

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

Katedra materiálů a technologií pro automobily



## **EXPERIMENTÁLNÍ MODELOVÁNÍ TEPLOTNÍCH CYKLŮ**

## **EXPERIMENTAL MODELING OF THERMAL CYCLES**

Autor práce: Martin Jahn

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Tomčík, Ph.D.

Ostrava 2014

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství  
Katedra materiálů a technologií pro automobily

## Zadání bakalářské práce

Student: **Martin Jahn**  
Studijní program: B3923 Materiálové inženýrství  
Studijní obor: 3911R034 Materiály a technologie pro automobilový průmysl  
Téma: **Experimentální modelování teplotních cyklů**  
**Experimental modeling of thermal cycles**

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor diagramu ARA
2. Rozbor teplotních cyklů pro vybrané technologie zpracování
3. Experimentální modelování teplotních cyklů na připravených vzorcích
4. Popis dosažených struktur pomocí metalografie a měření tvrdosti
5. Vyhodnocení dosažených výsledků

Seznam doporučené odborné literatury:

SONDEL, M. Studium vlastností modelovaných pásem TOO svarových spojů oceli P91. Disertační práce, VŠB – TU Ostrava, 2005. 101s.

KUČERA, J. Teorie svařování. Skripta VŠB. Ostrava: VŠB – TUO, 1991, 408 s.

Kolektiv autorů. Materiály a jejich svařitelnost. Skripta pro výuku svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 2001. 292 s. ISBN 80-85771-85-3

KOUKAL, J., ZMYDLENÝ, T. Svařování I. skripta VŠB – TUO. Ostrava: VŠB – TUO, 2005. 133 s. ISBN 80-248-0870-6

VODÁREK, V. Fyzikální metalurgie modifikovaných (9-12)% Cr ocelí, monografie VŠB – TUO, Ostrava: VŠ - TUO, 2003. 163 s. ISBN 80-248-0329-1

SILBERNAGEL, A. Nauka o materiálu I., 1. Vyd. VŠB-TU Ostrava, 1991. 152s. ISBN 80-7078-116-5.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Petr Tomčík, Ph.D.**

Datum zadání: 29.11.2013

Datum odevzdání: 30.04.2014



---

doc. Ing. Petr Tomčík, Ph.D.  
vedoucí katedry



---

prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.  
děkanka fakulty

# Zásady pro vypracování bakalářské práce

## I.

Bakalářskou prací (dále jen BP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

## II.

### Uspořádání bakalářské práce:

- |  |                              |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list                              | 6. Obsah BP                  |
| 2. Originál zadání BP                        | 7. Textová část BP           |
| 3. Zásady pro vypracování BP                 | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení     | 9. Přílohy                   |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky |                              |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání BP obdrží student na oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování bakalářské práce“ následují za originálem zadání BP. („Zásady pro vypracování bakalářské práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání BP. V případě, že BP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnícké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním BP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah BP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech číslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části BP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část BP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním BP;
- Vlastní rozpracování BP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků BP z hlediska stanoveného zadání.

BP nemusí obsahovat experimentální (aplikační) část.

BP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující doporučené úpravy - písmo Times New Roman (nebo podobné) 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na



ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost.

U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury.

Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 8) BP bude obsahovat alespoň 10 literárních odkazů, z toho nejméně 3 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu BP.

ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně vělenit do vlastní textové části, např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

### III.

Bakalářskou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*  
*Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství*  
*Katedra .....*

uprostřed: *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE*


dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě.

### IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování bakalářské práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem bakalářského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2013/2014.

Ostrava 1. 2. 2014

  
**Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.**  
děkanka fakulty metalurgie a materiálového inženýrství  
VŠB-TU Ostrava

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že:

- Jsem byl seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odstavec 3)
- Souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB – TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB TUO.
- Bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odstavce 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněná v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona číslo 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.
- **Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval samostatně.**



V Ostravě dne: 26.4.2014

Podpis (jméno a příjmení studenta)

## **Abstrakt**

Bakalářská práce je zaměřena na experimentální modelování teplotních cyklů na oceli 12 010. Práce je rozdělena na teoretickou a experimentální část.

V teoretické části bakalářské práce je popsán rozbor diagramu ARA a jsou popsány vlastnosti oceli, která byla použita při modelování teplotních cyklů. V druhé části teorie je popsán rozbor teplotních cyklů, které probíhají při svařování, zejména teplotní pásma tepelně ovlivněné oblasti.

V experimentální části je popsán pracovní postup teplotního cyklu na teplotním simulátoru a také výsledné grafy z experimentálního modelování teplotních cyklů. V závěru experimentální části je uvedena metalografická zkouška, zkouška tvrdosti a rozbor diagramu ARA pro konkrétní vzorek, který byl použit při modelování teplotních cyklů.

**Klíčová slova: teplotní cyklus, teplotní simulátor, ocel 12 010, tepelně ovlivněná oblast, metalografická zkouška, zkouška tvrdosti, diagram ARA.**

## **Abstract**

The Bachelor thesis is focused on the experimental modeling of thermal cycles of steel 12 010. The thesis is divided on theoretical and practical part.

In the theoretical thesis is described ARA diagram and there is also described properties of steel, which was used for modeling thermal cycles. In second part of theory, there are described thermal cycles, which progress during welding, especially temperature zones of heat affected zone.

In the experimental part is described workflow of temperature cycle on the temperature simulator and also there are final graphs of the experimental modeling of thermal cycles. In the end of the experimental part is showed metallographic exam, hardness test and analysis of ARA diagram for the sample, which was used for modeling of thermal cycles.

**Keywords: thermal cycles, thermal simulator, steel 12 010, heat affected zone, metallographic exam, hardness test, ARA diagram.**

# Obsah

ÚVOD .....	10
<b>1 ROZBOR DIAGRAMU ARA, VLASTNOSTI OCELI 12 010 .....</b>	<b>11</b>
1.1 DIAGRAM ARA .....	11
1.2 ROZBOR DIAGRAMU ARA PRO OCEL 12 050.....	11
1.2.1 Popis jednotlivých struktur v ARA diagramu .....	12
1.3 DIAGRAM ARA „IN SITU“ .....	13
1.4 OCEL 12 010 .....	14
1.4.1 Vlastnosti oceli .....	14
1.4.2 Použití oceli.....	14
1.4.3 Tepelné zpracování oceli 12 010.....	14
<b>2 ROZBOR TEPLOTNÍCH CYKLŮ PRO VYBRANÉ TECHNOLOGIE ZPRACOVÁNÍ .....</b>	<b>15</b>
2.1 TEPLOTNÍ CYKLUS SVAŘOVÁNÍ .....	15
2.1.1 Charakteristika teplotního cyklu .....	16
2.2 TEPELNĚ OVLIVNĚNÁ OBLAST .....	19
<b>3 EXPERIMENTÁLNÍ MODELOVÁNÍ TEPLOTNÍCH CYKLŮ .....</b>	<b>22</b>
3.1 POSTUP MĚŘENÍ .....	22
3.1.1 Teplotní simulátor .....	24
3.2 GRAFY TEPLOTNÍCH CYKLŮ .....	29
3.2.1 Měření v oblasti částečné překrystalizace.....	29
3.2.2 Měření v oblasti normalizace .....	31
3.2.3 Měření teploty na povrchu i uvnitř vzorku v oblasti částečné překrystalizace.....	33
<b>4 POPIS DOSAŽENÝCH STRUKTUR POMOCÍ METALOGRAFIE A MĚŘENÍ TVRDOSTI.....</b>	<b>34</b>
4.1 METALOGRAFICKÁ ZKOUŠKA .....	34
4.1.1 Popis metalografické zkoušky .....	34
4.1.2 Metalografická struktura vzorku .....	35
4.2 MĚŘENÍ TVRDOSTI .....	36
4.2.1 Zkouška tvrdosti podle Vickerse.....	36
4.2.2 Naměřené hodnoty.....	36
4.3 ARA DIAGRAM .....	37
<b>5 VYHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>39</b>
PODĚKOVÁNÍ .....	40
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	41



<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>43</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>45</b>

## Úvod

Tato bakalářská práce je zaměřena na zkoumání teplotních cyklů, které probíhají při svařování oceli třídy 12. V práci je popsán teplotní simulátor, který je jediný svého druhu v ČR a probíhal na něm experiment. Hlavním úkolem bakalářské práce bylo zjistit funkčnost, popřípadě návrh na vylepšení teplotního simulátoru. Práce je rozdělena na teoretickou a experimentální část.

V teoretické části bakalářské práce je popsán rozbor diagramu ARA a jsou popsány vlastnosti oceli, která byla použita při modelování teplotních cyklů. V druhé části teorie je popsán rozbor teplotních cyklů, které probíhají při svařování, zejména teplotní pásma tepelně ovlivněné oblasti.

V experimentální části je popsán pracovní postup teplotního cyklu na teplotním simulátoru, který byl otestován. Vzorek oceli 12 010, na kterém probíhal experiment, byl testován zejména v oblasti částečné překrystalizace a normalizace a výsledky jsou zaznamenány v podobě grafů. V závěru experimentální části je uvedena metalografická zkouška, zkouška tvrdosti a rozbor diagramu ARA pro konkrétní vzorek, který byl použit při modelování teplotních cyklů.

Tato bakalářská práce je první svého druhu a její výsledky z modelování teplotních cyklů mohou být použity při dalších měřeních na teplotním simulátoru.

# 1 Rozbor diagramu ARA, vlastnosti oceli 12 010

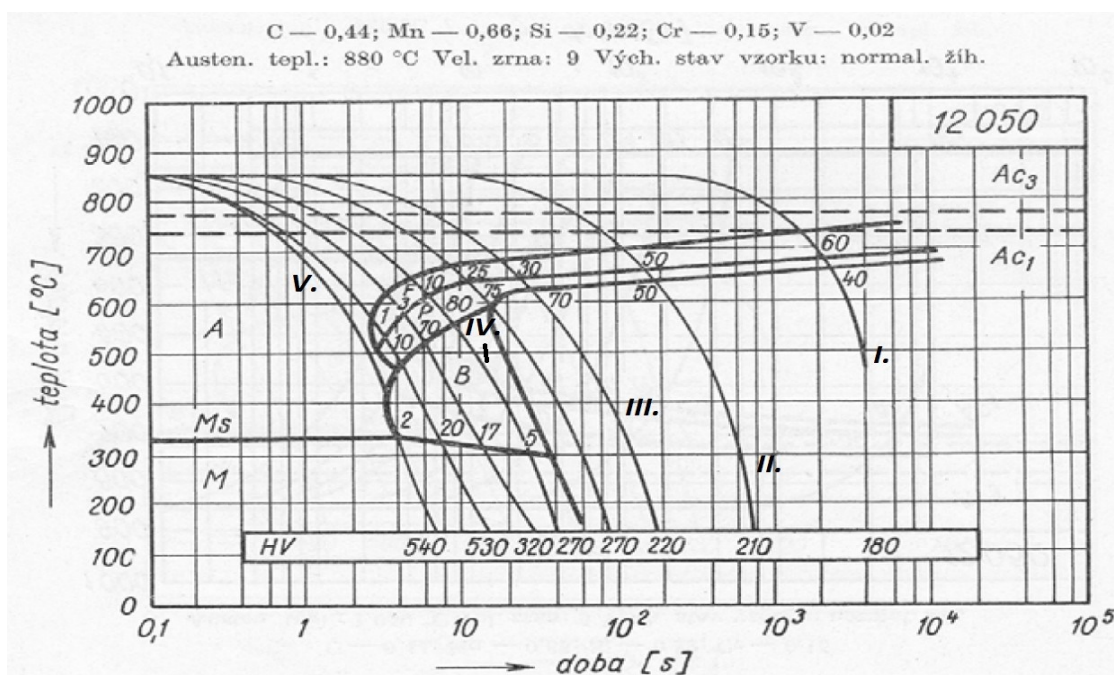
V této první kapitole si popíšeme diagram ARA pro ocel 12 050 a také vlastnosti oceli 12 010, kterou jsem používal při modelování teplotních cyklů.

## 1.1 Diagram ARA

Diagram anizotermického rozpadu austenitu, který udává změny struktury při plynulém ochlazování austenitu z teplot nad pásmem částečné překrystalizace ( $740^{\circ}\text{C}$ ). Jedná se o závislost teploty na čase, potřebného pro vznik a zakončení rozpadu austenitu na martenzit, dolní a horní Bainit, Perlit a Ferit. ARA-diagramy jsou velmi podobné diagramům IRA (izotermického rozpadu austenitu), liší se od nich tím, že křivky rozpadu austenitu jsou posunuty směrem k nižším teplotám. ARA diagramy jsou specifické pro každou ocel a jsou důležité pro jejich tepelné zpracování [1,2].

## 1.2 Rozbor diagramu ARA pro ocel 12 050

Diagram ARA pro ocel 12 010, kterou jsem používal při měření teplotních cyklů, neexistuje. Z tohoto důvodu zde popíšu diagram oceli 12050, která je také z řádu 12 a je mé oceli velice podobná svou strukturou. Diagram ARA si později ještě rozebereme při metalografické zkoušce a znázorníme si na něm tvrdost a vzniklé struktury v oblasti částečné překrystalizace pro konkrétní vzorek oceli 12 010. ARA diagram pro ocel 12 050 je znázorněn na Obr. 1.



Obr. 1: Diagram ARA oceli 12 050 [8]

Při ochlazování podle I., tj. relativně pomalu, se začne Austenit měnit na Ferit a přechází na Perlit. Výslednou strukturou je 60% Feritu a 40% Perlitu.

Při ochlazování podle II. – rychlejší ochlazení prvku, výsledná struktura je 50% Perlitu a 50% Feritu.

Při ochlazování podle IV. se začne Austenit měnit na Ferit a přechází na Perlit, dále v oblasti okolo 550°C dochází k přeměně na Bainit a nad hranicí 300°C se mění struktura prvku v Martenzit. Výslednou strukturou je směs 10% Feritu, 80% Perlitu 5% Bainitu a 5% Martenzitu.

Při ochlazování podle V. neprotne prvek čáru Feritu ani Perlitu. Při rychlosti jen o málo nižší by ovšem Perlit vznikl. Proto se rychlost V nazývá Martenzitická horní kritická rychlost ochlazování, někdy zkráceně horní rychlost zákalu. Je to tedy nejnižší rychlost ochlazování, při které je výsledná struktura tvořena samotným Martenzitem a přechází z Bainitu rovnou na Martenzit.

### 1.2.1 Popis jednotlivých struktur v ARA diagramu

**Austenit (A):** strukturní složka oceli, tuhý roztok uhlíku v železe, obsahující nejvýše 2,06 % uhlíku při teplotě 1147 °C. Je měkký, velmi tvárný, má velký měrný odpor, malou tepelnou vodivost, je paramagnetický. Podle rychlosti ochlazování se mění na jiné struktury

**Ferit (F):** tuhý roztok malého množství uhlíku v železe alfa. Vzniká pomalým ochlazováním podeutektoidní oceli nebo při eutektoidní přeměně. Vzniká při teplotách nad 500°C nad Perlitem. Je tvárný, měkký.

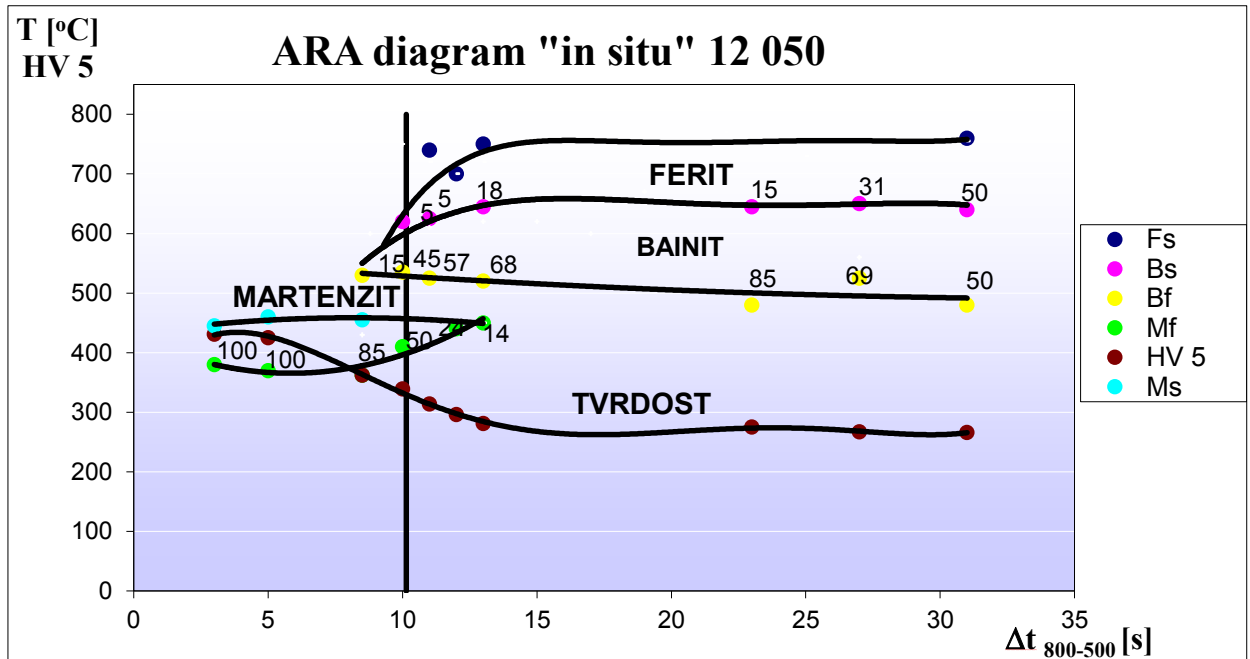
**Perlit (P):** strukturní složka v ocelích vznikající rozpadem Austenitu při konstantní kritické teplotě za pomalého ochlazování. Obvykle vzniká při teplotě od 500-700°C. Je to směs destičkovitých krystalů feritu a cementitu

**Martenzit (M):** strukturní složka oceli vzniklé prudkým ochlazením austenitu kritickou rychlostí pod teplotu počátku vzniku martenzitu. Martenzit vzniká od 200-350 °C

**Bainit (B):** strukturní složka oceli složená z velmi disperzní směsi feritu a cementitu, vzniká rozpadem austenitu mezi 500 °C a teplotou vzniku martenzitu. Bainit je stálý za teploty pod 500 °C, poměrně tvrdý, tvárný, houževnatý a feromagnetický. Bainit se vyznačuje jehlicovitou nebo deskovitou strukturou podle teploty vzniku.[5]

### 1.3 Diagram ARA „in situ“

ARA diagram vytvořený speciálně pro svařování, kde zejména odvod tepla je jiný, než u klasického tepelného zpracování. Používá se označení rychlosti ochlazování  $t_{8/5}$ , což značí pokles teploty z 800°C na 500°C za nějakou dobu (Obr. 2)



Obr. 2: ARA diagram "in situ" pro ocel 12 050[6]

## 1.4 Ocel 12 010

V diplomové práci budu provádět měření na oceli 12 010. Její vlastnosti popíšu podrobněji v následujících odstavcích. Ocel 12010 byla zvolena jako typický příklad konstrukčních ocelí.

### 1.4.1 Vlastnosti oceli

Ocel s označením 12 010 podle ČSN je uhlíková ocel vhodná k zušlechťování a povrchovému kalení. Ocel má obsah uhlíku 0,07-0,14% - tím se řadí mezi podeutektoidní ocel. Materiál oceli je velmi dobře obrobitelný a vyznačuje se dobrou tvarovou stabilitou po tepelném zpracování. Pro zjištění přesné struktury prvku jsme udělali ve školních laboratořích chemickou analýzu oceli (Tabulka 1.)

*Tabulka 1 : Chemické složení oceli 12 010 v %*

	C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]	Cu [%]	Al [%]
	0,076	0,337	0,094	0,006	0,008	0,082	0,134	0,172	0,024
	0,074	0,338	0,091	0,006	0,008	0,082	0,135	0,173	0,023
	0,073	0,336	0,089	0,005	0,008	0,082	0,135	0,173	0,024
<b>Průměr:</b>	<b>0,074</b>	<b>0,337</b>	<b>0,091</b>	<b>0,005</b>	<b>0,008</b>	<b>0,082</b>	<b>0,135</b>	<b>0,172</b>	<b>0,024</b>

### 1.4.2 Použití oceli

Ocel je vhodná pro pevnostní díly ve všeobecném strojírenství, zejména pro tepelně zpracované díly, kdy jsou maximálně využity mechanické vlastnosti oceli. Je vhodná pro následující typové díly: hřídele těžních strojů, turbokompresorů, karuselů apod., na větší ozubená kola, šneky, ozubené věnce, rotory šroubových kompresorů, ojnice, pístnice, vřetena, plunžry, písty kompresorů, pevnostní kolíky, čepy a šrouby, dopravní válečky...[3]

### 1.4.3 Tepelné zpracování oceli 12 010

Žihání normalizační: 840 - 880 °C

Žihání na měkko: 650 - 700 °C

Kalící teplota: 820 - 860 °C

Kalící médium: voda, olej



## 2 Rozbor teplotních cyklů pro vybrané technologie zpracování

### zpracování

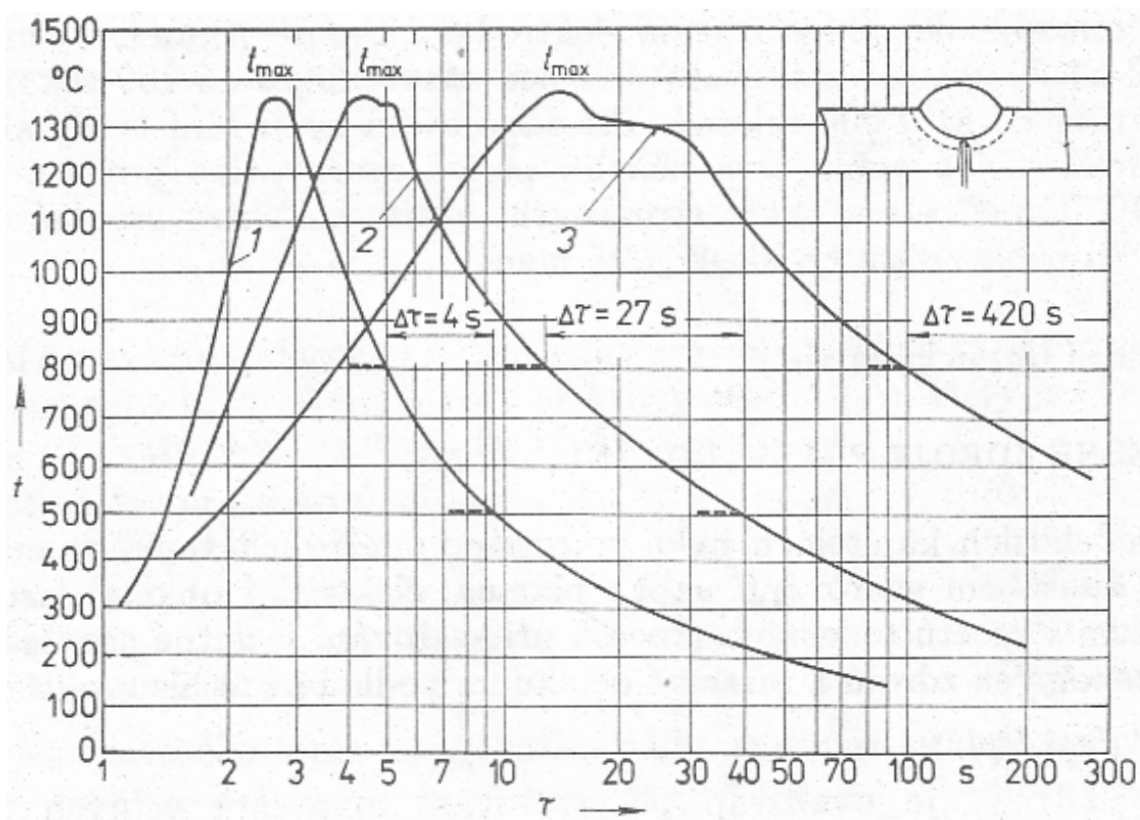
V následujících odstavcích si rozepíšeme popis teplotního cyklu a charakteristiku tepelně ovlivněné oblasti včetně všech její části.

### 2.1 Teplotní cyklus svařování

Teplotní cyklus je grafická závislost teploty na čase v libovolném místě (bodu) svarového spoje. Jinými slovy je to vývin teplot v průběhu svařování pro zvolené místo ve svarovém spoji (Obr. 3).

Při procesu svařování za působení soustředěného zdroje tepla dojde krátkodobě k intenzivnímu místnímu ohřevu materiálu na vysoké teploty. Dodaným teplem se natavuje malý objem kovu. Důsledkem tepelné vodivosti se ohřívá i okolní oblast základního materiálu.[5]

Při svařování způsobují vysoké teploty a jejich rychlé změny v základním materiálu různé struktury, které si popíšeme později.



Obr. 3: Teplotní cyklus v podhousenkové oblasti.

1- metoda 111; 2- svařování automatem pod tavidlem (121); 3- elektrostruskové svařování [6]

## 2.1.1 Charakteristika teplotního cyklu

Teplotní cyklus se skládá ze tří etap.

### 1. Oblast ohřevu

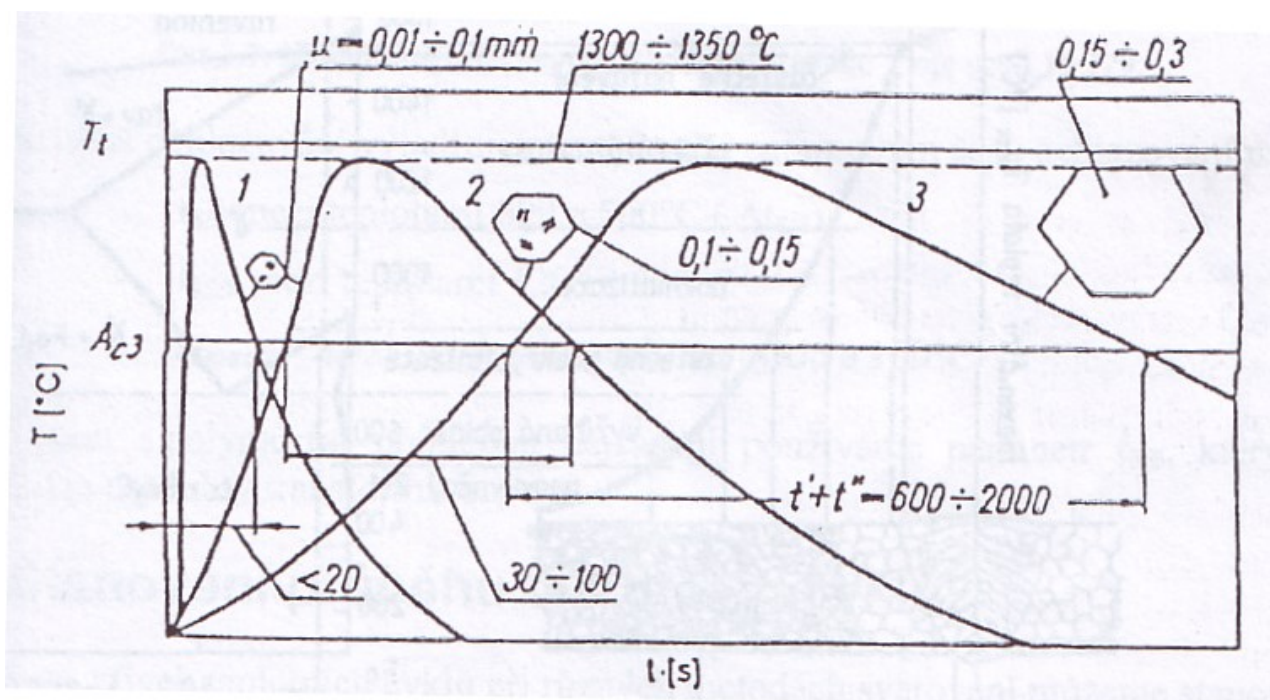
Jde o nárůst teploty z počáteční po maximální teplotu teplotního cyklu. Důležitá je rychlost ohřevu, čím větší je rychlost ohřevu tím k vyšším hodnotám se posouvají teploty transformačních přeměn ( $A_{c1}$ ,  $A_{c3}$ , ...).

Rychlost ohřevu na maximální teplotu je dána:

- fyzikálními vlastnostmi svařovaného materiálu
- použitou technologií svařování
- intenzitou použitého zdroje[6]

### 2. Maximální teplota, nebo doba setrvání nad určitou vysokou teplotou

Doba setrvání na určité teplotě nám vypovídá o velikosti zhrubnutí zrna, čím je tento čas větší, tím větší zrno můžeme očekávat (Obr. 4). Vliv rostoucího (hrubého) zrna ovlivňuje materiál a zhoršuje jeho mechanické vlastnosti.



Obr. 4: Vliv rostoucího zrna v závislosti teploty na čase [6]

Na obrázku 6 vidíme, jak se mění velikost zrna, podle toho, jak dlouho vydržíme na dané teplotě. V prvním případě je velikost zrna 0,01-0,1 mm, ve druhém 0,1-0,15mm a ve třetím se zrno zvětší až na 0,15-0,3 mm. Důsledkem zhrubnutí zrna je zhoršení mechanických vlastností materiálu.

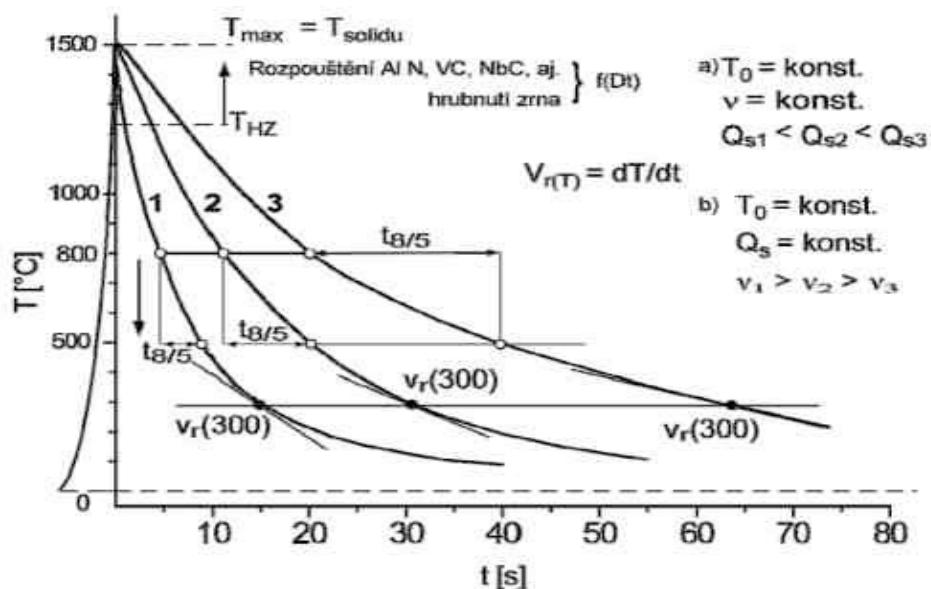
### 3. Ochlazovací část

Ochlazovací větev teplotního cyklu zejména ovlivňuje strukturní přeměnu  $\gamma \rightarrow \alpha$ . Čím je rychlost ochlazování větší, tím větší je pravděpodobnost získání nerovnovážné zakalené struktury (dolní Bainit, Martenzit).

Odhad mikrostruktury nelze dělat pomocí klasických ARA diagramů, ty jsou konstruovány pro rozpady austenitu v podmínkách tepelného zpracování, kde je dosaženo dokonalé austenitizace. Pro odhady mikrostruktury se používají ARA diagramy „in situ“ (Obr. 2), které jsou konstruované pro podmínky svařování. Na vodorovné ose se u těchto diagramů místo času vynáší parametr  $\Delta t_{8/5}$ . [6]

#### Parametr ochlazování $\Delta t_{8/5}$ ( $\Delta t_{800^\circ\text{C}-500^\circ\text{C}}$ ):

Je to doba, za kterou se dané místo svarového spoje ochladí z  $800^\circ\text{C}$  na  $500^\circ\text{C}$ . Platí pro oceli, které prodělávají překrystalizaci. (Obr. 5)



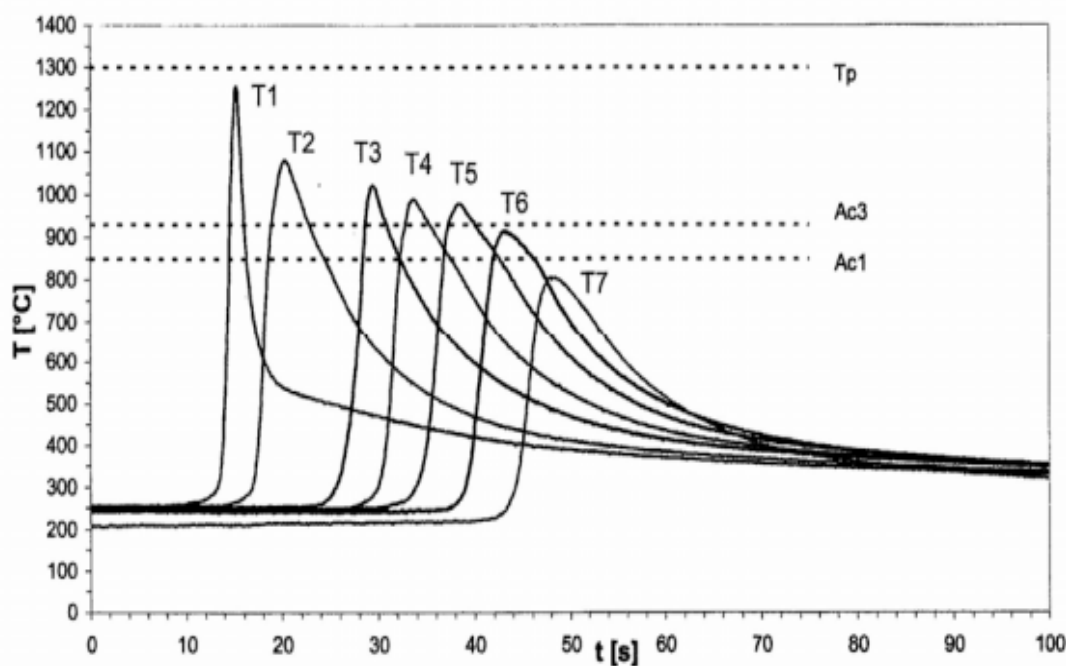
Obr. 5: Závislost ochlazování  $\Delta t_{8/5}$  a rychlosti chladnutí  $v_r(T)$  na průběhu teplotního cyklu [7]

Na Obr. 5 jsou naznačeny tři druhy teplotních cyklů odpovídající různým podmínkám svařování. Protože uhlíkové a nízkolegované oceli mají odlišné složení a mají zhruba stejné fyzikální vlastnosti, průběh teplotního cyklu je závislý pouze na velikosti přivedeného tepla  $Q_S$  a na rychlosti odvedení, tzn. Je funkcí  $Q_S$ , tloušťky plechu, geometrii svaru a výchozí teploty plechu  $T_0$ . Podobný průběh teplotního cyklu může mít svar tenkého plechu při nízkým  $Q_S$  nebo tlustého plechu při vysokým  $Q_S$ . [7]

Výpočet doby chladnutí  $\Delta t_{8/5}$ , nebo rychlosti chladnutí  $v_r$  (300) je poměrně rychlý a spolehlivý. Větším problémem je, jakým způsobem dát výsledky výpočtu do souvislosti a daným konkrétním materiálem, neboť zatím není dostatek podkladů pro objektivní rozhodování. Pokud tyto podklady jsou, dá se z nich sestavit optimální rozmezí rychlosti ochlazování (oblast mezi rychlostí, kdy hrozí opožděné trhliny a rychlosti, kdy se nepřipustně zhorší vlastnosti TOO - Obr. 5. Materiál se dá charakterizovat jediným číslem, které odpovídá optimální době nebo rychlosti chladnutí a je považováno za důležitý parametr. [7]

Příčinou vzniku teplotního cyklu při svařování je zdroj tepla, který musí působit v oblasti svarového spoje, aby byla zajištěna termická aktivace svařovaných povrchů. Přiváděné teplo a vedení tepla jsou pak příčinou vzniku teplotního cyklu.[7]

Teplotní cyklus vyjadřuje závislost průběhu teploty na čase v posuzovaném místě svarového spoje. Typický průběh teplotních cyklů v TOO svarového spoje oceli 12 010 v různých vzdálenostech od hranice nastavení (Obr. 6). [8]

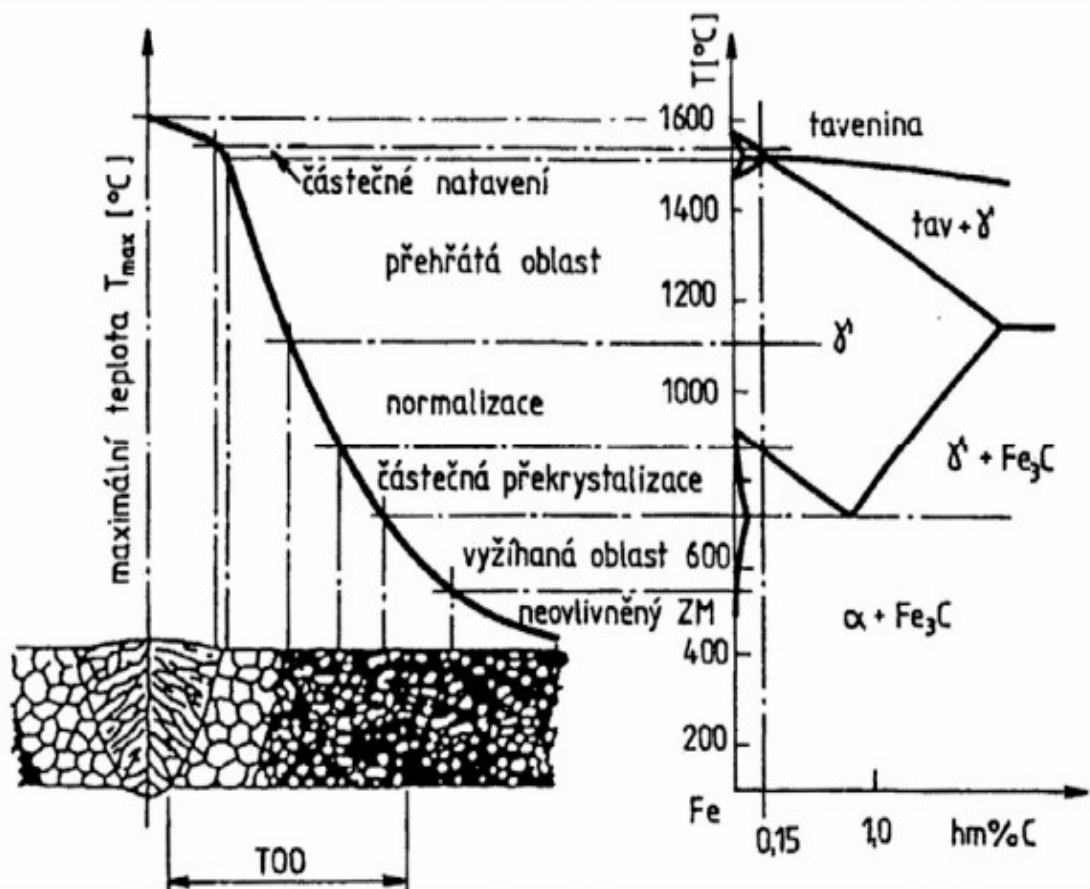


Obr. 6: Průběh teplotních cyklů [8]

## 2.2 Tepelně ovlivněná oblast

Tepelně ovlivněnou oblast nazýváme oblast základního materiálu, ve kterém byly vlastnosti a mikrostruktura silně ovlivněny procesem a technikou svařování. Teplo dodané materiálu při jeho tavení a následném ochlázování způsobuje změny materiálu v oblasti přiléhající ke svaru. Velikost tepelně ovlivněné oblasti je závislá na tepelné vodivosti základního materiálu. Pokud má materiál velkou tepelnou vodivost, tak ochlazovací rychlost materiálu je taktéž velká a tepelně ovlivněná oblast malá. [5,9]

Tepelně ovlivněná oblast je složená z pásem, které jsou charakteristické specifickými změnami v jejich mikrostruktura a jsou znázorněné na Obr. 7. Patří zde pásma částečného natavení, pásmo přehřátí, pásmo normalizace, pásmo částečné překrystalizace a vyžíhaná oblast. [5,9]



Obr. 7: Vliv teplotního účinku svařování na strukturu svarového spoje [5]

### **Pásmo částečného natavení**

Tato oblast tvoří přechod z TOO do svarového kovu a má maximální teplotu  $T_{max}$ . Teplotně je ohraničeno - shora teplotou likvidu (Teplota, při které se kov vyskytuje v tekuté fázi) a zdola teplotou solidu (teplota, při které již dosahujeme 100% tuhého roztoku). U většiny ocelí se toto pásmo redukuje na linii nazývanou hranice ztavení, protože rozdíl mezi teplotou solidu a likvidu je minimální. Současně zde existuje tavenina společně s Austenitem, tím dochází k tavení základního materiálu a promícháním se svarovým kovem. Teplota pásma je okolo 1500°C. [5,9]

### **Pásmo přehřátí**

Oblast s teplotami nad  $A_{c3}$  překračující teplotu intenzivního růstu primárních zrn se nazývá pásmo přehřátí. Z důvodu rozpuštěných precipitátů, bránících růst austenitických zrn za nižších teplot se tato oblast někdy nazývá hrubozrnná. Výsledkem je výrazné zhrubnutí austenitických zrn. V ocelích s nízkým obsahem chrómu vzniká ochlazením Bainiticko-Martenzitická mikrostruktura. U nelegovaných ocelí je teplota přehřátí okolo 1050 °C, pro mikrolegované oceli je teplota cca 1250 až 1300 °C a u nízkolegovaných ocelí je asi 1200 °C. [5,9]

### **Pásmo normalizace**

Je definováno teplotami  $A_{c3}$  a teplotou přehřátí s úplnou transformací  $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ . Struktura je tvořena austenitem a malým podílem precipitátů bránících růst austenitického zrna. Z uvedeného důvodu vzniká během chladnutí výsledná jemnozrnná struktura. [9]

### **Pásmo částečné překrystalizace**

Toto pásmo se nachází mezi teplotami  $A_{c1}$  a  $A_{c3}$ , ve kterém dochází během ohřevu k částečné transformaci feritu na austenit. Část precipitátů se rozpustí a po tepelném zpracování může dojít k zhrubnutí nerozpuštěných částic. Po ochlazení se vzniklá struktura vyznačuje přítomností nově vzniklého Bainitu a vyžíhané nebo rekrytalizované původní mikrostruktury. Toto pásmo svarového spoje je charakteristické malou velikostí zrna a vykazuje nejnižší hodnoty tvrdosti. [9]

### **Vyžíhaná oblast**

Při teplotách blízko pod  $A_{c1}$  nedochází k fázové přeměně mikrostruktury, ale k lokálnímu přehřátí oproti chladnějšímu základnímu materiálu. V důsledku vyššího koeficientu difúze při dané teplotě dochází k zhrubnutí precipitátů. [9]



Šířka jednotlivých TOO oblastí je rozdílná pro různé metody svařování a je ve velké míře závislá na svařovacích nebo na stroji nastavených parametrech. Dle literatury je možné pro jednotlivé metody svařování charakterizovat šířku pásma TOO viz Tabulka 2.[5]

*Tabulka 2: Orientační šířky jednotlivých pásem TOO[5]*

Metoda svařování	Šířka TOO [mm]		
	nad A <sub>1</sub>	nad A <sub>3</sub>	přehřátá oblast
111	3 až 8	0,3 až 1	0,1 až 0,3
135, 131	3 až 8	0,3 až 1	0,1 až 0,3
121	3 až 15	0,3 až 2	0,1 až 0,5
72	5 až 50	1 až 10	0,5 až 5
51	0,3 až 1	0,1 až 0,3	0 až 0,1
15	0,3 až 1	0,1 až 0,3	0 až 0,1

### 3 Experimentální modelování teplotních cyklů

Cílem experimentu je nasimulovat teplotní cykly, které probíhají při svařování oceli 12 010, zejména v oblasti normalizace a částečné překrytalizace. Pro modelování těchto teplotních cyklů bylo použito zařízení – teplotní simulátor a experiment probíhal na kovovém vzorku. Teplotní simulátor i vzorek si podrobně popíšeme v následujících kapitolách a rozebereme si grafy teplotních cyklů.

#### 3.1 Postup měření

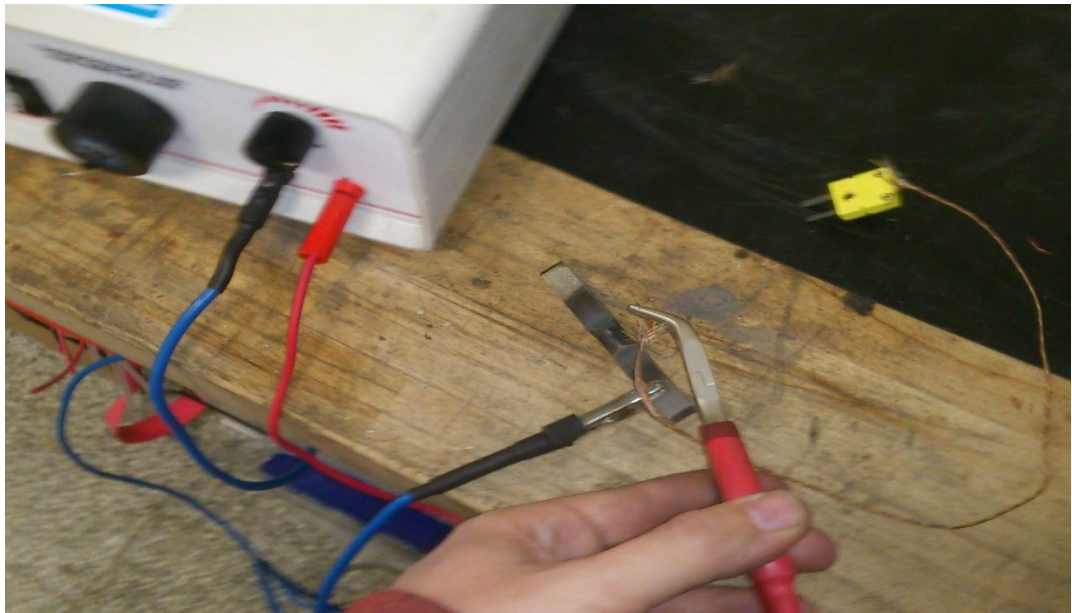
Měření teplotních cyklů probíhalo na teplotním simulátoru, který si popíšeme později, vzorek, který byl k tomu použit je z oceli 12 010 (viz Ocel 12 010). Vzorek měl rozměry 100x10x10 mm (Obr. 8). Pro měření teplot na vzorku byly v polovině vzorku přivařeny termočlánky. Postup navaření termočlátku můžeme vidět na Obr. 9 a Obr. 10. Nejprve jsem si musel připravit termočlánek, svařením jeho dvou drátků a poté se termočlánek navařil na vzorek. Navařené termočlánky na vzorku můžeme vidět na Obr. 11. Termočlánky byly navařeny 2, aby došlo k eliminaci chyb měření a zvýšení spolehlivosti v případě, že by se jeden z termočláneků v průběhu experimentu poškodil.



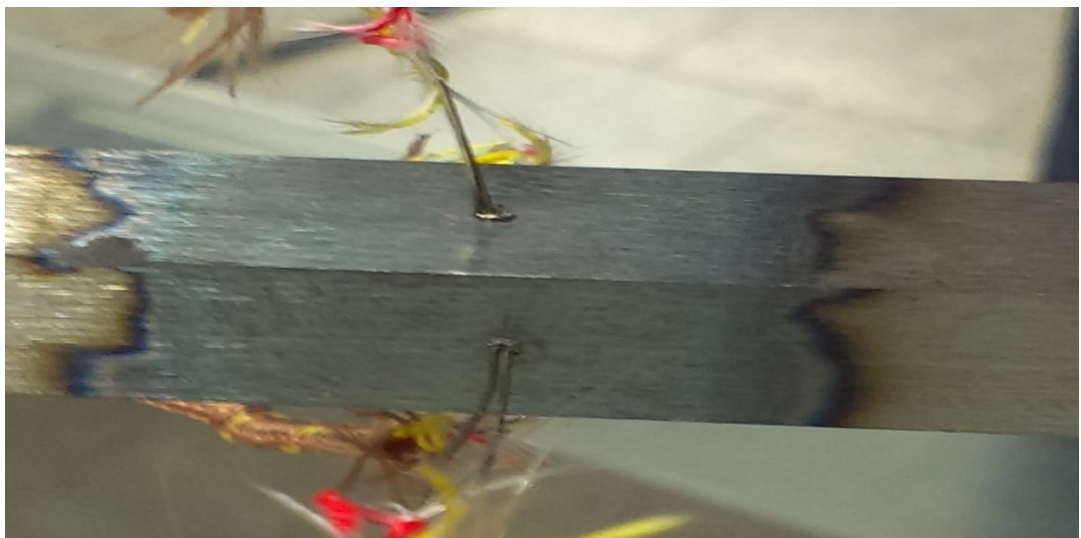
*Obr. 8: Vzorek z oceli 12 010 z praktického měření*



*Obr. 9: Postup navaření termočlánku 1/2*



*Obr. 10: Postup navaření termočlánku 2/2*

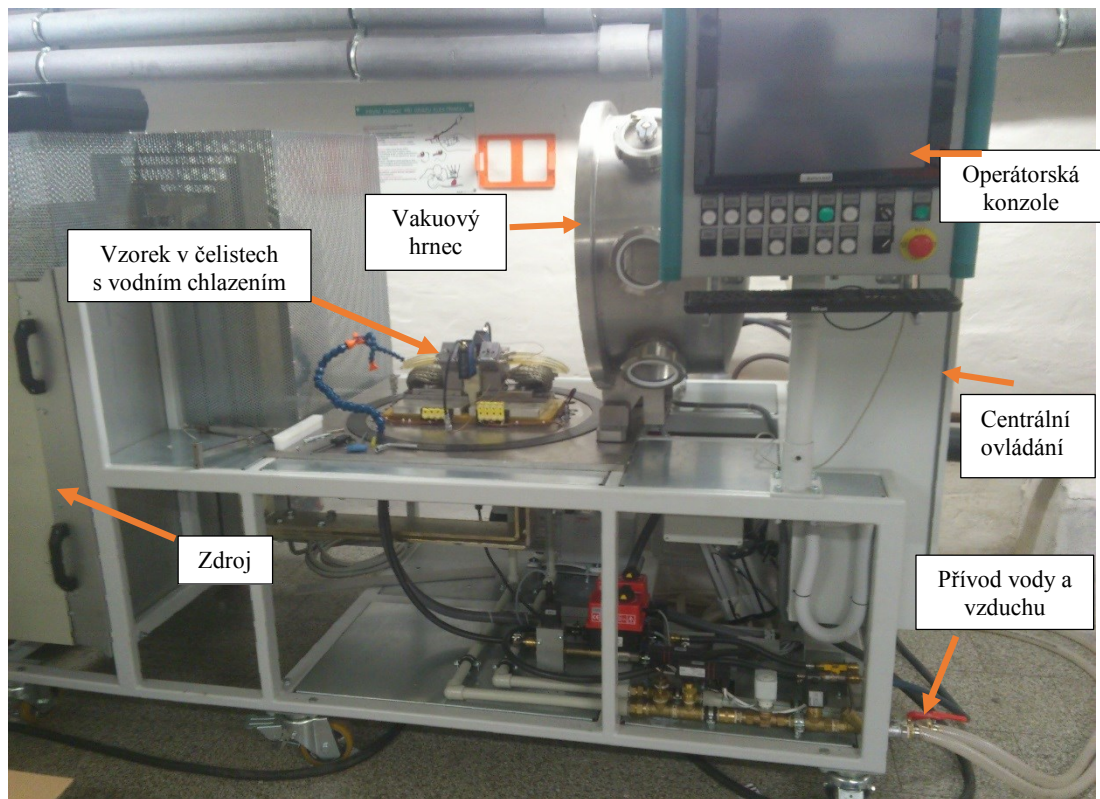


*Obr. 11: Navařené termočlánky na vzorku*



### 3.1.1 Teplotní simulátor

Po navaření termočlánku máme vzorek připraven a můžeme ho upnout do čelistí teplotního simulátoru (Obr. 13). Teplotní simulátor (Obr. 12) je zařízení pro simulaci teplotních cyklů a skládá se ze zdrojů, palubní obrazovky, a samotné vakuové komory, kde probíhal experiment.



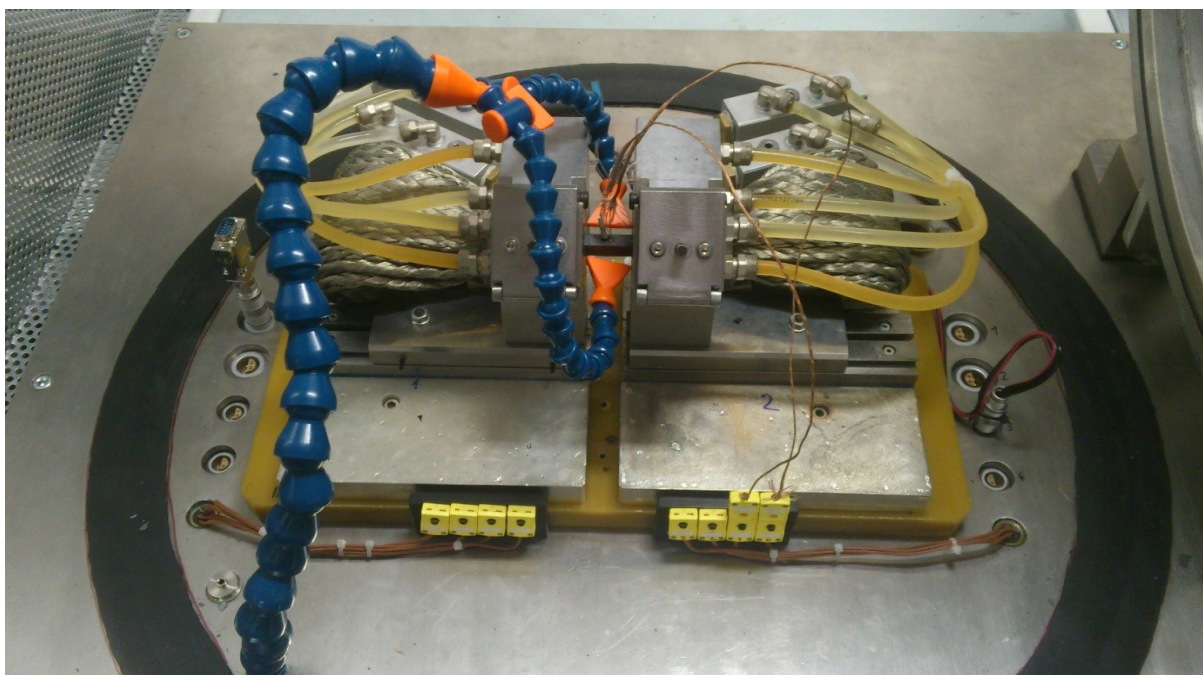
Obr. 12: Teplotní simulátor



Obr. 13: Vzorek v čelistech



Po upnutí vzorku do čelistí zapneme na operátorské konzoli (Obr. 15) zdroje, provoz a ovládání, poté pustíme vodu, která teče hadičkami a ochlazuje čelisti, které proudem zahřívají vzorek. Chlazení pouze vodou nebylo dostačující (viz Obr. 24: Teplotní cyklus v oblasti částečné překrystalizace bez přídavného chlazení), proto jsme použili přídavné chlazení vzduchem (Obr. 14), pomocí kompresoru (Obr. 16) které částečně vykompenzovalo pomalé chlazení, vůči požadované teplotě.



*Obr. 14: experimentální část*

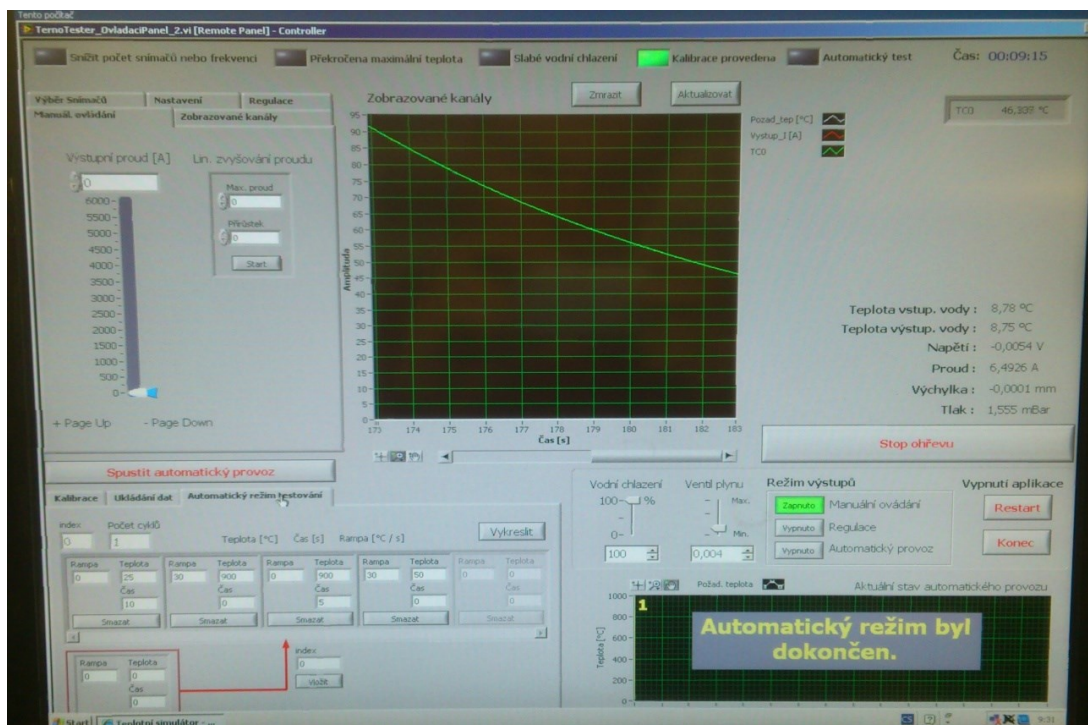


*Obr. 15: Operátorská konzole*



*Obr. 16: Vzduchový kompresor*

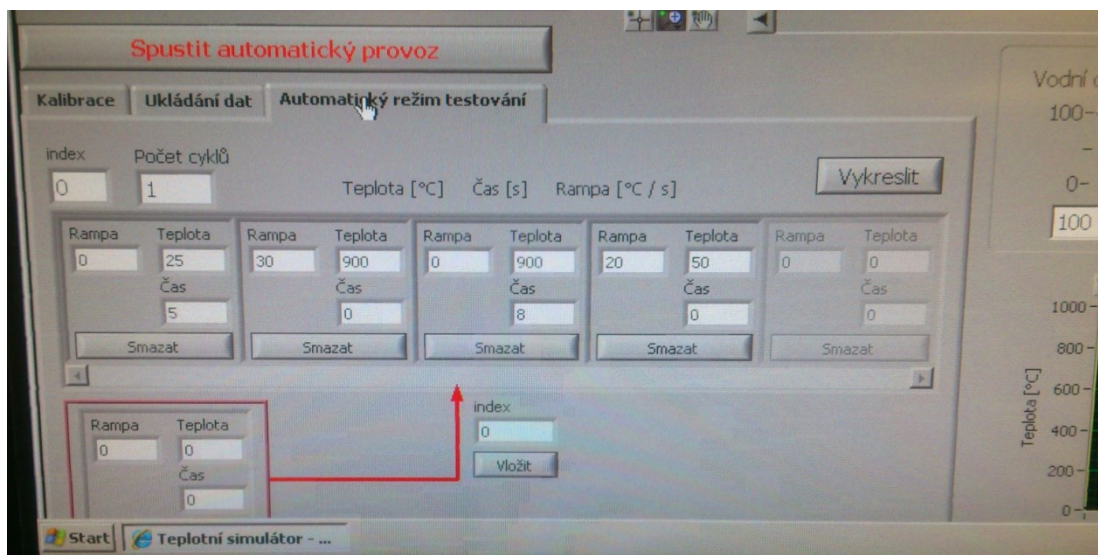
Po zapojení všech příslušných komponentů a nastavení vzorku se přesuneme do programu teplotního simulátoru (Obr. 17) kde si postupně nastavíme všechny parametry pro naměření teplotního cyklu. Ze všeho nejdříve vybereme termočlánky, které máme připojeny a nastavíme kanály, které budeme chtít zobrazit při měření. V programu lze nastavit hodně parametrů, jako nastavení vstupního proudu, napětí, automatické či manuální ovládání apod.



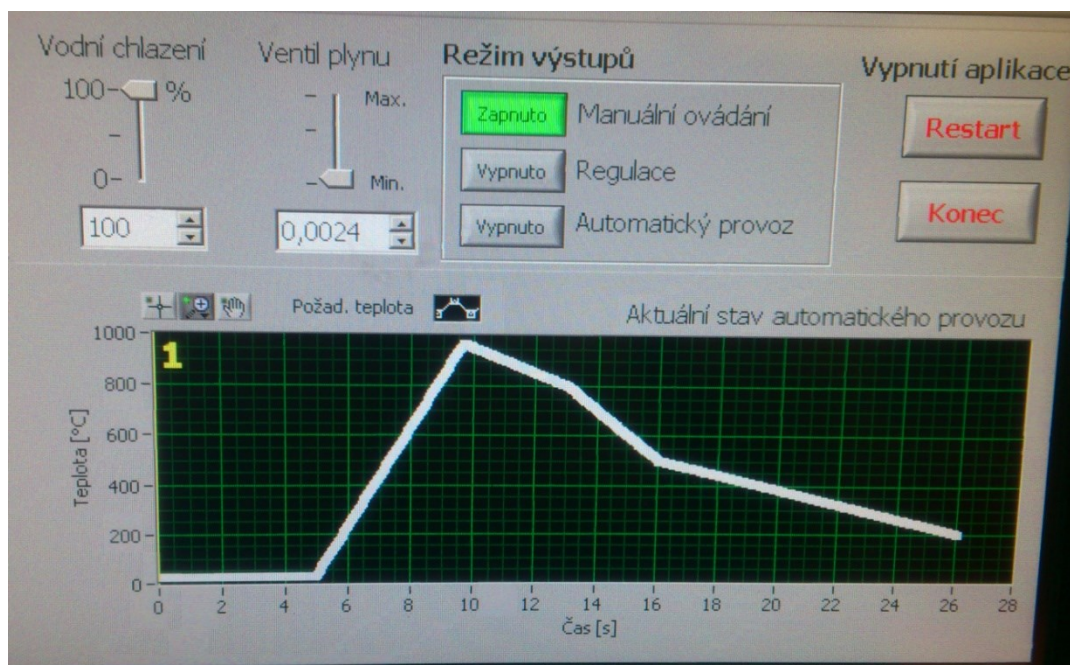
Obr. 17: Program teplotního simulátoru

Poté, co jsme vybrali zobrazované kanály, provedeme kalibraci a korekci skoku, díky tomu se přesvědčíme, že termočlánky jsou dobře navařené a vše je v pořádku. Nyní musíme nastavit požadovanou teplotu cyklu (Obr. 18) poté dáme „vykreslit“ a teplotní cyklus se nám zobrazí, jak bude probíhat. (Obr. 19)



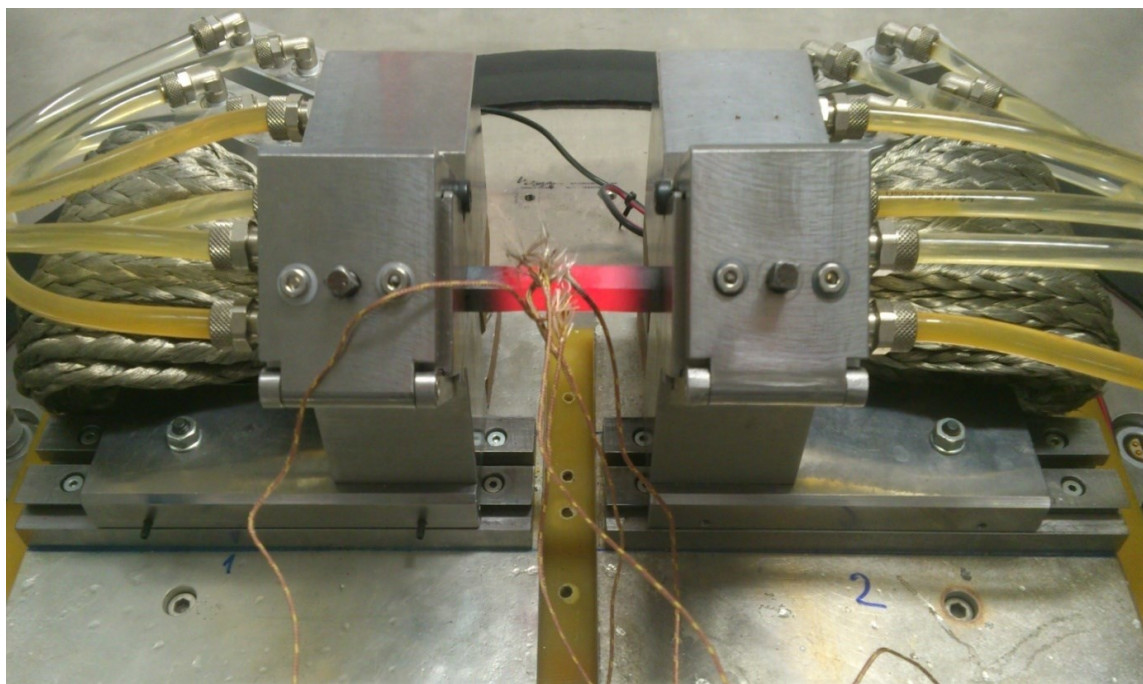


Obr. 18: Nastavení požadované teploty

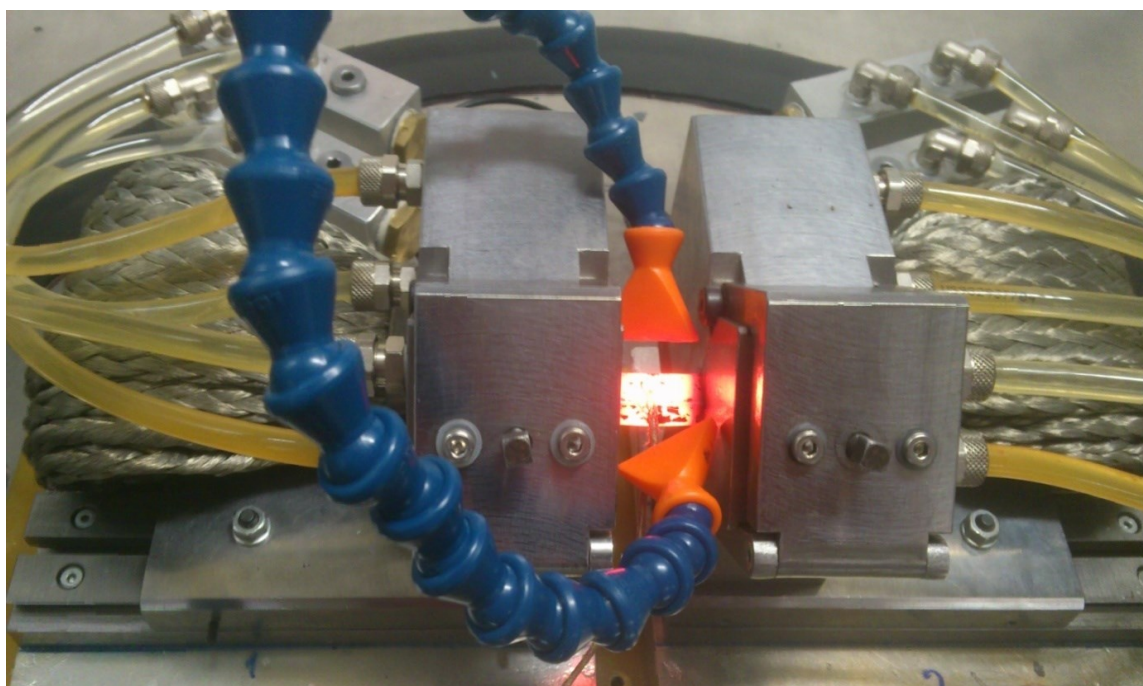


Obr. 19: Grafické znázornění teplotního cyklu

Jakmile máme vše nastaveno, klikneme na „spustit automatický provoz“ a vzorek se začne zahřívat na teplotu, kterou jsme nastavili, a poté se ochladí, tím proběhne teplotní cyklus. V další kapitole si ukážeme výsledné grafy teplotních cyklů a ukážeme si, jaký vliv mělo ochlazování vzorku s přídavným chlazením vzduchem a bez vzduchu. U vzorku bylo také rozhodující nastavení vzdálenosti čelisti od středu vzorku. V momentě kdy jsme čelisti dali cca 1,5 cm od sebe (Obr. 21), chlazení bylo mnohem účinnější, než když čelisti byly od sebe 5 cm (Obr. 20). Je to způsobeno tím, že vodou chlazené čelisti, ochlazují větší část vzorku, pokud jsou blíž k sobě a lépe odvádí teplo.



*Obr. 20: Čelisti vzdáleny 5cm od sebe, bez přídavného chlazení vzduchem*



*Obr. 21: Vzdálenost čelistí 1,5 cm od sebe s přídavným chlazením vzduchem, vzorek zahřátý na teplotu 900°C*

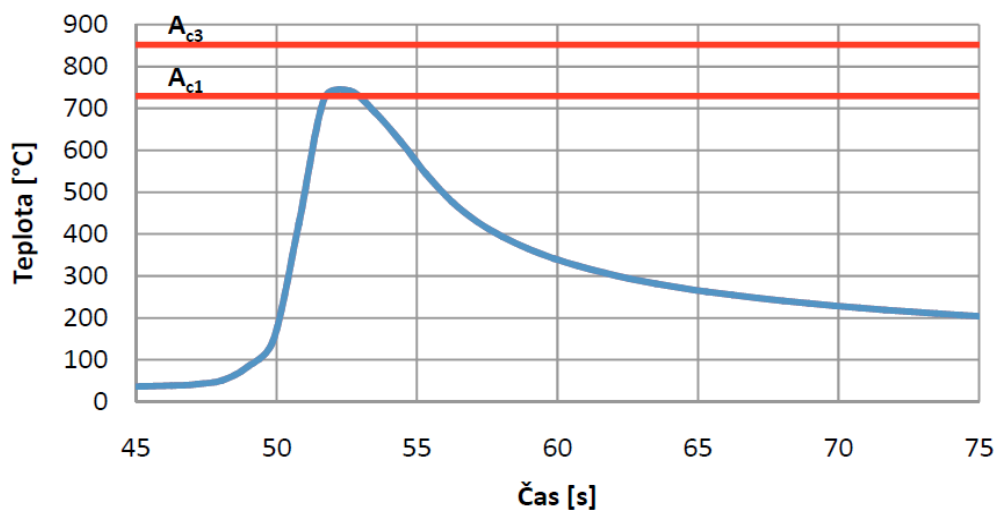


## 3.2 Grafy teplotních cyklů

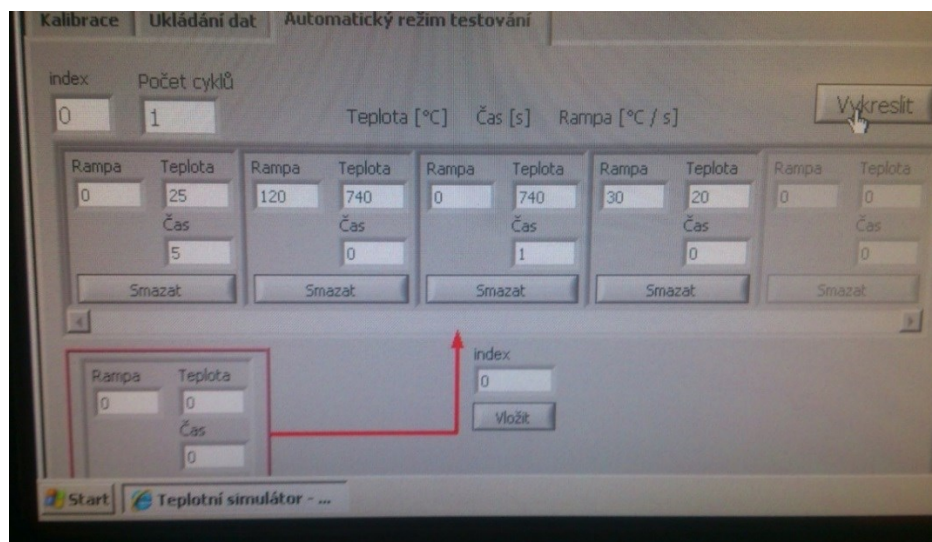
Nyní si znázorníme grafy pro pásmo normalizační a pásmo částečné překrystalizace. Také si ukážeme, jak probíhalo chladnutí v různých nastaveních čelistí od vzorku a chladnutí s přídavným chlazením a bez něj.

### 3.2.1 Měření v oblasti částečné překrystalizace

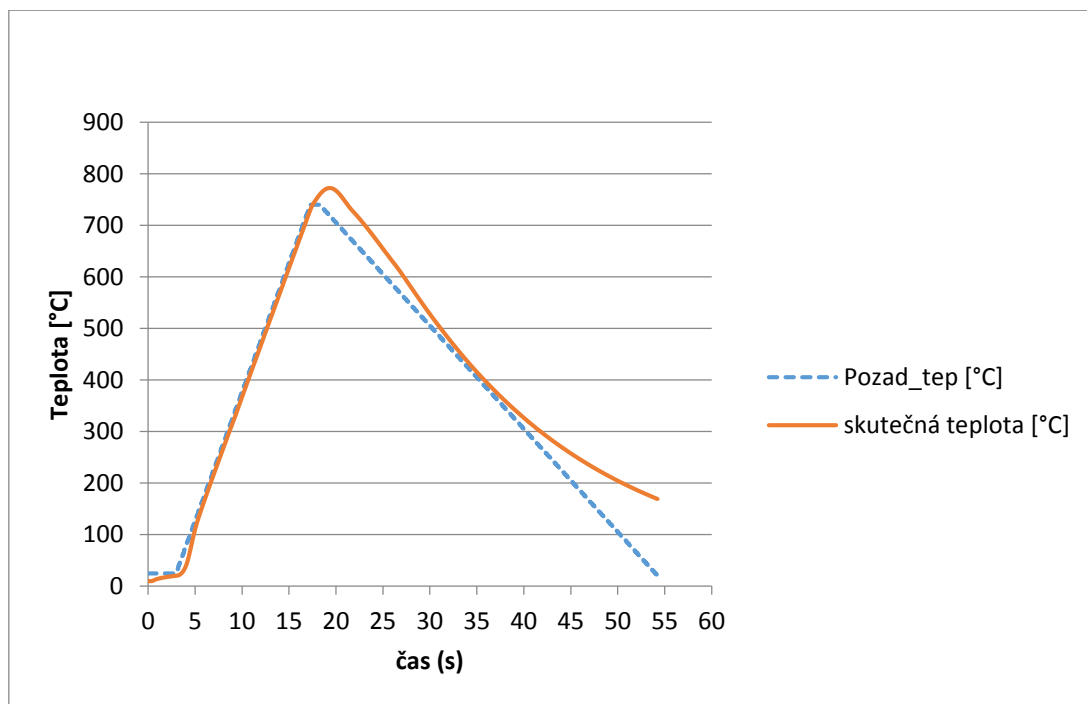
Naměřená data na Obr. 22 se nachází v pásmu částečné překrystalizace. Maximální teplota cyklu u tohoto vzorku byla 742 °C. Hodnoty jsou převzaty z reálného svařování oceli 12010. Vzdálenost od hranice ztavení k termočládku byla 1,6 mm. Na Obr. 23 vidíme nastavení hodnot pro oblast částečné překrystalizace v programu. Nastavení čelistí bylo 1,5 cm od sebe, protože větší vzdálenost čelistí od sebe, působila lineárně na pomalejší chladnutí.



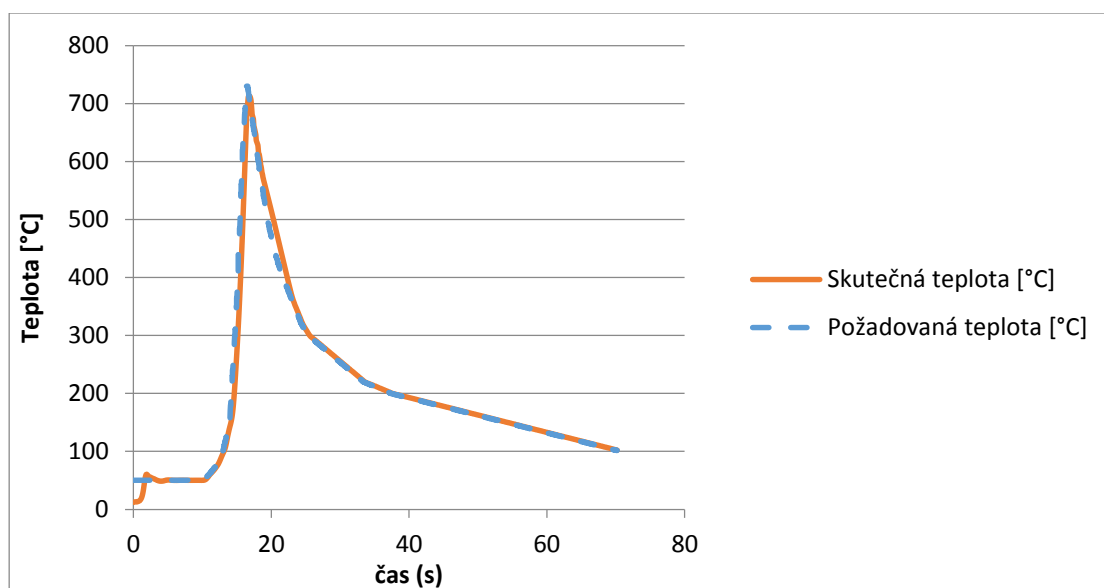
Obr. 22: Teplotní cyklus svařování v oblasti částečné překrystalizace



Obr. 23: nastavení hodnot pro oblast částečné překrystalizace v programu teplotního simulátoru



Obr. 24: Teplotní cyklus v oblasti částečné překrystalizace bez přídavného chlazení

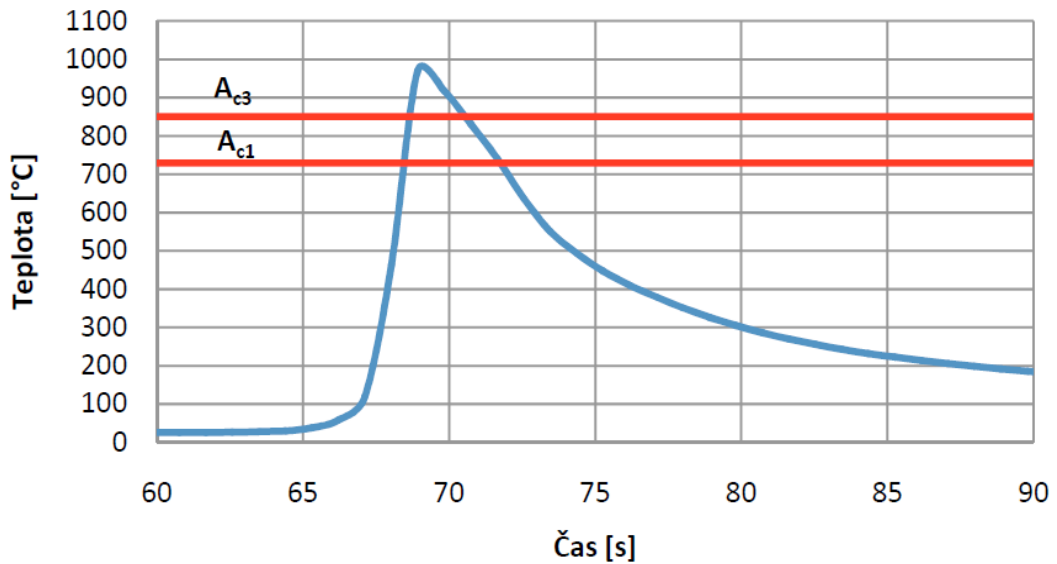


Obr. 25: Teplotní cyklus v oblasti částečné překrystalizace s přídavným chlazením

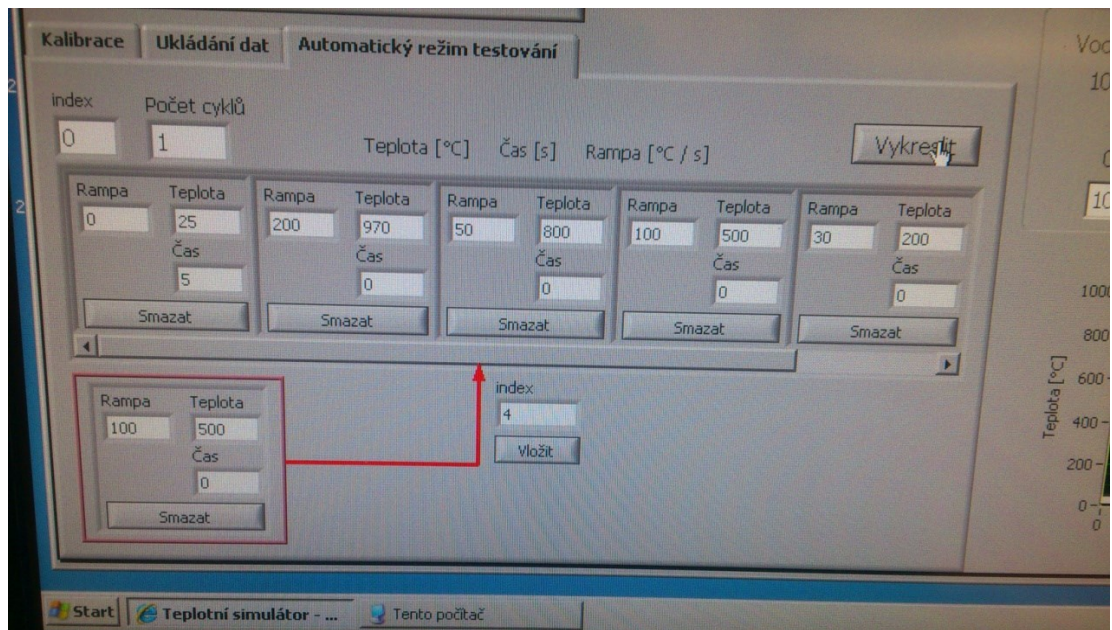
Na Obr. 24 a Obr. 25 vidíme rozdíl v chladnutí bez přídavného chlazení a s chlazením. S přídavným chlazením vidíme téměř totožnou křivku vůči požadované teplotě, bez chlazení vzduchem je zde vidět mírné odchýlení od požadované teploty.

### 3.2.2 Měření v oblasti normalizace

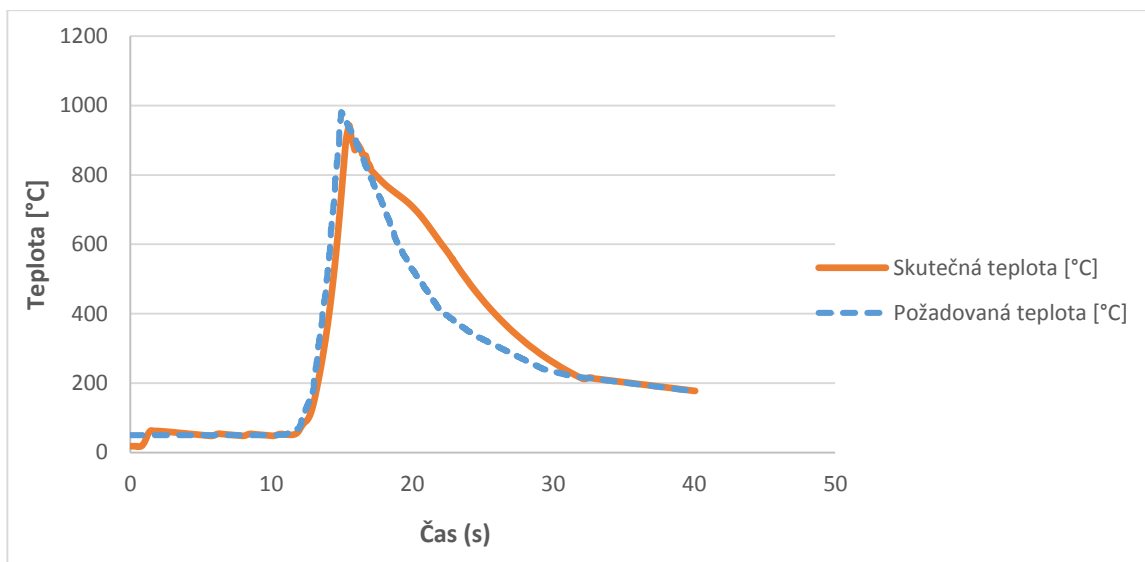
Naměřená data na Obr. 26 pochází ze svařování vzorku s termočlánkem v oblasti normalizace. Vzdálenost termočlánku od hranice ztavení byla 0,6 mm. Maximální teplota cyklu u tohoto vzorku byla 970 °C. Čas ochlazování z teploty 800 °C na 500 °C byl 3 sekundy. Na Obr. 27 vidíme nastavení teplot v programu podle teplotního cyklu svařování.



Obr. 26: Teplotní cyklus svařování v oblasti normalizace

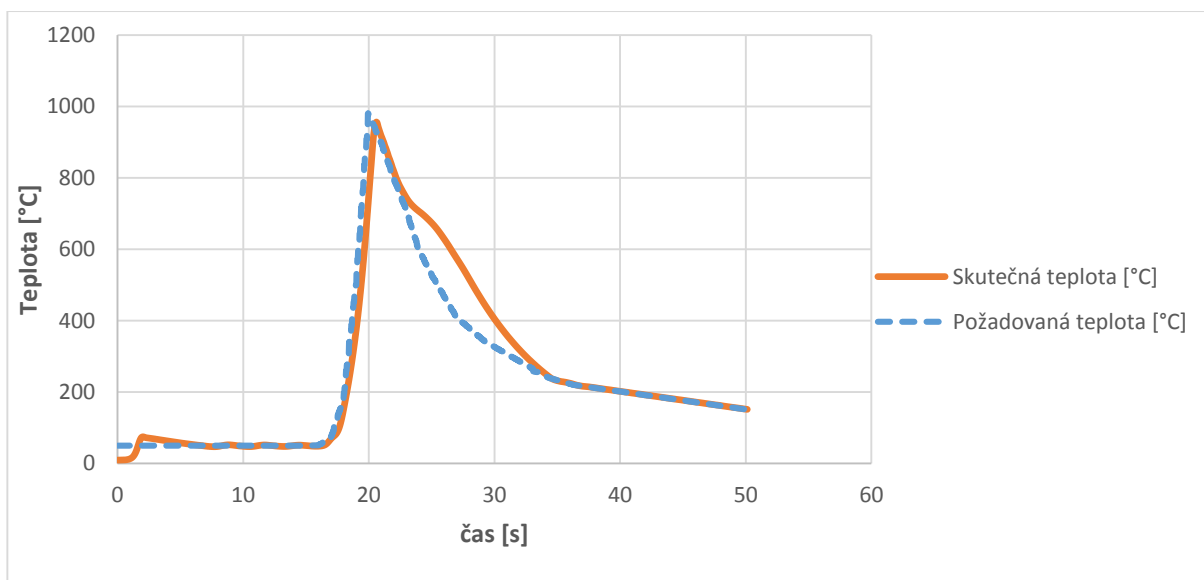


Obr. 27: Nastavení teplotních hodnot v programu pro oblast normalizace



Obr. 28: Teplotní cyklus v oblasti normalizace, bez přídavného chlazení

Simulace teplotního cyklu v oblasti normalizace proběhla také úspěšně, pro sledování žádané teploty bylo využito přídavného chlazení (Obr. 29). Měřená teplota se odchýlila od požadovaného průběhu v oblasti 300-700 °C kdy vzorek chladnul pomaleji než je ideální přes veškerá opatření. Celková délka teplotního cyklu a jeho hlavní parametry ale byly dosaženy.



Obr. 29: Teplotní cyklus pro oblast normalizace s přídavným chlazením

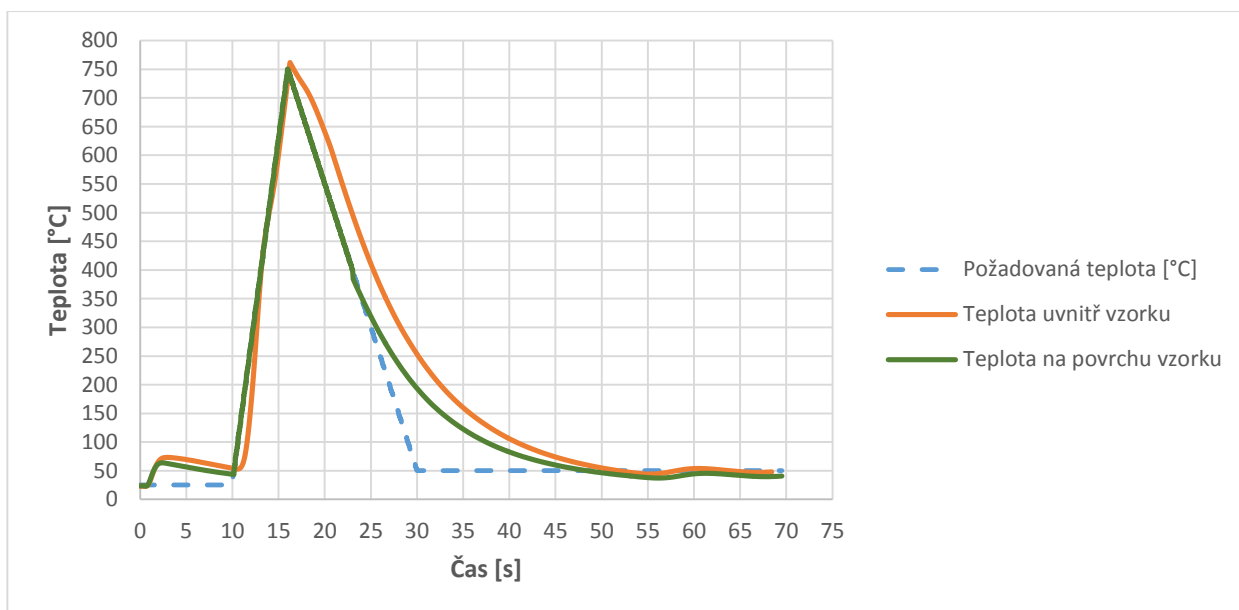


### 3.2.3 Měření teploty na povrchu i uvnitř vzorku v oblasti částečné překrystalizace

Další měření, které jsem provedl, bylo se vzorkem stejné oceli, ale teplotní článek jsem umístil krom na povrch, také dovnitř vzorku (Obr. 30). Díky těmto dvěma teplotám se mně podařilo zjistit, jaká je skutečná teplota uvnitř vzorku při zahřátí a jaký je rozdíl mezi teplotami. Teploty byly při ohřívání téměř totožné, avšak při ochlazování se křivka teploty uvnitř vzorku odchýlila a chladla o něco pomaleji než teplota na povrchu (cca 15% rozdíl). Více viz Obr. 31.



Obr. 30: Nový vzorek s navařeným termočlánkem uvnitř i na povrchu



Obr. 31: Teplotní cyklus v oblasti částečné překrystalizace s porovnáním teplot uvnitř a na povrchu vzorku

Ochlazovací křivka termočlánku uvnitř vzorku nám ukazuje, jaká skutečná teplota je uvnitř, mírné odchýlení v ochlazování vůči požadované teplotě vidíme, ale rychleji vzorek ochladit nešel. Teplotního cyklu se však dosáhlo. Pro vzorek na Obr. 30 si v další kapitole rozebereme metalografickou zkoušku a také se zaměříme na zkoušku tvrdosti a začlenění teplotního cyklu do ARA diagramu pro ocel 12 010.

## 4 Popis dosažených struktur pomocí metalografie a měření tvrdosti

V této kapitole si rozepíšeme metalografickou zkoušku, měření tvrdosti a rozbor diagramu ARA pro daný vzorek. Veškerá měření probíhala se vzorkem, na kterém probíhal teplotní cyklus v oblasti částečné překrystalizace a byly na něm navařeny 2 termočlánky, jeden uvnitř a druhý na povrchu (Obr. 30).

### 4.1 Metalografická zkouška

Metalografické hodnocení dává informace o struktuře materiálu, slouží pro kontrolu výrobních operací, např. pro kontrolu materiálu po svařování, po tepelném zpracování, tváření apod. Poskytuje potřebné informace o stavu materiálu provozovaného zařízení, např. o stupni ovlivnění způsobeného překročením předepsaných provozních teplot. Metalografii lze využít k hodnocení stavu povrchových vrstev materiálu, korozního a erozního napadení materiálu a k získání podkladů pro posouzení vhodnosti použití daného materiálu pro konkrétní prostředí. V neposlední řadě lze hodnotit i čistotu materiálů, zejména ocelí. Metalografie se využívá pro hodnocení kovů i svarů plastů. [11]

V této části si rozepíšeme průběh metalografické zkoušky na vzorku oceli 12 010.

#### 4.1.1 Popis metalografické zkoušky

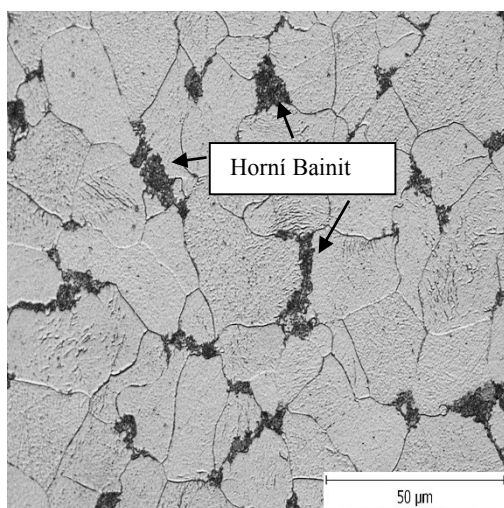
Vzorek jsme nejprve upnuli do kotev (Obr. 32) a poté jsme začali vzorek brousit na brusných kotoučích podle drsnosti (od nejdrsnějšího po nejhladší). Když máme vzorek dostatečně očištěn, nejsou vidět žádné okuje, tak vzorek opláchneme vodou a lihem a vysušíme fénem. Vzorek ještě není dostatečně připraven, a proto musí být ještě očištěn na čistícím kotouči, poté vzorek zase opláchneme vodou, lihem a také kyselinou a usušíme fénem. Takto připravený vzorek dáme pod mikroskop a pozorujeme jeho strukturu. Pokud vzorek ještě není dostatečně vyčištěn (poznáme pod mikroskopem) opakujeme čištění několikrát, až máme vzorek dokonale čistý pro sledování vzniklé struktury.



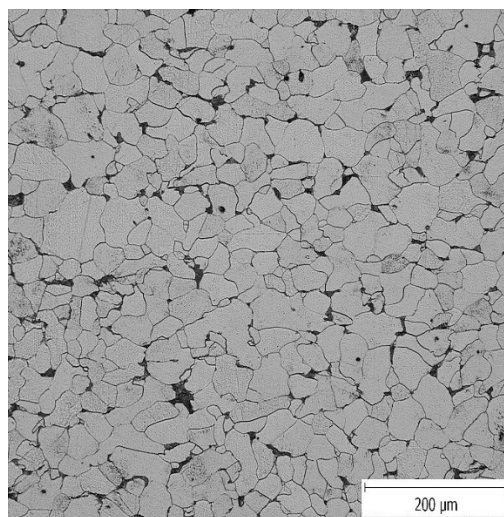
Obr. 32: Vyleštěný vzorek upnutý v kotvách

## 4.1.2 Metalografická struktura vzorku

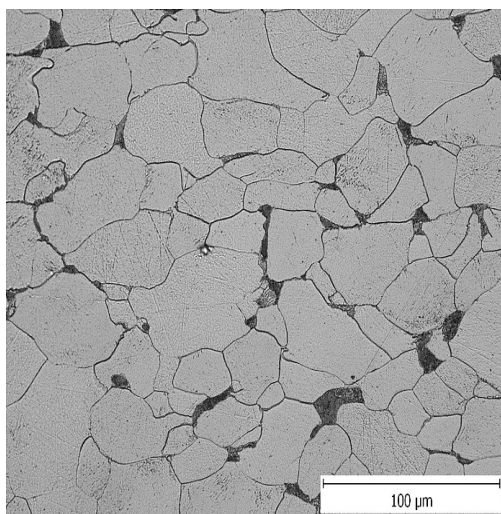
Vzorek máme připraven pro pozorování pod mikroskopem. Na následujících obrázcích uvidíme strukturu, která vznikla v průběhu teplotního cyklu v oblasti částečné překrystalizace, tedy 740°C. Měření struktury probíhalo pod mikroskopem na několika místech vzorku, ve středu a také několik cm od středu pro porovnání vzniklé struktury. Vzorek jsme pozorovali také při různém zvětšení (200x, 500x a 1000x).



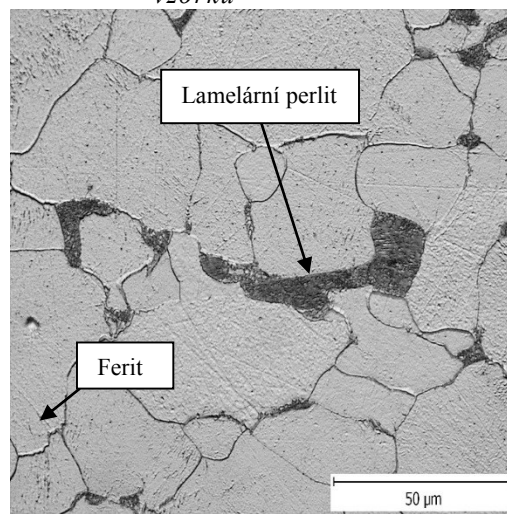
Obr. 33: Zvětšení 1000x ve středu vzorku



Obr. 34: Zvětšení 200x ve středu vzorku



Obr. 35: Zvětšení 500x – 1cm od středu vzorku



Obr. 36: Zvětšení 1000x – 1cm od středu vzorku

Na Obr. 33 Vidíme Ferriticko-Bainitickou strukturu, na Obr. 34, Obr. 35 a Obr. 36 vidíme ferriticko-perlitickou strukturu. Horní Bainit zaujímá jen malé procento a jde vidět pouze ve středu vzorku, kde byl rychle ochlazen vzduchem. Podle ČSN EN ISO 643 je číslo velikosti zrna  $G = 7,5$  a střední průměr zrna  $d_m = 0,0312$  mm. Podíl perlitu vůči feritu jsme spočítali pomocí programu z vyfoceného snímku. Perlit zaujímá 7% vzorku, horní Bainit 2% a tedy zbývajících 91% obsahuje Ferit.

## 4.2 Měření tvrdosti

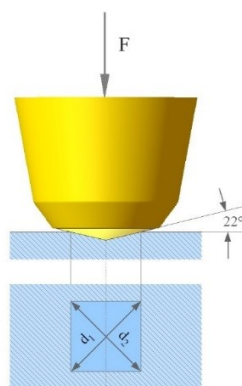
Tvrdot materiálu je společně s pevností a houževnatostí jednou ze základních mechanických vlastností. Tvrdot je definována jako odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa. Metody zkoušení tvrdosti jsou rozdělovány obvykle podle způsobu zatěžování (statické nebo dynamické) a podle typu deformace zkoušeného povrchu (elastické nebo plastické).[12]

Zkoušku tvrdosti jsme prováděli podle metody Vickerse.

### 4.2.1 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Zkouška patří mezi statické zkoušky tvrdosti materiálu. Způsob jejího provedení je popsán a ujednocen normou ČSN EN ISO 6507-1. Princip spočívá ve vnikání zkušebního tělesa – indentoru – do zkoumaného materiálu a následného zjišťování míry deformace tohoto materiálu. Jakožto indentor se v tomto případě používá diamantový čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem  $136^\circ$ , měřítkem tvrdosti materiálu jsou délky dvou úhlopříček vtisknutého jehlanu (Obr. 37).

Vickersova zkouška se označuje HV, je značně univerzální, lze ji použít na tvrdé i měkké materiály. Její výhodou je též to, že výsledná hodnota tvrdosti nezávisí na zatěžovací síle, jelikož vtisky jsou pro různé síly geometricky přibližně stejné.[13]



Obr. 37: Zkouška tvrdosti podle Vickerse [13]

### 4.2.2 Naměřené hodnoty

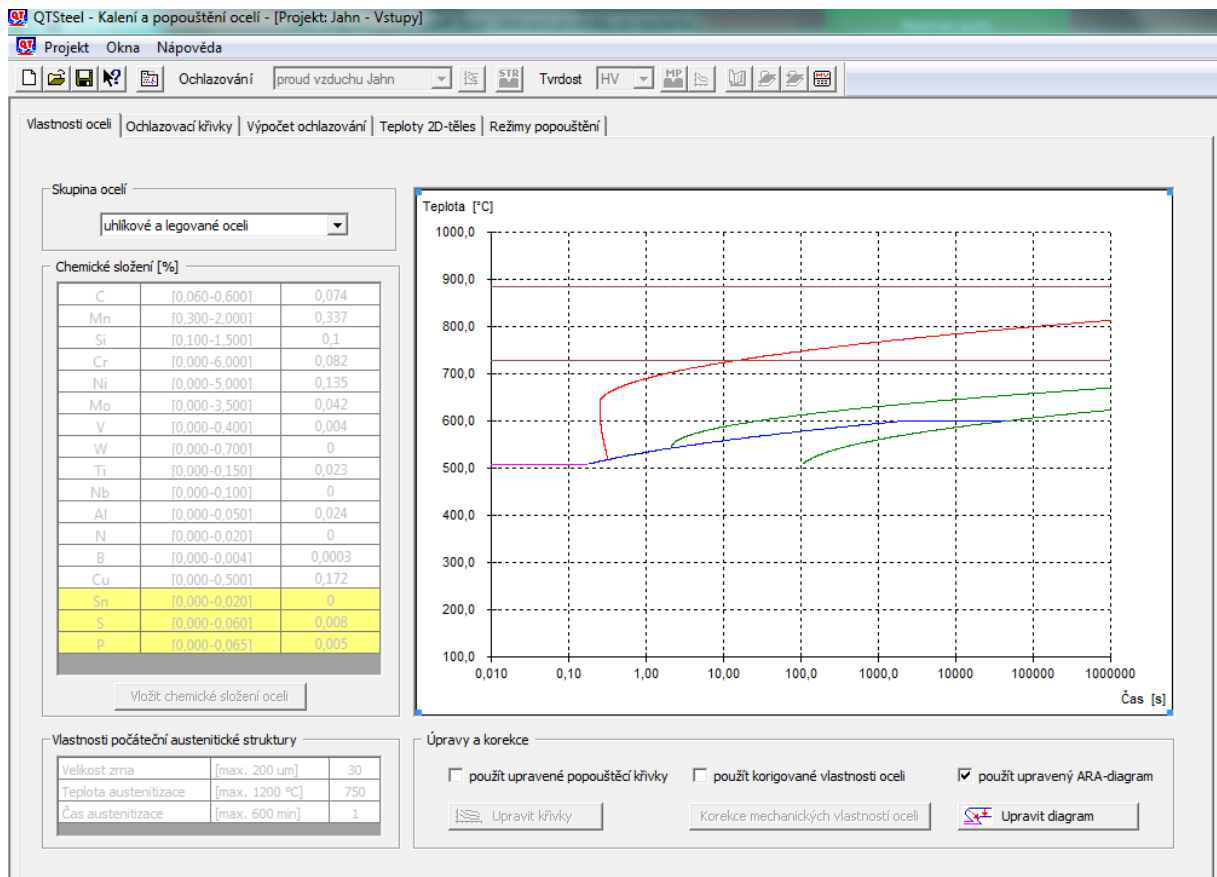
Tvrdot jsme měřili na 3 místech od středu a máme tedy 3 hodnoty, ze kterých jsem udělal průměr (Tabulka 3). Výsledná průměrná tvrdost byla 162 HV10 – 10 znamená zatížení 10 kg.

Tabulka 3: Naměřené hodnoty ze zkoušky tvrdosti

u – uhlopříčka vtisku (mm)	Tvrdot (HV 10)
0,332	168
0,344	157
0,340	160
Průměr:	<b>162</b>

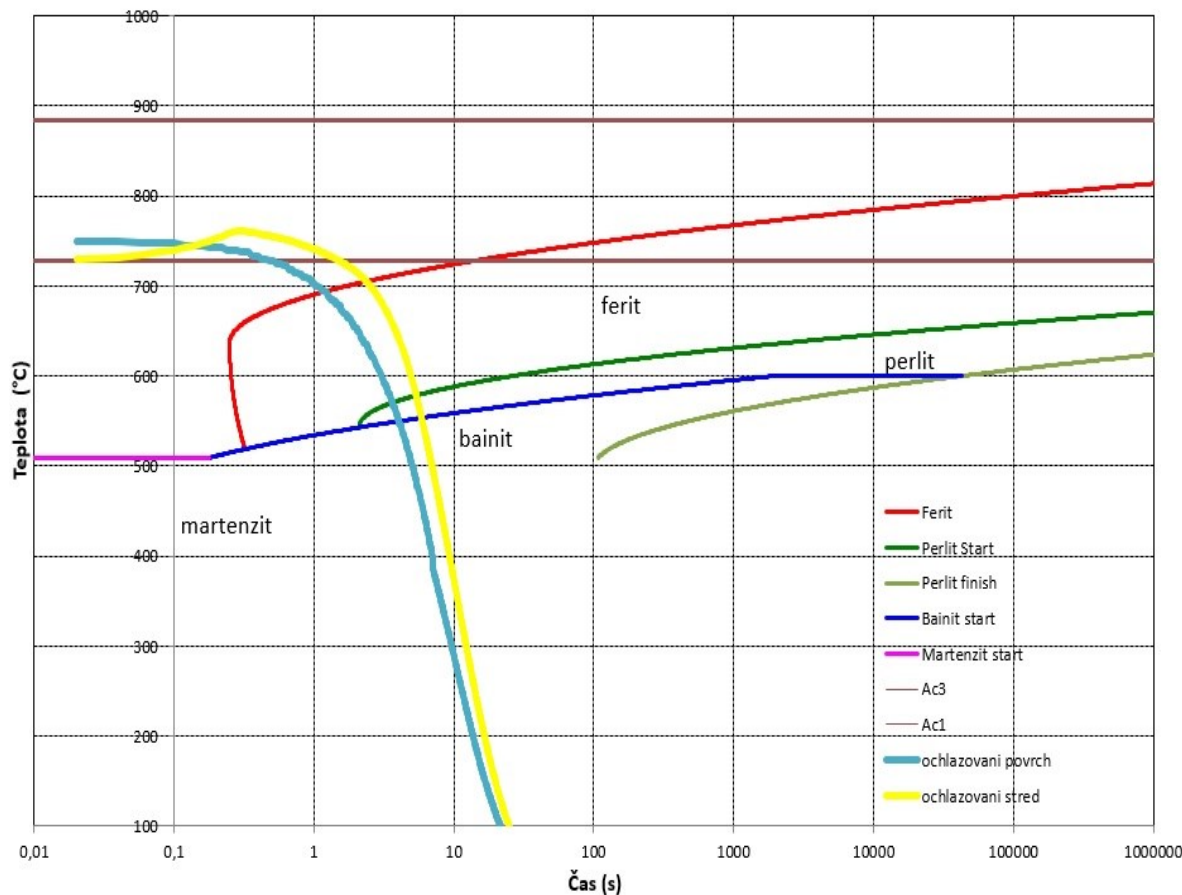
### 4.3 ARA Diagram

Po naměření všech hodnot (metalografická zkouška, tvrdost) můžeme umístit hodnoty do diagramu ARA pro danou ocel. Diagram ARA už jsme si rozebírali v kapitole 1, avšak nyní si ukážeme diagram ARA, který byl vytvořen přímo pro daný vzorek, na kterém probíhal teplotní cyklus. Ara diagram jsme si vytvořili pomocí programu QT Steel 3.1 od firmy ITA Ostrava (Obr. 38).



Obr. 38: Ukázka z programu QT Steel 3.1 pro tvorbu diagramu ARA

Diagram ARA byl vytvořen pro vzorek, který byl ohříván do oblasti částečné překrystalizace (Obr. 31).



Obr. 39: Diagram ARA oceli 12 010 z oblasti částečné překrystalizace

Na Obr. 39 vidíme diagram ARA ze vzorku, na kterém probíhal teplotní cyklus z oblasti částečné překrystalizace. Světle modrá křivka nám znázorňuje chladnutí u termočládku, který byl navařen na povrchu vzorku, žlutá křivka potom chladnutí uvnitř vzorku. Rozdíl v chladnutí byl cca 10%. Z chladnutí vznikla struktura, která se přeměnila z Austenitu na Ferit dále je vidět několika procentní podíl Perlitu a v oblasti okolo 550°C vznikla také struktura horního Bainitu (jen malé procento, horní Bainit jde vidět jen na několika málo místech uprostřed vzorku, je to nejspíš způsobeno rychlým ochlazením důsledkem vzduchových trubíc, které chladily jen prostředek vzorku, kvůli rychlejšímu ochlazení.) Vzniklá struktura je tedy Feriticko-Perlitická s malým obsahem horního Bainitu.



## 5 Vyhodnocení dosažených výsledků

Tato bakalářská práce má hlavní přínos v naměření průběhu teplotních cyklů na teplotním simulátoru. V praktické části byly naměřeny teplotní cykly na vzorku oceli 12 010 z oblasti částečné překrystalizace a pásma normalizace. Teplotní cykly jsou zaznamenány v podobě grafů. Z těchto grafů byly zjištěny vzniklé struktury při fázi ochlazování pro jednotlivé teplotní cykly. Pomocí metalografie jsme zjistili výslednou strukturu po ochlazení vzorku a pomocí zkoušky tvrdosti byla zjištěna tvrdost vzorku. Nakonec byl vytvořen diagram ARA, který znázorňuje výslednou strukturu ochlazovací křivky zkoumaného vzorku.

Tato práce měla také za úkol prověřit funkčnost teplotního simulátoru, který je unikátní v ČR. Teplotní simulátor prokázal svou funkčnost, avšak má problémy v oblasti ochlazování, kdy bez pomoci chlazení stlačeným vzduchem nestačí chladit vzorek, podle požadované teploty - viz Obr. 28: Teplotní cyklus v oblasti normalizace, bez přídavného chlazení. Vodou chlazené čelisti neochladí vzorek dostatečně rychle, řešení by mohlo být ve chlazení Argonem nebo dusíkem, vzorek by poté byl ochlazen dostatečně rychle.

Další věcí, kterou bych ještě zmínil, jsou čelisti, ve kterých je vzorek uchycen. Vzorek, který se ohřeje na 800°C – vznikají na vzorku okraje a tím, jak je pevně uchycen v čelistech se po pár teplotních cyklech v čelistech přilepí a nejde ho dostat pryč – tím se čelisti poškodí. V tomto ohledu by mělo být také řešení a vodou chlazené čelisti, po nějaké době vyměnit (nebo po každém měření dostatečně očistit např. brusným papírem). V programu teplotního simulátoru jde nastavit hodně parametrů a v podstatě pro každý vzorek je nastavení parametrů odlišné (nastavení proudu, napětí, výdrž na dané teplotě atd.). V tomto směru by se mělo nastavení parametrů dobře nastavit, protože pak dochází k nežádaným výsledkům, pokud je program špatně nastaven.

Teplotní simulátor má ještě své mouchy a stále je co doladovat, avšak teplotní cykly, které jsem prováděl, proběhly úspěšně a byla prokázána funkčnost teplotního simulátoru. Dosažené výsledky z modelování teplotních cyklů mohou být použity při dalších měřeních a mohou pomoci studentům, jako návod pro měření na teplotním simulátoru.

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Petru Tomčíkovi, Ph.D. za cenné rady, užitečné připomínky a odborné vedení v průběhu vypracování mé bakalářské práce.

Také chci poděkovat paní Miroslavě Subíkové, která mi pomohla s metalografickou zkouškou na vzorku a dala mi cenné rady při rozboru struktury vzorku. Dále chci poděkovat Ing. Petře Váňové, Ph.D. za její pomoc v oblasti metalografie a za pomoc při vytvoření diagramu ARA.



## Seznam použité literatury

- [1] JECH, Jaroslav. Tepelné zpracování oceli: Metalografická příručka. 4. vyd. Praha 1: SNTL, 1983. [cit. 2014-04-11].
- [2] PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu. 2. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-32. [cit. 2014-04-11].
- [3] Brown Mac – [online]. [cit. 2014-04-11].  
Dostupné z <<http://www.brownmac.com/products/chrome-moly-plate/asme-sa387-and-astm-a387.aspx>>
- [4] Internetová encyklopedie COJECO. [online]. [cit. 2014-04-11] Dostupné z <<http://www.cojeco.cz>>
- [5] KOUKAL, J., ZMYDLENÝ, T. *Svařování I.* skripta VŠB – TUO. Ostrava: VŠB – TUO, 2005. 133 s. ISBN 80-248-0870-6. [cit. 2014-04-20]
- [6] Teplotní cyklus svařování - prezentace. [online]. [cit. 2014-04-11] Dostupné z: [http://www.primat.cz/moje-materialy/detail/93537?\\_fid=hdra#notify](http://www.primat.cz/moje-materialy/detail/93537?_fid=hdra#notify)
- [7] URBAN, V. *Vliv velikosti vneseného tepla na vybrané vlastnosti svaru jemnozrnné oceli* [online]. Brno, 2011. [online]. [cit. 2014-04-11]. Dostupné z: <[https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/7868/DP\\_Urban\\_V.pdf?sequence=1](https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/7868/DP_Urban_V.pdf?sequence=1)>  
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.
- [8] NĚMEC, K. *Vliv vneseného tepla na vlastnosti a strukturu svarového spoje duplexní oceli* [online]. Brno, 2010 [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: <[http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=26902](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=26902)>  
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.
- [9] JECH, D. *Struktura a vlastnosti svarového spoje rotorových ocelí* [online]. Brno, 2012 [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: <[http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=55567](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=55567)>  
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Foret, CSc.
- [10] Technologie I. [online]. [cit. 2014-04-11] Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/ksm/obsah/vyuka/materialy/cvi%C4%8Den%C3%AD8\\_presentation.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/ksm/obsah/vyuka/materialy/cvi%C4%8Den%C3%AD8_presentation.pdf)
- [11] TÜV NORD CZECH [online] [cit. 2014-04-23]  
Dostupné z: <<http://www.tuv-nord.com/cz/cs/laboratore-a-zkusebny/metalograficka-laborator-736.htm>>
- [12] Zkoušky tvrdosti SSSE BRNO [online]. [cit. 2014-04-23]  
Dostupné z: [http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/zkousky\\_tvrdosti.pdf](http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/zkousky_tvrdosti.pdf)>

- [13] Zkouška tvrdosti podle Vickerse. [online]. [cit. 2014-04-25] Dostupné z:  
<[http://cs.wikipedia.org/wiki/Zkou%C5%A1ka\\_tvrdosti\\_podle\\_Vickerse](http://cs.wikipedia.org/wiki/Zkou%C5%A1ka_tvrdosti_podle_Vickerse)>

## Seznam obrázků

OBR. 1: DIAGRAM ARA OCELI 12 050 [8] .....	11
OBR. 2: ARA DIAGRAM "IN SITU" PRO OCEL 12 050[6] .....	13
OBR. 3: TEPLTNÍ CYKLUS V PODHOUSENKOVÉ OBLASTI. ....	15
OBR. 4:VLIV ROSTOUCÍHO ZRNA V ZÁVISLOSTI TEPLoty NA ČASE [6].....	16
OBR. 5: ZÁVISLOST OCHLAZOVÁNÍ $\Delta T_{8/5}$ A RYCHLOSTI CHLADNUTÍ $VR(T)$ NA PRŮBĚHU TEPLTNÍHO CYKLU [7].....	17
OBR. 6:PRŮBĚH TEPLTNÍCH CYKLŮ [8].....	18
OBR. 7:VLIV TEPLTNÍHO ÚČINKU SVAŘOVÁNÍ NA STRUKTURU SVAROVÉHO SPOJE [5] .....	19
OBR. 8: VZOREK Z OCELI 12 010 Z PRAKTICKÉHO MĚŘENÍ .....	22
OBR. 9: POSTUP NAVAŘENÍ TERMOČLÁNKU 1/2.....	23
OBR. 10: POSTUP NAVAŘENÍ TERMOČLÁNKU 2/2.....	23
OBR. 11: NAVAŘENÉ TERMOČLÁNKY NA VZORKU.....	23
OBR. 12: TEPLTNÍ SIMULÁTOR .....	24
OBR. 13: VZOREK V ČELISTECH .....	24
OBR. 14: EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	25
OBR. 15: OPERÁTORSKÁ KONZOLE .....	25
OBR. 16: VZDUCHOVÝ KOMPRESOR .....	25
OBR. 17: PROGRAM TEPLTNÍHO SIMULÁTORU .....	26
OBR. 18: NASTAVENÍ POŽADOVANÉ TEPLoty.....	27
OBR. 19: GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ TEPLTNÍHO CYKLU.....	27
OBR. 20: ČELISTI VZDÁLENY 5CM OD SEBE, BEZ PŘÍDAVNÉHO CHLAZENÍ VZDUCEM .....	28
OBR. 21: VZDÁLENOST ČELISTÍ 1,5 CM OD SEBE S PŘÍDAVNÝM CHLAZENÍM VZDUCEM, VZOREK ZAHŘÁTÝ NA TEPLoty 900°C.....	28
OBR. 22: TEPLTNÍ CYKLUS SVAŘOVÁNÍ V OBLASTI ČÁSTEČNÉ PŘEKRYSTALIZACE .....	29
OBR. 23: NASTAVENÍ HODNOT PRO OBLAST ČÁSTEČNÉ PŘEKRYSTALIZACE V PROGRAMU TEPLTNÍHO SIMULÁTORU .....	29
OBR. 24: TEPLTNÍ CYKLUS V OBLASTI ČÁSTEČNÉ PŘEKRYSTALIZACE BEZ PŘÍDAVNÉHO CHLAZENÍ.....	30
OBR. 25: TEPLTNÍ CYKLUS V OBLASTI ČÁSTEČNÉ PŘEKRYSTALIZACE S PŘÍDAVNÝM CHLAZENÍM .....	30
OBR. 26: TEPLTNÍ CYKLUS SVAŘOVÁNÍ V OBLASTI NORMALIZACE.....	31
OBR. 27: NASTAVENÍ TEPLTNÍCH HODNOT V PROGRAMU PRO OBLAST NORMALIZACE.....	31
OBR. 28: TEPLTNÍ CYKLUS V OBLASTI NORMALIZACE, BEZ PŘÍDAVNÉHO CHLAZENÍ .....	32
OBR. 29: TEPLTNÍ CYKLUS PRO OBLAST NORMALIZACE S PŘÍDAVNÝM CHLAZENÍM .....	32
OBR. 30: NOVÝ VZOREK S NAVAŘENÝM TERMOČLÁNKEM UVNITŘ I NA POVRCHU .....	33
OBR. 31: TEPLTNÍ CYKLUS V OBLASTI ČÁSTEČNÉ PŘEKRYSTALIZACE S POROVNÁNÍM TEPLoty UVNITŘ A NA POVRCHU VZORKU .....	33
OBR. 32: VYLEŠTĚNÝ VZOREK UPNUTÝ V KOTVÁCH.....	34
OBR. 33: ZVĚTŠENÍ 1000x VE STŘEDU VZORKU.....	35
OBR. 34: ZVĚTŠENÍ 200x VE STŘEDU VZORKU.....	35
OBR. 35: ZVĚTŠENÍ 500x – 1CM OD STŘEDU VZORKU .....	35
OBR. 36: ZVĚTŠENÍ 1000x – 1CM OD STŘEDU VZORKU .....	35
OBR. 37: ZKOUŠKA TVRDOSTI PODLE VICKERSE [13] .....	36

OBR. 38: UKÁZKA Z PROGRAMU QT STEEL 3.1 PRO TVORBU DIAGRAMU ARA .....	37
OBR. 39: DIAGRAM ARA OCELI 12 010 Z OBLASTI ČÁSTEČNÉ PŘEKRYSTALIZACE .....	38

## Seznam tabulek

TABULKA 1 : CHEMICKÉ SLOŽENÍ OCELI 12 010 v %.....	14
TABULKA 2: ORIENTAČNÍ ŠÍŘKY JEDNOTLIVÝCH PÁSEM TOO[5] .....	21
TABULKA 3: NAMĚŘENÉ HODNOTY ZE ZKOUŠKY TVRDOSTI .....	36