



# Vliv teplotního cyklu na kinetiku růstu zrna a změnu mechanických vlastností u jemnozrnné oceli S700MC

## Bakalářská práce

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





## Zadání bakalářské práce

# Vliv teplotního cyklu na kinetiku růstu zrna a změnu mechanických vlastností u jemnozrnné oceli S700MC

*Jméno a příjmení:* Šárka Bukovská  
*Osobní číslo:* S16000037  
*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 výroby a způsobem zpevnění jemnozrnných ocelí.
2. Proveďte rešerši v oblasti kinetiky růstu zrna a metod vyhodnocení velikosti zrna.
3. Seznamte se s podstatou a možnostmi teplotně-napětového simulátoru Gleeble.
4. Seznamte se s různými způsoby zkoušení materiálů (měřením tvrdosti, rázovou zkouškou v ohybu a statickou zkouškou tahem).
5. Navrhněte a připravte si testovací vzorky z oceli S700MC pro stanovení křivky kinetiky růstu zrna, experimenty proveďte včetně vyhodnocení.
6. Připravte si testovací vzorky z oceli S700MC pro aplikaci teplotních cyklů, k nimž dochází v TOO, případně cyklů odpovídajících tepelnému zpracování.
7. Proveďte materiálové zkoušky základního materiálu při teplotě 20°C.
8. Aplikujte na vyrobené vzorky v simulátoru Gleeble teplotní cykly a proveďte materiálové zkoušky na těchto vzorcích.
9. Proveďte zhodnocení výsledků a diskuzi.

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



### Seznam odborné literatury:

- [1] KOUKAL, J., D. SCHWARZ a J. HAJDÍK. *Materiály a jejich svařitelnost*. Ostrava: Český svářečský ústav, 2009. ISBN 978-80-248-2025-5.
- [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] NEUMANN, H. *Teorie svařování*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. ISBN: 978-80-7494-171-9.
- [4] AWS Welding Handbook: *Welding Science and Technology*. 9th Ed., Vol.1, 2001.
- [5] Technické normy ČSN pro destruktivní zkoušky (tvrdost HV dle Vickerce, rázová zkouška ohybem, statická zkouška tahem).

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



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

V Liberci 1. listopadu 2018

## Prohlášení

Byla jsem seznámena 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 vědoma 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 vypracovala 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.

11. 6. 2019

Šárka Bukovská

## **Anotace**

Bakalářská práce se zabývá vlivem teplotního cyklu na změnu mechanických vlastností u oceli S700MC, včetně stanovení kinetiky růstu zrna v tepelně ovlivněné oblasti svarů. V teoretické části jsou popsány jemnozrnné oceli, jejich výroba, značení a způsob jejich zpevnění. Dále je popsána kinetika růstu zrna a teplotně napěťový simulátor Gleeble 3500. V experimentální části byla naměřena křivka kinetiky růstu zrna, hodnota aktivační energie, celková exponenciální konstanta a samozřejmě také vliv teplotního cyklu na mechanické vlastnosti oceli ať již s uvažováním volné dilatace vzorku, nebo s vlivem plastické deformace způsobené vlastní nebo vynucenou tuhostí. Naměřené hodnoty byly zpracovány, vyhodnoceny a diskutovány.

## **Klíčová slova**

Jemnozrnné oceli, ocel S700MC, mechanické vlastnosti, teplotní cyklus, Gleeble 3500, zhrubnutí zrna

## **Annotation**

Bachelor thesis is aimed at the effect of temperature cycle on the change of mechanical properties of steel S700MC, including determination of kinetics of grain growth in the heat affected area of the welds. In the theoretical part of the thesis fine-grained steels, their production, signification and their way of hardening are described. Furthermore, kinetics of grain growth and temperature-voltage simulator Gleeble 3500 are described in the thesis. In the experimental part, the curve of kinetics of grain growth, activation energy value, total exponential constant and of course the effect of temperature cycle on mechanical properties of steel was determined (either considering free dilation of the sample, or the effect of plastic deformation caused by either its or forced stiffness). The measured values were processed, evaluated and discussed.

## **Key words**

Fine-grained steels, steel S700MC, mechanical properties, temperature cycle, Gleeble 3500, grain roughing

## **Poděkování**

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu své bakalářské práce doc. Ing. Jaromíru Moravcovi, Ph.D. za jeho odbornou pomoc, poskytnuté materiály k vypracování této bakalářské práce, ochotu pomoci, připomínky a také jeho volný čas, který byl věnován měření a konzultacím ohledně této bakalářské práce. Dále bych ráda poděkovala Ing. Ivě Novákové, Ph.D. za cenné rady a pomoc v laboratořích. Také bych ráda poděkovala své rodině a přátelům za podporu v průběhu studia a při psaní této bakalářské práce.

# Obsah

Seznam použitých zkratek a symbolů .....	9
<b>1. Úvod .....</b>	<b>11</b>
<b>2. Teoretická část .....</b>	<b>12</b>
2.1 Jemnozrnné oceli.....	12
2.1.1 Výroba a značení jemnozrnných ocelí.....	12
2.1.2 Způsob zpevnění jemnozrnných ocelí .....	15
2.2 Hrubnutí zrna, velikost zrna a kinetika růstu zrna .....	18
2.2.1 Způsoby stanovení velikosti zrna .....	20
2.2.2 Stanovení hodnoty aktivační energie Q a konstanty úměrnosti K.....	25
2.3 Svařování jemnozrnných ocelí.....	28
2.3.1 Svařitelnost jemnozrnných ocelí.....	28
2.4 Teplotně napěťový simulátor Gleeble.....	31
2.4.1 Základní části systému Gleeble 3500 .....	31
2.4.2 Získávání dat a řídicí systém simulátoru .....	32
2.4.3 Ohřev a chlazení vzorků, teplotní systém.....	32
2.4.3.1 Měření teploty .....	33
2.4.3.2 Termočlánky a správný výběr termočlánků .....	33
2.4.3.3 Teplotní gradienty ve vzorku.....	34
2.4.3.4 Vliv tvaru, materiálu čelistí a volné délky vzorku .....	35
2.4.4 Simulace dějů probíhajících v tepelně ovlivněné oblasti.....	37
<b>3. Experimentální část .....</b>	<b>39</b>
3.1 Testovaný materiál .....	39
3.2 Stanovení kinetiky růstu zrna.....	41
3.3 Svařování.....	47
3.4 Příprava zkušebních vzorků .....	49

3.5	Vyhodnocení vlivu teplotního cyklu na změnu mechanických vlastností a hodnotu nárazové práce .....	52
3.6	Diskuze výsledků .....	55
<b>4.</b>	<b>Závěr</b> .....	<b>57</b>
	Seznam použité literatury .....	58



## Seznam použitých zkratk a symbolů

$C_{\text{ekv}}$ , CET, CE	– uhlíkový ekvivalent	[-]
HD	– objem difúzního vodíku	[ml·100g <sup>-1</sup> ]
$R_e$	– mez kluzu	[MPa]
$R_m$	– mez pevnosti	[MPa]
$\sigma_0$	– napětí, při kterém dochází k pohybu dislokací	[MPa]
k	– koeficient zpevnění	[MPa·m <sup>1/2</sup> ]
$D_{\text{střední}}$	– střední velikost zrna	[mm]
D	– aktuální velikost zrna	[mm]
$D_0$	– počáteční velikost zrna	[mm]
K	– konstanta úměrnosti	[mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
t	– čas výdrže na dané teplotě	[s]
m	– exponent	[-]
$K_0$	– celková exponenciální konstanta	[mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
Q	– aktivační energie	[kJ·mol <sup>-1</sup> ]
R	– plynová konstanta	[kJ·K <sup>-1</sup> ·mol <sup>-1</sup> ]
T	– teplota výdrže	[K]
$L_x, L_y, L_z$	– skutečné délky úseček	[mm]
A, B	– parametry	[mm]
$l_x, l_y, l_z$	– délky úseček	[mm]
n	– celkový počet zrn	[-]
$n_1$	– počet zrn, kde úsečka prochází celým zrnem	[-]
$n_2$	– počet zrn, kde úsečka projde jen po hranici zrn	[-]
$n_3$	– počet zrn, kde úsečka jen částečně zasáhla	[-]
N	– průměrný počet zrn na 1 mm úsečky	[mm <sup>-1</sup> ]
L	– skutečná délka úsečky	[mm]
$\bar{N}_L$	– průměrný počet zrn na 1 mm úsečky	[mm <sup>-1</sup> ]
$N_x, N_y, N_z$	– průměrný počet zrn na 1 mm úsečky	[mm <sup>-1</sup> ]
$n_s$	– počet zrn odpovídající obdélníku	[-]
$n_1$	– počet zrn, která leží celou plochou v obdélníku	[-]
$n_2$	– počet zrn, kde hranice obdélníku protnou zrno	[-]
$n_3$	– počet zrn, která jsou zasažena rohem obdélníku	[-]
$\bar{d}$	– střední průměr zrna	[mm]

$\bar{a}$	– skutečná střední plocha zrna	[mm <sup>2</sup> ]
G	– číslo velikosti zrna	[-]
K <sub>T</sub>	– exponenciální konstanta	[-]
A <sub>střední</sub>	– skutečná střední plocha zrna	[mm <sup>2</sup> ]
y	– rovnice trendové přímky	[-]
ln (K <sub>T</sub> )	– log. exponenciální konstanty	[mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
C	– konstanta definující sklon trendové přímky	[K]
B	– konstanta	[mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
R <sub>eH</sub>	– horní mez kluzu	[MPa]
R <sub>eL</sub>	– dolní mez kluzu	[MPa]
R <sub>p0,2</sub>	– smluvní mez kluzu určená z trvalých deformací	[MPa]
R <sub>t0,5</sub>	– smluvní mez kluzu určená z celkových deformací	[MPa]
A	– tažnost	[%]
A <sub>g</sub>	– tažnost na mezi pevnosti	[%]
TOO	– tepelně ovlivněná oblast	[-]

## 1. Úvod

Dnešní výrobci, zejména v automobilovém průmyslu, kladou požadavky na vlastnosti konstrukčních materiálů, a proto se materiály stále vylepšují. Požadavkem je, aby materiál splňoval řadu vlastností, které se mnohdy navzájem vylučují. Je požadována vyšší mez kluzu a mez pevnosti, ale je také požadována tažnost a svařitelnost. Dostatečnou tuhost konstrukce při snížení hmotnosti zajišťuje již zmíněná vyšší mez kluzu a mez pevnosti. Tyto protichůdné vlastnosti splňují mikrolegované oceli. [1]

Cena vysoce pevných mikrolegovaných ocelí, tzv. HSLA ocelí, je odvozena od cen základních uhlíkových ocelí, to znamená, že tyto oceli jsou levné a zároveň mají dobré mechanické vlastnosti, a proto u těchto ocelí je výrazná úspora nákladů. Cena mikrolegovaných ocelí je nízká, protože obsah cenu zvyšujících legujících prvků je na velmi nízké hodnotě, zejména do 0,5 %. [2]

Cílem této bakalářské práce je stanovit, jak se projeví vliv teplotního cyklu při svařování a při tepelném zpracování na změnu mechanických vlastností u jemnozrnné oceli S700MC. Teplotní cykly budou na zkušební vzorky simulovány pomocí teplotně-napěťového simulátoru Gleeble a mechanické vlastnosti budou vyhodnocovány na základě statické zkoušky tahem a rázové zkoušky ohybem. Dalším cílem této bakalářské práce bude vyhodnocení zhrubnutí zrna, k němuž dochází ve vysokoohřáté tepelně ovlivněné oblasti.

## 2. Teoretická část

### 2.1 Jemnozrnné oceli

Oceli určené k použití za vyšších hodnot zatížení mohou k získání požadovaných mechanických vlastností používat různé mechanismy zpevnění. Jednou z možností zvýšení pevnostních vlastností je zpevnění hranicemi zrn díky jemnozrnné struktuře. Takto zpevňované oceli jsou pak označovány jako jemnozrnné.

#### 2.1.1 Výroba a značení jemnozrnných ocelí

Jemnozrnné konstrukční oceli jsou od výrobců dodávány ve formě plechů, pásů nebo jako dlouhé výrobky, které jsou válcované za tepla. Při výrobě oceli jsou použity mikrolegury, jako jsou niob, vanad, titan nebo hliník. Obsah těchto mikrolegur určuje výrobce, zejména podle obsahu dusíku a uhlíku a podle požadavků na výsledné mechanické vlastnosti. [3]

Vyšší pevnosti je dosaženo termomechanickým nebo tepelným zpracováním a dobré svařitelnosti je dosaženo nižším obsahem uhlíku a omezením obsahu chromu, molybdenu a mědi. To se projevuje zejména na hodnotě uhlíkového ekvivalentu  $C_{ekv}$ , která bude nízká. [3] Pro výpočet uhlíkového ekvivalentu u jemnozrnných ocelí lze použít rovnici (1), případně pro běžné konstrukční oceli je nejčastěji používán uhlíkový ekvivalent CE doporučený mezinárodní svářečskou institucí – rovnice (2). [4]

$$CET = C + \frac{Mn+Mo}{10} + \frac{Cr+Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad (1)$$

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (2)$$

Rovnice (1) a (2) lze využít pro rozsah chemického složení v hmotnostních procentech legujících prvků, která jsou v tabulce 2.1.1 a pro rozsah CE 0,30 až 0,70. [4]

Na základě spočítaných uhlíkových ekvivalentů se rozhoduje o nutnosti použít předehřevy při svařování. Způsob stanovení velikosti předehřevu definuje norma ČSN EN 1011-2 a umožňuje použít dvě metody A a B. U metody A se teplota předehřevu odečítá z grafů, kde je uvažován vliv obsahu difúzního vodíku, kombinované tloušťky spoje, uhlíkového ekvivalentu a tepelného příkonu. U metody B lze teplotu předehřevu spočítat na základě uhlíkového ekvivalentu CET. Existují však i další rovnice stanovující teplotu předehřevu se zahrnutím vlivu tloušťky svařovaných materiálů, vlivu HD ve svarovém kovu a vlivu tepelného příkonu. [5]

Tab. 2.1.1 Hmotnostní procenta legujících prvků [5]

ČSN EN 1011- 2	C	Si	Mn	Cr	Cu	Ni	Mo	V	Ti	Nb	B
CE	0,05 až 0,25	max. 0,80	max. 1,70	max. 0,90	max. 1,00	max. 2,50	max. 0,75	max. 0,20			
CET	0,05 až 0,25	max. 0,80	0,5 až 1,9	max. 1,5	max. 0,7	max. 2,50	max. 0,75	max. 0,18	max. 0,12	max. 0,06	max. 0,005

Oceli obecně, a tedy i jemnozrnné oceli, je možné označovat různými způsoby. V současnosti je v Evropě využíváno označování podle norem ČSN EN 10027-1 a ČSN EN 10027-2. V prvním případě, podle normy ČSN EN 10027-1, se jedná o označování ocelí a stavbu značek buď podle způsobu jejich použití a mechanických vlastností, nebo podle chemického složení oceli. V druhém případě, podle normy ČSN EN 10027-2, je každé oceli přiřazeno konkrétní číselné označení.

Jak již bylo zmíněno, v systému označování ocelí dle normy ČSN EN 10027-1 se používají dva typy značení: [6]

- značky vytvořené podle použití ocelí a podle jejich fyzikálních a mechanických vlastností
- značky založené na chemickém složení oceli, respektující a uvádějící v názvu hlavní legující prvky a jejich obsahy

U jemnozrnných ocelí je zpravidla používáno značení ocelí podle způsobu použití a mechanických vlastností, a proto zde bude vysvětlen právě tento způsob stavby značek. V takovém případě je značka tvořena třemi skupinami, dle následujícího schématu: [6]

1.skupina	2.skupina	3.a skupina	3.b skupina
(G)X	nnn(n)	X(X)	X(n)

1.skupina znaků je tvořena velkými písmeny a vyjadřuje oblast použití. Je-li před velkým písmenem udáno ještě označení G znamená to, že je ocel vhodná na odlitky.

2.skupina vyjadřuje nejčastěji mechanické vlastnosti jako je mez kluzu, mez pevnosti nebo tvrdost oceli.

3.a skupina popisuje dodatečné vlastnosti oceli, jako je například chemické složení nebo způsob výroby a tepelné zpracování.

3.b skupina je spojena s použitím oceli.

Význam jednotlivých skupin značek je uveden v tabulce 2.1.2. [3,6]

Tab. 2.1.2 Orientační přehled významu jednotlivých skupin označení oceli [3]

Použití oceli	význam 1.sk.	význam 2.sk.	význam 3.a sk.	význam 3.b sk.
ocelové konstrukce	S	min. $R_e$ [MPa] <sup>1)</sup>	KV [J] <sup>2)</sup>	specifikace použití
tlakové nádoby	P	min. $R_e$ [MPa] <sup>1)</sup>	výroba a užití	teploty užití
potrubí	L	min. $R_e$ [MPa] <sup>1)</sup>	výrobní způsob	číslice <sup>3)</sup>
strojní součásti	E	min. $R_e$ [MPa] <sup>1)</sup>	G	tvářitelnost za studena
Kolejnice	R	min. $R_m$ [MPa]	chemické složení	Q = zušlechtěno

<sup>1)</sup>pro nejmenší tloušťku výrobku

<sup>2)</sup>zaručené hodnoty nárazové práce při různých teplotách

<sup>3)</sup>číslice, která označuje třídu požadavků

Další význam přidavných symbolů: [6]

- C – se zvláštní tvářitelností za studena
- F – pro kování
- H – duté profily
- L – pro nízké teploty
- M – termomechanicky válcováno
- N – normalizačně žiháno, normalizačně válcováno
- A – precipitačně vytvrzeno
- Q – zušlechtěno

Při označování ocelí podle normy ČSN EN 10027-2 je stavba označení dle následujícího schématu:

1.nnnn(nn)

kdy první číslo, umístěné před tečkou, je hlavní číslo skupiny materiálu. Číslo 1 je přiřazené ocelím, číslice 2 až 9 mohou být přiřazena jiným materiálům. První dvojčíslí za tečkou značí

číslo skupiny materiálu. Další dvojčíslí udává pořadí oceli ve skupině. Čísla v závorce jsou připravena pro budoucí použití oceli. Pro ocel S700MC je ekvivalent značení dle normy ČSN EN 10027-2 1.8974, kdy číslo 1 značí, že jde o ocel a číslo 89 (v tabulce 2.1.3 označeno tučným písmem) zařazuje ocel do skupiny vysoce pevných svařitelných ocelí. [7]

Tab. 2.1.3 Značení ocelí dle normy ČSN EN 10027-2 [7]

Oceli nelegované			Oceli legované							
Oceli obvyklých jakostí	Oceli jakostní	Oceli uslechlité	Oceli jakostní	Oceli uslechlité						
				Nástrojové oceli	Různé oceli	Chemicky odolné oceli	Konstrukční oceli, oceli na strojní součásti a na tlakové nádoby			
	05 95 Oceli s průměrným % C ≥ 0,25 <0,55 nebo Rm ≥ 500 <700 MPa	15 Nástrojové oceli		25 W-V Cr-W-V	35 Oceli na valivá ložiska	45 Nerezavějící oceli se zvláštními přísadami	55 B Mn-B s <1,65 % Mn	65 Cr-Ni-Mo s <0,4 % Mo + <2,0 % Ni	75 Cr-V s <2,0 % Cr	85 Oceli k nitrlování
	06 96 Oceli s průměrným % C ≥ 0,55 nebo Rm ≥ 700 MPa	16 Nástrojové oceli		26 W Kromě tříd 24, 25 a 27	36 Materiály se zvláštními magnetickými vlastnostmi bez Co	46 Chemicky odolné a žárovevně slitiny Ni	56 Ni	66 Cr-Ni-Mo s <0,4 % Mo + ≥ 2,0 <3,5 % Ni	76 Cr-V s > 2,0 % Cr	86
	07 97 Oceli s vyšším obsahem P nebo S	17 Nástrojové oceli		27 8 Ni	37 Materiály se zvláštními magnetickými vlastnostmi s Co	47 Žárovzdorné oceli s <2,5 % Ni	57 Cr-Ni s <1,0 % Cr	67 Cr-Ni-Mo s <0,4 % Mo + ≥ 3,5 <5,0 % Ni nebo ≥ 0,4 % Mo	77 Cr-Mo-V	87 Oceli neurčené pro tepelné zpracování u odběratele
		18 Nástrojové oceli	08 98 Oceli se zvláštními fyzikálními vlastnostmi	28 ostatní	38 Materiály se zvláštními fyzikálními vlastnostmi bez Ni	48 Žárovzdorné oceli s ≥ 2,5 % Ni	58 Cr-Ni s ≥ 1,0 <1,5 % Cr	68 Cr-Ni-V Cr-Ni-W Cr-Ni-V-W	78	88 Vysocepevné svařitelné oceli
		19	09 99 Oceli pro různé oblasti použití	29	39 Materiály se zvláštními fyzikálními vlastnostmi s Ni	49 Vysoce žárovevné materiály	59 Cr-Ni s ≥ 1,5 <2,0 % Cr	69 Cr-Ni Kromě tříd 57 až 68	79 Cr-Mn-Mo Cr-Mn-Mo-V	<b>89 Vysocepevné svařitelné oceli</b>

1) rozdělení skupin ocelí je v souladu s rozdělením ocelí podle EN 10020  
2) V polích tabulky jsou obsaženy následující údaje:  
a) číslo skupiny oceli (vždy vlevo nahoře);  
b) charakteristické vlastnosti skupiny oceli shrnuté pod příslušným číslem;  
c) pevnost v tahu Rm  
Mezní hodnoty uvedené pro chemické složení a pro pevnost v tahu (Rm) platí jako vodítka.

## 2.1.2 Způsob zpevnění jemnozrnných ocelí

Jemnozrnné oceli jsou podle způsobu výroby a ve shodě s normou ČSN EN 10027-1 označovány písmeny A, Q a M, kde: [6]

- Normalizačně žíhané jemnozrnné oceli se značí písmenem A
- Zušlechtné jemnozrnné oceli se značí písmenem Q
- Termomechanicky zpracované jemnozrnné oceli se označují písmenem M

V této práci je použita ocel, kde je zpevnění dosaženo termomechanickým zpracováním, proto bude dále popsán pouze tento způsob zpevnění oceli.

Při termomechanickém zpracování je kombinovaným účinkem tváření a vysoké teploty dosaženo lepších vlastností oceli a vyšších pevnostních hodnot při zachování dostatečné plasticity materiálu. Intenzivním tvářením v oblasti austenitu je dosaženo jemnějšího zrna, s následným rychlým ochlazením. Výsledné produkty transformace austenitu (martenzit,

bainit, ferit a perlit) budou pak také jemnější. Tvářením lze také dosáhnout zvýšené hustoty dislokací v austenitu. [3,8]

Pod pojem teplotně mechanické (termomechanické) zpracování lze nejčastěji zařadit postupy, které jsou spojené s rychlým ochlazováním deformovaného austenitu. Podle teploty, při níž je austenit plasticky deformován, je rozlišováno vysokoteplotní a nízkoteplotní termomechanické zpracování. [3,8]

### **Vysokoteplotní termomechanické zpracování**

Při tomto způsobu zpracování probíhá deformace v oblasti nad teplotou  $A_{c3}$ . Materiál se zahřeje do oblasti stabilního austenitu a dále následuje deformace, která je při vysokoteplotním zpracování vysoká (40 až 90 %). [3,8] V závislosti na předchozím stupni deformace, dochází ke změně velikosti zrna. Pokud je větší stupeň deformace, zrno bude jemnější. Dále nastávají další dva děje, kterými jsou zpevnění a odpevnění. Při tvářením za tepla proběhne odpevnění okamžitě a tím se materiál nezpevní. Tento děj se nazývá dynamická rekrytalizace. [9] Po deformaci se materiál intenzivně ochlazuje, aby se zachovala jemnozrná struktura. Průběh vysokoteplotního zpracování je znázorněn na obrázku číslo 2.1.1. Parametry, jako je teplota, velikost deformace a rychlost, jsou voleny tak, aby se plasticita austenitu nevyčerpala a rekrytalizace austenitu nebyla úplná. Úplná rekrytalizace je nežádoucí, protože by se ztratilo deformační zpevnění. [3,8]

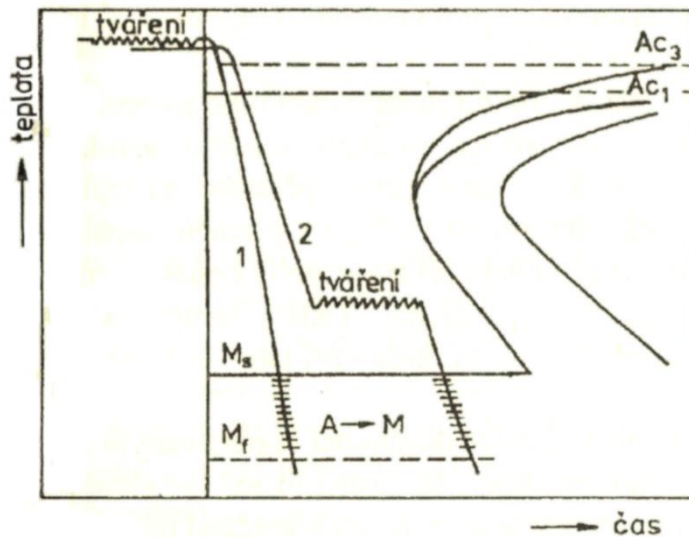
Vysokoteplotní termomechanické zpracování vede ke zvyšování pevnosti, zlepšení vrubové houževnatosti, růstu odolnosti proti únavovému porušení a proti korozi. Tyto vlastnosti lze dosáhnout především vznikem jemnozrné martenzitické struktury a zvýšenou hustotou dislokací. [3,8]

### **Nízkoteplotní termomechanické zpracování**

Při tomto způsobu zpracování probíhá deformace v oblasti metastabilního austenitu. Prvně nastává ohřev do oblasti stabilního austenitu, následně se materiál rychle ochlazuje do oblasti metastabilního austenitu, kde následuje intenzivní deformace, která je vyšší než u vysokoteplotního termomechanického zpracování. Po deformaci se materiál opět intenzivně ochlazuje a popouští při nízkých teplotách. Průběh nízkoteplotního zpracování je také znázorněn na obrázku číslo 2.1.1. Teplota, velikost a způsob deformace a rychlost je opět zvolena tak, aby se plasticita austenitu nevyčerpala. [3,8]



Při nízkoteplotním termomechanickém zpracování je růst pevnosti výraznější než u vysokoteplotního, výsledná pevnost je nejvíce ovlivněna stupněm deformace. Nízkoteplotní termomechanické zpracování vede k růstu vrubové houževnatosti a k růstu odolnosti proti únavě. Tyto následky zpracování jsou spojeny, stejně jako u vysokoteplotního termomechanického zpracování, s jemnozrnnou martenzitickou strukturou a vysokou hustotou dislokací. [3,8]



Obr. 2.1.1 Průběh vysokoteplotního (1) a nízkoteplotního (2) zpracování [3]

## 2.2 Hrubnutí zrna, velikost zrna a kinetika růstu zrna

Při ohřevech na vysoké teploty dochází v materiálu ke změnám majících vliv na změnu mechanických vlastností oceli. Mezi takové změny patří například rozpouštění či hrubnutí precipitačních částic, nebo růst zrna. Při ochlazování pak zpravidla dochází také ke strukturálním změnám. Strukturální změny jsou největší v oblasti, kde došlo k ohřevu materiálu nad teplotu  $A_{c3}$ . Růst zrna je nejvíce závislý na teplotě, na kterou je zkušební vzorek ohříván a na následné délce výdrže na této teplotě. K růstu zrn dochází například i při pokojové teplotě, ale růst je velmi pomalý, v řádu desítek až stovek let. Při svařování dochází k nejintenzivnějšímu růstu zrna blízko hranice ztavení, tedy při teplotách blížících se teplotě solidu. Obecně však dochází k rychlejšímu růstu zrna již při teplotách převyšujících 900 °C. Růst zrna je ale také omezen různými faktory, jako jsou například další částice, které jsou v materiálu obsaženy. Příkladem těchto částic mohou být precipitáty, oxidy, sulfidy a jiné fáze typu přesycených tuhých roztoků. Tyto částice zabraňují pohybu hranic zrn. [10,11]

Velikost zrna ovlivňuje řadu materiálových vlastností. Ovlivňuje pevnostní a křehkolemové vlastnosti, únavovou a creepovou odolnost, ale také průběh transformačních pochodů. Významný materiálový parametr je mez kluzu, kterou velikost zrna zásadně ovlivňuje. Příklad vlivu velikosti zrna na změnu meze kluzu udává Hall-Petchova rovnice (3). Pokud zrno zhrubne, dochází ke snížení plasticity, vrubové houževnatosti a částečně i ke snížení pevnostních vlastností. [10,11]

$$R_e = \sigma_o + k \cdot D_{střední}^{-1/2} \quad (3)$$

Kde:

$R_e$	– mez kluzu	[MPa]
$\sigma_o$	– napětí, při kterém dochází k pohybu dislokací	[MPa]
$k$	– koeficient zpevnění	[MPa·m <sup>1/2</sup> ]
$D_{střední}$	– střední velikost zrna	[mm]

Hall-Petchova rovnice (3) popisuje, jak ovlivňuje velikost zrna již zmíněnou mez kluzu, kde  $\sigma_o$  je napětí, při kterém dochází k pohybu dislokací,  $D_{střední}$  je střední velikost zrna a  $k$  je koeficient zpevnění, který je pro každý materiál charakteristický. [10,11]

Podstata růstu zrna je zapříčiněna tím, že menší zrna jsou pohlcována rostoucími zrny a tím celkový počet zrn klesá a dochází k hrubnutí zrna v materiálu. Růst zrn neznamená

srůstání zrn, ale k růstu dochází pohybem hranic zrn, kde se směr pohybu může měnit, protože pohyb hranic je přerušovaný. Růstem zrn se postupně zvyšuje průměrná velikost zrna. Základní výpočet ideálního růstu zrna vychází z rovnice (4),

$$D^2 - D_0^2 = Kt \quad (4)$$

kde: [11]

D	– aktuální velikost zrna	[mm]
D <sub>0</sub>	– počáteční velikost zrna	[mm]
K	– konstanta úměrnosti	[mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
t	– čas výdrže na dané teplotě	[s]

Rovnici ideálního růstu zrna lze použít, pokud v materiálu nejsou žádné překážky, které by zpomalovaly kinetiku růstu zrna a růst zrna je tak řízen pouze difúzí. V případech, kdy existují faktory, které kinetiku růstu zrna zpomalují, rovnice ideálního růstu zrna je zobecněna dosazením exponentu m, jak je zřejmé z rovnice (5). [11]

$$D^m - D_0^m = Kt \quad (5)$$

Kde:

m	– exponent	[-]
---	------------	-----

V rovnici (5) je m exponent, který leží v rozmezí hodnot 2 až 5. Pokud je růst zrna řízen difúzí, tak m=2 a rovnice se rovná základnímu výpočtu ideálního růstu zrna. Pokud se exponent rovná 3, růst zrna je řízen difúzí společně s precipitační fází v rostoucích zrnech. Exponent je roven 4, pokud se projevuje společný účinek difúze podél hranic zrn a precipitace. Exponent se rovná 5, pokud je růst zrna ovlivněn především precipitací. [11]

Konstanta úměrnosti K je veličina, která je charakteristická pro každý materiál. Způsob výpočtu konstanty K a vztah mezi konstantou K a teplotou T, při které k růstu zrna dochází, popisuje rovnice (6), [11]

$$K = K_0 e^{-\frac{Q}{RT}} \quad (6)$$

kde: [11]

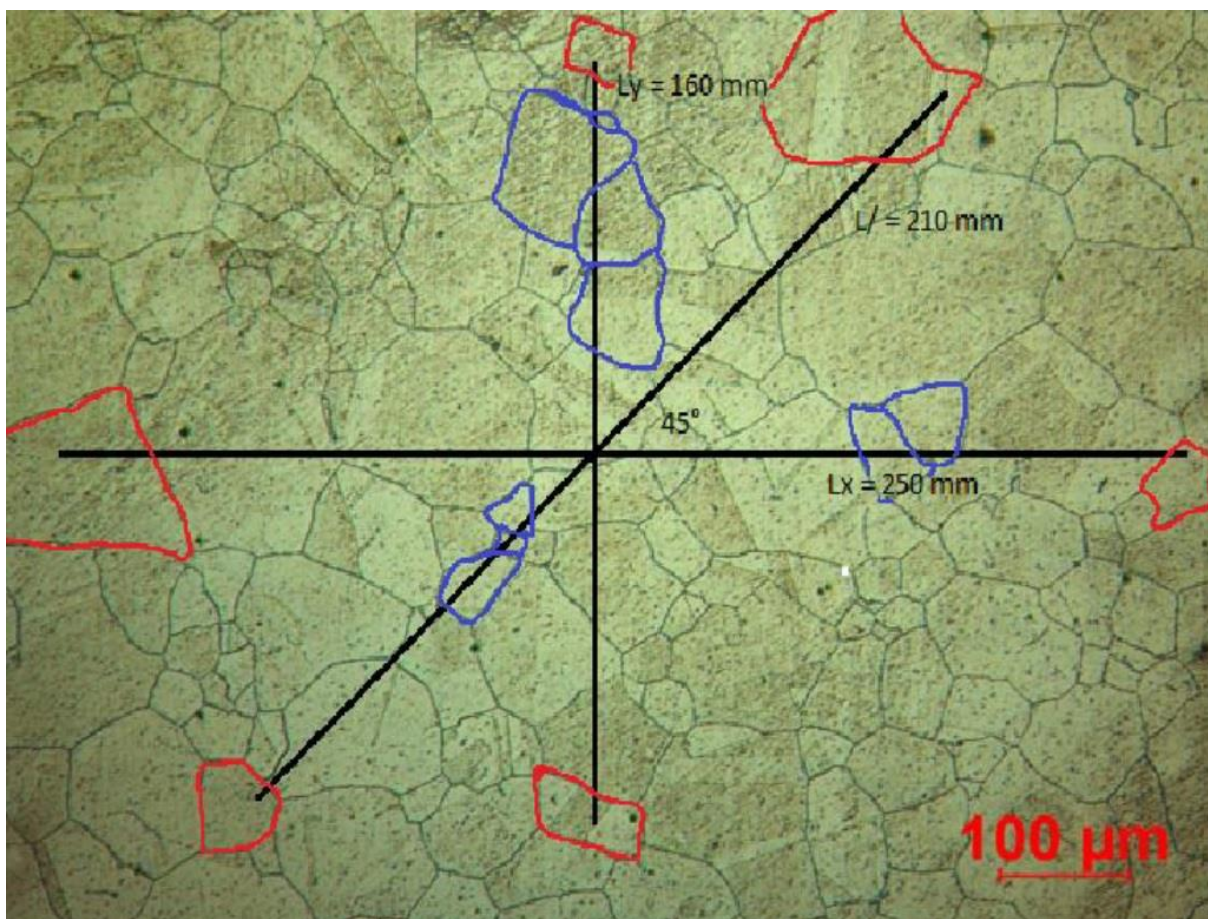
K	– konstanta úměrnosti	$[\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
$K_0$	– celková exponenciální konstanta	$[\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
Q	– aktivační energie	$[\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}]$
R	– plynová konstanta	$[\text{kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}]$
T	– teplota výdrže	[K]

### 2.2.1 Způsoby stanovení velikosti zrna

Způsob vyhodnocení velikosti zrna lze realizovat pomocí různých metod. Tyto metody se dělí na přímé a nepřímé. Do přímých se řadí metoda porovnávací, nebo-li metoda komparační. Nepřímé metody jsou nejčastěji zastoupeny lineární průsečikovou metodou a Jefferiho planimetrickou metodou. Vyhodnocení lze ale provést také s využitím speciálního softwaru určeného pro optickou i elektronovou mikroskopii. Ve všech případech je však vyhodnocení realizováno v souladu s normou ČSN EN ISO 643. [11]

Metoda komparačního porovnání je přímá metoda vyhodnocení, je nejrychlejší, ale zároveň je nejméně přesná. U této metody je určováno pouze číslo velikosti zrna G, ale ne přesná velikost zrna, což je jedna z nevýhod této metody. Další nevýhodou je vliv lidského faktoru, zejména pokud vzorek je na rozhraní dvou skupin a každý se může rozhodnout jinak. Komparační metoda spočívá v porovnání 100x zvětšeného reálného vzorku s normovanými velikostmi zrna. Tento způsob hodnocení je navíc vhodný pouze pro rozmezí velikosti zrna odpovídající skupinám G-1(00) až G10. [11]

Mezi nepřímé metody vyhodnocení velikosti zrna se dá zařadit lineární průsečiková metoda a Jefferiho planimetrická metoda. Z důvodu jednoduchosti a celkem dobré přesnosti je nejčastěji používána lineární průsečiková metoda. Tato metoda je mnohem přesnější než metoda komparační. Velikost zrn je u této metody určena pomocí definovaných úseček, které jsou vkresleny do pořízených snímků struktury vzorků. Při vyhodnocování jsou z důvodu deformace zrn pouze v jednom směru použity alespoň 3 úsečky. Každá z úseček je jinak orientována a při lineární průsečikové metodě je hodnocen počet zrn, který úsečky protnuly. Aby se eliminovala nepřesnost měření, délka úseček je volena tak, aby úsečky protnuly co největší počet zrn. Na obrázku číslo 2.2.1 je ukázán způsob vyhodnocení velikosti zrna lineární průsečikovou metodou pomocí 3 úseček. [11]



Obr. 2.2.1 Stanovení velikosti zrna pomocí lineární průsečkové metody [11]

Délky úseček odpovídají hodnotám  $l_x$ ,  $l_y$ ,  $l_c$ . Tyto délky úseček jsou přepočítávány na skutečné délky úseček na reálném vzorku. K přepočtu se definuje parametr B, který odpovídá měřítku na snímku v milimetrech a parametr A, který odpovídá skutečné délce měřítka na vzorku. K výpočtu skutečných délek úseček jsou použity rovnice (7), (8) a (9). [11]

$$L_x = \frac{A \cdot l_x}{B} \quad (7)$$

$$L_y = \frac{A \cdot l_y}{B} \quad (8)$$

$$L_c = \frac{A \cdot l_c}{B} \quad (9)$$

Kde: [11]

$L_x, L_y, L_c$  – skutečné délky úseček [mm]

A, B – parametry [mm]

$l_x, l_y, l_c$  – délky úseček [mm]

Pro každou úsečku se určuje počet protnutých zrn podle dohodnutých podmínek. Pokud úsečka prochází celým zrnem, tak je takové zrno počítáno jako celek a toto číslo je označeno  $n_1$ . Pokud úsečka projde pouze po hranici zrna, takové zrno je počítáno jako polovina celku a tato hodnota je označena  $n_2$ . Zrna na okrajích úsečky, do kterých úsečka jen částečně zasáhla, jsou počítána jako polovina celku a tato hodnota je označena  $n_3$ . Celkový počet zrn se vypočte podle rovnice (10). [11]

$$n = n_1 + \frac{n_2}{2} + \frac{n_3}{2} \quad (10)$$

Kde: [11]

$n$	– celkový počet zrn	[-]
$n_1$	– počet zrn, kde úsečka prochází celým zrnem	[-]
$n_2$	– počet zrn, kde úsečka projde jen po hranici zrn	[-]
$n_3$	– počet zrn, kde úsečka jen částečně zasáhla	[-]

Dále je počítán průměrný počet úseků  $N$ , který je vztažen na 1 mm úsečky. Výpočet je prováděn podle rovnice (11),

$$N = \frac{n}{L} \quad (11)$$

kde:

$N$	– průměrný počet zrn na 1 mm úsečky	[mm <sup>-1</sup> ]
$n$	– celkový počet zrn	[-]
$L$	– skutečná délka úsečky	[mm]

Je také třeba vypočítat průměrný počet úseků na 1 mm délky úsečky, což je vypočteno dle rovnice (12). [11]

$$\bar{N}_L = \sqrt[3]{N_x \cdot N_y \cdot N_z} \quad (12)$$

Kde: [11]

$\bar{N}_L$	– průměrný počet zrn na 1 mm úsečky	[mm <sup>-1</sup> ]
$N_x, N_y, N_z$	– průměrný počet zrn na 1 mm úsečky	[mm <sup>-1</sup> ]

Na základě tohoto výpočtu lze stanovit střední velikost zrna v souladu s normou ČSN EN ISO 643, jak ukazuje tabulka 2.2.1. Déle také lze stanovit střední průměr  $\bar{d}$ . [11,12]

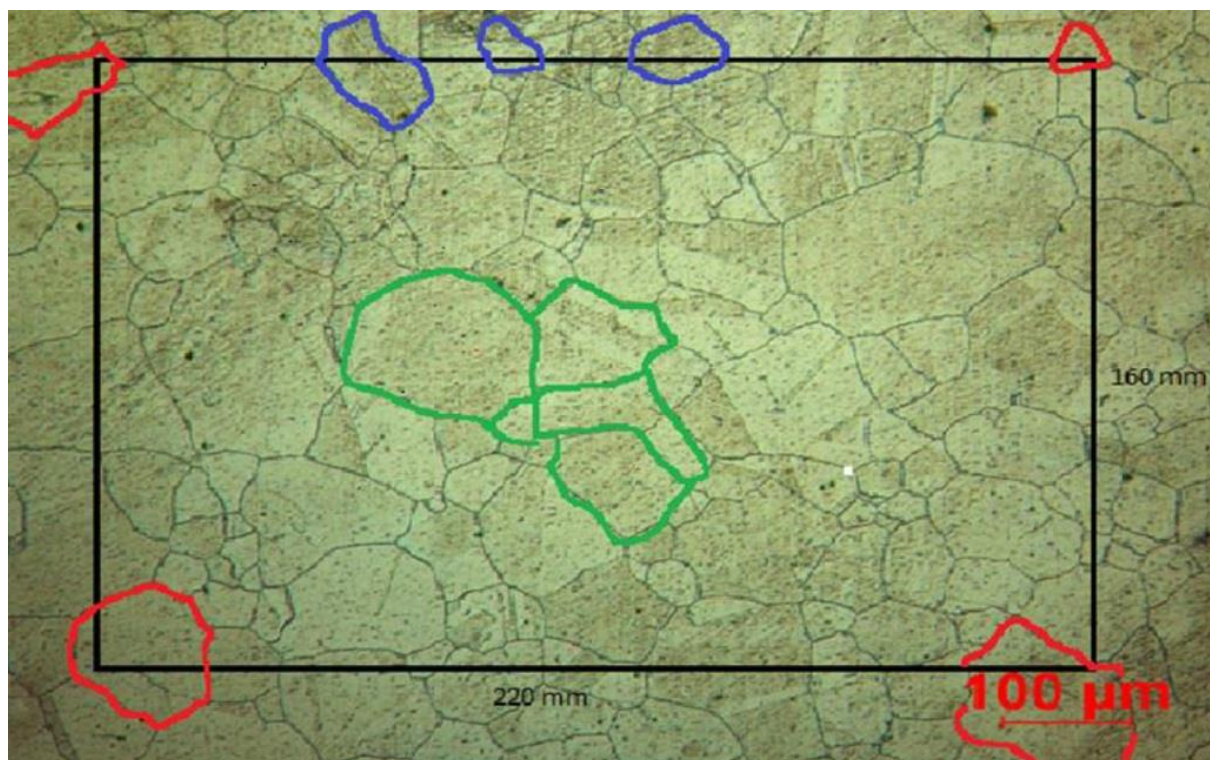
Tab. 2.2.1 Hodnocení počtu zrn ve vztahu k různým parametrům [12]

Číslo velikosti zrna	Počet zrn na milimetr čtvereční			Střední průměr zrna	Střední plocha zrna	Průměrná délka zachyceného úseku	Průměrný počet úseků na milimetr měřící čáry
	M						
	G	Jmenovitá hodnota	Mezní hodnoty				
od			Do				
				$\bar{d}$ mm	$\bar{a}$ mm <sup>2</sup>	$l$ mm	$\bar{N}_L$
-7	0,0625	0,046	0,092	4,000	16,0	3,577	0,279
-6	0,125	0,092	0,185	2,828	8,0	2,529	0,395
-5	0,25	0,185	0,37	2,000	4,0	1,788	0,559
-4	0,50	0,37	0,75	1,414	2,0	1,265	0,790
-3	1	0,75	1,5	1,000	1,0	0,894	1,118
-2	2	1,5	3	0,707	0,5	0,632	1,582
-1(00)	4	3	6	0,500	0,25	0,447	2,237
0	8	6	12	0,354	0,125	0,320	3,125
1	16	12	24	0,250	0,0625	0,226	4,42
2	32	24	48	0,177	0,0312	0,160	6,25
3	64	48	96	0,125	0,0156	0,113	8,84
4	128	96	192	0,0884	0,00781	0,080	12,5
5	256	192	384	0,0625	0,00390	0,0566	17,7
6	512	384	768	0,0442	0,00195	0,0400	25,0
7	1 024	768	1 536	0,0312	0,00098	0,0283	35,4
8	2 048	1 536	3 072	0,0221	0,00049	0,0200	50,0
9	4 096	3 072	6 144	0,0156	0,000244	0,0141	70,7
10	8 192	6 144	12 288	0,0110	0,000122	0,0100	100
11	16 384	12 288	24 576	0,0078	0,000061	0,00707	141
12	32 768	24 576	49 152	0,0055	0,000030	0,00500	200
13	65 536	49 152	98 304	0,0039	0,000015	0,00354	283
14	131 072	98 304	196 608	0,0028	0,0000075	0,00250	400
15	262 144	196 608	393 216	0,0020	0,0000037	0,00170	588
16	524 288	393 216	786 432	0,0014	0,0000019	0,00120	833
17	1 048 576	786 432	1 572 864	0,0010	0,00000095	0,00087	1 149

**Poznámka: Tato tabulka uvádí hodnoty mezi různými parametry rovnoosých zrn.**



Další z nepřímých metod je planimetrická metoda. Tato metoda je nejpřesnější, protože touto metodou lze přesně stanovit střední plochu zrna  $\bar{a}$  a na základě této plochy lze také stanovit střední průměr zrna  $\bar{d}$ . Při planimetrické metodě je velikost zrna určována pomocí uzavřeného obrazce, který může být libovolného tvaru, ale je upřednostňován tvar obdélníku, ukázaný na obrázku číslo 2.2.2. [11]



Obr. 2.2.2 Zobrazení obrazce pro vyhodnocení pomocí planimetrické metody [11]

Při určování velikosti zrna je potřeba znát počet zrn, která jsou umístěna uvnitř a po krajích obrazce, velikost obrazce je zvolena tak, aby počet zrn uvnitř obrazce byl alespoň 50. Také při této metodě jsou počítány skutečné délky stran obdélníku, výpočty jsou dle rovnic (7) a (8). Dále se z vypočtených skutečných délek stran obdélníku vypočte skutečná plocha obdélníku. Následně se stanovuje příslušný počet zrn odpovídající obdélníku  $n_s$ . Při vyhodnocení jsou použita pravidla podobná jako u lineární průsečíkové metody. Pokud je zrno celou svojí plochou uvnitř obdélníku, tak je počítáno jako jeden celek, tato hodnota je označena  $n_1$ . Pokud hranice obdélníku protnou zrno, počítá se takové zrno jako polovina celku, tato hodnota je označena  $n_2$ . Pokud je zrno zasaženo rohem obdélníku, počítá se toto zrno jako čtvrtina celku a tato hodnota je označena jako  $n_3$ . Celkový adekvátní počet zrn je dán rovnicí (13). [11]



$$n_s = n_1 + \frac{n_2}{2} + \frac{n_3}{4} \quad (13)$$

Kde: [11]

$n_s$	– počet zrn odpovídající obdélníku	[-]
$n_1$	– počet zrn, která leží celou plochou v obdélníku	[-]
$n_2$	– počet zrn, kde hranice obdélníku protnou zrno	[-]
$n_3$	– počet zrn, která jsou zasažena rohem obdélníku	[-]

Skutečná střední plocha zrna  $\bar{a}$  u planimetrické metody je stanovena jako podíl adekvátního počtu zrn a skutečné plochy obdélníku. Dle rovnice (14) lze stanovit střední průměr zrna. [11]

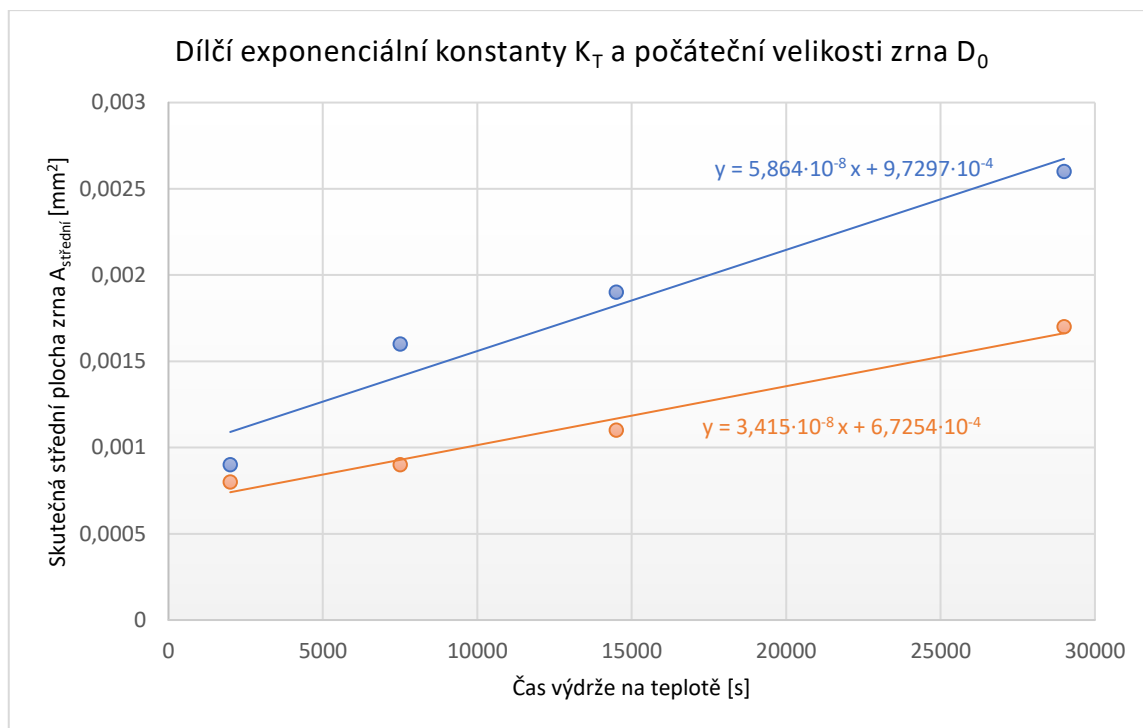
$$\bar{d} = \sqrt{\bar{a}} \quad (14)$$

Kde: [11]

$\bar{d}$	– střední průměr zrna	[mm]
$\bar{a}$	– skutečná střední plocha zrna	[mm <sup>2</sup> ]

### 2.2.2 Stanovení hodnoty aktivační energie Q a konstanty úměrnosti K

K určení hodnoty aktivační energie Q, kterou je potřeba znát ke stanovení růstu zrna, a teplotní závislosti konstanty úměrnosti K je potřeba mít vzorky pro alespoň dvě různé teploty a alespoň tři různé výdrže na těchto teplotách, tedy minimální počet vzorků je 6. Takto bude ale získána pouze velmi hrubá hodnota aktivační energie Q. Mnohem přesnější je vycházet alespoň z 9, lépe však z 12 vzorků teplotně exponovaných za různých podmínek. V případě intenzivního tváření vzorku a použití průsečíkové metody je vhodné pro každou dvojici parametrů (teplota, doba výdrže) na každém vzorku stanovit střední průměr zrna pro příčný a pro podélný směr, kde se v každém uvažovaném směru vyhodnocují dvě a více míst. Více míst se vyhodnocuje proto, aby se vyloučil vliv heterogenity materiálu v daném místě. K vyhodnocování budou použity reálně změřené hodnoty, jako jsou skutečná střední velikost zrna a průměrná hodnota skutečné střední velikosti zrna. Pro získání hodnot  $D_0$  (což lze definovat jako velikost zrna v čase  $t = 0$  s, po aplikaci teplotního cyklu s maximální teplotou odpovídající expoziční teplotě) a  $K_T$  (což je exponenciální konstanta pro danou expoziční teplotu) byl vytvořen graf, do kterého jsou zaneseny hodnoty skutečné střední plochy zrna v závislosti na čase. Vše je znázorněno na obrázku číslo 2.2.3. [11]



Obr. 2.2.3 Zobrazení závislosti skutečné střední plochy zrna  $A_{středni}$  na čase

V grafu je vidět trendová přímka a její rovnice, která vyjadřuje danou expoziční teplotu. Ze sklonu trendové přímky lze odečíst hodnotu  $K_T$  a také  $D_0$  pro příslušnou expoziční teplotu, kde byl čas výdrže  $t = 0$  sekund. Pro stanovení celkové exponenciální konstanty  $K_0$  a aktivační energie  $Q$  je potřeba mít další hodnoty, hodnoty přirozeného logaritmu dílčích exponenciálních konstant  $K_T$  a dále převrácené hodnoty expozičních teplot. Díky těmto hodnotám, které budou použity v dalším výpočtu, je možné stanovit hodnotu aktivační energie  $Q$  a celkovou exponenciální konstantu  $K_0$ . Opět jsou tyto hodnoty vyneseny do grafu, který je na obrázku číslo 2.2.4, dále je díky tomu vytvořena trendová přímka, která je popsána rovnicí (15),

$$y = C \cdot x + B \quad (15)$$

kde:

- C – konstanta definující sklon trendové přímky [K]
- B – konstanta [mm<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>]

kde C je konstanta, která definuje sklon trendové přímky. Konstanta C a plynová konstanta R jsou využity pro výpočet aktivační energie Q podle rovnice (16). [11]

$$Q = -(2,3 \cdot R \cdot C) \quad (16)$$

Kde: [11]

Q	– aktivační energie	[J·mol <sup>-1</sup> ]
R	– plynová konstanta	[J·K <sup>-1</sup> ·mol <sup>-1</sup> ]
C	– konstanta definující sklon trendové přímky	[K]

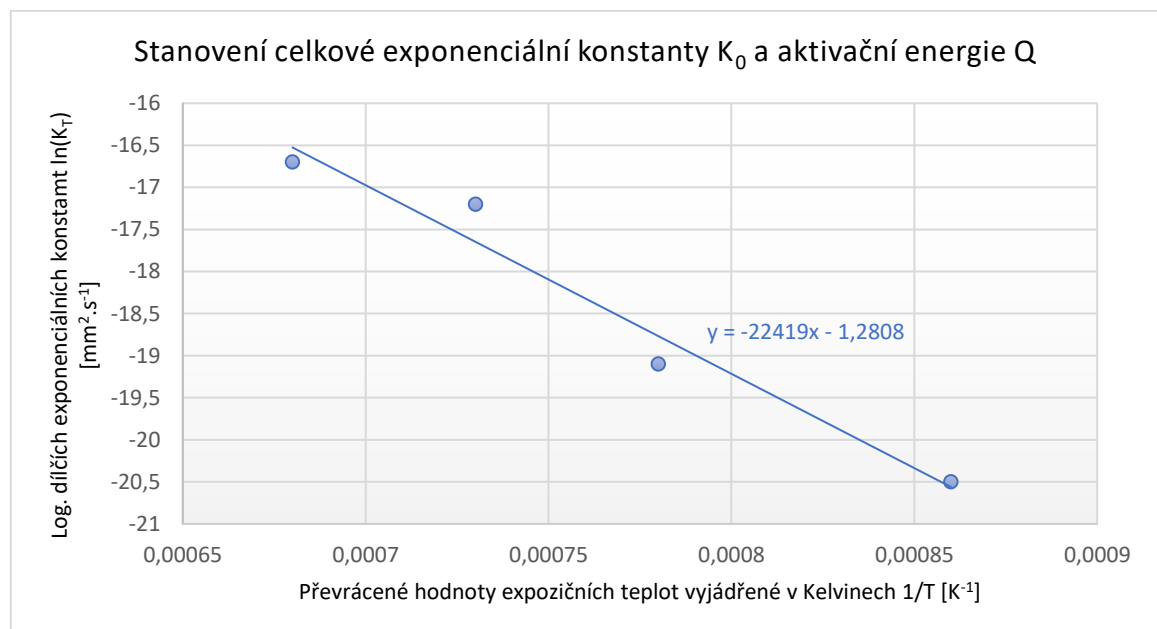
Konstanta B z rovnice (15) je dále použita ve výpočtu hodnoty celkové exponenciální konstanty K<sub>0</sub> podle rovnice (17). [11]

$$K_0 = e^B \quad (17)$$

Kde: [11]

K <sub>0</sub>	– celková konstanta úměrnosti	[mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
B	– konstanta	[mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ]

Uvedené údaje jsou dle rovnice (6) použity pro definování křivky kinetiky růstu zrna. Křivka kinetiky růstu zrna je teplotní závislost konstanty úměrnosti K. Pro lepší znázornění křivky lze také použít zobrazení s logaritmickou souřadnicí ln K. [11]



Obr. 2.2.4 Graf pro získání celkové exponenciální konstanty K<sub>0</sub> a aktivační energie Q

## 2.3 Svařování jemnozrnných ocelí

Jemnozrnné oceli lze svařovat metodami 111, 121, 135 a 136, kde metoda 111 značí ruční svařování obalenou elektrodou, metoda 135 je svařování tavící se elektrodou v aktivním ochranném plynu (MAG), metoda 136 je také metoda MAG, ale svařuje se plněnou elektrodou v aktivním ochranném plynu a metoda 121 je svařování pod tavidlem drátovou elektrodou. Normalizačně žáhané, zušlechťené a termomechanicky zpracované jemnozrnné oceli se svařují metodami 111, 135, 136. Oceli, které jsou termomechanicky zpracované, jsou svařovány nejlépe bez přehřevu, aby účinek termomechanického zpracování v tepelně ovlivněné oblasti svarového spoje byl co nejméně ovlivněn. [4,13]

### 2.3.1 Svařitelnost jemnozrnných ocelí

Důležitá technologická vlastnost materiálu je svařitelnost, což je schopnost vytvořit svarový spoj požadované jakosti. Svařitelnost ovlivňuje především materiál, který je svařován, ale také technologický postup svařování, přídavný materiál nebo například množství tepla, které je přivedeno do svaru. Při svařování vzniká ve svařovaném materiálu vnitřní napětí a změny ve struktuře. Tyto nepříznivé účinky vznikají v důsledku místního, nerovnoměrného ohřevu na vysoké teploty. [14] Všechny materiály se s těmito nepříznivými účinky nevyrovňají, a proto ne všechny materiály (oceli) jsou vhodné pro svařování. Oceli se dělí do skupin a podskupin podle TNI CEN ISO/TR 15608. Přehled vybraných skupin a podskupin je v tabulce číslo 2.3.1. [10]

V tabulce jsou uvedeny pro příklad pouze první tři skupiny, protože v těchto skupinách jsou zařazeny jemnozrnné oceli.

Při svařování jemnozrnných mikrolegovaných ocelí je očekáván růst zrn v tepelně ovlivněné oblasti. S růstem zrn souvisí následný pokles plastických vlastností v tepelně ovlivněné oblasti svaru. Jemnozrnné oceli jsou svařovány především bez přehřevu, ale v případě nutnosti postačí přehřev v rozmezí teplot 100 až 150 °C. U mikrolegovaných termomechanicky zpracovaných ocelí je očekáváno snížení tvrdosti v již zmíněné tepelně ovlivněné oblasti. Snížení tvrdosti je řešeno snížením měrného tepelného příkonu do svaru. [4]

Tab. 2.3.1 Systém zařazování ocelí do skupin [10]

Skupina	Podskupina	Druh oceli
1		Oceli se stanovenou minimální mezí kluzu $R_{eH} \leq 460 \text{ N/mm}^2$ a s obsahem prvků v %: $C \leq 0,25$ $Si \leq 0,60$ $Mn \leq 1,80$ $Mo \leq 0,70^b$ $S \leq 0,045$ $P \leq 0,045$ $Cu \leq 0,40^b$ $Ni \leq 0,5^b$ $Cr \leq 0,3$ (0,4 pro odlitky) <sup>b</sup> $Nb \leq 0,06$ $V \leq 0,1^b$ $Ti \leq 0,05$
	1.1	Oceli se stanovenou mezí kluzu $R_{eH} \leq 275 \text{ N/mm}^2$
	1.2	Oceli se stanovenou mezí kluzu $275 \text{ N/mm}^2 < R_{eH} \leq 360 \text{ N/mm}^2$
	1.3	Normalizované jemnozrnné oceli se stanovenou mezí kluzu $R_{eH} > 360 \text{ N/mm}^2$
	1.4	Oceli se zvýšenou odolností proti atmosférické korozi, u kterých obsah prvků může překročit požadavky pro jednotlivé prvky, jak jsou uvedeny pro skupinu 1
2		Termomechanicky zpracované jemnozrnné oceli a lité oceli se stanovenou mezí kluzu $R_{eH} > 360 \text{ N/mm}^2$
	2.1	Termomechanicky zpracované jemnozrnné oceli a lité oceli se stanovenou mezí kluzu $360 \text{ N/mm}^2 < R_{eH} \leq 460 \text{ N/mm}^2$
	2.2	Termomechanicky zpracované jemnozrnné oceli a lité oceli se stanovenou mezí kluzu $R_{eH} > 460 \text{ N/mm}^2$
3		Zušlechtěné, popuštěné a precipitačně vytvrzené jemnozrnné oceli kromě korozivzdorných ocelí, se stanovenou mezí kluzu $R_{eH} > 360 \text{ N/mm}^2$
	3.1	Zušlechtěné a popuštěné jemnozrnné oceli se stanovenou mezí kluzu $360 \text{ N/mm}^2 < R_{eH} \leq 690 \text{ N/mm}^2$
	3.2	Zušlechtěné a popuštěné jemnozrnné oceli se stanovenou mezí kluzu $R_{eH} > 690 \text{ N/mm}^2$
	3.3	Precipitačně vytvrzené jemnozrnné oceli kromě korozivzdorných ocelí
a V souladu se specifikací podle výrobních norem ocelí může být $R_{eH}$ nahrazeno $R_{p0,2}$ nebo $R_{t0,5}$		
b Vyšší hodnota je přijatelná za předpokladu, že $Cr + Mo + Ni + Cu + V \leq 0,75 \%$		

Mikrolegující prvky, které jsou obsaženy v oceli, mění složení sulfidické fáze. Vazba síry na železo a mangan není uskutečněna v plném rozsahu. V oceli jsou přítomné sulfidy MnS, FeS, legované siričky, ale i sulfokarbidy, sulfonitridy a oxisulfidy, které mají nízkou teplotu tavení, a proto u jemnozrnných ocelí je očekávána zvýšená náchylnost ke vzniku teplých likvačních trhlin, proto je požadavkem na výrobu mikrolegovaných ocelí snížení obsahu síry. Obsah síry je pro normalizačně žíhané oceli max. 0,03 hm. % a pro zušlechtěné a termomechanicky zpracované oceli je to max. 0,015 hm. %. [4]

Po svaření se svarové spoje z jemnozrnných ocelí žíhají, aby se dosáhlo snížení vnitřního pnutí, ale tyto materiály jsou precipitačně tvrzené, a proto musí být teploty žíhání správně zvoleny. Teploty žíhání jsou v nižším rozmezí než u nelegovaných uhlíkových konstrukčních ocelí. [4]

## 2.4 Teplotně napěťový simulátor Gleeble

Teplotně-napěťový simulátor Gleeble 3500 je často využíván ke zkoumání dějů, které probíhají v různých kovových materiálech, zejména při vysokých teplotách. Testovat

se dají vzorky s různou geometrií, toto zařízení je zkonstruováno pro vzorky do průměru 20 mm, nebo pro vzorky, které mají plochu průřezu do 400 mm<sup>2</sup>. Systém Gleeble je složen ze tří hlavních částí, kterými jsou ovládací panel, hlavní jednotka a testovací zařízení viz. obrázek 2.4.1. [15]

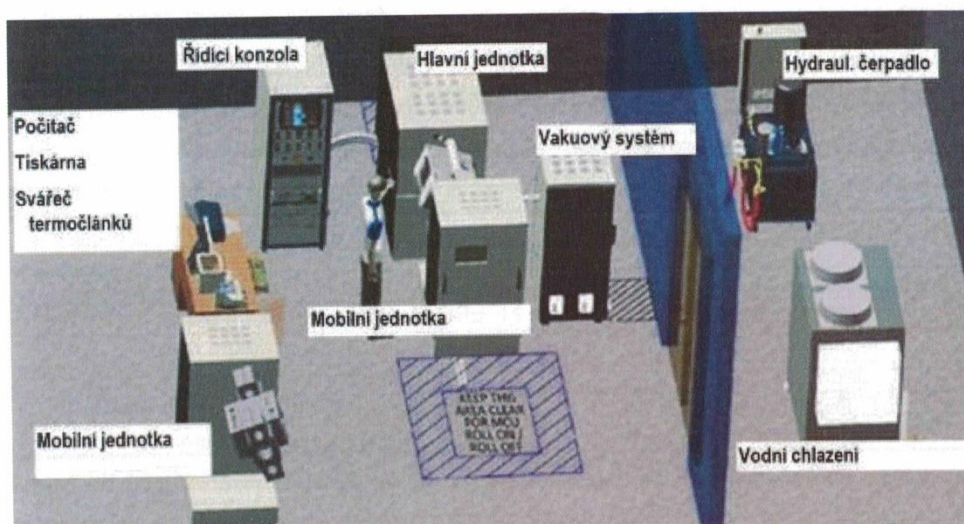


*Obr. 2.4.1 Hlavní části systému Gleeble, hlavní jednotka (1), testovací zařízení (2), ovládací panel (3)*

Využití systému je velice rozsáhlé. Dají se nasimulovat svařovací procesy, kde test může být zaměřen například na zkoumání tepelně ovlivněné oblasti nebo zjištění náchylnosti materiálu k trhlinám. Dále lze provádět únavové testy, kde je zjišťována teplotní únava materiálu nebo tepelně mechanická únava. Také lze simulovat solidifikační procesy, kterými jsou například simulace tání a tuhnutí nebo je test zaměřen na analýzu pevnosti v tahu za vyšších teplot. [15]

### 2.4.1 Základní části systému Gleeble 3500

Systém je tvořen několika částmi: hlavní jednotkou, ovládacím panelem, mobilní jednotkou, hydraulickým čerpadlem, vakuovým systémem a kompresorem a kondenzátorem svářečkou. Jednotlivé části jsou vidět na obrázku číslo 2.4.2. [15]



Obr. 2.4.2 Zobrazení rozmístění částí systému Gleeble [15]

Hlavní jednotka zajišťuje pohon a ovládání zařízení. Mobilní jednotka je připojena k hlavní jednotce. Dále je ovládací panel s počítačem, který v sobě má hardware a software. Ovládací panel zajišťuje řízení a ovládání systému. Důležitá část je vakuový systém, kterým je odčerpán vzduch z komory, kde se vzorek testuje. Vakuum je použito kvůli ochraně testovaného vzorku před oxidací a také kvůli ochraně vybavení testovací komory. K dispozici je také chladicí zařízení. [15]

## 2.4.2 Získávání dat a řídicí systém simulátoru

Řídicí systém je složen z pracovní stanice se systémem Windows a z procesorů, které jsou výkonné a zajišťují rychlý záznam dat a datový přenos. Pracovní stanice je využívána pro simulační programy, vyhodnocení dat a analýzu. Jednotlivé testy jsou programovány uživatelem a pro psaní různých programů bylo vytvořeno uživatelské rozhraní v programu QuikSim2. Další vybavení systému Gleeble je mechanické a teplotní řízení. Pro získání dat, jak mechanických, tak i teplotních, jsou použity datové kanály, jejichž počet je možné volit přímo uživatelem. Při získávání teplotních dat jsou maximálně čtyři termočlánkové kanály a při získávání mechanických dat je k dispozici maximálně osm kanálů. [15]

## 2.4.3 Ohřev a chlazení vzorků, teplotní systém

Systém Gleeble je schopen ohřát vzorek rychlostí až na  $10000\text{ °C}\cdot\text{s}^{-1}$  a ochladit na povrchu vzorku rychlostí až  $6000\text{ °C}\cdot\text{s}^{-1}$ . Tyto rychlosti jsou závislé na způsobu namáhání vzorku a na jeho rozměrech. Maximální rychlost ohřevu tedy závisí na velikosti průřezu vzorku, způsobu namáhání a vzdáleností mezi čelistmi. Ochlazování vzorků může být řízené



nebo neřízené, které využívá chlazení vodou, odvodu tepla stlačeným vzduchem nebo inertním plynem. [15]

Systém Gleeble vzorky ohřívá pomocí elektrického odporu, čímž lze dosáhnout vysokých rychlostí ohřevu a přesné výdrže na dosažené teplotě. Vzorek je upnut v upínacích čelistech, které mají vysokou elektrickou a případně i tepelnou vodivost, díky které mohou být čelisti použity k ohřevu i k ochlazení. Na vzorek jsou připojeny termočlánky, které umožňují získat zpětnou informaci o teplotě, a to umožňuje řídit rychlost ohřevu a ochlazení. [15]

#### 2.4.3.1 Měření teploty

Teplotu lze monitorovat pomocí termočlánků, nebo pomocí pyrometru. Přístroj Gleeble má čtyři kanály, kterými lze měřit teplotu. Každý z kanálů lze využít pro připojení termočlánku, nebo jeden z kanálů se dá využít pro připojení pyrometru a na ostatní tři jsou připojeny termočlánky. Termočlánekové kanály lze vidět na obrázku číslo 2.4.3. [15]



Obr. 2.4.3 Termočlánekové kanály

Termočlánky mají rychlejší odezvu, a proto se používají pro většinu aplikací. Dráty termočlánku se přivařují kondenzátorově doprostřed vzorku, protože maximum teplotního gradientu je uprostřed vzorku mezi čelistmi. Ohřívací systém simulátoru Gleeble spočívá ve změně výkonu transformátoru, který pouští proud do vzorku a vzorek je ohříván odporovým teplem od procházejícího proudu. [15]

#### 2.4.3.2 Termočlánky a správný výběr termočlánků

Jak již bylo zmíněno, dráty termočlánků se přivařují ke vzorku a je doporučeno odmastit a očistit místo, kde je termočlánek připevněn, aby vytvořený spoj měl dobrý kontakt

se vzorkem. Termočlánky jsou voleny podle svého teplotního rozsahu. V tabulce 2.4.1 jsou uvedeny doporučené teplotní rozsahy jednotlivých termočlánků. Nejčastěji používané termočlánky na systému Gleeble jsou termočlánky typu K, S, R nebo B. [15]

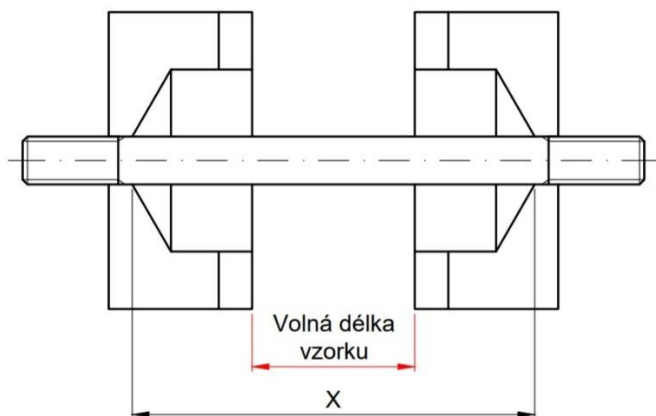
Tab. 2.4.1 Typy termočlánků [15]

Typ termočlánku	Teplotní rozsah
Typ K	0 – 1250 °C
Typ S	0 – 1450 °C
Typ R	0 – 1450 °C
Typ B	0 – 1700 °C
Typ E	0 – 900 °C

Termočlánek typu K může být používán k testování do teploty 1250 °C. Tento termočlánek je používán k testování vzorků ve vakuu, ale lze ho použít například při testování v inertních prostředích. Termočlánky typu S nebo R jsou používány do teploty 1400 °C, a to v inertních a oxidačních prostředích. [15]

### 2.4.3.3 Teplotní gradienty ve vzorku

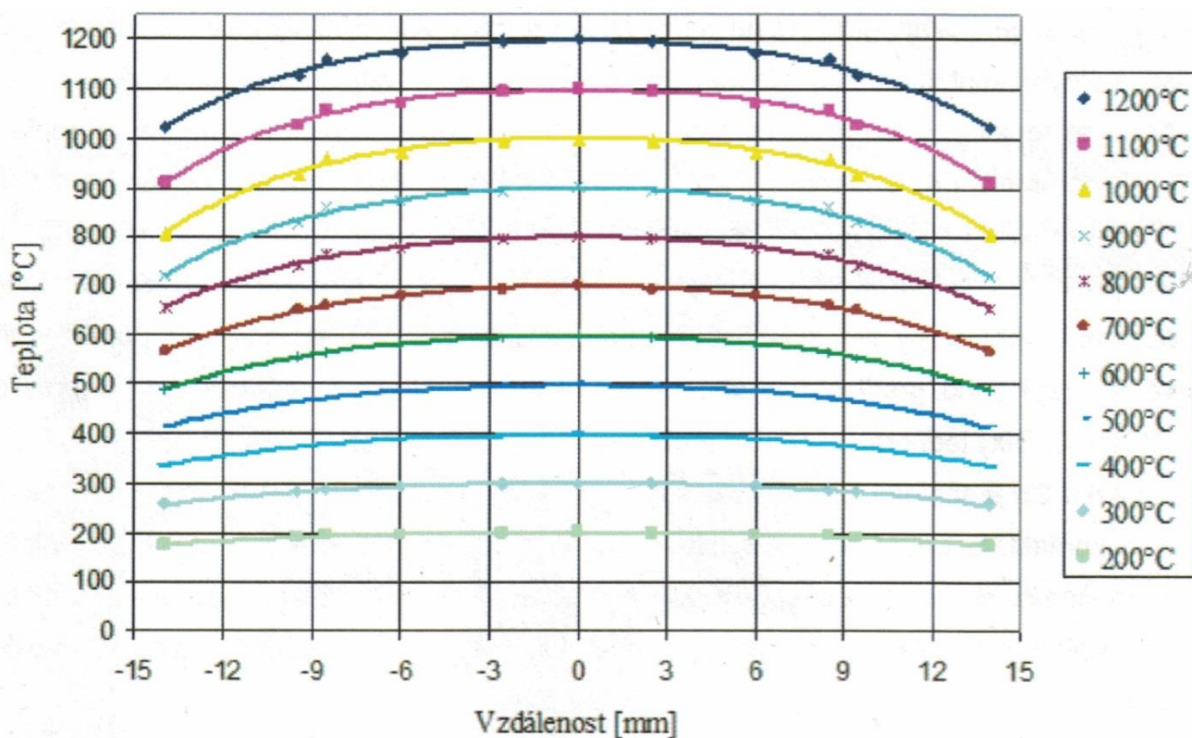
Zařízení Gleeble má systém pro kontrolu teplotních gradientů u vzorků. Při simulaci svařovacích procesů je velký teplotní gradient. Teplotní gradient je závislý na testovaném materiálu, teplotním i elektrickém odporu, délce vzorku, průřezu vzorku, poměru povrchu a objemu vzorku a na tzv. volné délce vzorku. Při ohřevu je volná délka ta délka, která je mezi okraji kontaktu s čelistmi (obrázek číslo 2.4.4 označení X). Při testech je většinou sledována délka mezi čelistmi, proto dále bude tato délka označována jako volná délka vzorku. Vše je znázorněno na schematickém obrázku číslo 2.4.4. [15]



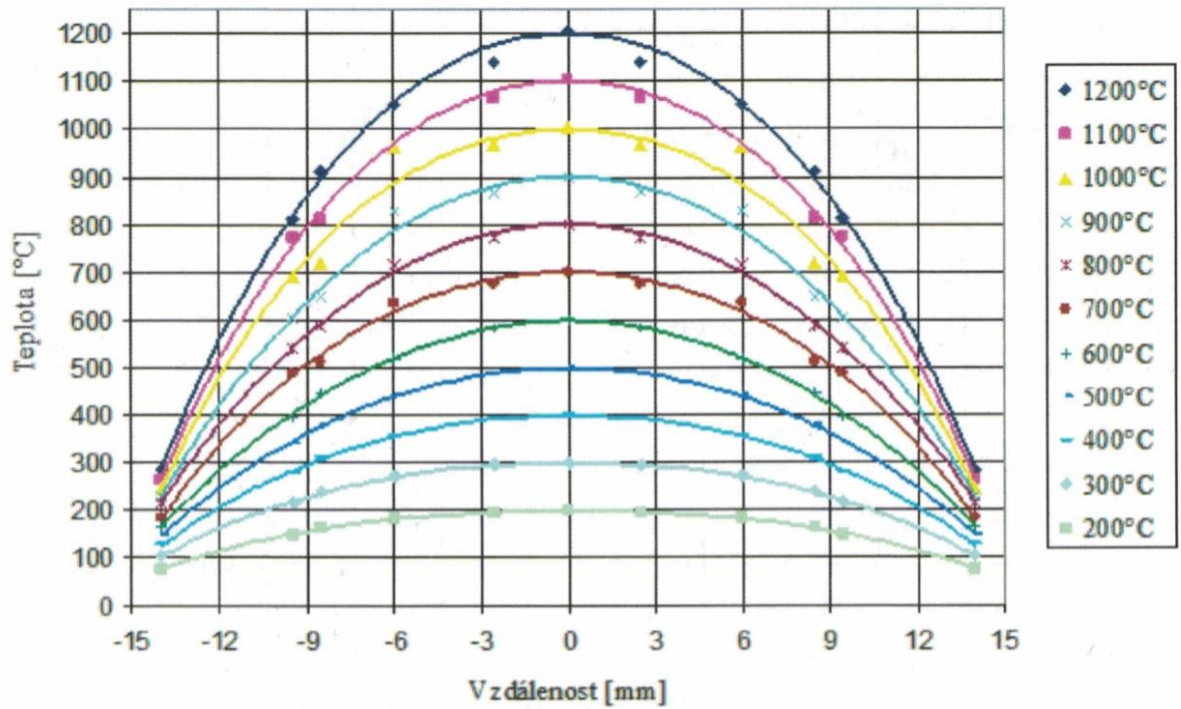
Obr. 2.4.4 Schematické znázornění volné délky vzorku

#### 2.4.3.4 Vliv tvaru, materiálu čelistí a volné délky vzorku

Teplotní gradient je ovlivněn především tvarem a materiálem čelistí. Čelisti jsou chlazené vodou a tím pádem v místě styku vzorku s čelistí je menší teplota než uprostřed vzorku. Pokud je požadován rovnoměrnější teplotní gradient, je potřeba kratší kontakt mezi čelistmi a testovaným vzorkem, tím je ale snížena maximální rychlost ohřevu a rychlost ochlazování. Čím menší tedy kontakt mezi vzorkem a čelistmi je, tím je rovnoměrnější teplotní gradient, což je vidět při porovnání obrázků číslo 2.4.5 a 2.4.6. [15]



Obr. 2.4.5 Teplotní gradient za použití měděných čelistí s částečným kontaktem [15]



Obr. 2.4.6 Teplotní gradient za použití měděných čelistí s plným kontaktem [15]

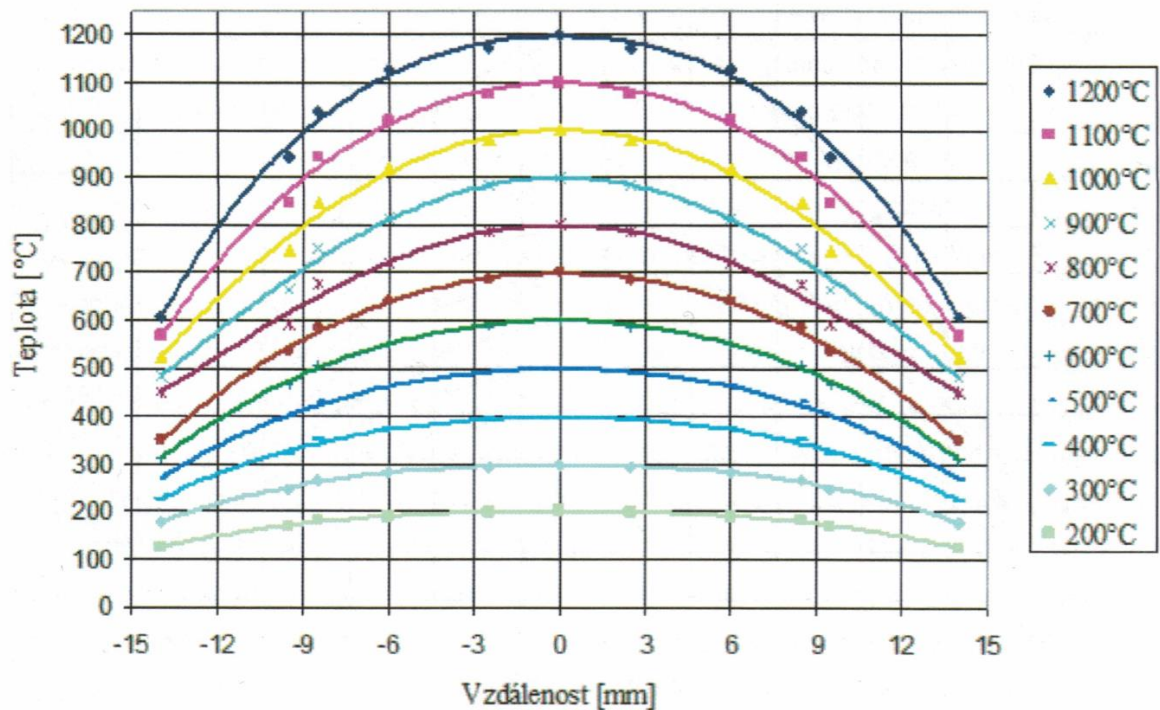
Existují různé druhy upínacích čelistí s úplným, nebo s částečným dotykem mezi čelistmi a vzorkem. Různé druhy jsou vyobrazeny na obrázku číslo 2.4.7. [15]



Obr. 2.4.7 Druhy upínacích čelistí



Teplotní gradient je významně ovlivněn materiálem upínacích čelistí. Často používané jsou čelisti z mědi, nebo z austenitické vysokolegované oceli. Tyto materiály mají výrazně rozdílnou tepelnou vodivost, což umožňuje pro stejný vzorek a pro stejný tvar upínacích čelistí získat rozdílný teplotní gradient, což je vyobrazeno na obrázku číslo 2.4.6 a 2.4.8. [15]



Obr. 2.4.8 Teplotní gradient za použití čelistí z vysokolegované oceli s plným kontaktem [15]

Při volbě materiálu čelistí je potřeba znát, jaké teplotě budou čelisti vystaveny, jaká bude rychlost ohřevu a rychlost volného chladnutí, jakou silou bude vzorek zatěžován, jaký tvar bude mít testovací vzorek a jaký je požadován teplotního gradient ve vzorku. [15]

#### 2.4.4 Simulace dějů probíhajících v tepelně ovlivněné oblasti

Na zařízení Gleeble lze simulovat různé teplotní cykly, a proto je toto zařízení určeno ke studiu dějů, jako je například tepelně ovlivněná oblast u svarů, protože v této oblasti dochází k fázovým transformacím nebo například ke hrubnutí zrna. K simulaci lze využít reálný tepelný cyklus, který lze získat z experimentů, nebo vygenerovat teplotní cykly pomocí speciálního softwaru. Pro simulaci tepelně ovlivněné oblasti jsou využívány měděné čelisti s plným kontaktem, které jsou přizpůsobené tvaru vzorku. Simulaci tepelně ovlivněné oblasti lze využít pro různé typy testů, například pro rázovou zkoušku ohybem pomocí Charpyho kladiva, pro test statické zkoušky tahem, nebo pro test, který je zaměřen na strukturu,

mikrostrukturu a na stanovení velikosti zrna. Pro statickou zkoušku tahem je použit vzorek ve tvaru válce o průměru 6 nebo 10 mm s volnou délkou testovaného vzorku 25 mm. [15]

### 3. Experimentální část

Cílem experimentální části bylo zjistit, jak se změní mechanické vlastnosti u jemnozrnné oceli S700MC po aplikování teplotního cyklu při svařování. Dále bylo zkoumáno, jak u této oceli zhrubne zrno, pokud materiál byl vystaven určité teplotě ve vakuové peci po určitou dobu výdrže na této teplotě.

#### 3.1 Testovaný materiál

V experimentální části byla testována ocel s označením S700MC. Ocel S700MC je jemnozrnná vysokopevná ocel, kde z označení oceli lze vyčíst, že minimální hodnota kluzu je 700 MPa, dále písmeno M značí, že ocel je termomechanicky zpracována a písmeno C značí, že je ocel vhodná pro tváření za studena. Zjemnění zrna je u oceli S700MC dosaženo mikrolegováním a termomechanickým zpracováním. Ocel je mikrolegována Al, Ti, Nb a V, kdy součet obsahu mikrolegur Nb, V a Ti by neměl překročit 0,22 %. Chemické složení oceli změřené spektrometrem je uvedeno v tabulce 3.1.1.

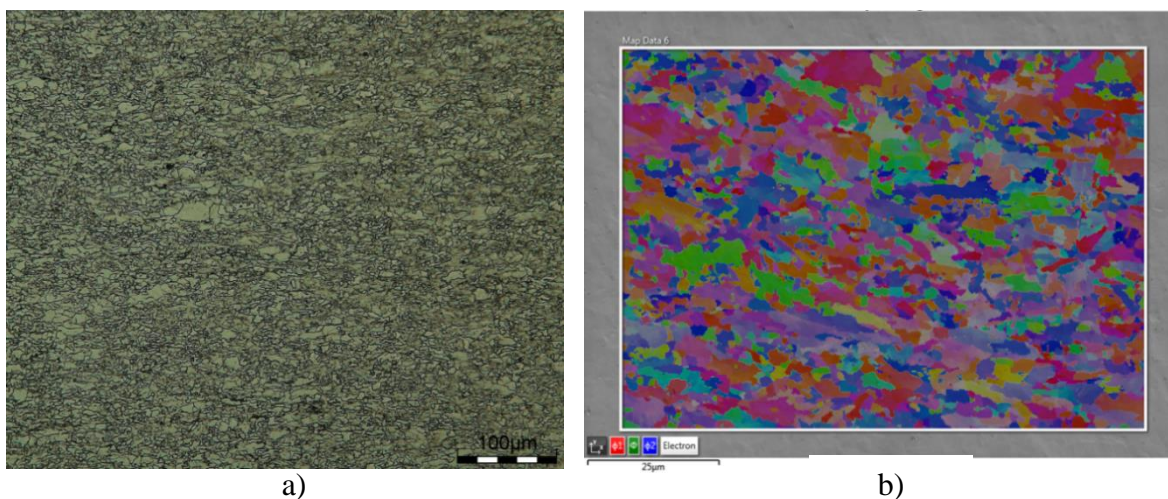
Tab. 3.1.1 Chemické složení oceli S700MC v hmotnostních procentech

<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>N<sub>2</sub></b>	<b>Cu</b>	<b>Ni</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>
0,051	1,916	0,197	0,063	0,006	0,013	0,012	0,154	0,036	0,113
<b>V</b>	<b>Al</b>	<b>W</b>	<b>Ti</b>	<b>Nb</b>	<b>B</b>	<b>Co</b>	<b>Pb</b>		<b>Cekv</b>
0,072	0,038	0,035	0,056	0,063	0,000	0,010	0,005		-----

Ocel S700MC byla pro tento experiment dodána ve formě plechu, který měl tloušťku 10 mm. Tato ocel má feriticko-bainitickou strukturu a na elektronovém mikroskopu byla zjištěna velikost zrna u základního materiálu, která je uvedena v tabulce číslo 3.1.2. Feriticko-bainitická struktura a vyhodnocení velikosti zrna pomocí EBSD analýzy jsou ukázány na obrázku číslo 3.1.1.

Tab. 3.1.2 Hodnoty velikosti zrna u základního materiálu S700MC

S700MC	$\bar{d}$ [mm]	$\bar{a}$ [mm <sup>2</sup> ]	číslo velikosti zrna vyhodnocené planimetrickou metodou
	0,00335	0,0000112225	G13



Obr. 3.1.1 a) feriticko-bainitická struktura  
b) výsledek EBSD analýzy při stanovení velikosti zrna

Mechanické vlastnosti základního materiálu S700MC získané statickou zkouškou tahem jsou uvedeny v tabulce 3.1.3.

Tab. 3.1.3 Mechanické vlastnosti získané statickou zkouškou tahem na materiálu S700MC

Označení Zkoušky	Teplota zkoušky [°C]	Průměr zk. vzorku [mm]	Mez kluzu $R_e$ [MPa]	Mez pevnosti $R_m$ [MPa]	Tažnost mez pevn. $A_g$ [%]	Tažnost $A_{30}$ [%]
RT_vz.1	23	6,52	749	851	10,97	23,91
RT_vz.2	23	6,53	748	852	12,33	25,22
RT_vz.2	23	6,50	731	849	10,72	23,62

Hodnoty vrubové houževnatosti a nárazové práce základního materiálu ze zkoušky rázem v ohybu na Charpyho kladivu jsou uvedeny v tabulce 3.1.4.



Tab. 3.1.4 Hodnoty vrubové houževnatosti a nárazové práce na materiálu S700MC

Číslo vzorku	Vrubová houževnatost [J·cm <sup>-2</sup> ]	Nárazová práce [J]
1	294,7	235,8
2	367,1	293,7
3	336,1	268,9
4	327,3	261,8
5	306,4	245,1

### 3.2 Stanovení kinetiky růstu zrna

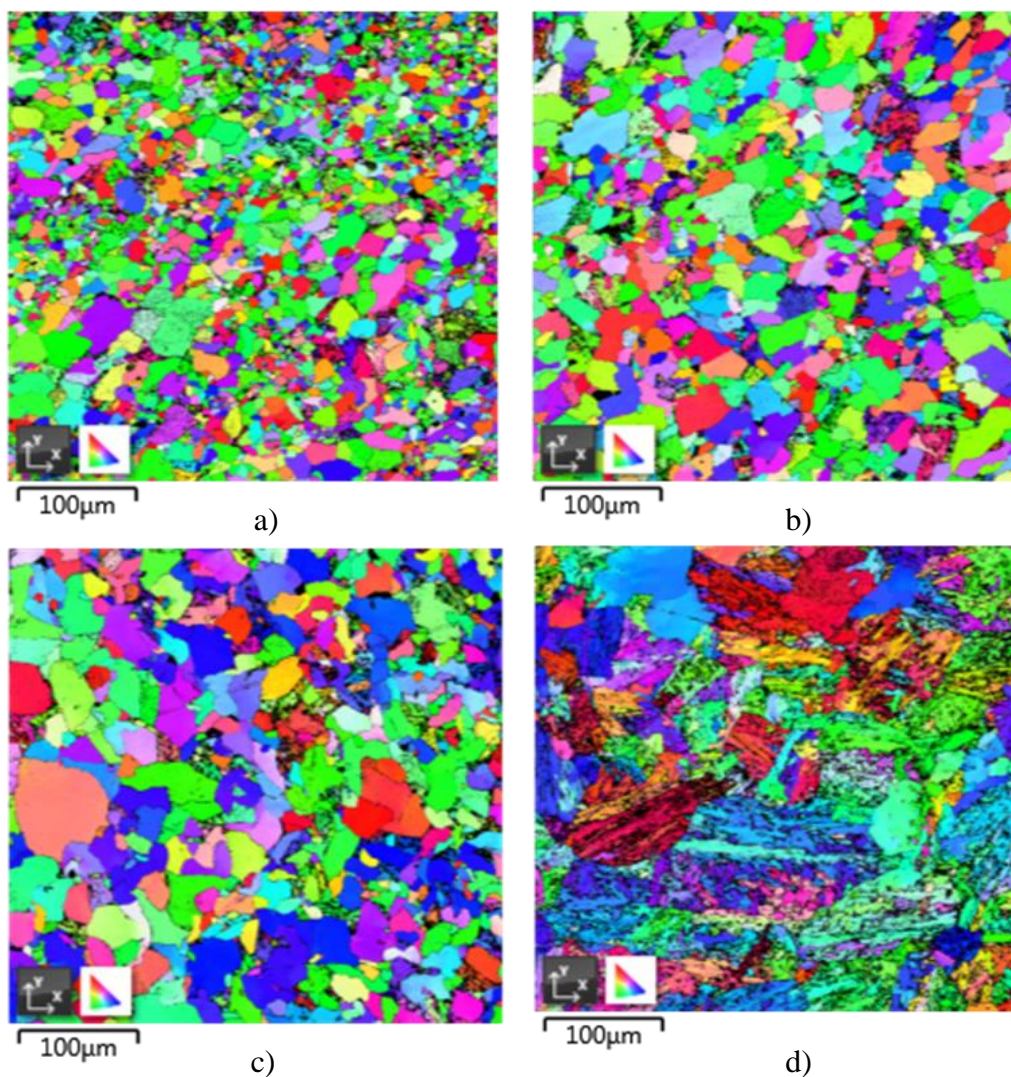
V této části experimentu byly testované vzorky o rozměrech 12x12x20 mm ohřívány ve vakuové peci na stanovenou hodnotu expoziční teploty, s definovanou délkou výdrže na této teplotě. Vakuová pec byla použita z důvodu předejití oxidaci povrchu a kontaminaci vzorku difúzí plynů z okolní atmosféry. Cílem tohoto měření bylo vyhodnocení zhrubnutí zrna u teplotně zatížených vzorků.

Připravené testovací vzorky byly vkládány postupně do vakuové pece, kde došlo k jejich teplotní expoziční. Teploty a časy výdrže na této teplotě jsou uvedeny v tabulce 3.2.1.

Tab. 3.2.1 Zobrazení hodnot expoziční teploty a doby výdrže

Teplota	Čas výdrže [min]			
900 °C	30	120	240	480
1000 °C	30	120	240	480
1100 °C	30	120	240	480
1200 °C	30	120	240	480

Teplotně zatížené vzorky byly dále metalograficky připravovány na vyhodnocení velikosti zrna na elektronovém mikroskopu. Kvádr byl na metalografické pile uprostřed rozříznut a dále byl zalisován do vodivého materiálu. V této práci byla použita, jako vodivý materiál, hmota Polyfast. Zalisované vzorečky byly popsány pomocí gravírovací brusky. Dále se zalisované vzorečky vybrousily a vyleštily. Takto připravené vzorky byly nasnímány na elektronovém mikroskopu pomocí EBSD analýzy, kde bylo pro dané parametry vyhodnoceno zhrubnutí zrna. Snímky z elektronového mikroskopu jsou ukázány na obrázku číslo 3.2.1, kde byly vybrány snímky pro teploty 900, 1000, 1100 a 1200 °C při výdrži 240 minut.



*Obr. 3.2.1 Výsledky EBSD analýzy velikosti zrna po výdržích 240 minut na teplotě – a) 900 °C, b) 1000 °C, c) 1100 °C, d) 1200 °C*

Pro vyhodnocení kinetiky růstu zrna je potřeba mít k dispozici vzorky alespoň pro dvě různé teploty a tři různé výdrže na těchto teplotách a na základě těchto údajů je stanovena hodnota aktivační energie  $Q$  a konstanta úměrnosti  $K$ . Z tabulky 3.2.1 lze vidět, že při tomto experimentu bylo použito celkem 16 vzorků pro čtyři různé teploty a čtyři různé výdrže. Byly tak získány průměrné hodnoty střední velikosti zrna  $\bar{d}$ . Z této hodnoty se dále vypočítala střední plocha zrna  $A_{\text{střední}}$  a také se dle normy ČSN EN ISO 643 určilo číslo velikosti zrna, které bylo vyhodnoceno planimetrickou metodou. Shrnutí naměřených a vypočtených hodnot je v tabulkách 3.2.2, 3.2.3, 3.2.4. Hodnoty z tabulek 3.2.2 a 3.2.3 byly

použity pro vytvoření grafu závislosti střední plochy zrna na čase výdrže. Graf je ukázán na obrázku číslo 3.2.2.

Tab. 3.2.2 Průměrná velikost zrna  $\bar{d}$  [mm]

Teplota [°C]	Čas výdrže na teplotě [s]			
	1800 s	7200 s	14400 s	28800 s
900 °C	0,00399	0,00429	0,00487	0,00591
1000 °C	0,00515	0,00706	0,00798	0,01053
1100 °C	0,00681	0,00862	0,01078	0,01382
1200 °C	0,00853	0,01002	0,01278	0,01697

Tab. 3.2.3 Střední plocha zrna  $A_{\text{střední}}$  [mm<sup>2</sup>]

Teplota [°C]	Čas výdrže na teplotě [s]			
	1800 s	7200 s	14400 s	28800 s
900 °C	0,00001592	0,000018404	0,000023717	0,00003493
1000 °C	0,00002652	0,00004984	0,00006368	0,00011088
1100 °C	0,00004638	0,000074304	0,00011621	0,00019099
1200 °C	0,00007276	0,0001004	0,00016333	0,00028798

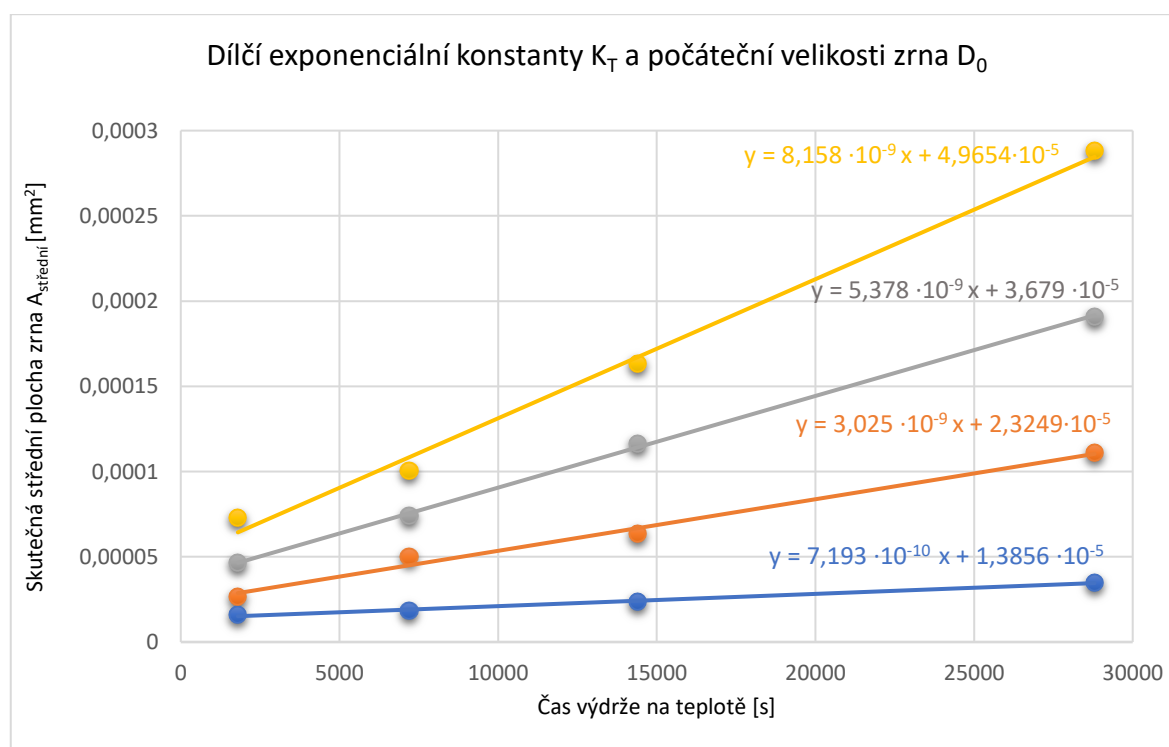
Tab.3.2.4 Číslo velikosti zrna vyhodnocené planimetrickou metodou

Teplota [°C]	Čas výdrže na teplotě [s]			
	1800 s	7200 s	14400 s	28800 s
900 °C	G13	G13	G12	G12
1000 °C	G12	G11	G11	G10
1100 °C	G11	G11	G10	G9
1200 °C	G11	G10	G9	G9

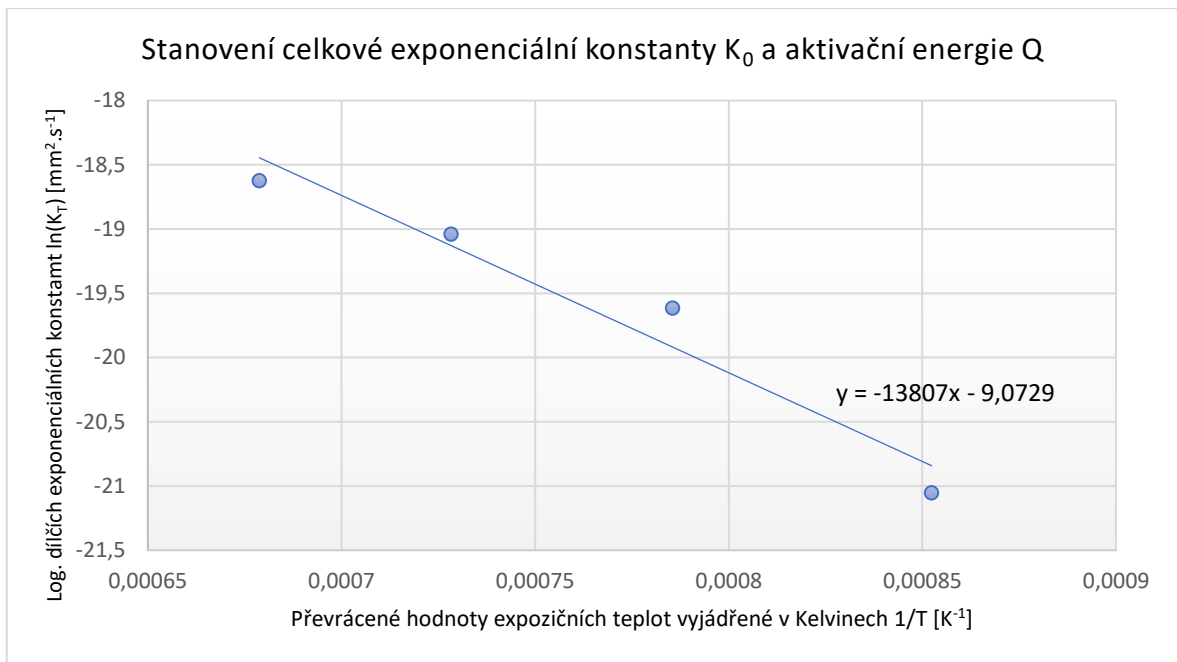
V grafu na obrázku číslo 3.2.2 je každá z teplot vyjádřena trendovou přímkou, která je popsána rovnicí. Z rovnice lze získat hodnoty exponenciální konstanty pro danou teplotu  $K_T$  a počáteční velikost zrna v čase nula sekund  $D_0$ , odpovídající velikosti zrna odpovídající svařovacímu cyklu s maximální teplotou rovnou expoziční teplotě. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 3.2.5. K dalšímu výpočtu je třeba použít přirozený logaritmus exponenciálních konstant  $K_T$  a převrácené hodnoty expoziční teploty  $T$ , které jsou uvedeny v dolní části tabulky. Z těchto hodnot byl sestaven graf, který lze vidět na obrázku číslo 3.2.3.

Tab. 3.2.5 Hodnoty dílčích exponenciálních konstant  $K_T$  a velikostí zrna  $D_0$

	Teplota [°C]			
	900 °C	1000 °C	1100 °C	1200 °C
$K_T$	$7,193 \cdot 10^{-10}$	$3,025 \cdot 10^{-9}$	$5,378 \cdot 10^{-9}$	$8,158 \cdot 10^{-9}$
$D_0$	$1,3856 \cdot 10^{-5}$	$2,3249 \cdot 10^{-5}$	$3,679 \cdot 10^{-5}$	$4,9654 \cdot 10^{-5}$
$\ln(K_T)$	-21,0527	-19,6164	-19,0409	-18,6243
$T^{-1}$	0,0008524	0,0007855	0,0007283	0,0006788



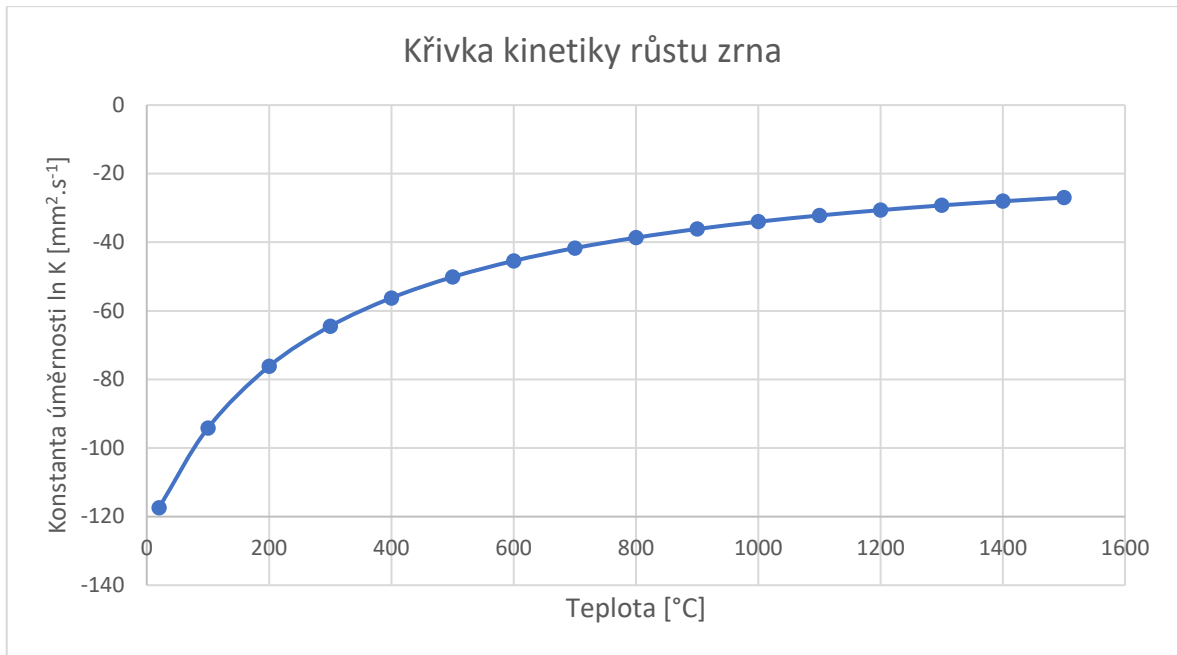
Obr. 3.2.2 Závislost skutečné střední plochy zrna  $A_{\text{středni}}$  na čase výdrže



*Obr. 3.2.3 Závislost logaritmu dílčích exponenciálních konstant na převrácených hodnotách teploty*

Z rovnice trendové přímky, získané z grafu na obrázku číslo 3.2.3 lze získat konstanty C a B, které jsou použity pro výpočet aktivační energie  $Q$  a celkové exponenciální konstanty  $K_0$ . Výpočet je podle rovnic (16) a (17). Hodnota aktivační energie  $Q$  pro materiál S700MC vyšla **264,035 kJ.mol<sup>-1</sup>** a hodnota celkové exponenciální konstanty  $K_0$  vyšla **11,473 · 10<sup>-5</sup> mm<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>**. Hodnota aktivační energie  $Q$  a hodnota celkové exponenciální konstanty  $K_0$  jsou dále použity pro výpočet křivky kinetiky růstu zrna, reprezentovanou tepelnou závislostí konstanty úměrnosti  $K$  podle rovnice (6). Vypočítané hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3.2.6. Z těchto hodnot byly sestaveny křivky kinetiky růstu zrna, které jsou ukázány v grafech na obrázcích číslo 3.2.4 a 3.2.5. Z průběhů křivek je zřejmé, že k intenzivnějšímu růstu zrna dochází až od teploty 1300 °C.



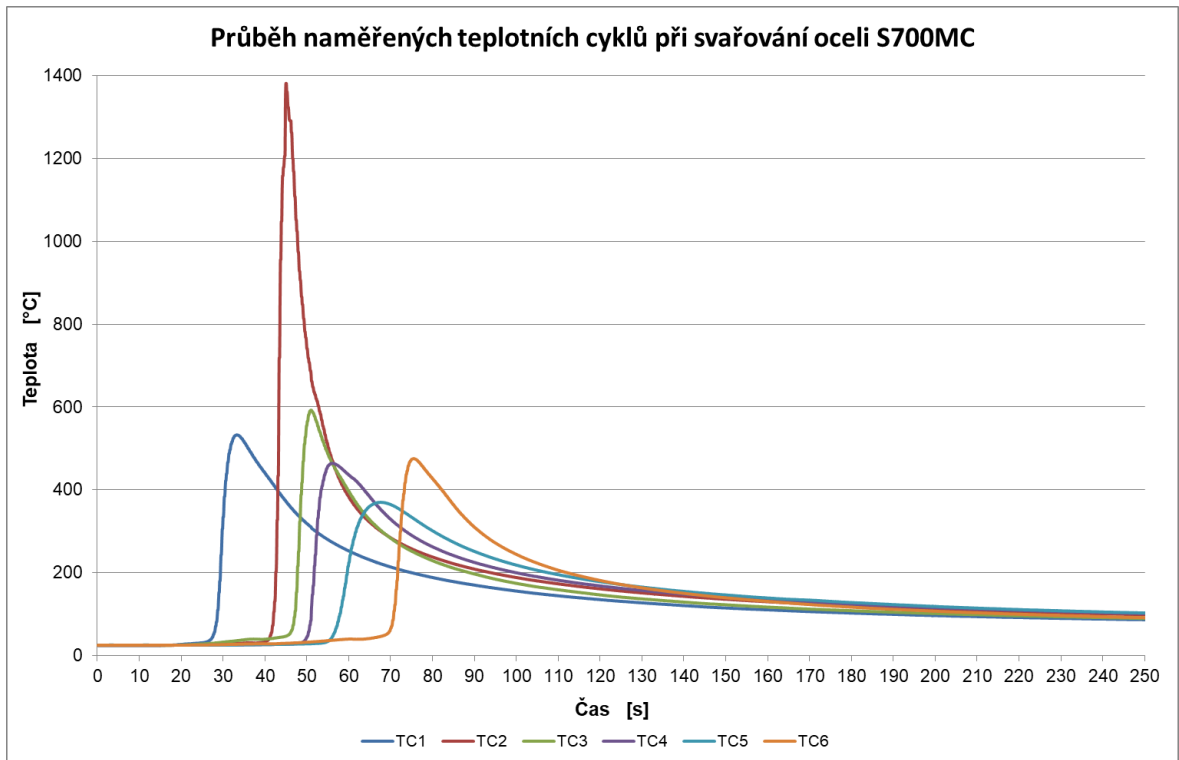


Obr. 3.2.5 Křivka kinetiky růstu zrna v závislosti na teplotě s logaritmickou souřadnicí

### 3.3 Svařování

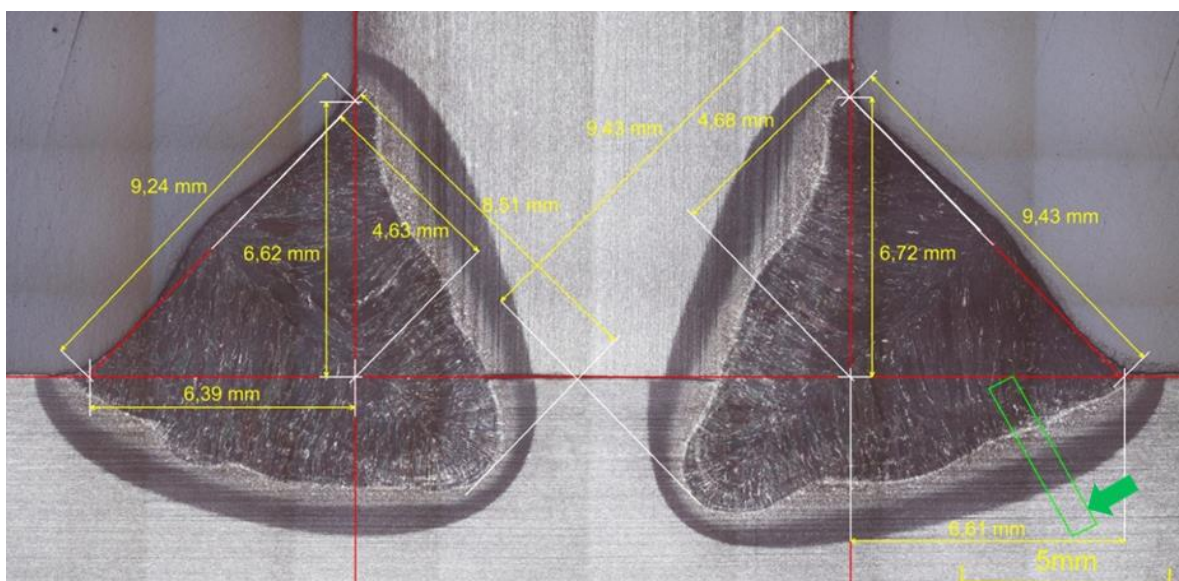
K další části experimentu byl potřeba reálný teplotní svařovací cyklus, který byl získán experimenty svařování na oceli S700MC. Získané teplotní cykly jsou vyobrazeny na obrázku číslo 3.3.1. Experimentem byl získán teplotní cyklus s maximální teplotou 1383 °C, který byl dále použit jak pro vyhodnocení zhrubnutí zrna v tepelně ovlivněné oblasti, tak také pro aplikace na vzorky v teplotně napětovém systému Gleeble.





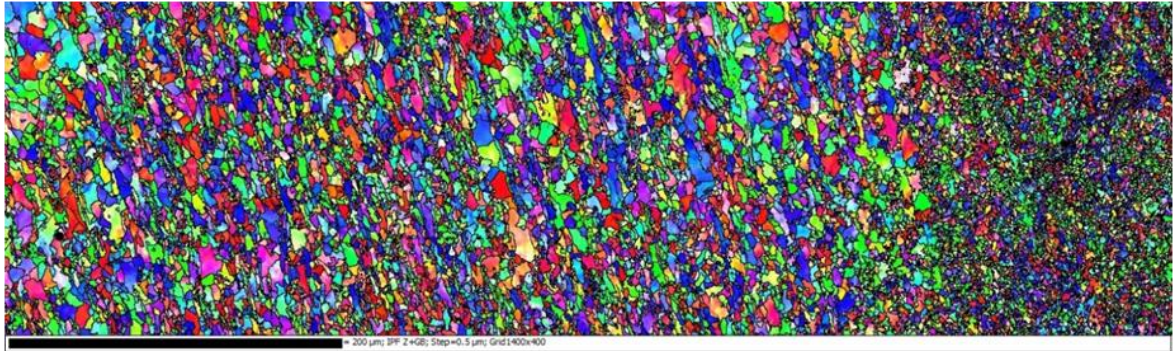
Obr. 3.3.1 Průběhy teplotních cyklů získané při svařování materiálu S700MC

Reálný svar byl metalograficky připraven a nasnímán. Na obrázku číslo 3.3.2 je ukázán metalografický výbrus svaru. Oblast, která je znázorněna na obrázku číslo 3.3.2 zeleným obdélníkem a šipkou byla na elektronovém mikroskopu pomocí EBSD analýzy nasnímána a byla stanovena velikost zrna v tepelně ovlivněné oblasti. Detail zhrubnutí zrna v tepelně ovlivněné oblasti lze vidět na obrázku číslo 3.3.3.



Obr. 3.3.2 Metalografický výbrus svaru, znázornění oblasti měření velikosti zrna [16]



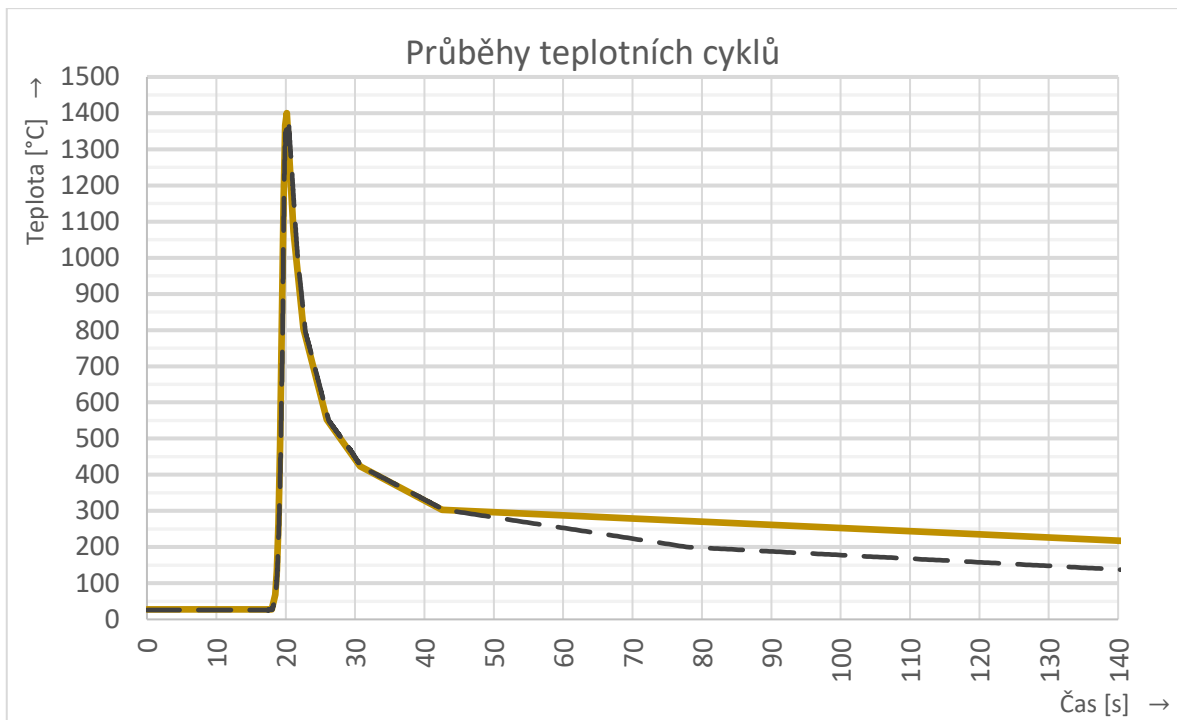


*Obr. 3.3.3 Detail zhrubnutí zrna z EBSD analýzy v tepelně ovlivněné oblasti ze zelené oblasti z obr. 3.3.2*

### **3.4 Příprava zkušebních vzorků**

Pomocí EBSD analýzy byla ve vysokoohřáté TOO stanovena průměrná střední velikost zrna  $d_{stř} = 13,21 \mu\text{m}$ . Cílem bylo posoudit, jak se zhrubnutím zrna změní mechanické vlastnosti a KV2. Proto bylo rozhodnuto nechat ve vakuové peci Reetz narůst při zvolené expoziční teplotě a době výdrže zrna do velikosti  $13,2 \mu\text{m}$  v celém objemu vzorku. Pomocí stanovené konstanty úměrnosti K (tab. 3.2.6), mohla být pro zvolenou expoziční teplotu  $1100 \text{ }^\circ\text{C}$  stanovena doba výdrže 418 minut. Ve vzorcích určených pro statickou zkoušku tahem byla získána střední velikost zrna  $d_{stř} = 13,39 \mu\text{m}$  a ve vzorcích pro rázovou zkoušku ohybem dle normy ISO 148-1 byla získána střední velikost zrna  $d_{stř} = 13,43 \mu\text{m}$ .

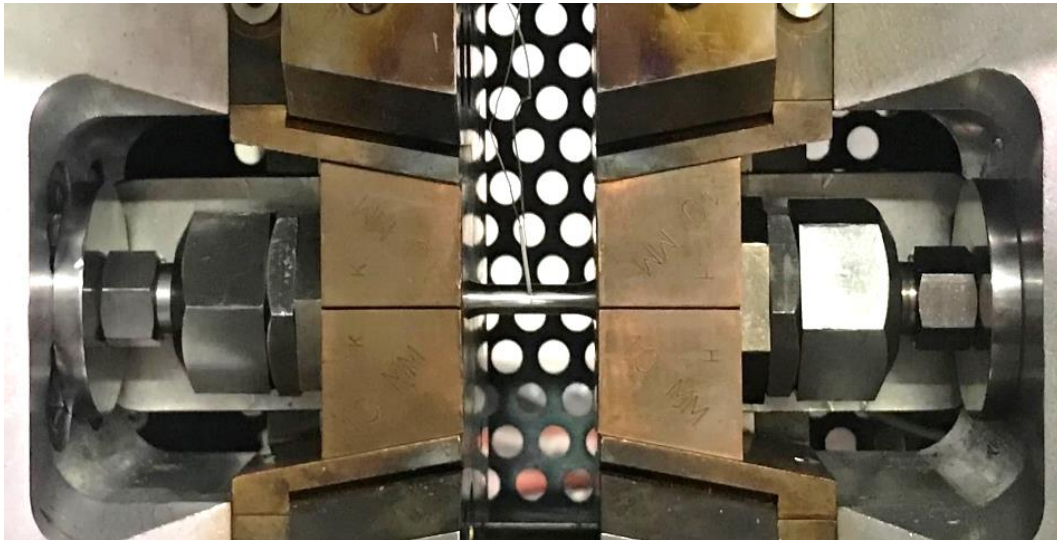
Další zkušební vzorky byly vyrobeny pro aplikaci teplotního svařovacího cyklu v teplotně napěťovém simulátoru Gleeble. Opět to byly vzorky určené pro statickou zkoušku tahem a vzorky pro rázovou zkoušku ohybem dle normy ISO 148-1. Na tyto vzorky, které jsou určeny pro simulátor Gleeble, byl aplikován teplotní cyklus s maximální teplotou  $1383 \text{ }^\circ\text{C}$ , který je znázorněn na obrázku 3.4.1 v porovnání se skutečným průběhem aplikovaného teplotního cyklu.



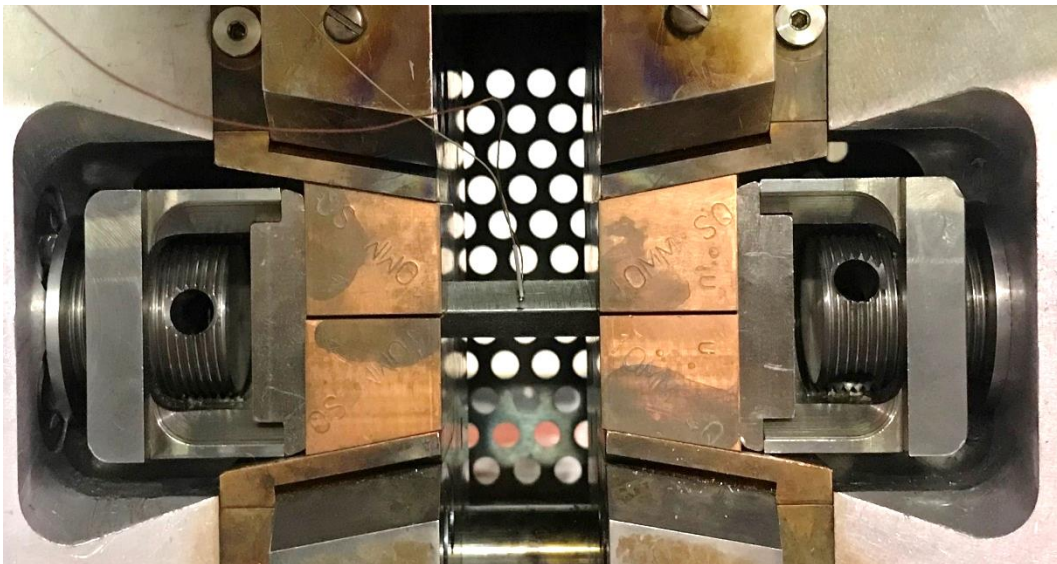
Obr. 3.4.1 Průběhy teplotních cyklů

- naprogramovaný teplotní cyklus
- skutečný průběh teplotního cyklu

Na připravené vzorky z materiálu S700MC byly doprostřed přivařeny termočlánky, které během experimentu měřily teplotu na povrchu vzorku. Pro tento experiment byly použity termočlánky typu K a byly přivařeny na odporové svářečce. Termočlánky typu K jsou z materiálů Ni-Cr a Ni-Al. Vzoreček se dále upnul do měděných čelistí pro kruhový průřez do komory v testovacím zařízení systému Gleeble. Celkové uspořádání je znázorněno na obrázku číslo 3.4.2 (uspořádání se vzorky pro statickou zkoušku tahem) a 3.4.3 (uspořádání se vzorky pro rázovou zkoušku ohybem).

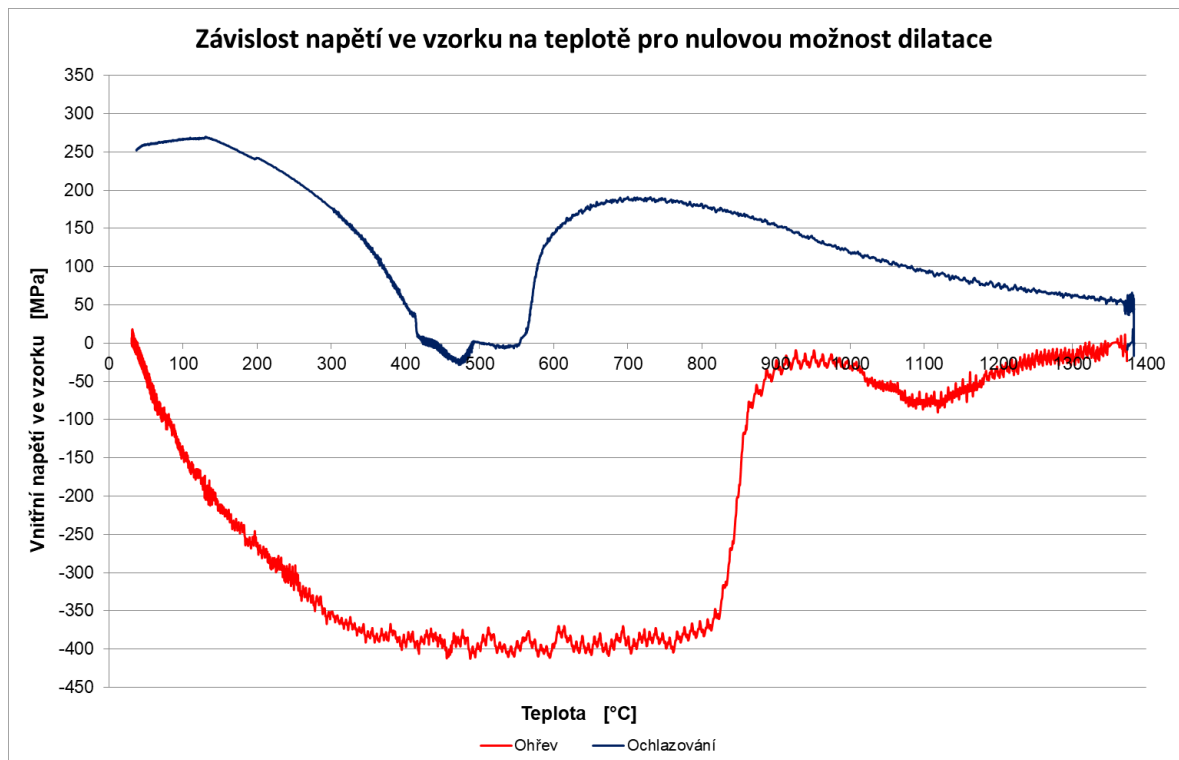


*Obr. 3.4.2 Uspořádání v teplotně napěťovém simulátoru Gleeble se vzorky pro statickou zkoušku tahem*



*Obr. 3.4.3 Uspořádání v teplotně napěťovém simulátoru Gleeble se vzorky pro rázovou zkoušku ohybem*

Aplikaci teplotního cyklu je možné provést dvěma způsoby. První způsob je, že upínací čelisti se budou pohybovat podle směru a velikosti dilatace vzorku. Při této aplikaci ve vzorku nevznikne napětí, které způsobuje plastickou deformaci. Druhý způsob je s nulovou dilatací vzorku, kdy jsou čelisti nepohyblivé. Ve vzorku vznikne napětí, které se nejprve kompenzuje elastickou deformací a dále i plastickou deformací. Průběh vznikajícího napětí a jeho kompenzace je vidět na obrázku číslo 3.4.4. Druhý způsob simuluje podmínky, k nimž dochází při svařování upnutých vzorků, nebo vzorků s vlastní vysokou tuhostí.



Obr. 3.4.4 Závislost napětí ve vzorku na teplotě, při aplikaci cyklu s nulovou dilatací

### 3.5 Vyhodnocení vlivu teplotního cyklu na změnu mechanických vlastností a hodnotu nárazové práce

Svařovací teplotní cyklus byl aplikován na vzorky pro statickou zkoušku tahem, kdy byla umožněna volná dilatace vzorku. Tyto vzorky jsou označeny GT-VD-0X. Další aplikace teplotního cyklu byla také na vzorky pro statickou zkoušku tahem, kdy byla nulová dilatace. Tyto vzorky jsou označeny GT-0D-0X. Pro statickou zkoušku tahem byly také připraveny vzorky, které byly teplotně zatíženy ve vakuové peci při teplotě 1100 °C a čase výdrže 418 minut, kdy zrno zhrublo v celém objemu vzorku. Tyto vzorky jsou označeny VPT-VD-0X. Výsledky zkoušek tahem jsou uvedeny v tabulce číslo 3.5.1.

Svařovací teplotní cyklus byl také aplikován v teplotně napěťovém simulátoru Gleeble na vzorky pro rázovou zkoušku ohybem. V prvním případě byla umožněna volná dilatace vzorku a tyto vzorky se označily GCH-VD-0X. V druhém případě byla dilatace vzorku nulová a vzorky jsou značeny GCH-0D-0X. Další vzorky byly opět dány do vakuové pece s expoziční teplotou 1100 °C a časem výdrže 418 minut. Tyto vzorky byly značeny VPCH-VD-01. Výsledky rázových zkoušek v ohybu jsou uvedeny v tabulce 3.5.2.

Tab. 3.5.1 Výsledky tahové zkoušky vzorků pro základní materiál a pro vzorky ovlivněné teplotním cyklem

Rychlost deformace [s <sup>-1</sup> ]	Označení vzorku	Průměr vzorku	Re [MPa]	Rm [MPa]	Ag [%]	A20 [%]
10 <sup>-2</sup>	ZMT-01	6,52	749	851	10,97	23,91
	ZMT-02	6,53	748	852	12,33	25,22
	ZMT-03	6,50	731	849	10,72	23,62
	Průměrná hodnota			743	851	11,01
10 <sup>-2</sup>	GT-VD-01	6,48	708	834	8,64	23,85
	GT-VD-02	6,51	712	826	8,36	22,97
	GT-VD-03	6,50	699	829	9,02	23,68
	GT-VD-03	6,51	704	822	8,58	23,33
	Průměrná hodnota			706	828	8,65
10 <sup>-2</sup>	GT-0D-01	6,50	617	785	5,49	23,38
	GT-0D-02	6,48	626	797	5,32	23,63
	GT-0D-03	6,51	621	783	5,12	21,78
	GT-0D-04	6,50	634	790	4,94	24,21
	Průměrná hodnota			625	789	5,22
10 <sup>-2</sup>	VPT-VD-01	6,51	301	448	13,24	37,65
	VPT-VD-01	6,49	306	452	13,45	38,63
	VPT-VD-01	6,48	311	446	13,52	38,16
	VPT-VD-01	6,51	304	457	13,09	37,93
	Průměrná hodnota			306	451	13,33

Tab. 3.5.2 Výsledky rázové zkoušky ohybem u vzorků pro základní materiál a pro vzorky ovlivněné teplotním cyklem

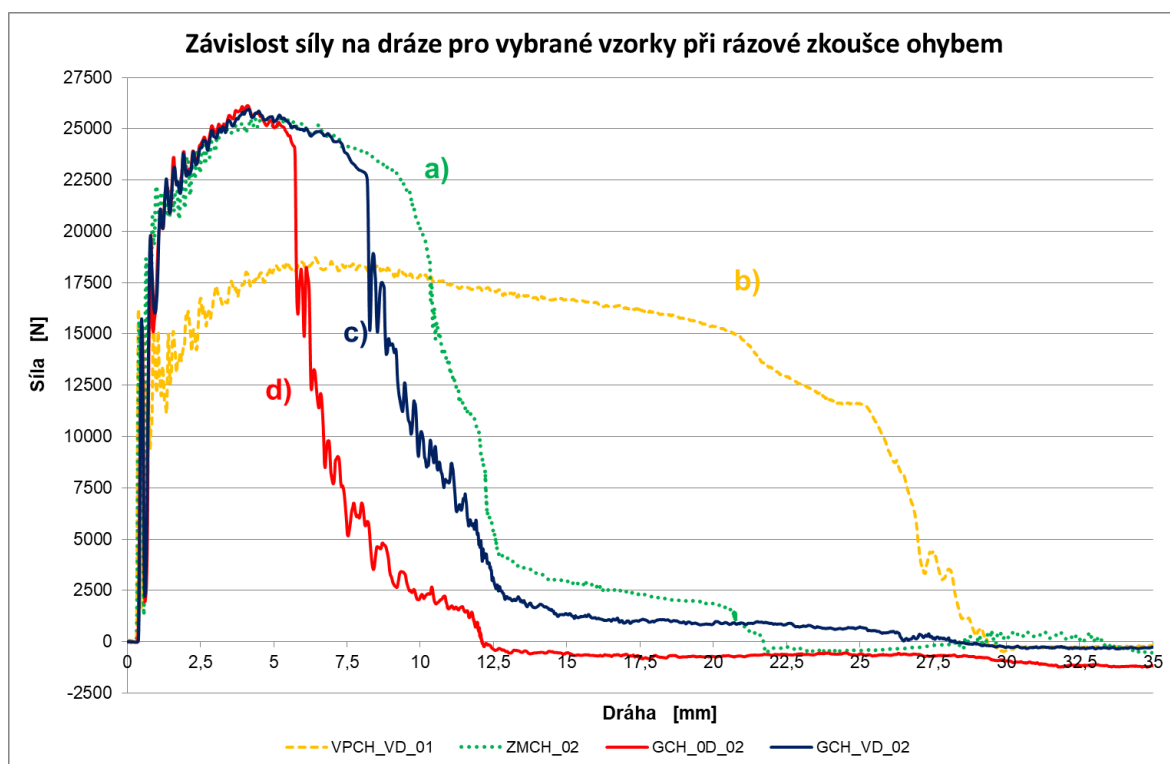
Označení vzorku	Rozměr vzorku [mm]	KCV <sub>2</sub> [J/cm <sup>2</sup> ]	Nárazová práce KV <sub>2</sub> [J]	F <sub>max</sub> [N]	Skutečná rychlost dopadu [m·s <sup>-1</sup> ]	Smykový lom [%]
ZMCH-01	10x10	294,7	235,8	25119	5,529	100
ZMCH-02	10x10	367,1	293,7	25536	5,478	100
ZMCH-03	10x10	336,1	268,9	25343	5,426	100
ZMCH-03	10x10	327,3	261,8	25413	5,429	100
ZMCH-03	10x10	306,4	245,1	25323	5,426	100
Průměrná hodnota		326,3	261,1			
GCH-VD-01	10x10	254,7	187,8	25714	5,439	62,5
GCH-VD-02	10x10	237,5	174,0	25649	5,426	59,8
GCH-VD-03	10x10	263,2	194,6	25803	5,511	63,3
GCH-VD-03	10x10	271,8	201,4	25852	5,442	63,9
Průměrná hodnota		256,8	205,4			
GCH-0D-01	10x10	166,3	133,0	26094	5,512	35,3
GCH-0D-02	10x10	174,1	139,3	25927	5,426	33,6
GCH-0D-03	10x10	187,6	150,1	25973	5,431	36,1
GCH-0D-04	10x10	170,9	136,7	26011	5,473	37,0
Průměrná hodnota		174,7	139,8			
VPCH-VD-01	10x10	466,6	373,3	18694	5,426	100
VPCH-VD-01	10x10	473,9	379,1	18670	5,426	100
VPCH-VD-01	10x10	432,3	345,8	18434	5,684	100
VPCH-VD-01	10x10	458,9	367,2	18030	5,383	100
Průměrná hodnota		457,9	366,3			



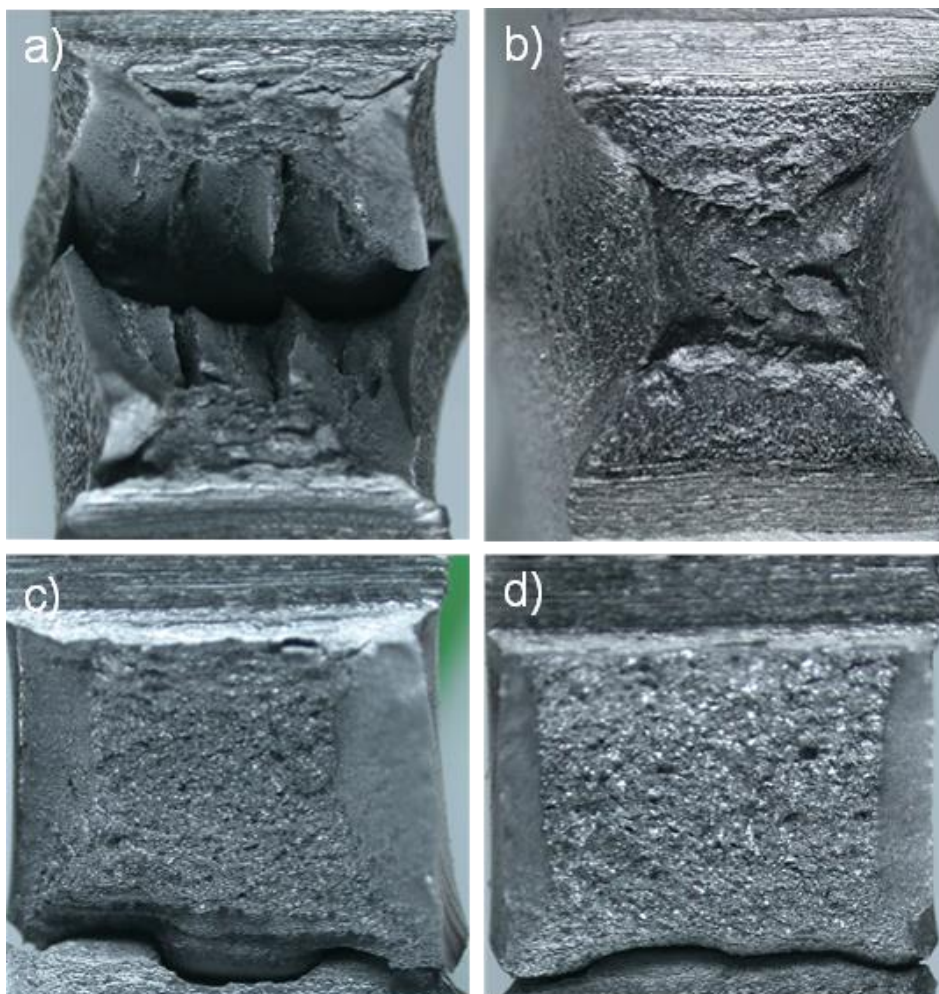
### 3.6 Diskuze výsledků

Svařovací proces má vliv na změnu vlastností celého spoje. V této práci byla věnována pozornost tepelně ovlivněné oblasti, ve které dochází k největším změnám vlastností. Tuto změnu lze ovlivnit pouze procesními parametry svařování. V tepelně ovlivněné oblasti intenzivně roste zrno, což má vliv na změnu pevnostních vlastností a u jemnozrnných ocelí je růst zrna obzvláště významný. Jemnozrnné oceli je z tohoto důvodu doporučeno svařovat s omezeným tepelným příkonem.

Při porovnání vzorků, které mohly volně dilatovat se vzorky, které dilataci měly nulovou je zřejmé, že dochází k rozdílům v hodnotách meze kluzu, meze pevnosti i v homogenní tažnosti (tažnost na mezi pevnosti). Při porovnání hodnot nárazové práce je rozdíl ještě výraznější. Z tabulky 3.5.2 lze spočítat rozdíl hodnot nárazové práce mezi vzorky, které mohly volně dilatovat a vzorky, které měly dilataci nulovou. Rozdíl v této hodnotě je přibližně 66 J, což je více než 30%. Rozdíl mezi volnou a nulovou dilatací je zřejmý i ze závislosti síly na dráze při rázové zkoušce ohybem, což je zřejmé z grafu na obrázku číslo 3.6.1. V grafu jsou pro představu uvedeny závislosti také pro základní materiál a pro vzorek, který byl vystaven zhrubnutí zrna ve vakuové peci. K těmto vzorkům jsou na obrázku číslo 3.6.2 nasnímány lomové plochy vzorků po rázové zkoušce ohybem.



Obr. 3.6.1 Závislost síly na dráze při rázové zkoušce ohybem



*Obr. 3.6.2 Lomové plochy vzorků po rázové zkoušce ohybem pro vzorky  
a) ZMCH\_02, b) VPCH\_VD\_01, c) GCH\_VD\_02, d) GCH\_0D\_02*

U vzorků teplotně exponovaných ve vakuové peci došlo k požadovanému zhrubnutí zrna v celém objemu. Vzorky byly ve vakuové peci dlouhodobě vystaveny expoziční teplotě a tím u vzorků došlo nejen k hrubnutí zrna, ale také k odstranění zpevnění po termomechanickém zpracování. Tento jev měl za příčinu snížení mechanických vlastností o polovinu a nárazová práce narostla o 105 J.



## 4. Závěr

Tato práce je vypracována za cílem posouzení vlivu zhrubnutí zrna v tepelně ovlivněné oblasti na změnu mechanických vlastností a hodnotu nárazové práce u jemnozrnných ocelí. Intenzita zhrubnutí zrna je významný materiálový parametr, a proto je jí věnována dostatečná pozornost, především u termomechanicky zpracovaných ocelí, které jsou zpevněné hranicemi zrn.

Při realizaci experimentů by měla být brána v úvahu určitá doporučení. Před ověřovacím experimentem by se měl definovat typ svarového spoje a možnosti jeho dilatace, které nastávají v průběhu svařování. Také by se měl definovat způsob upnutí a vlastní tuhost spojovaných dílů. Další doporučení se týká zvážení maximální teploty u teplotního cyklu, který je aplikován na zkušební vzorek, zvláště pokud jde o termomechanicky zpracované jemnozrnné oceli, protože vliv zhrubnutí zrna se výrazně projeví až od teploty 1300 °C. Poslední doporučení je navržení správného tvaru a velikosti zkušebních vzorků (vzdálenost mezi čelistmi), což je důležité pro dosažení požadovaných rychlostí ohřevu, ochlazování a maximální teploty.

Pokud se výše uvedená doporučení dodrží, je možné shrnout výsledky měření, které bylo zaměřené na tepelně ovlivněnou oblast a dosažené při svařování jemnozrnné oceli S700MC následovně:

- 1) Hodnoty teplotní závislosti konstanty úměrnosti  $K$  definující kinetiku růstu zrna je možné použít k predikci velikosti zrna, jak pro dlouhodobé výdrže na expoziční teplotě, tak i pro dynamické teplotní cykly, které jsou pro svařování charakteristické.
- 2) Při svařování upnutých dílů, nebo dílů, které mají větší tuhost, je dilatace vzorku kompenzována plastickou deformací. V tomto případě je hodnota meze kluzu o 12 % nižší a hodnoty nárazové práce klesly o 32 % oproti dílům, které mohou volně dilatovat.
- 3) Vliv zhrubnutí zrna při aplikaci teplotních cyklů se projeví zejména na hodnotách  $KV_2$ . Dochází-li při svařování k plastické deformaci v TOO, je tento vliv ještě výraznější.

## Seznam použité literatury

- [1] *ASM International: vysoce pevné mikrolegované oceli* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://svv.cz/files/2.11.vysocepevnmikroleg.ocelipdf.pdf>
- [2] *Výzkumné centrum kolejových vozidel: zkoušky mikrolegovaných ocelí DOMEX 700MC* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: [https://www.opi.zcu.cz/fraktografie\\_prednaska1.pdf](https://www.opi.zcu.cz/fraktografie_prednaska1.pdf)
- [3] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu*. II. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, c2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-3.
- [4] KOLEKTIV AUTORŮ. *Materiály a jejich svařitelnost*. Ostrava: Česká svářečská společnost ANB Zeross-svářečské nakladatelství, 1999. ISBN 80-85771-63-2.
- [5] ČSN EN 1011-2. *Svařování – Doporučení pro svařování kovových materiálů – Část 2: Obloukové svařování feritických ocelí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2002, 56 s. Třídící znak 052210
- [6] ČSN EN 10027-1. *Systémy označování ocelí – část 1: Stavba značek ocelí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017, 40 s. Třídící znak 42 0011.
- [7] ČSN EN 10027-2. *Systémy označování ocelí – část 2: Systém číselného označování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016, 24 s. Třídící znak 42 0011.
- [8] MACEK, Karel, Petr ZUNA a Jiří JANOVEC. *Tepelné zpracování kovových materiálů*. V Praze: České vysoké učení technické, 2008, 133 s. ISBN 978-80-01-04186-4.
- [9] *Katedra strojírenské technologie: zotavení a rekrytalizace* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce/01.htm#013](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm#013)
- [10] NEUMANN, Heinz. *Teorie svařování a pájení*. Část 1, Tavné svařování. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014, 167 s. ISBN 978-80-7494-171-9.
- [11] MORAVEC, Jaromír. *Kinetika růstu austenitického zrna*. Liberec, 2016. Habilitační práce. TUL.
- [12] ČSN EN ISO 643. *Ocel-Mikrografické stanovení velikosti zrn*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013, 36 s. Třídící znak 42 0462.

- [13] *První železářská společnost Kladno: Svařování ocelových konstrukcí* [online]. [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://www.pzsk.cz/svarovani>
- [14] BERNASOVÁ, Eva. *Svařování*. Praha: SNTL, 1987, 199 s.
- [15] MORAVEC, Jaromír a Josef BRADÁČ. *Možnosti a využití teplotně-napěťového simulátoru Gleeble při výzkumu technologické zpracovatelnosti materiálů*. Liberec: Technická univerzita, 2014, 105 s. ISBN 978-80-7494-138-2.
- [16] KADLEC, Tomáš. *Vliv svařování na změny únavové životnosti spojů z jemnozrnné oceli S700MC*. Liberec, 2019. Diplomová práce. TUL.

