



# Vliv rychlosti ohřevu a ochlazování na transformační změny materiálu

## Bakalářská práce

*Studijní program:* B2301 – Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* 2301R000 – Strojní inženýrství  
*Autor práce:* **Jiří Vondráček**  
*Vedoucí práce:* doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.





## Zadání bakalářské práce

# Vliv rychlosti ohřevu a ochlazování na transformační změny materiálu

*Jméno a příjmení:* **Jiří Vondráček**  
*Osobní číslo:* S16000192  
*Studijní program:* B2301 Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* Strojní inženýrství  
*Zadávací katedra:* Katedra strojírenské technologie  
*Akademický rok:* **2018/2019**

### Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se teoreticky s podstatou termálních analýz materiálů (teplotní a tepelná vodivost, teplotní roztažnost, transformační změny, hustota).
2. Seznamte se teoreticky s druhy a podstatou snímačů pro měření délkové roztažnosti.
3. Seznamte se s principem a funkcemi quenching dilatometru DIL 805L.
4. Vyzkoušejte rozsah možných rychlostí ohřevu vzorků pro aplikaci při tvorbě in-situ ARA diagramů.
5. Na vzorcích s rozdílným chemickým složením (např. S460MC, S690QL, P92, X23CrMoV12-1 atd.) posudte vliv rychlosti ohřevu na posun hodnoty transformačních teplot Ac1 a Ac3.
6. Vyzkoušejte a ověřte měření transformačních ochlazovacích křivek u materiálů s teplotou Mf pod teplotou okolí.
7. Dosažené výsledky zhodnoťte, proveďte diskuzi a navrhněte doporučení pro měření ARA a In-situ ARA diagramů rozdílných materiálů.

Rozsah grafických prací: tabulky, grafy  
Rozsah pracovní zprávy: cca 30  
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická



### Seznam odborné literatury:

- [1] Uživatelský manuál přístroje DIL 805L, TA Instrument, 2017.
- [2] MORAVEC, J. a J. BRADÁČ. *Možnosti a využití teplotně-napěťového simulátoru Gleeble při výzkumu technologické zpracovatelnosti materiálů*. Skripta – 1. vydání. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. ISBN 978-80-7494-138-2.
- [3] KOUKAL, J., D. SCHWARZ a J. HAJDÍK. *Materiály a jejich svařitelnost*. Ostrava: Český svářečský ústav, 2009. ISBN 978-80-248-2025-5.
- [4] Technické normy ČSN.

Vedoucí práce: doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.  
Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce: Ing. Iva Nováková, Ph.D.  
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání práce: 31. října 2018

Předpokládaný termín odevzdání: 30. dubna 2020

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan

V Liberci 1. listopadu 2018



doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.  
vedoucí katedry

## Prohlášení

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

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

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že texty tištěné verze práce a elektronické verze práce vložené do IS STAG se shodují.

17. 6. 2019

Jiří Vondráček



# Vliv rychlosti ohřevu a ochlazování na transformační změny materiálu

## Anotace

Cílem této bakalářské práce je stanovení velikosti transformačních teplot  $A_{c1}$  a  $A_{c3}$  u několika druhů ocelí (S690QL, X23CrMoV12-1, S460MC a S700MC) a posouzení, jak se projeví rychlost ohřevu na posunu hodnot transformačních teplot.

Teoretická část se zabývá fyzikálními veličinami potřebnými k popisu jevů probíhajících v materiálu při tepelném zatížení, termickými analýzami a dalšími věcmi nezbytnými pro pochopení procesů dilatometrie jako je indukční ohřev, snímače teploty, snímače polohy apod.

Praktická část práce je věnována experimentálním měřením na dilatometrickém přístroji DIL 805L. Při měření nebyly zjišťovány pouze velikosti transformačních teplot při různých rychlostech ohřevu, ale také byla hledána maximální rychlost ohřevu, při které je Quenching dilatometr DIL 805L schopen ještě s dostatečnou přesností zaznamenat dilatometrické změny, k nimž dochází v materiálu. Tato informace je důležitá při tvorbě „In-Situ“ ARA diagramů. Pomocí měření tvrdosti HV10 bylo také zkoumáno, zda se změna transformačních teplot při ohřevu projeví na finálních vlastnostech při konstantní rychlosti ochlazování.

## Klíčová slova

Termická analýza, dilatometr DIL 805L, transformační teploty, dilatometrická křivka

## Anotation

The aim of this bachelor thesis is firstly, to define the range of transformational temperatures of  $A_{c1}$  and  $A_{c3}$  on a several types of steel (S690QL, X23CrMoV12-1, S460MC a S700MC) and secondly, to assess the impact of the speed of heating up on the changes in phase in steel.

Theoretical part describes physical quantities that are important to understand phenomena inside material during thermal load. The brief insight into thermal analysis and other

aspects necessary to perceive dilatometry such as induction heating; temperature sensors; position sensors etc. , are introduced in this part.

Practical part introduces the experimental measurements of Quenching dilatometer DIL 805L.

Not only the range of transformational temperatures during variable speed of the heating process were measured but also the highest possible speed of the heating process was sought. During the process Quenching dilatometer DIL 805L was able to measure dilatometric changes with satisfying accuracy. This information is crucial in creating „In-Situ“ ARA diagrams. The HV 10 test was used to examine the dependency of the changes transformation temperatures during heating on final properties while cooling down.

## **Keywords**

thermal analysis, dilatometer DIL 805L, transformational temperatures, dilatometric curve

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval panu doc. Ing. Jaromíru Moravcovi, Ph.D. za odborné vedení a za mnoho cenných rad při tvorbě této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval panu Ing. et Bc. Jiřímu Sobotkovi, Ph.D. za pomoc při zpracování naměřených dat a paní Ing. Ivě Novákové, Ph.D. za pomoc při měření tvrdosti vzorků.

Také bych rád poděkoval své rodině a přátelům, kteří mě podporovali v průběhu celého mého studia.

# Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů .....	9
1. Úvod.....	11
2. Teoretická část .....	12
2.1. Teplotní pole .....	12
2.1.1. Termografie .....	13
2.2. Fyzikální veličiny.....	13
2.2.1. Tepelná vodivost.....	14
2.2.2. Teplotní vodivost .....	15
2.2.3. Měrná tepelná kapacita .....	16
2.2.4. Teplotní roztažnost .....	16
2.2.5. Hustota.....	17
2.3. Termická analýza materiálů .....	18
2.3.1. Úvod a základní definice metod termické analýzy.....	18
2.3.2. Vlastní termická analýza.....	19
2.3.3. Klasická termická analýza .....	20
2.3.4. Termogravimetrie (TG) .....	20
2.3.5. Diferenční termická analýza (DTA) .....	21
2.3.6. Diferenční skenovací kalorimetrie (DSC) .....	22
2.3.7. Termická dilatometrická analýza (TDA).....	23
2.3.8. Elektrotermická analýza (ETA) .....	24
2.4. Snímače pro měření teploty .....	24
2.4.1. Teoretický princip snímačů teploty .....	24
2.4.2. Rozdělení snímačů teploty.....	25
2.5. Způsoby ohřevu materiálu.....	27
2.6. Snímače polohy.....	28



2.6.1.	Odporové snímače polohy .....	28
2.6.2.	Indukční snímače polohy .....	29
2.6.3.	Optické snímače polohy.....	30
2.6.4.	Magnetické snímače polohy .....	31
2.6.5.	Kapacitní snímače polohy.....	31
2.6.6.	Ultrazvukové snímače polohy .....	32
2.7.	Metoda stanovení transformačních teplot .....	33
3.	Experimentální část.....	36
3.1.	Charakteristika materiálů použitých pro dilatometrická měření.....	36
3.2.	Dilatometrie.....	38
3.2.1.	Kalící dilatometr DIL 805L .....	38
3.3.	Počáteční zkušební dilatometrická měření.....	40
3.3.1.	Posouzení opakovatelnosti měření stejného vzorku .....	40
3.3.2.	Posouzení vlivu změny rychlosti ohřevu .....	44
3.4.	Posouzení vlivu rychlosti ohřevu na hodnotu přechodových teplot .....	46
3.4.1.	Ocel S690QL .....	47
3.4.2.	Ocel X23CrMoV12-1 .....	52
3.4.3.	Ocel S460MC .....	53
3.4.4.	Ocel S700MC .....	55
3.5.	Měření tvrdosti podle Vickerse.....	56
3.6.	Měření svařovacích cyklů .....	59
3.7.	Diskuze výsledků .....	62
4.	Závěr .....	65

## Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratka/symbol	Název	Jednotky
q	hustota tepelného toku	[W. m <sup>-2</sup> ]
T	teplota	[K]
$\lambda$	součinitel tepelné vodivosti	[W.m <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> ]
Q	množství tepla	[J]
t	čas	[s]
$S_p$	obsah ploch	[m <sup>2</sup> ]
h	vzdálenost mezi plochami	[m]
$\Delta T$	teplotní rozdíl mezi plochami	[K]
a	součinitel teplotní vodivosti	[m <sup>2</sup> . s <sup>-1</sup> ]
$\lambda$	součinitel tepelné vodivosti	[W.m <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> ]
$\rho$	hustota	[kg. m <sup>-3</sup> ]
$C_p$	izobarická měrná tepelná kapacita	[J. kg <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> ]
C	měrná tepelná kapacita	[J. kg <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> ]
Q	množství potřebného tepla	[J]
m	hmotnost	[kg]
T	teplota	[K]
V	konečný objem	[m <sup>3</sup> ]
$V_0$	počáteční objem	[m <sup>3</sup> ]
$\beta$	teplotní součinitel objemové roztažnosti	[K <sup>-1</sup> ]
$\Delta T$	rozdíl teplot na počátku děje a na konci	[K]
l	konečná délka	[m]
$l_0$	počáteční délka	[m]
$\alpha$	teplotní součinitel délkové roztažnosti	[K <sup>-1</sup> ]
$\Delta T$	rozdíl teplot na počátku děje a na konci	[K]
$\rho$	hustota	[kg. m <sup>-3</sup> ]
m	hmotnost látky	[kg]
V	objem látky	[m <sup>-3</sup> ]
$\Delta H$	změna entalpie	[J]
T	absolutní teplota	[K]

$\Delta S$	změna entropie	[J.K <sup>-1</sup> ]
$T_0$	počáteční hodnota teploty	[K]
$T_K$	konečná hodnota teploty po změně	[K]
t	čas měřený od počátku změny	[s]
$\tau$	časová konstanta	[s]
L	vlastní indukčnost	[H]
N	počet závitů na cívce	[-]
$\mu_r$	poměrná permeabilita materiálu magnetického obvodu [-]	
$\mu_0$	permeabilita vakua	[H. m <sup>-1</sup> ]
S	průřez magnetického obvodu	[m <sup>2</sup> ]
$l_{av}$	střední délka magnetické siločáry	[m]
C	kapacita kondenzátoru	[F]
$\varepsilon_r$	poměrná permitivita dielektrika	[-]
$\varepsilon_0$	permitivita vakua	[F. m <sup>-1</sup> ]
S	účinná plocha elektrod	[m <sup>2</sup> ]
l	vzdálenost elektrod (tloušťka dielektrika)	[m]
TG	termogravimetrická analýza	
DTA	diferenční termická analýza	
DSC	diferenční skenovací kalorimetrie	
TMA	termomechanická analýza	
TOA	termooptometrie	
DDTA	derivační diferenční termická analýza	
ETA	elektrotermická analýza	
TDA	termická dilatometrická analýza	
$A_{c1}$	první transformační teplota	[°C]
$A_{c3}$	druhá transformační teplota	[°C]
$R_m$	mez pevnosti v tahu	[MPa]
$R_e$	mez kluzu	[MPa]

# 1. Úvod

Při řešení jakéhokoliv strojírenského problému, ať už se jedná o návrh konstrukce, návrh technologie výroby, tepelného zpracování nebo další úlohy ve kterých hraje roli teplotní zatížení, se kterým se lze ve strojírenské praxi běžně setkat, je nedílnou součástí správné určení materiálu a dokonalé pochopení jeho vlastností a jevů, k nimž dochází při tepelném zatížení.

V této práci zaměřené na téma: *Vliv rychlosti ohřevu a ochlazování na transformační změny materiálu*, jsou uvedeny základní metody termických analýz materiálu, které tyto změny a jevy umožňují detekovat a zobrazit jejich průběh na příslušných křivkách. Jsou zde také uvedeny fyzikální veličiny, které umožňují popsat chování materiálu při tepelném zatížení.

Dilatometrická metoda, která byla použita v experimentální části této práce, není ovšem založena pouze na výsledné dilatometrické křivce, ale je třeba pochopit i princip fungování dilatometru, princip fungování snímačů teploty a polohy, metodu ohřevu materiálu, aby bylo možné výsledné křivky správně interpretovat a dosáhnout použitelných výsledků, případně dokázat najít a odstranit chyby, které mohou při měření vzniknout. Těmito věcmi se zabývá teoretická část této bakalářské práce.

V praktické části bylo experimentálně na různých druzích ocelí zkoušeno dilatometrické měření za použití kalícího dilatometru DIL 805L. Byl zjišťován vliv rychlosti ohřevu na posun hodnoty transformačních teplot  $A_{c1}$  a  $A_{c3}$ , při kterých ocel mění svojí krystalovou mřížku. Výsledky byly zjišťovány dvěma na sobě nezávislými metodami, aby bylo minimalizováno riziko vzniku chyb měření.

Další důležitou věcí, kterou nelze opomenout, je skutečnost, že použité výsledky z dilatometrických měření lze použít pro stanovení „In situ“ ARA diagramů, které popisují fázové přeměny v materiálu za podmínek svařování. Podle průběhu dilatometrické křivky lze totiž stanovit kritickou rychlost ohřevu, kdy je daný přístroj schopen regulovat a zaznamenávat s dostatečnou přesností výsledky měření.

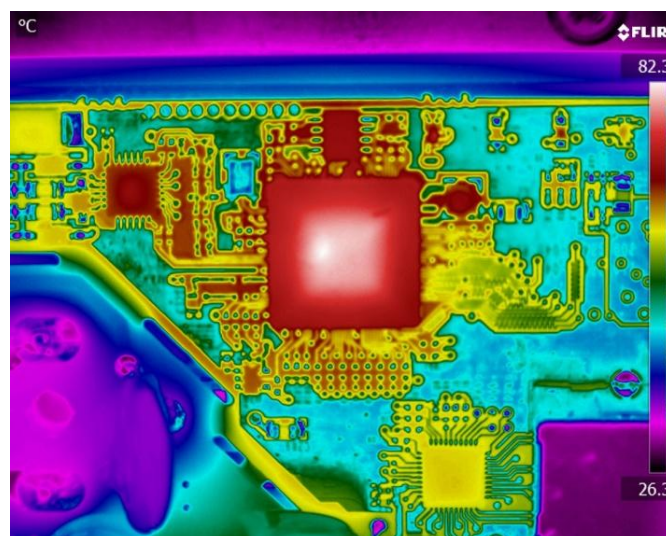
## 2. Teoretická část

V teoretické části se tato práce zabývá popisem těch fyzikálních veličin, které jsou podstatné pro popis a pochopení fungování tepelných změn v materiálech a pro správné provedení a vyhodnocení termických analýz materiálu. Zabývá se samotnými termálními analýzami, popisem jednotlivých metod a možností jejich využití. Pro proces dilatometrie je nutno znát i principy, na jakých dilatometrie funguje, tj. druhy používaných snímačů teploty, polohy, metody ohřevu materiálu a v neposlední řadě i vlastní vyhodnocení naměřených hodnot. V teoretické části je vše výše uvedené shrnuto a popsáno tak, aby bylo možno tyto procesy alespoň v základu pochopit a správně interpretovat výsledky experimentální části práce.

### 2.1. Teplotní pole

Teplotní pole definuje prostor, ve kterém lze v každém místě a čase určit termodynamickou teplotu. Rozlišují se stacionární a nestacionární teplotní pole. Rozdíl je v tom, že v nestacionárním teplotním poli je teplota nejen funkcí souřadnic bodu ale i času. Podle toho zda je teplota funkcí jedné, dvou nebo tří souřadnic, se rozlišují také teplotní pole jedno-, dvou- a třírozměrná. [22]

Teplotní pole mají v dnešní době velmi významnou úlohu nejenom na teoretické úrovni, hojně jsou používána i v praxi. Různé typy software umožňují převádět vzorce do vizuálních modelů a tím dávají dokonalý přehled o rozložení teplot v objektech (obr.1), o teplotních gradientech, směrech a velikostech tepelných toků, tepelných ztrátách apod. [1]

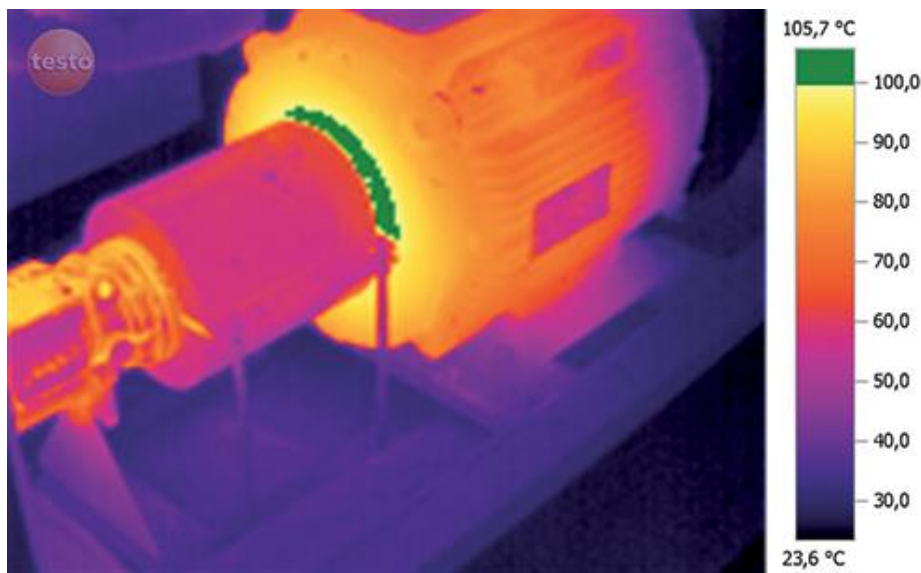


*Obr. 1 Rozložení teplot v plošném spoji [16]*

### 2.1.1. Termografie

Obvyklou a v praxi častou metodou pro sledování teplotních polí je metoda termografie. Při této metodě se používá termokamera, která zaznamenává intenzitu záření v infračervené části elektromagnetické spektra, které je pro člověka neviditelné a to potom převádí na obraz viditelný. [2] Termokamera dokáže snímat rozložení na celém povrchu tělesa, což je její zásadní výhoda oproti teploměru.

Tato metoda má velmi široké uplatnění. Běžně se používá pro sledování izolační schopnosti domů, vyhledávání osob, ale i pro preventivní údržbu strojních zařízení, kdy poškozená součást vyzařuje teplo a lze ji tak vyměnit dříve, než dojde k poruše celého stroje (obr.2.). Další výhodou je, že se jedná o neinvazivní metodu, tím pádem nedochází k zásahu do sledovaného objektu a ten je možno sledovat dlouhodobě. [2,3]



Obr. 2 Sledování teploty motoru [15]

## 2.2. Fyzikální veličiny

V této části jsou popsány základní fyzikální veličiny, které jsou nejvýznamnější pro popis nestacionárních teplotních polí, teplotních gradientů a pro popis pružně-plastického chování materiálů při aplikaci teplotních cyklů. Tím, že jsou vlastnosti a vztahy fyzikálních veličin jasně definovány a stanoveny, je umožněno opakovat experimenty několikrát za sebou při stále stejných podmínkách a provést tak správné vyhodnocení výsledků. V tomto případě přístroje pro termickou analýzu určují, hlídají a zaznamenávají podmínky a definované veličiny automaticky a uživateli stačí pouze nastavit požadované parametry, na které se mají jednotlivé hodnoty dostat. [4]

### 2.2.1. Tepelná vodivost

Tepelná vodivost (konduktivita)  $\lambda$  je charakterizována vedením tepla látkou. Je to schopnost určité části látky vést teplo. Představuje rychlost, se kterou se teplo šíří z teplejší části látky do chladnější části. Veličina, která tepelnou vodivost charakterizuje, se nazývá **součinitel tepelné vodivosti** a je definována Fourierovým zákonem. Podle něho je hustota tepelného toku úměrná záporné hodnotě teplotního gradientu dle vztahu (1).

$$q = -\lambda \text{ grad } T \quad (1)$$

Kde:

- q     hustota tepelného toku [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ]  
 T     teplota [K]  
 $\lambda$      součinitel tepelné vodivosti [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

Pokud se jedná o ustálený a zároveň homogenní tepelný tok, pak lze použít názornější vztah (2):

$$\frac{Q}{t \cdot S_p} = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{h} \quad (2)$$

Kde:

- Q     množství tepla [J]  
 t     čas [s]  
 $S_p$      obsah ploch kolmých ke směru toku [ $\text{m}^2$ ]  
 h     vzdálenost mezi plochami kolmými ke směru toku [m]  
 $\Delta T$      teplotní rozdíl mezi plochami [K]

Ze kterého je následně vyjádřen součinitel tepelné vodivosti (3):

$$\lambda = \frac{h}{t \cdot S_p \cdot \Delta T} \cdot Q \quad (3)$$

#### Fourierova rovnice pro vedení tepla

Výše uvedený vzorec (1) však není obecný, a proto je nutné uvést Fourierovu diferenciální rovnici vedení tepla v úplném znění. Vychází z nultého zákona termodynamiky, který říká, že systém je v tepelné rovnováze, tj. nedochází v něm ke sdílení tepla, má-li všude stejnou (konstantní) teplotu. [23]

$$\left( \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4)$$

Jedná se o vektor, který svým směrem udává směr nejrychlejšího růstu teploty. Pokud se jedná o jeho absolutní velikost, tak ta udává rychlost růstu teploty.

V případě, že se mění teplota pouze ve směru jedné osy, využívá se Fourierova zákona pro vedení tepla, např. teplota se mění pouze ve směru osy  $x$ , potom platí vztah (5). Tento vztah představuje tok tepla  $\dot{Q}$  plochou o velikosti  $A$ , kolmou k ose  $x$ , ve směru osy  $x$ , úměrný velikosti této plochy a záporné hodnotě derivace teploty podle souřadnice  $x$ . [23]

$$\dot{Q} = -A \cdot \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (5)$$

Pokud je vztáhnut tok tepla na jednotku plochy, je získána intenzita tepelného toku. V tomto případě ve směru osy  $x$ :

$$q_x = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (6)$$

Pro obecný případ by pak platil vztah (7). Kdy intenzita toku tepla je vektor, který má velikost přímo úměrnou velikosti gradientu teploty.

$$\vec{g} = (g_x, g_y, g_z) = -\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (7)$$

Toto je Fourierův zákon pro vedení tepla ve vektorovém tvaru. [23]

### 2.2.2. Teplotní vodivost

Teplotní vodivost (difuzivita) vyjadřuje schopnost látky vyrovnat gradient teploty v homogenním prostředí za neustálého šíření tepla. V literatuře se také uvádí její název jako tepelná difuzivita.

Vztah (8) vyjadřuje teplotní vodivost pomocí měrné tepelné kapacity za konstantního tlaku.

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p} \quad (8)$$

Kde:

- $a$  součinitel teplotní vodivosti [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]
- $\lambda$  součinitel tepelné vodivosti [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]
- $\rho$  hustota [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
- $C_p$  izobarická měrná tepelná kapacita [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]



### 2.2.3. Měrná tepelná kapacita

Vyjadřuje, jakou tepelnou kapacitu má jeden kilogram látky. Pro lepší představu se jedná o množství tepla, které je potřeba látce o jednotkové hmotnosti (1 kilogram) dodat, aby se ohřála o 1°C (1 K). Je vyjádřena vztahem (9).

$$c = \frac{dQ}{m \cdot dT} \quad (9)$$

C měrná tepelná kapacita [J. kg<sup>-1</sup>. K<sup>-1</sup>]

Q množství potřebného tepla [J]

m hmotnost [kg]

T teplota [K]

### 2.2.4. Teplotní roztažnost

Jedná se o jev, při kterém se při změně teploty (ochlazení, ohřev) změní délkové rozměry (objem) látky. U většiny látek dochází při ohřevu k rozpínání, tím dochází k rychlejšímu pohybu molekul a k rostoucí vzdálenosti jejich rovnovážných poloh.

Pro moji práci je nejpodstatnější:

#### Teplotní objemová roztažnost

Jev, při kterém těleso, které je zahřáté o určitou teplotu, změní svůj objem. Objemová roztažnost může být vyjádřena podle vztahu (10):

$$V = V_0 \cdot (1 + \beta \cdot \Delta T) \quad (10)$$

Kde:

V konečný objem [m<sup>3</sup>]

V<sub>0</sub> počáteční objem [m<sup>3</sup>]

β teplotní součinitel (koeficient) objemové roztažnosti [K<sup>-1</sup>]

ΔT rozdíl teplot na počátku děje a na konci [K]

#### Teplotní součinitel (koeficient) objemové roztažnosti

Jedná se o koeficient úměrnosti, přesný vztah pro definování této veličiny je dán vztahem (11).

$$\beta = \frac{1}{V_0} \cdot \frac{dV}{dT} \doteq 3\alpha \quad (11)$$

Kde:

α teplotní součinitel délkové roztažnosti [K<sup>-1</sup>]

Pro přesné určení součinitele  $\beta$  je také potřeba určit typ změny probíhající v materiálu a podmínky, za kterých změna probíhá. Hodnota tohoto součinitele nezávisí pouze na druhu látky, ale i na její teplotě. U většiny látek, až na výjimky, nabývá tento součinitel kladných hodnot. To znamená, že dochází se vzrůstající teplotou k nárůstu objemu.

### Teplotní délková roztažnost

Jev, při kterém se těleso, které je zahřáté o určitou teplotu roztáhne v daném směru o určitou délku tak, jak je definováno ve vztahu (12).

$$l = l_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (12)$$

Kde:

$l$  konečná délka [m]

$l_0$  počáteční délka [m]

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

$\Delta T$  rozdíl teplot na počátku děje a na konci [K]

### Teplotní součinitel (koeficient) délkové roztažnosti

Opět se jedná o koeficient úměrnosti. Přesný vztah pro definování je vztah (13).

$$\alpha = \frac{l}{l_0} \cdot \frac{dl}{dT} \quad (13)$$

### 2.2.5. Hustota

Jedná se o fyzikální veličinu, která vyjadřuje hodnotu určité veličiny vztažené k jednotkovému objemu dané látky. Hustot může být více typů, vždy záleží, ke které veličině je vztahována např. objemová, plošná apod. Používá se nejen ve fyzice, ale i v mnoha dalších oborech vědy např. hustota pravděpodobnosti, hustota zalidnění atd. Pro technickou praxi je nejdůležitější měrná hustota, což je podíl hmotnosti a objemu materiálu daný obecným vztahem (14). [22]

$$\rho = \frac{dm}{dV} \quad (14)$$

Kde:

$\rho$  hustota [ $kg \cdot m^{-3}$ ]

$m$  hmotnost látky [kg]

$V$  objem látky [ $m^{-3}$ ]

Její velikost závisí na atomové stavbě látky a je závislá na poloze prvku v periodické soustavě. Hustota reálných prvků se však často liší od hustoty ideální z toho důvodu, že prvky nemají obsazena všechna uzlová místa, protože v mřížkách se vyskytují četné strukturní vady. Navíc se reálné prvky mohou v dané látce vyskytovat i ve formě izotopů s rozdílnou atomovou hmotností. [22]

## 2.3. Termická analýza materiálů

### 2.3.1. Úvod a základní definice metod termické analýzy

Metodami termické analýzy jsou sledovány a následně analyzovány změny složení a změny některých vlastností ve studovaném systému při tepelném zatížení.[5]

Fázově přeměny tuhých látek jsou doprovázeny jevy, jako je pohlcování a uvolňování tepla, změna rozměrů, změna magnetických, elektrických, mechanických popřípadě ještě dalších vlastností. Na základě průběhu případně změn průběhu těchto veličin se dají rozpoznat fázové přeměny, které probíhají v materiálu. [6] Tyto změny jsou zachycovány pomocí dilatometrických křivek. Příklady fyzikálních a chemických změn ve studované látce vlivem teplotního zatížení jsou uvedeny v tabulce 1.

*Tab. 1 Příklady fyzikálních a chemických změn ve studované látce [5]*

Fyzikální procesy	Endotermické	Exotermické	Změna hmotnosti
<b>krystalizace</b>		+	beze změny
<b>tání</b>	+		beze změny
<b>vypařování</b>	+		úbytek
<b>sublimace</b>	+		úbytek
<b>fázové přeměny</b>	+	+	beze změny
Chemické procesy	Endotermické	Exotermické	Změny hmotnosti
<b>chemisorpce</b>		+	nárůst
<b>dehydroxlace</b>	+		úbytek
<b>rozklad</b>	+	+	úbytek
<b>oxidace</b>		+	nárůst

Podle vlastností, které jsou při jednotlivých termických analýzách sledovány, se příslušné analýzy nazývají. Analýzy, které jsou uvedeny v tabulce 2, se používají nejčastěji a lze o nich hovořit jako o primárních. Na tyto metody mohou navazovat další, které jsou nazývány sekundární. [5]

Tab. 2 Nejčastěji používané termické analýzy [5]

Metoda	Sledovaná vlastnost	Označení
<b>Termogravimetrická analýza</b>	<b>hmotnost</b> - hmotnost je měřena v závislosti na teplotě vzorku	<b>TG</b>
<b>Diferenční termická analýza</b>	<b>rozdíl teplot</b> – měří se rozdíl mezi vzorkem a standardem při ohřevu popřípadě chladnutí	<b>DTA</b>
<b>Diferenční skenovací kalorimetrie</b>	<b>entalpie a tepelný tok</b> – měří se tepelný tok dodávaný do referenční látky, tak aby teplotní rozdíl mezi vzorkem a standardem byl nulový	<b>DSC</b>
<b>Termomechanická analýza</b>	<b>rozměr a mechanické vlastnosti</b> – je sledována deformace vzorku při zatížení v závislosti na teplotě	<b>TMA</b>
<b>Termooptometrie</b>	<b>optické vlastnosti</b> – měří se určité vlastnosti světla (vlnová délka, luminiscence atd.)	<b>TOA</b>
<b>Termoakustická analýza</b>	<b>akustické vlastnosti</b> – sledují se charakteristiky zvukových vln po jejich průchodu vzorkem	-

### 2.3.2. Vlastní termická analýza

Nejdůležitějším úkolem výše uvedených metod je získat údaje pro optimalizaci postupů svařování, tváření, tepelného zpracování, slévání a samozřejmě i dalších výrobních procesů. Těmito analýzami se dá ověřovat i např. kvalita výrobků nebo třeba kontrolovat výroba. [6]

Většina metod termické analýzy sleduje jednotlivé vlastnosti systému jako dynamickou funkci teploty. Dále jsou tyto metody používány pro určení některých fyzikálních vlastností např.: teploty likvidu a solidu, koeficientu délkové roztažnosti, teplot tání látek nebo třeba tepelné a elektrické vodivosti. Hojně se jich využívá i při studování termodynamiky a reakcí při různých procesech. [5,6]

Velmi důležitým jevem je změna entalpie ( $\Delta H$ ). Platí, že každou fyzikální nebo chemickou změnu lze popsat změnou Gibbsovy volné energie ( $\Delta G$ ), pro kterou platí vztah (15):

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (15)$$

Kde:

$\Delta H$  změna entalpie [J]

T absolutní teplota [K]

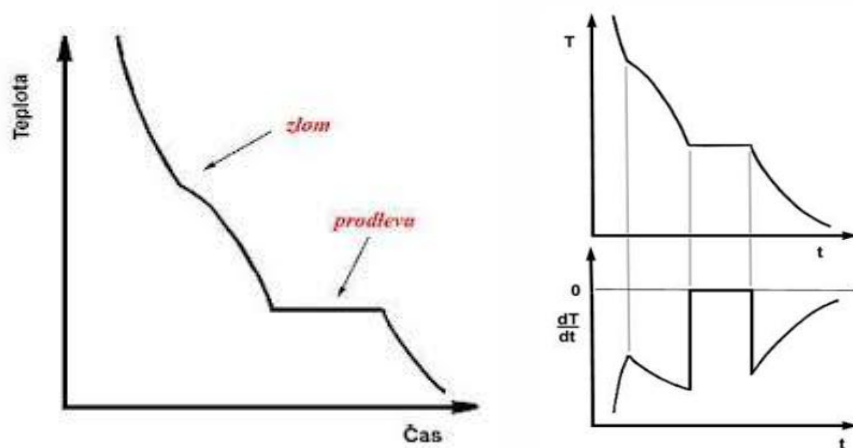
$\Delta S$  změna entropie [ $J \cdot K^{-1}$ ]

Každý systém se snaží dostat do takového stavu, kterému odpovídá nižší hodnota Gibbsovy volné energie. [5]

### 2.3.3. Klasická termická analýza

Tato metoda je nejstarší a zároveň nejjednodušší metodou termické analýzy. Používá se převážně pro stanovení teploty tání a tuhnutí u čistých látek. Sleduje vnitřní (latentní) teplo, které je buď uvolňováno, nebo pohlcováno při fázové přeměně v látce. Je pozorován průběh teploty systému v závislosti na čase  $T = f(t)$ , kdy se jednotlivé fázové přeměny projevují anomáliemi na této křivce (obr. 3.)

Metoda se používá například pro sledování krystalizace kovů a slitin, které musejí mít výraznější tepelný efekt, aby byl dobře pozorovatelný na křivce. Z tohoto důvodu je metoda nevhodná pro pozorování přeměn v tuhém stavu, protože jsou málo tepelně zřetelné a metoda není dostatečně citlivá. [6]

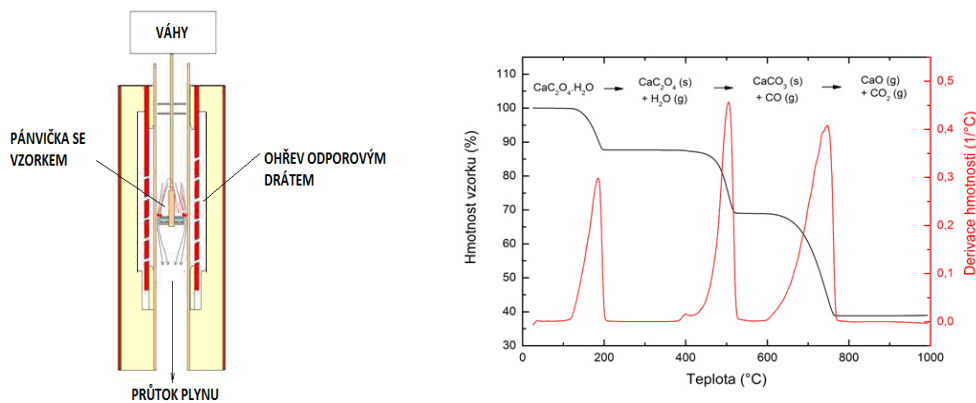


Obr. 3 Průběhy termických křivek záznam teploty v závislosti na čase (vlevo); derivace záznamu teplotní křivky (vpravo) [6]

### 2.3.4. Termogravimetrie (TG)

Jedná se o základní a poměrně jednoduchou metodu termické analýzy. Studuje změnu hmotnostní navážky, kdy je vzorek o hmotnosti miligramů až gramů vystaven teplotnímu zatížení a na velmi citlivých váhách je pozorována změna hmotnosti, ke které došlo.

Vzorek je pozorován buď při kontinuálním zvyšování teploty (dynamický způsob), nebo v izotermickém režimu. Měření se provádí v libovolné atmosféře, která je nejčastěji inertní, nebo oxidační. Výsledkem je termogravimetrická křivka, která zobrazuje závislosti hmotnosti buď na teplotě, nebo čase. [5,7]

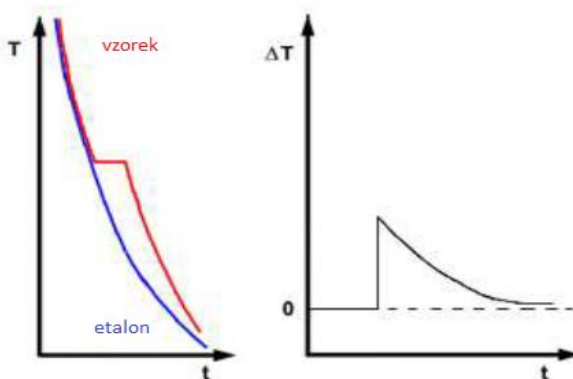


**Obr. 4** Schéma přístroje pro termogravimetrii a termogravimetrická křivka pro termický rozklad monohydrátu šřavelanu vápenatého [7]

### 2.3.5. Diferenční termická analýza (DTA)

Jedná se o jednu ze základních termických metod. Je založena na principu měření teplot mezi dvěma vzorky studovaným a srovnávacím (etalon). Srovnávací vzorek musí být v měřeném intervalu inertní a stabilní (nesmí dojít k fázové přeměně). Jako etalony jsou nejčastěji používány ( $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  nebo některé čisté kovy). Vzorky musí mít co nejpodobnější tepelnou kapacitu, tepelnou vodivost apod.

Oba vzorky jsou umístěny v peci vedle sebe z toho důvodu, aby byly ohřívány stejným způsobem: stejný program a stejná atmosféra v peci. Teplotní rozdíl se graficky zaznamenává tzv. křivkou přímého ohřevu, což je teplotní, resp. časová závislost. Tato křivka vykazuje lokální extrémy podle toho, zda se jedná o exotermní nebo endotermní reakci. [5,6]



**Obr. 5** Znárodnění křivky ochlazování etalonu, resp. vzorku (vlevo) a příslušné časové závislosti rozdílu teplot těchto materiálů (vpravo) [6]

Tato metoda je v porovnání s klasickou termickou analýzou mnohem citlivější, a proto se používá například pro detekci fázových přeměn v materiálu a to i v tuhém stavu. Existuje i její modernější modifikace, kterou představuje: **Derivační diferenční termická analýza (DDTA)**. Princip je prakticky shodný jako u diferenční termické analýzy. Zkoumá se časová derivace křivky DTA, konkrétně  $d(\Delta T)/dt = f(T)$ , nebo případně  $d(\Delta T)/dt = f(t)$ . [6] Metoda má výhodu v tom, že dokáže přesněji určit teploty právě začínajících změn a dokáže rozlišit vzájemně se překrývající jevy.

### 2.3.6. Diferenční skenovací kalorimetrie (DSC)

Jiný název je také diferenciální kompenzační kalorimetrie. Je to metoda, která zkoumá tepelné vlastnosti materiálů. Jedná se o metodu velmi hojně používanou pro určení teplot tání, skelných přechodů nebo např. krystalizací nejrůznějších materiálů. [5]

Princip spočívá v tom, že dvě nádoby jsou chlazeny (ohřívány) konstantní rychlostí současně vedle sebe. Je nutno udržet nulový teplotní rozdíl. Neměří se difference teplot, ale elektrická energie přídatného zdroje potřebná k vyrovnání teplotních rozdílů mezi vzorky.

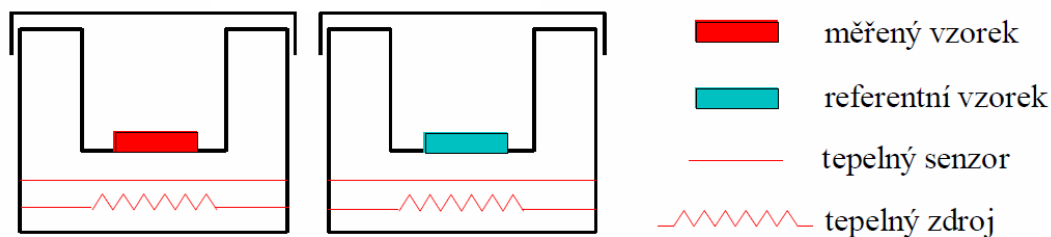
Pokud probíhá ve vzorku endotermní děj, je toho dosaženo dodáním energie do měřeného vzorku. Pokud probíhá exotermní děj, pak je větší energie dodána do referenční látky. [8]

Existují dva základní typy DSC analyzátorů:

#### DSC s kompenzací příkonu

Neboli tzv. obrácená DTA. Tato metoda zachovává nulový teplotní rozdíl mezi srovnávacím a měřeným vzorkem. Základem jsou dva tepelné zdroje a dvě měřící cely (obr. 6.). Oba vzorky jsou zahřívány stejně rychle. [8] Další postup se liší dle toho, jaká reakce začne probíhat viz. text výše.

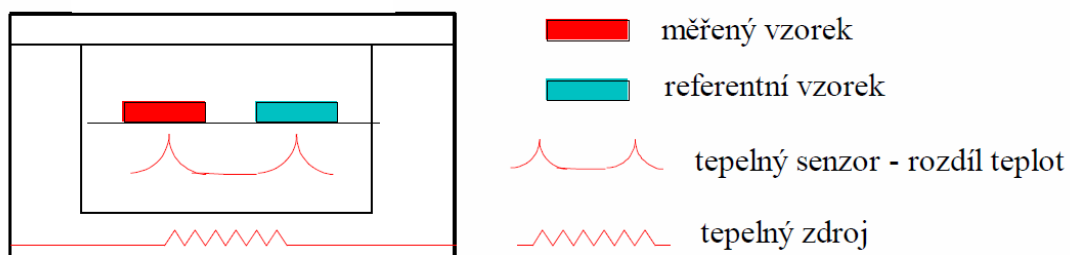
K vyrovnávání teplot dochází pomocí dodání menšího množství energie do vzorku. Příkon je nutno kompenzovat tak, aby v obou vzorcích zůstala stejná teplota. Měřenou veličinou je potom elektrický příkon, potřebný k udržení teploty vzorků na konstantní hodnotě. [5]



**Obr. 6** DSC s kompenzací příkonu [17]

### DSC s tepelným tokem

Tato metoda spočívá v tom, že každý ze vzorků je umístěn na samostatném čidle, která jsou společně v kalorimetrické cele (obr. 7.). Neměří se rozdíl příkonu, ale rozdíl teplot analyzovaného a referenčního vzorku, které jsou spojeny pomocí tepelného mostu. Endotermní popřípadě exotermní reakce způsobují změny teploty v měřeném vzorku a tento rozdíl je pak zaznamenáván jako tepelný tok z jednoho vzorku do druhého. Tento tepelný tok je považován za úměrný vůči rozdílu teplot. [5,8]



**Obr. 7** DSC s tepelným tokem [17]

### 2.3.7. Termická dilatometrická analýza (TDA)

Jedná se o metodu, která sleduje některé fyzikální či chemické procesy, které probíhají v rovnoměrně vyhřívaném vzorku. Tyto procesy jsou spojeny se změnou délkové, popřípadě objemové roztažnosti viz. kapitola dilatometrie v praktické části této práce.

Jednotlivé teploty, které jsou charakteristické pro různé změny v látce lze odečítat na termodilatometrických křivkách. Tyto křivky jsou závislostí  $dl/l = f(T)$  popřípadě  $DV/V = f(T)$ . [6] Lze využít i derivační termodilatometrické křivky, které jsou názornější.



### 2.3.8. Elektrotermická analýza (ETA)

Jedná se o často využívanou metodu, která nachází své uplatnění např. při studiu krystalizace. Tato analýza sleduje závislost elektrické vodivosti případně elektrického odporu vzorku na teplotě. Vzhledem k tomu, že tuhá a kapalná fáze mají různou elektrickou vodivost, dochází při krystalizaci ke změně podílu obou těchto fází a tím dochází ke změně vodivosti. [6]

Metoda má i jiné využití např. se dají pozorovat změny ve strukturách tuhých látek (očkování, modifikace apod.).

## 2.4. Snímače pro měření teploty

Na teplotě závisejí hodnoty všech fyzikálních veličin a to buď implicitně, nebo explicitně. Z toho důvodu existuje celá řada metod měření teploty. V textu níže jsou vypsány základní a nejběžnější metody měření teploty.

### 2.4.1. Teoretický princip snímačů teploty

Měření teploty patří k důležitým oborům měření, protože je základem celé řady technologických procesů. Pro měření teploty jsou dány dvě základní stupnice:

- a) *Termodynamická* – platí absolutní Kelvinova stupnice (K). Platí vztah:  $273,16\text{ }^{\circ}\text{C} = 1\text{K}$ .
- b) *Mezinárodní teplotní stupnice* – je určena pro praktické využití v běžném životě. Teplota je udávána ve stupních Celsia ( $^{\circ}\text{C}$ ). [10]

### Časová konstanta snímačů teploty

Pokud se změní měřená teplota ve sledovaném prostředí skokově o hodnotu  $\Delta T$ , bude časový průběh údajů snímače teploty dán exponenciální křivkou, která je vyjádřena vztahem (16):

$$T = T_K - (T_K - T_0) * e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (16)$$

Kde:

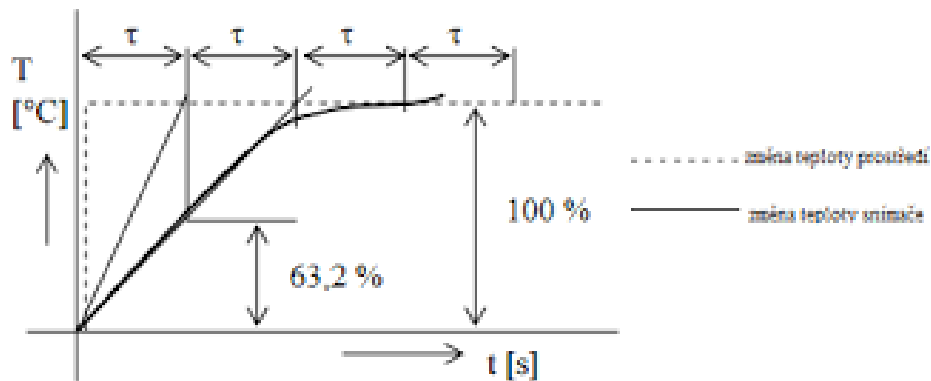
$T_0$  počáteční hodnota teploty před změnou [K]

$T_K$  konečná hodnota teploty po změně [K]

$t$  čas měřený od počátku změny [s]

$\tau$  časová konstanta [s]

Časová konstanta je doba, za kterou by snímač teploty dosáhl stejné teploty jako je teplota v měřeném prostředí, pokud by rychlost změny jeho údajů byla stále stejná jako na počátku měření. [10]



**Obr. 8 Grafické znázornění časové konstanty [10]**

Existuje způsob grafického stanovení časové konstanty, přičemž je tento způsob schematicky znázorněn na obr. 8. Časová konstanta je totiž také doba, za kterou snímač dosáhne teploty rovnající se 63,2% původního teplotního rozdílu. Jak je vidět z obrázku, dojde k ustálení teploty za čas rovnající se téměř  $4\tau$ . [10]

### 2.4.2. Rozdělení snímačů teploty

Při změně teploty se mění některé z vlastností tuhých látek, popř. kapalin nebo plynů. Právě změny těchto vlastností se využívají pro měření teploty. Podle toho, na které vlastnosti snímače teploty reagují, jsou děleny na [10]:

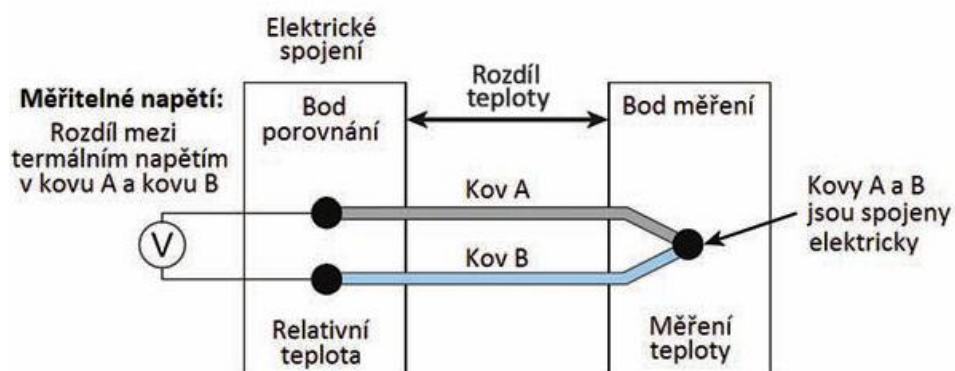
- 1) Snímače teploty dilatační - pracují na principu roztažnosti materiálu (klasické teploměry, bimetaly apod.)
- 2) Snímače teploty tlakové
- 3) Snímače teploty odporové - využívají změny elektrického odporu (odporové teploměry)
- 4) Snímače teploty termoelektrické
- 5) Snímače teploty bezdotykové (pyrometry, fotoelektrické)

Protože teorie snímačů teploty je velmi rozsáhlá a vystačila by na samostatnou bakalářskou práci, tak se další text bude zabývat pouze snímačem nejpodstatnějším pro dilatometrii a pro tuto bakalářskou práci, tímto snímačem je termočlánek.

## Princip fungování termočlánku

Velmi důležitou a jednou z nejpoužívanějších součástí při snímání teploty jsou termočlánky. Měření s termočlánky patří mezi nejvýznamnější a nejčastější způsoby měření. Termočlánek převádí teplotu na elektrické napětí pomocí tzv. *Seebeckova jevu*. Tento jev je vlastně přeměna teplotních rozdílů na elektrické napětí.

V praxi to znamená, že pokud kovová tyčka má mezi svými konci teplotní gradient  $\Delta T$ , pak musí existovat i termoelektrické napětí mezi nimi. Podmínkou je, že tento obvod musí být tvořen alespoň ze dvou různých materiálů (obr. 9.). Velikost získaného napětí závisí na druhu kovů a na teplotním rozdílu mezi spoji.



Obr. 9 Schéma termočlánku [26]

Samostatné termočlánky se s výhodou využívají jako čidla teploty v řádech stovek stupňů. Mají také dobrou citlivost v řádech desítek mikrovoltů na  $^{\circ}\text{C}$ . Termočláneků je mnoho druhů dělených podle maximálních teplot a použitých kovů (obr. 10.) [6]

Označení termočlánku dle IEC 584	Složení	Měřicí rozsah [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Původní označení
T	Cu-CuNi	-200 až +350	Cu-ko
J	Fe-CuNi	-200 až +750	Fe-ko
E	NiCr-CuNi	-100 až +900	ch-ko
K	NiCr-NiAl	-200 až +1200	ch-a
N	NiCr-Si-NiSi	-200 až +1200	---
S	PtRh10-Pt	0 až +1600	PtRh10
R	PtRh13-Pt	0 až +1600	PtRh13
B	PtRh30-PtRh6	+300 až +1700	PtRh18
Označení termočlánku dle DIN 43710	Složení	Měřicí rozsah [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Původní označení
L	Fe-CuNi	-200 až +900	Fe-ko
U	Cu-CuNi	-200 až +600	Cu-ko

Obr. 10 Základní druhy termočláneků [18]

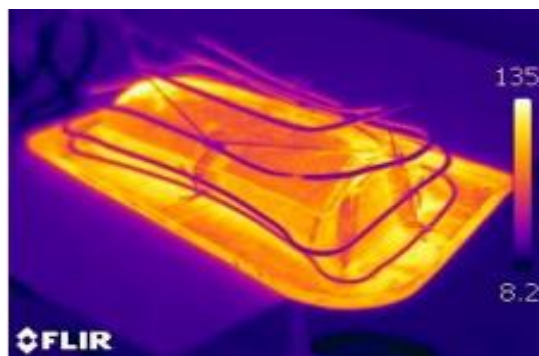
## 2.5. Způsoby ohřevu materiálu

Při dilatometrii je nutné materiál ohřát na určitou teplotu, což vyžaduje zařízení s ohřevem. V průmyslové praxi se pro ohřívání materiálu používá mnoho typů ohřivačů, které fungují na různých principech, mezi něž patří např.: indukční, elektrický odporový, elektrokontaktní, radiační apod. V kalicím dilatometru DIL 805L se nachází indukční ohřev, proto je vhodné uvést jeho princip.

### Indukční ohřev

Jedná se o elektrický ohřev využívající elektromagnetické indukce. Do cívky, jejímž vynutím protéká střídavý proud, se vloží předmět určený k ohřevu, jenž musí být elektricky vodivý. Následně se začnou indukovat se střídavým magnetickým polem v dutině cívky v ohřívaném předmětu vířivé proudy. Teplo se do ohřívaného předmětu dostává pomocí střídavého magnetického pole, ne teplotním spádem jako u ohřevů nepřímých a vzniká přímo v ohřívaném předmětu. [11] Důležitým parametrem pro indukční ohřev je hloubka pronikání magnetického vlnění do ohřívaného materiálu. Tento parametr stanovuje, jak daleko od povrchu dokáže prostoupit elektromagnetické vlnění, kde se posléze přemění jeho energie na teplo. Pro účely této práce je postačující, že při vysoké frekvenci se ohřívá pouze tenká vrstva materiálu a naopak při nízké frekvenci se prohřívá větší vrstva materiálu. Při nevhodně zvolené frekvenci by totiž mohlo docházet k elektromagnetické pružnosti materiálu, kdy elektromagnetická vlnění působí navzájem proti sobě a tím se vzájemně zeslabují, čímž významně klesá účinnost přenosu tepla do materiálu. [25]

Indukční ohřev má značnou výhodu v tom, že všechno v okolí může zůstat chladné (obr. 11.), což značně zvyšuje bezpečnost práce. Další výhodou je, že se tento druh ohřevu vyznačuje vysokou účinností, čímž se snižuje energetická náročnost na vybavení.



Obr. 11 Ohřev nesymetrické součásti [11]

Určitou nevýhodou je, že se teplo v předmětu nevyvíjí rovnoměrně v celém průřezu a také nelze použít nekovové materiály.

Indukční ohřev se využívá např. při tváření, tavení kovů, pájení, lisování ale i v domácnostech indukční vařiče apod. Součást určená k ohřevu nemusí být pravidelného tvaru lze ohřát i nesymetrické součásti, což ale vyžaduje úpravu cívky (obr 11, obr 12). [11]



*Obr. 12 Ohřev symetrické válcové tyče [11]*

## 2.6. Snímače polohy

Další součástí, nezbytnou pro dilatometrické měření, jsou snímače polohy, které umožňují v každém čase přesně definovat polohu měřeného objektu nebo případně detekovat změny, které vznikají zatížením na měřeném objektu. Jedná se o technické zařízení, které slouží k odměřování délky popřípadě úhlu natočení součásti. Snímače jsou děleny podle typu kontaktu s měřeným předmětem na snímače dotykové a bezdotykové. [11]

Základní typy snímačů polohy jsou děleny podle principu, na jakém fungují na:

*Odporové snímače, Optoelektrické snímače, Indukční snímače, Magnetické snímače, Kapacitní snímače, Ultrazvukové snímače* apod.

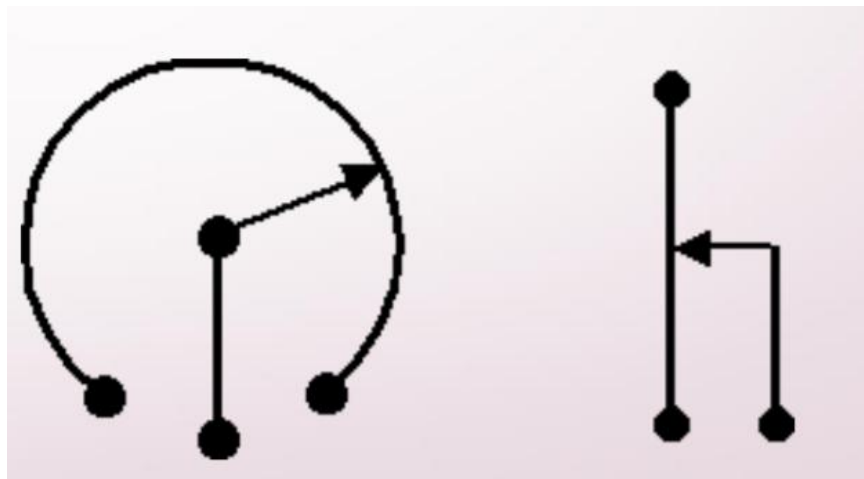
### 2.6.1. Odporové snímače polohy

Tyto snímače jsou dále děleny na snímače spojitě a nespojitě.

#### **Spojitě odporové snímače polohy**

Základem těchto snímačů je odporový potenciometr, jehož část, tzv. jezdec, se posouvá po odporové dráze. Tento jezdec je mechanicky spojen s tělesem, jehož poloha je odměřována.

Odporová dráha je umístěna na izolační podložce, na které je navinutý drát, který bývá kvůli lepšímu dotyku vyleštěn a po této jeho části se pohybuje jezdec. Další důležitou částí je nekovový odporový element, který bývá obvykle z plastu, v němž je obsaženo vodivé plnivo. Schéma spojitého odporového snímače polohy je ukázáno na obrázku (obr. 13.).



*Obr. 13 Odporové potenciometry (otočný a posuvný) [19]*

Tím jak měřená veličina působí na kontakt, se jeho poloha mění pohybováním se po odporové dráze. Takto se mění odpor mezi běžcem a odporovou dráhou, jehož změna je pozorována. Použití odporových snímačů je např. při měření polohy akčních členů, ale i hladiny paliva v nádrži apod.

### **Nespojité odporové snímače polohy**

Základem je detekce změny polohy sledovaného objektu, která je převáděna na skokovou změnu odporu. Tato změna je způsobena přepnutím kontaktů. Výstupem je signál logického typu: zapnuto – vypnuto. [19] Tyto snímače nezaznamenávají konkrétní hodnotu snímané veličiny, ale pouze konstatují fakt, zda se snímaný díl nachází nebo nenachází v definovaném místě, poloze, rozsahu.

### **2.6.2. Indukční snímače polohy**

Jedná se o bezkontaktní snímače polohy, což má značnou výhodu v tom, že odpadají problémy se třením, které je nevýhodou odporových snímačů. [20]

Pracují na principu změny indukčnosti cívky, když dojde ke změně magnetické vodivosti jejího obvodu podle vztahu (17).

$$L = N^2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{S}{l_{av}} \quad (17)$$

Kde:

L	vlastní indukčnost [H]
N	počet závitů na cívce [-]
$\mu_r$	poměrná permeabilita materiálu magnetického obvodu [-]
$\mu_0$	permeabilita vakua [H · m <sup>-1</sup> ]
S	průřez magnetického obvodu [m <sup>2</sup> ]
$l_{av}$	střední délka magnetické siločáry [m]

Dochází k převodu polohy na změnu vzájemné nebo vlastní indukčnosti, zatím co je v indukčním snímači vnější pole indukovaného napětí.

Existuje více typů indukčních snímačů např.: tlumivkové nebo transformátorové. [20]

### 2.6.3. Optické snímače polohy

Tyto snímače fungují na principu převodu polohy přímo na číselný údaj. Zdrojem optického záření je LED nebo laserová dioda. Optický signál musí být převeden na elektrický, což se zpravidla děje pomocí fotodiody, fototranzistoru apod.

Jejich značnou výhodou je vysoká přesnost, která bývá zpravidla lepší než u snímačů, které fungují analogově, proto se hojně využívají např. při CNC obrábění. Také umožňují velký rozsah měřených vzdáleností.

Existují tři základní typy:

#### **Binární snímače polohy**

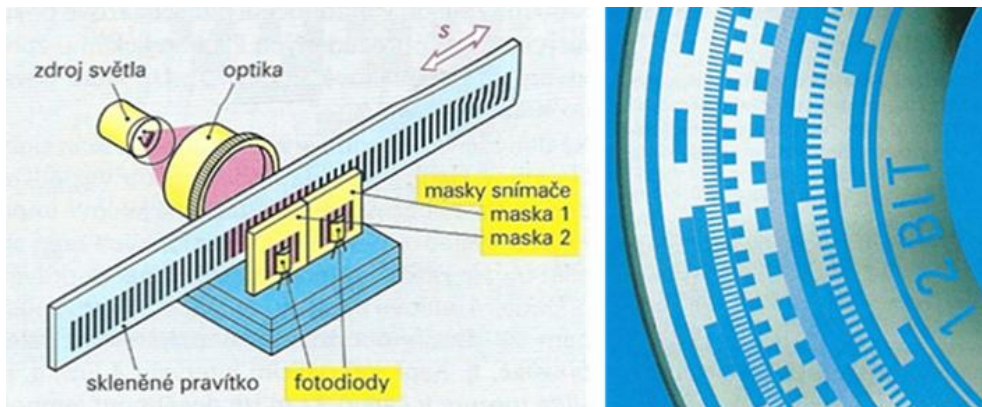
Obvykle jsou konstruovány jako reflexní difuzní snímače, jednocestné světelné závory, případně reflexní světelné závory.

#### **Inkrementální snímače polohy**

Odečítají přírůstky dráhy z pravítek, na kterých jsou rovnoměrně vyznačeny body. Světelný tok mezi zdrojem a fotocitlivými prvky je cloněn pomocí pravítka, případně kotoučku (rotoru) pravidelně rozděleného na propustné a nepropustné úseky (obr. 14.).

### Absolutní snímače polohy

Každá poloha je přesně definována číselnou hodnotou. Číselná hodnota je zakódována na kódových pravicích a kotoučích v binárním kódu za pomoci průhledných a neprůhledných ploch (obr. 14.). [12]



Obr. 14 Inkrementální (vlevo) a absolutní snímač (vpravo) [12]

### 2.6.4. Magnetické snímače polohy

Tyto snímače využívají magnetického pole trvalého magnetu. Nejznámější a zároveň nejpoužívanější jsou snímače fungující na principu Hallova jevu.

Princip spočívá v tom, že příčné magnetické pole působí na polovodič (Si, Ge, In, Sb apod.) kterým prochází elektrický proud. Magnetická indukce je povětšinou tvořena za pomoci permanentních magnetů. Je nutno doplnit vyhodnocovací elektroniku, která upravuje Hallovo napětí a udržuje a stabilizuje napájecí napětí. Změna Hallova napětí se musí rovnat pouze změně hodnoty indukce magnetického pole, proto je udržení konstantního proudu klíčové pro správné měření.

Poloha se dá snímat buď tak, že se Hallův článek pohybuje v magnetickém poli a tím se mění Hallovo napětí, nebo se v blízkosti magnetické pole permanentního magnetu může pohybovat těleso, což zapříčiní změnu magnetické indukce a změny výstupní napětí. [12]

### 2.6.5. Kapacitní snímače polohy

Tyto snímače měří změnu kapacity deskového kondenzátoru dle vztahu (18).

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{l} \quad (18)$$

Kde:

C kapacita kondenzátoru [F]

$\varepsilon_r$  poměrná permitivita dielektrika[-]



- $\varepsilon_0$  permitivita vakua [ $F \cdot m^{-1}$ ]  
 $S$  účinná plocha elektrod [ $m^2$ ]  
 $l$  vzdálenost elektrod (tloušťka dielektrika) [ $m$ ]

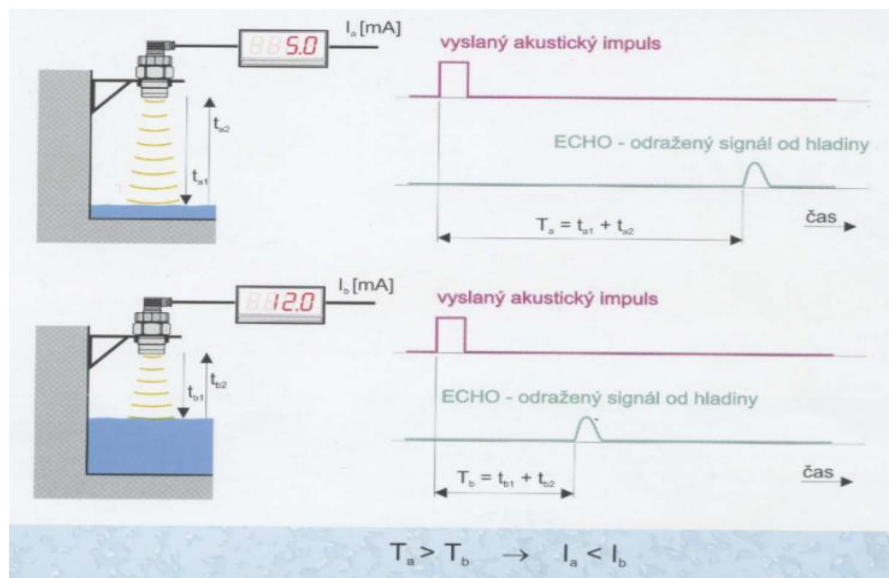
Tento typ snímačů převádí měřenou veličinu na kapacitu deskového kondenzátou. Ta je následně převáděna na signál, který se dá dále zpracovat. Užití je výhodné pro nekovové předměty (plast, papír, dřevo atd.). Změny kapacity se dá dosáhnout několika způsoby: změnou vzdálenosti desek, zasunutím dielektrika mezi desky, případně změnou plochy překrytí mezi deskami.

Desky kondenzátou jsou ploché, ale mohou to být i souosé trubky. Speciálním, ale často používaným případem, je diferenciální kondenzátor, který má jednu z desek (prostřední) pohyblivou. Ta se nachází mezi dvěma pevnými deskami. [21]

### 2.6.6. Ultrazvukové snímače polohy

Jedná se o snímače, které pracují bezdotykově. Vyznačují se poměrně dobrou odolností vůči vlivům okolí a mají vysokou spolehlivost.

Ultrazvukový snímač vysílá krátké pulzy o vysoké frekvenci, které se za určitou dobu vrátí zpět. Tyto odražené vlny jsou detekovány a podle doby, za kterou se navrátí, se dá určit poloha objektu (obr. 15.). [24]



Obr. 15 Měření vzdálenosti hladiny pomocí ultrazvukového snímače [24]

## 2.7. Metoda stanovení transformačních teplot

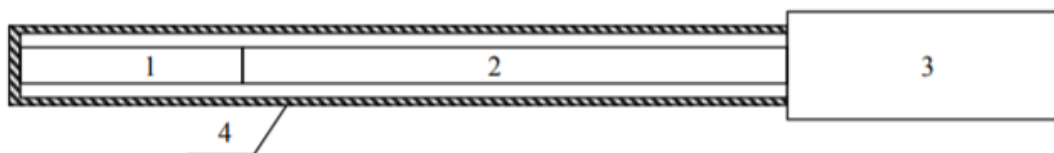
Při fázových přeměnách v ocelích dochází z důvodu změny krystalové mřížky ke změně rozložení atomů v materiálu a podle těchto změn lze určit transformační teploty. V praxi existuje celá řada metod pro měření transformačních teplot např.: metoda měření pomocí vířivých proudů, metoda pulzní kalorimetrie apod.

V této práci byla jako vyhodnocující zvolena dilatometrická metoda stanovení transformačních teplot. Z toho důvodu je této metodě věnována následující kapitola.

### Dilatometrická metoda stanovení transformačních teplot

Klasický a nejjednodušší dilatometr (obr. 16.) se skládá z trubice uzavřené na jedné straně a přenosové tyče, jenž slouží k přenosu délkových změn rozměru vzorku do převodníku.

Převodník slouží k převodu změny délkového rozměru na elektrický signál.

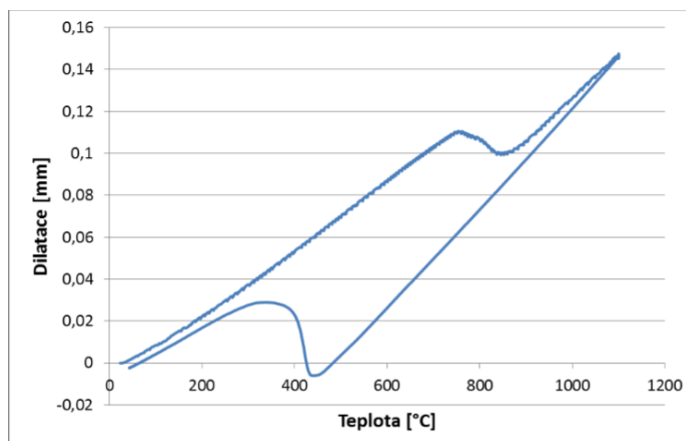


*1 – vzorek, 2 – přenosová tyč, 3 - snímač, 4 - trubice*

#### *Obr. 16 Princip klasického (nejjednoduššího) dilatometru [13]*

Měření musí být co nejpřesnější, proto je trubice i přenosová tyč obvykle vyrobena ze stejného materiálu s co nejnižší teplotní roztažností. Tento materiál musí odolat požadované teplotě pro měření vzorku. Pro teploty pod 1000°C se s výhodou používá křemenné sklo, protože má nízkou teplotní roztažnost. Pro teploty mezi 1000 °C – 1700 °C se dobře uplatňuje keramika např. sintrovaný korund nebo dražší materiály jako je safír apod. Pro teploty nad 1700 °C je vhodné použít žáruvzdorné kovy (Mo, W, Ta atd.). [13]

### Popis a interpretace dilatometrické křivky



*Obr. 17 Záznam dilatometr. křivky oceli S690QL při rychlosti ochlazování 50°C/s [14]*

Na obrázku (obr. 17.) je vidět průběh dilatometrické křivky. K vyhodnocení transformačních teplot je dobré použít více metod, nejlépe na sobě nezávislých, aby se minimalizovalo riziko vzniku chyb.

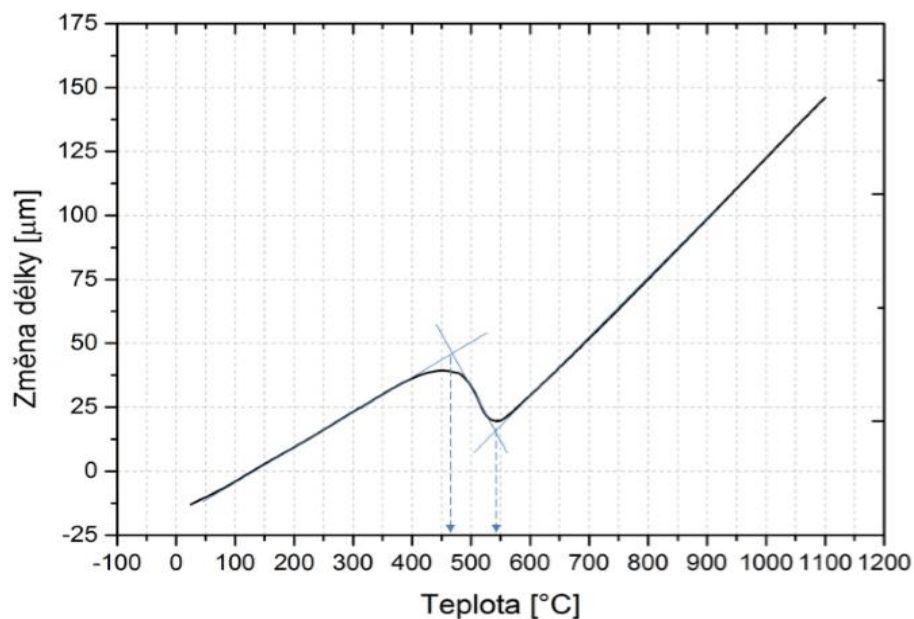
V tomto případě byly k vyhodnocení použity dvě metody a to: *metoda 3 tečen a metoda stanovení rychlosti délkové přeměny*.

Při použití více metod jsou výsledné hodnoty teplot stanoveny zpravidla aritmetickým průměrem obou těchto metod. Výše zmíněné metody jsou použity i pro vyhodnocení experimentální části bakalářské práce, a proto je vhodné zmínit jejich teoretický princip.

### Metoda 3 tečen

Jednotlivé přechodové teploty  $A_{c1}$  a  $A_{c3}$  jsou stanovovány jako průsečíky tečen na dilatometrické křivce. Názorná ukázka je na obr. 18. Jednotlivé změny na křivce označují teploty, při kterých v oceli S690QL dochází k začátku i ukončení transformační přeměny. Tato změna je charakteristická výraznou změnou průběhu křivky, protože při změně na jinou krystalovou strukturu se atomy v materiálu přeskupí, tím dojde k přerušení téměř lineární závislosti prodloužení na teplotě a materiál v průběhu této přeměny, která trvá určitý čas, začne měnit svůj rozměr. Po této přeměně je již průběh křivky zase téměř lineární, což ale závisí na druhu materiálu.

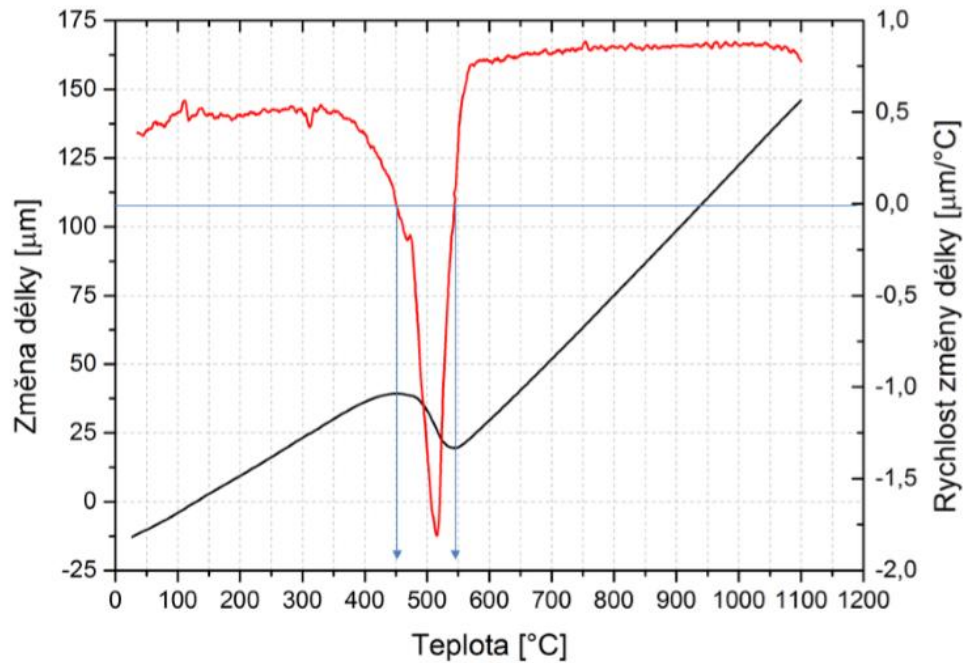
Je nutné říci, že při dilatometrickém měření je třeba volit maximální teplotu do oblasti nad teplotu  $A_{c3}$ , ale pod teplotu solidu.



Obr. 18 Metoda 3 tečen pro určení teploty počátku a konce fázové transformace [14]

### Metoda stanovení rychlosti délkové přeměny

Podstatou této metody je pomocí první derivace křivky stanovení změny délky na teplotě. Jedná se o složitější metodu, než je metoda 3 tečen. Přechodové teploty jsou určeny teplotou, při které je rychlost změny délky nulová, tedy kde protnou uvedenou osu v nule. Z těchto průsečíků jsou spuštěny kolmice na osu teploty a jsou tak odečteny přechodové teploty  $A_{c1}$  a  $A_{c3}$ , jak je zřejmé z obrázku (obr. 19.). [14]



**Obr. 19** Metoda stanovení rychlosti délkové přeměny [14]

Na obrázku (obr. 19.) červená křivka značí první derivaci změny délky. Jedná se o první derivaci podle času pro dilatometrickou křivku (černá).

### 3. Experimentální část

V experimentální části se tato práce zabývá stanovením velikosti přechodových teplot  $A_{c1}$  a  $A_{c3}$  v závislosti na rychlosti ohřevu. Tyto poznatky jsou důležité pro skutečné teplotní cykly aplikované na materiály. Je třeba přesně vědět, kdy začínají vznikat jednotlivé fáze v materiálu, a jakou teplotu při ohřevu nepřesáhnout. Zároveň je však potřeba používat dostatečnou rychlost ohřevu, aby se co nejvíce zefektivnily technologické procesy. V rámci práce byla dále zjišťována kritická rychlost, při které je kalící dilatometr DIL 805L ještě schopen zaznamenávat s dostatečnou přesností naměřená data a je to tudíž maximální rychlost, kterou má smysl v tomto přístroji pro dané materiály používat.

Pro experimentální měření byly vybrány čtyři druhy ocelí reprezentující jemnozrnné oceli (S460MC), HSLA oceli (S690QL a S700MC) a creepově odolná martenzitická ocel X23CrMoV12-1. Tyto druhy ocelí byly vybrány proto, aby bylo pokryto větší spektrum materiálů a výsledky experimentální části měli určitou vypovídací hodnotu.

#### 3.1. Charakteristika materiálů použitých pro dilatometrická měření

##### Ocel S460MC

Jedná se o konstrukční mikrolegovanou, jemnozrnnou, svařitelnou ocel vyrobenou pomocí termomechanického válcování. Číselné označení v názvu oceli definuje minimální zaručenou mez kluzu 460 MPa. Mez pevnosti se pohybuje mezi 520 – 670 MPa. Tažnost se pohybuje mezi 14 – 17%. Tato ocel se používá pro výrobky tvářené za studena, nejčastěji se jedná o výlisky, případně o plechy pro konstrukční sestavy.

Ocel je mikrolegována Ti, Al, Nb a V. Vysvětlení popisných písmen v názvu oceli je následující: S – označuje konstrukční ocel, M – termomechanicky válcováno a C – označuje, zvláštní tvářitelnost za studena. V tabulce 3 je uvedeno chemické složení oceli S460MC dle ČSN EN 10149.

**Tab. 3 Maximální hodnoty chemických prvků v hmotnostních procentech pro ocel S460MC**

C	Si	Mn	P	S	Al
0,12	0,50	1,60	0,025	0,015	0,015
Nb	V	Ti			
0,09	0,20	0,15			

### Ocel S690QL

Jedná se o vysokopevnostní, konstrukční, zušlechtěnou ocel, která se při výrobě kalí a následně popouští.

Velmi často se vyrábí ve formě plechu. Z označení oceli je zřejmé, že minimální zaručená hodnota meze kluzu je 690 MPa. Mez pevnosti v tahu závisí na tloušťce plechu a pohybuje se mezi 770 – 940 MPa při tažnosti 14%. Tato ocel je navržena tak, že její chemické a mechanické vlastnosti zajišťují vynikající svařitelnost a dostatečnou tvářitelnost. Její vysoká pevnost se využívá pro návrh součástí, při kterých je potřebné ušetřit hmotnost, zvýšit odolnost nebo trvanlivost. Konkrétní použití nachází při stavbě strojů, konstrukcí, vozidel, manipulátorů apod.

Vysvětlení popisných písmen v názvu oceli je následující: S – označuje konstrukční ocel, Q – označuje, že je ocel kalená s následným popouštěním a L – naznačuje použitelnost pro nízké teploty. V tabulce 4 je uvedeno chemické složení oceli dle ČSN EN 10149.

*Tab. 4 Maximální hodnoty chemických prvků v hmotnostních procentech pro ocel S690QL*

<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>N</b>
0,20	0,80	1,70	0,02	0,01	0,015
<b>B</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Mo</b>	<b>Ni</b>	<b>V</b>
0,005	1,50	0,50	0,70	2,00	0,12

### Ocel S700MC

Jedná se vysokopevnostní, jemnozrnnou, konstrukční, jakostní ocel, která se vyznačuje vysoko hodnotou meze kluzu  $R_e$  a meze pevnosti  $R_m$ . Mez kluzu dosahuje minimální zaručené hodnoty 700 MPa, jak odpovídá již značení oceli. Mez pevnosti se pohybuje v intervalu hodnot 750 – 930 MPa. Mechanické vlastnosti opět závisí na tloušťce dodaného materiálu.

Tažnost této oceli je nižší než tomu bylo u oceli S460MC a pohybuje se okolo 10%. U této oceli je také zaručena svařitelnost všemi běžnými způsoby svařování.

Vzhledem k vysoké pevnosti tohoto materiálu je jeho použití převážně tam, kde je potřeba při nižším objemu použitého materiálu, zajistit co největší pevnost. Jedná se například o výrobu náprav, rámu podvozku osobních i nákladních automobilů, výrobu jeřábů apod. V tabulce 5 je uvedeno chemické složení oceli dle ČSN EN 10149. [22]

**Tab. 5 Maximální hodnoty chemických prvků v hmotnostních procentech pro ocel S700MC**

C	Si	Mn	P	S	Al
0,12	0,60	2,10	0,025	0,015	0,015
Nb	V	Ti	Mo	B	
0,09	0,20	0,22	0,50	0,005	

**Ocel X23CrMoV12-1**

Jedná se o ocel ze skupiny vysokolegovaných martenzitických ocelí. Ocel je creepově odolná a byla navržena pro aplikační teploty do 650 °C. V drtivé většině případů bývá zušlechťena a dosahuje meze kluzu okolo 700 MPa a meze pevnosti v tahu 900 – 1050 MPa. Tažnost se pohybuje okolo 11% a minimální hodnota nárazové práce 20 J.

Uvedená ocel se s výhodou používá v energetickém průmyslu pro součásti turbín, jako jsou rotory, lopatky apod., další využití nachází například u pohonných částí letadel. Chemické složení oceli X23CrMoV12-1 získané spektrometrem je uvedeno v tabulce 6. [22]

**Tab. 6 Hodnoty chemických prvků v hmotnostních procentech v oceli X23CrMoV12-1 získané spektrometrem Q4 Tasman**

C	Si	Mn	P	S	Cr
0,206	0,246	0,682	0,023	0,011	11,720
Ni	V				
0,626	0,337				

**3.2. Dilatometrie**

Jedná se o experimentální měřicí metodu, díky níž lze studovat délkové změny zkoumaného materiálu, které způsobují fyzikální případně chemické procesy. Jednotlivé procesy mohou být zkoumány buď v závislosti na teplotě, nebo na čase. Ke stanovení dilatometrických křivek se používají přístroje nazvané dilatometry. Na Katedře strojírenské technologie je k dispozici kalící dilatometr DIL 805L od společnosti TA Instruments.

**3.2.1. Kalící dilatometr DIL 805L**

Jedná se o plně automatizovaný kalící dilatometr, který je určený pro studování dilatometrických změn materiálů při ohřevu i ochlazování. Lze jej využít pro stanovení teplotní závislosti koeficientu teplotní roztažnosti, ke studiu transformačních změn

materiálů při ohřevu a ochlazování a to nejen za zvýšených teplot, ale také v režimu „sub zero“, tedy při teplotách nižších než 0 °C. Velká výhoda spočívá ve velmi přesném řízení ohřívací a ochlazovací rychlosti. Maximální teplota ohřevu může být až 1500 °C, jako minimální je zpravidla uváděna teplota okolí RT, ale při použití režimu „Sub zero“ je možné vzorky ochlazovat až do teploty – 100 °C. Přesné řízení rychlostí ohřevu i ochlazování umožňuje velmi podrobné sledování dilatometrických změn a to i při velmi vysokých rychlostech ochlazování (až 2500 °C.s<sup>-1</sup> na povrchu vzorku). Dilatometr si automaticky řídí průtok chladicí kapaliny i pracovního plynu. Vzorky jsou ohřívány pomocí indukční cívky na určenou teplotu a následně jsou kontinuálně chlazeny buď exponenciální, nebo lineární rychlostí.

Dilatometr může pracovat v několika různých prostředích: na vzduchu, ve vakuu a v atmosférách He, Ar, případně N. Při požadavku na vysoké rychlosti ochlazování je zpravidla využíváno He díky své velmi vysoké teplotní vodivosti.

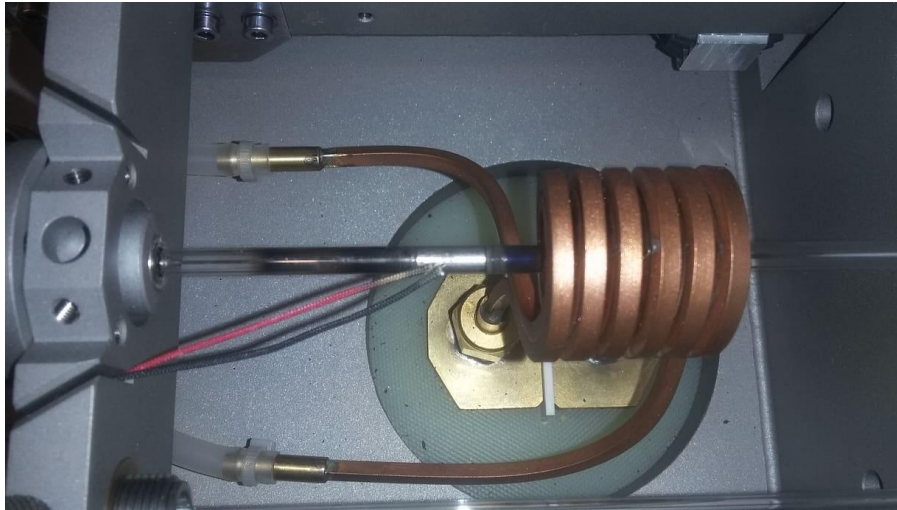
Během ohřevu i ochlazování dochází k rozměrové změně vzorku, která je zaznamenávána velmi citlivým snímačem schopným detekovat délkové změny o velikosti μm, díky čemuž jsou zaznamenány i objemové změny typu mřížky.

Výstupem je potom dilatometrická křivka, z níž lze odečíst začátky a konce transformačních přeměn. Podle typu experimentu lze na základě dilatometrických křivek sestavit ARA, IRA, případně při použití svařovacího teplotního cyklu také In-Situ ARA diagramy.

### **Velikost a geometrie použitých vzorků**

Pro vlastní měření byly použity vzorky ve formě válečků průměru 4 mm a délky 10 mm. V případě požadavku na vysoké ochlazovací rychlosti je do uvedeného vzorku vyvrtán otvor průměru 2 mm. Díky tomu se sníží celkový objem vzorku s naakumulovaným teplem a zároveň se zvětší celková plocha povrchu, kterou je teplo odváděno. Díky tomu lze dosáhnout opravdu vysokých ochlazovacích rychlostí. Vzorek je do dilatometru umístěn ve směru délky, s dotykem na čelních plochách, tak jak je ukázáno na obrázku (obr. 20.). Na povrchu vzorku je přivařen termočlánek typu S, který slouží ke zpětnovazebnímu řízení rychlostí ohřevu a ochlazování.





*Obr. 20 Umístění vzorku do quenching dilatometru DIL 805L*

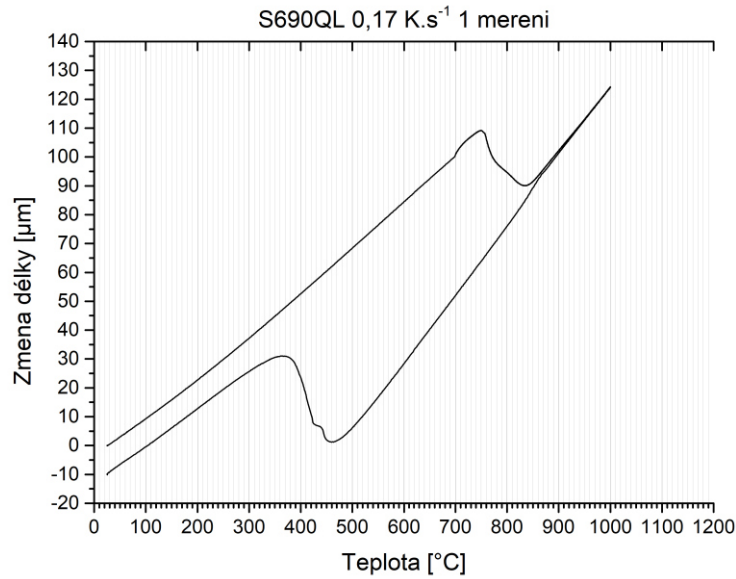
### **3.3. Počáteční zkušební dilatometrická měření**

#### **3.3.1. Posouzení opakovatelnosti měření stejného vzorku**

Prvním úkolem bylo zjistit, zda se opakovaným ohřevem stejného vzorku dosáhne stejných hodnot transformačních teplot, nebo zda předchozí ovlivnění teplotním cyklem měření zásadním způsobem ovlivní. Pokud by nebylo zjištěno žádné ovlivnění dilatometrických křivek, pak by to v praxi velmi ušetřilo čas potřebný na jednotlivá zkušební měření. Zcela by tak odpadla příprava vzorku, příprava termočlánku, upínání do stroje a v neposlední řadě by se významně snížil počet zkušebních vzorků.

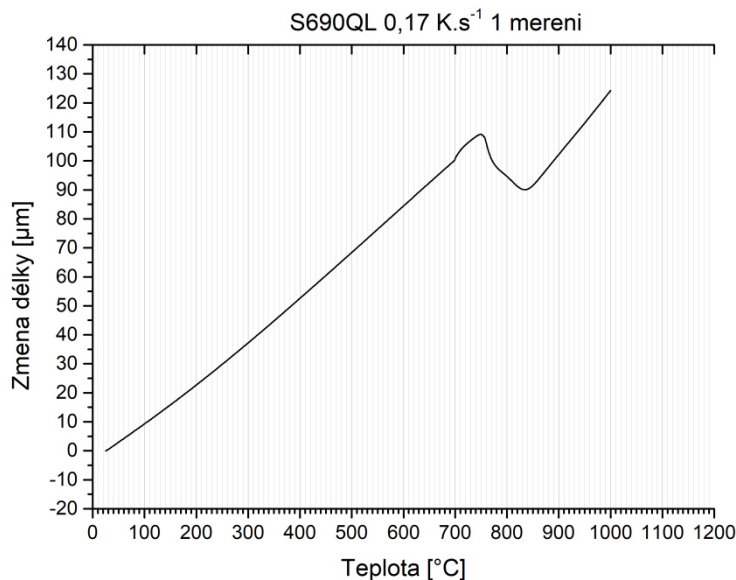
Toto ověřovací měření bylo provedeno na oceli S690QL při rychlosti ohřevu  $0,17 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$  na teplotu  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , výdrži na uvedené teplotě po dobu 60 sekund s následným ochlazením rychlostí  $10 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ . Měření bylo opakováno celkem 3x, aby bylo potvrzeno, popřípadě vyvráceno to, že lze použít jeden vzorek materiálu pro více měření, aniž by se to výrazněji projevilo na dilatometrické křivce.

Jako vyhodnocovací byla použita Metoda 3 tečen, a také Metoda stanovení rychlosti délkové přeměny pomocí první derivace dilatometrické křivky. Způsob vyhodnocení oběma metodami byl již popsán v teoretické části v kapitole 2.7. Výstupem z dilatometrických měření je buď graficky zpracovaná forma naměřených dilatometrických křivek, nebo datový soubor obsahující informace o teplotě, čase a dilataci vzorku. Uvedené datové soubory byly převedeny do programu OriginPro 9 následně graficky vyhodnoceny ve formě dilatometrické křivky, tedy zobrazení dilatace vzorku v závislosti na teplotě (obr. 21.).



**Obr. 21** Křivka závislosti změny délky na teplotě pro ocel S690QL rychlost ohřevu 0,17  $K.s^{-1}$

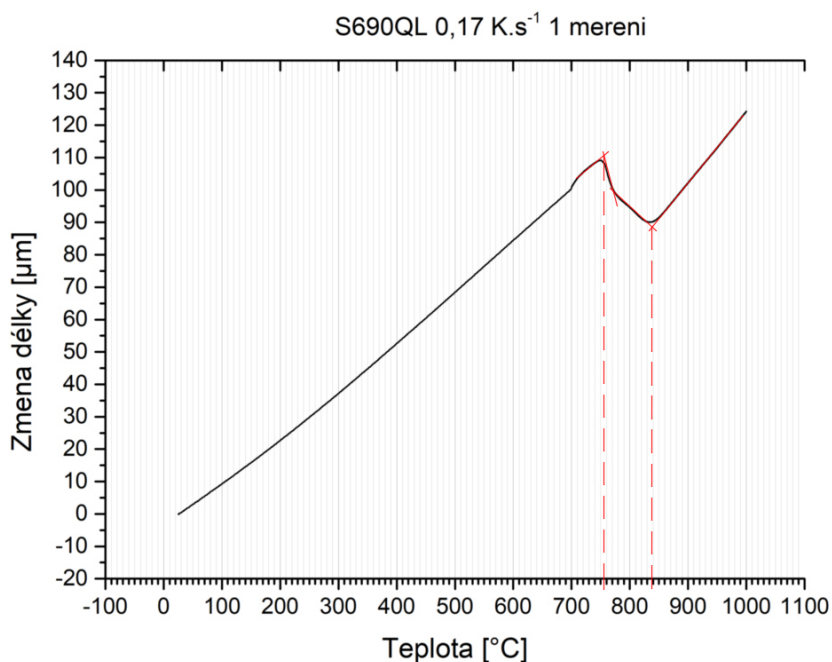
Z grafu jsou jasně patrné změny v průběhu dilatací a právě tyto změny byly kvantifikovány jednotlivými vyhodnocovacími metodami. Pro tuto práci je nejpodstatnější křivka ohřevu, proto je v následujících obrázcích z důvodu větší přehlednosti zobrazována právě tato část křivky (obr. 22.).



**Obr. 22** Část dilatometrické křivky zobrazující ohřev

### Metoda tří tečen

Metoda tří tečen spočívá v tom, že v místě intenzivních dilatometrických změn jsou na přilehlých lineárních částech křivky udělány tečny a z jejich vzájemných průsečíků jsou spuštěny kolmice na osu s teplotou. Díky tomu je odečtena teplota počátku a konce transformační přeměny, což je popsáno v teoretické části této práce. V tomto případě je však vidět z obrázku 23, že tečny nemusí být pouze tři, ale jejich počet se upravuje podle průběhu křivky. Zde konkrétně se jedná o 4 tečny.

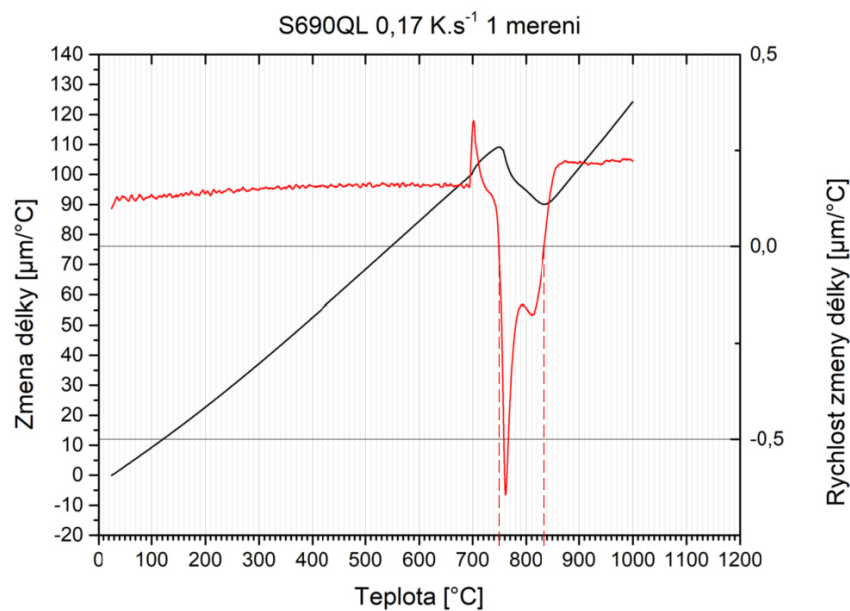


**Obr. 23** Odečtení přechodových teplot pomocí upravené metody tří tečen

Pro dané podmínky ohřevu tak již mohly být snadno odečteny hodnoty přechodové teploty  $A_{c1} = 756 \text{ °C}$  a  $A_{c3} = 838 \text{ °C}$ .

### Metoda stanovení rychlosti délkové přeměny

Pomocí Metody stanovení rychlosti délkové přeměny jsou zjišťovány průsečíky první derivace dilatometrické křivky s osou reprezentující nulovou rychlost délkové změny (obr. 24.). Tímto způsobem byly odečteny teploty  $A_{c1} = 749 \text{ °C}$  a  $A_{c3} = 834 \text{ °C}$ .



**Obr. 24** Odečtení přechodových teplot metodou stanovení rychlosti délkové přeměny

Z výsledků měření jednotlivých metod byly stanoveny výsledné teploty jako aritmetický průměr těchto hodnot.

**Ukázka výpočtu:**

$$A_{C1} = \frac{756+749}{2} = 752,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

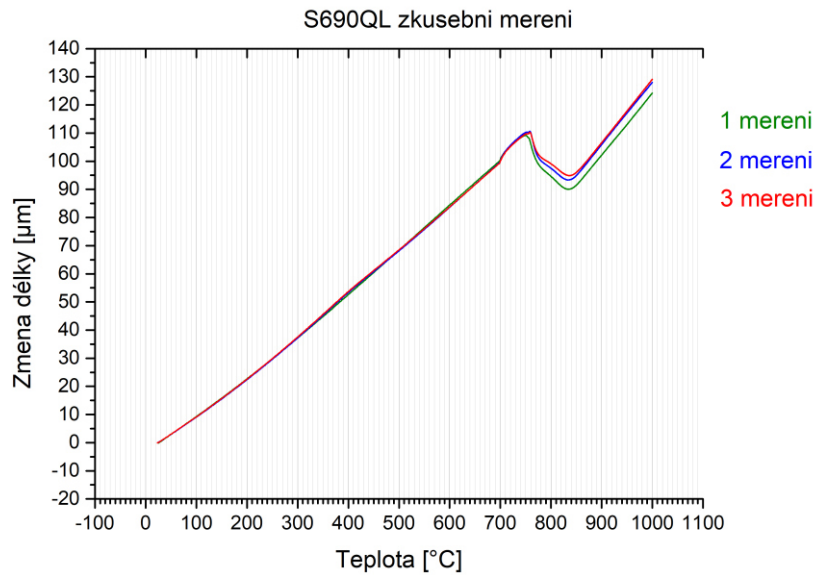
$$A_{C3} = \frac{838+834}{2} = 836 \text{ } ^\circ\text{C}$$

V tabulce 7 jsou číselně uvedeny hodnoty teplot zjištěné jednotlivými metodami pro opakovaný cyklus číslo měření 1, 2 a 3.

**Tab. 7** Přechodové teploty při jednotlivých opakovaných měřeních téhož vzorku

Č. měř.	Teplota $A_{C1}$ [°C]			Teplota $A_{C3}$ [°C]		
	Met. 3 tečen	Met. stan. rychl. délk. přem.	Průměr	Met. 3 tečen	Met. stan. rychl. délk. přem.	Průměr
<b>1</b>	756	749	<b>752,5</b>	838	834	<b>836</b>
<b>2</b>	758	757	<b>757,5</b>	838	834	<b>836</b>
<b>3</b>	760	758	<b>759</b>	843	838	<b>840,5</b>

Z výsledných křivek všech tří měření (obr. 25.) je zřejmá viditelná odchylka pro každý následný cyklus. Zároveň však transformační teploty získané jednotlivými metodami vykazují sice rostoucí trend, ale odchylky jsou velmi malé, méně než 1%.



**Obr. 25** Porovnání jednotlivých opakovaných měření téhož vzorku

I přes relativně malé odchylky transformačních teplot  $A_{c1}$  a  $A_{c3}$  dochází k významnějším odchylkám v celkovém průběhu dilatace. Z tohoto důvodu bych nedoporučil použít více opakovaných teplotních cyklů na jednom vzorku.

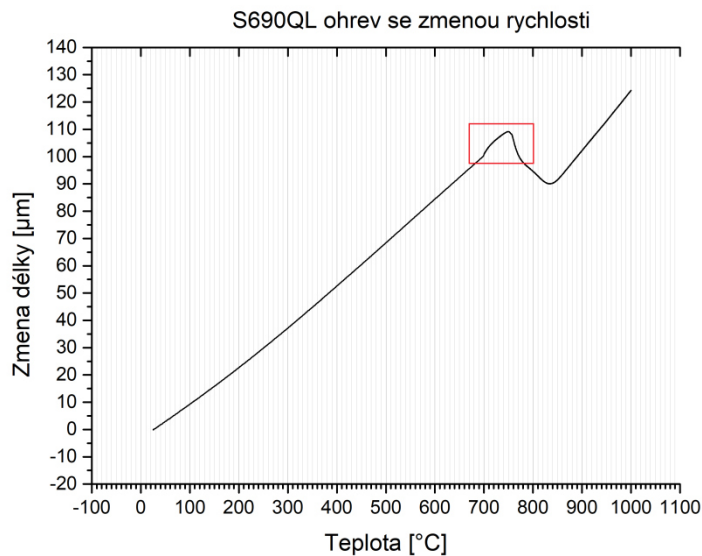
### 3.3.2. Posouzení vlivu změny rychlosti ohřevu

Další úkol, který bylo třeba experimentálně ověřit, bylo to, zda se musí vzorek v celém teplotním intervalu ohřívat stále stejnou rychlostí. Z hlediska přesnosti je třeba, aby se stanovení teplot  $A_{c1}$  a  $A_{c3}$  provádělo při co nejnižší rychlosti ohřevu. To ale značně prodlužuje celkovou dobu testování. Například při rychlosti ohřevu  $0,1 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$  na teplotu  $1000 \text{ °C}$  trvá ohřevová fáze 165 minut. Ideální by byl takový průběh experimentu, při kterém by byl vzorek ohříván vyšší rychlostí. Ta by se snížila až cca  $50 \text{ °C}$  před dosažením první transformační teploty. Tím by se významně snížila časová náročnost celého cyklu.

Ověřovací měření proběhlo opět na materiálu S690QL. Při ověřovacím měření byl materiál ohříván do teploty  $1000 \text{ °C}$  a to v teplotním intervalu  $20 \text{ °C} - 700 \text{ °C}$  rychlostí  $10 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$  a v teplotním intervalu  $700 \text{ °C} - 1000 \text{ °C}$  stonásobně pomaleji rychlostí  $0,1 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$  (obr. 26.). Při druhém měření byl nový vzorek ze stejného materiálu ohříván konstantní rychlostí  $0,1 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$  na celém intervalu  $20 \text{ °C} - 1000 \text{ °C}$ . V obou případech byla na maximální teplotě tj.  $1000 \text{ °C}$  výdrž 60 sekund s následnou rychlostí ochlazování  $10 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Na obrázku 26 je grafický záznam ohřevové fáze vzorku z materiálu S690QL při nerovnoměrné rychlosti ohřevu. V místě, které je důležité pro stanovení transformační teploty, bylo potřeba udělat detail, jenž je pro lepší orientaci zvýrazněn červeným

rámečkem. Na obrázku 27 je pak ukázán detail z červeného rámečku pro nerovnoměrnou rychlost ohřevu (vlevo) a pro rovnoměrnou rychlost ohřevu  $0,1 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$  na celém intervalu (vpravo).



**Obr. 26** Ohřev materiálu: interval  $20 \text{ °C} - 700 \text{ °C}$ , rychlost ohřevu  $10 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$  a interval  $700 \text{ °C} - 1000 \text{ °C}$ , rychlost ohřevu  $0,1 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$



**Obr. 27** Detail vrcholu křivky při nekonstantním ohřevu (vlevo), detail vrcholu křivky při konstantním ohřevu (vpravo)

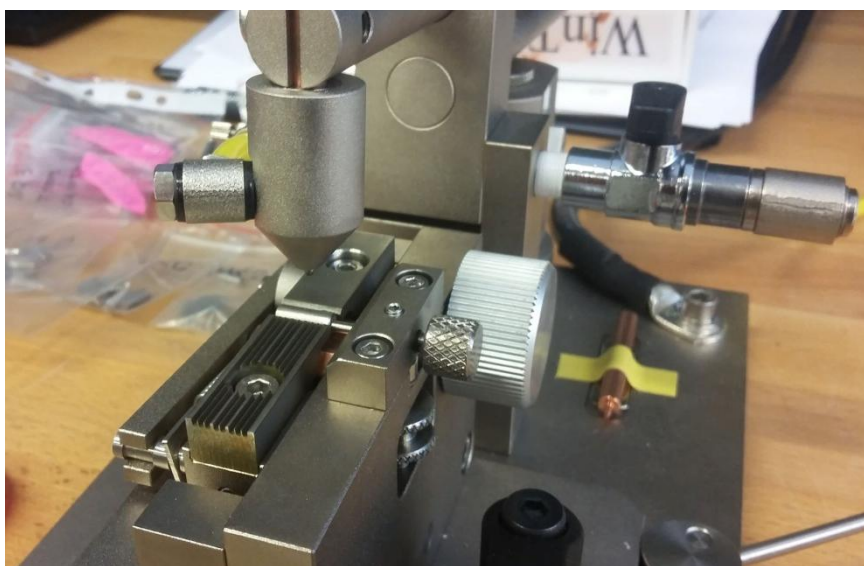
Z obrázků je patrné, že při vyšší rychlosti ohřevu a následném zpomalení dojde k mírnému skoku na křivce (obr. 27 vlevo). Tento skok při plynulém ohřevu nenastane (obr. 27 vpravo), a proto byl zvolen plynulý ohřev pro všechna měření. Což má několik výhod, zejména to ulehčuje děláni metody tečen, protože se plynulá křivka bez nerovností lépe nahrazuje tečnou a při metodě první derivace nedochází ke zbytečnému šumu na křivce. Na výsledky získání transformačních teplot však změna rychlosti žádný významnější vliv nemá, jak dokládá tabulka (tab. 8).

**Tab. 8** Rozdíl v transformačních teplotách při ohřevu stejnou (2 měření) a měnící se rychlostí (1 měření)

Č. měř./rychl.	Teplota $A_{c1}$ [°C]			Teplota $A_{c3}$ [°C]		
	Met. 3 tečen	Met. stan. rychl. dél. přem.	Prům.	Met. 3 tečen	Met. stan. rychl. dél. přem.	Prům.
1 / měnící se	754	751	<b>752,5</b>	837	833	<b>835</b>
2 / stejná	750	748	<b>749</b>	839	835	<b>837</b>

### 3.4. Posouzení vlivu rychlosti ohřevu na hodnotu přechodových teplot

Cílem této etapy měření bylo posoudit vliv rychlosti ohřevu vzorku na hodnotu (posun) transformačních teplot  $A_{c1}$  a  $A_{c3}$ . Na vybraný vzorek oceli, jednalo se o plné válečky o průměru 4 mm a délce 10 mm, byl přivařen termočlánek typu S. Přivaření probíhalo pomocí kondenzátorové svářečky (obr. 28).



**Obr. 28** Svářečka termočláneků s upnutým vzorkem materiálu

Takto připravený vzorek byl vložen do dilatometru DIL 805L, upnut přesně pomocí skleněných tyčinek a posunut do cívky indukčního ohřevu, kde byl ustaven pomocí dorazů (obr. 20.). Dále následovala úprava programu a následné spuštění vlastního testu.

Pro každou ocel byly zvoleny čtyři základní rychlosti ohřevu a to  $0,1 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $1 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $10 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$  a  $100 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ . Těmito rychlostmi byly ohřívány veškeré vzorky a to buď na teplotu  $1000 \text{ °C}$  pro ocel S690QL nebo na teplotu  $1100 \text{ °C}$  pro ostatní ocele s výdrží 60 sekund na této



maximální teplotě. Ohřev na zvýšenou teplotu byl zvolen proto, že martenzitická ocel X23CrMoV12-1 má oproti ostatním ocelím transformační teploty  $A_{c1}$  a  $A_{c3}$  posunuty výše. Je třeba, aby měl materiál dostatek času na přeměnu krystalové mřížky a k získání dostatečně dlouhého pokračování dilatometrické křivky tak, aby mohla být s dostatečnou přesností použita tečna ke křivce. Rychlost ochlazování byla zvolena  $10 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$  pro všechny typy ocelí. K chlazení bylo použito hélia a veškerá měření probíhala ve vakuu.

Protože vyhodnocení dilatometrických křivek ve formě grafů je velké množství, nebudou zde uvedeny grafy každého měření ale pouze vybrané, na kterých lze ilustrovat danou problematiku.

### 3.4.1. Ocel S690QL

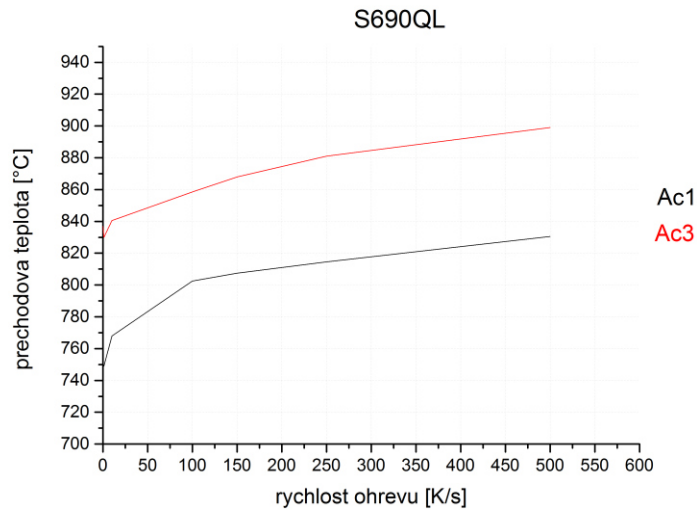
Vzhledem k tomu, že tento typ oceli byl měřen jako první, bylo nutné stanovit také kritickou rychlost ohřevu, proto proběhlo o několik měření více než u ostatních druhů ocelí. Tato měření se týkala vyšších rychlostí ohřevu než  $100 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ . Dalším krokem byla ohřevová rychlost  $500 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ . V tabulce 9 jsou uvedeny všechny použité rychlosti ohřevu, včetně vyhodnocení teplot  $A_{c1}$  a  $A_{c3}$ .

*Tab. 9 Přechodové teploty při jednotlivých měřeních oceli S690QL*

Č. měř.	rychlost ohřevu [ $\text{K}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	Teplota $A_{c1}$ [°C]			Teplota $A_{c3}$ [°C]		
		Met. 3 tečen	Met. stan. rychl. délk. přem.	Průměr	Met. 3 tečen	Met. stan. rychl. délk. přem.	Průměr
1	0,1	750	748	749	839	835	837
2	1	754	744	749	830	830	830
3	10	770	767	768,5	841	840	840,5
4	100	802	800	802,5	857	860	858,5
5	150	811	804	807,5	868	868	868
6	250	819	810	814,5	879	883	881
7	500	832	829	830,5	900	898	899

Jak je vidět z tabulky, velikost transformačních teplot roste v závislosti na rychlosti ohřevu. Důvodem je fakt, že materiál prakticky nemá dostatečný čas na to, aby stačila proběhnout austenitizace. Z toho důvodu se zvyšováním rychlosti ohřevu zvyšuje také hodnota transformačních teplot. Pro lepší přehlednost byl vypracován graf závislosti rychlosti ohřevu na hodnotě transformačních (přechodových) teplot (obr. 29).





**Obr. 29** Závislost přechodových teplot  $A_{C1}$  a  $A_{C3}$  na rychlosti ohřevu pro ocel S690QL

Jak je patné z toho obrázku při vyšších rychlostech ohřevu rostou transformační teploty téměř lineární závislostí. Je nutno dodat, že by bylo potřeba více měření, aby bylo dosaženo přesnějších průběhů křivek. Pro lepší názornost bude u každého druhu oceli připojen obrázek porovnání dilatometrických křivek při rychlosti ohřevu  $0,1$  a  $100 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ , kde už je jasně znatelný posun obou těchto křivek vůči sobě. Pro ocel S690QL se jedná o obrázek 29.

Dále bylo nutné stanovit tzv. kritickou rychlost ohřevu, aby u dalšího druhu materiálů již nedocházelo k ohřevu nadkritickou rychlostí, tedy rychlostí s nespojitou ohřevovou dilatometrickou křivkou.



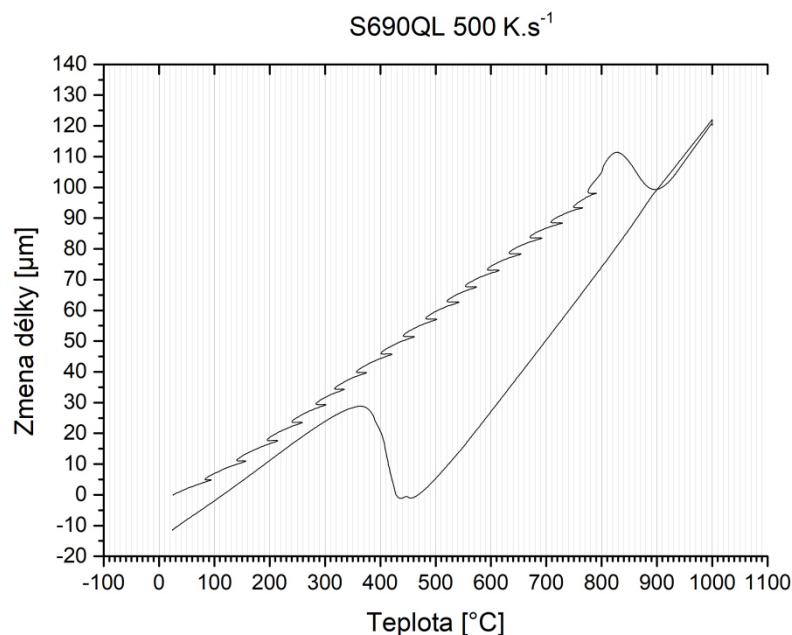
**Obr. 30** Rozdíly mezi dilatometrickou křivkou při rychlosti  $0,1$  a  $100 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$

### Kritická rychlost ohřevu

Jak již bylo uvedeno výše, kritická rychlost ohřevu je v tomto případě taková rychlost, se kterou je kalící dilatometr DIL 805L ještě schopen regulovat a zaznamenávat s dostatečnou přesností jednotlivé výsledky a změny v materiálu. Je tedy zřejmé, že pokud bude k měření používán jiný přístroj, potom i tyto rychlosti budou rozdílné.

Detekce kritické rychlosti je poměrně snadná, protože pokud již dilatometr nestačí dostatečně regulovat ohřevovou fázi, tak se nepřesnosti zřetelně projeví na dilatometrické křivce. Jako testovací byla opět použita ocel S690QL, na které byly tyto změny sledovány a následně byla stanovena kritická rychlost. Touto kritickou rychlostí byly následně ohřívány i všechny další druhy ocelí. Další měření proběhla proto, aby se zjistilo, zda je tato rychlost rychlostí kritickou i pro ostatní druhy ocelí.

Na obrázku (obr. 31.) je vidět dilatometrická křivka ohřevu oceli S690QL vysokou rychlostí a to  $500 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ . Zřetelně jsou vidět "zuby" na křivce, takže lze s jistotou prohlásit, že toto je již ohřev nadkritickou rychlostí.

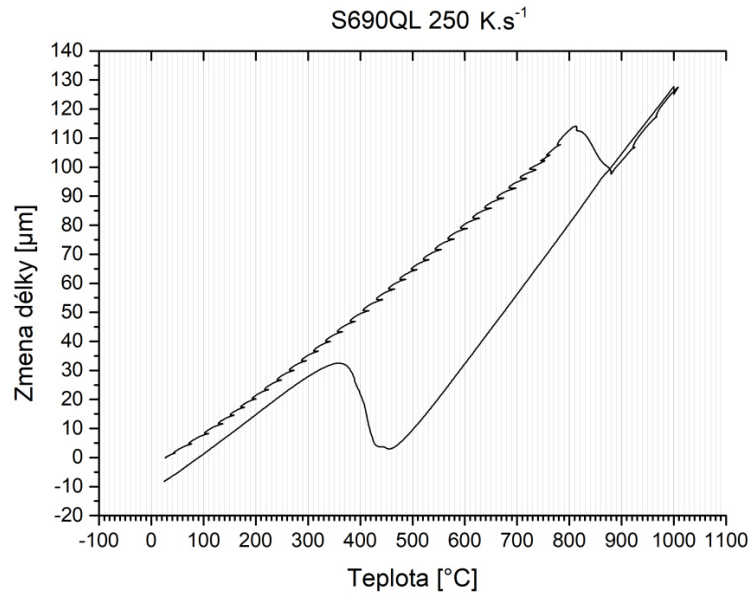


**Obr. 31** Nadkritický ohřev oceli S690QL rychlostí 500 K/s

V dalším měření byla rychlost ohřevu snížena metodou půlení intervalu, tedy na rychlost  $250 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$  (obr. 32.).

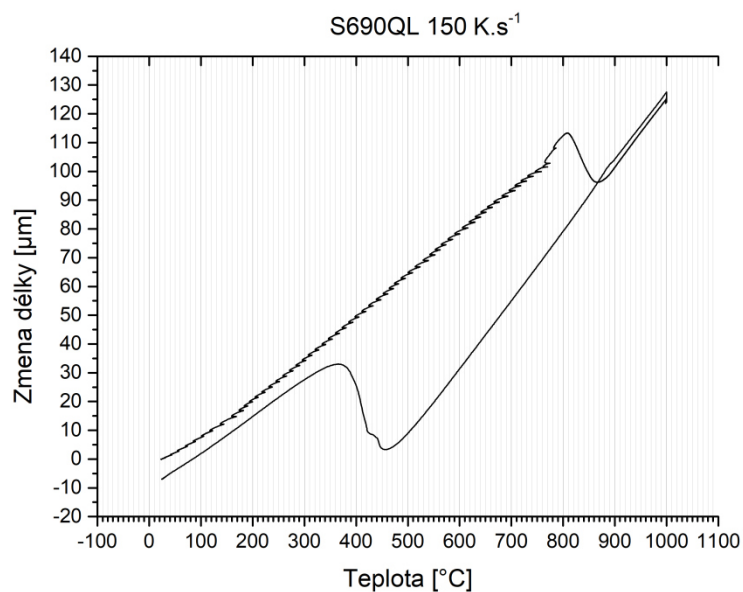
Lze si všimnout hned dvou věcí a to, že "zuby" na křivce se zmenšily, a také toho se zvětšil jejich počet. Tento jev je způsoben tím, že dilatometr již dokáže plynuleji regulovat

rychlost ohřevu, nicméně stále je to nedostatečné. Je proto zřejmé, že rychlost je stále nadkritická, protože ani takovýto průběh není ještě přípustný.



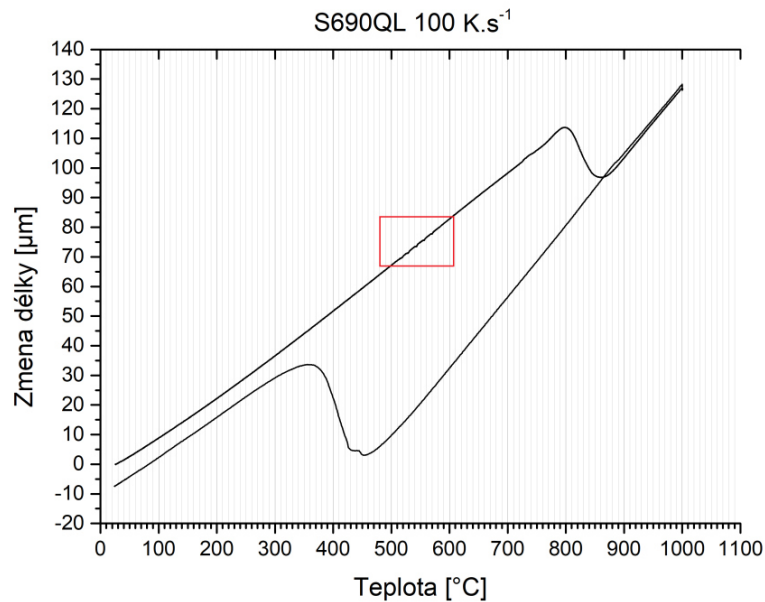
**Obr. 32** Nadkritický ohřev oceli S690QL rychlostí 250 K.s<sup>-1</sup>

Proběhlo ještě několik dalších měření pro představu např. při rychlosti 150 K.s<sup>-1</sup> (obr. 33.) je zřetelné opět zmenšení "zubů" a zvětšení jejich počtu. Křivka se nadále vyhlazuje a získává v tomto úseky již téměř lineární průběh.

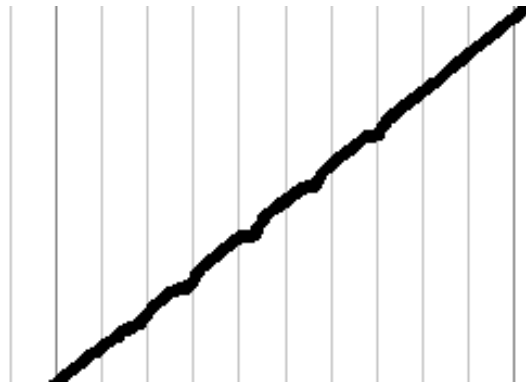


**Obr. 33** Nadkritický ohřev oceli S690QL rychlostí 150 K.s<sup>-1</sup>

Jako kritická rychlost pro ocel S690QL na quenching dilatometru DIL 805L byla po sérii měření stanovena rychlost  $100 \text{ K.s}^{-1}$  (obr. 34.), zde se již dá pozorovat vznik prvních nepřesností na křivce. Tyto nepřesnosti jsou však tak nízké, že zatím nemají vliv na správnost konečných dat získaných z dilatometru. Pro lepší přehlednost byl v místě prvních nepřesností udělán detail (obr. 35.).



**Obr. 34** Kritický ohřev oceli S690QL rychlostí  $100 \text{ K.s}^{-1}$



**Obr. 35** Detail dilatometrické křivky na které vznikají první nepřesnosti při měření části

Kvůli tomu, aby se předešlo zbytečným měřením nadkritickou rychlostí u dalších druhů ocelí, byla rychlost ohřevu  $100 \text{ K.s}^{-1}$  stanovena jako kritická a zároveň maximální jaká byla použita pro další druhy ocelí.

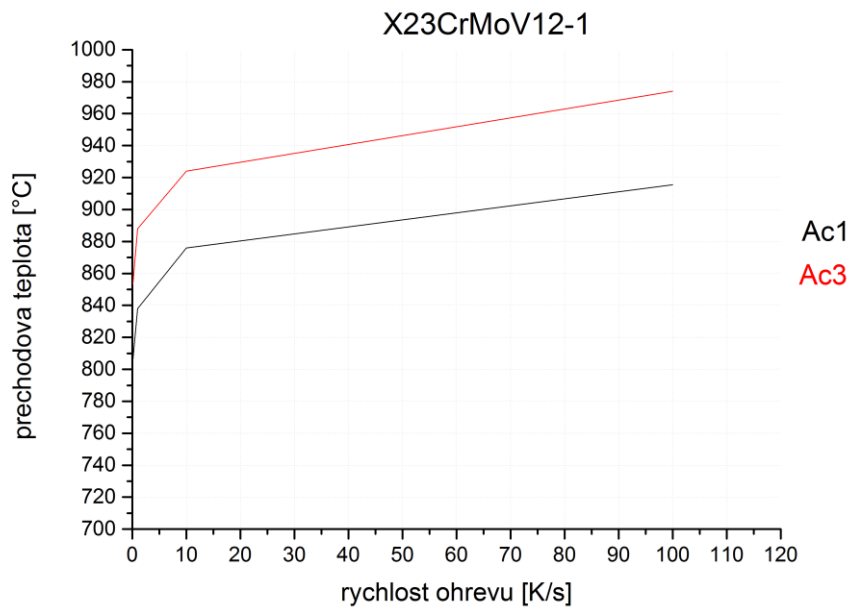
### 3.4.2. Ocel X23CrMoV12-1

Jak je vidět, legující prvky v oceli mají podstatný vliv na velikost transformačních teplot, které jsou o poznání vyšší než u oceli S690QL. Z toho důvodu musela být maximální teplota, na kterou je materiál ohříván zvýšena na 1100 °C. V tabulce 10 jsou uvedeny získané transformační teploty  $A_{c1}$  a  $A_{c3}$  pro rozdílné rychlosti ohřevu.

*Tab. 10 Přechodové teploty při jednotlivých měřeních oceli X23CrMoV12-1*

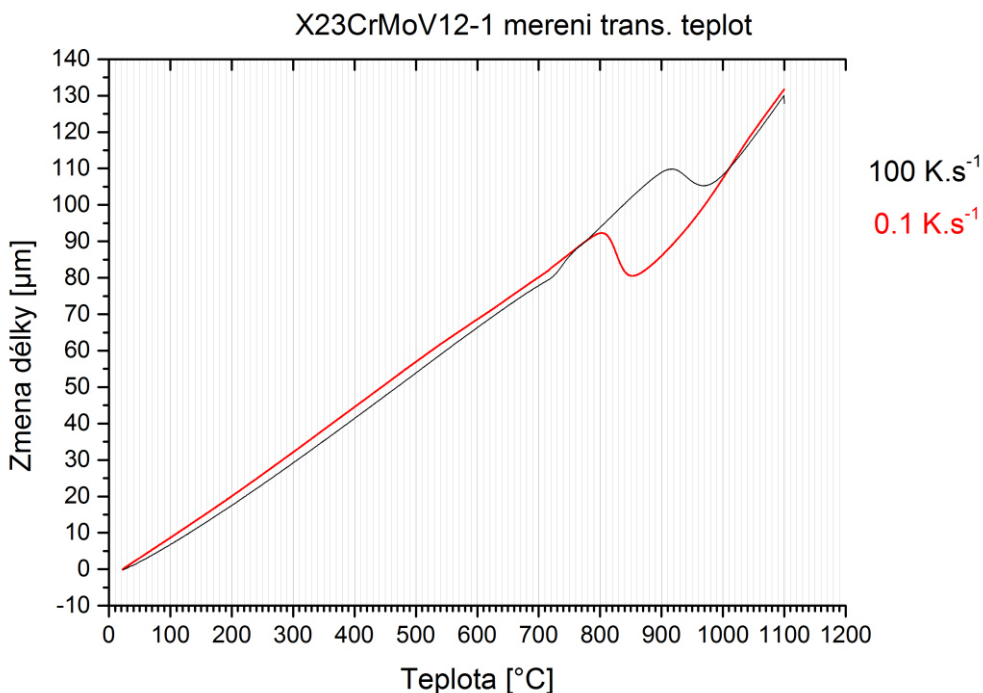
Č. měř.	rychlost ohřevu [K.s <sup>-1</sup> ]	Teplota $A_{c1}$ [°C]			Teplota $A_{c3}$ [°C]		
		Met. 3 tečen	Met. stan. rychl. délk. přem.	Průměr	Met. 3 tečen	Met. stan. rychl. délk. přem.	Průměr
1	0,1	809	804	806,5	854	853	853,5
2	1	840	836	838	887	889	888
3	10	878	874	876	925	923	924
4	100	913	918	915,5	978	970	974

Výsledky v této tabulce opět dokládají to, že se zvyšující se rychlostí ohřevu roste i velikost transformačních teplot  $A_{c1}$  a  $A_{c3}$ . V grafu na obrázku 36 je ukázán průběh transformační teplot v závislosti na rychlosti ohřevu.



**Obr. 36** Závislost přechodových teplot  $A_{c1}$  a  $A_{c3}$  na rychlosti ohřevu

Porovnání dilatometrických křivek (obr. 37.) při rychlosti ohřevu  $0,1$  a  $100 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ , kdy je opět vidět výrazný posun transformační křivky při 100x vyšší rychlosti ohřevu.



Obr. 37 Rozdíly mezi dilatometrickou křivkou při rychlosti  $0,1$  a  $100 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$

### 3.4.3. Ocel S460MC

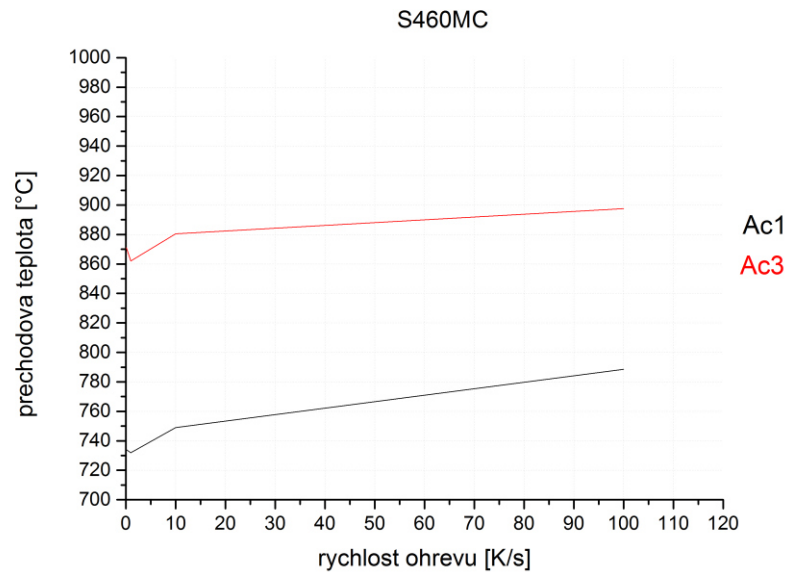
Z výsledků je patrné, že hodnoty transformačních teplot se podobají hodnotám v oceli S690QL, což je logické, protože v chemickém složení těchto dvou ocelí není zase tak velký rozdíl.

Tab. 11 Přechodové teploty při jednotlivých měřeních oceli S460MC

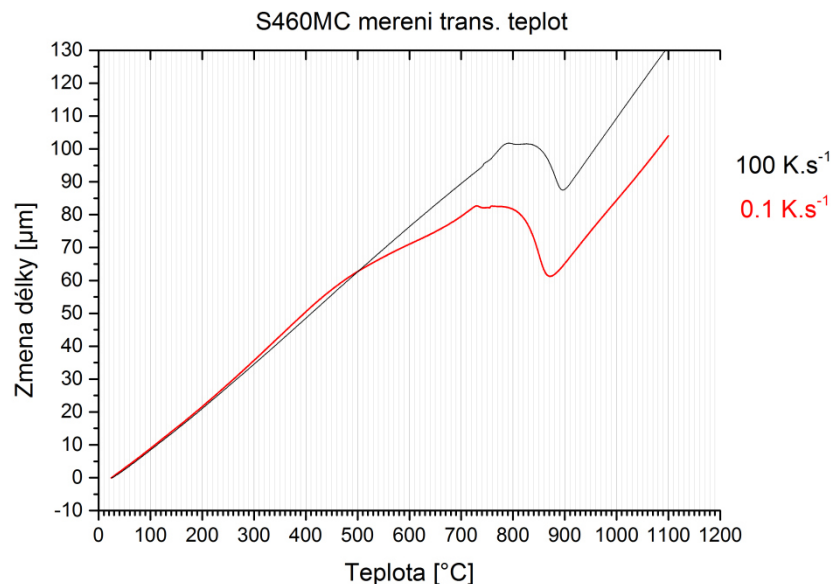
Č. měř.	rychlost ohřevu [ $\text{K}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	Teplota $A_{C1}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]			Teplota $A_{C3}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]		
		Met. 3 tečen	Met. stan. rychl. délk. přem.	Průměr	Met. 3 tečen	Met. stan. rychl. délk. přem.	Průměr
1	0,1	736	732	734	870	872	871
2	1	732	732	732	861	863	862
3	10	750	748	749	879	882	880,5
4	100	784	793	788,5	896	899	897,5

Z tabulky 11 je patrné, že transformační teploty rostou v závislosti na rychlosti ohřevu, tento jev je logický a je popsán v kapitole 3.4.1.

V grafu na obrázku 38 je ukázán průběh transformační teplot v závislosti na rychlosti ohřevu. Lze si povšimnout, že transformační teploty při rychlosti ohřevu  $1 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$  klesly. Vzhledem k tomu, že byly měřeny i další podobné typy ocelí, u nichž ale tento skok nenastal, lze říci, že se jedná o chybu měření.



**Obr. 38** Závislost přechodových teplot  $A_{C1}$  a  $A_{C3}$  na rychlosti ohřevu



**Obr. 39** Rozdíly mezi dilatometrickou křivkou při rychlosti  $0,1$  a  $100 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$

Obrázek 39 opět ilustruje posun dilatometrické křivky při vyšší hodnotě ohřevu směrem k vyšším teplotám.

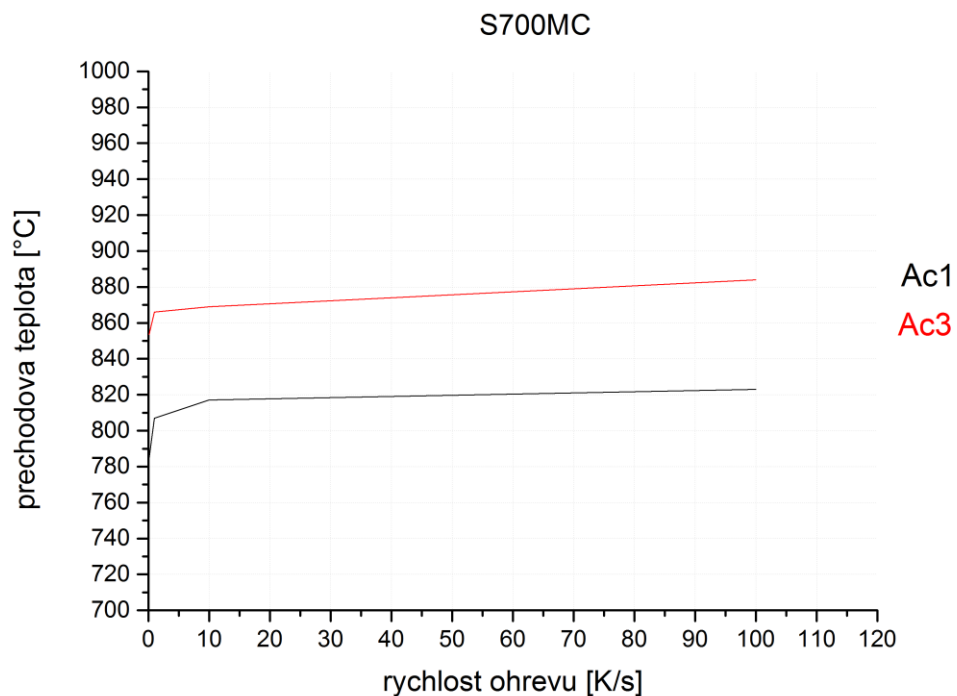
### 3.4.4. Ocel S700MC

Z výsledků je patrné, že hodnoty transformačních teplot se podobají hodnotám v oceli S690QL a S460MC. Opět je to dáno jejich podobnými vlastnostmi a chemickým složením.

Tab. 12 Přechodové teploty při jednotlivých měřeních oceli S700MC

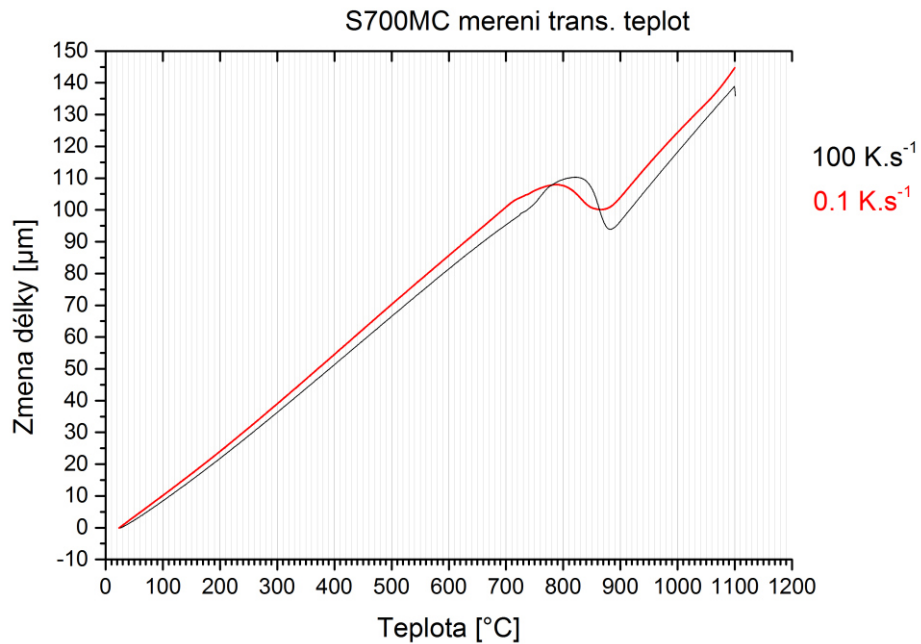
Č. měř.	rychlost ohřevu [K.s <sup>-1</sup> ]	Teplota A <sub>C1</sub> [°C]			Teplota A <sub>C3</sub> [°C]		
		Met. 3 tečen	Met. stan. rychl. délk. přem.	Průměr	Met. 3 tečen	Met. stan. rychl. délk. přem.	Průměr
1	0,1	779	790	784,5	866	868	853,5
2	1	812	802	807	863	869	866
3	10	822	812	817	868	870	869
4	100	833	823	823	879	884	884

V tabulce 12 je názorně vidět plynulý nárůst přechodových teplot, který pro lepší názornost dokládá graf závislosti velikosti přechodových teplot na rychlosti ohřevu (obr. 40.).



Obr. 40 Závislost přechodových teplot A<sub>C1</sub> a A<sub>C3</sub> na rychlosti ohřevu





**Obr. 41** Rozdíly mezi dilatometrickou křivkou při rychlosti 0,1 a 100 K.s<sup>-1</sup>

Obrázek 41 ilustruje posun dilatometrické křivky při vyšší hodnotě ohřevu směrem k vyšším teplotám. Lze si však všimnout, že u této vysokopevnostní, jemnozrnné oceli tento posun není tak výrazný, jako u oceli S460MC. Také průběh dilatometrických křivek při rychlosti 0,1 a 100 K.s<sup>-1</sup> se od sebe mírně liší.

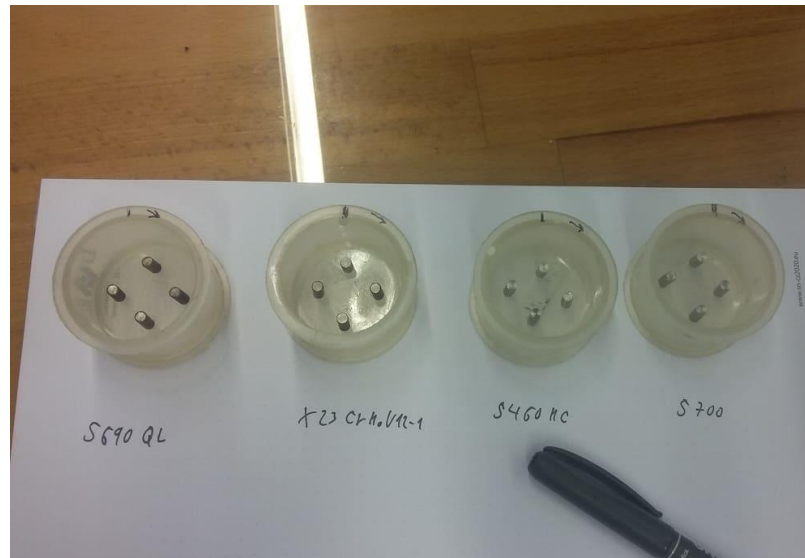
### 3.5. Měření tvrdosti podle Vickerse

Dalším měřením, které bylo provedeno na vzorcích, jež prošli dilatometrickým cyklem, bylo měření tvrdosti. Toto měření bylo prováděno z důvodu zjištění, zda mají rozdílná rychlost ohřevu a posun transformačních teplot vliv na změnu mechanických vlastností testovaného materiálu. Vycházelo se z předpokladu, že v materiálu by nemělo dojít k výrazné změně tvrdosti, protože všechny vzorky daného materiálu byly ohřívány na stejnou teplotu a ochlazovány stejnou rychlostí. Rychlost ohřevu na maximální teplotu se sice lišila, to by však nemělo mít vliv na konečnou tvrdost, protože všechny vzorky byly plně austenitizovány. Správnost této domněnky dokládá přiložená tabulka 13. Měření bylo provedeno metodou dle Vickerse se zatížením HV10.

Tab. 13 Měření tvrdosti vzorků po proběhnutí dilatometrického cyklu

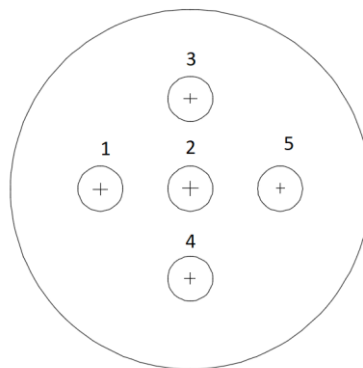
Číslo měření / rychlost ohřevu	1	2	3	4	5	Průměrná hodnota
<b>S690QL</b>	<b>Tvrdot podle metody Vickers HV 10</b>					
<b>0,1 K.s<sup>-1</sup></b>	400	392	399	405	398	<b>398,8</b>
<b>1 K.s<sup>-1</sup></b>	387	400	407	402	404	<b>400</b>
<b>10 K.s<sup>-1</sup></b>	405	402	402	406	404	<b>403,8</b>
<b>100 K.s<sup>-1</sup></b>	409	403	394	400	400	<b>401,2</b>
<b>X23CrMoV12-1</b>						
<b>0,1 K.s<sup>-1</sup></b>	626	619	611	626	626	<b>621,6</b>
<b>1 K.s<sup>-1</sup></b>	629	637	636	627	625	<b>630,8</b>
<b>10 K.s<sup>-1</sup></b>	637	640	647	644	637	<b>641</b>
<b>100 K.s<sup>-1</sup></b>	546	561	565	549	540	<b>552,2</b>
<b>S460MC</b>						
<b>0,1 K.s<sup>-1</sup></b>	135	137	135	138	134	<b>135,8</b>
<b>1 K.s<sup>-1</sup></b>	131	136	134	139	136	<b>135,2</b>
<b>10 K.s<sup>-1</sup></b>	137	138	132	134	134	<b>135</b>
<b>100 K.s<sup>-1</sup></b>	131	133	133	135	134	<b>133,2</b>
<b>S700MC</b>						
<b>0,1 K.s<sup>-1</sup></b>	220	219	220	224	214	<b>219,4</b>
<b>1 K.s<sup>-1</sup></b>	233	226	227	230	226	<b>228,4</b>
<b>10 K.s<sup>-1</sup></b>	228	231	227	232	231	<b>229,8</b>
<b>100 K/s</b>	235	230	227	234	225	<b>230,2</b>

Z tabulky 13 je zřejmé, že zkoušky tvrdosti byly provedeny celkem na 16 vzorcích čtyř druhů ocelí. Prvotní zkušební měření tvrdosti nedopadlo podle představ, protože čela vzorků vykazovala po soustružení vyšší drsnost povrchu, což se projevilo na nesymetričnosti vpichu a nebylo možné správně odečíst délku úhlopříček vnikacího tělesa (jehlanu). Tento problém byl vyřešen tak, že všechny vzorky příslušné oceli byly narovnány do formičky (obr. 42.) a zality hmotou Dentacryl. Po vytvrdnutí hmoty pak byly na metalografické brusce vybroušeny na požadovanou drsnost povrchu. Poté již mohlo proběhnout měření tvrdosti v požadované jakosti.



**Obr. 42** Narovnané vzorky materiálu do formy, připravené k lítí Dentacrylem

V každém vzorku bylo provedeno celkem 5 vpichů. Na obr. 43 jsou schematicky naznačena místa jednotlivých vpichů na příčném řezu vzorku. Z těchto vpichů byla výsledná tvrdost vzorku určena aritmetickým průměrem těchto pěti hodnot.



**Obr. 43** Rozmístění vpichů na příčném řezu vzorku

Výsledky u ocelí S460MC, S690QL a S700MC potvrzují původní domněnku, že při tomto typu měření nedochází ke změně tvrdosti, i přestože se objevila jedna výjimka u oceli S700MC při rychlosti 0,1 K.s<sup>-1</sup>, kdy byla naměřena tvrdost nižší o 10 HV oproti ostatním rychlostem ohřevu. Protože se jedná o jemnozrnnou ocel, pravděpodobně zde došlo k částečnému zhrubnutí zrna, což se mohlo projevit na dílčí změně tvrdosti.

Kde se vliv rychlosti ohřevu na změnu mechanických vlastností projevil, to bylo u martenzitické oceli X23CrMoV12-1. Při rychlosti ohřevu 100 K.s<sup>-1</sup> došlo k výrazné změně tvrdosti oproti ostatním měřením na vzorcích téhož materiálu. Chyba měření byla

vyloučena opětovným vybroušením vzorku a novým měřením tvrdosti se stejným výsledkem.

### 3.6. Měření svařovacích cyklů

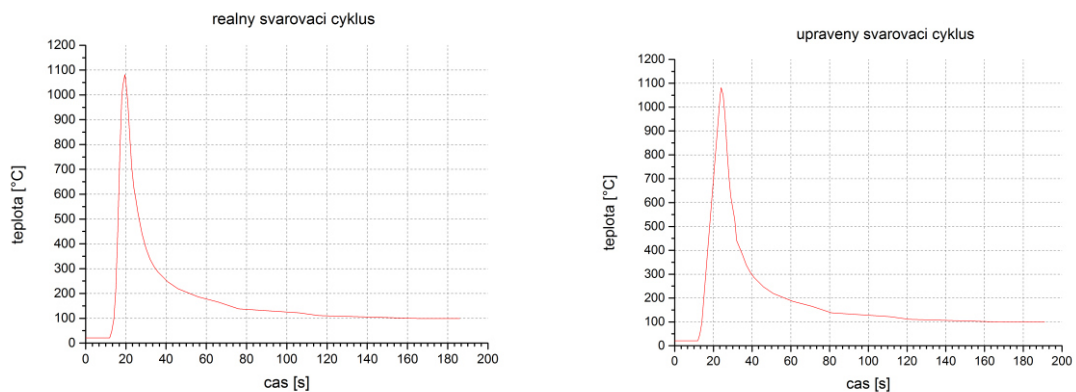
Vzhledem k tomu, že častokrát se lze v praxi setkat s ohřevem popř. ochlazováním, které není plynulé stále stejnou rychlostí, ale v jednotlivých úsecích se rychlost zvětšuje, popřípadě zmenšuje, byla experimentálně ověřena i možnost využití dilatometru DIL 805L při aplikaci reálných cyklů. Tyto cykly se využívají například při měření tzv. „In-Situ“ svářečských ARA diagramů. Jako vzor pro měření byl zvolen reálný svařovací cyklus, jehož hodnoty jsou na obrázku 44 vlevo. Jak je zřejmé z tabulky 14, v níž byl teplotní cyklus rozdělen na jednotlivé úseky, aby mohl být naprogramován do dilatometru, v některých úsecích vyšla kritická rychlost ohřevu vyšší než  $100 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ . Z těchto důvodů byl vytvořen nový upravený svařovací cyklus, který vycházel z původního, ovšem v ohřevové fázi nepřekročil výrazně rychlost  $100 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Tab. 14 Parametry reálného svařovacího cyklu

Reálný svařovací cyklus			
Číslo úseku	Čas [s]	Teplota na konci cyklu [°C]	Rychlost ohřevu / ochlazování [ $\text{K}\cdot\text{s}^{-1}$ ]
1	0	21,3	0
2	12	21,3	26,7
3	13	48	48
4	14	96	112
5	15	208	249
6	16	457	312
7	17	769	223
8	18	992	90
9	18,5	1037	45
10	19,5	<b>1082</b>	-66
11	20	1049	-82
12	21	967	-144
13	22	823	-117
14	23	706	-81
15	24	625	-49
16	25	576	-49
17	26	527	-43
18	28	441	-29,5
19	30	382	-21,5
20	32	339	-15,5
21	34	308	-11
22	36	286	-8
23	41	246	-5,4
24	46	219	-3,3

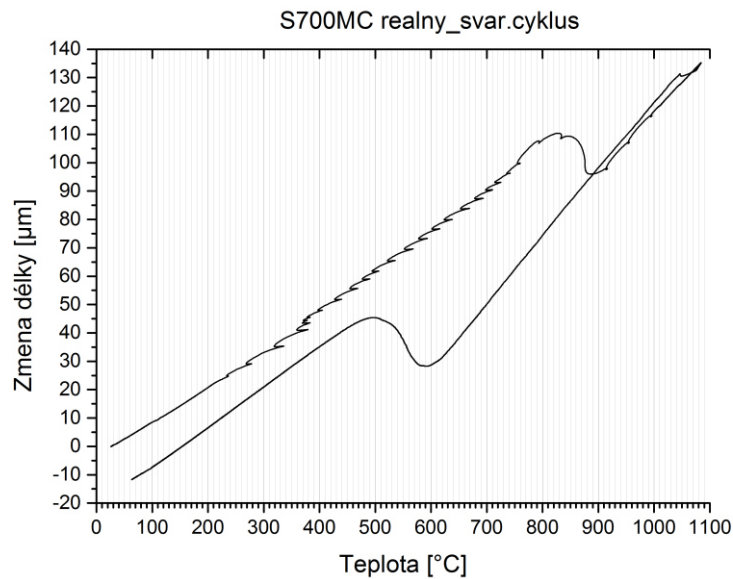
25	56	186	-2,1
26	66	165	-2,7
27	76	138	-0,53
28	106	122	-1,1
29	116	111	-0,23
30	146	104	-0,25
31	166	99	0
32	186	99	

Na obrázku 44 je graficky znázorněn reálný teplotní cyklus (vlevo) a upravený teplotní cyklus (vpravo).



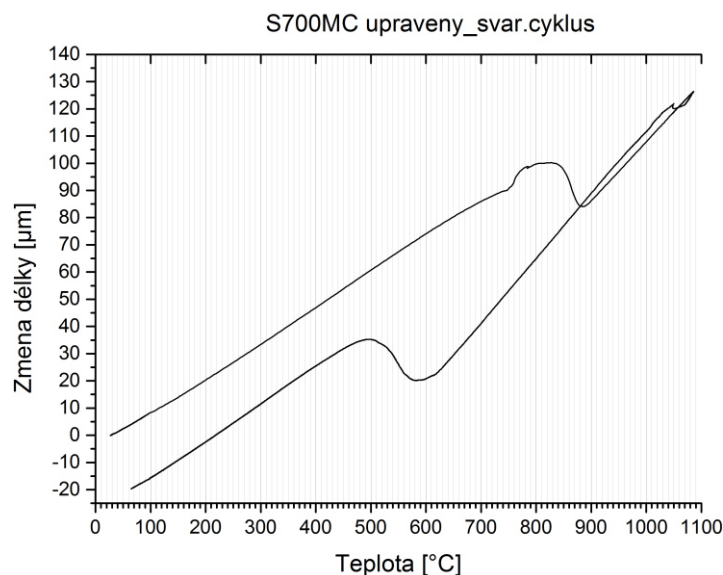
**Obr. 44** Grafy závislosti teploty na čase při svařovacích cyklech: reálný cyklus (vlevo) a upravený cyklus (vpravo)

U všech druhů ocelí ( S690QL, X23CrMoV12-1, S460MC a S700MC) byly experimentálně provedeny testy s oběma teplotními cykly a opět byly stanoveny jak transformační teploty  $A_{c1}$  a  $A_{c3}$ , tak také teploty transformačních přeměn při ochlazování. Pokud by byly při porovnání obou cyklů tyto teploty stejné, pak lze říci, že tento reálný svařovací cyklus lze plně nahradit tím upraveným s omezenou maximální rychlostí ohřevu. Pro ilustraci byly v této kapitole použity grafy naměřené na oceli S700MC. Na reálném cyklu lze zřetelně vidět, že dilatometr nestačí dostatečně rychle regulovat výkon indukční cívky a dilatometrická křivka nemá svůj skutečný tvar, jsou na ní "zuby" (obr. 45.), což je logické, protože se jedná o ohřev nadkritickou rychlostí.



**Obr. 45** Dilatometrická křivka reálného svařovacího cyklu - ocel S700MC

Naproti tomu u upraveného svařovacího cyklu (obr. 46.) se tyto problémy již nevyskytují a křivka má svůj reálný tvar, přestože její průběh v oblasti teploty  $A_{c1}$  není dle očekávání zcela hladký. Přesto úprava svařovacího cyklu přinesla požadovaný výsledek.



**Obr. 46** Dilatometrická křivka upraveného svařovacího cyklu - ocel S700MC

K vyhodnocení přechodových teplot bylo opět použito metody tří tečen a metody stanovení rychlosti délkové přeměny. Zjištěné výsledky jsou uvedeny v tabulkách 16 a 17.

**Tab. 16** Přechodové teploty při reálném svařovacím cyklu

Reálný svařovací cyklus				
Druh oceli	Tep. $A_{C1}$ [°C] při ohřevu	Tep. $A_{C3}$ [°C] při ohřevu	Tep. $A_{C1}$ [°C] při ochlazování	Tep. $A_{C3}$ [°C] při ochlazování
<b>S690QL</b>	818	872	324	401
<b>X23CrMoV12-1</b>	958	1010	131	288
<b>S460MC</b>	794	910	574	674
<b>S700MC</b>	828	889	494	592

**Tab. 17** Přechodové teploty při upraveném svařovacím cyklu

Upravený svařovací cyklus				
Druh oceli	Tep. $A_{C1}$ [°C] při ohřevu	Tep. $A_{C3}$ [°C] při ohřevu	Tep. $A_{C1}$ [°C] při ochlazování	Tep. $A_{C3}$ [°C] při ochlazování
<b>S690QL</b>	783	848	282	353
<b>X23CrMoV12-1</b>	912	963	130	282
<b>S460MC</b>	799	904	572	670
<b>S700MC</b>	809	887	496	593

Z výsledků je zřejmé, že upravený svařovací cyklus nahrazuje ten reálný v ohřevové fázi nedostatečně, protože rozdíly mezi přechodovými teplotami  $A_{C1}$  a  $A_{C3}$  jsou při reálném a upraveném svařovacím cyklu v desítkách °C. Výrazně se zde projevuje druh použitého materiálu. Upravený svařovací cyklus by se nechal použít pro ocel S460MC, kde jsou rozdíly pouze v jednotkách °C, a také pro ochlazovací části ocelí X23CrMoV12-1, S460MC a S700MC, kde je tomu také tak. Z těchto výsledků je patrné, že pokud by bylo potřeba reálný svařovací cyklus skutečně nasimulovat, tak by muselo být použito jiného přístroje, než je DIL 805L a to například přístroj Gleeble 3500, kterým také disponuje Katedra strojírenské technologie.

### 3.7. Diskuze výsledků

Z výsledků experimentální části této bakalářské práce lze vyvodit hned několik závěrů. V první řadě to, že nelze při dilatometrickém cyklu používat opakovaně jeden vzorek materiálu, protože by to mělo vliv na velikosti přechodových teplot  $A_{C1}$  a  $A_{C3}$ . Ty se s každým následným opakováním lehce zvyšovaly. Přestože byly uvedené odchylky relativně malé (činily méně než 1%), dochází k významnějším odchylkám v celkovém

průběhu dilatometrické křivky. Opakované měření by pravděpodobně dodalo hodnotu s ještě akceptovatelnou přesností, nicméně tento postup nedoporučuji.

Také změna rychlosti ohřevu v průběhu ohřívání vzorku není zcela vhodná. Uvedená změna způsobí na dilatometrické křivce „zub“, a přestože je další průběh křivky možné využít k přiložení tečny, ani tento postup bych nedoporučil. Je lépe zvolit ohřev konstantní rychlostí i za cenu prodloužení celkové délky cyklu.

Při měření vlastních přechodových teplot bylo zjištěno, že druh oceli má významný vliv na jejich velikost, kdy rozdíly mezi jednotlivými druhy ocelí byly v řádech desítek °C. Oceli použité v této práci byly vybrány tak, aby bylo pokryto širší spektrum ocelí a výsledky měly určitou vypovídací hodnotu.

Přechodové teploty byly zjišťovány dvěma na sobě nezávislými metodami, aby se předešlo riziku vzniku chyb při vyhodnocení. Jednalo se o Metodu 3 tečen a Metodu stanovení rychlosti délkové přeměny. Rozdíly v hodnotách přechodových teplot  $A_{c1}$  a  $A_{c3}$ , získaných těmito metodami, byly velmi malé, a proto je možné tvrdit, že při použití jakékoliv z těchto metod bude dosaženo výsledku s dostatečnou přesností. Podle očekávání bylo také zjištěno, že s rostoucí rychlostí ohřevu roste velikost transformačních teplot. Je tomu tak proto, že materiál potřebuje na přeměnu své krystalové mřížky určitý čas a pokud je rychlost ohřevu vysoká, pak nevyhnutelně dojde ke zvýšení hodnoty transformačních teplot. Neočekávaná je možná skutečnost, že při rychlostech ohřevu  $0,1 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$  a  $100 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$  byl rozdíl mezi transformačními teplotami v desítkách °C a u oceli X23CrMoV12-1 dokonce ve stovkách °C. Konkrétně se jednalo u oceli S460MC o  $61 \text{ °C}$  u  $A_{c1}$  a o  $27 \text{ °C}$  u  $A_{c3}$ ; u oceli S690QL o  $54 \text{ °C}$  u  $A_{c1}$  a o  $23 \text{ °C}$  u  $A_{c3}$ ; u oceli S700MC o  $38 \text{ °C}$  u  $A_{c1}$  a o  $30 \text{ °C}$  u  $A_{c3}$  a u oceli X23CrMoV12-1 o  $109 \text{ °C}$  u  $A_{c1}$  a o  $130 \text{ °C}$  u  $A_{c3}$ .

Dále byla stanovena rychlost ohřevu  $100 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$  jako maximální rychlost, při které ještě má smysl s materiálem provádět experimenty na kalícím dilatometru DIL 805L. Při vyšších rychlostech již získaná data ztrácejí přesnost, nejsou dobře použitelná, dilatometr nedostatečně rychle řídí výkon indukční cívky.

Z mechanických vlastností byla zkoumána tvrdost metodou dle Vickerse HV10, aby bylo zjištěno, zda má tento druh tepelného cyklu vliv i na tyto vlastnosti. Vzhledem k tomu, že rychlost ochlazování byla ve všech experimentech stejná  $10 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$  a měnila se pouze rychlost ohřevu, tak tvrdost zůstala podle předpokladu stále stejná, pouze docházelo k odchýlkám okolo 3% způsobených měřeními a tím, že materiál není dokonale homogenní.

Poslední typ experimentu se týkal posouzení aplikovatelnosti reálného svařovacího cyklu. Vzhledem k tomu, že ohřev probíhal nadkritickou rychlostí, musel být tento reálný



svařovací cyklus upraven. Z naměřených dat poté lze konstatovat, že reálný svařovací cyklus nelze s dostatečnou přesností aplikovat pro měření na kalícím dilatometru DIL 805L. U upraveného svařovacího cyklu jsou již data o poznání přesnější, ale bohužel rozdíly v transformačních teplotách mezi těmito svařovacími cykly jsou tak velké, že upravený svařovací cyklus nemůže při měření nahradit ten reálný.

## 4. Závěr

Tato bakalářská práce měla několik cílů, které již byly popsány v diskuzi výsledků. V teoretické části se práce zabývá popisem těch fyzikálních veličin, které jsou podstatné pro popis a pochopení fungování tepelných změn v materiálech a pro vyhodnocení termických analýz materiálu. Následně jsou popsány základní termické analýzy, jejich princip a možnosti aplikace. Dále teoretická část čtenáře seznamuje s principem dilatometrie, do níž patří i druhy používaných snímačů teploty, polohy, metody ohřevu materiálu a samozřejmě vyhodnocovací metody, které byly v této práci použity.

V experimentální části byl použit nově pořízený kalící dilatometr DIL 805L, na němž byly provedeny experimenty týkající se:

- Opakovatelnosti měření na jednom vzorku.
- Stanovení maximální rychlosti ohřevu pro dilatometrické měření na přístroji DIL 805L.
- Posouzení vlivu rychlosti ohřevu na změnu hodnoty transformačních teplot  $A_{C1}$  a  $A_{C3}$  pro oceli S690QL, X23CrMoV12-1, S460MC a S700MC.
- Posouzení možnosti tvorby „In-situ“ ARA diagramů pomocí reálných svařovacích cyklů pro oceli S690QL, X23CrMoV12-1, S460MC a S700MC.

Na základě provedených experimentů a získaných výsledků a jejich diskuze lze dát následující doporučení:

- Opakovat dilatometrická měření na stejném vzorku se nedoporučuje.
- Maximální použitelná rychlost ohřevu na kalícím dilatometru DIL 805L je pro testované materiály  $100 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ .
- Vliv rychlosti ohřevu má významný vliv na posun transformačních teplot  $A_{C1}$  a  $A_{C3}$ . Je však silně závislý na druhu použité oceli.
- Přístroj DIL 805L není vhodné použít pro dilatometrická měření s reálnými teplotními cykly, které mají ve fázi ohřevu rychlost vyšší než  $100 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ .

## Použitá literatura

- [1] *Teplotní pole v programu ANSYS* [online]. Brno [cit. 2019-06-23]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=8874](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=8874). Příručka. VUT Brno.
- [2] Využití termografie v průmyslu: Informační příručka o aplikacích termografie v průmyslu. *Blue-panther* [online]. FLIR Systems AB, 2012 [cit. 2019-06-24]. Dostupné z: <https://www.blue-panther.cz/data/files/vyuziti-termovize-v-prumyslu-899.pdf>
- [3] Průvodce termografií. *Termokamery-testo* [online]. Praha 5: Testo, s.r.o, 2015 [cit. 2019-06-23]. Dostupné z: <https://www.termokamery-testo.cz/prirucka-termografie/>
- [4] Fyzikální veličina. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-06-23]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Fyzik%C3%A1ln%C3%AD\\_veli%C4%8Dina](https://cs.wikipedia.org/wiki/Fyzik%C3%A1ln%C3%AD_veli%C4%8Dina)
- [5] KLOUŽKOVÁ, A., P. ZEMENOVÁ, J. KLOUŽEK a W. PABST. *Termická analýza* [online]. VŠCHT Praha, 2012 [cit. 2019-06-05]. Dostupné z: <tresen.vscht.cz/sil/sites/default/files/Termická%20analýza.pdf>. Studijní materiály. VŠCHT.
- [6] Termická analýza - teorie. *Ústav kovových materiálů a korozního inženýrství* [online]. 166 28 Praha 6 – Dejvice: VŠCHT Praha [cit. 2019-06-24]. Dostupné z: <http://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Termick%C3%A1%20anal%C3%BDza.pdf?redirected>
- [7] KUČEŘÍK, Jiří. *Termická analýza – termogravimetrie (TGA)*. CHEMPOINT [online]. Vysoké učení technické Brno, 2011 [cit. 2019-06-05]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/kucerik-1>
- [8] VALENTOVÁ, Bc. Kateřina. *Studium tepelných vlastností materiálů akumulujících teplo na bázi fázové přeměny* [online]. Brno, 2016 [cit. 2019-06-05]. Dostupné z: [https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/58431/DP\\_Valentova.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/58431/DP_Valentova.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [9] ŠEBESTA, Petr. *Stanovení podílu vlhkosti v elektroizolačních materiálech* [online]. Brno, 2014 [cit. 2019-06-05]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=88412](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=88412). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [10] Snímače teploty. *Automatizace-issnp.wz* [online]. Nová Paka: Integrovaná střední škola, Kumburská 846 [cit. 2019-06-23]. Dostupné z: <http://automatizace-issnp.wz.cz/Soubory/Snimace%20teploty.pdf>

- [11] KRÁL, Jan, Pavel BREJNÍK a Jakub ČERNÝ. *Indukční ohřev* [online]. Praha, 2015 [cit. 2019-06-24]. Dostupné z: [http://www1.fs.cvut.cz/stretech/2015/sbornik\\_2015/0610.pdf](http://www1.fs.cvut.cz/stretech/2015/sbornik_2015/0610.pdf). Středoškolská práce. Střední průmyslová škola a Vyšší odborná škola Kladno.
- [12] *Elektrotechnika: Snímače polohy* [online]. MŠMT, 2015 [cit. 2019-06-23]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/960>
- [13] JEDLIČKA, Zdeněk, Irena HERZOGOVÁ a Ivo SZURMAN. *Metody měření transformačních teplot paměťových slitin* [online]. TU Ostrava, 2006 [cit. 2019-06-24]. Dostupné z: <http://konference.tanger.cz/data/metal2006/sbornik/papers/59.pdf>. Vysokoškolská práce. VŠB - TU Ostrava.
- [14] MORAVEC, Jaromír a Josef BRADÁČ. *Možnosti a využití teplotně-napětového simulátoru Gleeble při výzkumu technologické zpracovatelnosti materiálů*. Liberec: Technická univerzita, 2014. ISBN 978-80-7494-138-2.
- [15] Průmyslová termografie. In: *Termokamery-testo* [online]. Praha 5: Testo, s.r.o., 2015 [cit. 2019-06-23]. Dostupné z: <https://www.termokamery-testo.cz/wp-content/uploads/2015/09/Prumyslova-termografie-2.jpg>
- [16] SOVA, Jan. Bezdotykové měření teplotních polí I. In: *Aldebaran* [online]. AGA & Štefánikova hvězdárna v Praze, 2017 [cit. 2019-06-23]. Dostupné z: [https://www.aldebaran.cz/bulletin/2017\\_18\\_ter.php](https://www.aldebaran.cz/bulletin/2017_18_ter.php)
- [17] HAINES, P. *Principles of thermal analysis and calorimetry*. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2002. RSC paperbacks. ISBN 0-85404-610-0.
- [18] Měření teploty - 1 Doplněná inovovaná přednáška. In: *Kts.tul* [online]. Liberec: Katedra textilních a jednoúčelových strojů TUL, 2012 [cit. 2019-06-23]. Dostupné z: [http://www.kts.tul.cz/content/files/podklady/In-TECH2\\_Mereni\\_teploty\\_1\\_ver2.pdf](http://www.kts.tul.cz/content/files/podklady/In-TECH2_Mereni_teploty_1_ver2.pdf)
- [19] Strojírenství: Snímače polohy - odporové. *ELUC* [online]. MŠMT, 0125n. 1. [cit. 2019-06-23]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1576>
- [20] Strojírenství: Snímače polohy - indukční. *ELUC* [online]. MŠMT, 0125n. 1. [cit. 2019-06-23]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1577>
- [21] Strojírenství: Snímače polohy - kapacitní. *ELUC* [online]. MŠMT, 0125n. 1. [cit. 2019-06-23]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1577>
- [22] MORAVEC, Jaromír. *Disertační práce: Analýza kritických míst svařovacího procesu na základě simulací v programu SYSWELD* [online]. Liberec, 2008 [cit. 2019-06-24]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/4516>. TUL Liberec.

- [23] Hasal P., Schreiber I., Šnita D., et al.: *Chemické inženýrství I. 2nd ed.* Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2007. ISBN 978-80-7080-002-7
- [24] Snímače polohy: Ultrazvukové snímače polohy. *Automatizace-issnp.wz* [online]. Nová Paka: Integrovaná střední škola, Kumburská 846 [cit. 2019-06-23]. Dostupné z: <http://automatizace-issnp.wz.cz/Soubory/Snimace%20polohy%20ultrazvukove.pdf>
- [25] KUNC, bc. Marek. *Průmyslové využití ohřevů elektromagnetickou indukcí* [online]. Plzeň, 2014 [cit. 2019-06-23]. Dostupné z: [https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/14923/1/DP\\_Kunc.pdf](https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/14923/1/DP_Kunc.pdf). Diplomová práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ. Vedoucí práce Prof. Ing. Jiří Kožený, CSc.
- [26] NGONGANG, Aurelien Ngongang a RUTRONIK. Snímače IR MEMS Thermopile Array. In: *DPS Elektronika od A do Z* [online]. Liberec 15: CADware, 2016 [cit. 2019-06-23]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/soucastky/id:26125/z-aktualniho-vydani-casopisu-snimace-nbsp-ir-nbsp-mems-thermopile-array>