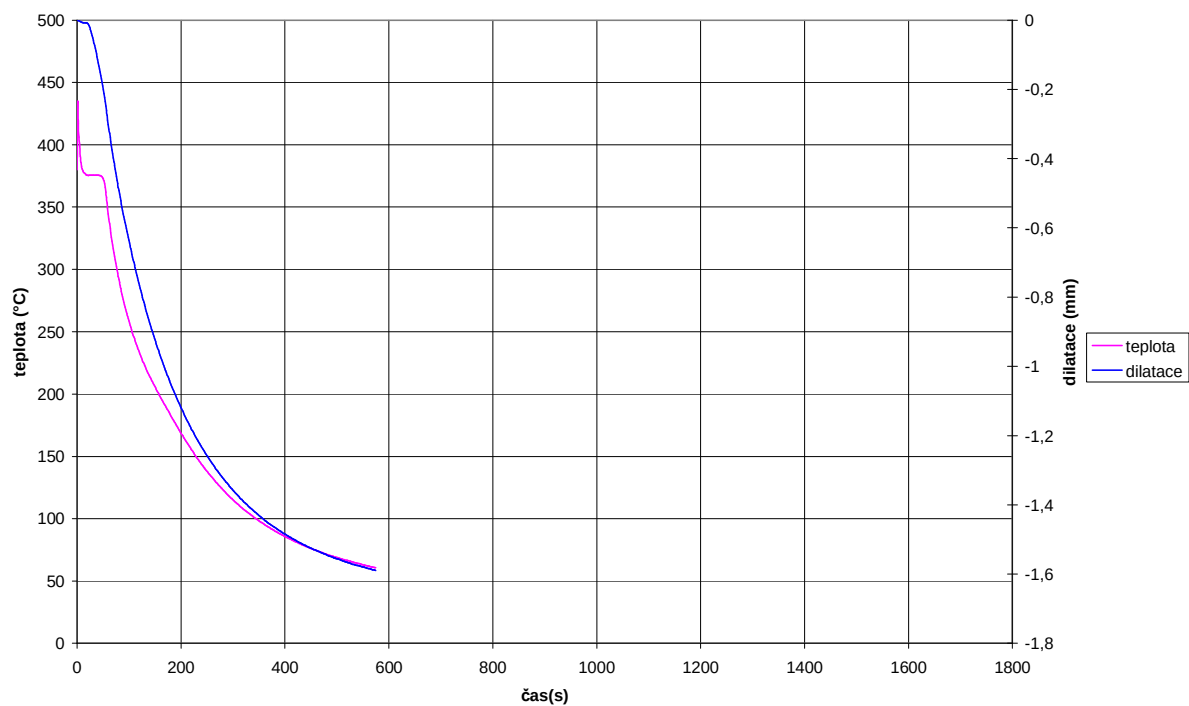
## Zinek 810

1

### Příloha č.3

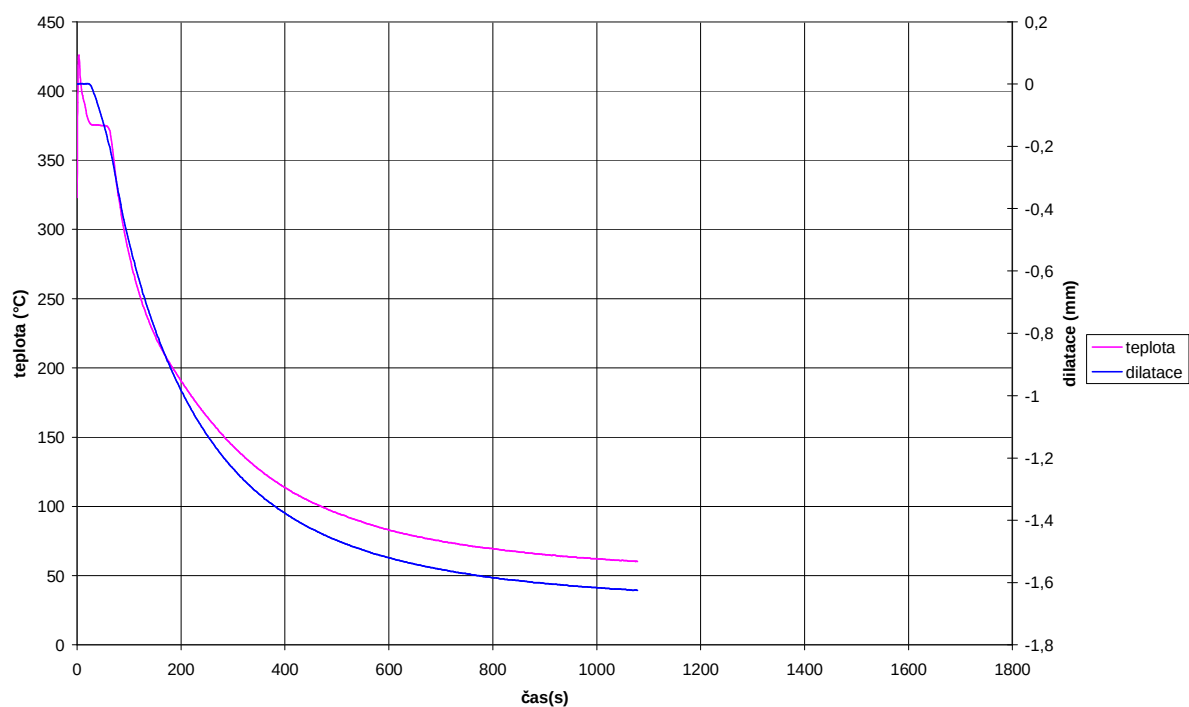


2

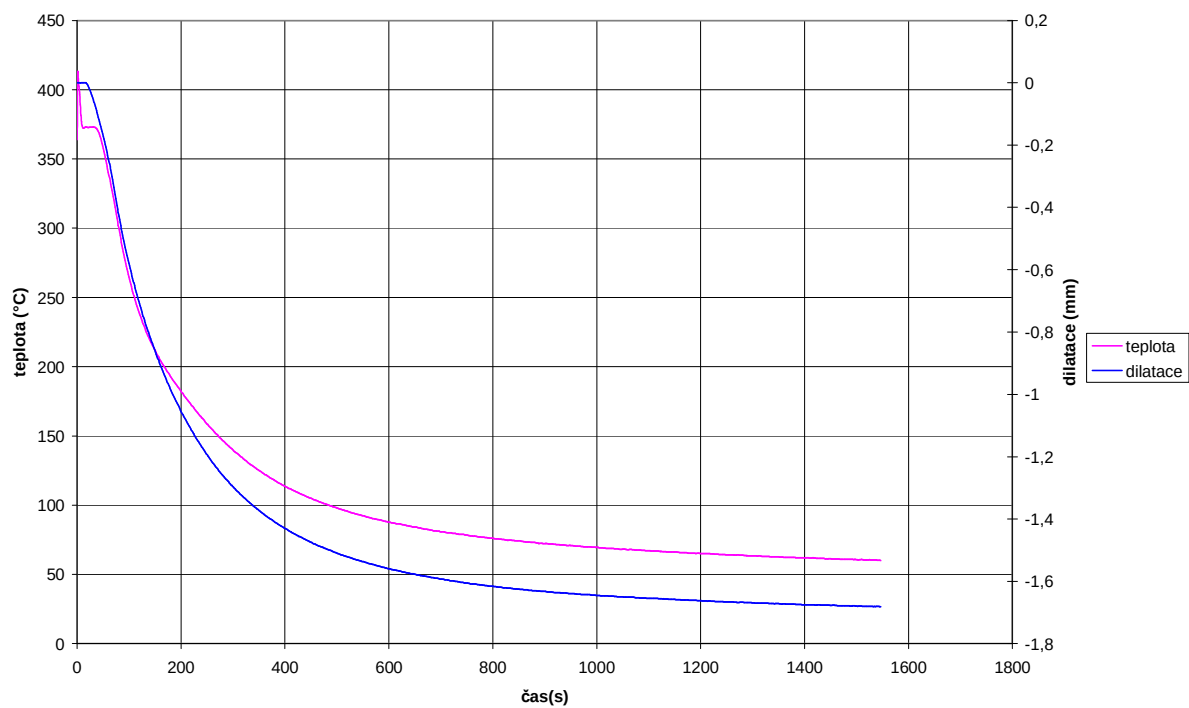


## 3

## Příloha č.3



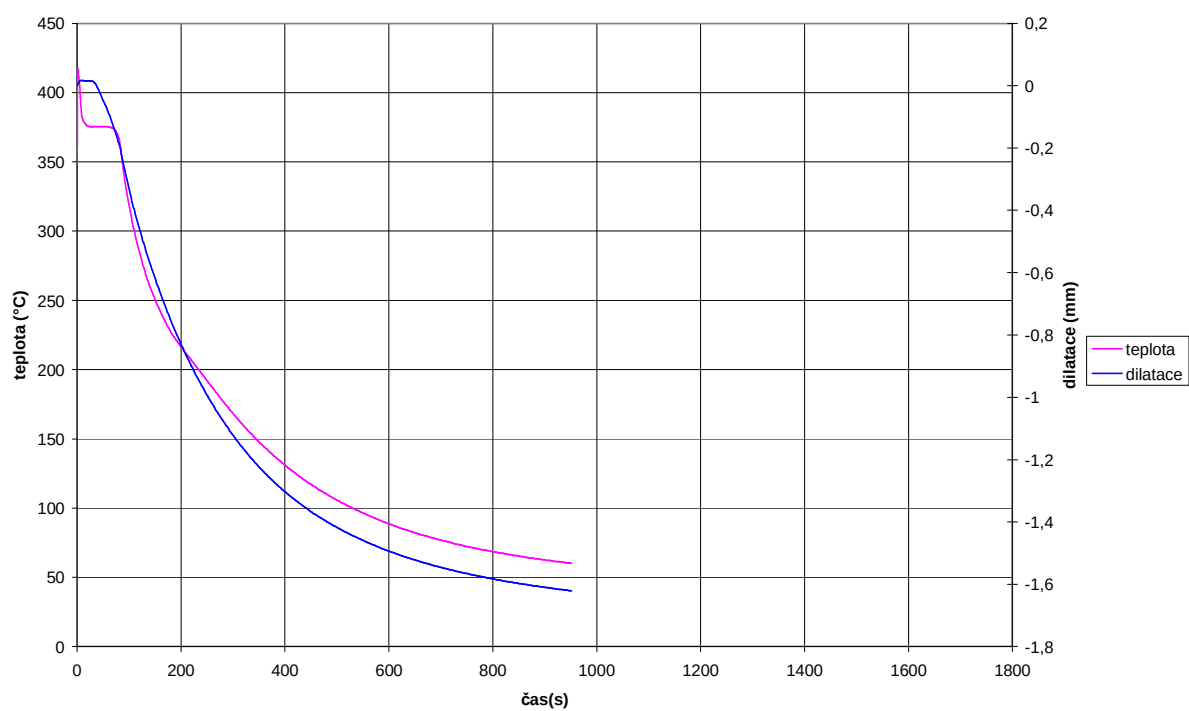
## 4





## 5

## Příloha č.3

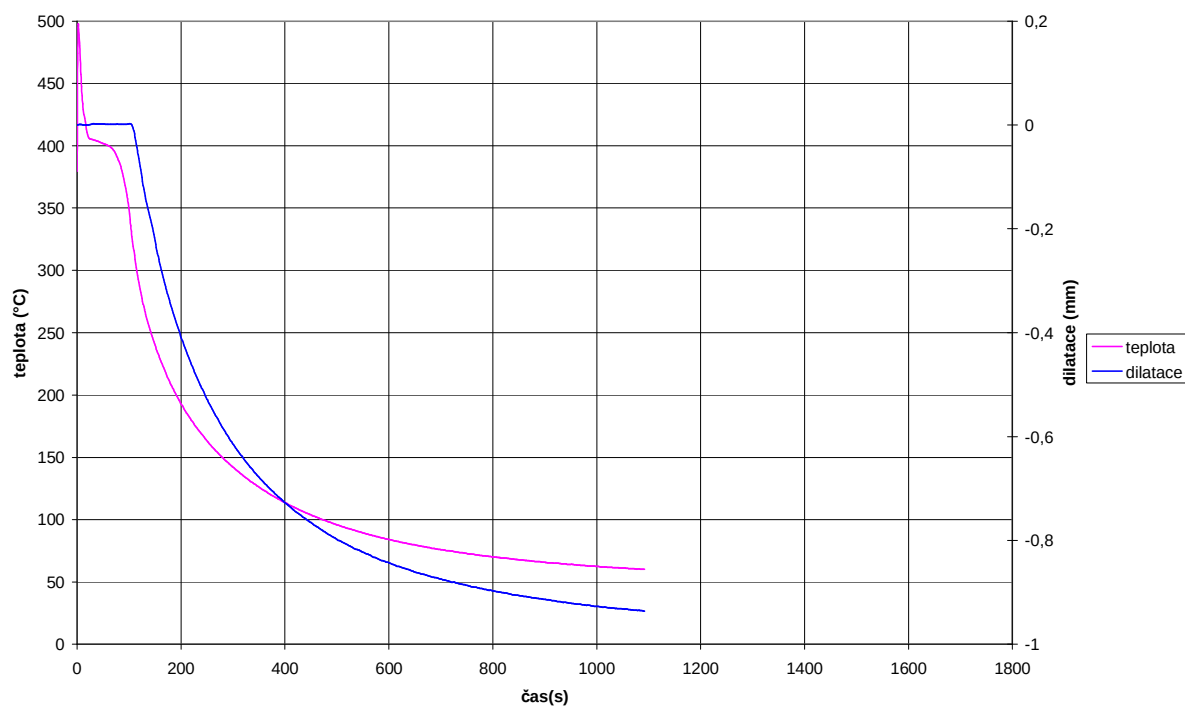


## Příloha č. 4

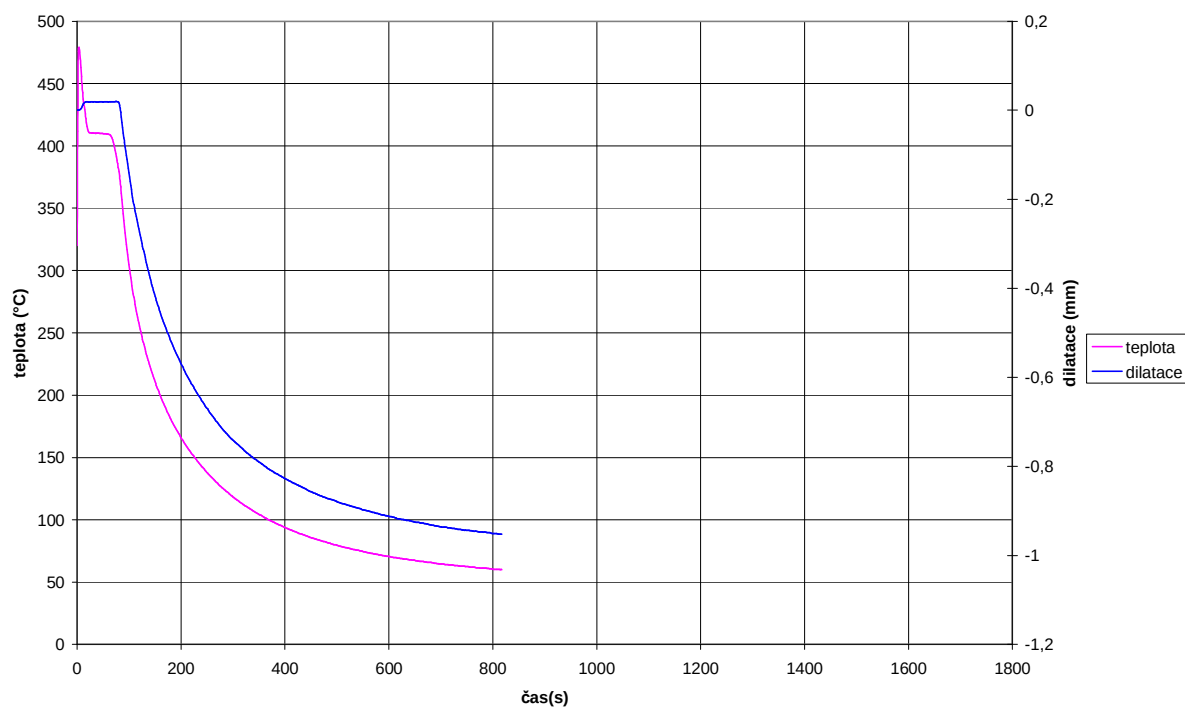
## Odlévání do pískových příložek

## Čistý zinek

1

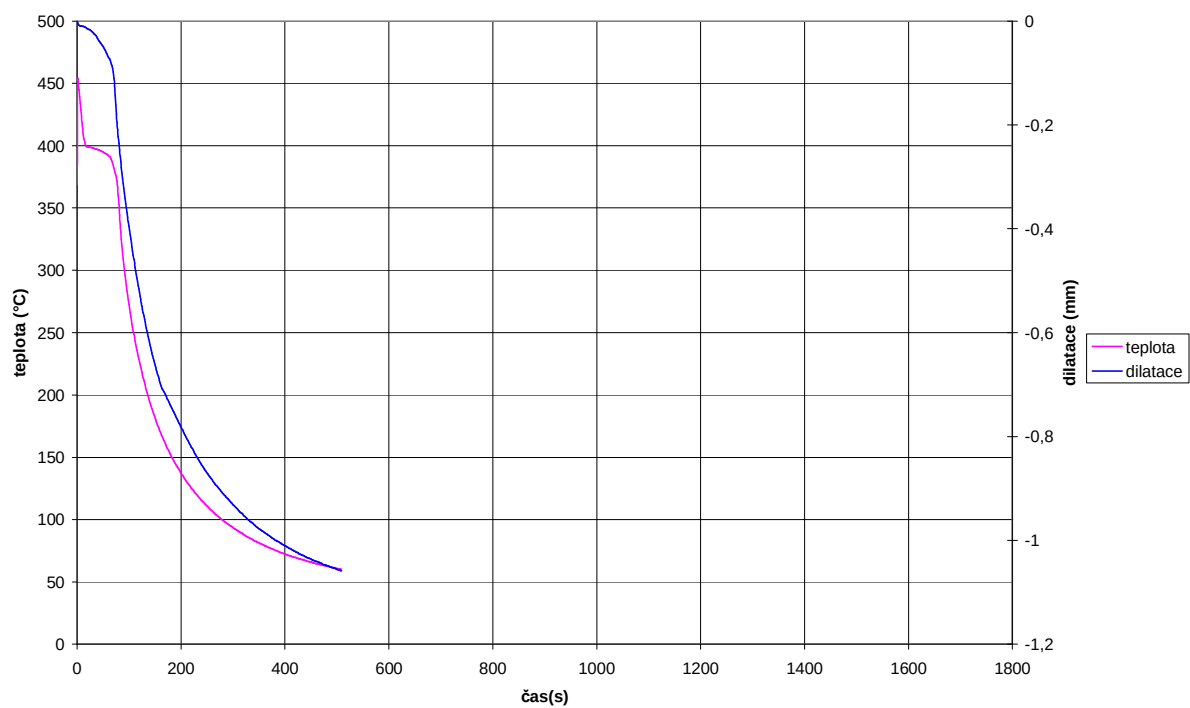


2

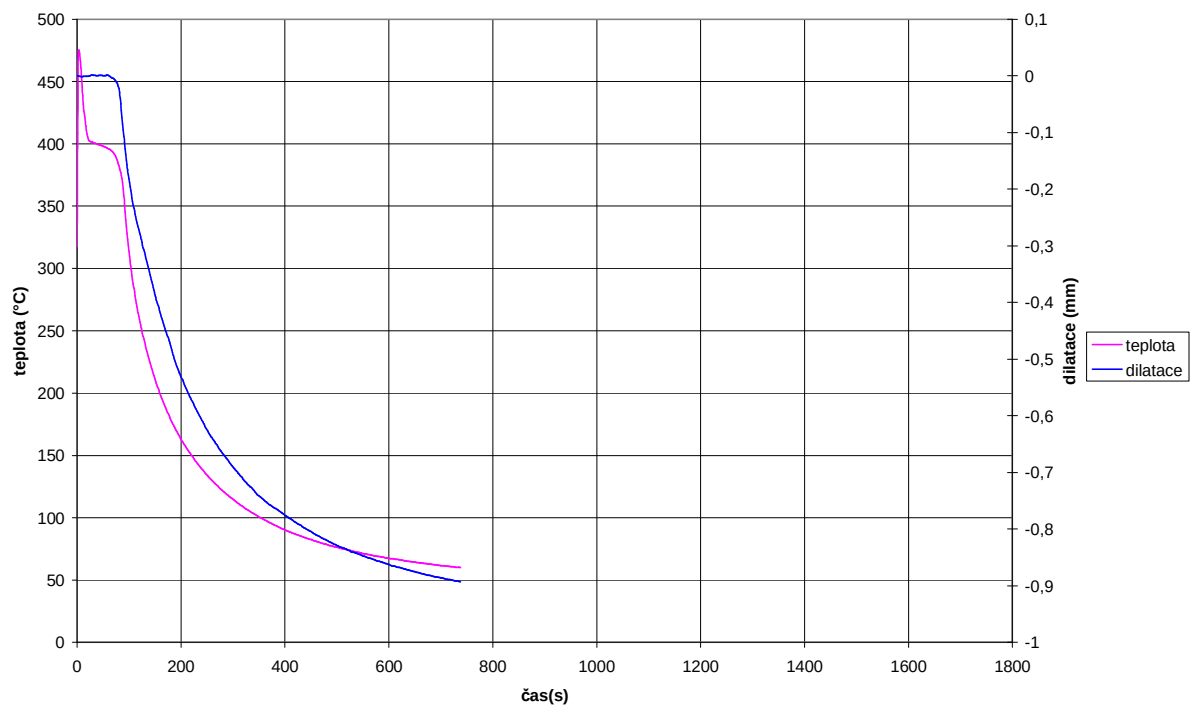


3

## Příloha č.4

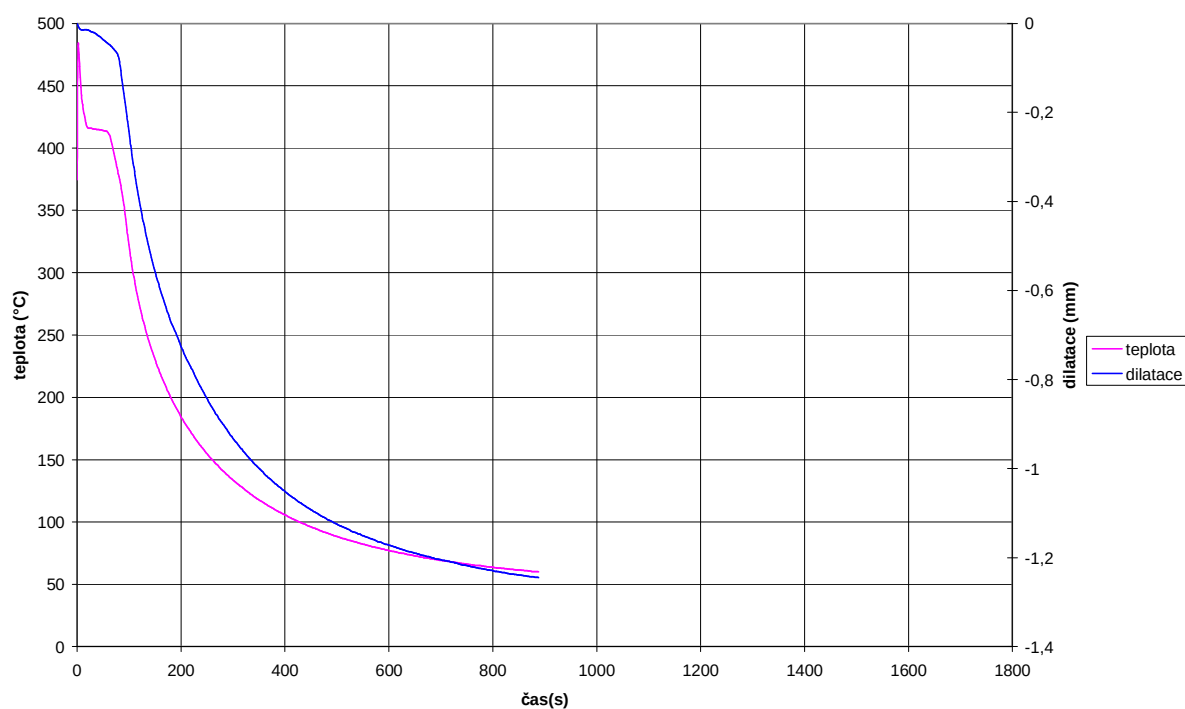


4



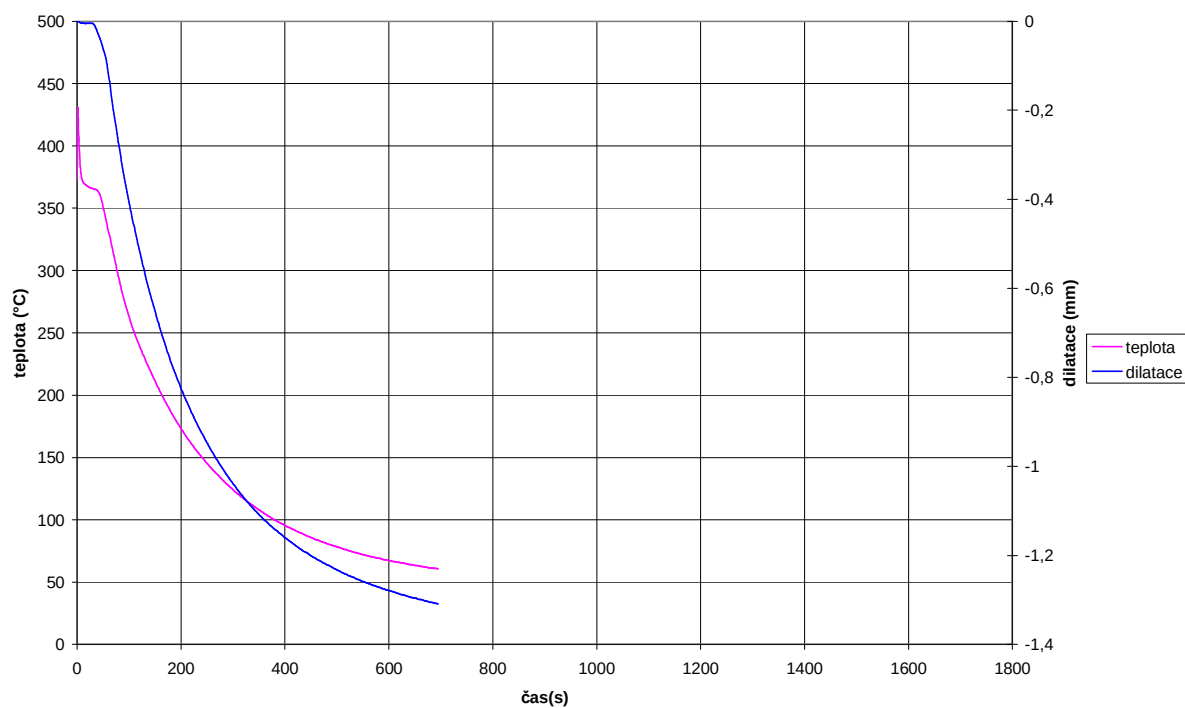
## 5

## Příloha č.4



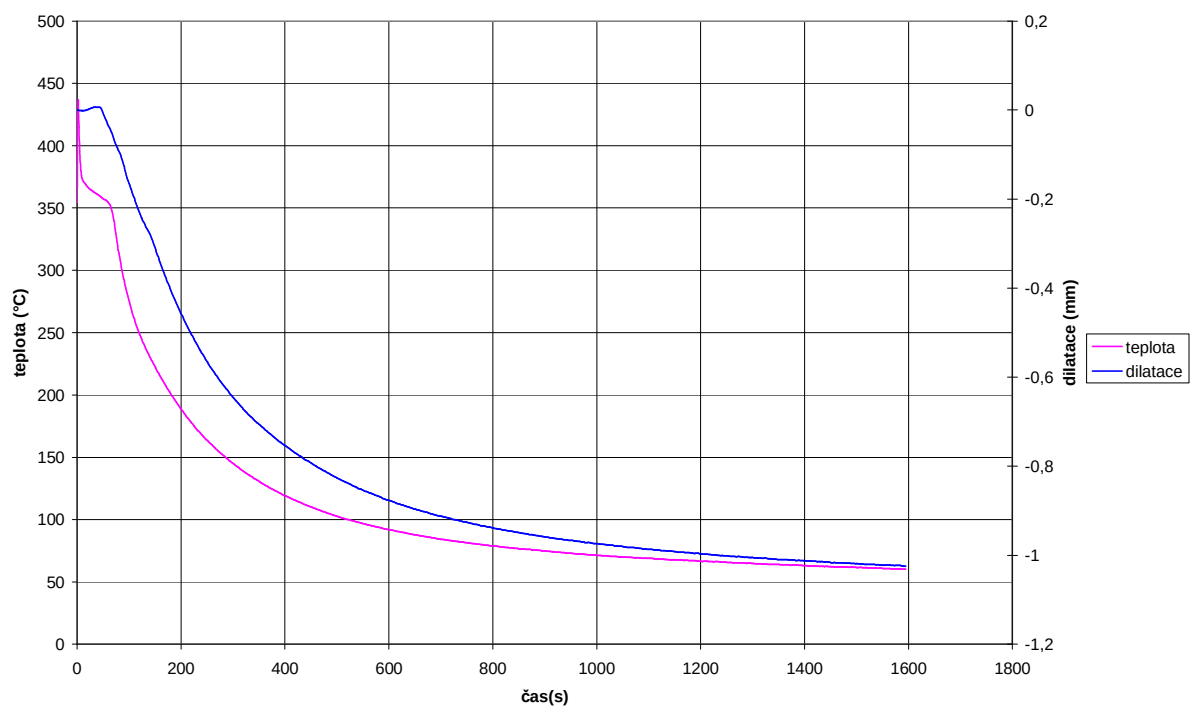
## Zinek 400

## 1

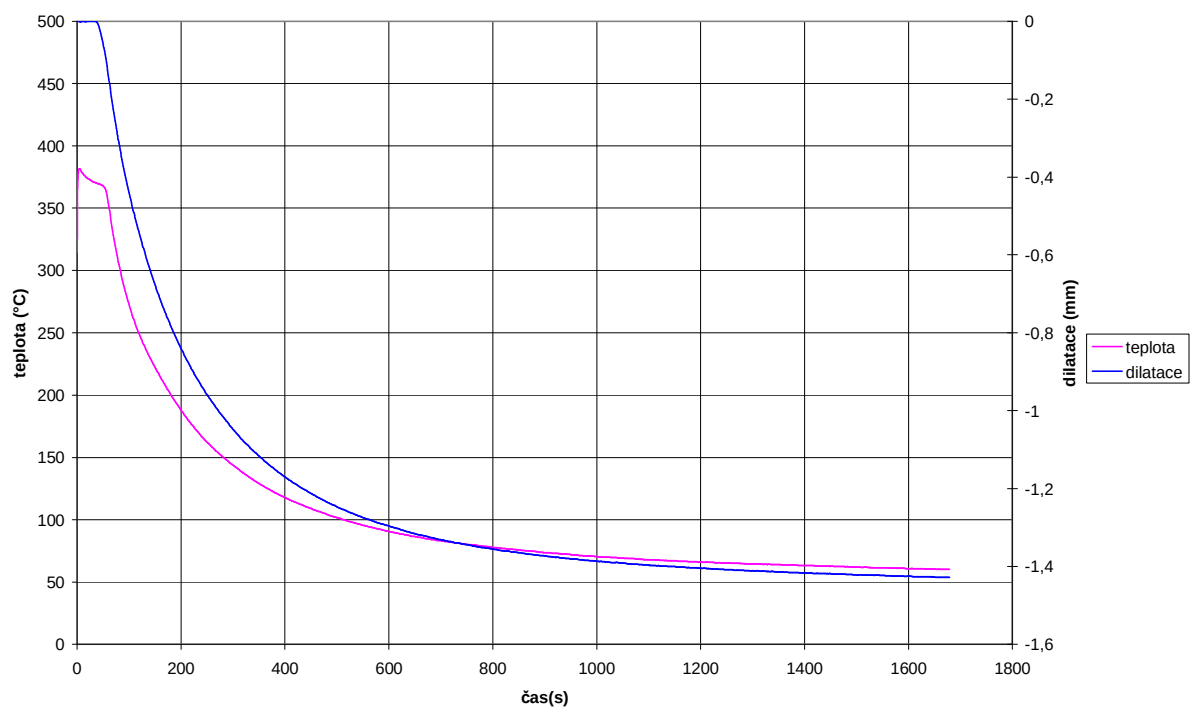


2

## Příloha č.4

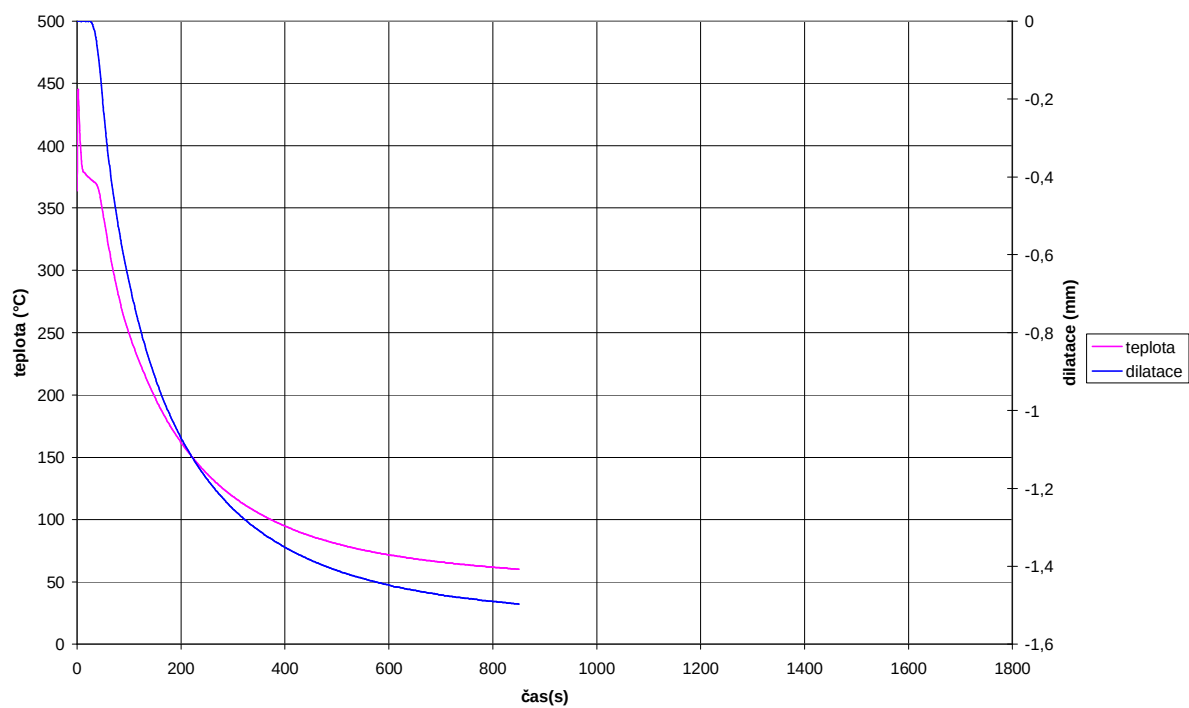


3

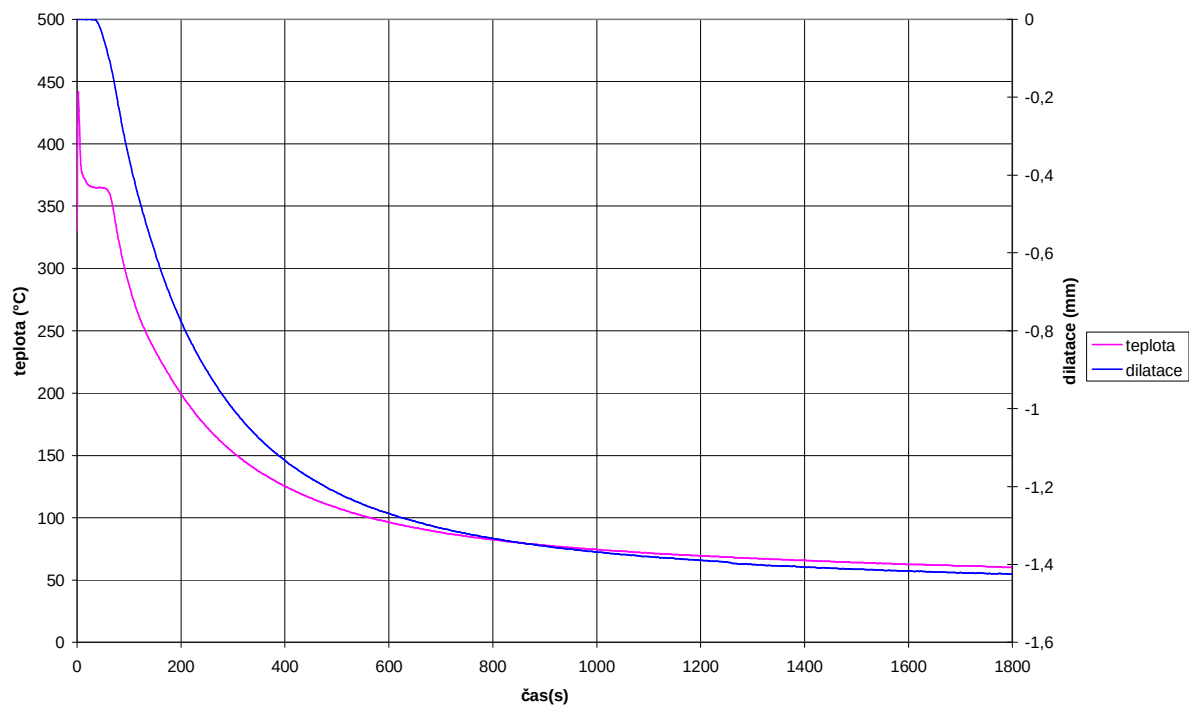


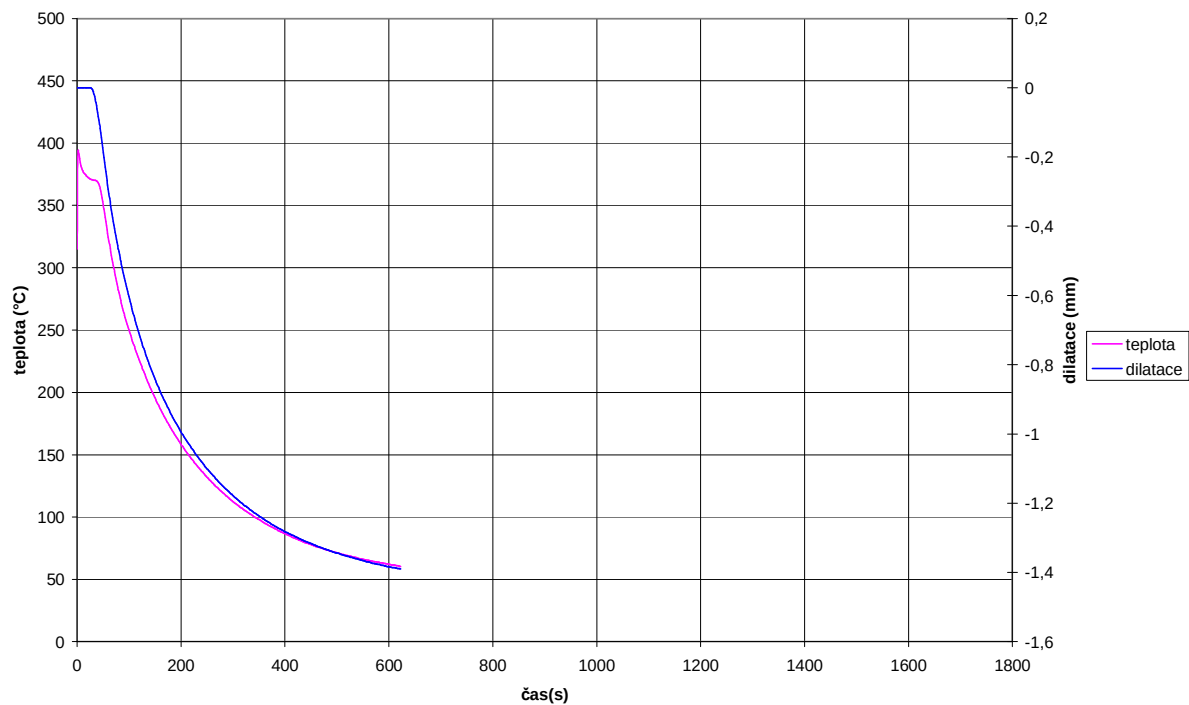
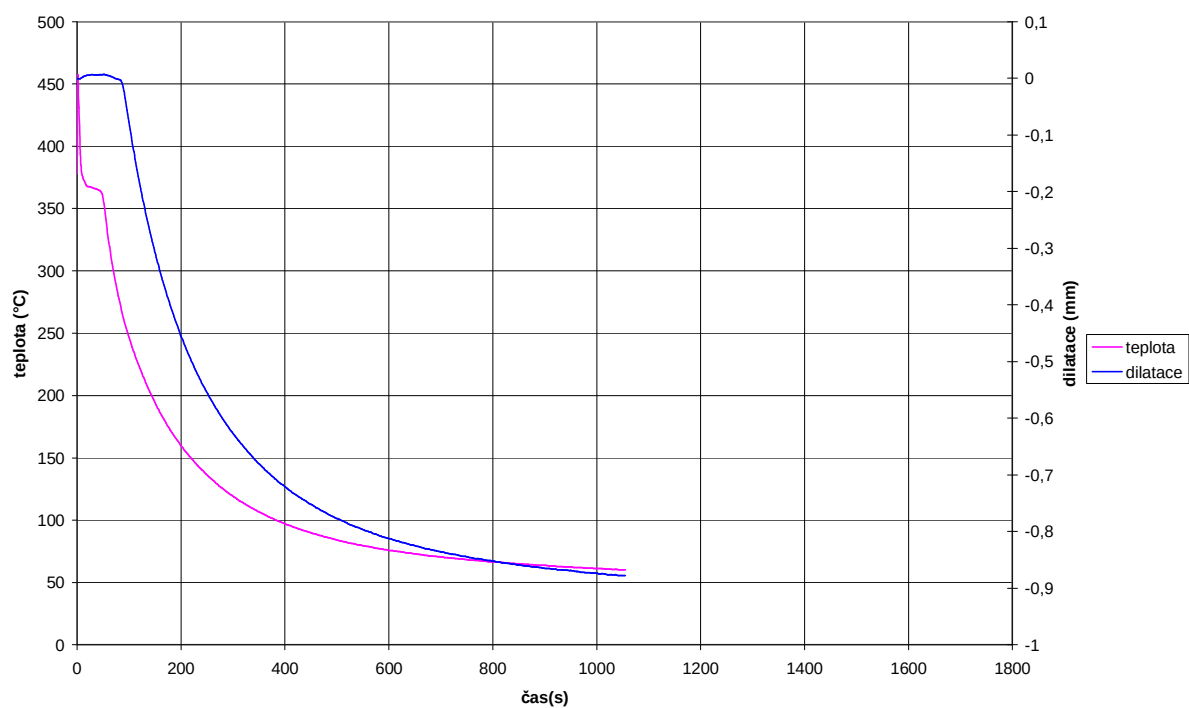
4

## Příloha č.4



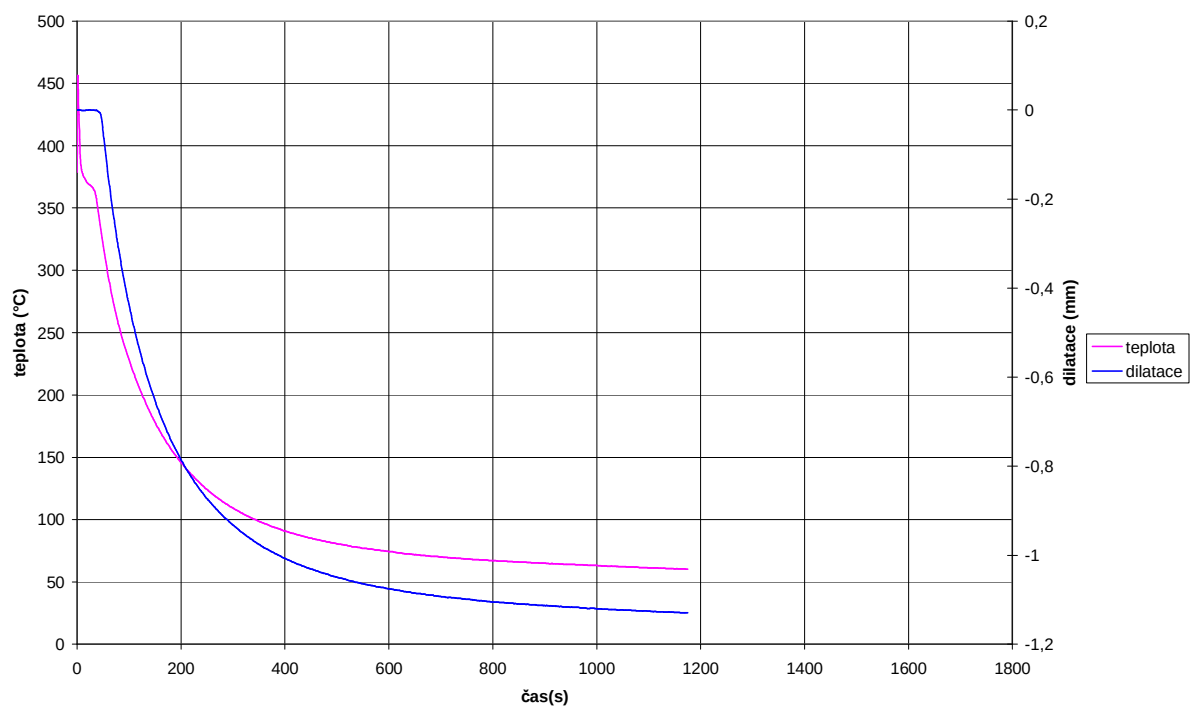
5



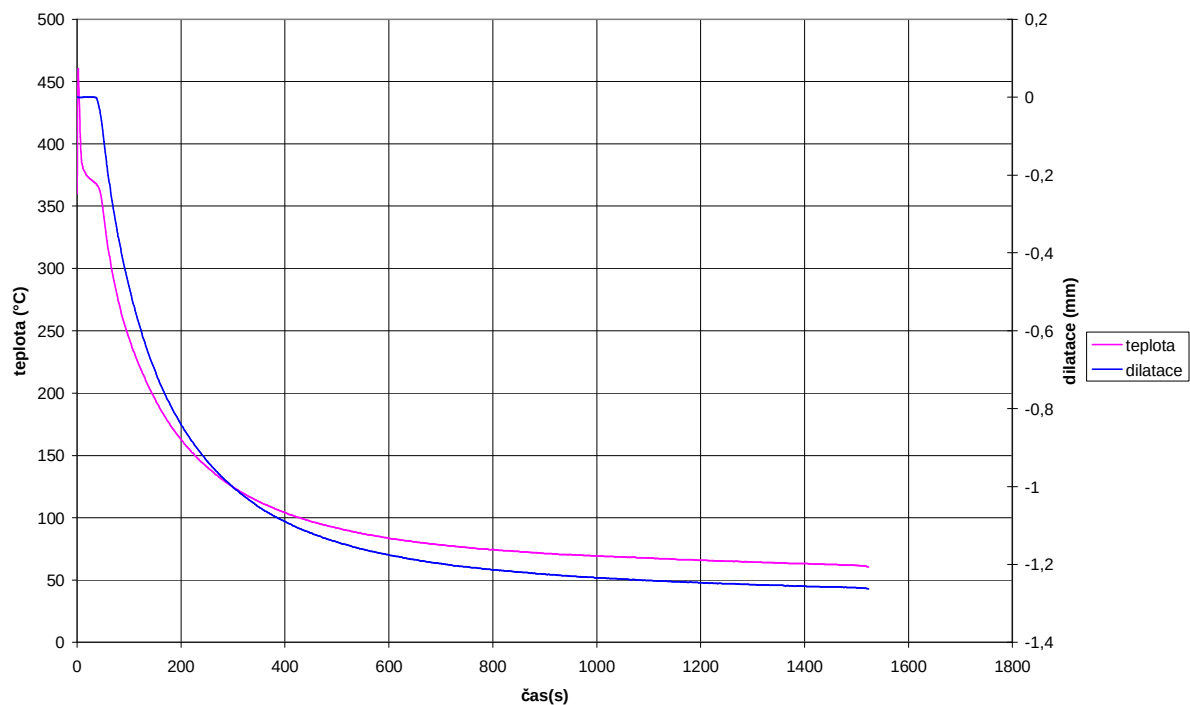
**Zinek 410****1****Příloha č.4****2**

3

## Příloha č.4



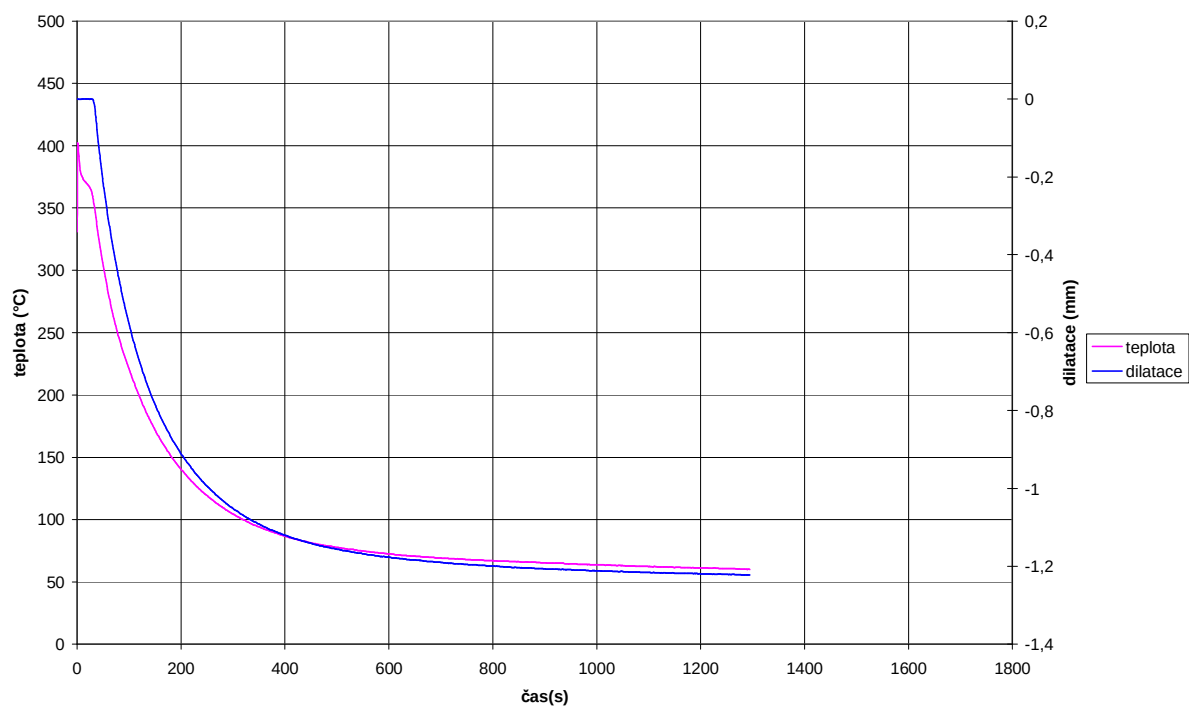
4





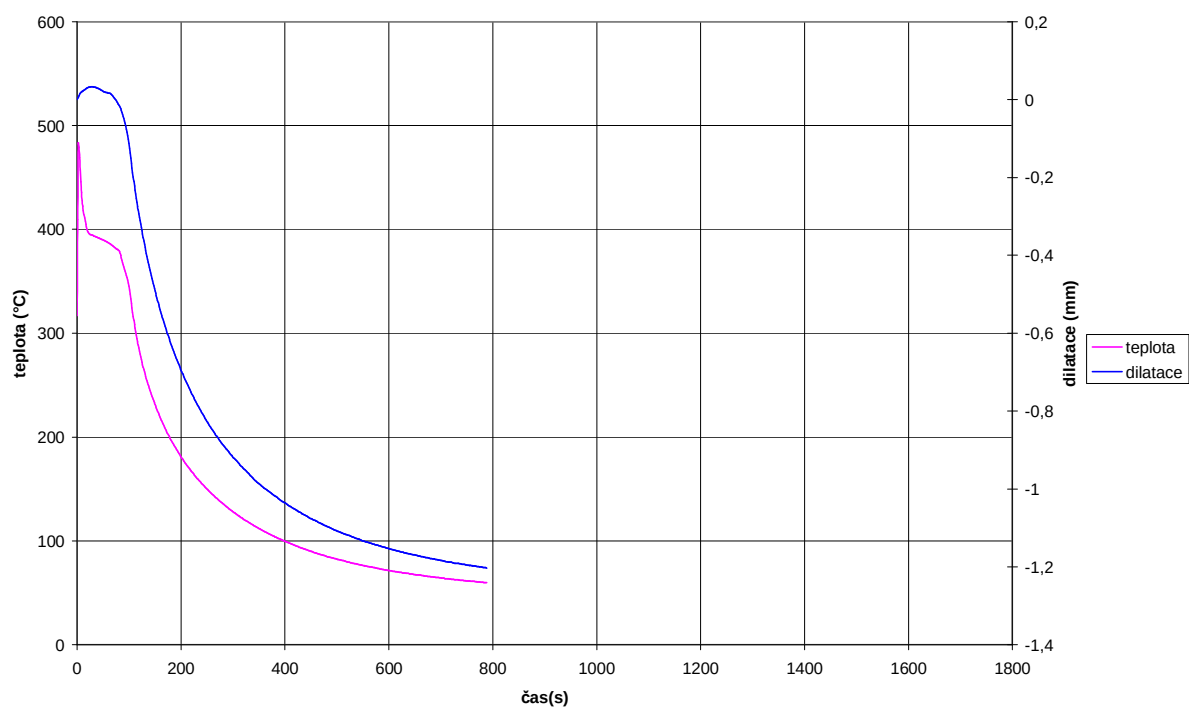
## 5

## Příloha č.4



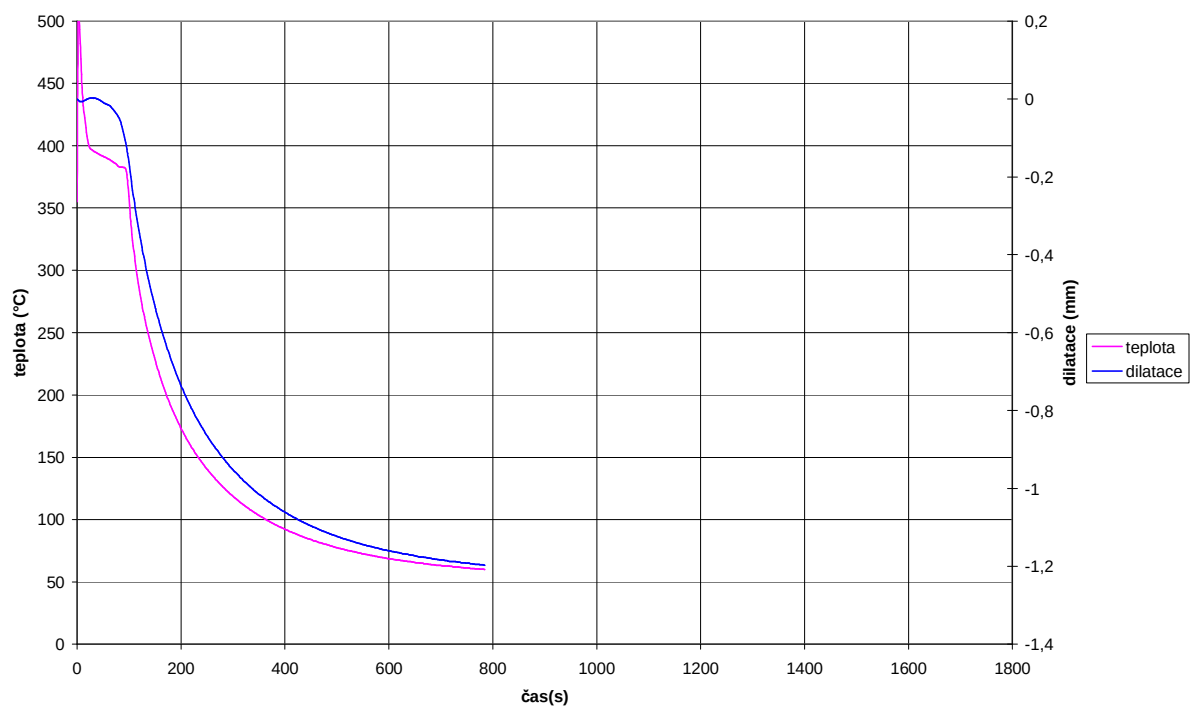
## Zinek 430

## 1 použité

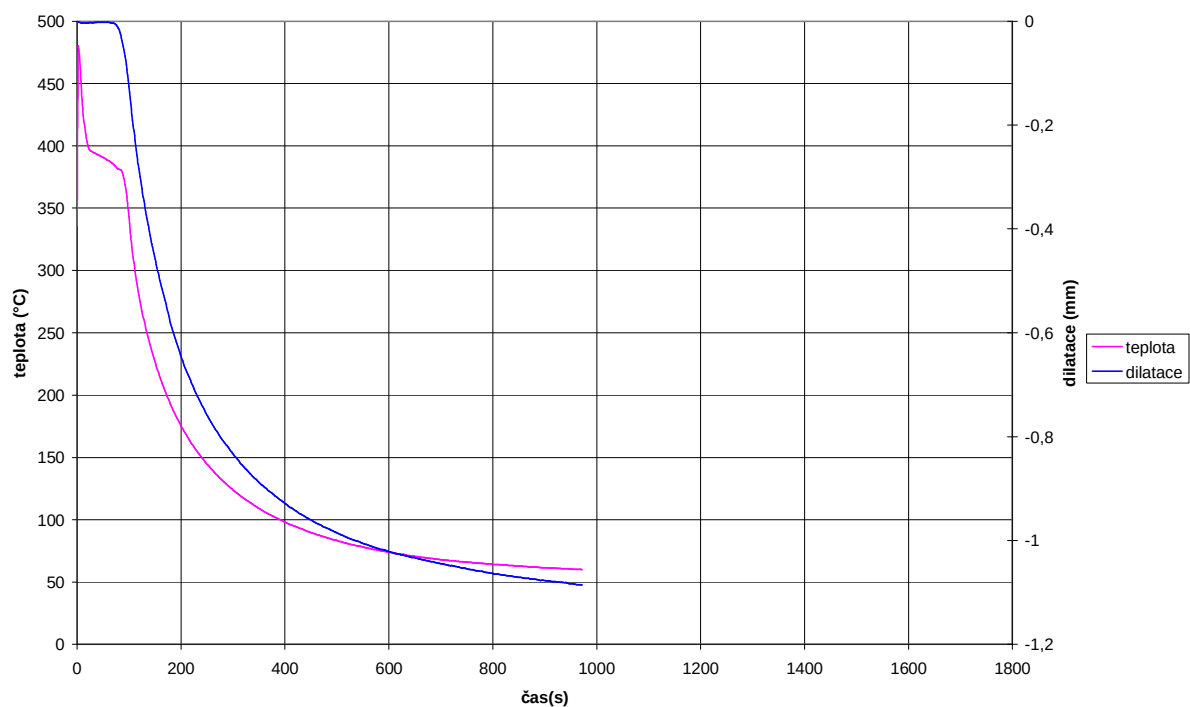


2

## Příloha č.4

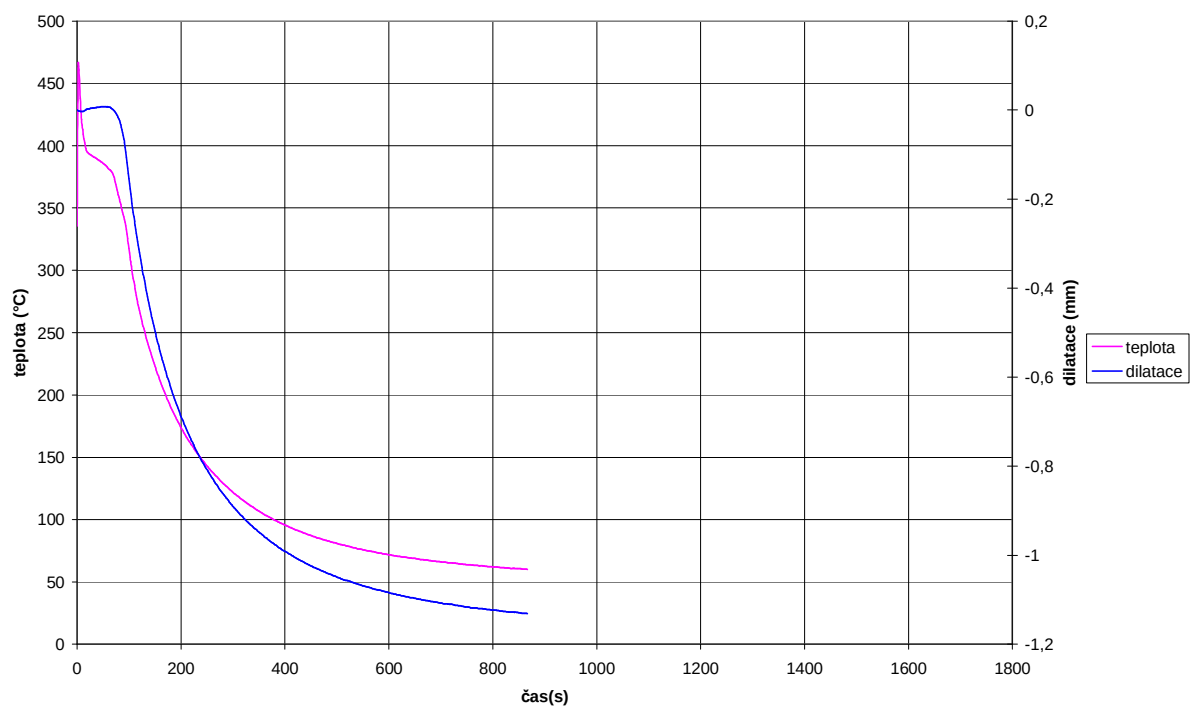


3

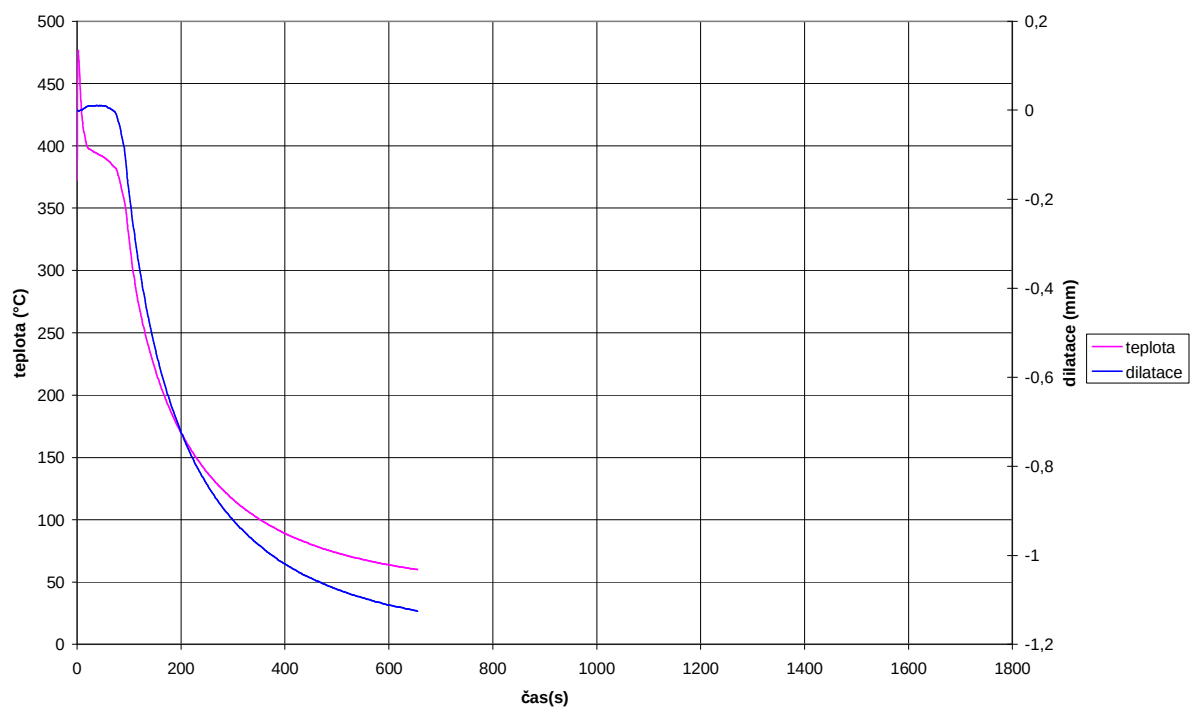


4

## Příloha č.4



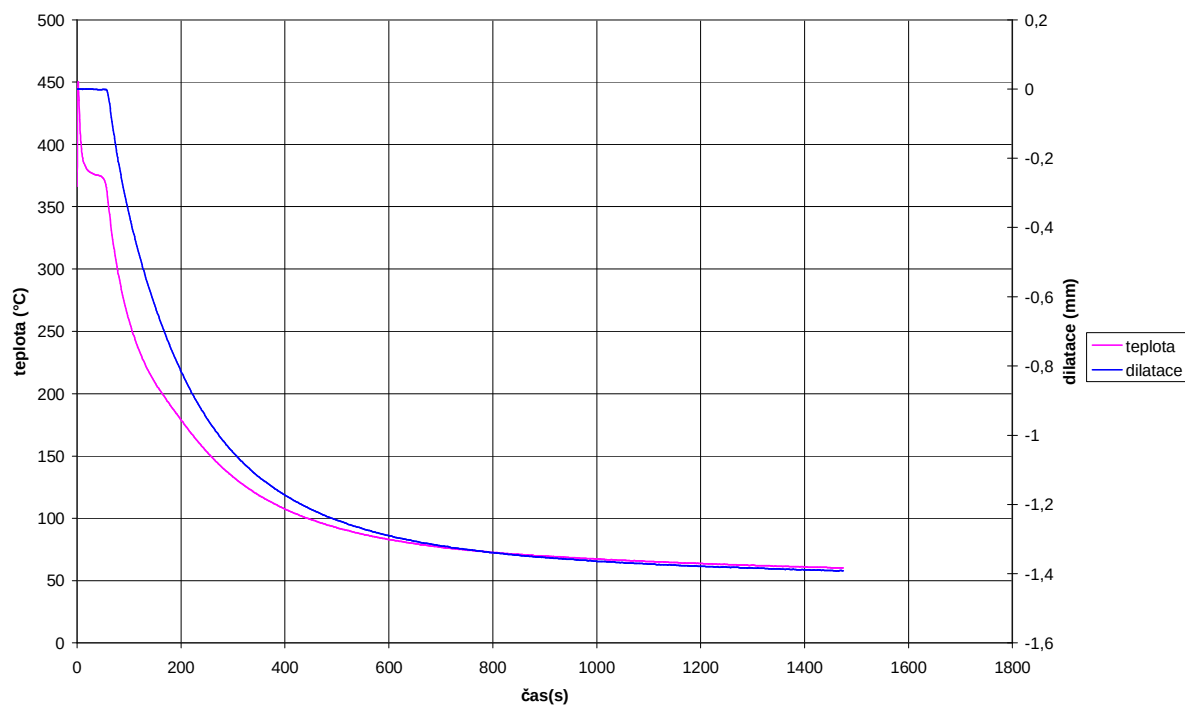
5



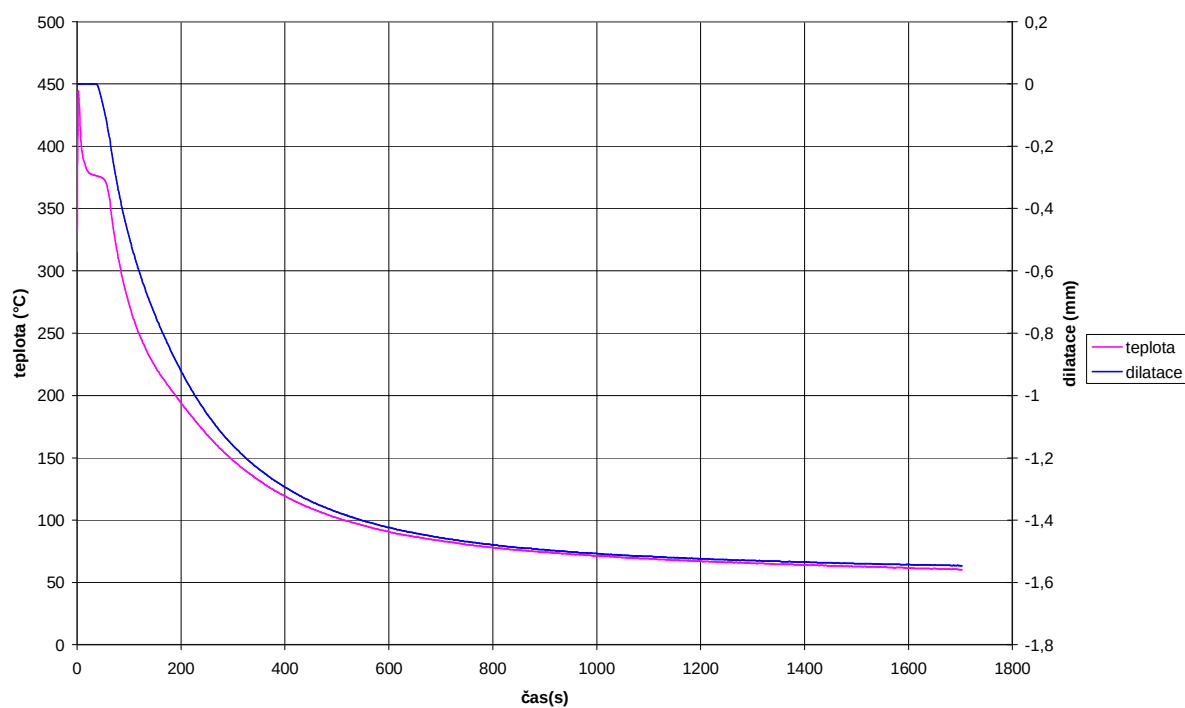
## Zinek 810

1

### Příloha č.4

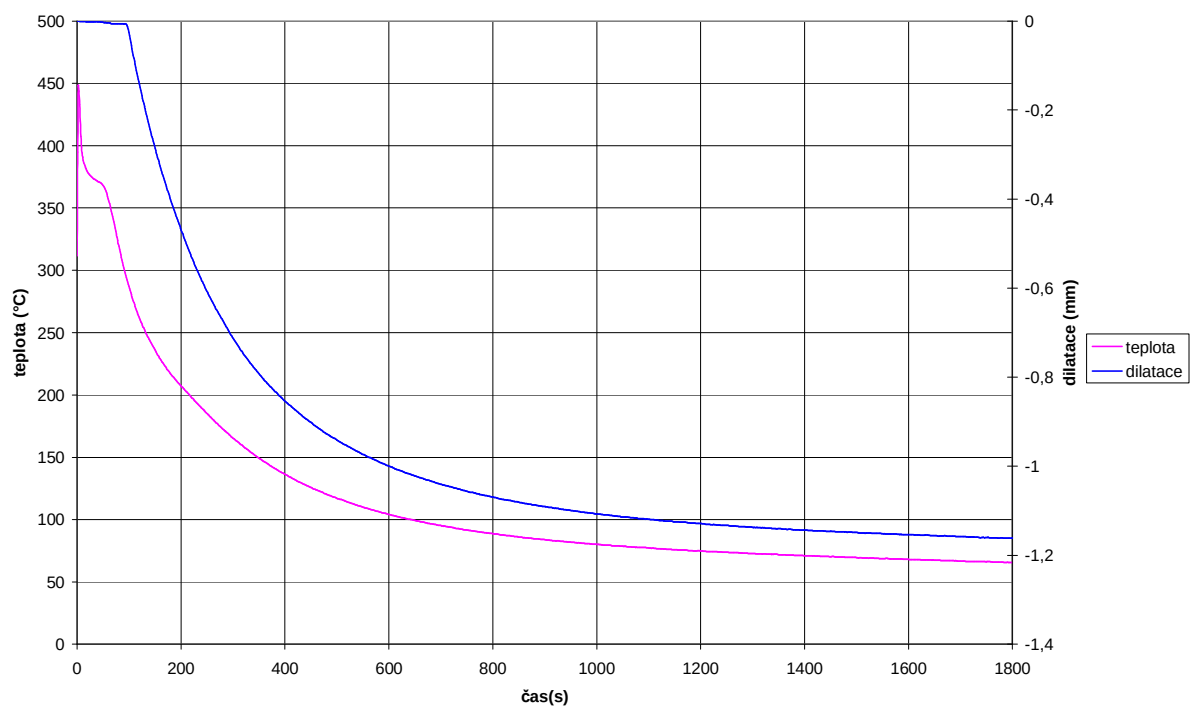


2

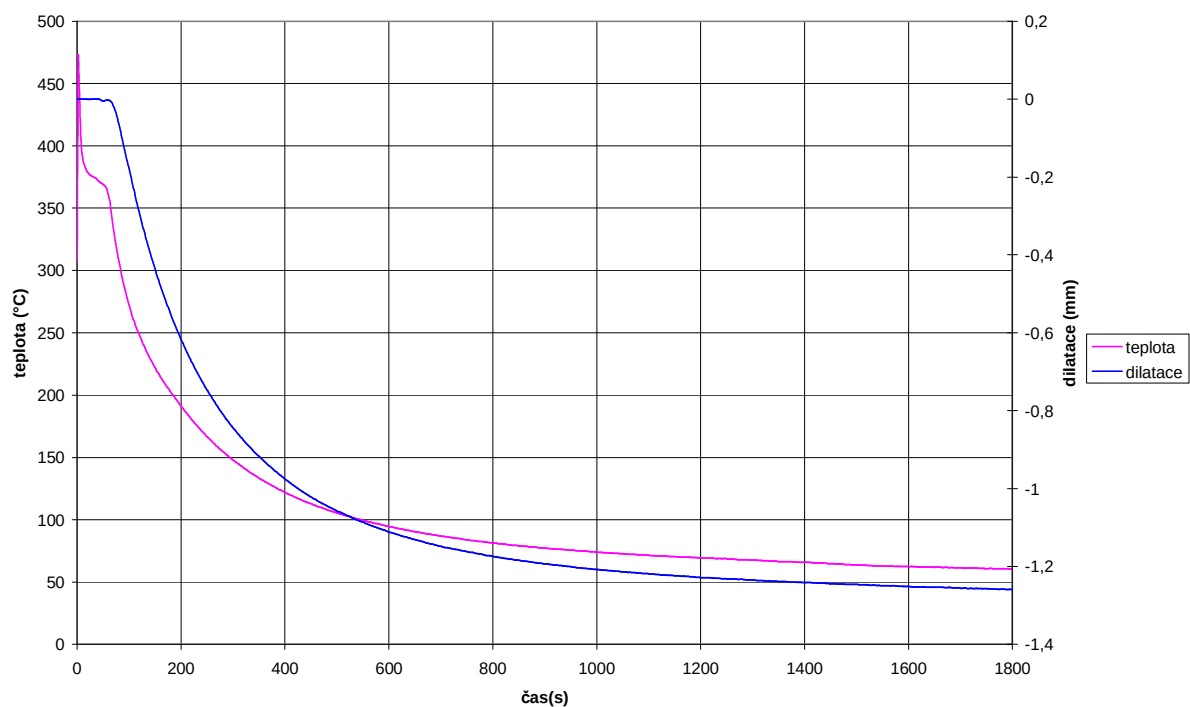


3

## Příloha č.4

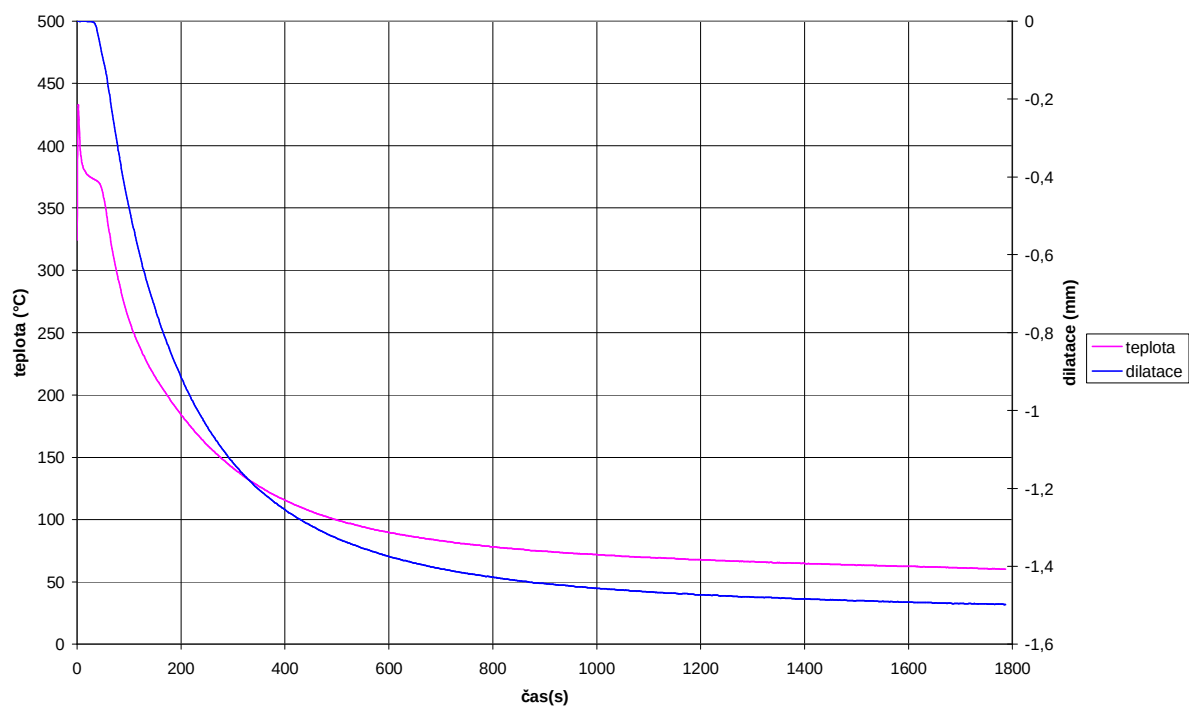


4



## 5

## Příloha č.4

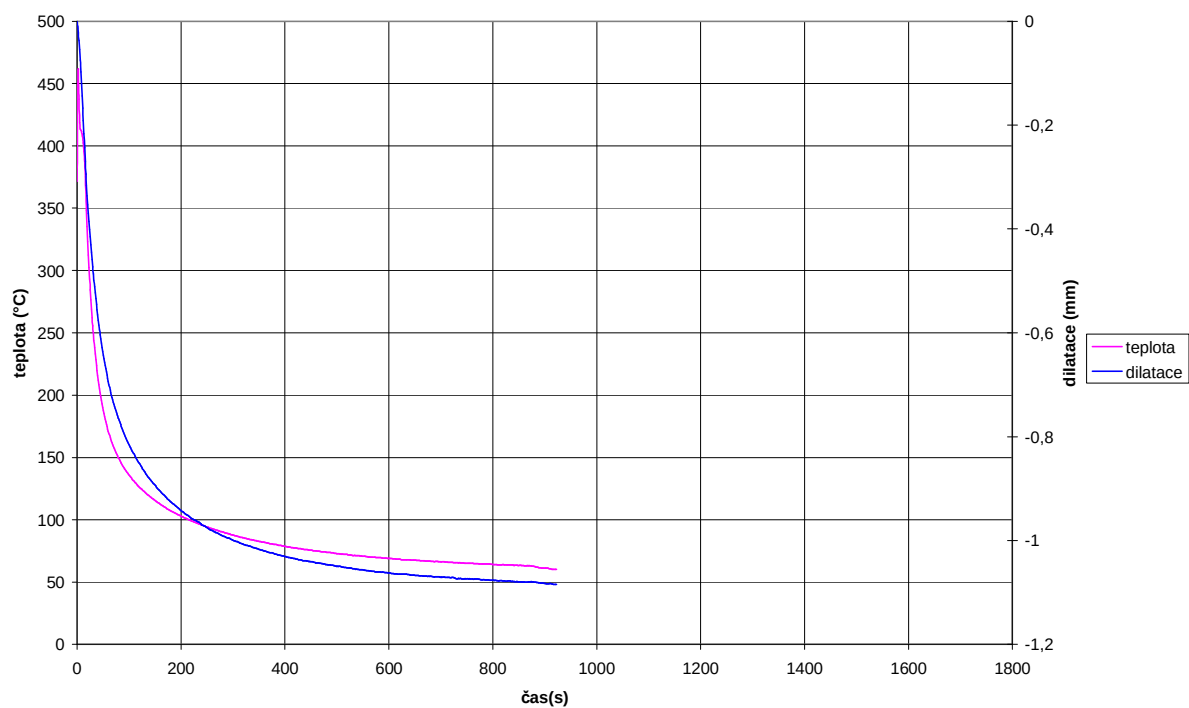


## Příloha č. 5

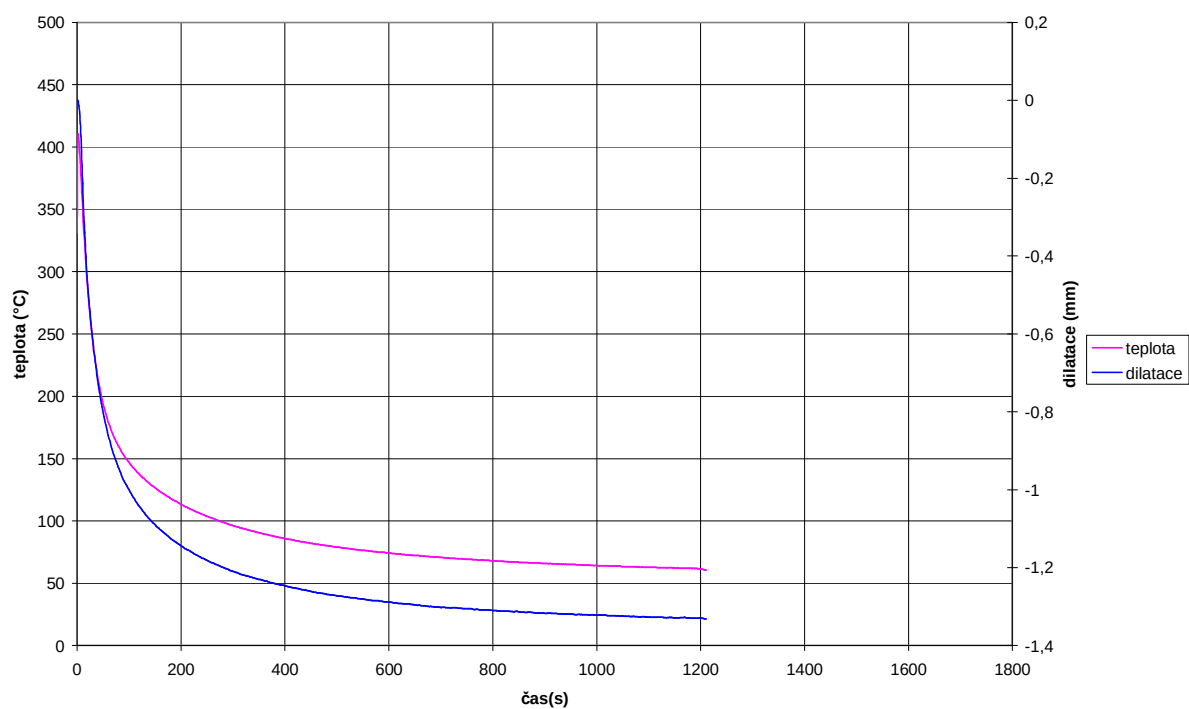
## Zmenšený průřez

## Čistý zinek

1

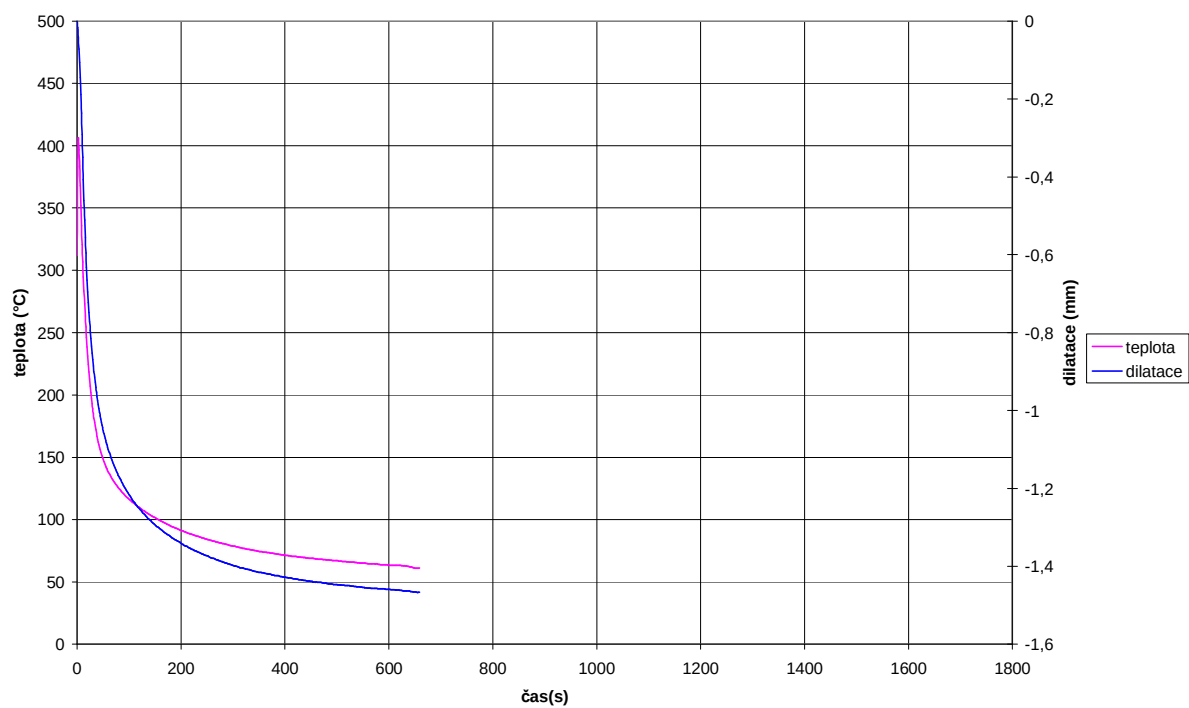


2

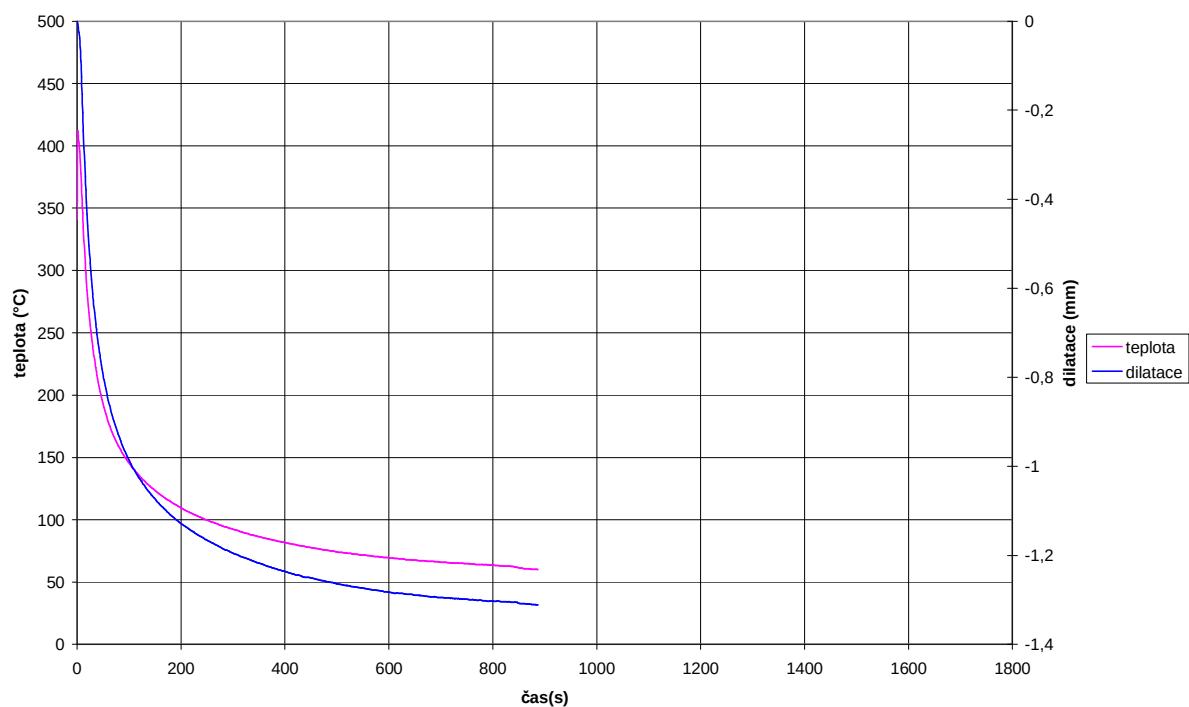


3

## Příloha č.5



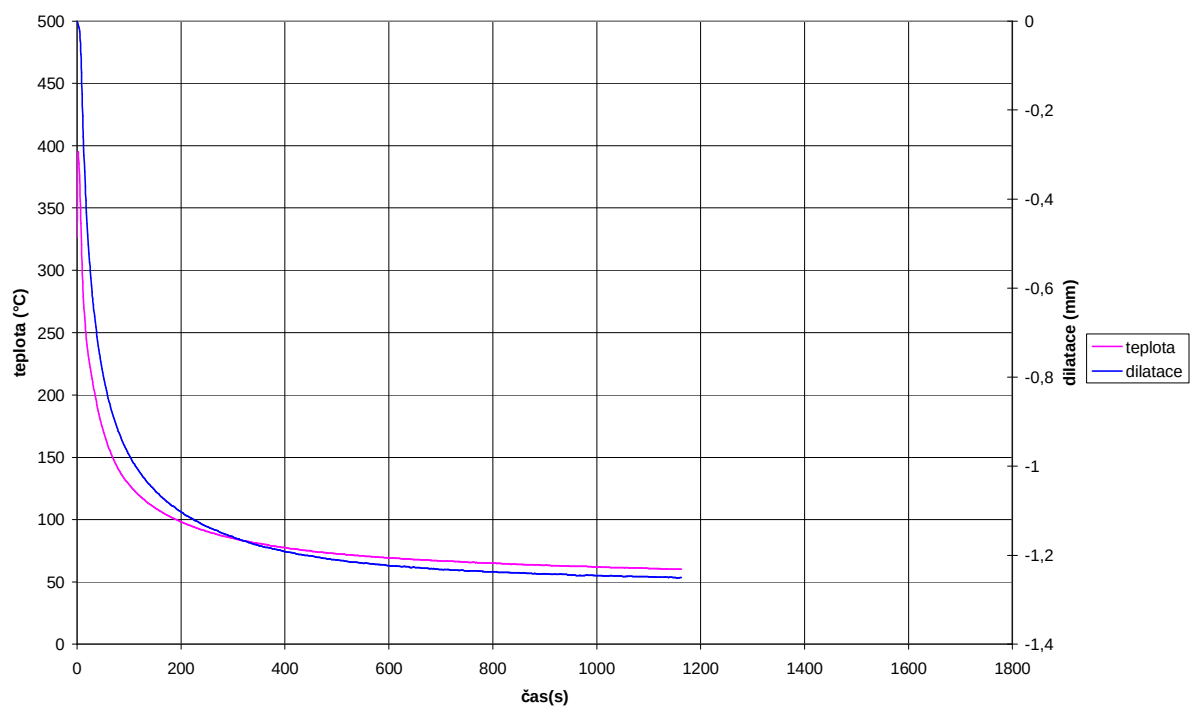
4





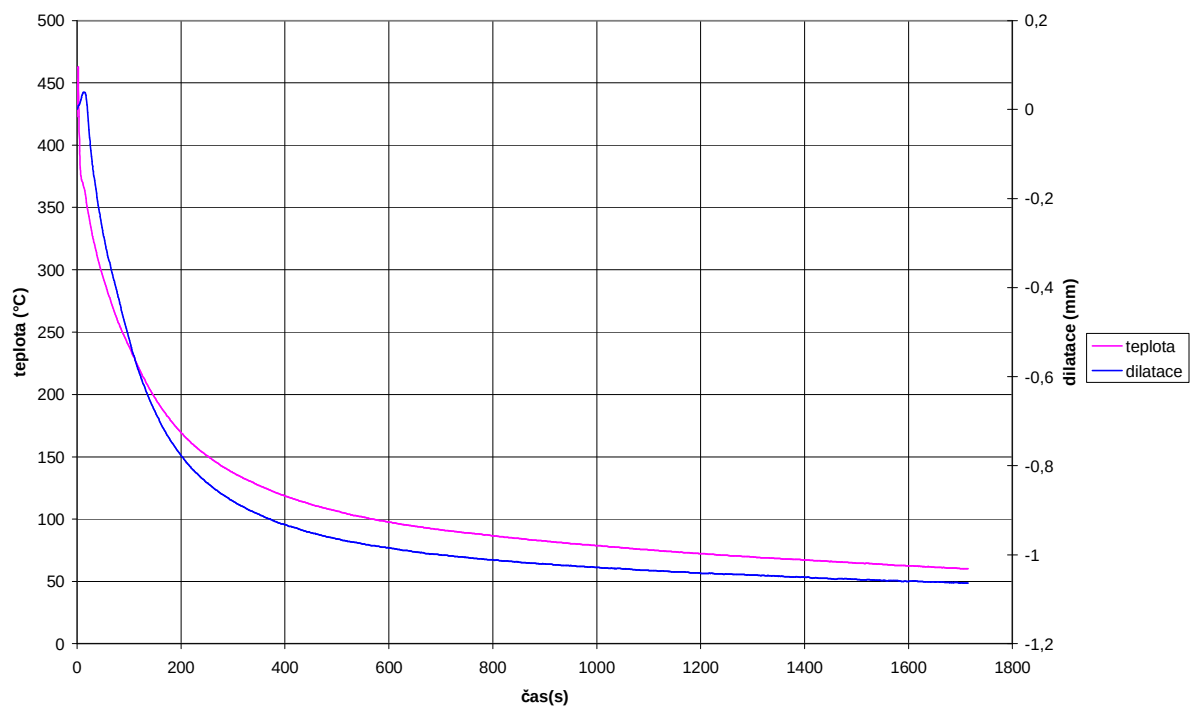
5

## Příloha č.5



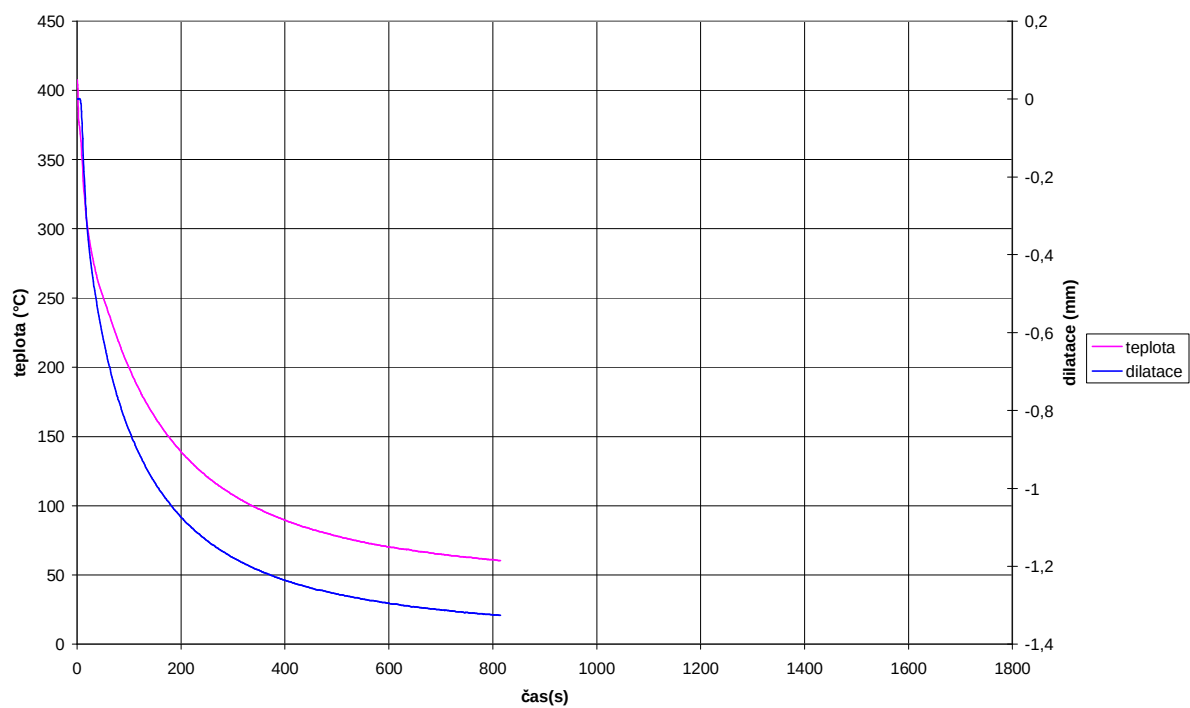
## Zinek 400

1

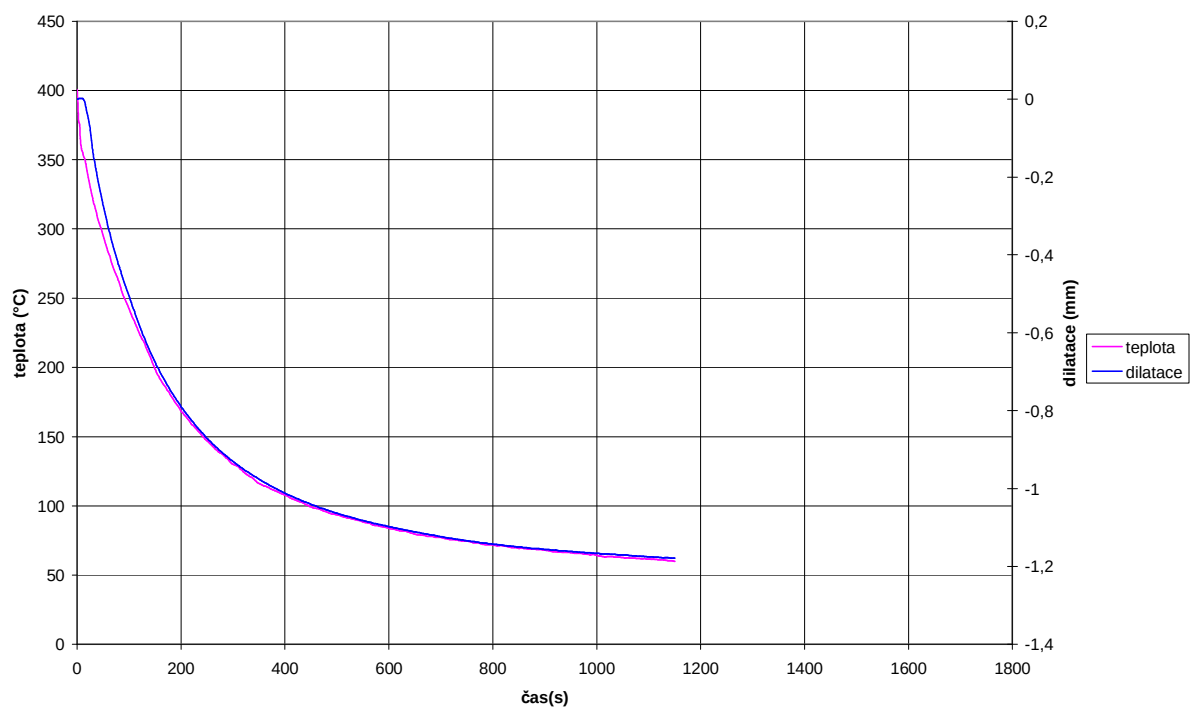


2

## Příloha č.5

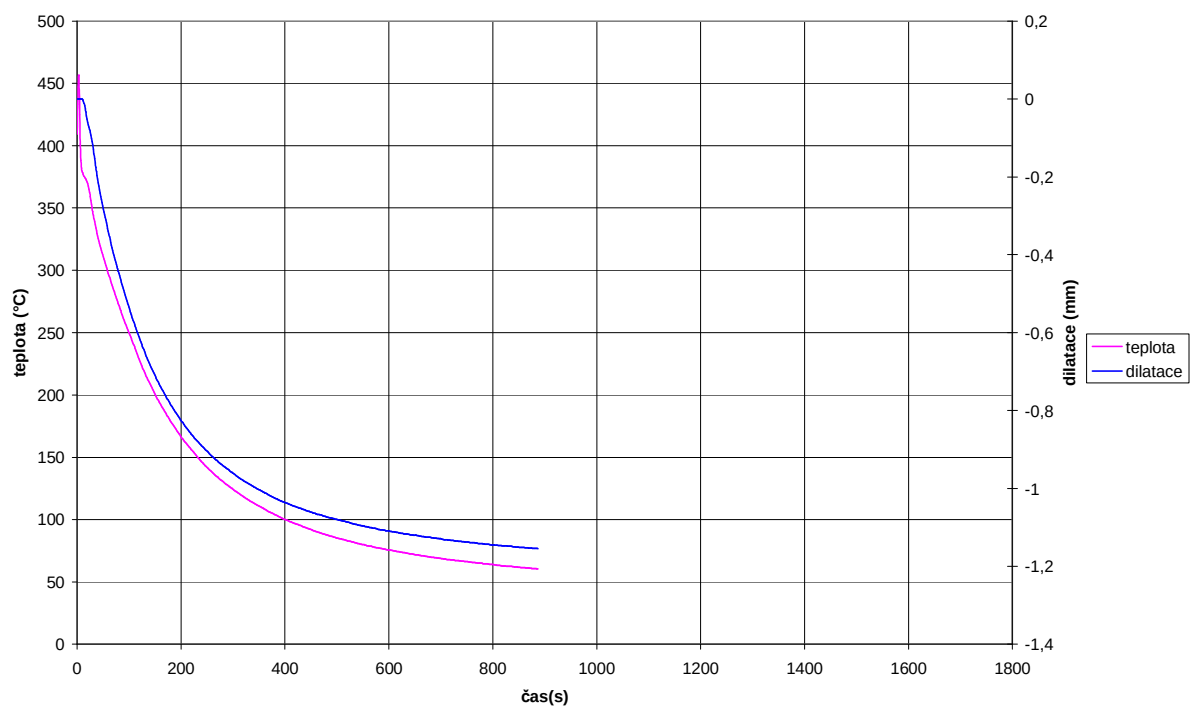


3

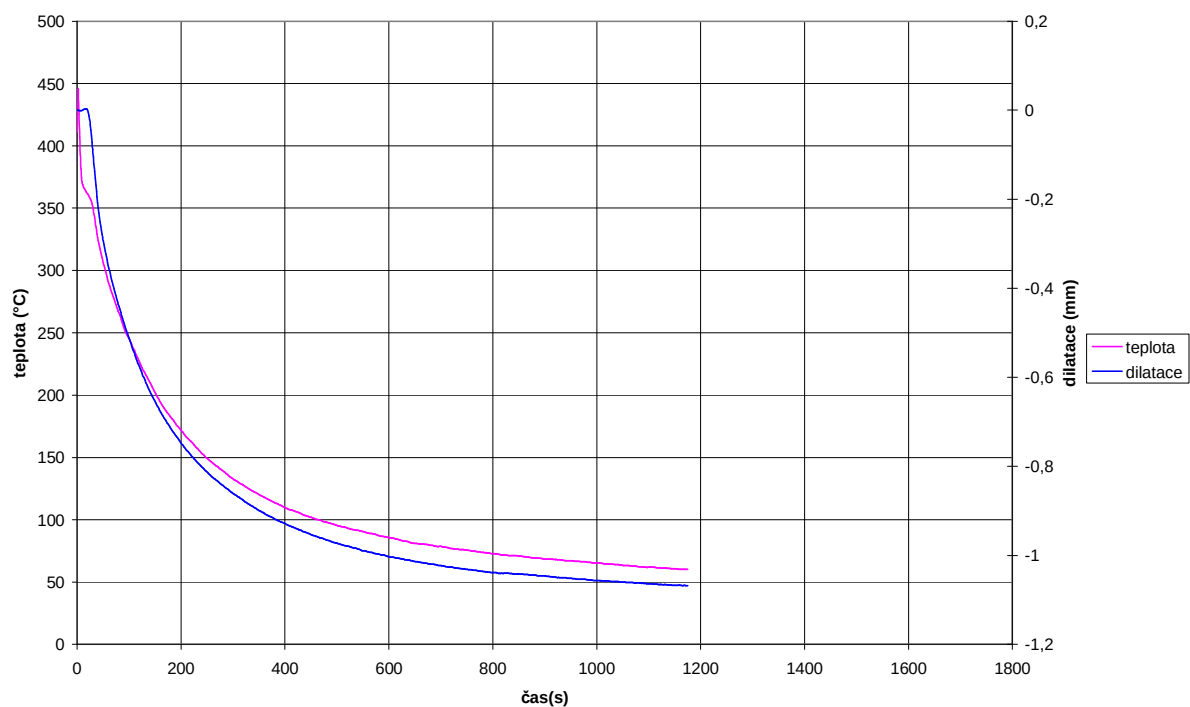


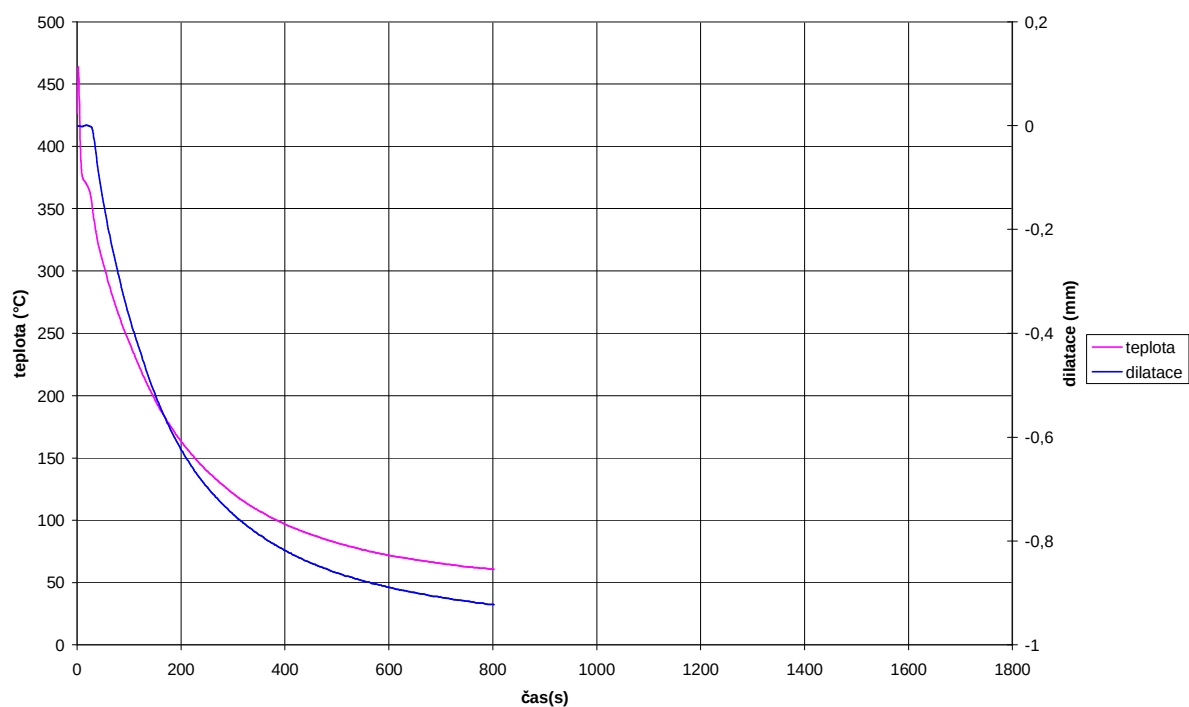
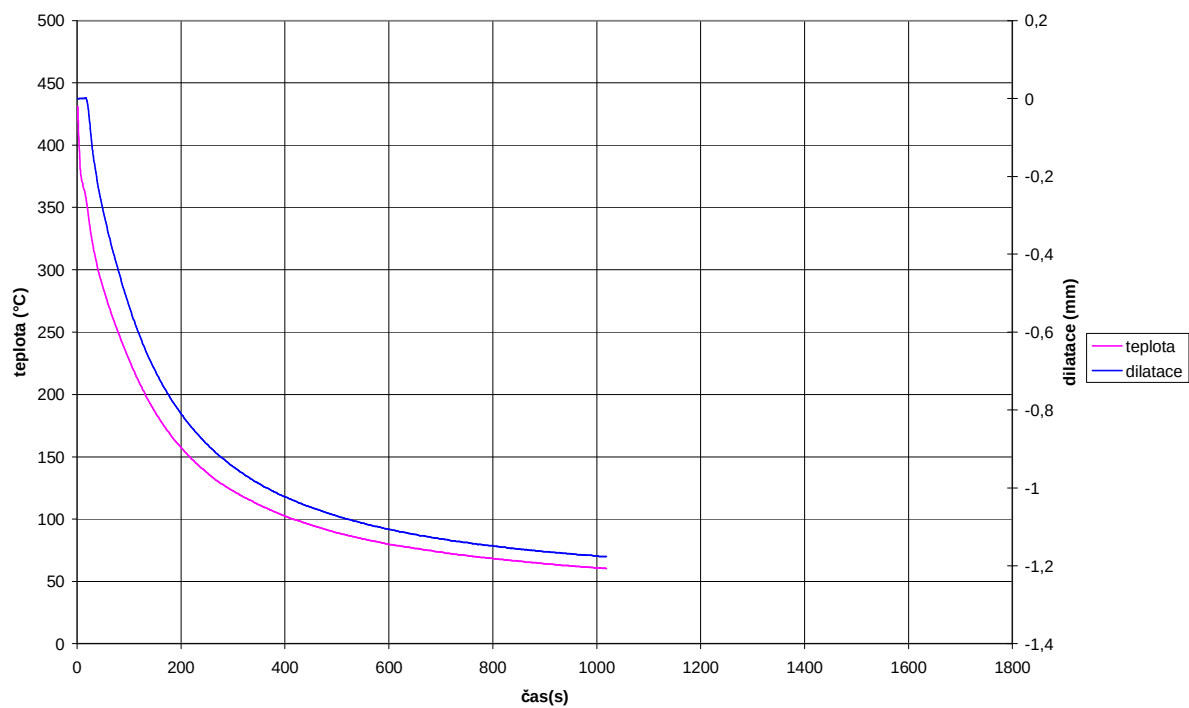
4

## Příloha č.5



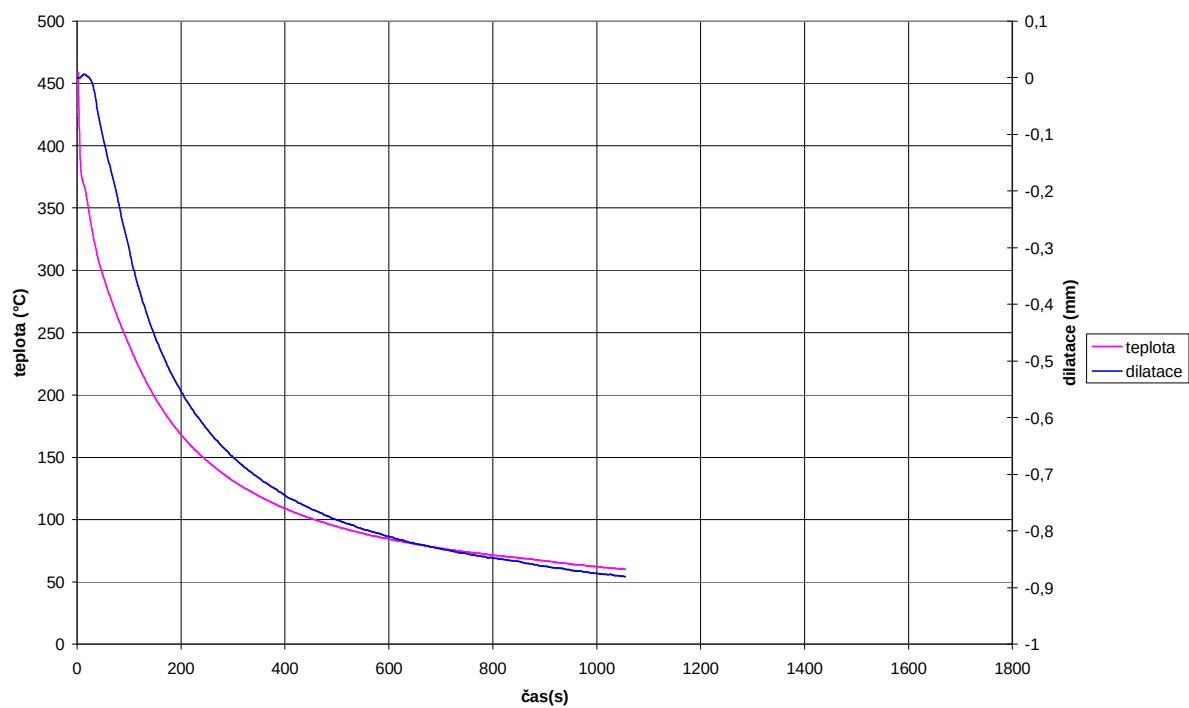
5



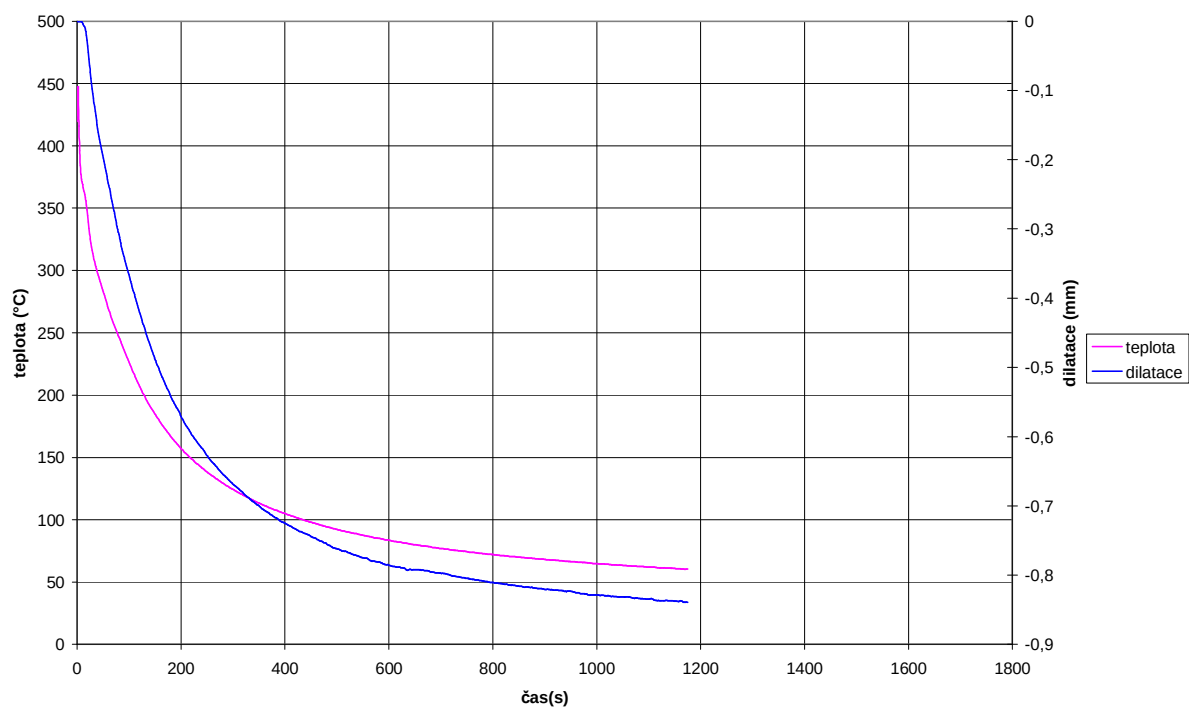
**Zinek 410****1****Příloha č.5****2**

3

## Příloha č.5

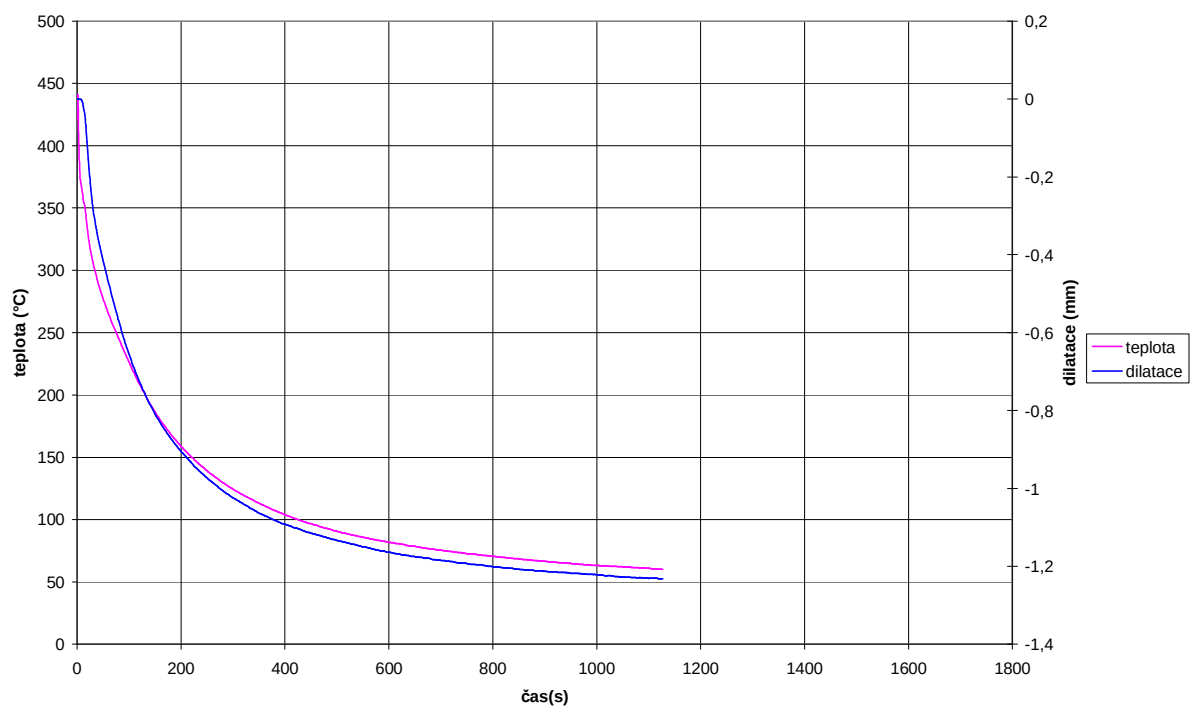


4



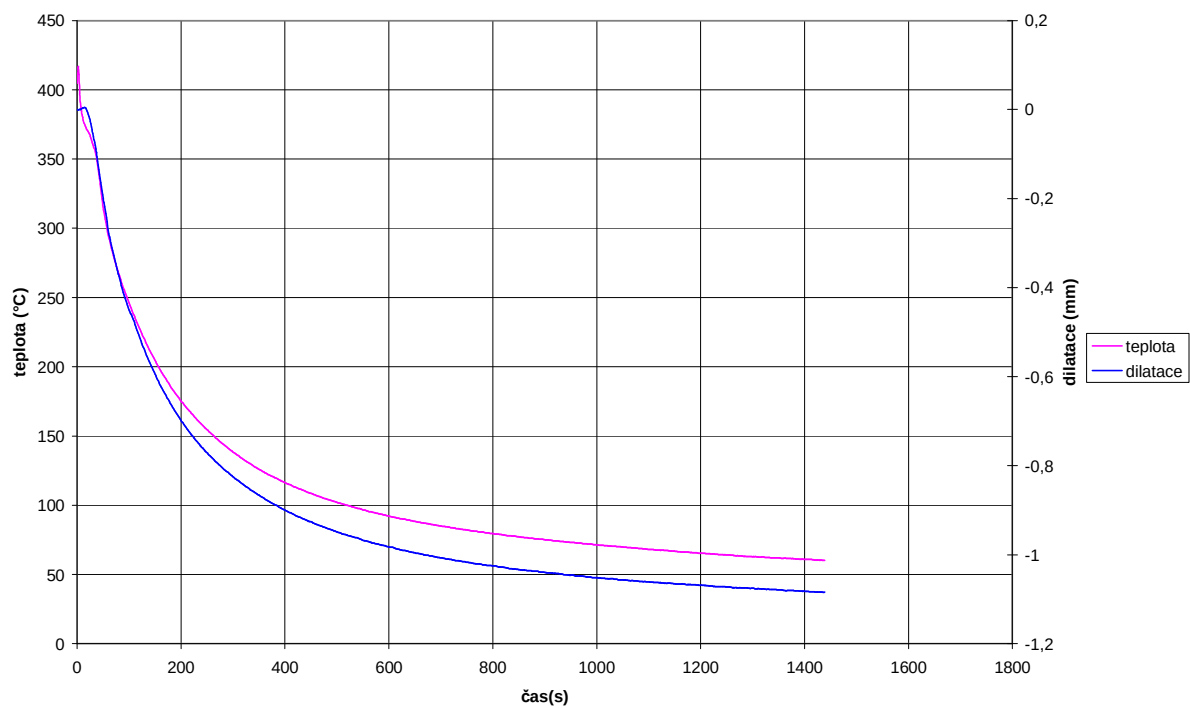
## 5

## Příloha č.5



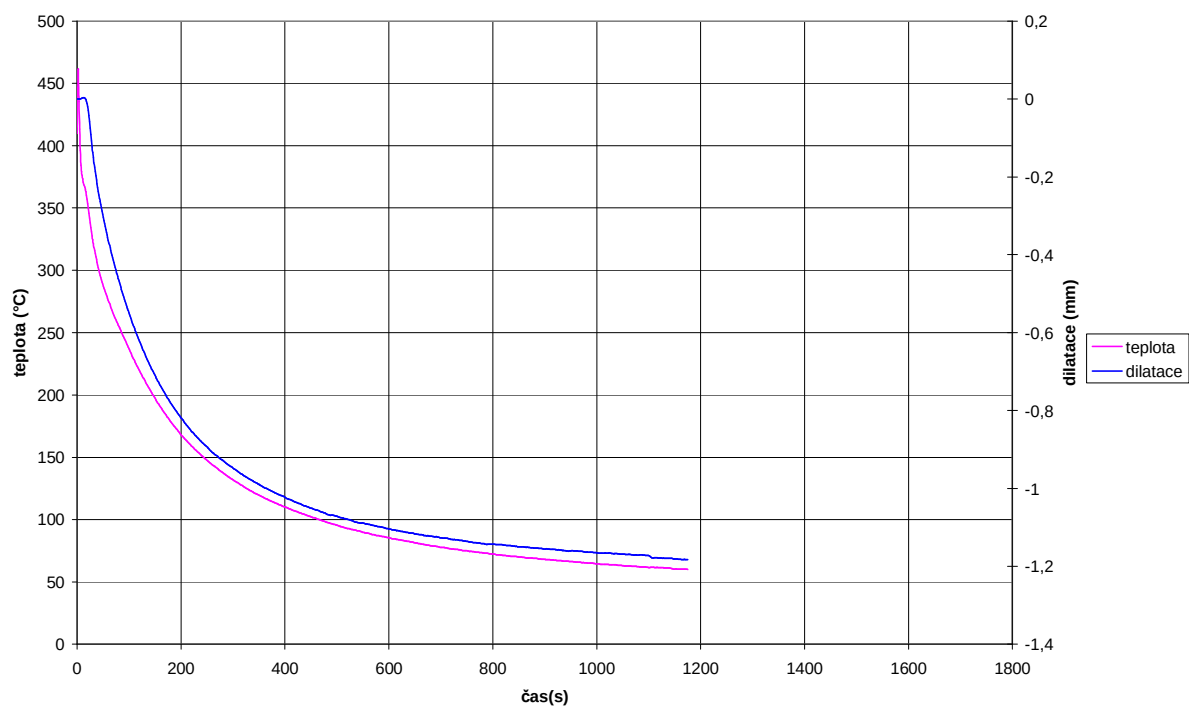
## Zinek 430

## 1

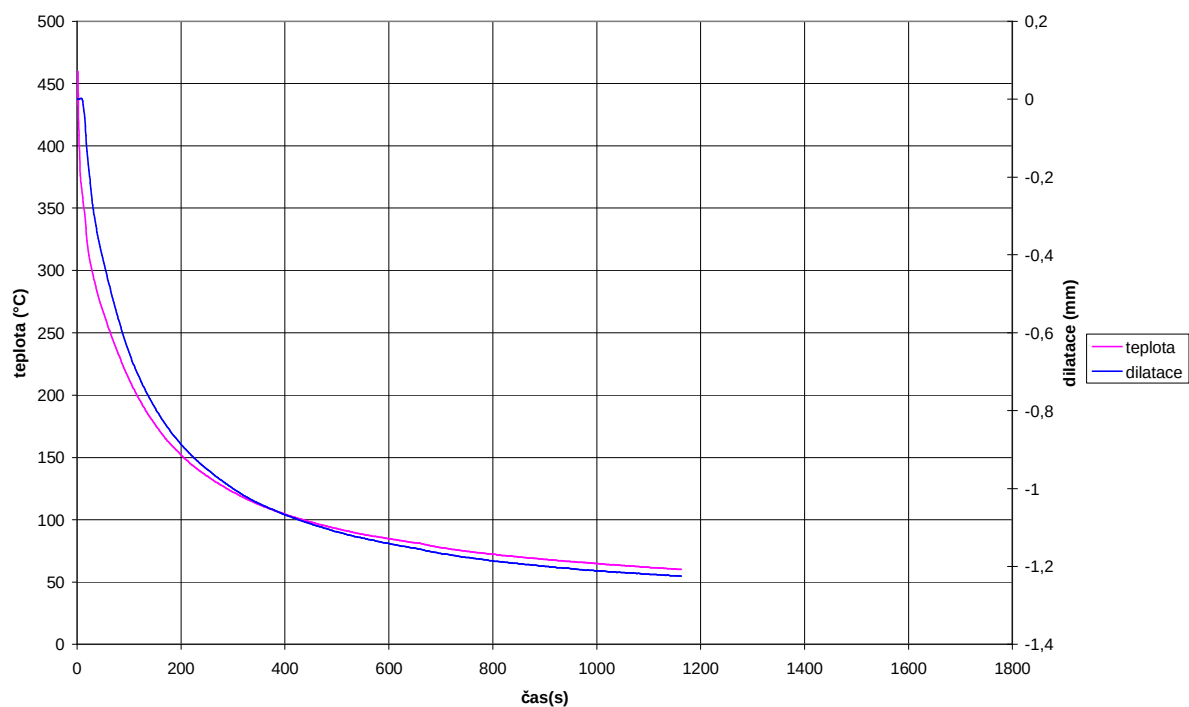


2

## Příloha č.5

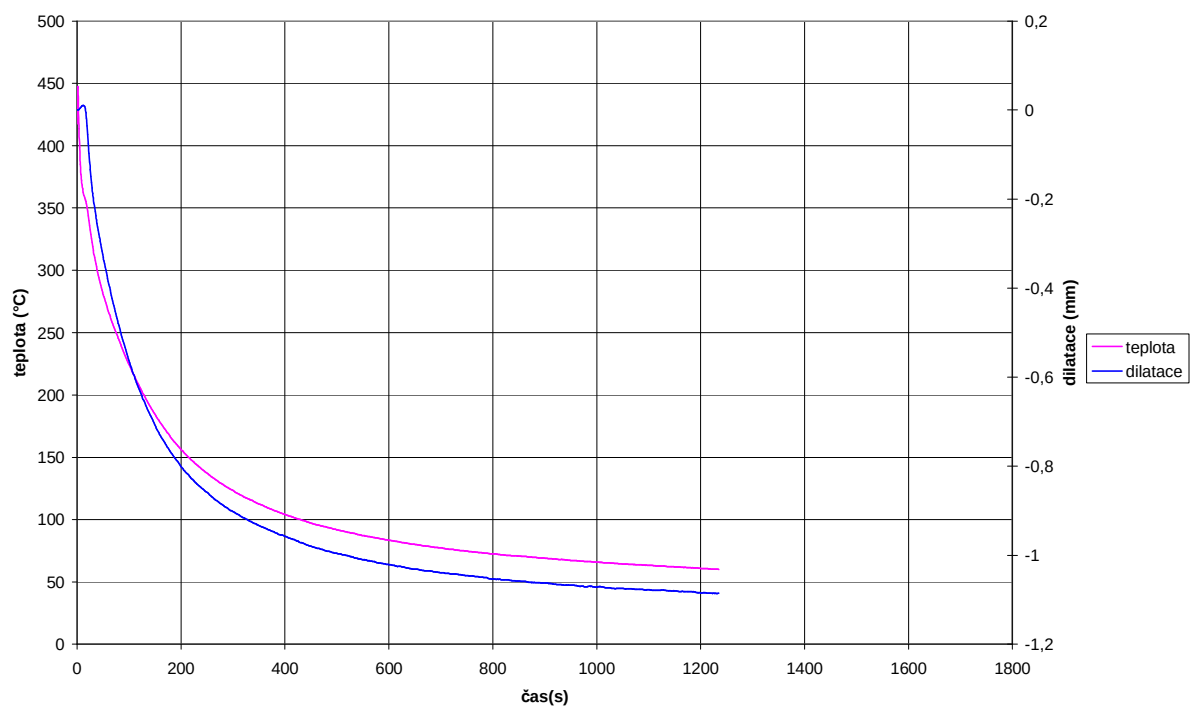


3

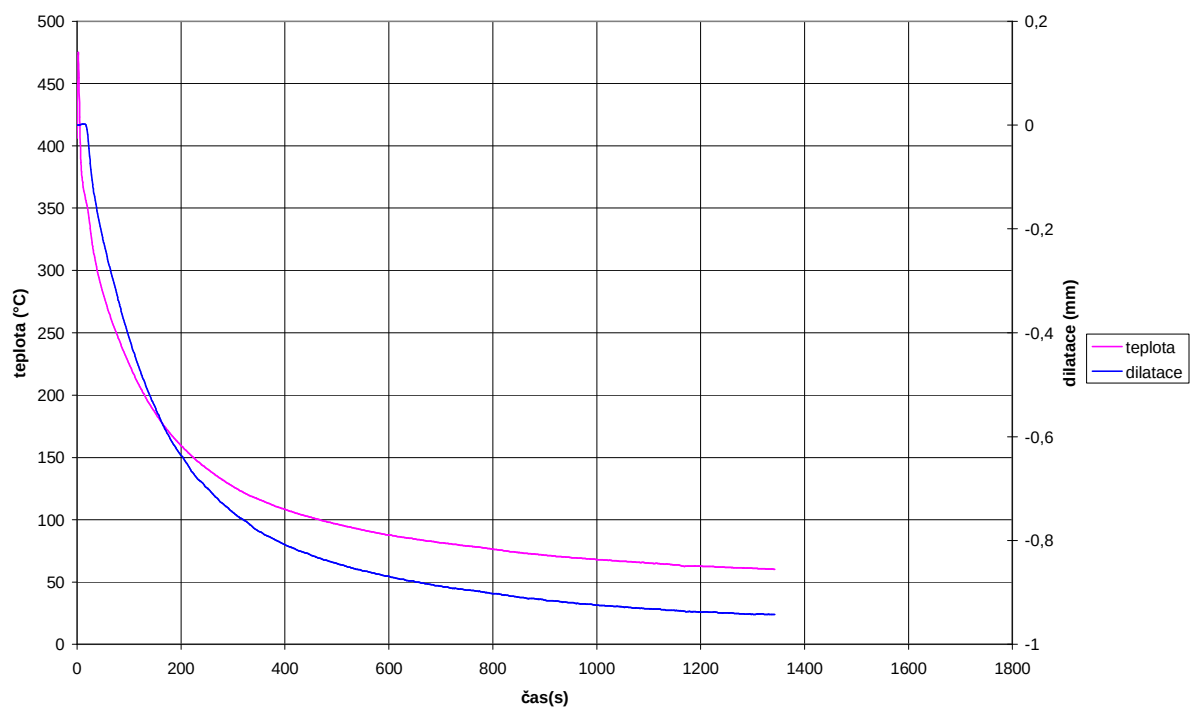


4

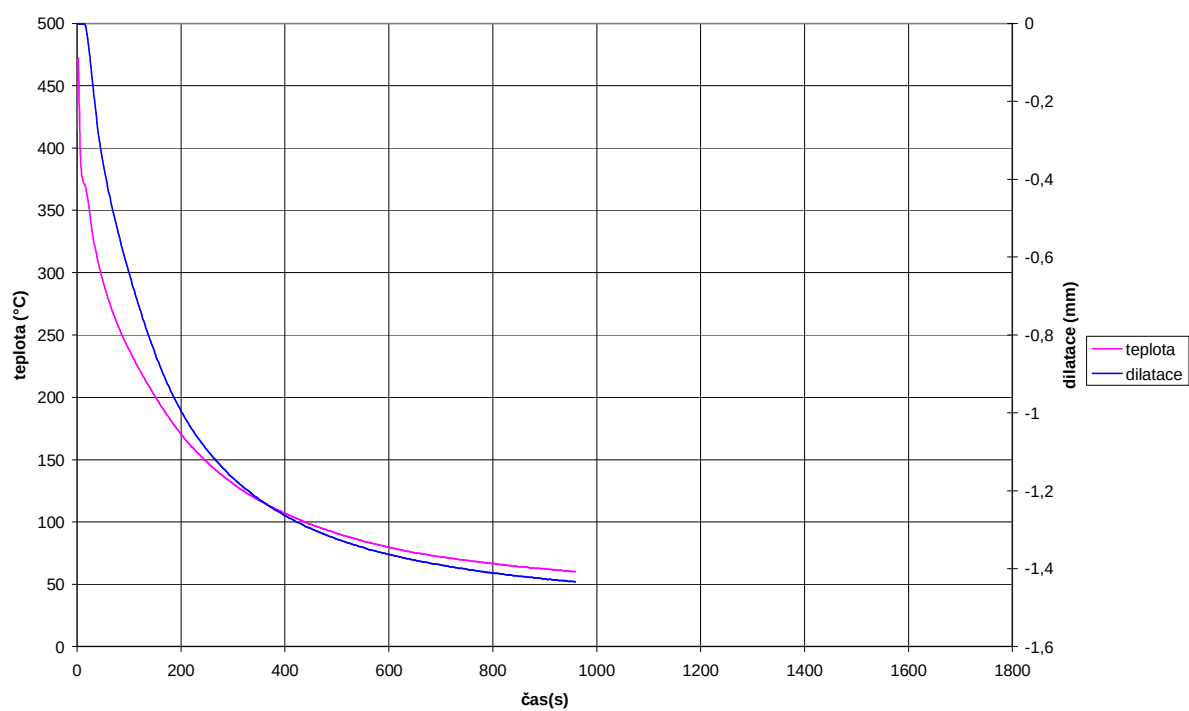
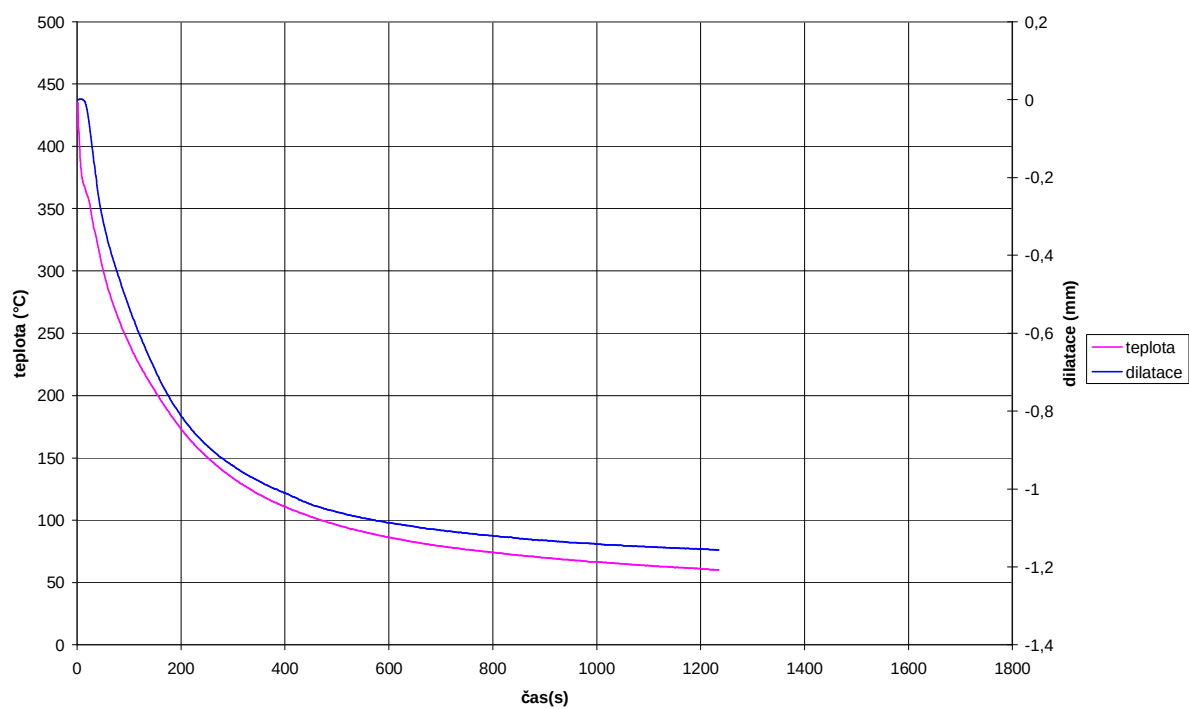
## Příloha č.5



5

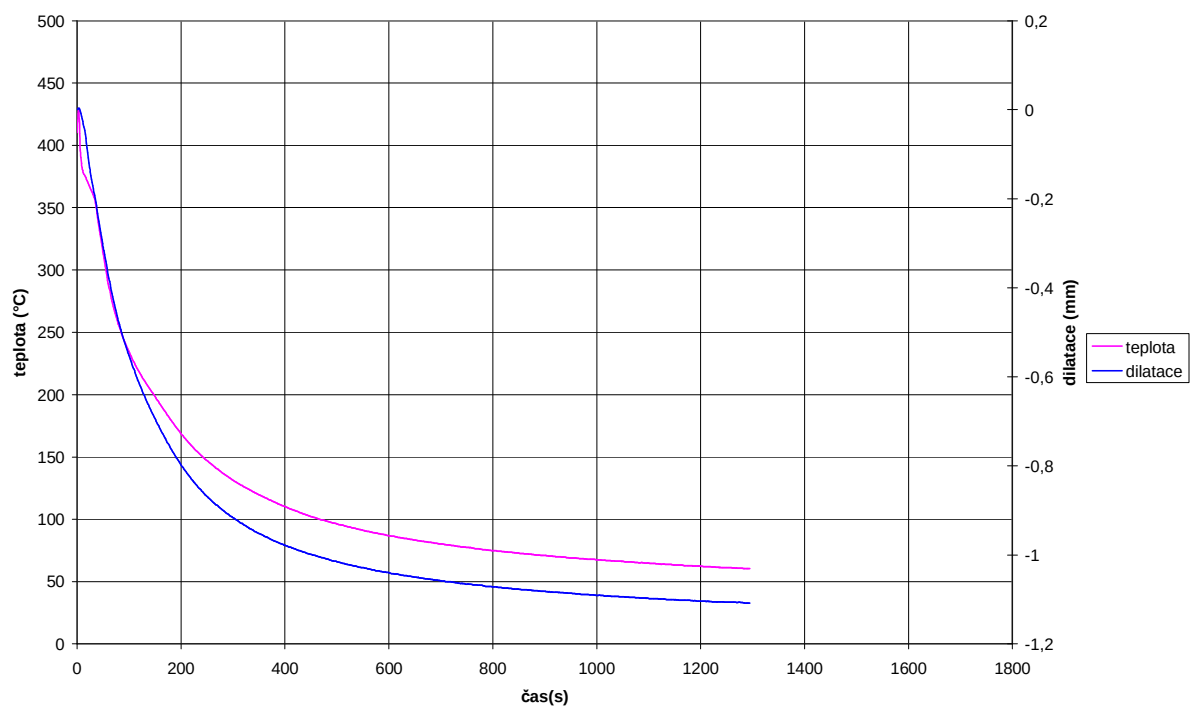




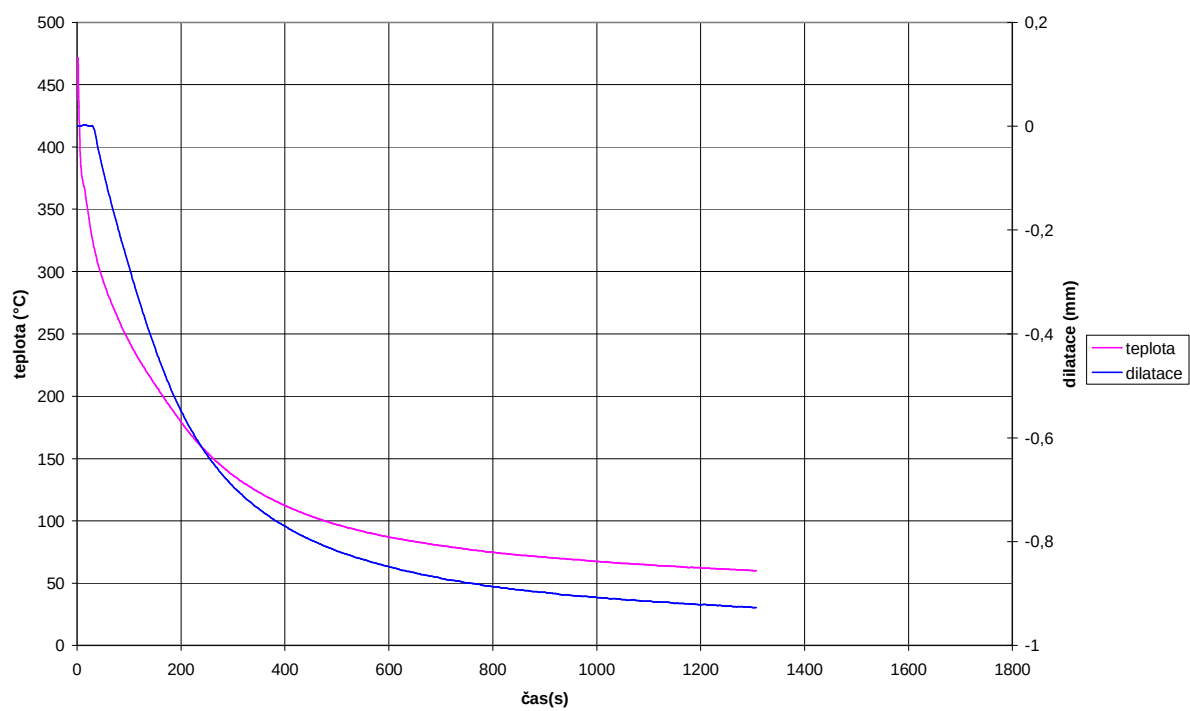
**Zinek 810****1****Příloha č.5****2**

3

Příloha č.5

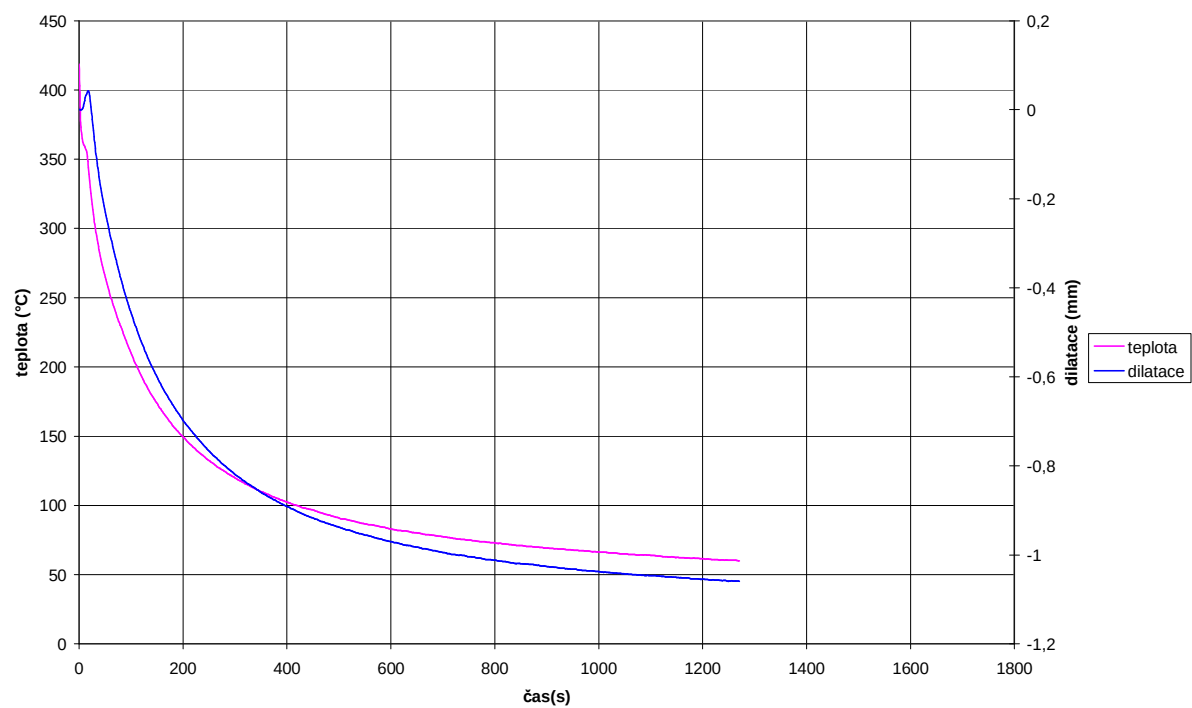


4



## 5

## Příloha č.5



## Obrázky pro experimentální část

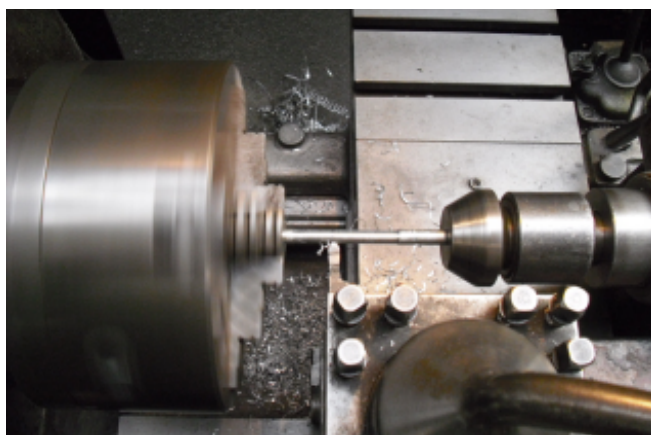
## Příloha 6.



Obr. 6-9 pohled na otevřenou pec, ve které jsme tavily taveninu

**Zkouška zabíhavosti Curryho spirála**

Obr. 6-26 Ukázka modelu Curryho spirály. Model vyroben ze dřeva a nastříkán barvou.

**Soustružení válcových tyček pro tahovou zkoušku**

Obr. 6-33 Opracování vzorku pro trhací zkoušku provedenou na soustruhu

## Příloha 6.

### Příprava vzorků pro zkoušku na Charpyho kladivu



Obr. 6-38 Řezání vzorků na pile pro následnou operaci - frézování



Obr. 6-39 Frézování vzorků pro zkoušku na Charpyho kladivu

## Příloha 6.

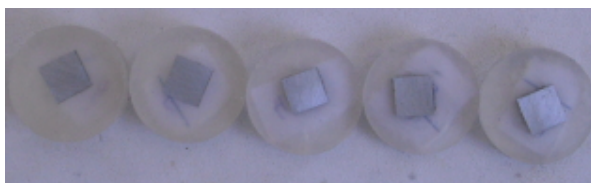


Obr. 6-40 Pohled na Charpppyho kladivo

### Výroba metalografických výbrusů

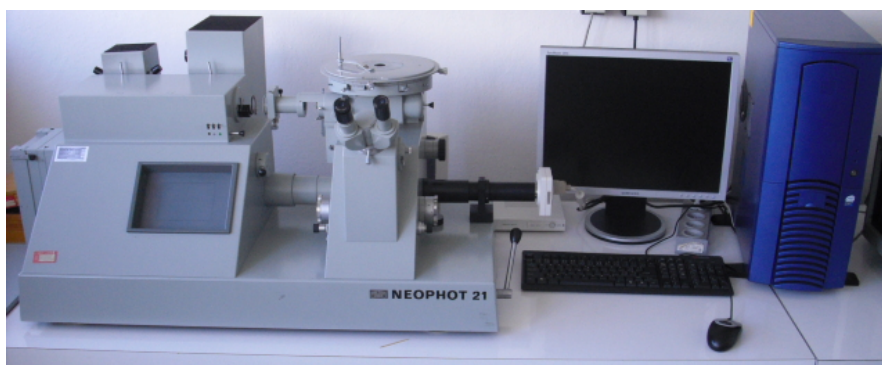


Obr. 6-82 Příprava vzorků pro vyhodnocení vnitřní struktury materiálů



Obr. 6-83 Vzorky připravené k naleptání a následné zkoumání metalografickým mikroskopem

## Příloha 6.



Obr. 6-84 Zkoumání vnitřní struktury materiálů pod metalografickým mikroskopem a zároveň snímání obrázků struktury optickou kamerou a Pc zařízením

## Příloha 7.

**Vztahy používané při statistickém vyhodnocení naměřených dat****střední hodnota sledované veličiny:**

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k,$$

kde značí: **n** - počet měření (n = 5)

**k** - pořadoví sledované veličiny

**x<sub>k</sub>** - naměřenou hodnotu sledované veličiny při jistém měření.

**směrodatná odchylka sledované veličiny:**

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2},$$

**rozptyl sledované veličiny:**

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_k - \bar{x})^2$$

**variační koeficient sledované veličiny:**

$$v = \frac{s}{\bar{x}}.$$



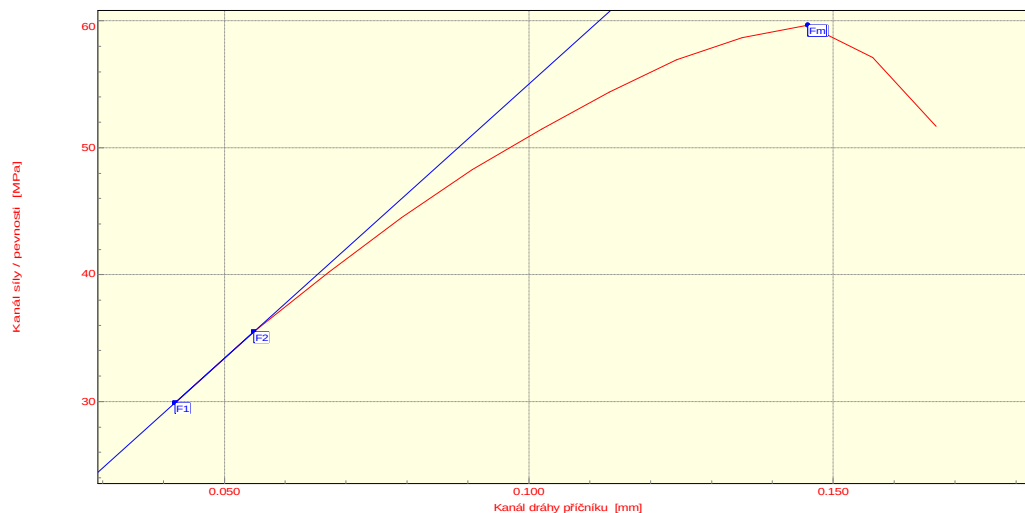
**Příloha 8.****STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM****VSTUPNÍ PARAMETRY**

Testovaný materiál: : Zn  
Norma: : EN - ISO 6892-1  
Rozměr vzorku: : Průměr 6 mm  
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min  
Vypracoval: : Ing.Pavel Pěnička  
Datum zkoušky: : 9.5.2011  
Směr odebrání vzorku: : 0°

**VÝSTUPNÍ HODNOTY**

| Číslo zkoušky | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------------|-----------|--------|---------|
| 1             | 44.2      | 58.7   | -----   |
| 2             | 38.5      | 57.0   | -----   |
| 3             | 50.8      | 51.4   | -----   |
| 4             | 45.5      | 52.0   | -----   |
| 5             | 46.9      | 50.2   | -----   |
| 6             | 44.0      | 59.7   | -----   |

| Statistická hodnota | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------------------|-----------|--------|---------|
| Průměrná hodnota    | 45.0      | 54.8   | -----   |
| Směrodatná odchylka | 4.0       | 4.1    | -----   |

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení strojírenské metalurgie  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

## Příloha 8.

## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

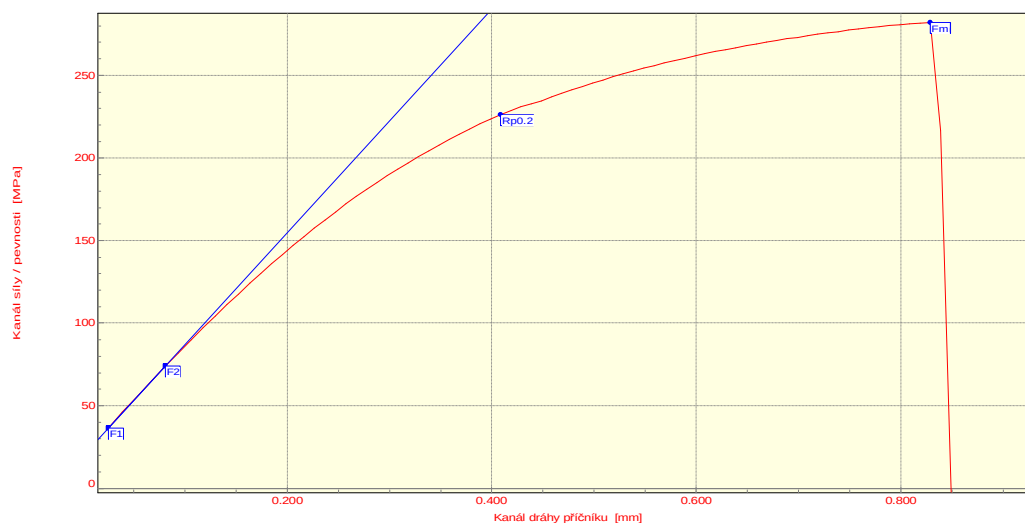
## VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : ZnAl4  
Norma: : EN - ISO 6892-1  
Rozměr vzorku: : Průměr 6 mm  
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min  
Vypracoval: : Ing. Pavel Pěnička  
Datum zkoušky: : 9.5.2011  
Směr odebrání vzorku: : 0°

## VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------------|-----------|--------|---------|
| 1             | 226.2     | 282.1  | -----   |
| 2             | 232.9     | 308.4  | -----   |
| 3             | 316.9     | 338.2  | -----   |
| 4             | 226.9     | 293.5  | -----   |
| 5             | 245.7     | 299.1  | -----   |

| Statistická hodnota | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------------------|-----------|--------|---------|
| Průměrná hodnota    | 249.7     | 304.3  | -----   |
| Směrodatná odchylka | 38.4      | 21.2   | -----   |



## TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení strojírenské metalurgie  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

## Příloha 8.

## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

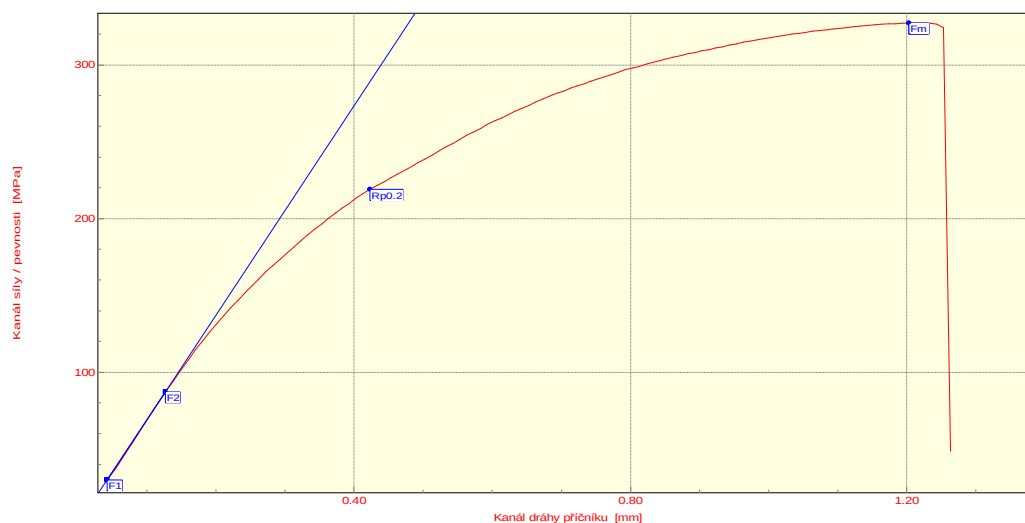
## VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : ZnAl4Cu1  
Norma: : EN - ISO 6892-1  
Rozměr vzorku: : Průměr 6 mm  
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min  
Vypracoval: : Ing. Pavel Pěnička  
Datum zkoušky: : 9.5.2011  
Směr odebrání vzorku: : 0°

## VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------------|-----------|--------|---------|
| 1             | 238.4     | 281.4  | -----   |
| 2             | 235.8     | 340.4  | -----   |
| 3             | 232.6     | 288.8  | -----   |
| 4             | 219.0     | 327.3  | -----   |
| 5             | 189.5     | 305.7  | -----   |

| Statistická hodnota | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------------------|-----------|--------|---------|
| Průměrná hodnota    | 223.1     | 308.7  | -----   |
| Směrodatná odchylka | 20.2      | 25.0   | -----   |



## TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení strojírenské metalurgie  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

## Příloha 8.

## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

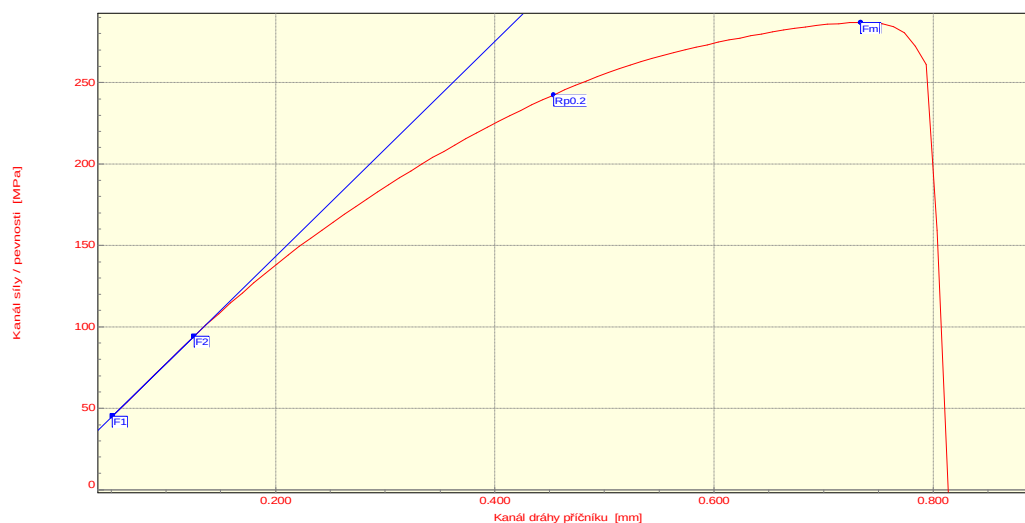
## VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : ZnAl4Cu3  
Norma: : EN - ISO 6892-1  
Rozměr vzorku: : Průměr 6 mm  
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min  
Vypracoval: : Ing.Pavel Pěnička  
Datum zkoušky: : 9.5.2011  
Směr odebrání vzorku: : 0°

## VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------------|-----------|--------|---------|
| 1             | 253.7     | 282.3  | -----   |
| 2             | 229.1     | 314.4  | -----   |
| 3             | 223.0     | 313.2  | -----   |
| 4             | 242.4     | 286.9  | -----   |
| 5             | 215.4     | 247.0  | -----   |

| Statistická hodnota | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------------------|-----------|--------|---------|
| Průměrná hodnota    | 232.7     | 288.8  | -----   |
| Směrodatná odchylka | 15.3      | 27.6   | -----   |



## TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení strojírenské metalurgie  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>

## Příloha 8.

## STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

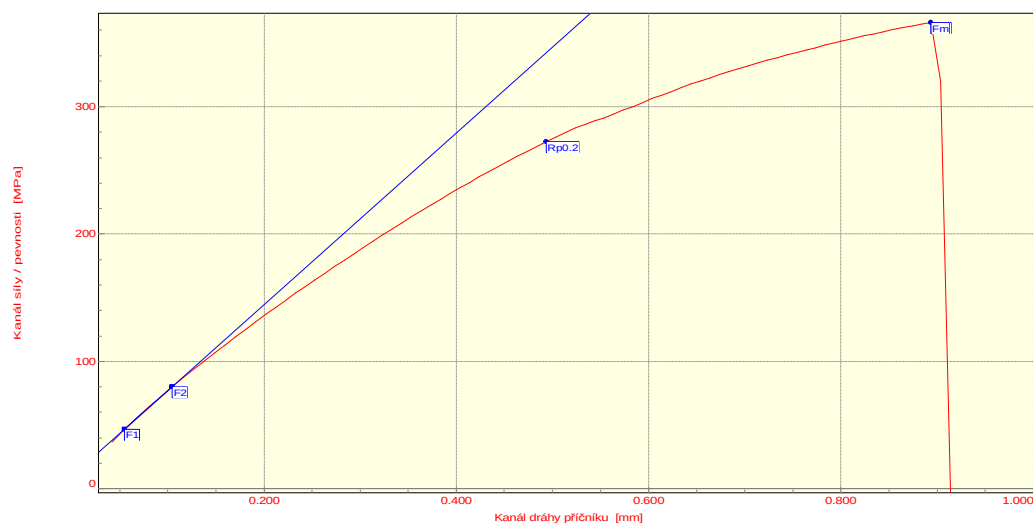
## VSTUPNÍ PARAMETRY

Testovaný materiál: : ZnAl8Cu1  
Norma: : EN - ISO 6892-1  
Rozměr vzorku: : Průměr 6 mm  
Rychlost zatěžování: : 10 mm/min  
Vypracoval: : Ing.Pavel Pěnička  
Datum zkoušky: : 3.5.2011  
Směr odebrání vzorku: : 0°

## VÝSTUPNÍ HODNOTY

| Číslo zkoušky | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------------|-----------|--------|---------|
| 1             | 277.9     | 283.8  | -----   |
| 2             | 294.9     | 303.3  | -----   |
| 3             | 295.9     | 365.1  | -----   |
| 4             | 297.7     | 305.8  | -----   |
| 5             | 272.6     | 366.1  | -----   |

| Statistická hodnota | Rp0.2 MPa | Rm MPa | A80mm % |
|---------------------|-----------|--------|---------|
| Průměrná hodnota    | 287.8     | 324.8  | -----   |
| Směrodatná odchylka | 11.7      | 38.2   | -----   |



## TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení strojírenské metalurgie  
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

<http://www.ksp.tul.cz>