



**ČVUT**

ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE

**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

**VYUŽITÍ METODY POPOUŠTĚCÍ HOUSENKY PRO OPRAVY STĚŽEJNÍCH  
KOMPONENT V JADERNÉ ENERGETICE**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**AUTOR:**

Lukáš Jurásek

**VEDOUcí PRÁCE:**

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE  
Ing. Marek Palán, IWE, IWI-C, ETSS

**STUDIJNÍ PROGRAM:**

Výroba a ekonomika ve strojírenství

**STUDIJNÍ OBOR:**

Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

**Praha 2021**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Jurásek** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **484108**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**  
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**  
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Využití svařování metodou popouštěcí housenky při opravách stěžejních komponent a zařízení v jaderné energetice**

Název bakalářské práce anglicky:

**Use of welding by the tempering pass method in repairs of key components and equipments in nuclear energy**

Pokyny pro vypracování:

- Popis principu svařování metodou popouštěcí housenky, účel použití, používané metody svařování a materiály,
- Rozbor a popis metod destruktivního zkoušení svarových spojů ve vztahu ke svařování metodou popouštěcí housenky
- Návrh experimentu - realizace experimentálních návarů orbitálním svařováním
- Vyhodnocení vytvořených zkušebních vzorků – metalografické zkoušky, měření tvrdosti
- Porovnání a vyhodnocení výsledků jednotlivých zkoušek

Seznam doporučené literatury:

- [1] JUNEK, L., ČANČURA, Z., BROM, J.: Vývoj nové technologie opravy heterogenních svarových spojů pomocí „weld overlay (WOL)“, Konference Nové materiály, technologie a zařízení pro svařování, ČSÚ, Ostravice, 2014.
- [2] CRUZ-CRESPO, A. BEZERRA DE ARAUJO, D., SCOTTI, A. Effect of Tempering Pass on HSLA-80 Steel HAZ Microstructures, Welding Journal, Vol. 92, 2013
- [3] ALTO P., Welding and Repair Technology Center: Repair Welding Handbook EPRI, 2012.
- [4] KUNCIPÁL, J., PILOUS, V., DUNOVSKÝ, J. Nové technologie ve svařování, SNTL, Praha, 1984

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

**Ing. Marek Palán, ČEZ a.s.**

Datum zadání bakalářské práce: **15.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **06.08.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2021**

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

# Bibliografické údaje

**Název bakalářské práce:** Využití metody popouštěcí housenky pro opravy stěžejních komponent v jaderné energetice

**Vedoucí bakalářské práce:**

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

Ing. Marek Palán, IWE, IWI-C, ETSS

**Ústav:** Ústav strojírenské technologie

**Studijní obor:** Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

**Klíčová slova:** svařování, metoda popouštěcí housenky, nedestruktivní kontroly, kontrola makrostruktury, tvrdost dle Vickerse, mikrotvrdost

**Rozsah bakalářské práce:**

Počet stran: 72

Počet obrázků: 38

Počet tabulek: 15

## Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá problematikou svařování metodou popouštěcí housenky ve vztahu ke stěžejním komponentám jaderných elektráren typu VVER-1000/320. V rámci teoretické části je proveden detailní rozbor uvedené problematiky z hlediska materiálového, technologického a provádění nedestruktivních kontrol a destruktivních zkoušek. Experimentální část práce popisuje provedení a vyhodnocení zkušebních těles a vzorků, zejména metodami destruktivního zkoušení, ve formě hodnocení makrostruktury, měření tvrdosti (HV 10) a mikrotvrdosti (HV 0,1). V závěrečné části je provedeno stručné shrnutí dosažených výsledků.

# Bibliographical information

**Thesis name in English:** Use of Welding by the Tempering Pass Method in Repairs of Key Components and Equipments in Nuclear Energy

**Supervisors:**

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

Ing. Marek Palán, IWE, IWI-C, ETSS

**School department:** Department of Technology

**Field of Study:** Production and Economics in Mechanical Engineering

**Keywords:** welding, temper bead welding, non-destructive testing, destructive testing, macroscopic examination, Vickers hardness, microhardness

**Theses scope:**

- **Number of pages:** 72
- **Number of figures:** 38
- **Number of tables:** 15

## Abstract

This bachelor's thesis deals with the use of temper bead welding with connection to key components in nuclear power plants of VVER-1000/320 type. The theoretical part is dedicated to a detailed description of the given topic with relation to materials science, welding technology and destructive and nondestructive testing of materials. The experimental part describes the process of conducting and evaluation of the given test samples, mainly using the destructive testing methods such as macrostructure examination and Vickers hardness (HV 10) and microhardness (HV 0,1) tests. The thesis conclusion describes the achieved results.

# Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Ladislava Kolaříka, Ph.D. a Ing. Marka Palána, a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

Z důvodu citlivých informací o know-how zadavatele bakalářské práce je však v elektronické verzi bakalářské práce část výsledků utajena. Plná verze je na vyžádání k dispozici u vedoucího práce na Ústavu strojírenské technologie Fakulty strojní ČVUT v Praze.

.....  
V Praze

.....  
Lukáš Jurásek

# Poděkování

Touto formou bych chtěl poděkovat všem, kteří se podíleli na tvorbě této práce. Děkuji vedoucím práce doc. Ing. Ladislavu Kolaříkovi, Ph.D. a Ing. Marku Palánovi za odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi věnovali. Dále bych chtěl poděkovat zaměstnancům TaRC Temelín za umožnění využití jejich materiálové laboratoře pro experimentální část této práce.

# Použité zkratky

- **A<sub>5</sub>** - Tažnost na krátké tyči
- **ARA** - Anizotermický rozpad austenitu
- **BCT** - Body Centered Tetragonal (tetragonální prostorově středěná kryst. mřížka)
- **CCT** - Continuous Cooling Transformation (ARA diagram)
- **FCC** - Face Centered Cubic (kubická plošně středěná kryst. mřížka)
- **GOST** - государственный стандарт (státní standard/norma)
- **HAZ** - Heat Affected Zone (tepelně ovlivněná oblast)
- **HCP** - Hlavní cirkulační potrubí
- **IRA** - Izotermický rozpad austenitu
- **JE** - Jaderná elektrárna
- **KSS** - Kontrolní svarový spoj ve smyslu NTD A.S.I.
- **NTD A.S.I.** - Normativně technická dokumentace Asociace strojních inženýrů ČR
- **R<sub>m</sub>** - Mez pevnosti
- **R<sub>p0,2</sub>** - Smluvní mez kluzu při 0,2% prodloužení
- **SK** - Svarový kov
- **TBW** - Temper Bead Welding (svařování metodou popouštěcí housenky)
- **TOO** - Tepelně ovlivněná oblast
- **TOFD** - Time-of-Flight Diffraction (technika měřící dobu průchodu ultrazvukových vln)
- **TTT** - Time Temperature Isothermal Transformation (IRA diagram)
- **TZ** - Tepelné zpracování
- **VVER** - Vodo-vodní energetický reaktor (z RJ)
- **ZM** - Základní materiál
- **Z** - Kontrakce

# Obsah

1	Úvod	1
I	<b>Teoretická část</b>	<b>2</b>
2	Technologie svařování	3
3	<b>Tepelně ovlivněná oblast</b>	<b>4</b>
3.1	Děje v tepelně ovlivněné oblasti . . . . .	4
3.1.1	Tepelný příkon . . . . .	4
3.1.2	Teplotní cykly . . . . .	4
3.2	Pásma tepelně ovlivněné oblasti . . . . .	6
3.2.1	Tepelná difuzivita . . . . .	6
3.2.2	Oblast částečného natavení . . . . .	7
3.2.3	Přehřátá oblast . . . . .	7
3.2.4	Oblast normalizace . . . . .	7
3.2.5	Oblast částečné překrystalizace . . . . .	7
3.2.6	Vyžíhaná oblast . . . . .	7
4	<b>Fázové transformace v ocelích</b>	<b>8</b>
4.1	Strukturní složky v ocelích . . . . .	8
4.1.1	Austenit . . . . .	8
4.1.2	Ferit- $\alpha$ . . . . .	9
4.1.3	Perlit . . . . .	9
4.1.4	Ferit- $\delta$ . . . . .	9
4.1.5	Martenzit . . . . .	9
4.1.6	Bainit . . . . .	9
4.2	Vznik martenzitické struktury . . . . .	10
4.3	IRA a ARA diagramy . . . . .	11
4.3.1	IRA diagramy . . . . .	11
4.3.2	ARA diagramy . . . . .	12
4.3.3	ARA diagramy In Situ . . . . .	12



<b>5</b>	<b>Tepelné zpracování po svařování</b>	<b>13</b>
5.1	Tepelné zpracování s překrytí . . . . .	13
5.2	Tepelné zpracování bez překrytí . . . . .	13
5.3	Popouštění . . . . .	13
5.3.1	Fáze popouštění . . . . .	14
5.3.2	První fáze popouštění . . . . .	14
5.3.3	Druhá fáze popouštění . . . . .	14
5.3.4	Třetí fáze popouštění . . . . .	14
5.3.5	Čtvrtá fáze popouštění . . . . .	14
<b>6</b>	<b>Svařování metodou popouštěcí housenky</b>	<b>15</b>
6.1	Základní popis metody . . . . .	15
6.2	Historie a vznik metody . . . . .	16
6.3	Umístění svarových housenek . . . . .	16
6.4	Používané metody svařování . . . . .	17
6.5	Metoda 141 (GTAW/TIG/WIG) . . . . .	18
6.5.1	Přídavný materiál . . . . .	19
6.5.2	Polarita zdroje při svařování metodou 141 . . . . .	19
6.5.3	Elektrody a jejich druhy . . . . .	20
6.5.4	Metodika svařování a geometrie elektrod . . . . .	20
6.5.5	Ochranné inertní plyny a jejich směsi . . . . .	22
<b>7</b>	<b>Kontroly a zkoušky svarů</b>	<b>24</b>
7.1	Nedestruktivní kontrola svarů . . . . .	24
7.1.1	Typy vad ve svarech . . . . .	25
7.1.2	Metody NDT kontrol . . . . .	25
7.2	Destruktivní zkoušky svarů . . . . .	27
7.2.1	Metody destruktivních zkoušek . . . . .	27
<b>8</b>	<b>Svařování v jaderné energetice</b>	<b>30</b>
8.1	Legislativa v jaderné energetice . . . . .	30
8.2	Normalizace v jaderné energetice . . . . .	30
8.3	Svařování ve smyslu NTD A.S.I. Sekce I . . . . .	31
8.3.1	Kvalifikace v rámci NTD A.S.I. Sekce I . . . . .	31
8.3.2	Kontrolní svarový spoj . . . . .	32
<b>II</b>	<b>Experimentální část</b>	<b>33</b>
<b>9</b>	<b>Předmět experimentální části</b>	<b>34</b>
9.1	██ . . . . .	34
9.2	Současný stav a plánované provedení . . . . .	35

9.3	Záměr experimentální části . . . . .	36
<b>10</b>	<b>Základní a přídavné materiály</b>	<b>37</b>
10.1	Základní materiály . . . . .	37
10.1.1	10GN2MFA dle GOST . . . . .	37
10.1.2	22K dle GOST . . . . .	38
10.1.3	P265GH dle ČSN EN 10216-2 . . . . .	39
10.2	Přídavné materiály . . . . .	40
10.2.1	Sv-07Ch25N13 dle GOST . . . . .	40
<b>11</b>	<b>Příprava zkušebních těles a vzorků</b>	<b>41</b>
11.1	Příprava a provedení zkušebních těles . . . . .	41
11.2	Příprava zkušebních vzorků . . . . .	43
<b>12</b>	<b>Provedení a vyhodnocení</b>	
	<b>destruktivních zkoušek</b>	<b>46</b>
12.1	Hodnocení makrostruktury . . . . .	46
12.2	Tvrдость a mikrotvrдость . . . . .	47
12.3	Výsledky destruktivních zkoušek . . . . .	48
12.3.1	Zkušební vzorek KSS 1 . . . . .	48
12.3.2	Zkušební vzorek H6-1 . . . . .	50
12.3.3	Zkušební vzorek H6-2 . . . . .	52
12.3.4	Zkušební vzorek PM 1 . . . . .	54
<b>13</b>	<b>Shrnutí výsledků</b>	<b>56</b>
13.1	Vyhodnocení a porovnání výsledků zkušebních vzorků H6-1 a H6-2 . . . . .	56
13.2	Posouzení výsledků zkušebního vzorku KSS 1 . . . . .	58
13.3	Posouzení výsledků zkušebního vzorku PM 1 . . . . .	58
<b>14</b>	<b>Závěr</b>	<b>60</b>

# 1. Úvod

Jaderné elektrárny produkují zhruba 10 % veškeré elektrické energie na světě. Jedná se o složitá zařízení, která podléhají speciálním bezpečnostním a kvalitativním pravidlům a požadavkům, podle kterých jsou prováděny jednotlivé činnosti související s jejich provozem. Jaderné elektrárny mají omezenou životnost, kterou lze do určité míry prodlužovat prováděním změn, rekonstrukcí a oprav.

Při provádění výše zmíněných činností jsou na jaderných elektrárnách, na rozdíl od běžných průmyslových aplikací, kladeny zvýšené požadavky na kvalitu a bezpečnost realizovaných konstrukčně-technologických řešení. Z tohoto důvodu se veškeré svarové spoje přímo související se stěžejními komponentami jaderných elektráren podrobují důsledným kontrolám a zkouškám, a zároveň jsou často realizovány nejmodernějšími technologiemi.

Z důvodu zvýšených požadavků na provozní parametry komponent těchto zařízení je často využíváno materiálů vyžadujících specifický přístup z hlediska technologického zpracování. Zpravidla se jedná o náročnější technologické zpracování hutních polotovárů z těchto materiálů. Tato skutečnost se následně projevuje v případě svařování například nezbytností provedení tepelného zpracování svarových spojů po jejich svaření. U některých materiálů může v případě neprovedení tepelného zpracování po svařování vzniknout v tepelně ovlivněné oblasti místo se zvýšenou tvrdostí a výrazně odlišnými mechanickými vlastnostmi. V tomto místě pak může dojít k iniciaci a rozvoji trhlin, které mohou vést až k fatálnímu poškození komponent a zařízení.

Ne vždy lze provést vhodné technologické postupy z důvodu různých omezujících faktorů zabraňujících jejich provedení. Faktory omezující použití, jako v případě tepelného zpracování po svařování, jsou rozměry zpracovávané součásti, její tvarová složitost, obtížný přístup, a další faktory. V uvedených případech je nutné nahradit tyto technologické postupy jinými, například svařováním metodou popouštěcí housenky.

Pro konkrétní aplikaci v podobě [REDACTED]  
[REDACTED]  
formou svařování a navařování byl z výše uvedených důvodů zvolen postup svařování metodou popouštěcí housenky s využitím mechanizovaného svařování v podobě orbitálního svařování metodou 141. Jedná se o postup, kterým lze pozitivně ovlivnit struktura tepelně ovlivněné oblasti tak, aby bylo dosaženo zlepšení mechanických vlastností v této kritické oblasti svarového spoje. Pokud je tento postup vhodně navržen a následně i proveden, je možné do určité míry nahradit tepelné zpracování po svařování.

# I. Teoretická část

## 2. Technologie svařování

Je proces využívající tepla, tlaku nebo kombinace účinků obou fyzikálních veličin k vytvoření trvalého nerozebíratelného spoje dvou nebo více součástí. Při svařování dochází k tavení základního materiálu a u některých metod k přidávání přídavného materiálu, který následně tvoří svarovou lázeň a svarovou housenku. Svarový spoj je složen ze 3 základních částí, těmi jsou svarový kov (SK), tepelně ovlivněná oblast (TOO), která postupně přechází do tepelně neovlivněného základního materiálu (ZM). [1]

Svařování se používá pro spojování dílčích jednodušších součástí do složitějších celků, které by jinak bylo velice obtížné nebo nemožné vyrobit jako jeden díl. Svařované konstrukce bývají často levnější a efektivnější, než použití jiné technologie výroby, pokud je jejich realizace vůbec možná. Svařování je tedy díky své univerzálnosti poměrně často využívanou technologií ve strojním a stavebním průmyslu. Mezi jeho hlavní výhody patří vysoká pevnost a životnost spojů. Svarové spoje jsou také mnohem jednodušší na provedení, než například odlitky a zároveň dochází k menší spotřebě materiálu. Technologie svařování je využívána i pro opravy a renovace dílů, u nichž dochází ke zvýšenému opotřebení vlivem působení různých degradačních mechanismů. [1, 2]

Svařování má i své nevýhody, mezi které patří hlavně potřeba kvalifikovaného personálu, obtížná svařitelnost některých materiálů a v některých případech i již zmíněná nerozebíratelnost spoje. Také dochází ke vzniku výše zmiňované TOO, kde může u ocelí docházet ke vzniku struktur zákalného charakteru (např. martenzitické struktury). Tyto struktury způsobují změnu mechanických vlastností v tepelně ovlivněné oblasti a svarovém kovu, čímž se tato oblast stává oproti základnímu materiálu mnohem tvrdší a křehčí. [1, 2]

## 3. Tepelně ovlivněná oblast

Anglicky HAZ (Heat Affected Zone), je definována jako část nenataveného základního materiálu, jehož mikrostruktura byla ovlivněna teplem vneseným při svařování. Toto teplo se pak šíří materiálem, a to hlavně pomocí vedení (kondukce).

### 3.1 Děje v tepelně ovlivněné oblasti

Během svařování dochází k lokálnímu ohřevu materiálu a jeho natavení. Z hlediska fázových přeměn tak vzniká riziková oblast, s množstvím rozdílných struktur a vlastností. Se snižující se vzdáleností od svarové housenky roste míra tepelného ovlivnění. Tento jev je popsán tzv. tepelným příkonem svařování, který vyjadřuje množství tepla vnesené do materiálu, viz výpočtový vztah 3.1. Každá metoda svařování díky svému odlišnému principu tvoří TOO s rozdílnou šířkou. Šířku TOO rovněž ovlivňuje tloušťka materiálu. [3]

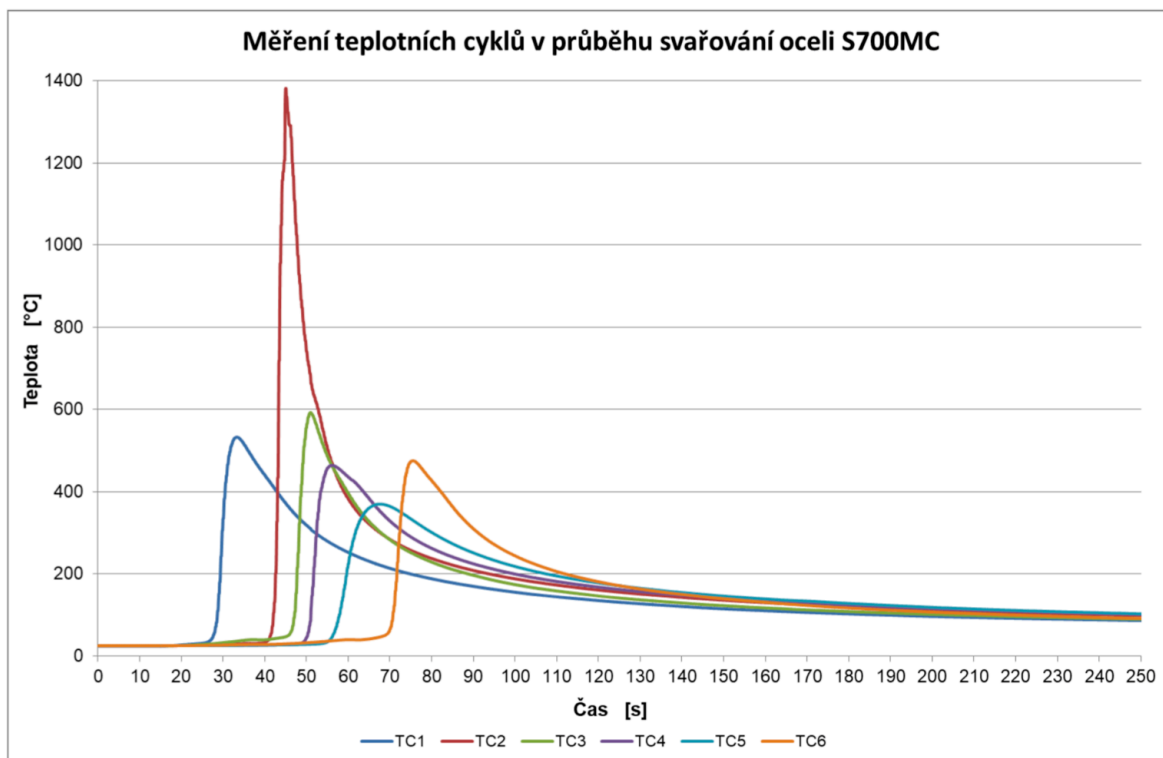
#### 3.1.1 Tepelný příkon

Označuje se písmenem  $Q$  a charakterizuje množství tepla vneseného do svaru na jednotku jeho délky [ $kJ \cdot mm^{-1}$ ]. Závisí na svařovacím proudu ( $I$ ), napětí ( $U$ ) a svařovací rychlosti ( $v$ ) v [ $mm \cdot s^{-1}$ ]. Jednotlivé metody svařování se však vzhledem k účinnosti tepelného přenosu na materiál mírně liší. Tato odlišnost je charakterizována tzv. koeficientem tepelné účinnosti ( $k$ ), viz Tabulka 3.1. [4, 3]

$$Q = k \cdot \frac{U \cdot I}{v} \cdot 10^{-3} [kJ \cdot mm^{-1}] \quad (3.1)$$

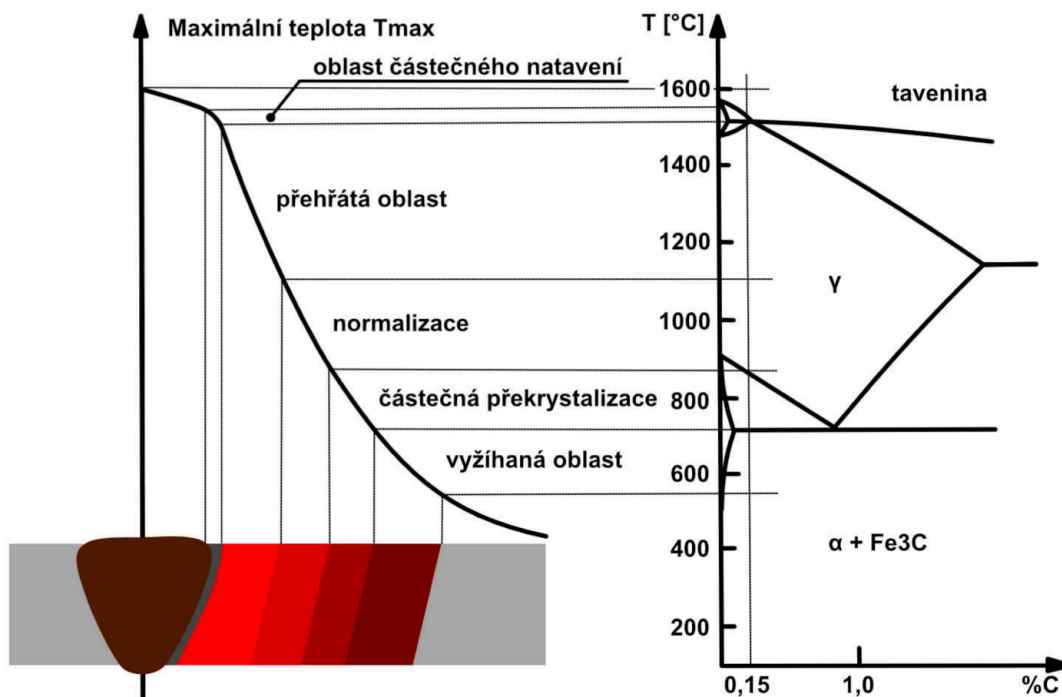
#### 3.1.2 Teplotní cykly

Materiál v průběhu svařování prochází velkými změnami teplot, které lze popsat  $T = f(t)$  diagramem teplotního cyklu, viz Obrázek 3.1. Teplotní cykly reprezentují proces svařování z hlediska průběhu teplot v daném bodě. Během svařování dochází k postupnému nárůstu teploty, který se s přibližujícím se zdrojem tepla prudce zvyšuje. Následuje rychlý pokles, který je v závislosti na svojí rychlosti rizikovým parametrem. Rychlost ohřevu je závislá na svařovaném materiálu a zvolené metodě svařování, kdy například při použití metody 111 je rychlost ohřevu zhruba 350 °C za sekundu. Při řezání kyslíkem se však tato rychlost může dostat až na 1750 °C za sekundu. Následné chladnutí z maximální teploty má za následek výše zmiňované strukturní změny a je závislé na materiálu, technologii svařování a podmínkách svařování. [5, 3]



Obrázek 3.1: Příklad průběhu teplotních cyklů při svařování oceli S700MC [6]

Čas po který materiál setrvává v oblasti přehřátí (nad  $A_{c3}$ ) je důležitý pro hrubnutí zrna. Čím déle se materiál pohybuje v této oblasti, tím více ke zhrubnutí zrna dochází. [5, 3]



Obrázek 3.2: Pásma TOO svarového spoje oceli s obsahem 0,15% C. [3]

## 3.2 Pásma tepelně ovlivněné oblasti

Tepelně ovlivněná oblast svaru se dělí na dílčí pásma, která nemají přesně stanovené hranice a dochází tedy k plynulému přechodu mezi nimi. Tato pásma jsou vyobrazena na Obrázek 3.2 a dále popsána v kapitolách 3.2.2 - 3.2.6. [4]

### 3.2.1 Tepelná difuzivita

Šířka dílčích pásem TOO je ve velké míře závislá na vlastnosti daného materiálu zvané tepelná difuzivita. Tepelná difuzivita ( $\alpha$ ) popisuje rychlost šíření tepla materiálem a závisí na součiniteli tepelné vodivosti ( $\lambda$ ), hustotě materiálu ( $\rho$ ) a měrné tepelné kapacitě ( $c$ ). Lze ji stanovit podle výpočtového vztahu 3.2. [7, 4]

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} [m^2 \cdot s^{-1}] \quad (3.2)$$

Čím vyšší je hodnota tepelné difuzivity, tím lépe je homogenní materiál schopen vyrovnávat teploty ve svém objemu během neustálého šíření tepla vedením. Pro materiály s vyšší tepelnou difuzivitou pak platí, že dochází ke snadnějšímu ochlazení a šířka TOO je menší. V případě použití materiálu s nižší tepelnou difuzivitou dochází k uvěznění tepla po delší dobu a rozšíření TOO. Zásadní vliv na šířku TOO má i zvolená metoda svařování a svařovací parametry dané metody. [7, 8, 4]

**Tabulka 3.1:** Tabulka koeficientů tepelné účinnosti ( $k$ ) pro jednotlivé metody svařování [3]

Označení metody	Metoda svařování	Koeficient $k$
121	svařování pod tavidlem drátovou elektrodou	1,0
111	ruční obloukové svařování obalenou elektrodou	0,8
114	obloukové svařování plněnou elektrodou bez ochranného plynu	0,8
131	obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu: MIG svařování	0,8
135	obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu: MAG svařování	0,8
136	obloukové svařování tavidlem plněnou elektrodou v aktivním plynu	0,8
137	obloukové svařování tavidlem plněnou elektrodou v inertním plynu	0,8
138	obloukové svařování kovem plněnou elektrodou v aktivním plynu	0,8
139	obloukové svařování kovem plněnou elektrodou v inertním plynu	0,8
141	obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu: WIG (TIG) svařování	0,6
15	plazmové svařování	0,6



### 3.2.2 Oblast částečného natavení

V této oblasti dochází k největšímu ohřátí základního materiálu a jeho částečnému natavení. Svarový kov se zde mísí se základním materiálem. Toto pásmo může kriticky ovlivnit kvalitu celého svarového spoje, a to z důvodu rizika vzniku trhlin způsobených chemickou nestejnoroďostí. [3]

### 3.2.3 Přehřátá oblast

Někdy se také označuje jako oblast nárůstu nebo hrubnutí zrna vyznačující se zejména hrubým austenitickým zrnem a přítomností feritu- $\delta$ . V rovnovážném diagramu se jedná o oblast vysoko nad teplotou  $A_{c3}$  (podle složení oceli od 1100 až 1300°C). Vzhledem k vysokým teplotám a relativně rychlému ochlazení po svařování může v tomto pásmu vznikat martenzitická, martenziticko-bainitická nebo bainitická struktura. Také dochází k výraznému hrubnutí zrna díky přehřátí materiálu. Hlavním mechanismem vzniku nerovnovážných strukturních složek je zamezení difúze uhlíku ven z krystalové mřížky austenitu (FCC). Při prudkém ochlazení tedy dojde pouze k malému pohybu částic (na vzdálenosti menší než vzdálenost mezi atomy mřížky) a změně plošně středěné (FCC) mřížky austenitu na prostorově centrovanou tetragonální mřížku (BCT) martenzitu. Tímto dojde k prodloužení jedné ze stran mřížky, které způsobuje zvýšení napětí ve výsledné struktuře. Díky tomuto jevu je zde v porovnání s ostatními pásmy TOO poměrně vysoká tvrdost a nízká houževnatost. Z hlediska svařování metodou popouštěcí housenky se jedná o nejrizikovější oblast, na kterou metoda cílí. V ideálním případě pak dochází během svařování k popuštění této oblasti. [8, 3]

### 3.2.4 Oblast normalizace

Je oblast, ve které se dosahuje teplot těsně nad  $A_{c3}$ . Dochází zde k překrytí a růstu menších austenitických zrn, která po ochlazení transformují na martenzit. Dochází také k normalizačnímu vyžihání struktury, které vede na lepší mechanické vlastnosti a nižší tvrdost. Oblast normalizace se vyznačuje sníženou odolností vůči creepu (tečení materiálu) a rovnoměrností zrn. [8]

### 3.2.5 Oblast částečné překrytí

Je charakterizována teplotami mezi  $A_{c1}$  a  $A_{c3}$ . Za normálních podmínek by v této oblasti docházelo k difúzi uhlíku do netransformovaného feritu- $\alpha$ . Tento proces je však při svařování brzo přerušeno a vzniká tzv. načechraný perlit (nedojde k úplné transformaci na austenit). [3]

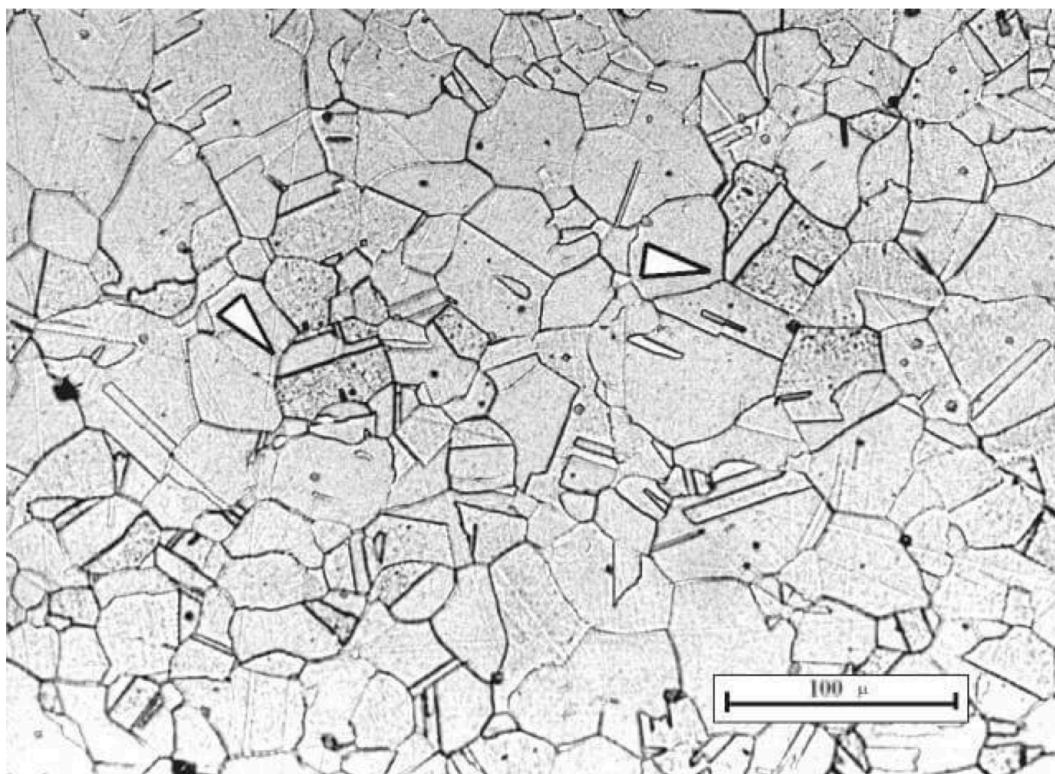
### 3.2.6 Vyžihaná oblast

Je oblastí, kde teplotně probíhá žihání na snížení napětí. Nachází se těsně pod teplotou  $A_{c1}$ . Mikrostruktura neprodělává fázovou transformaci, dochází zde však ke změnám v rámci tuhého roztoku feritu- $\alpha$ , případně také k substrukturním změnám. [8]

## 4. Fázové transformace v ocelích

### 4.1 Strukturní složky v ocelích

Oceli obsahují struktury, které jsou chemicky a fyzikálně stejnorodé, oddělené tzv. mezifázovým rozhraním, kde dochází ke skokové změně z jedné struktury na druhou. Toto rozhraní má výrazně odlišné vlastnosti od struktur, které odděluje. Rozlišujeme rovnovážné a nerovnovážné strukturní složky. Výskyt rovnovážných strukturních složek je popsán metastabilním diagramem Fe-Fe<sub>3</sub>C. Nerovnovážné strukturní složky vznikají při ochlazování materiálů vysokou rychlostí. [9, 10]



Obrázek 4.1: Austenitická zrna. [11]

#### 4.1.1 Austenit

Z pohledu strukturních přeměn v ocelích je nejdůležitější rovnáznou strukturní složkou austenit, někdy označován jako fáze  $\gamma$ . Pro pochopení ARA/IRA diagramů v dalších kapitolách je nutné vědět, že austenit, neboli intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe  $\gamma$ , je počáteční fází, ze které ochlazujeme materiál a v průběhu tohoto ochlazení se

tvoří ostatní rovnovážné i nerovnovážné strukturní složky oceli. Austenitické zrno lze ve struktuře rozeznat jako mnohoúhelníky světlé barvy, viz Obrázek 4.1. [9, 10, 12]

#### **4.1.2 Ferit- $\alpha$**

Je rovnovážnou strukturní složkou Fe-Fe<sub>3</sub>C diagramu. Definuje se jako intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe  $\alpha$ , ve struktuře se jeví jako bílá polyedrická zrna. [9]

#### **4.1.3 Perlit**

Rovnovážná strukturní složka, která vzniká při pomalém ochlazování z oblasti austenitu a skládá se z feritu- $\alpha$  a cementitu. Tyto dvě složky mohou být uspořádány lamelárně (ve střídajících se vrstvách) nebo globulárně (cementit se vyskytuje jako kuličky ve feritické matici), viz Obrázek 4.2. Jedná se tedy o směs - eutektoid metastabilní soustavy. [9, 12, 13]

#### **4.1.4 Ferit- $\delta$**

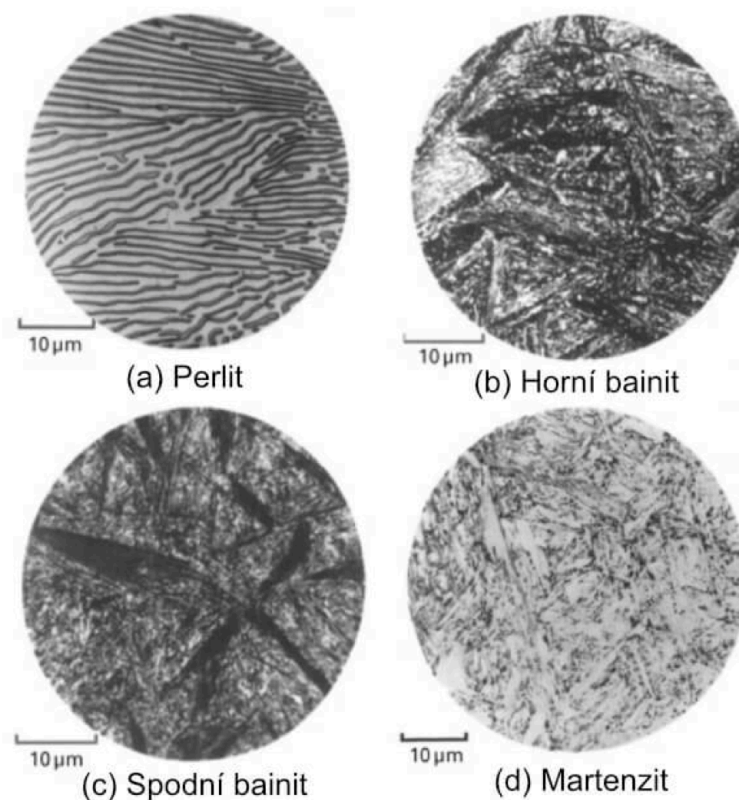
Je rovnovážnou strukturní složkou, která se vyskytuje při nejvyšších teplotách aniž by se přeměnila na taveninu (do 1526 °C). Nemagnetický, má zhruba 5x větší rozpustnost uhlíku než ferit- $\alpha$ . [10, 9, 14]

#### **4.1.5 Martenzit**

Nerovnovážná strukturní složka oceli charakteristická nejvyšší dosahovanou tvrdostí. Nejčastěji se vyskytuje jako tzv. martenzitické jehlice, viz Obrázek 4.2. Vzniká při rychlém ochlazování z oblasti austenitu a struktura obsahující více než 50 % martenzitu je považována za zakalenou. Společně s martenzitem při rychlém ochlazování ve struktuře zůstává i zbytkový austenit. [9, 13, 15]

#### **4.1.6 Bainit**

K bainitické přeměně dochází při poměrně rychlém ochlazování, kdy se nedosahuje takové rychlosti ochlazování, aby vznikla základná martenzitická struktura. Skládá se z cementitu a lamel feritu. Tyto dvě složky tvoří bainitické jehlice, viz Obrázek 4.2. Rozlišován je horní (při vyšší teplotě) a spodní (při nižší teplotě) bainit. Patří také mezi nerovnovážné strukturní složky oceli. [16]

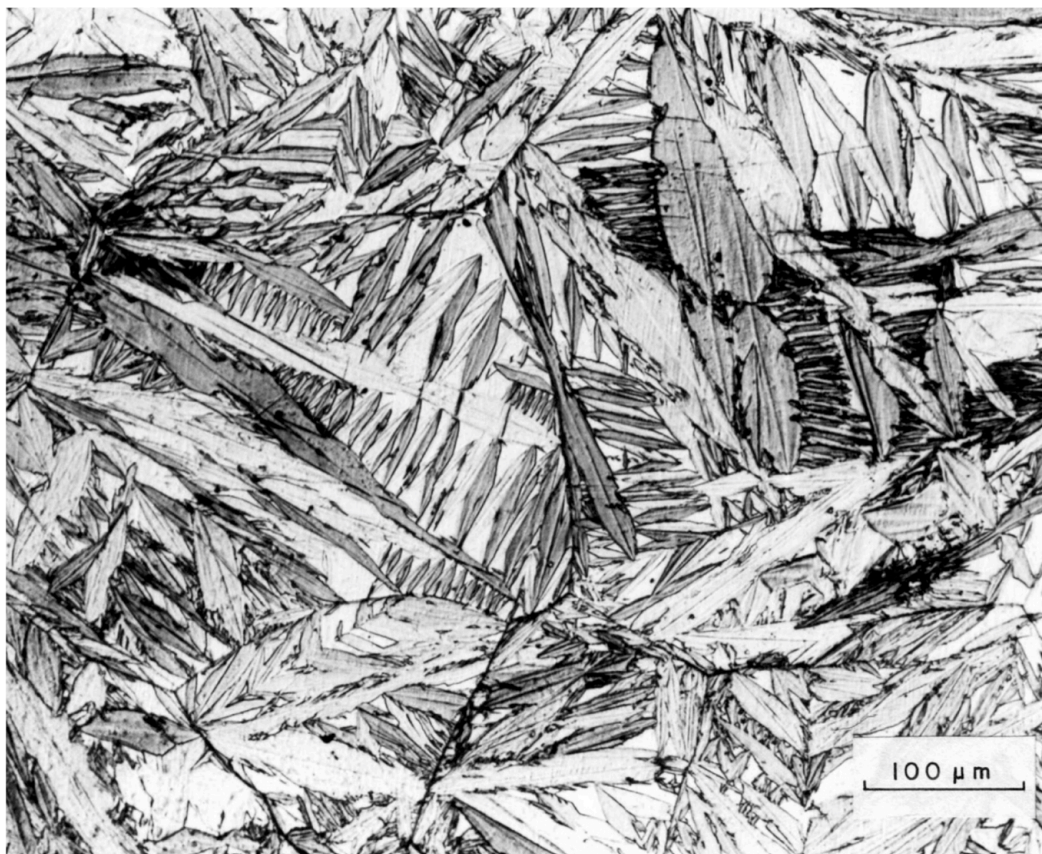


**Obrázek 4.2:** Příklady výše zmiňovaných struktur. [17]

## 4.2 Vznik martenzitické struktury

Pro objasnění nutnosti využití tepelného zpracování po svařování (viz kapitola 5.) je nutné popsat, co je jeho cílem. V průběhu svařování dochází k natavení základního a přídavného materiálu, během tohoto procesu dochází k výraznému překročení austenitizační teploty materiálu. Při určitém složení oceli (obecně nad 0,2 % C) poté může během chlazení na vzduchu docházet k částečnému zakalení struktury a vzniku martenzitu. [13, 15]

Martenzit je tvrdá a křehká nerovnovážná strukturní složka oceli, ale i jiných nekovových materiálů. Ve struktuře lze rozpoznat jako tzv. martenzitické jehlice (může se vyskytovat i jako lamely), viz Obrázek 4.3. Vzniká bezdifúzní stříhovou transformací, to znamená, že atomy příměsí se v krystalové mřížce přesunou jen na vzdálenosti menší než je mřížkový parametr. Tohoto jevu docílíme rychlým ochlazením z oblasti austenitu. V případě oceli tak FCC austenit transformuje bezdifúzně přímo na BCT martenzit. Podle obsahu uhlíku a složení oceli je vzniklá tetragonální krystalová mřížka přesycena uhlíkem a v závislosti na jeho množství zvýší svůj objem. Zvýšení objemu je způsobeno zvýšením poměru mřížkových parametrů BCT mřížky martenzitu. Tato mřížková deformace je pak nositelem napětí, které v materiálu způsobuje výše zmiňovanou tvrdost a křehkost. [13, 15]



**Obrázek 4.3:** Martenzitická struktura FeNiC oceli po zakalení do kapalného dusíku. [18]

Proces vzniku martenzitu je popsán v tzv. transformačních diagramech: IRA a ARA (izotermický a anizotermický rozpad austenitu). Pro získání martenzitické struktury musí dojít ke splnění dvou základních požadavků: dostačující rychlost ochlazování a dosažení teplot  $M_s$  a následně  $M_f$ . Tyto teploty (martenzit start a martenzit finish) definují teplotní pásmo, ve kterém k martenzitické přeměně může docházet. Pro martenzitickou přeměnu není potřeba na těchto teplotách setrvávat a k přeměně začne docházet okamžitě po překročení teploty  $M_s$ . Teploty  $M_s$  a  $M_f$  závisí na chemickém složení oceli, nikoliv na rychlosti ochlazování. [13, 15]

### 4.3 IRA a ARA diagramy

Diagramy izotermického a anizotermického rozpadu austenitu slouží k popsání průběhu teploty v závislosti na čase v materiálu. Z IRA/ARA diagramů lze předběžně odhadnout výslednou strukturu tepelného zpracování.

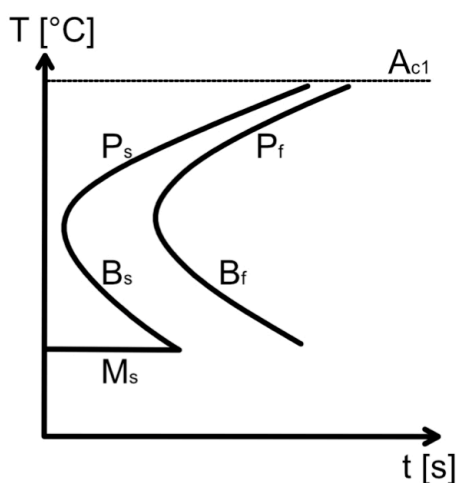
#### 4.3.1 IRA diagramy

Popisují strukturní přeměny v oceli v závislosti na teplotě a časovém průběhu. IRA (anglicky TTT - Time Temperature isothermal Transformation) diagramy jsou používány pro počáteční odhad a plánování procesu zpracování oceli. Jejich nevýhodou je však to, že počítají s izotermickými procesy a během svařování se materiál vždy chová anizotermicky. Na Obrázek 4.4 je příklad IRA diagramu. Křivky ve tvaru C určují

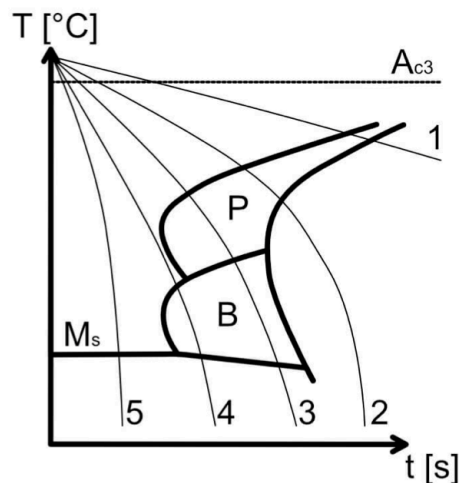
počáteční a konečné podmínky pro dané transformace ( $P_s$  a  $P_f$  odpovídají podmínkám pro začátek a konec přeměny austenit  $\rightarrow$  perlit, nápodobně je tomu u křivek pro bainitickou přeměnu -  $B_s$  a  $B_f$ ). Příklad bainitické přeměny podle IRA diagramu tak probíhá následovně: Materiál se ochladí na teplotu nad  $M_s$   $\rightarrow$  tato teplota zůstává stabilní až do konce přeměny (proto izotermický rozpad) a protnutí křivky  $B_f$ . Po dokončení přeměny se materiál dochladi na požadovanou teplotu. [14, 19, 20]

### 4.3.2 ARA diagramy

ARA (anglicky CCT - Continuous Cooling Transformation) diagramy, byly vyvinuty pro popis přeměn strukturních složek během proměnných rychlostí ochlazování. Různé rychlosti ochlazování tak vedou na různé finální struktury materiálu. Na Obrázek 4.5 jsou vyznačeny možné průběhy teplot při ochlazování z oblasti austenitu. Oblasti vyznačené jako "B" a "P" odpovídají podmínkám, při kterých vznikají dané strukturní složky (bainit a perlit). Křivky jsou většinou charakterizovány rychlostí ochlazování a výslednou tvrdostí na konci procesu ochlazování. Např. křivka č. 4 prochází oblastí bainitu a končí v oblasti martenzitu. Z toho je možné usoudit, že výsledná struktura bude martenziticko-bainitická. Nad oblastí perlitu se někdy uvádí také oblast feritu- $\delta$ . Rozložení strukturních složek v diagramu tak závisí na chemickém složení dané oceli a pro každý materiál je tento diagram odlišný. [14, 19, 20]



Obrázek 4.4: Příklad IRA diagramu



Obrázek 4.5: Příklad ARA diagramu

### 4.3.3 ARA diagramy In Situ

Pro popis průběhů teplot během procesu svařování bývá využito speciálního typu ARA diagramů "in situ". Jedná se o variantu ARA diagramu, kdy na ose x není logaritmus času ale parametr  $\Delta t_{8/5}$ , který popisuje čas, za který proběhne snížení teploty z 800 °C na 500 °C. Čím menší tento parametr je, k tím rychlejšímu ochlazení dochází a může začít docházet ke vzniku bainitické nebo martenzitické struktury. Pro zvýšení parametru  $\Delta t_{8/5}$  se nejčastěji využívá přehřev svařovaného materiálu. [3]

## 5. Tepelné zpracování po svařování

Tepelné zpracování (TZ) je procesem, který zásadně ovlivňuje konečné vlastnosti materiálu. Během TZ dochází k cíleným změnám struktury materiálu. Obecně se TZ skládá z ohřevu materiálu na danou teplotu, výdrže na této teplotě a následného ochlazení. Podle teploty na kterou je materiál ohříván se TZ dále dělí na 2 základní skupiny (s překrystalizací a bez překrystalizace). Tyto skupiny se dále dělí na dílčí typy TZ. U svařování však využíváme pouze některých typů TZ, a to zejména žíhání a popouštění. [3, 21]

### 5.1 Tepelné zpracování s překrystalizací

Tepelné zpracování s překrystalizací je charakterizováno úplnou přeměnou krystalové mřížky během procesu, kdy při ohřevu dochází k přeměně  $\alpha \rightarrow \gamma$  a při ochlazení zase zpět  $\gamma \rightarrow \alpha$ . Rychlost a průběh ochlazování pak ovlivňuje výslednou strukturu (ARA, IRA diagramy). Do této skupiny TZ jsou zařazeny následující typy: normalizační žíhání, homogenizační žíhání, žíhání ke zhrubnutí zrna, různé druhy kalení, rozpouštěcí žíhání, stabilizační žíhání a termomechanické zpracování. [3]

### 5.2 Tepelné zpracování bez překrystalizace

Při TZ bez překrystalizace nedochází k překročení teploty  $A_{c1}$  a krystalová mřížka tak neprochází  $\alpha \rightarrow \gamma$  přeměnami a zůstává pouze v  $\alpha$  fázi. Těchto TZ se využívá pro uvolnění vnitřních napětí v materiálu, odstranění deformačně zpevněné struktury, změkčení struktury,... Mezi TZ bez překrystalizace tedy spadají následující metody: žíhání ke snížení napětí, rekrystalizační žíhání, žíhání na měkko a popouštění. [3]

### 5.3 Popouštění

Popouštění je typ tepelného zpracování bez překrystalizace, který se obecně provádí vždy po kalení, kombinace kalení + popouštění se nazývá zušlechťování. Skládá se z několika fází, ale hlavní charakteristikou je ohřev materiálu těsně pod teplotu  $A_1$ , tak aby nedošlo k překrystalizaci struktury a vzniku austenitu. Jeho cílem je snížení napětí, obnovení houževnatosti, pevnosti a zlepšení rozměrové stálosti. Dělí se na nízkoteplotní (do 350 °C) a vysokoteplotní (400 °C a více). Při nízkoteplotním popouštění si materiál zachovává velkou část své tvrdosti, může dokonce dojít k efektu tzv. sekundární tvrdosti, kdy materiál během popouštění vlivem precipitace legujících prvků a karbidů docílí ještě vyšší tvrdosti než měla původní zakalená struktura. [22, 23]

### 5.3.1 Fáze popouštění

Popouštění se dělí na 4 fáze, během kterých dochází k různým procesům (zejména difúzi karbidů a změnám krystalových mřížek), které přispívají k dosažení požadované struktury. [22]

### 5.3.2 První fáze popouštění

V první fázi (do 200 °C) dochází k ochuzení martenzitu zakalené struktury o uhlík a následkem toho se snižuje jeho tetragonalita. Tato fáze se také poměrně liší s % C ve struktuře. Pro oceli do 0,2 % C platí, že v důsledku nižšího obsahu uhlíku reagují jinak, než oceli nad 0,2 % C. V nízkouhlíkových ocelích (do 0,2 % C) při první fázi popouštění dochází k difúzi atomů uhlíku po hranicích zrn a na dislokacích. V důsledku nižšího obsahu uhlíku se netvoří tzv.  $\epsilon$ -karbidy ( $\text{Fe}_{2,4}\text{C}$ ), protože všechny uhlík je obsažen právě na hranicích zrn nebo dislokacích. Oceli s vyšším obsahem uhlíku (nad 0,2 % C) se na druhou stranu vyznačují vysokou nestabilitou martenzitu díky jeho přesycení uhlíkem. V těchto ocelích pak dochází k difúzi  $\epsilon$ -karbidů a snížení tetragonality martenzitu (jeho BCT mřížka se ochudí o uhlík a tím se zmenší poměr délek stran, v podstatě dojde k přiblížení se zpět ke kubické mřížce). Vyloučené  $\epsilon$ -karbidy poté tvoří vlastní fázi (hexagonální kryst. mřížka) a dále se nepřeměňují na  $\text{Fe}_3\text{C}$ . V důsledku ochuzení BCT mřížky martenzitu o uhlík dochází ke snížení objemu součásti. [22, 23]

### 5.3.3 Druhá fáze popouštění

Druhá fáze popouštění (200 - 300 °C) se vyznačuje hlavně přeměnou zbytkového austenitu na spodní bainit ( $\text{Fe} + \text{Fe}_{2,4}\text{C}$ ), který má kubickou krystalovou mřížku. Tato přeměna má za následek zvýšení objemu součásti. [22, 23]

### 5.3.4 Třetí fáze popouštění

Během třetí fáze popouštění (200 – 350 °C) dochází k formování lamel cementitu, úplnému rozpuštění  $\epsilon$ -karbidů v matrici a kompletní ztrátě tetragonality martenzitu (martenzit ztrácí všechny uhlík a stává se tak k nerozeznání od FCC feritu). Díky této přeměně martenzitu pak opět dochází ke snížení objemu součásti. [22, 23]

### 5.3.5 Čtvrtá fáze popouštění

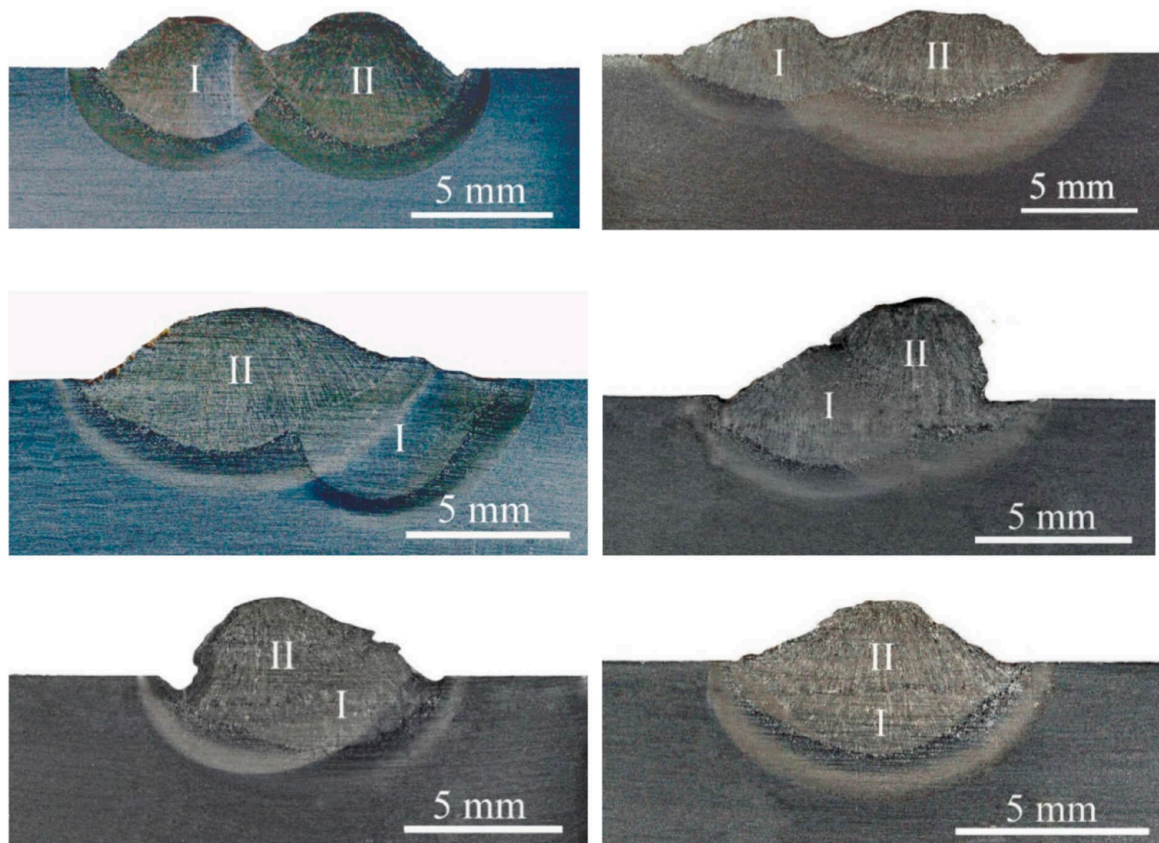
Čtvrtá fáze (350 - 700 °C) se vyznačuje růstem a sferoidizací cementitu, rekrystalizací, a zotavením původních feritických zrn. Lamely cementitu začínají růst od 300 °C, k jejich sferoidizaci však dochází až při teplotách nad 400°C. Při překročení teploty 600 °C dochází k rekrystalizaci původních feritických zrn a v kombinaci se sferoidním cementitem vzniká struktura, kterou nazýváme globulární perlit. Tato struktura se vyznačuje dobrou obrobitelností a tažností, také je považována za nejstabilnější strukturu diagramu Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$ . [22, 23]



## 6. Svařování metodou popouštěcí housenky

### 6.1 Základní popis metody

Metoda svařování popouštěcí (někdy také žíhací) housenkou je forma obloukového tavného svařování využívající řízení množství vneseného tepla k pozitivnímu ovlivnění struktury a mechanických vlastností svarového kovu a jeho tepelně ovlivněné oblasti. Na Obrázek 6.1 je patrný vliv různých parametrů svařování na rozměry, tvar a geometrii svarových housenek a strukturu tepelně ovlivněné oblasti. Cílem metody je zvolení parametrů svařování tak, aby došlo k co nejlepšímu překrytí hrubozrné a zákalné oblasti předchozího svaru oblastí vyžítanou svaru dalšího. Dochází tak k popuštění (vyžítání) předešlým svařováním zakalené nebo hrubozrné oblasti a ke zlepšení výsledných mechanických vlastností svaru. [24, 25]



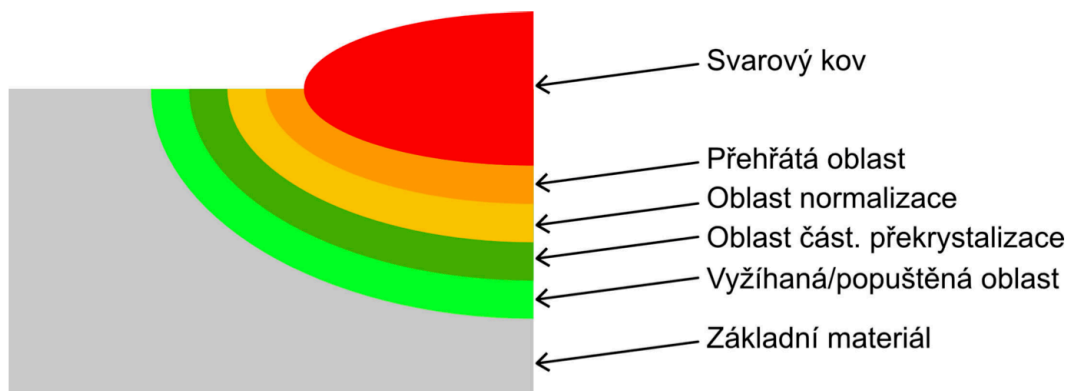
Obrázek 6.1: Příklady ovlivnění svarové housenky další housenkou. [24]

## 6.2 Historie a vznik metody

Metoda svařování popouštěcí housenkou byla poprvé vyvinuta v 80. letech ve Francii. V rámci širšího označení "popouštěcí housenka" je zahrnuto několik dílčích metod. První a nejzákladnější dílčí metodou je Half Bead Technique (metoda poloviční housenky). Half Bead Technique využívá metody svařování obalenou elektrodou (111), kdy je pro každou další vrstvu svarového kovu použita elektroda o větším průměru než předchozí vrstva. Tímto způsobem dochází k postupnému navyšování vneseného tepla a vyššímu stupni popouštění a rozšíření TOO vyšších vrstev. V této práci je věnována pozornost modernější dílčí metodě zvané Alternate Temper Bead Technique (alternativní metoda popouštěcí housenky), která využívá automatizace metody svařování netavící se wolframovou elektrodou v inertním plynu (141). Obecným cílem svařování metodou popouštěcí housenky je zušlechtnění svarového kovu již během procesu svařování. Toho se v rámci Alternate Temper Bead Technique docílí přesnou kontrolou svařovacích parametrů a vneseného tepla. [26]

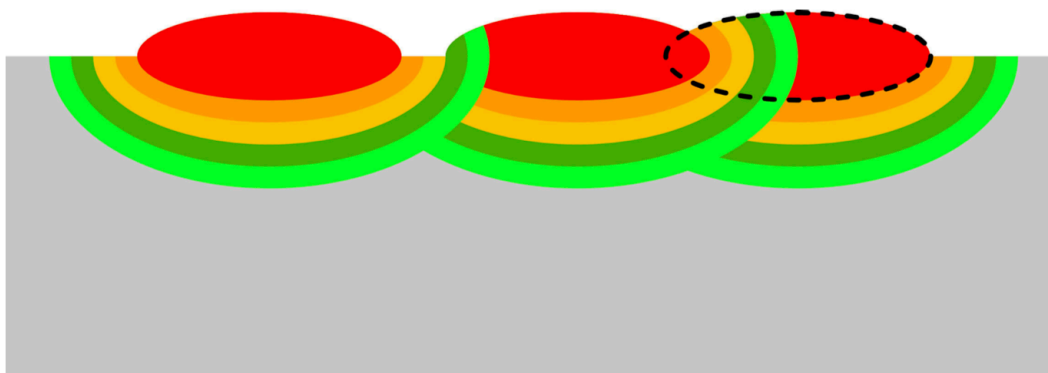
## 6.3 Umístění svarových housenek

Pro dosažení požadovaného efektu v celém objemu svaru je nutné přesně umisťovat jednotlivé svarové housenky. Jak již bylo zmíněno v kapitole 5, TOO se skládá z jednotlivých částí, které jsou pro připomenutí zakresleny na Obrázek 6.2. [27, 25]



Obrázek 6.2: Zjednodušené schéma TOO svarové housenky

Z principu svařování metodou popouštěcí housenky tak vyplývá, že musí docházet k určitému procentu překrytí předchozí svarové housenky, housenkou následující. Procento překrytí výrazně ovlivňuje výslednou tvrdost materiálu a pro maximální efekt popouštění TOO je nutné každou další housenkou vyžíhat hrubozrnnou oblast TOO a svarový kov předchozí housenky. Tato problematika je názorně zobrazena na Obrázku 6.3, kde je možné pozorovat jak se jednotlivé housenky (v pořadí zprava doleva) navzájem ovlivňují na základě jejich vzdálenosti. [27, 25]



**Obrázek 6.3:** Vzájemné ovlivnění housenek při jejich různých vzdálenostech.

## 6.4 Používané metody svařování

V případě využití metody svařování popouštěcí housenkou jsou voleny dobře regulovatelné a pokud možno automatizovatelné nebo mechanizovatelné metody. V zásadě se tak jedná o metody obloukového svařování tavící se elektrodou (MIG, MAG, MMA), metody využívající netavící se elektrodu (TIG) a metody využívající svařování pod tavidlem (SAW). Výše uvedené metody jsou podrobněji definovány normou ČSN EN ISO 4063 [28], která daným metodám přiřazuje běžně využívané číselné označení. Co se týče normalizace metody svařování metodou popouštěcí housenky, ta je zastřešena pouze americkou normou ASME BPVC, která též definuje výše zmiňované metody pod jinými názvy. ASME BPVC pro metodu svařování popouštěcí housenkou definuje metody uvedené v Tabulka 6.1. [29]

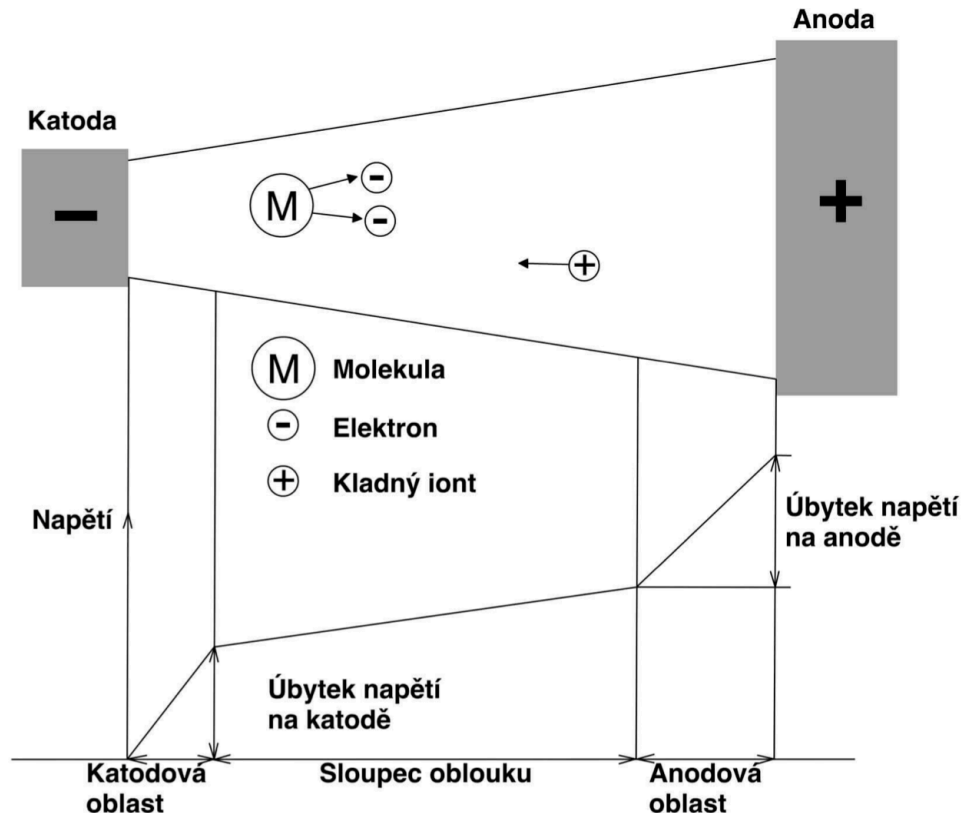
**Tabulka 6.1:** Metody stanovené ASME kódem pro svařování metodou popouštěcí housenky.

ASME	ČSN EN ISO 4063	SLOVNÍ POPIS
SMAW	MMA - 111	Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou
SAW	SAW - 12	Svařování pod tavidlem
GMAW	MIG/MAG - 131/135	Svařování tavící se elektrodou v ochranném plynu
GTAW	TIG/WIG - 141	Svařování netavící se wolframovou elektrodou v inertním plynu
FCAW	FCAW - 132, 133, 136, 138	Obloukové svařování plněnou elektrodou v ochranném plynu
LBW	LBW - 52	Laserové svařování
PAW	PAW - 15	Plazmové svařování

## 6.5 Metoda 141 (GTAW/TIG/WIG)

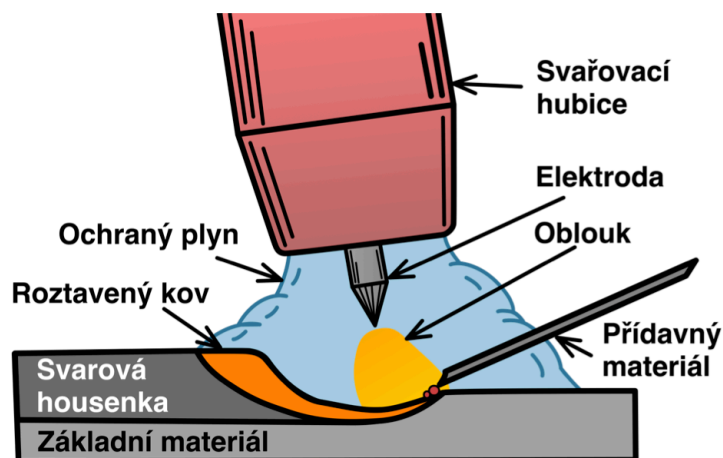
Jedná se o metodu obloukového svařování netavící se wolframovou elektrodou v inertním ochranném plynu. Bližší vysvětlení principu obloukového svařování je v dalším odstavci. Metodou 141 je možno svařovat jak stejnosměrným, tak i střídavým proudem. Podmínkou je však strmá statická volt-ampérová charakteristika svařovacího zdroje. V případě automatizovaného svařování je však preferována plochá volt-ampérová charakteristika. Pro svařování ocelí je svařování střídavým proudem méně podstatné, používá se zejména pro svařování hliníku, hořčíku a jejich slitin. Proto této variantě nebude dále věnována pozornost. [30, 31]

Elektrický oblouk využívaný při svařování je nízkonapěťový elektrický vysokotlaký výboj o délce 2 - 7 mm. Skládá se ze tří hlavních částí, a to katodové oblasti, sloupce oblouku a anodové oblasti. V katodové oblasti dochází k emisi elektronů díky jejímu nízkému emisnímu odporu. Ve sloupci oblouku dochází k rozkladu molekul (disociace), následnému uvolnění valenčního elektronu jednoatomových složek (ionizace), přechodu elektronů na vyšší energetickou vrstvu (excitace) a následně dochází k návratu elektronů do původního stavu (rekombinace). Rekombinace je převládajícím jevem v anodové oblasti, ve které se díky tomuto jevu uvolňuje až o 30% více tepla než v katodové oblasti. Dalším faktorem je dopad elektronů na anodovou oblast. Kinetická energie těchto elektronů je zde přeměněna na teplo. [32]



**Obrázek 6.4:** Zjednodušené schéma elektrického oblouku při přímé polaritě DC- (elektroda = katoda). [32]

Při použití metody 141 dochází k zapálení a stabilnímu hoření oblouku mezi netavící se wolframovou elektrodou a svařovaným materiálem viz Obrázek 6.5. Ochranný plyn (většinou argon) bývá přiváděn z lahve s plynem a chrání svarovou lázeň (více k ochranným plynům v kapitole 6.5.5). [2]



Obrázek 6.5: Schéma svařování metodou 141. Nakresleno autorem dle [33].

### 6.5.1 Přídavný materiál

Metoda TIG je schopna pracovat s i bez přídavného materiálu, norma ČSN EN ISO 4063 tyto možnosti rozlišuje následovně. Pro svařování s přídavným materiálem se jedná o metodu 141, v případě svařování bez přídavného materiálu hovoříme o metodě 142. V případě použití přídavného materiálu se jedná o drát přidávaný do svarové lázně svářečem nebo automatizovaným podavačem. V případě automatizovaného podávání drátu se většinou jedná o drát velmi podobný přídavnému materiálu pro svařování metodou 135/131. Pro manuální způsob bývají přídavné materiály ve formě tvrdých drátů o délce zhruba 500 mm. Materiál se volí vhodně ve vztahu ke svařovaným materiálům, tzn. že by měl co nejlépe odpovídat chemickým složením a mechanickými vlastnostmi základnímu materiálu. V případě heterogenních svarů se přídavný materiál volí tak, aby svými vlastnostmi vhodně doplňoval dané materiály a nijak negativně je neovlivňoval. Volba přídavného materiálu je zásadním parametrem pro úspěšné svařování metodou 141. [2]

### 6.5.2 Polarita zdroje při svařování metodou 141

Metoda 141 využívá všech možností napájení pro obloukové svařování. Jedná se tedy o zapojení na přímou (DC-) a nepřímou (DC+) polaritu stejnosměrného proudu, ale i možnost svařovat střídavým proudem (AC). Každá polarita jinak zatěžuje materiál a elektrodu, v tomto případě dochází k většímu tepelnému zatížení materiálu při DC- a elektrody při DC+. Je důležité zmínit, že při využití DC+/AC je dosaženo čistícího efektu oblouku, který je velmi důležitý např. při svařování Al, Mg a jejich slitin. Pro svařování ocelí tento efekt není tak důležitý. [3, 2]

### 6.5.3 Elektrody a jejich druhy

Všechny elektrody pro metodu 141 obsahují jako většinovou složku wolfram. Wolfram se používá z důvodu jeho vysoké teploty tání, která přesahuje 3 410 °C. Čistě wolframové elektrody jsou univerzální a lze je použít téměř pro všechny materiály. Často však dochází k legování elektrod oxidy prvků vzácných zemin jako lanthan, cerium, zirkonium a thorium. V souladu s normou ČSN EN ISO 6848 [34] jsou elektrody značeny barevnými pásky, viz Tabulka 6.2. [2, 35, 36]

**Tabulka 6.2:** Rozdělení wolframových elektrod podle chemického složení. [34]

Klasifikační symbol	Požadavky na chemické složení			Barevné značení
	Legující oxid	Hm. %	Hm. % nečistot	
WP	není		0,1 max.	Zelená
WCe20	CeO <sub>2</sub>	1,8 až 2,2	0,1 max.	Šedá
WLa10	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,8 až 1,2	0,1 max.	Černá
WLa15	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,3 až 1,7	0,1 max.	Zlatá
WLa20	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,8 až 2,2	0,1 max.	Modrá
WTh10	ThO <sub>2</sub>	0,8 až 1,2	0,1 max.	Žlutá
WTh20	CeO <sub>2</sub>	1,7 až 2,2	0,1 max.	Červená
WTh30	ThO <sub>2</sub>	2,8 až 3,2	0,1 max.	Fialová
WZr3	ZrO <sub>2</sub>	0,15 až 0,50	0,1 max.	Hnědá
WZr8	ThO <sub>2</sub>	0,7 až 0,9	0,1 max.	Bílá

Nejrozšířenějším typem elektrod jsou thoriové elektrody, které se používají pro svařování stejnosměrným proudem, kterým se svařuje většina materiálů. Od tohoto typu elektrod se však upouští ve prospěch elektrod cériových a lanthanových. Oba druhy (cériové a lanthanové) elektrody se vyznačují velkou škálou svařovatelných materiálů a na rozdíl od thoria, které je radioaktivní, i zdravotní nezávadností pro obsluhu. [37]

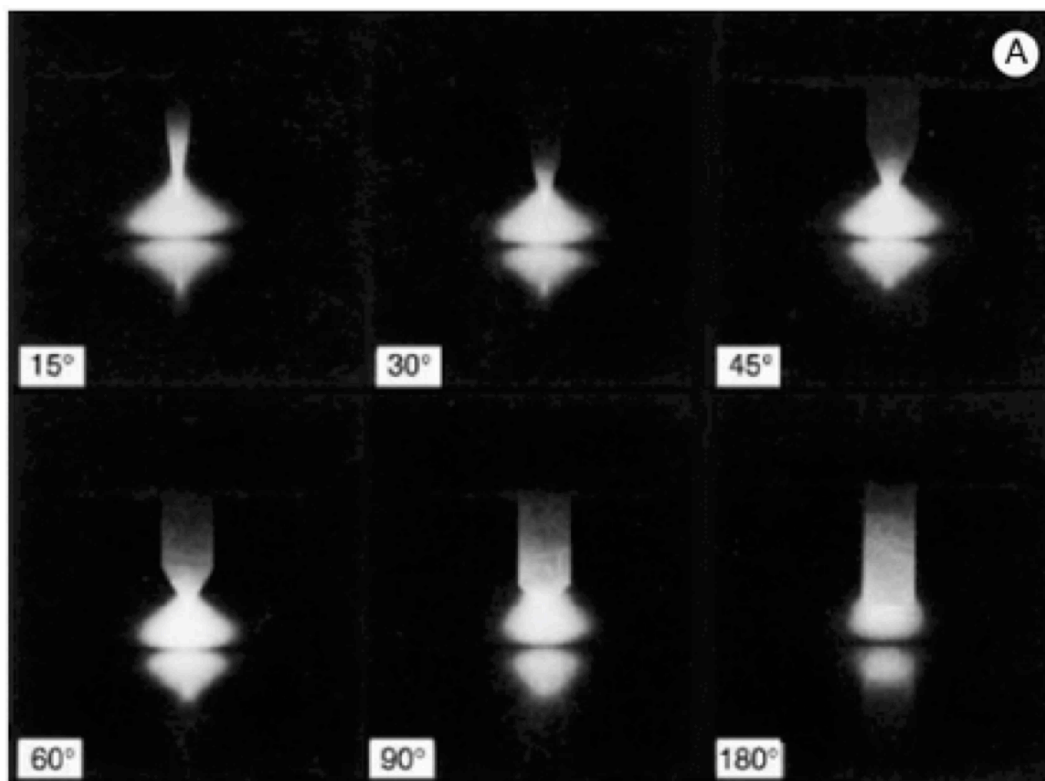
### 6.5.4 Metodika svařování a geometrie elektrod

Svařování wolframovou elektrodou se používá hlavně z důvodu jeho dobré regulovatelnosti. Tato vlastnost je však podmíněna použitím vhodných svařovacích parametrů, geometrie broušení elektrody, ochranného plynu a upevnění do hořáku. Aby docházelo ke správnému obtékání elektrody a svarové lázně ochranným plynem, měla by délka přesahu elektrody z hubice být zhruba dvojnásobek jejího průměru. V případě, že by elektroda byla výrazně vytažena ven, může dojít k horšímu pokrytí svarové lázně a elektrody ochranným plynem a jejich následné oxidaci. [2, 38]

Podstatný vliv na svařování má i geometrie konce elektrody. Ten se brousí na určité úhly podle použití. Vrcholové úhly elektrod se pohybují mezi 20° - 90°. Čím větší je

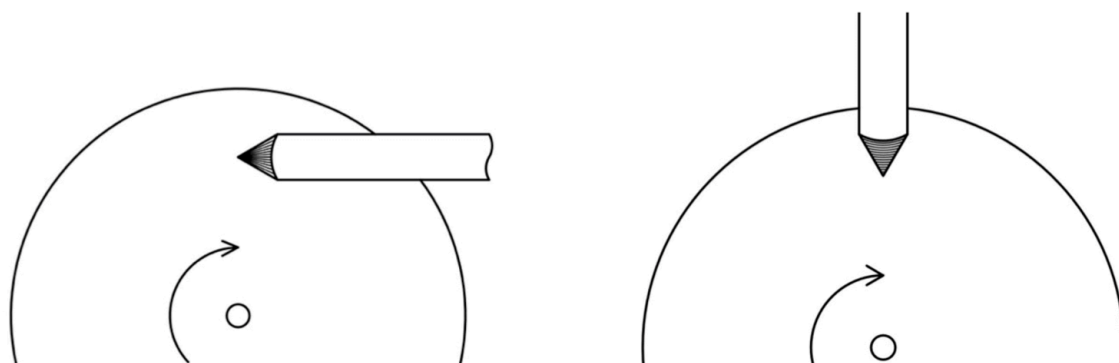
úhel, resp. čím „tupější“ je elektroda, tím nižší je dosažená hloubka průvaru materiálu, životnost elektrody a užší kužel oblouku viz Obrázek 6.6. Broušení na vyšší úhel má však i své nevýhody, a to zejména horší stabilitu oblouku a schopnost zapálit oblouk. Elektrody s menším vrcholovým úhlem se vyznačují snazším zapálením oblouku, jeho vyšší stabilitou a šířkou. Tyto elektrody však vykazují horší životnost. [2, 39, 40]

V případě automatizovaného svařování je brán zvláštní důraz na přesné dodržování geometrie elektrod. Svar prováděný automatizovanou metodou 141 se může v případě zachování všech parametrů až na geometrii elektrody výrazně lišit od svaru prováděného s jinou geometrií. [2]



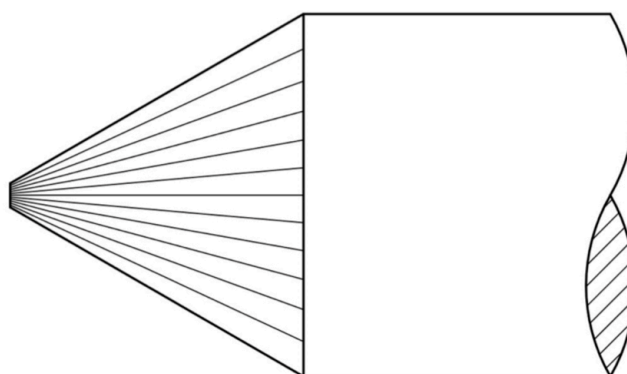
**Obrázek 6.6:** Tvary oblouků v závislosti na nabroušení elektrody. [41]

Broušení wolframových elektrod je doporučeno provádět na jemných diamantových bruskách. Při broušení na běžných bruskách může dojít ke kontaminaci elektrody cizími prvky a zhoršení její funkce. Broušení by mělo být prováděno rovnoběžně s osou elektrody, nikoliv kolmo nebo pod úhlem, viz Obrázek 11.5. Pokud bychom elektrodu nabrousili po obvodu elektrody, dojde ke zhoršení toku elektrického proudu elektrodou a zhoršení její funkce. Důležité je také to, aby hrot ležel v ose elektrody. Pokud by tomu tak nebylo, může dojít ke vzniku nestabilního oblouku. [39, 40]



**Obrázek 6.7:** Správná metoda broušení (vlevo) a nevhodná metoda broušení (vpravo).

Samotný hrot elektrody však také není dokonale špičatý a v případě přesného svařování záleží i na jeho tvaru. Každá elektroda (kromě geometrie do tzv. kaloty pro svařování hliníku nebo zapojení DC+) má na svém hrotu malou plochu viz. Obrázek 6.8. Rozměr této plochy ovlivňuje svar podobně jako úhel zabroušení elektrody. Čím větší tato plocha je, tím hůře se zapaluje oblouk a klesá jeho stabilita. Výhodami větší plochy na hrotu je vyšší hloubka průvaru a životnost elektrody. [39, 40]



**Obrázek 6.8:** Detail hrotu elektrody

### 6.5.5 Ochranné inertní plyny a jejich směsi

Pro svařování metodou 141, musíme použít ochranou atmosféru, a to konkrétně inertní plyn. Dva používané inertní plyny jsou argon, helium a jejich směsi viz Tabulka 6.3 dle ČSN EN ISO 14175 [42]. Tyto plyny se používají pouze ve vysoce čisté podobě (4.6 - 99,996 % až 5.0 - 99,999 %). V ojedinělých případech je možno argon a helium použít ve směsi s vodíkem nebo dusíkem. [31, 43, 44]



**Tabulka 6.3:** Značení inertních plynů pro TIG svařování dle ČSN EN ISO 14175. [42]

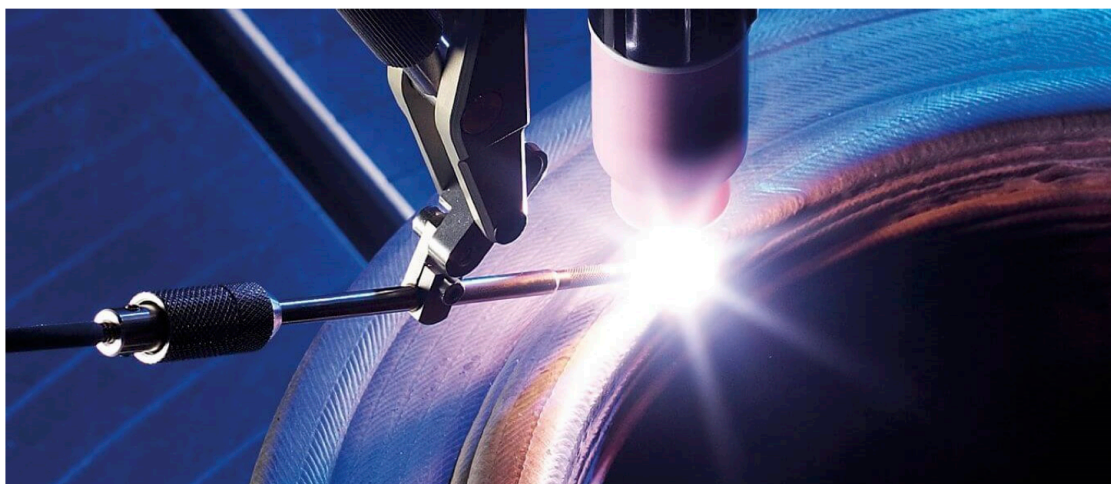
Označení	Složky v objemových %		
	Podskupina	Ar	He
I	1	100	
	2		100
	3	zbytek	0-95

Argon je jednoatomový inertní plyn, který dobře zapaluje a udržuje oblouk. Díky těmto vlastnostem se často používá jako nosný plyn při použití směsí. Jeho největší výhodou je jeho nízký ionizační potenciál a fakt, že je jednoatomový. Jednoatomovým plynům není potřeba dodávat disociační energii, protože k disociaci vůbec nedochází. Co se týče nevýhod argonu, musíme brát v potaz jeho nízkou tepelnou vodivost a na to navazující menší hloubku průvaru a menší šířku. [43, 44]

Helium je inertní plyn s vysokou tepelnou vodivostí. Při použití helia během svařování oblouk dosahuje vyšších teplot než při použití argonu se stejnými parametry svařování. Často se právě díky vyšší teplotě oblouku používá pro svařování hliníku, kde napomáhá lepšímu odstranění oxidické vrstvy během svařování. Nevýhodou helia je horší schopnost zapálení a stabilita oblouku. To je způsobeno jeho vyšší ionizační energií. V Evropě se z důvodu vysoké ceny (vysoká náročnost výroby) helium používá pouze pro speciální případy jako např. svařování hliníku a jeho slitin. [43, 44]

### **Orbitální svařování a navařování metodou 141**

Jak již bylo výše zmíněno, metoda 141 je dobře mechanizovatelná, případně automatizovatelná. Z uvedeného důvodu je těchto možností často využíváno. V případě svařování a navařování rotačních součástí, nebo kruhových návarů rovinných a zakřivených ploch, se mechanizovaný způsob svařování a navařování označuje jako orbitální. Příklad orbitálního navařování metodou 141 od společnosti Polysoude je na Obrázek 6.9. [45]



**Obrázek 6.9:** Orbitální navařování metodou 141. [46]

## 7. Kontroly a zkoušky svarů

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, během svařování dochází k výrazným teplotním změnám ve svarovém spoji a jeho okolí. V závislosti na rychlosti těchto teplotních změn dochází ke změnám struktury materiálu, vzniku a zvýšení vnitřních napětí. Tato napětí společně s křehkou strukturou po svařování mohou zapříčinit vznik trhlin, které se při namáhání daného dílce mohou postupně začít šířit až do fáze kdy dojde k úplnému lomu. Dalšími typy vad jsou výrobní vady související s postupem svařování, zvolenou metodou svařování a zručností svářeče. Zkoušení a ověřování kvality svarů a materiálu po svařování nemá za cíl těmto změnám zabránit, ale odhalit je, a pokud možno určit jejich původ. Zkoušení svarů je tak nedílnou součástí každého procesu svařování, zvláště při aplikacích v jaderné energetice, leteckém průmyslu a podobných odvětvích, kde vada materiálu může mít fatální následky. Způsobů zkoušení materiálů jsou desítky a pro správný výběr metody je potřeba znát typy vad, které jsou pro danou aplikaci důležité. Jedná se především o typ namáhání, materiálové složení svaru a zvolenou metodu svařování.

### 7.1 Nedestruktivní kontrola svarů

Jedná se o druh kontroly, při které nedochází k destrukci nebo poškození dané součásti. Tento typ kontroly bývá prováděn jako výstupní kontrola finálního stavu součásti a může odhalit povrchové i vnitřní vady. U většiny kontrol však nemluvíme přímo o nalezení vady ale tzv. indikaci vady. Prováděním NDT kontrol svarů tedy kontrolujeme přítomnost a rozsah indikací. Způsob provádění kontrol je shrnut v normě ČSN EN ISO 17635 [47], která propojuje požadované stupně kvality dle ČSN EN ISO 5817 [48] a stupně přípustnosti, které jsou stanoveny pro každý typ NDT kontroly zvlášť její vyhodnocovací normou. Norma ČSN EN ISO 17635 [47] tedy sjednocuje požadované stupně kvality s postupy kontrol a jejich vyhodnocením. [47]

### 7.1.1 Typy vad ve svarech

Typy vad ve svarech udává norma ČSN EN ISO 6520-1 [49], která je rozděluje celkem do šesti skupin. Každá skupina má dané číselné označení (např. 100 pro trhlinu) a výsledné značení trhliny poté vypadá následovně: ČSN EN ISO 6520-1-100. [49]

Rozdělení do skupin:

1. **Trhlina (100)** - Vady 101 - 106.
2. **Dutina (200)** - Vady 201 - 203.
3. **Pevný vměstek (300)** - Vady 301 - 304.
4. **Studený spoj a neprůvar(400)** - Vady 401 - 403.
5. **Vady tvaru a rozměru (500)** - Vady 501 - 521.
6. **Různé vady (600)** - Vady 601 - 618.

### Hodnocení vad

Norma ČSN EN ISO 5817 [48] zavádí tři stupně kvality (B, C, D - B nejvyšší stupeň kvality, D nejnižší stupeň kvality). Pro každou vadu jsou zde stanoveny rozměry, poloha a rozsah, ve kterých se vada může vyskytovat, aby výsledná kvalita odpovídala požadovanému stupni kvality, tzn. že určuje přípustnost vad. Pro zjištění zda-li se vady ve svaru nachází, a pokud ano, v jakém rozsahu je nutno provádět kontroly svarů. Každá jednotlivá kontrola podléhá své vlastní prováděcí a vyhodnocovací normě. [48]

### 7.1.2 Metody NDT kontrol

#### Vizuální zkouška [VT - Visual Test]

Základní metoda NDT kontroly prováděná u každého svaru. Metoda spočívá ve vizuální kontrole svarové housenky za předepsaných podmínek daných prováděcí normou ČSN EN ISO 17637 [50], kde jsou stanovena kritéria jako vzdálenost z jaké se má kontrola provádět, vhodné osvětlení, úhel. Kontrola může být prováděna jako přímá nebo nepřímá. V případě nepřímé kontroly je dráha mezi okem a svarem přerušena, jedná se tedy o kontrolu pomocí optických přístrojů (kamer, endoskopů). V případě přímé vizuální kontroly se jedná o prohlédnutí pouhým okem nebo použití pomůcek typu lupa, zrcadlo. Jako jediná NDT kontrola je schopna odhalit přímo vady, ostatní metody NDT kontrol již pracují pouze s indikacemi vad. Kontrola se vyhodnocuje dle normy ČSN EN ISO 5817. [48, 51]

#### Kapilární zkouška [PT - Penetrant Test]

Poměrně častá metoda kontroly svarových spojů, a to hlavně díky svojí jednoduchosti a nízké technologické náročnosti. Kontrola spočívá v nanesení penetrantu na předem dobře očištěný povrch. Penetrant zateče do trhlin, pórů a dalších pouhým okem neviditelných povrchových vad. Po normou stanovené době se přebytečný penetrant odstraní

tak, aby zůstal pouze v hledaných povrchových vadách. Poté se nanese tzv. vývojka. Vývojka slouží k poskytnutí kontrastního pozadí a kapilárnímu vyvzlínání penetrantu z již zmiňovaných vad. Na svaru je pak možné v případě využití metody barevné indikace pozorovat barevná místa, kde bylo vytaženo větší množství penetrantu. Druhou a citlivější metodou je metoda fluorescenční. Při použití této metody je možno vyvzlínaný penetrant pozorovat pod UV světlem. Tato místa jsou indikacemi konkrétních vad na daném místě. Způsob provedení zkoušky popisuje norma ČSN EN ISO 3452-1 - ČSN EN ISO 3452-6, vyhodnocení pro svarové spoje probíhá dle normy ČSN EN ISO 23277. [52, 53, 54]

### **Magnetická metoda prášková [MPT - Magnetic Particel Test]**

Magnetická metoda prášková stejně jako kapilární zkouška odhaluje pro oko neviditelné vady na povrchu svaru. Na rozdíl od kapilární zkoušky však dokáže indikovat i vady těsně pod povrchem. Metoda pracuje na principu zakřivení magnetických siločar (tzv. rozptylové magnetické pole), které je způsobeno vzduchovou mezerou (trhlinou nebo dutinou) v materiálu. Toto zakřivení siločar následně zviditelníme pomocí kovového prášku, který zaujme tvar těchto siločar. Materiál zkoušený magnetickou práškovou metodou musí být feromagnetický. Metoda se v případě svarových spojů provádí dle normy ČSN EN ISO 17638 [55] a pro svarové spoje vyhodnocuje podle ČSN EN ISO 23278. [56, 57]

### **Zkoušení vířivými proudy [ET - Eddy current Testing]**

Jedná se o nedestruktivní bezdotykovou zkoušku materiálu využívající elektromagnetické indukce. Zkouška spočívá ve využití jevu elektromagnetické indukce, který způsobuje vytvoření elektromagnetického pole kolem vodiče jímž prochází elektrický proud. Pokud tento vodič přiblížíme k druhému, jeho elektromagnetické pole svým působením na druhém vodiči indukuje proud, který vytvoří elektromagnetické polem kolem druhého vodiče. Toto pole má však opačnou polaritu než pole vodiče prvního. Jakákoliv změna vodivosti druhého vodiče (zkoušeného materiálu) tak zapříčiní pokles síly tohoto pole, který můžeme na přístroji detekovat. Zkouška vířivými proudy je vhodná pro kontrolu povrchů a oblastí těsně pod povrchem zkoušeného materiálu. Podmínkou pro provedení zkoušky vířivými proudy je elektrická vodivost zkoušeného materiálu. Metoda zkoušení vířivými proudy se pro svarové spoje provádí podle normy ČSN EN ISO 17643. [58, 59, 60]

### **Prozařovací zkouška [RT - Radiography testing]**

Pracuje na principu rentgenového záření a na rozdíl od předchozích zkoušek odhaluje indikace vad uvnitř materiálu. Materiál je prozařován rentgenovým nebo gama zářením, které je postupně během průchodu materiálem zeslabováno. Stupeň zeslabení je dán mimo jiné tloušťkou zkoušeného materiálu. Metoda je vhodná pro detekci prostorových i vhodně orientovaných plošných vad vně zkoušeného materiálu, to je dáno principem detekce průchozího záření u kterého se vyhodnocuje jeho síla. Pokud se v materiálu

nachází například dutina, paprsek se při jejím průchodu zeslabí jinak než kdyby procházel homogenním materiálem. V případě svarových spojů se tato změna intenzity zaznamená na film (kontrola dle normy ČSN EN ISO 17636-1 [61]) nebo digitálně (kontrola dle normy ČSN EN ISO 17636-2 [62]). Analogicky vyhodnocení obou metod pro svarové spoje probíhá dle norem ČSN EN ISO 10675-1 a 10675-2. [63, 64, 65]

### **Ultrazvukové zkoušení [UT - Ultrasonic testing]**

Jedná se o zkoušku pracující na principu šíření ultrazvukových vln materiálem, která je schopná odhalovat vady uvnitř materiálu. Díky skutečnosti, že v pevných látkách dochází k dobrému šíření zvuku je tato zkouška vhodná nejen pro kovové, ale i nekovové materiály. Zařízení pro ultrazvukovou kontrolu využívá efektu piezoelektrického jevu, který využívají sondy pro vysílání vysokofrekvenčních vln do materiálu. Tyto vlny jsou odraženy o stěny součásti nebo případné vady zpět do zařízení. Čidlo v zařízení je pak schopné zaznamenávat vracející se vlny a případné vady se projeví ve výsledném grafu jako echo. Zkouška se provádí několika metodami, které jsou popsány v normách ČSN EN ISO 17640 [66], ČSN EN ISO 10863 [67] a ČSN EN ISO 13588 [68]. V případě normy ČSN EN ISO 10863 [67] se jedná o difrakční techniku měřící dobu průchodu, označení TOFD. Norma ČSN EN ISO 13588 [68] definuje využití automatizované techniky phased array - metoda využívá postupné změny časování mezi jednotlivými vlnami. Pro charakterizaci diskontinuit ve svarech se používá norma ČSN EN ISO 23279 [69] a úrovně přípustnosti jsou uvedeny v normě ČSN EN ISO 11666 [70]. Personál pro provádění ultrazvukové zkoušky musí být kvalifikován v souladu s ČSN EN ISO 9712. [71, 72]

## **7.2 Destruktivní zkoušky svarů**

Jsou zkoušky určené pro ověření vlastností materiálu nebo svarového spoje. Každá zkouška je navržena tak, aby ověřila určitou materiálovou vlastnost. Během destruktivního zkoušení dochází k porušení, znehodnocení, nebo úplnému zničení zkoušeného tělesa. Jedná se především o mechanické zkoušky v různých směrech namáhání, zkoušky tvrdosti a metalografické zkoušky. Na rozdíl od kontrol nedestruktivních pro ně neexistuje souhrnná norma pro vyhodnocování a určení stupňů kvality. Vyhodnocují se dle požadavků stanovených ve výrobních normách, případně výrobně-technické dokumentaci.

### **7.2.1 Metody destruktivních zkoušek**

#### **Zkouška tahem [Tensile test]**

Je nejobvyklejší materiálovou zkouškou. Jedná se o statickou zkoušku, kdy se normalizované zkušební těleso (zkušební tyč) postupně zatěžuje tahovou silou až dojde k jeho přetržení. Výstupem tahové zkoušky je tahový diagram, který popisuje chování materiálu během zkoušky v závislosti na zvyšující se tahové síle. Z tohoto diagramu je možné určit hodnoty meze kluzu a pevnosti. Zkouška se provádí na trhacím stroji. [9]

Normy pro svařování rozlišují 3 následující zkoušky tahem:

- Příčná zkouška tahem (ČSN EN ISO 4136) [73]
- Podélná zkouška tahem (ČSN EN ISO 5178) [74]
- Zkouška tahem křížových a přeplátovaných spojů (ČSN EN ISO 9018) [75]

### **Zkouška rázem v ohybu [Charpy pendulum impact test]**

Zkouška slouží pro ověření chování materiálu při dynamickém zatížení. Pro konstrukční ocele a obecně materiály s BCC krystalovou mřížkou (někdy i hexagonální) platí, že při tahové zkoušce se chovají houževnatě. Při dynamickém zatížení v kombinaci se snížením teploty však dochází k přechodu do křehkého lomu. Teplota, při které k tomuto přechodu dochází se nazývá tranzitní teplota. Nejznámější zkouškou rázem v ohybu je metoda Charpy, kdy spuštěné kladivo přerazí zkušební těleso s vrubem definového tvaru. Vrub vytváří oblast se zmenšeným průřezem, kde k lomu dojde. Tímto způsobem je možné kontrolovat kde k lomu dojde. Výsledkem zkoušky metodou Charpy je hodnota energie kladiva potřebná k přeražení vzorku. Konkrétní detaily pro energii kladiva a rozměry zkušebního tělesa popisuje norma ČSN EN ISO 148-1 [76]. Pro svařování zkoušku upravuje norma ČSN EN ISO 9016. [77, 9]

### **Zkouška ohybem [Bend test]**

Zkouška ohybem je určena především pro materiály vykazující vysokou houževnatost. Zkušební těleso (tyč kulatá nebo hranatá) Je na koncích podepřena. V ose tělesa působí závažná síla, která zkušební těleso ohne. Výstupem zkoušky ohybem je graf popisující závislost prohnutí na závažné síle a v případě svařování přítomnost vad na lící straně svaru. Pro svařování je tato zkouška popsána normou ČSN EN ISO 5173 [78], ve které je definováno, že jeden z povrchů nebo příčných řezů svarem musí být namáhán tahem. [9]

### **Zkouška rozlomením [Fracture test]**

Je zvláštní formou ohybové nebo tahové zkoušky. Dochází k rozlomení svařence ve svarovém spoji takovým způsobem, aby se plocha lomu nacházela ve svarovém kovu. Zkouška může být prováděna jak staticky (ohnutí v lisu, svěráku) nebo dynamicky (kladivem). Povrch lomu se následně vizuálně kontroluje. Zkouška se provádí dle normy ČSN EN ISO 9017. [79, 80]

### **Zkouška tvrdosti [Hardness test]**

Spočívá v zatlačení zkušebního tělíska (tzv. indentoru) o definovaných rozměrech do materiálu. Nejpoužívanější metody využívané pro měření tvrdosti svarů jsou metoda měření tvrdosti podle Vickerse (ČSN EN ISO 6507-1 [81]) a podle Brinella (ČSN EN ISO 6506-1 [82]). V případě svarů se většinou využívá linie vtisků na příčném řezu

svarovým spojem, která pokryje jak základní materiál tak i samotný svar a jeho TOO. Pro zkoušky tvrdosti svarů je platná norma ČSN EN ISO 9015-1. [83, 84]

### **Zkouška mikrotvrdomsti [Microhardness test]**

Je prováděna dle ČSN EN ISO 9015-2 [85]. V případě zkoušky mikrotvrdomsti je materiál zatěžován mnohem menší silou a zkušební jehlan (zkouška podle Vickerse) je menších rozměrů. Provedení zkoušky opět podléhá normě ČSN EN ISO 6507-1 [81]. Slouží pro vyhodnocování materiálů s vysokým gradientem tvrdosti. Zkouška mikrotvrdomsti pro svary je popsána normou ČSN EN ISO 9015-2 [85], ale zároveň podléhá obecné normě pro měření tvrdosti ČSN EN ISO 6507-1. [3]

### **Makroskopická a mikroskopická kontrola [Makroscopic and microscopic examination]**

Tento druh zkoušky slouží pro vyhodnocování metalografického výbrusu svaru. Dochází k vybroušení, vyleštění a naleptání příčného řezu svarem a následnému hodnocení. Zkouška podléhá normě ČSN EN ISO 17639. [86, 3]

# 8. Svařování v jaderné energetice

## 8.1 Legislativa v jaderné energetice

Atomový zákon č. 263/2016 Sb. klasifikuje svařování jako tzv. zvláštní proces, kdy tato definice vychází z ČSN EN ISO 9000 [87] a ČSN EN ISO 3834-1 [88]. Pro provádění zvláštních procesů je nutné se řídit požadavky atomového zákona č. 263/2016 Sb. a vyhlášky č. 358/2016 Sb., která stanovuje požadavky na kvalitu a technickou bezpečnost vybraných zařízení. Vybrané zařízení je definováno jako zařízení důležité z pohledu jaderné bezpečnosti. Tato zařízení jsou dále řazena do tří bezpečnostních tříd dle vyhlášky č. 329/2017 Sb. [89]

## 8.2 Normalizace v jaderné energetice

Normalizace v oblasti jaderné energetiky není ve světě unifikovaná. Ve světě jsou běžně používány požadavky a předpisy norem zabývající se problematikou svařování v jaderné energetice. Patří mezi ně např. americké ASME BPVC [29], ruské PNAE G [90] a francouzské RSE-M [91] a RCC-M [92]. V České republice normalizaci pro jaderné elektrárny zastřešuje Normativně technická dokumentace Asociace strojních inženýrů ČR (dále jen NTD A.S.I.). V rámci NTD A.S.I. jsou zahrnuty požadavky původních ruských předpisů OP 1513-72 [93], PK 1514-72 [94] a navazujících předpisů PNAE G. Norma tvoří celek podobně jako ASME BPVC a je aktuálně rozdělena do sedmi Sekcí, vztahujících se k oblasti jaderné energetiky. Pro svařování je nejdůležitější Sekce I. [95, 96]

Sekce NTD A.S.I.:

- I - Svařování zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER
- II - Charakteristiky materiálů pro zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER
- III - Hodnocení pevnosti zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER
- IV - Výpočet zbytkové životnosti zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER
- V - Zkoušky materiálů



- VI - Vzduchotechnické systémy jaderných elektráren typu VVER
- VII - Zvláštní případy
- VIII - Klasická energetika

## 8.3 Svařování ve smyslu NTD A.S.I. Sekce I

NTD A.S.I. dále definuje způsob provedení kvalifikace svarových spojů, a to dle ČSN EN ISO 15614 [97] a 15613 [98]. Sekce I (Svařování zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER) v rámci NTD A.S.I. slouží jako nástroj pro normalizaci svařování v jaderné energetice. Je zpracována mimo jiné i na základě požadavků EN a ISO norem, společně s technickými poznatky z praxe z tuzemska a zahraničí. Sekce I stanovuje i certifikační požadavky, které se vztahují jak na výrobce zařízení v jaderné energetice, tak i na jejich dodavatele. Norma také definuje metody svařování, žárového stříkání a pájení, které lze použít pro úkony týkající se zařízení v jaderné energetice. [95]

### 8.3.1 Kvalifikace v rámci NTD A.S.I. Sekce I

#### Kvalifikace výrobce

Požadavky definované v příslušné kapitole mají za cíl zajistit dostatečnou kvalitativní úroveň organizací provádějících činnosti týkající se svařování v jaderných elektrárnách v České republice. Způsobnost těchto organizací je vyhodnocována na základě splnění kvalifikačních požadavků stanovených v NTD A.S.I. [95]

#### Kvalifikace personálu

Nižší svářečský personál je standardně kvalifikován dle ČSN EN ISO 9606-1 [99], ale v rámci NTD A.S.I. musí podstoupit ještě další úroveň kvalifikace, tzv. atestační zkoušky pro získání oprávnění "Schválení svářeče / operátora pro svařování vybraných zařízení JE". V případě vybraného zařízení bezpečnostní třídy 1 může svářečský dozor provádět pouze osoba s kvalifikací EWE/IWE nebo EWT/IWT v rozsahu blíže specifikovaném v NTD A.S.I. Sekce I. [95]

#### Kvalifikace postupů svařování

Kvalifikace postupu svařování je standardně prováděna podle příslušných částí normy ČSN EN ISO 15614 [97]. V případě nestandardního svarového spoje, který nelze danou normou pokrýt je nutné se řídit normou ČSN EN ISO 15613 [98]. V případě použití normy ČSN EN ISO 15613 je nutné uplatnit všechny relevantní požadavky příslušných částí normy ČSN EN ISO 15614. [95]

### 8.3.2 Kontrolní svarový spoj

NTD A.S.I. rozlišuje dva typy KSS, a to výrobní KSS a KSS při údržbě a opravách zařízení jaderných elektráren. Zásadním rozdílem mezi těmito typy je použití základního a přídatného materiálu. V případě výrobního KSS, NTD A.S.I. stanovuje, že musí být využit stejný materiál jako při výrobě vybraného zařízení (tj. stejná jakost, číslo tavby, směr vláken po válcování). V případě KSS pro údržbu nebo opravy zařízení v jaderných elektrárnách mnohdy není možné zajistit stejný materiál. NTD A.S.I. v tomto případě stanovuje nutnost použití materiálu, který odpovídá původnímu materiálu nebo jeho schválenému ekvivalentu dle NTD A.S.I. Sekce II. Vyhotovení KSS bývá zpravidla prováděno za účelem ověření navrženého řešení, použitých materiálů, aktuální zručnosti svářeče/operátora a nacvičení průběhu svařování v případě ztížených podmínek na místě realizace úkonu. [95]

Rozsah NDT kontrol v rámci KSS je specifikován v NTD A.S.I. Sekci I a způsob jejich provádění a vyhodnocování v NTD A.S.I. Sekci VII. Co se týče destruktivních zkoušek, jejich rozsah je stejně jako u NDT kontrol specifikován v NTD A.S.I. Sekci I. Způsob provádění a vyhodnocení spadá pod NTD A.S.I. Sekci V a požadavky výrobně-technické dokumentace. [95]

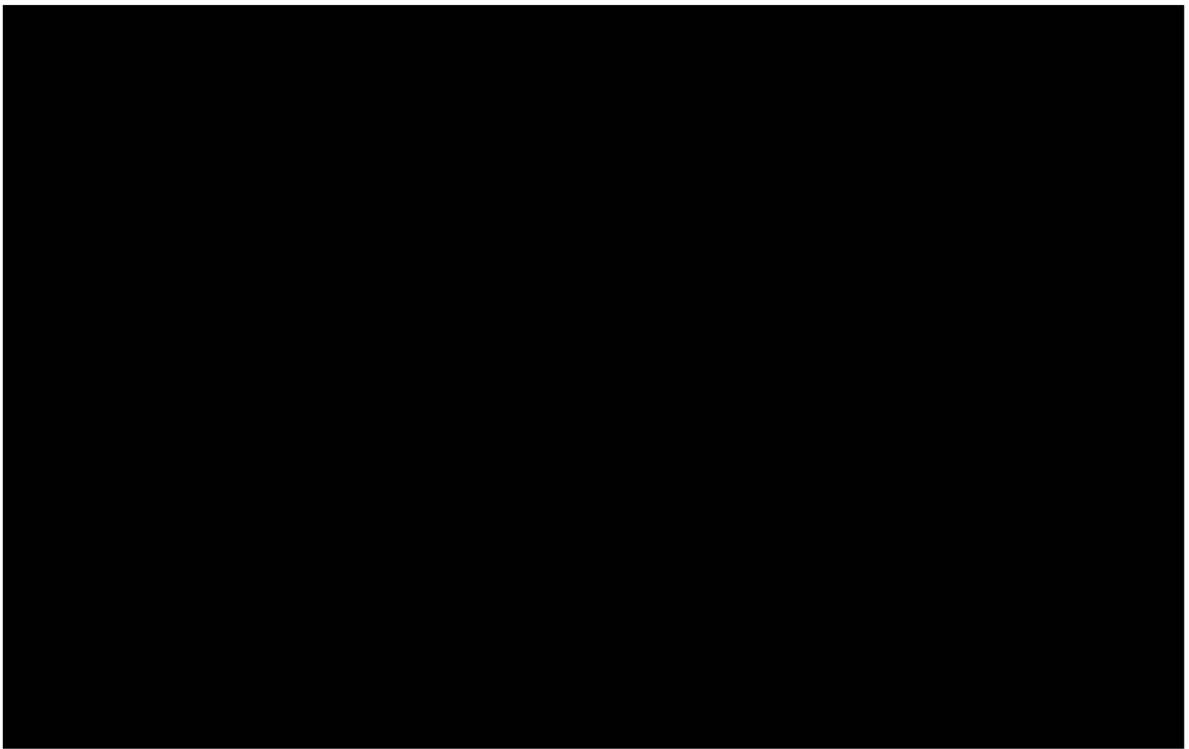
## II. Experimentální část

# 9. Předmět experimentální části

Experimentální část práce navazuje na [REDACTED]  
[REDACTED].  
Cílem této práce je posouzení vlastností tepelně ovlivněných oblastí návarů zhotovených v rámci přípravy výše uvedené akce metodou popouštěcí housenky a posouzení výsledků dosažených u zkušebních těles s provedeným tepelným zpracováním po svařování. Pro účely experimentální části byla využita zkušební tělesa navařovaná v rámci svařování kontrolního svarového spoje. Dále byla využita zkušební tělesa zhotovená pro experimentální účely a zkušební těleso vyrobené z odříznuté části [REDACTED]  
[REDACTED], a je opatřena austenitickým chromniklovým korozivzdorným návarem s následným tepelným zpracováním.

## 9.1 [REDACTED]

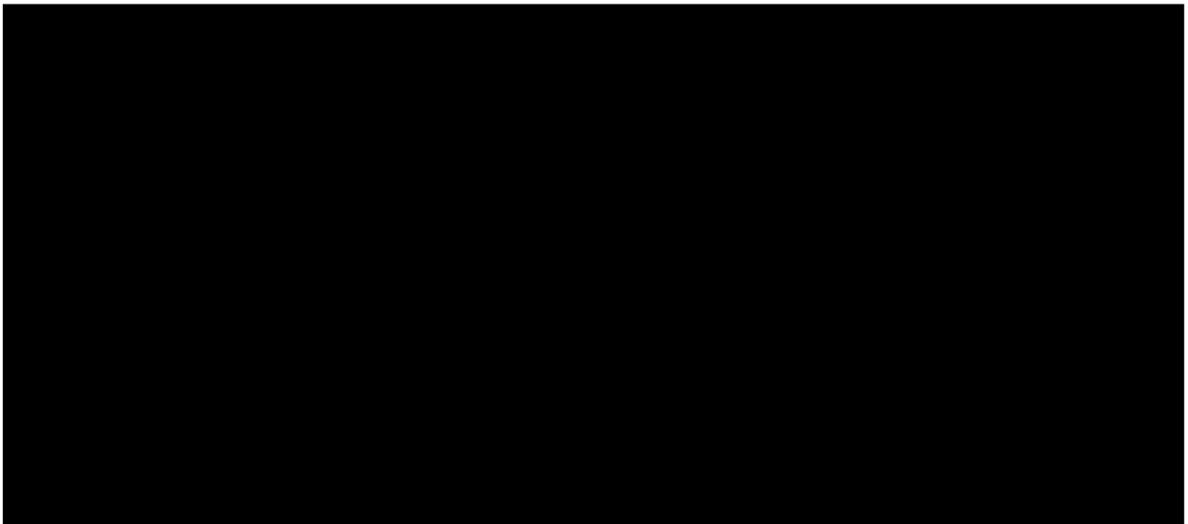
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]



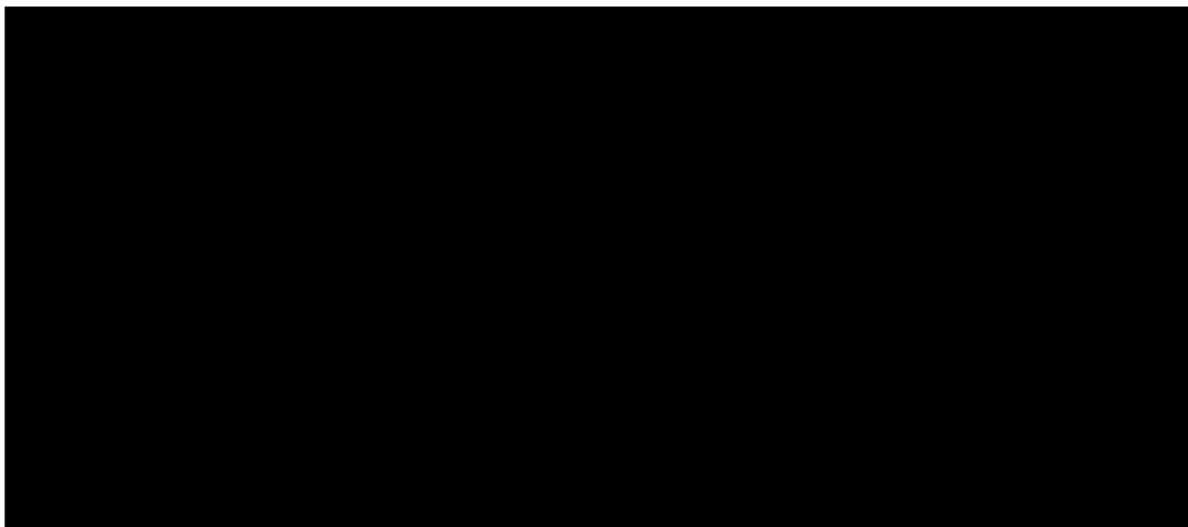
Obrázek 9.1: [REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]

## 9.2 Současný stav a plánované provedení

[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]



Obrázek 9.2: [REDACTED]



Obrázek 9.3: [REDACTED]

### 9.3 Záměr experimentální části

Záměrem experimentální části práce je posouzení vlastností tepelně ovlivněných oblastí návarů na oceli 10GN2MFA, 22K a P265GH (v případě P265GH se jedná o experimentální návary realizované souběžně s KSS) s návary zhotovenými přidavným materiálem Sv-07Ch25N13 o průměru 0,8 mm metodou 141, mechanizovaným způsobem při použití orbitálního svařování. V případě návaru na ocel 10GN2MFA byl na rozdíl od výše uvedeného způsobu svařování návar proveden, v případě prvních vrstev, metodou 121 přidavným materiálem [REDACTED]. Hodnocení vlastností tepelně ovlivněných oblastí je provedeno v rámci zkoušek tvrdosti, mikrotvrdosti a hodnocení makrostruktury dle příslušných norem viz kap. 11 a 12.

# 10. Základní a přídatné materiály

Pro účely experimentálního programu byly zvoleny základní materiály, které jsou uvažovány v rámci konstrukčně-technologického provedení [REDACTED], případně jejich ekvivalentní náhrady. Přídatný materiál byl volen s ohledem na původní projektové požadavky.

## 10.1 Základní materiály

### 10.1.1 10GN2MFA dle GOST

Jedná se o nízkolegovanou konstrukční ocel určenou pro tlakové součásti, zejména potrubí, parní generátory a další zařízení v jaderné energetice. Z oceli 10GN2MFA dle GOST, viz Tabulka 10.1 a Tabulka 10.2 je zhotoveno [REDACTED]. [103, 102]

**Tabulka 10.1:** Chemické složení oceli 10GN2MFA dle GOST. [102]

<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>
0,08 - 0,12 %	0,17 - 0,37 %	0,80 - 1,10 %	max. 0,30 %	1,70 - 2,70 %
<b>Mo</b>	<b>V</b>	<b>S</b>	<b>P</b>	<b>Cu</b>
0,40 - 0,70 %	0,03 - 0,07 %	max. 0,02 %	max. 0,02 %	max. 0,30 %

**Tabulka 10.2:** Mechanické vlastnosti oceli 10GN2MFA dle GOST. [102]

+20 °C			
<b>R<sub>m</sub></b> [MPa]	<b>R<sub>p0,2</sub></b> [MPa]	<b>A<sub>5</sub></b> [%]	<b>Z</b> [%]
min. 539	min. 343	min. 16	min. 55
+350 °C			
<b>R<sub>m</sub></b> [MPa]	<b>R<sub>p0,2</sub></b> [MPa]	<b>A<sub>5</sub></b> [%]	<b>Z</b> [%]
min. 490	min. 294	min. 14	min. 50

## 10.1.2 22K dle GOST

Nízkouhlíková konstrukční ocel vhodná ke svařování, určená pro výkovky strojních součástí a tlakových potrubí. Ocel 22K, viz Tabulka 10.3 a Tabulka 10.6, je určena k výrobě parních generátorů, potrubí, nátrubků, armatur a dalších tlakových zařízení jaderných elektráren. Je využívána v rozmezí provozních teplot od -40 do 450 °C. V rámci NTD A.S.I. Sekce II je pro tuto ocel schválen ekvivalent P265GH dle ČSN EN 10216-2. [95, 104, 105]

**Tabulka 10.3:** Chemické složení oceli 22K dle GOST. [102]

<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>
0,19 - 0,26 %	0,20 - 0,45 %	0,75 - 1,05 %	max. 0,03 %
<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>
max. 0,03 %	max. 0,30 %	0,30 - 0,50 %	0,10 - 0,15 %
<b>Cu</b>	<b>Ti</b>	<b>V</b>	—
max. 0,30 %	max. 0,05 %	0,02 - 0,05 %	—

**Tabulka 10.4:** Mechanické vlastnosti oceli 22K dle GOST. [95]

<b>+20 °C</b>			
<b>R<sub>m</sub> [MPa]</b>	<b>R<sub>p0,2</sub> [MPa]</b>	<b>A<sub>5</sub> [%]</b>	<b>Z [%]</b>
min. 430	min. 215	min. 18	min. 40
<b>+350 °C</b>			
<b>R<sub>m</sub> [MPa]</b>	<b>R<sub>p0,2</sub> [MPa]</b>	<b>A<sub>5</sub> [%]</b>	<b>Z [%]</b>
min. 392	min. 177	min. 18	min. 40



### 10.1.3 P265GH dle ČSN EN 10216-2

Nízkouhlíková ocel vhodná pro tlakové nádoby a potrubí. Je dobře svařitelná, má dobrou plasticitu a houževnatost. Ocel P265GH se běžně využívá pro výrobu výměníků, kotlů, parních trubek a tlakových nádob. [106]

**Tabulka 10.5:** Chemické složení oceli P265GH dle ČSN EN 10216-2. [105]

<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>S</b>	<b>N</b>
0 - 0,20 %	0 - 1,40 %	max. 0,01 %	0 - 0,012 %
<b>Cu</b>	<b>Nb</b>	<b>Ti</b>	<b>Si</b>
0 - 0,30 %	0 - 0,02 %	max. 0,04 %	0 - 0,40 %
<b>P</b>	<b>Al</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>
max. 0,025 %	0 - 0,02 %	0 - 0,30 %	0 - 0,08 %
<b>Ni</b>	<b>V</b>	—	—
0 - 0,30 %	0 - 0,02	—	—

**Tabulka 10.6:** Mechanické vlastnosti oceli P265GH pro tloušťky stěny od 16 do 40 mm dle ČSN EN 10216-2. [105]

+20 °C			
<b>R<sub>m</sub> [MPa]</b>	<b>R<sub>p0,2</sub> [MPa]</b>	<b>A<sub>5</sub> [%]</b>	<b>Z [%]</b>
410 - 570	min. 255	min. 23	—
+350 °C			
<b>R<sub>m</sub> [MPa]</b>	<b>R<sub>p0,2</sub> [MPa]</b>	<b>A<sub>5</sub> [%]</b>	<b>Z [%]</b>
—	min. 141	—	—

## 10.2 Přídavné materiály

### 10.2.1 Sv-07Ch25N13 dle GOST

Austenitický chromniklový korozivzdorný svarový kov, zvolen v souladu s dosavadním řešením vycházejícím z původního ruského předpisu OP 1513-72 [93]. Svarovým kovem Sv-07Ch25N13 se provádí korozivzdorné návary a svary při použití materiálu 10GN2MFA v jaderné energetice. [REDACTED]

[REDACTED]. Přídavný materiál je ve formě drátu na cívce pro svařování o průměru 0,8 mm. [102]

**Tabulka 10.7:** Chemické složení svarového kovu Sv-07Ch25N13 dle GOST. [102]

C	Si	Mn	Ni	Cr
max. 0,90 %	0,14 - 1,00 %	0,90 - 2,00 %	11,80 - 14,00 %	22,80 - 26,00 %
S	P	Co	Cu	—
max. 0,018 %	max. 0,025 %	max. 0,05 %	max. 0,25 %	—

**Tabulka 10.8:** Mechanické vlastnosti svarového kovu Sv-07Ch25N13 dle GOST. [102]

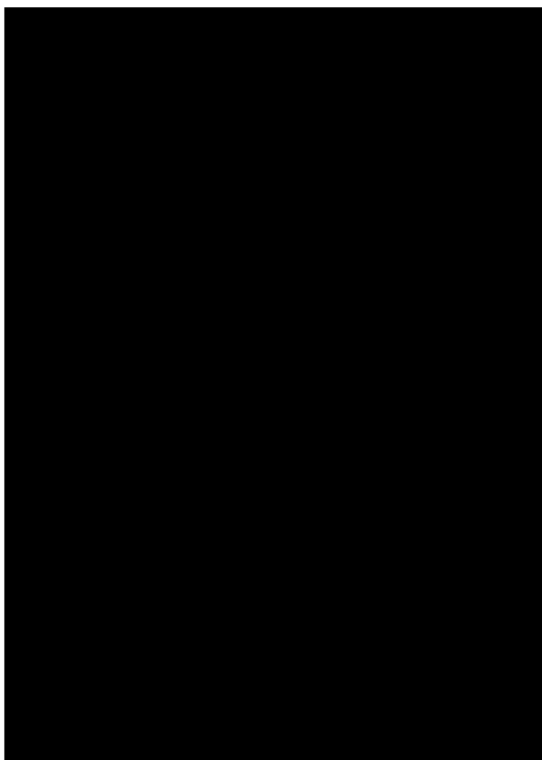
+20 °C			
R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	A <sub>5</sub> [%]	Z [%]
min. 490	min. 294	min. 22	min. 35
+350 °C			
R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	A <sub>5</sub> [%]	Z [%]
min. 392	min. 196	min. 15	min. 30

# 11. Příprava zkušebních těles a vzorků

## 11.1 Příprava a provedení zkušebních těles

Pro účely experimentální části byla využita zkušební tělesa zhotovená v rámci svařování kontrolních svarových spojů, a dále řada dalších experimentálních návarů. Kontrolní svarové spoje a další exeperimentální návary byly provedeny v prostředí svářečské haly Heřmanice v lokalitě jaderné elektrárny Dukovany.

Kontrolní svarové spoje související s přípravou [REDACTED] [REDACTED] byly provedeny v souladu se schválenou svářečskou dokumentací pro jejich realizaci, která odpovídala provedení uvedenému na Obrázek 9.3. Na Obrázek 11.1 a Obrázek 11.2 je navařování návaru č. 61 a 60 v rámci svařování kontrolních svarových spojů.

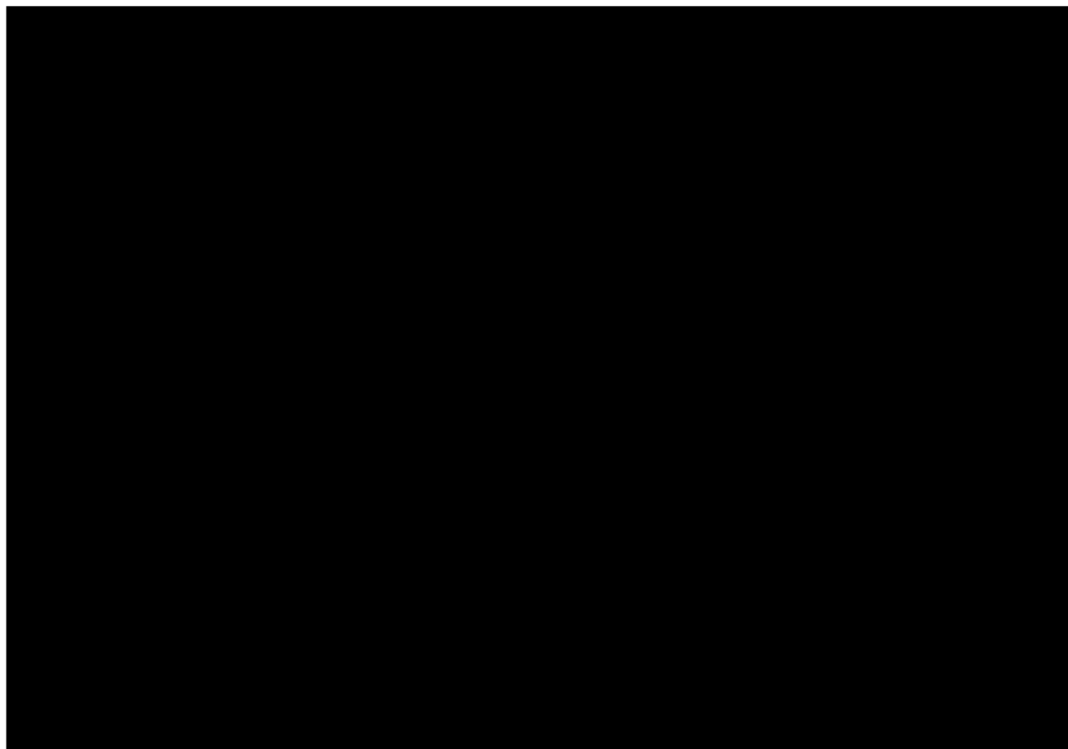


Obrázek 11.1: [REDACTED]  
[REDACTED].



Obrázek 11.2: [REDACTED]  
[REDACTED].

Pro experimentální účely byly realizovány návary na trubky z oceli P265GH, viz Obrázek 11.3, které měly za úkol svými rozměry simulovat provedení vnitřního návaru č. 60 stejným způsobem jako v případě kontrolních svarových spojů. Ocel P265GH byla v tomto případě zvolena jako ekvivalentní náhrada oceli 22K. Ocel 22K je vyráběna pouze ve formě výkovků a z tohoto důvodu je náročné a nákladné vyrábět pro experimentální účely polotovary z této oceli formou obrábění. V rámci experimentálních návarů byla zhotovena dvě zkušební tělesa, kdy v jednom případě byl proveden návar jako jednovrstvý a v druhém případě jako dvouvrstvý za účelem porovnání a posouzení vlivu metody popouštěcí housenky na výsledné vlastnosti v tepelně ovlivněné oblasti návaru.



Obrázek 11.3: [REDACTED]

Při navařování návaru č. 60 byly jak v případě kontrolních svarových spojů, tak i v případě experimentálních návarů na ocel P265GH použity shodné parametry svařování. Parametry svařování nejsou v této práci uvedeny s ohledem na zachování know-how společnosti ČEZ, a. s.

Posledním zkušebním tělesem je [REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED]. Toto zkušební těleso bylo zvoleno s ohledem na skutečnost, že již bylo tepelně zpracováno.

Značení zkušebních těles vychází ze značení uvedeného ve výrobně-technické dokumentaci, viz Tabulka 11.1.

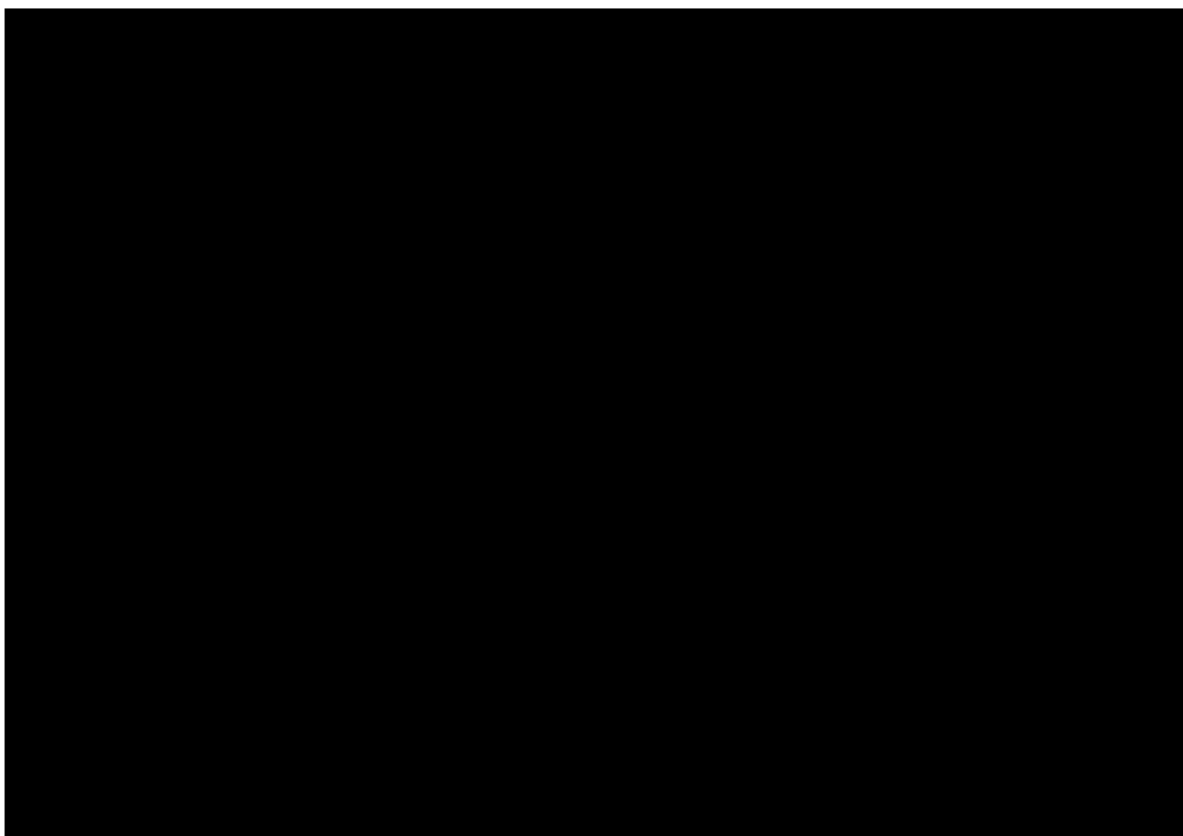
Po zhotovení výše uvedených zkušebních těles byly provedeny nedestruktivní kontroly a následovala příprava pro zhotovení zkušebních vzorků v rámci destruktivních zkoušek popsáná v kap. 11.2.

**Tabulka 11.1:** Tabulka použitých materiálů a tepelného zpracování zkušebních vzorků.

Označení vzorku	Základní materiál	Přídavný materiál	Forma TZ
KSS 1	22K	Sv-07Ch25N13	TBW
H6-1	P265GH	Sv-07Ch25N13	TBW
H6-2	P265GH	Sv-07Ch25N13	TBW
PM 1	10GN2MFA	Sv-07Ch25N13	S TZ

## 11.2 Příprava zkušebních vzorků

Příprava vzorků pro zvolená měření tvrdosti, mikrotvrdosti a hodnocení makrostruktury byla provedena v materiálové laboratoři Tréninkového a realizačního centra (dále jen TaRC) Temelín. Zkušební tělesa určená pro výrobu zkušebních vzorků jsou na Obrázek 11.4. Ze zkušebních těles byly vyhotoveny podélné řezy - destičky. Na těchto destičkách byly vybrány oblasti zájmu pro následné dělení na metalografické pile.



**Obrázek 11.4:** Zkušební tělesa pro vyhodnocení v rámci experimentální části.

Zkušební vzorky byly děleny na metalografické pile Struers Labotom-5. Jedná se o speciální pilu určenou pro tento účel. Pila je chlazená kapalinou, aby nedocházelo k zavádění tepla do oblasti řezu a potenciálnímu znehodnocení vzorků. Každý zkušební vzorek byl po dělení na metalografické pile očištěn a vysušen. Dalším krokem bylo odstranění otřepů a výběr plochy využitelné pro metalografický výbrus.

Pro připravené zkušební vzorky byly následně vytvořeny štítky s označením a základními informacemi. Tyto štítky byly společně se vzorky zalisovány do lisovací hmoty ve formě fenolformaldehydového polykondenzátu (bakelit). Jelikož každý vzorek obsahuje návar z korozivzdorné austenitické oceli, bylo nutné kombinovat bakelitovou směs pro elektrochemické i chemické leptání.

Hotové zkušební vzorky byly následně broušeny na metalografické brusce Struers LaboForce-100 (Obrázek 11.5). Prvním krokem bylo vyrovnaní větších nerovností. Pro tuto operaci byl zvolen brusný papír P600. Po vyrovnaní všech vzorků následovalo postupné broušení pomocí P800, P1200 a P2400 brusných papírů. Značení, např. P2400, značí, že na jeden centimetr čtvereční se na papíře nachází 2400 jednotlivých brusných zrn. Vybroušené vzorky byly ponechány v digestoři.



**Obrázek 11.5:** Broušení vzorků na metalografické brusce Struers LaboForce-100.

Pro měření tvrdosti a mikrotvrdosti bylo nutné vzorky vyleštit opět na metalografické brusce. Místo brusného papíru bylo použito leštící plátno s  $3\mu m$  diamantovou leštící pastou (velikost zrna  $3\mu m$ ). Každý vzorek byl následně leptán 3% Nitalem (směs  $HNO_3$  a ethanolu). Leptání bylo provedeno za účelem nalezení hranic tepelně ovlivněné oblasti tak, aby bylo jisté, že dojde k jejímu pokrytí linií vtisků.

Po provedení měření tvrdosti a mikrotvrdosti byly vzorky opět zbrušeny a vyleštěny, tentokrát i leštícím plátnem s  $1\mu m$  diamantovou leštící pastou. Vzorky bylo nutné okamžitě po broušení očistit a osušit horkým vzduchem tak, aby se zabránilo šíření koroze, které je na takto aktivním povrchu velmi rychlé. Vzorky byly následně leptány elektrochemicky v kyselině dusičné ( $HNO_3$ ) a chemicky Nitalem (3%). Elektrochemické leptání mělo za účel naleptat návary z austenitické korozivzdorné oceli, Nital (3%) naopak základní materiály.

**Tabulka 11.2:** Tabulka použitých zařízení pro přípravu zkušebních vzorků.

Druh zařízení	Výrobce	Označení
Metalografická pila	Struers	Labotom-5
Metalografická bruska	Struers	LaboForce-100
Zařízení pro elektrochemické leptání	Neurtek	ATM KRISTALL 680

## 12. Provedení a vyhodnocení destruktivních zkoušek

Za účelem hodnocení vlastností tepelně ovlivněných oblastí a vlivu tepelných režimů svařování byly v materiálové laboratoři TaRC Temelín provedeny destruktivní zkoušky vybraných zkušebních vzorků. Jako vhodný nástroj pro identifikaci průběhu materiálových vlastností v tepelně ovlivněné oblasti je provedení zkoušek tvrdosti (HV 10) a zkoušek mikrotvrdosti (HV 0,1). S ohledem na výhodnější přípravu pro provádění zkoušek bylo provedeno měření tvrdosti a mikrotvrdosti před hodnocením makrostruktury. Průběh provádění jednotlivých zkoušek je popsán v navazujících kapitolách.

**Tabulka 12.1:** Tabulka použitých zařízení pro měření a vyhodnocení zkušebních vzorků.

Druh zařízení	Výrobce	Označení
Tvrdoměr	Wilson	VH3100
Mikroskop	KEYENCE	VHX-6000

### 12.1 Hodnocení makrostruktury

Kontrola makrostruktury na mikroskopu probíhala v průběhu celého procesu destruktivního zkoušení a podle normy ČSN EN ISO 17639 [86]. V práci se však objevují snímky makrostruktury pouze v naleptaném stavu.

První kontrola probíhala před naleptáním základního materiálu pro měření tvrdosti. V této fázi bylo ohledání v rámci makrostruktury zaměřeno na nalezení případných trhlin, vměstků, staženin, nebo dalších vad ve svarovém kovu (u trhlin i v tepelně ovlivněné oblasti a základním materiálu). Většina vzorků byla bez větších vad, které by bylo nutné zohledňovat při hodnocení. Z pohledu hodnocení mikrostruktury, kterému není věnována hlubší pozornost, lze konstatovat, že mikrostruktura v tepelně ovlivněné oblasti odpovídá použitým materiálům, použité metodě a postupu svařování.



## 12.2 Tvrdost a mikrotvrdost

Obě zkoušky byly provedeny metodou podle Vickerse, kdy je do materiálu vtlačován indentor s geometrií čtyřbokého jehlanu o vrcholovém úhlu  $136^\circ$ . Tradičně na starších zařízeních pro měření tvrdosti probíhá vyhodnocování každého vtisku ihned po jeho realizaci. Pro měření tvrdosti a mikrotvrdosti byl však použit digitální tvrdoměr Wilson VH3100. Pro měření tvrdosti i mikrotvrdosti byl využit program "linie", kdy tvrdoměr vyhotoví linii vtisků o požadovaném kroku a počtu vtisků.

Pro nastavení těchto parametrů bylo důležité provést zkušební vtisk do materiálů, kde byly předpokládány nejnižší hodnoty tvrdosti. Dle rozměrů tohoto vtisku ( $326 \mu\text{m}$ ) byla nastavena délka kroku 1 mm pro HV 10 a 0,1 mm pro HV 0,1. Délka kroku byla nastavena v souladu s normou ČSN EN ISO 6507-1 [81], která stanovuje, že délka kroku musí být alespoň 2,5 násobek úhlopříčky největšího vtisku.

Dalším důležitým faktorem bylo pokrytí co největší části svarového kovu, celé tepelně ovlivněné oblasti a části základního materiálu. Vzhledem k tomu, že výška návaru byla na každém vzorku jiná, nebylo možné nastavit univerzální počet vtisků pro všechny vzorky. Z tohoto důvodu byl program pro každý vzorek upraven tak, aby alespoň odpovídal počet vtisků od linie ztavení přes tepelně ovlivněnou oblast do základního materiálu.

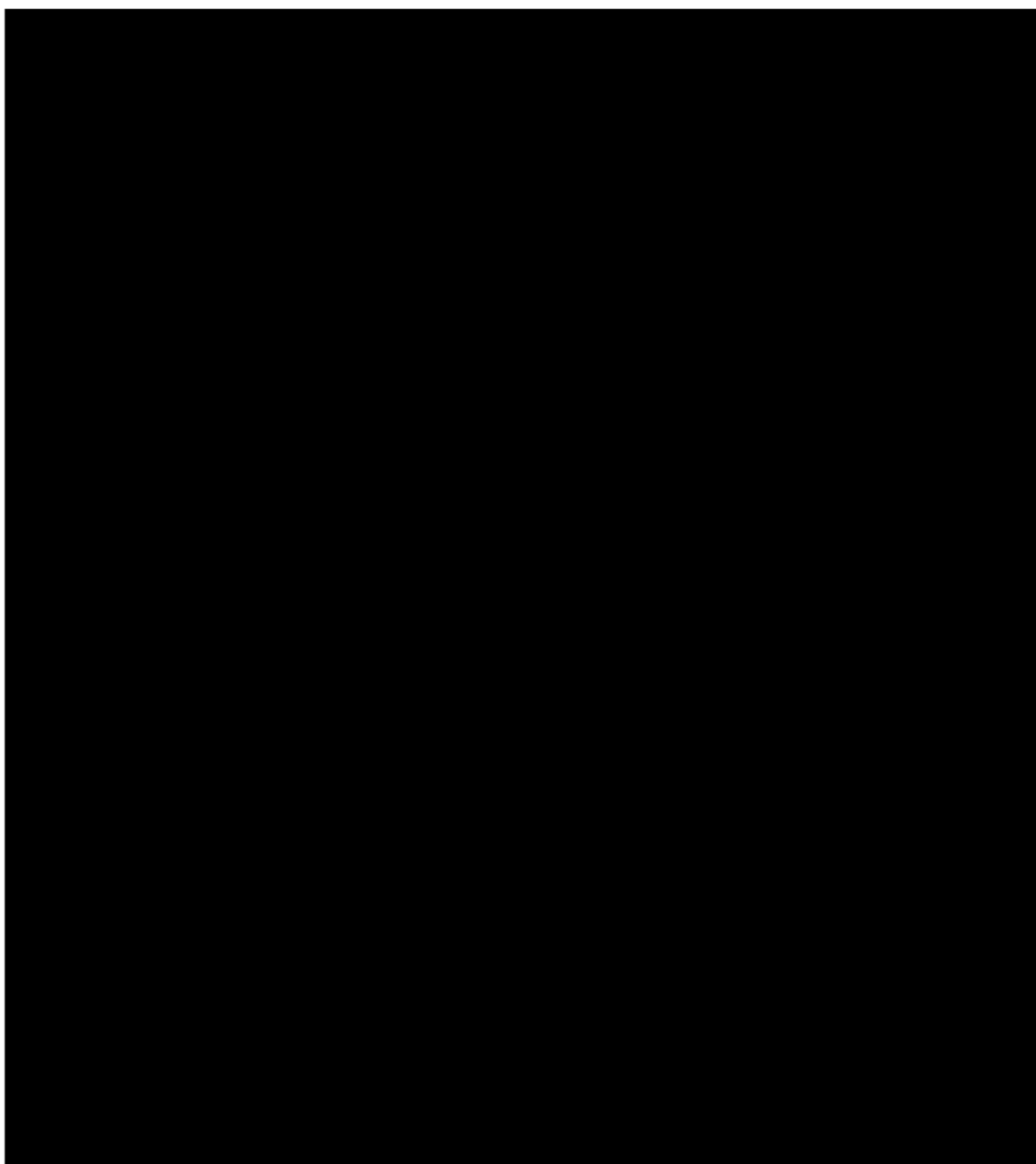
Měření tvrdosti bylo provedeno v částečně naleptaném stavu, kdy svarový kov nebyl naleptán, ale základní materiál pro zviditelnění tepelně ovlivněné oblasti ano. Pro co nejjednodušší vyhodnocení hodnot tvrdosti by bylo vhodné neleptat ani základní materiál. V tom případě by však nebylo možné ověřit, zda tvrdoměr překročí hranici tepelně ovlivněné oblasti a přejde i do základního materiálu. V naleptaném stavu tmavé hranice zrn způsobují horší viditelnost hranice vtisku a snižují tak přesnost jejich vyhodnocování. To způsobuje nutnost pečlivější ruční kontroly vyhodnocení vtisků.

## 12.3 Výsledky destruktivních zkoušek

Výstupy z provedených destruktivních zkoušek v podobě snímků makrostruktury, grafů průběhů tvrdosti a mikrotvrdosti jsou uvedeny níže. Výsledky zkoušek jsou detailně popsány a vyhodnoceny v následující kapitole 13.

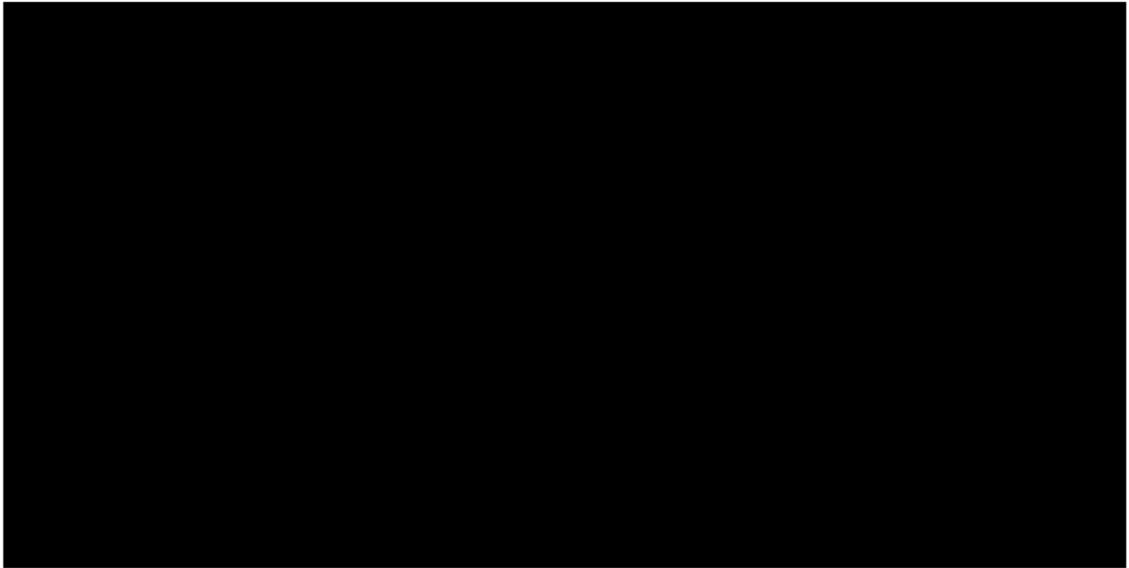
### 12.3.1 Zkušební vzorek KSS 1

Jedná se o vzorek vyhotovený z kontrolního svarového spoje, který je realizován pomocí základního materiálu 22K a přídavného materiálu Sv-07Ch25N13. Na Obrázek 12.1 jsou vyznačena místa, kde byla provedena měření tvrdosti a mikrotvrdosti společně se snímky mikrostruktury, kterým není dále z důvodu zkušenosti autora a rozsahu bakalářské práce věnována bližší pozornost (jsou zde čistě z informativního hlediska).

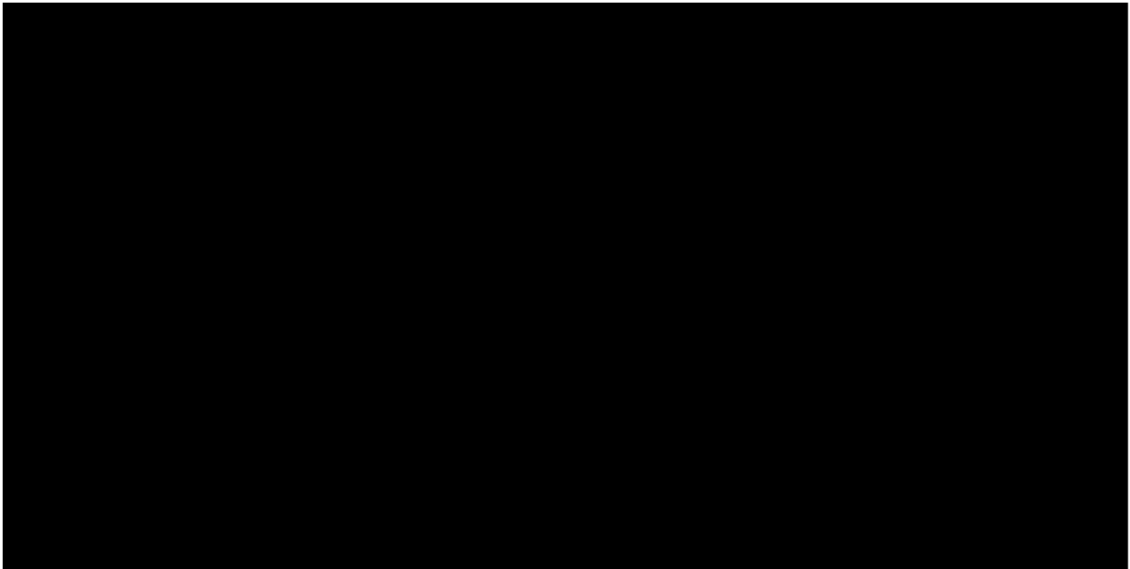


**Obrázek 12.1:** Makrosnímek vzorku "KSS 1". 1) linie ztavení, 2) linie vtisků měření tvrdosti, 3) linie vtisků měření mikrotvrdosti

Výsledky měření tvrdosti (HV 10) a mikrotvrdosti (HV 0,1) jsou uvedeny v grafech jejich průběhů, viz Obrázek 12.2 a Obrázek 12.3.



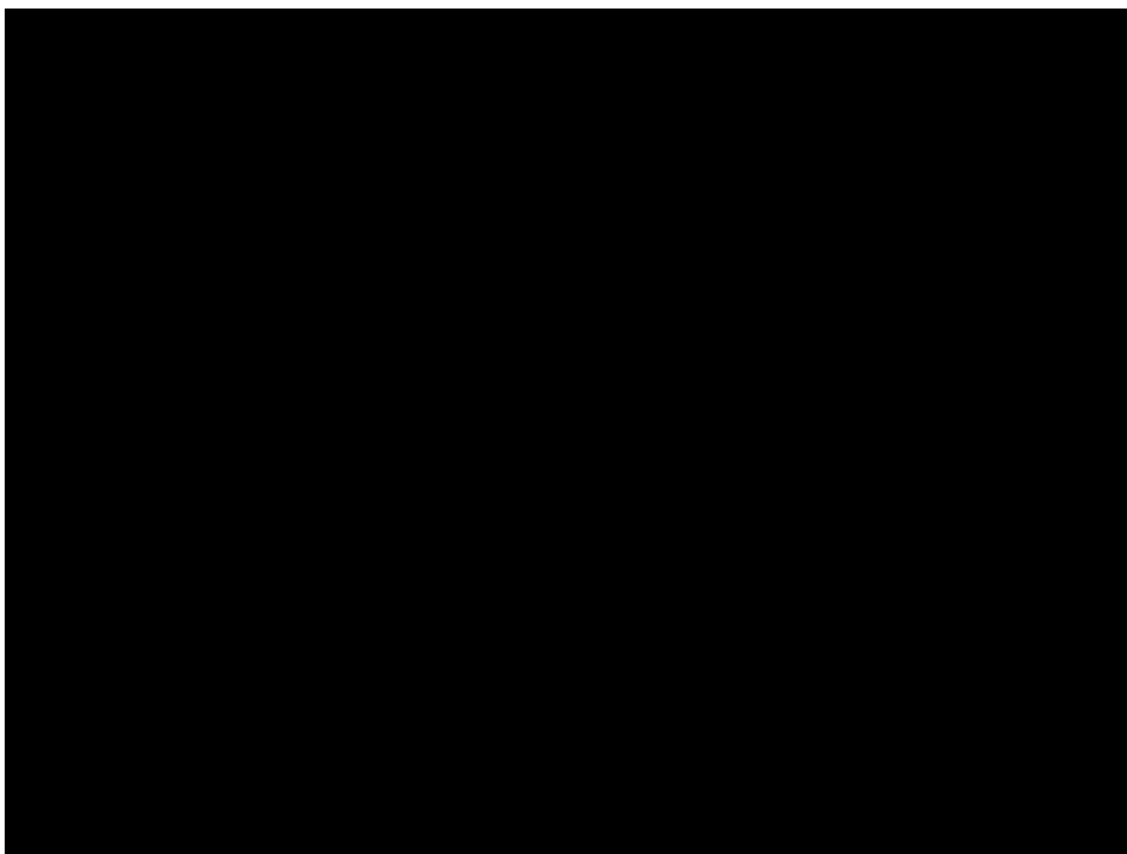
**Obrázek 12.2:** Graf průběhu tvrdosti zkušebního vzorku "KSS 1".



**Obrázek 12.3:** Graf průběhu mikrotvrdosti zkušebního vzorku "KSS 1".

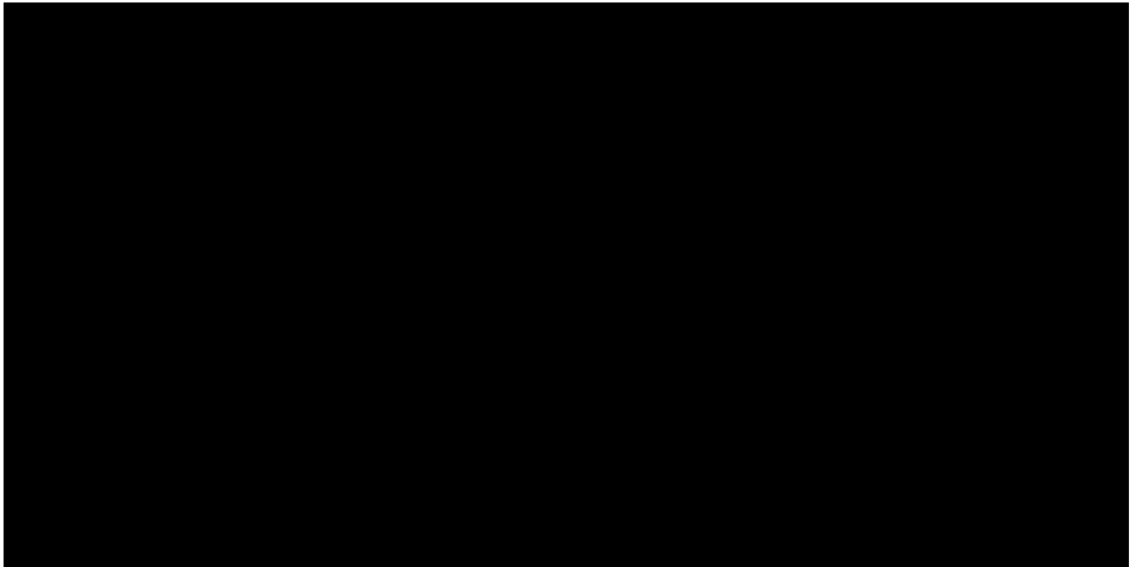
### 12.3.2 Zkušební vzorek H6-1

Zkušební vzorek "H6-1" je vyhotoven ze zkušebního tělesa z experimentálního návaru svarovým kovem Sv-07Ch25N13 na základní materiál z oceli P265GH. Jedná se o jednovrstvý návar určený pro zjištění a porovnání vlivů metody popouštěcí housenky při jedné vrstvě svarového kovu.

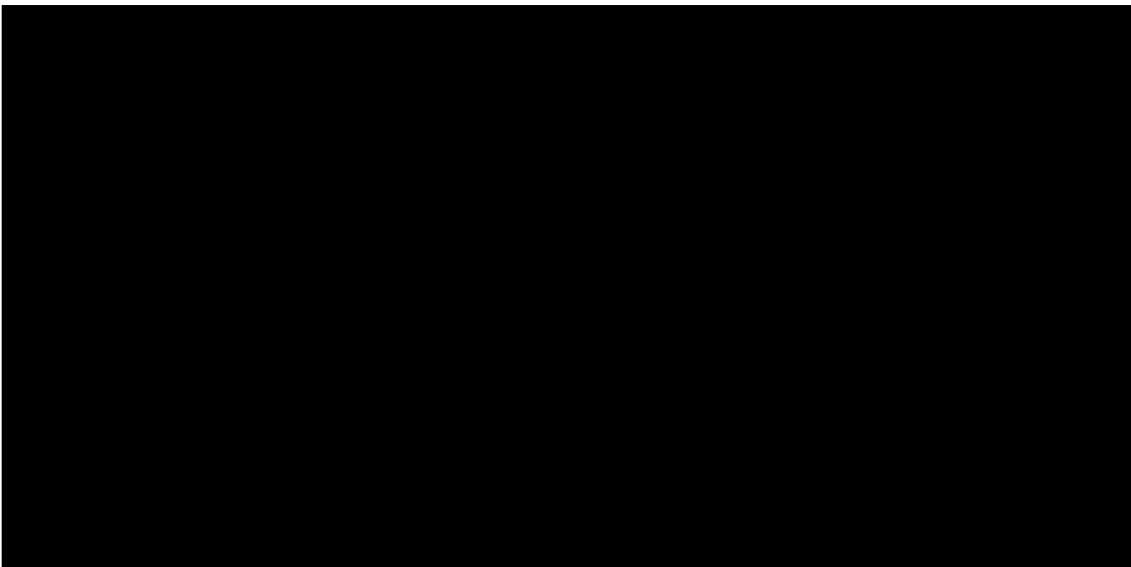


**Obrázek 12.4:** Makrosnímek vzorku "H6-1". 1) linie ztavení, 2) linie vtisků měření tvrdosti, 3) linie vtisků měření mikrotvrdosti

Výsledky měření tvrdosti (HV 10) a mikrotvrdosti (HV 0,1) jsou uvedeny v grafech jejich průběhů, viz Obrázek 12.5 a Obrázek 12.6.



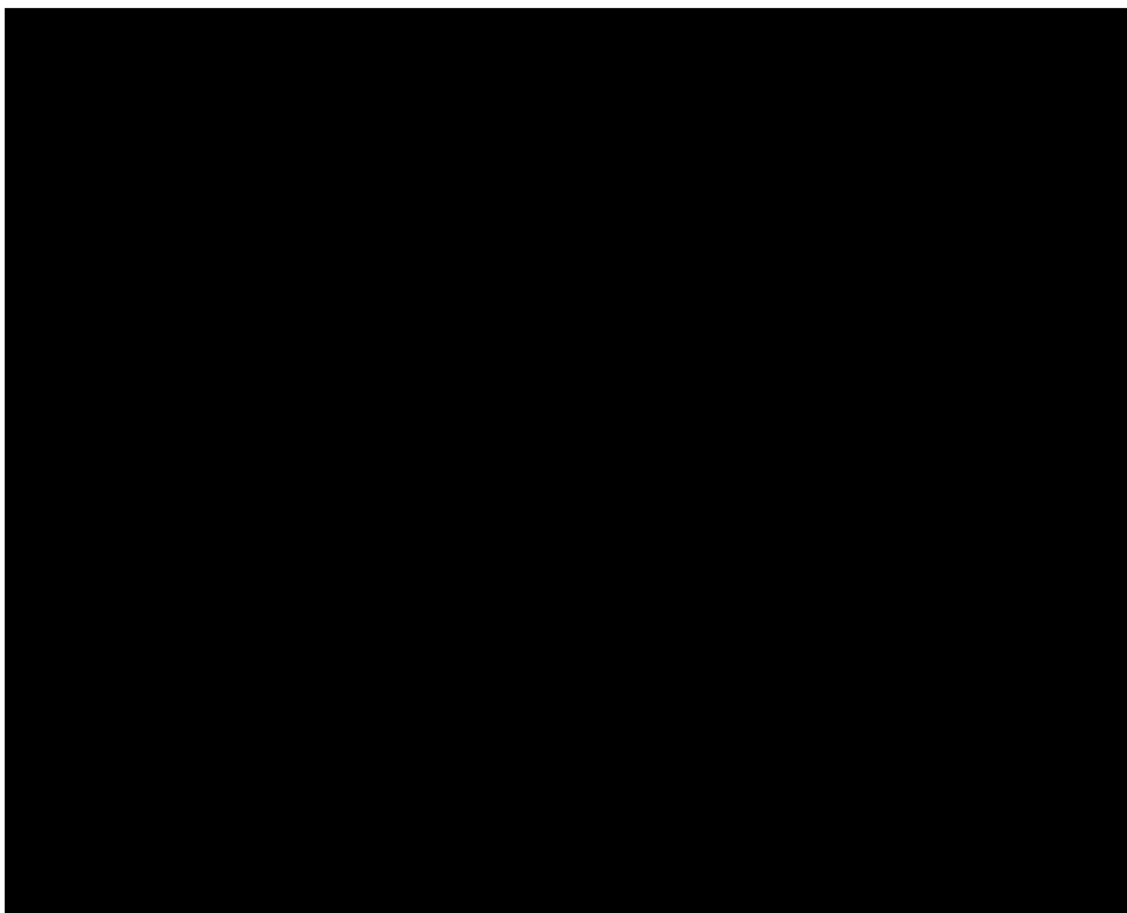
**Obrázek 12.5:** Graf průběhu tvrdosti zkušebního vzorku "H6-1".



**Obrázek 12.6:** Graf průběhu mikrotvrdosti zkušebního vzorku "H6-1".

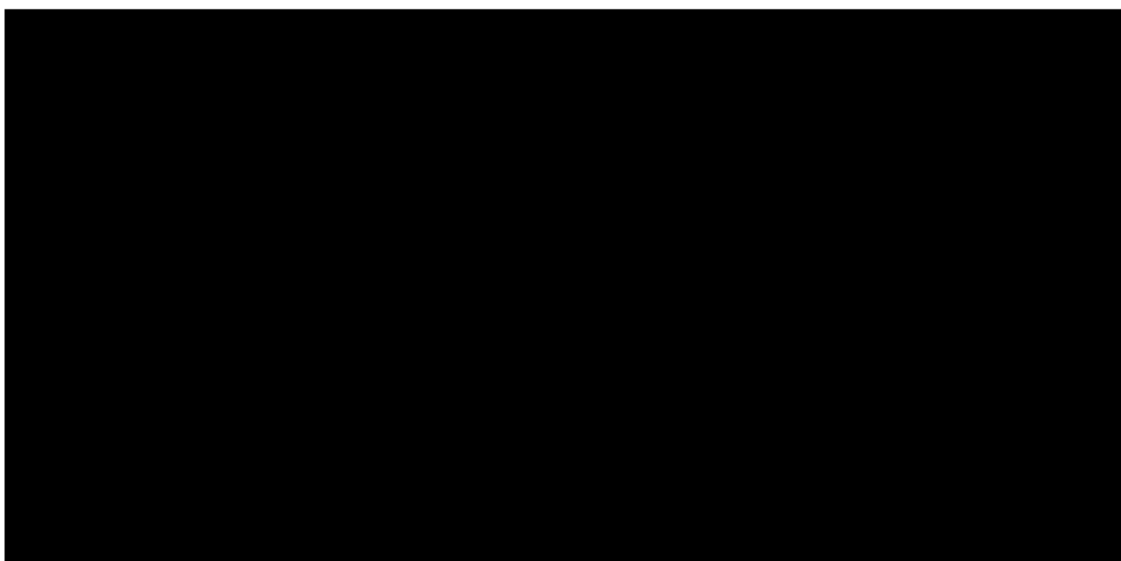
### 12.3.3 Zkušební vzorek H6-2

Zkušební vzorek "H6-2" je vyhotoven ze stejného experimentálního zkušebního tělesa jako zkušební vzorek "H6-1". V tomto případě se jedná o dvouvrstvý návar na ocel P265GH. Vzorek byl vyhotoven za účelem pozorování vlivu přidané vrstvy svarového kovu a jejího působení metodou popouštěcí housenky na průběh tvrdosti a mikrotvrdosti.

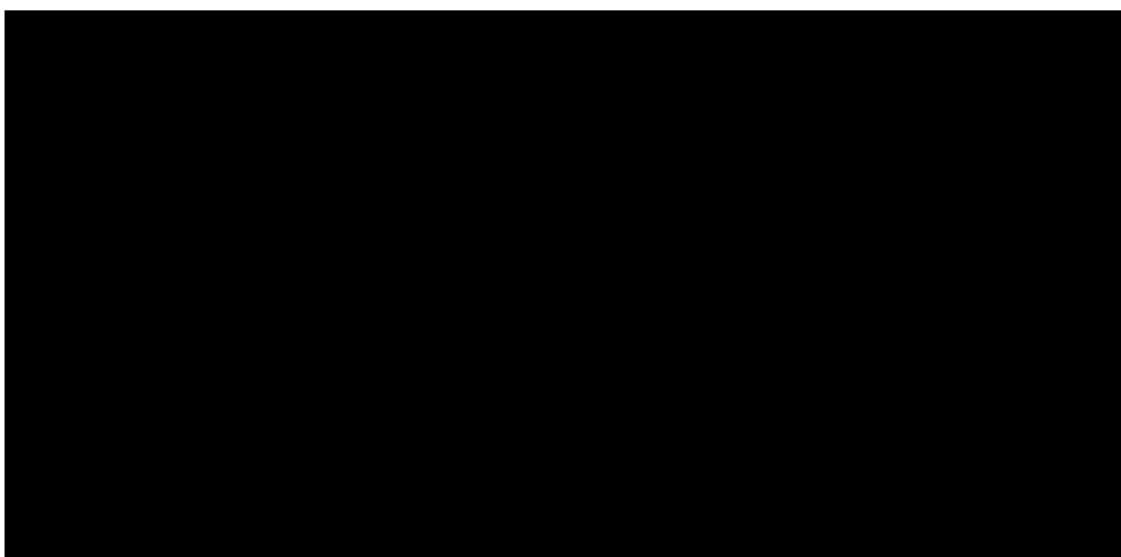


**Obrázek 12.7:** Makrosnímek vzorku "H6-2". 1) linie ztavení, 2) linie vtisků měření tvrdosti, 3) linie vtisků měření mikrotvrdosti

Výsledky měření tvrdosti (HV 10) a mikrotvrdosti (HV 0,1) jsou uvedeny v grafech jejich průběhů, viz Obrázek 12.8 a Obrázek 12.9.



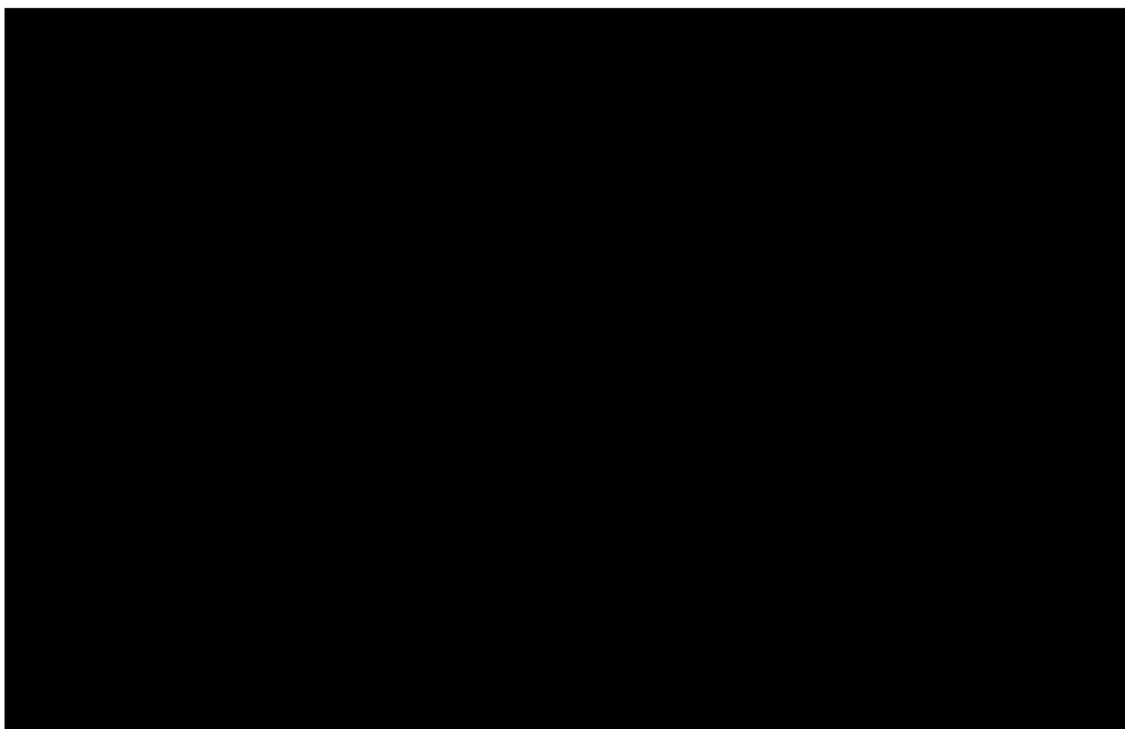
**Obrázek 12.8:** Graf průběhu tvrdosti zkušebního vzorku "H6-2".



**Obrázek 12.9:** Graf průběhu mikrotvrdosti zkušebního vzorku "H6-2".

### 12.3.4 Zkušební vzorek PM 1

Zkušební vzorek "PM 1" je [REDACTED]. Základním materiálem je 10GN2MFA a svarovým kovem je v prvních vrstvách Sv-07Ch25N13. Toto potrubí bylo tepelně zpracováno ve formě kalení s následným popouštěním.



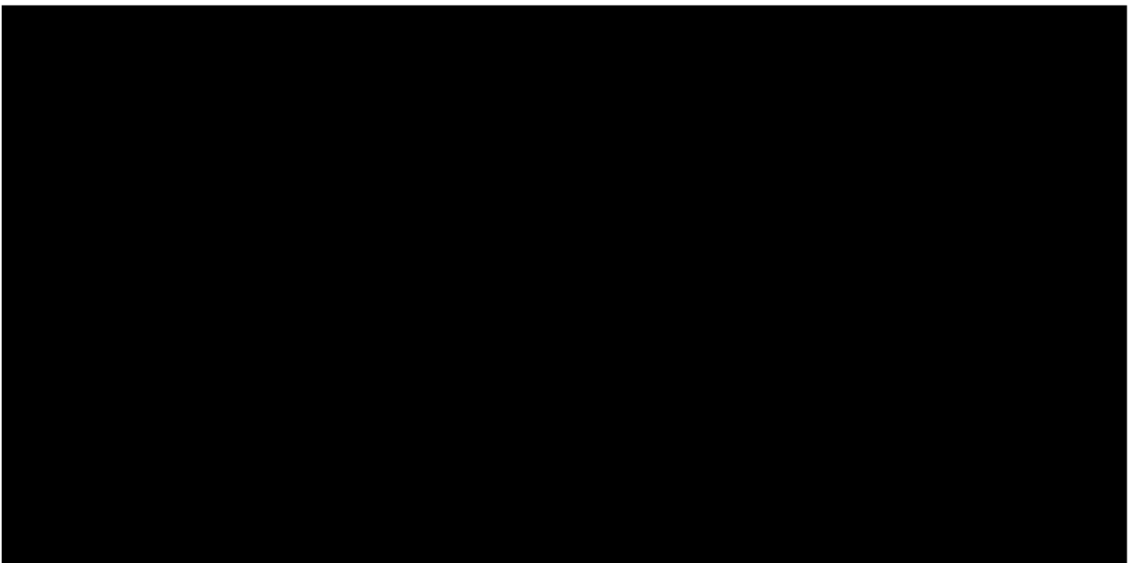
**Obrázek 12.10:** Makrosnímek vzorku "PM 1". 1) linie ztavení, 2) linie vtisků měření tvrdosti, 3) linie vtisků měření mikrotvrdosti



Výsledky měření tvrdosti (HV 10) a mikrotvrdosti (HV 0,1) jsou uvedeny v grafech jejich průběhů, viz Obrázek 12.11 a Obrázek 12.12.



**Obrázek 12.11:** Graf průběhu tvrdosti zkušebního vzorku "PM 1".



**Obrázek 12.12:** Graf průběhu mikrotvrdosti zkušebního vzorku "PM 1".

## 13. Shrnutí výsledků

Shrnutí výsledků je zaměřeno na podrobné vyhodnocení výsledků dosažených destruktivními zkouškami v podobě hodnocení makrostruktury, tvrdosti a mikrotvrdosti. Hodnoty mikrotvrdosti (HV 0,1) souhrnně u všech měřených zkušebních vzorků vykazují vyšší hodnoty, než hodnoty tvrdosti (HV 10). To je zapříčiněno vyšší citlivostí zkoušky mikrotvrdosti (HV 0,1), kdy je indentor schopen díky menším půdorysným rozměrům a hloubce vtisku zasáhnout jednotlivé tvrdší fáze ve zkoušeném materiálu.

### 13.1 Vyhodnocení a porovnání výsledků zkušebních vzorků H6-1 a H6-2

Zkušební vzorky "H6-1" a "H6-2" byly vyhotoveny ze stejného zkušebního tělesa, a to experimentálního návaru na základní materiál z oceli P265GH.

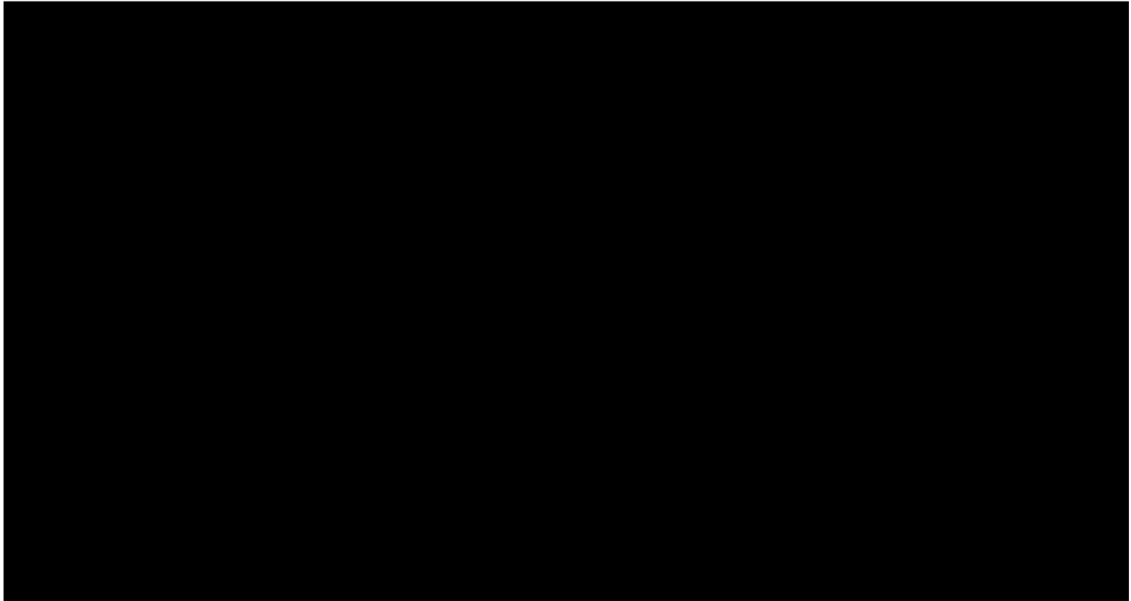
Z hlediska hodnocení makrostruktury byl zkušební vzorek "H6-1" bez vad, které by byly nominálně nepřijatelné nebo by svou velikostí překračovaly stanovená kritéria přípustnosti v podobě požadavků NTD A.S.I. Sekce VII [95] pro kategorii svarového spoje I a ČSN EN ISO 5817 [48] pro stupeň přípustnosti B. [REDACTED]

[REDACTED]

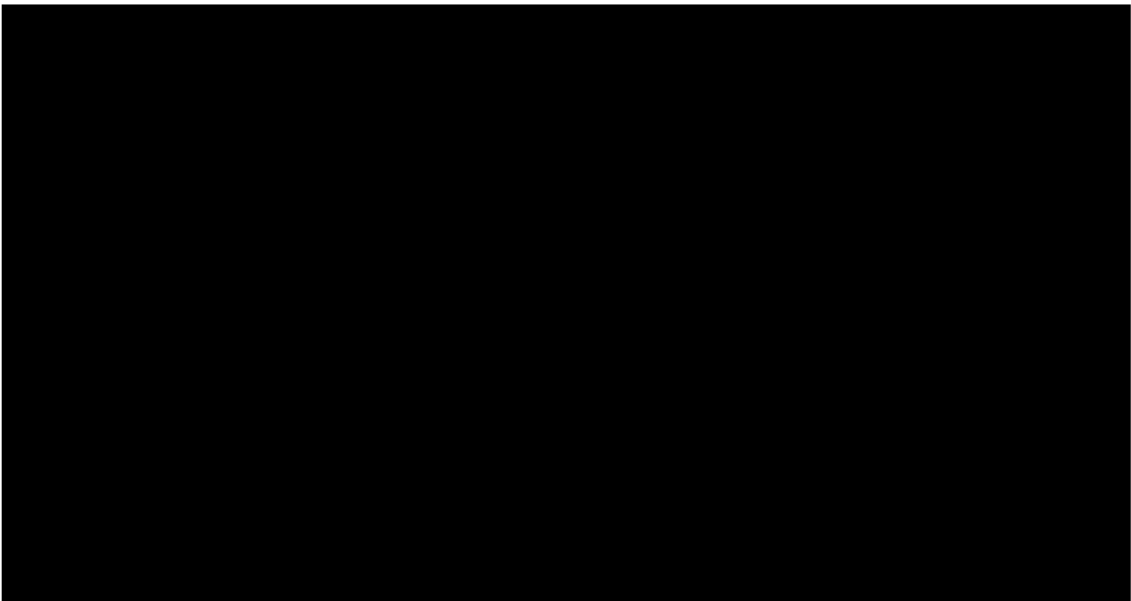
[REDACTED]

[REDACTED]

[REDACTED]



Obrázek 13.1: Graf porovnání hodnot tvrdosti mezi vzorky "H6-1" a "H6-2".



Obrázek 13.2: Graf porovnání hodnot mikrotvrdosti mezi vzorky "H6-1" a "H6-2".

## 13.2 Posouzení výsledků zkušební vzorku KSS 1

Zkušební vzorek "KSS 1" je tvořen nízkouhlikovou ocelí 22K s austenitickým chromniklovým korozivzdorným návarem svarovým kovem Sv-07Ch25N13.

Z hlediska hodnocení makrostruktury byl zkušební vzorek bez vad, které by byly nominálně nepřipustné nebo by svou velikostí překračovaly stanovená kritéria přípustnosti v podobě požadavků NTD A.S.I. Sekce VII [95] pro kategorii svarového spoje I a ČSN EN ISO 5817 [48] pro stupeň přípustnosti B.

Tento zkušební vzorek byl vyhotoven z kontrolního svarového spoje. Z grafů průběhů tvrdosti (HV 10), lze konstatovat, že naměřené hodnoty tvrdosti svým průběhem a hodnotami odpovídají očekávaným vlastnostem základního materiálu 22K, tepelně ovlivněné oblasti a svarového kovu Sv-07Ch25N13. Absolutní hodnoty se pohybují pod úrovní [REDACTED]. Jedna hodnota přímo na linii ztavení dosahuje [REDACTED]. Tyto hodnoty lze považovat za vyhovující i s ohledem na požadavky normy pro kvalifikaci postupu svařování ČSN EN ISO 15614-1 [97], kde je kritickou hodnotou pro tepelně nezpracované svarové spoje 380 HV 10. Mikrotvrdost (HV 0,1) svým průběhem koreluje s průběhem tvrdosti (HV 10), zejména v základním materiálu a tepelně ovlivněné oblasti. Absolutní hodnoty ve svarovém kovu jsou řádově o [REDACTED] vyšší a v blízkosti linie ztavení dosahují hodnoty mikrotvrdosti (HV 0,1) ojediněle i hodnot až [REDACTED].

[REDACTED]. Vzhledem k absenci kritérií přípustnosti pro měření mikrotvrdosti (HV 0,1) nelze jednoznačně tento výsledek vyhodnotit z pohledu přípustnosti, ale s ohledem na průběh mikrotvrdosti jej lze za vyhovující považovat.

## 13.3 Posouzení výsledků zkušební vzorku PM 1

Zkušební vzorek "PM 1" je [REDACTED]. Toto potrubí bylo tepelně zpracováno ve formě kalení s následným popouštěním. Zkušební vzorek se skládá ze základního materiálu, bainitické oceli 10GN2MFA, a austenitického chromniklového korozivzdorného návaru svarovým kovem Sv-07Ch25N13.

Z hlediska hodnocení makrostruktury byl zkušební vzorek bez vad, které by byly nominálně nepřipustné nebo by svou velikostí překračovaly stanovená kritéria přípustnosti v podobě požadavků NTD A.S.I. Sekce VII [95] pro kategorii svarového spoje I a ČSN EN ISO 5817 [48] pro stupeň přípustnosti B.

V grafech průběhů tvrdosti (HV 10) a mikrotvrdosti (HV 0,1) je možné pozorovat, že svarový kov oproti ostatním vzorkům dosahuje nižší tvrdosti, než základní materiál a tepelně ovlivněná oblast. To je způsobeno tím, že základním materiálem je bainitická ocel, která je mírně zvýšenou tvrdostí charakteristická. Obecně lze konstatovat, že u měření tvrdosti (HV 10) i mikrotvrdosti (HV 0,1) jsou průběhy rovnoměrné v celé

hodnocené oblasti a absolutní hodnoty jsou nízké. V grafu hodnot měření mikrotvrdomosti, viz Obrázek 12.12, však lze pozorovat, že i v případě využití tepelného zpracování se objevují tvrdé struktury přesně na linii ztavení, které jsou zde zachyceny jako ojedinělá hodnota dosahující [redacted]. Hodnoty tvrdosti (HV 10) jsou z pohledu požadavků normy ČSN EN ISO 15614-1 [97] vyhovující. Vzhledem k absenci kritérií přípustnosti pro měření mikrotvrdomosti (HV 0,1) nelze jednoznačně tento výsledek vyhodnotit z pohledu přípustnosti, ale s ohledem na průběh mikrotvrdomosti jej lze za vyhovující považovat.

## 14. Závěr

Cílem předkládané práce bylo provedení teoretického rozboru a následných experimentálních činností v návaznosti na svařování metodou popouštěcí housenky související s konkrétní problematikou řešenou na [REDACTED]. Svařování metodou popouštěcí housenky je uvažováno, jako jeden z vhodných technologický postupů, při provádění [REDACTED].

Teoretická část práce popisuje principy na kterých je založeno svařování metodou popouštěcí housenky, včetně popisu metod svařování, přehledu skupin a typů tepelného zpracování, předpisů a norem v jaderné energetice, a dále metod nedestruktivních kontrol a destruktivních zkoušek svarových spojů.

Experimentální část je zaměřena na realizaci experimentálních činností, které byly založeny na provedení kontrolních svarových spojů a dalších experimentálních návarů pomocí orbitálního svařování za účelem jejich následného vyhodnocení v rámci destruktivních zkoušek. Z destruktivních zkoušek byly vyhodnoceny jako nejvhodnější hodnocení makrostruktury, měření tvrdosti (HV 10) a měření mikrotvrdosti (HV 0,1). Uvedené destruktivní zkoušky byly zvoleny z důvodu jejich vysoké vypovídající schopnosti o změnách struktury v tepelně ovlivněné oblasti, které se následně projevují v podobě změn tvrdosti, resp. mikrotvrdosti.

V rámci vyhodnocení destruktivního zkoušení bylo prokázáno, že se hodnoty v rámci měření tvrdosti (HV 10) u všech zkušebních vzorků pohybovaly řádově do [REDACTED]. V případě mikrotvrdosti (HV 0,1) byly dosažené hodnoty vyšší ve srovnání s hodnotami tvrdosti (HV 10), ale jejich průběhy byly rovnoměrné v celé hodnocené oblasti. U všech zkušebních vzorků, včetně zkušebního vzorku s provedeným tepelným zpracováním po svařování, byla na linii ztavení identifikována místa se zvýšenými hodnotami tvrdosti (HV 10) a mikrotvrdosti (HV 0,1). [REDACTED]

[REDACTED]. Výše uvedené hodnoty tvrdosti (HV 10) lze považovat za vyhovující i s ohledem na požadavky normy pro kvalifikaci postupu svařování ČSN EN ISO 15614-1 [97]. Vzhledem k absenci kritérií přípustnosti pro měření mikrotvrdosti (HV 0,1) nelze jednoznačně tento výsledek vyhodnotit z pohledu přípustnosti, ale s ohledem na průběh mikrotvrdosti jej lze za vyhovující považovat.

Z pohledu kontroly makrostruktury byly [REDACTED]  
[REDACTED]  
[REDACTED],  
neboť toto zkušební těleso bylo přednostně určeno pro ověření metody popouštěcí housenky. V ostatních případech byly zkušební vzorky bez vad, které by byly nominálně nepřijatelné nebo by svou velikostí překračovaly stanovená kritéria přijatelnosti v podobě požadavků NTD A.S.I. Sekce VII [95] pro kategorii svarového spoje I a ČSN EN ISO 5817 [48] pro stupeň přijatelnosti B.

Z provedených destruktivních zkoušek a jejich výsledků vyplývá, že využití svařování metodou popouštěcí housenky je vhodnou alternativou pro nahrazení standardního tepelného zpracování po svařování při využití základních materiálů z ocelí 22K, 10GN2MFA a P265GH a přídavného materiálu ze svarového kovu Sv-07Ch25N13.

Na základě výše uvedených skutečností lze konstatovat, že byly zcela naplněny všechny uvedené cíle vyplývající ze zadání této bakalářské práce.

# Seznam obrázků

3.1	Příklad průběhu teplotních cyklů při svařování oceli S700MC [6] . . . . .	5
3.2	Pásma TOO svarového spoje oceli s obsahem 0,15% C. [3] . . . . .	5
4.1	Austenitická zrna. [11] . . . . .	8
4.2	Příklady výše zmiňovaných struktur. [17] . . . . .	10
4.3	Martenzitická struktura FeNiC oceli po zakalení do kapalného dusíku. [18]	11
4.4	Příklad IRA diagramu . . . . .	12
4.5	Příklad ARA diagramu . . . . .	12
6.1	Příklady ovlivnění svarové housenky další housenkou. [24] . . . . .	15
6.2	Zjednodušené schéma TOO svarové housenky . . . . .	16
6.3	Vzájemné ovlivnění housenek při jejich různých vzdálenostech. . . . .	17
6.4	Zjednodušené schéma elektrického oblouku při přímé polaritě DC- (elektroda = katoda). [32] . . . . .	18
6.5	Schéma svařování metodou 141. Nakresleno autorem dle [33]. . . . .	19
6.6	Tvary oblouků v závislosti na nabroušení elektrody. [41] . . . . .	21
6.7	Správná metoda broušení (vlevo) a nevhodná metoda broušení (vpravo). . . . .	22
6.8	Detail hrotu elektrody . . . . .	22
6.9	Orbitální navařování metodou 141. [46] . . . . .	23
9.1	[REDACTED] . . . . .	35
9.2	[REDACTED] . . . . .	36
9.3	[REDACTED] . . . . .	36
11.1	[REDACTED] . . . . .	41
11.2	[REDACTED] . . . . .	41
11.3	[REDACTED] . . . . .	42
11.4	Zkušební tělesa pro vyhodnocení v rámci experimentální části. . . . .	43
11.5	Broušení vzorků na metalografické brusce Struers LaboForce-100. . . . .	44



12.1 Makrosnímek vzorku "KSS 1". 1) linie ztavení, 2) linie vtisků měření tvrdosti, 3) linie vtisků měření mikrotvrdosti . . . . .	48
12.2 Graf průběhu tvrdosti zkušebního vzorku "KSS 1". . . . .	49
12.3 Graf průběhu mikrotvrdosti zkušebního vzorku "KSS 1". . . . .	49
12.4 Makrosnímek vzorku "H6-1". 1) linie ztavení, 2) linie vtisků měření tvrdosti, 3) linie vtisků měření mikrotvrdosti . . . . .	50
12.5 Graf průběhu tvrdosti zkušebního vzorku "H6-1". . . . .	51
12.6 Graf průběhu mikrotvrdosti zkušebního vzorku "H6-1". . . . .	51
12.7 Makrosnímek vzorku "H6-2". 1) linie ztavení, 2) linie vtisků měření tvrdosti, 3) linie vtisků měření mikrotvrdosti . . . . .	52
12.8 Graf průběhu tvrdosti zkušebního vzorku "H6-2". . . . .	53
12.9 Graf průběhu mikrotvrdosti zkušebního vzorku "H6-2". . . . .	53
12.10 Makrosnímek vzorku "PM 1". 1) linie ztavení, 2) linie vtisků měření tvrdosti, 3) linie vtisků měření mikrotvrdosti . . . . .	54
12.11 Graf průběhu tvrdosti zkušebního vzorku "PM 1". . . . .	55
12.12 Graf průběhu mikrotvrdosti zkušebního vzorku "PM 1". . . . .	55
13.1 Graf porovnání hodnot tvrdosti mezi vzorky "H6-1" a "H6-2". . . . .	57
13.2 Graf porovnání hodnot mikrotvrdosti mezi vzorky "H6-1" a "H6-2". . . . .	57

# Seznam tabulek

3.1	Tabulka koeficientů tepelné účinnosti (k) pro jednotlivé metody svařování [3] . . . . .	6
6.1	Metody stanovené ASME kódem pro svařování metodou popouštěcí housenky. . . . .	17
6.2	Rozdělení wolframových elektrod podle chemického složení. [34] . . . .	20
6.3	Značení inertních plynů pro TIG svařování dle ČSN EN ISO 14175. [42]	23
10.1	Chemické složení oceli 10GN2MFA dle GOST. [102] . . . . .	37
10.2	Mechanické vlastnosti oceli 10GN2MFA dle GOST. [102] . . . . .	37
10.3	Chemické složení oceli 22K dle GOST. [102] . . . . .	38
10.4	Mechanické vlastnosti oceli 22K dle GOST. [95] . . . . .	38
10.5	Chemické složení oceli P265GH dle ČSN EN 10216-2. [105] . . . . .	39
10.6	Mechanické vlastnosti oceli P265GH pro tloušťky stěny od 16 do 40 mm dle ČSN EN 10216-2. [105] . . . . .	39
10.7	Chemické složení svarového kovu Sv-07Ch25N13 dle GOST. [102] . . . .	40
10.8	Mechanické vlastnosti svarového kovu Sv-07Ch25N13 dle GOST. [102] .	40
11.1	Tabulka použitých materiálů a tepelného zpracování zkušebních vzorků.	43
11.2	Tabulka použitých zařízení pro přípravu zkušebních vzorků. . . . .	45
12.1	Tabulka použitých zařízení pro měření a vyhodnocení zkušebních vzorků.	46

# Seznam použitých literárních zdrojů

1. BENEŠ, Libor. Přehled svařování: Svařování. In: *Přehled svařování* [online]. [N.d.], s. 39 [cit. 2020-11-12]. Dostupné z: [http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovani/UT\\_01\\_Prehled\\_svarovani\\_T08.pdf](http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovani/UT_01_Prehled_svarovani_T08.pdf).
2. WEMAN, Klas. *Welding processes handbook*. Cambridge: Woodhead, 2003. ISBN 18-557-3689-6.
3. KOLEKTIV AUTORŮ. *Materiály a jejich chování při svařování: pro mezinárodní/evropské svářečské inženýry a technology (I/EWE, I/EWT)*. Ostrava: Český svářečský ústav s.r.o., Česká svářečská společnost ANB, 2016.
4. SKOTNICA, Ondřej. *Studium modelovaných pásem tepelně ovlivněné oblasti na oceli P92*. Ostrava, 2015. Diplomová práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava.
5. NĚMEC, Karel. *Vliv vneseného tepla na vlastnosti a strukturu svarového spoje duplexní oceli* [online]. Brno, 2010. Dostupné také z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30307198.pdf>.
6. MORAVEC, Jaromír. *Posouzení vlivu svařování na změnu mechanických a křehkolomových vlastností v TOO svarů z oceli S700MC* [Online]. [N.d.].
7. *Heat Affected Zone – Causes, Effects and How to Reduce It* [online] [cit. 2020-11-12]. Dostupné z: <https://fractory.com/heat-affected-zone-causes-effects-reduction/>.
8. *Vlastnosti jednotlivých pásem tepelně ovlivněné oblasti 9% Cr ocelí včetně jejich dlouhodobé žárupevnosti*. In: [online]. [N.d.] [cit. 2020-11-12]. ISSN 1803-8433. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/vlastnosti-jednotlivych-pasem-tepelne-ovlivnene-oblasti-9-cr-oceli-vcetne-jejich-dlouhodobezarupevnosti/>.
9. SOBOTOVÁ, Jana; KOLEKTIV. *Nauka o materiálu I. a II. cvičení*. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.
10. MACEK, Karel; ZUNA, Petr. *Nauka o materiálu*. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-010-1507-6.
11. *Austenite (Gamma Iron)*. Dostupné také z: <https://metallurgyfordummies.com/austenite-gamma-iron.html>.

12. JAHN, Martin. *Experimentální modelování teplotních cyklů* [Online]. Ostrava, 2014. Dostupné také z: [https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/104593/JAH0011\\_FMMI\\_B3923\\_3911R034\\_2014.pdf?sequence=1%5C&isAllowed=y](https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/104593/JAH0011_FMMI_B3923_3911R034_2014.pdf?sequence=1%5C&isAllowed=y).
13. Rozpad austenitu. In: [online]. [N.d.], s. 49 [cit. 2020-11-21]. Dostupné z: [https://www.opi.zcu.cz/download/Tepelne%5C%20zpracovani%5C%2009\\_10.pdf](https://www.opi.zcu.cz/download/Tepelne%5C%20zpracovani%5C%2009_10.pdf).
14. CHOTĚBORSKÝ, Rostislav. *Nauka o materiálu*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2006. ISBN 80-213-1442-7.
15. *Austenite Martensite Bainite Pearlite and Ferrite Structures* [online] [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-are-the-microstructural-constituents-austenite-martensite-bainite-pearlite-and-ferrite>.
16. BHADESHIA, H. K. D. H. *Bainite in steels*. Dostupné také z: <https://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2000/C9/lecture6.pdf>.
17. PEET, M.J. 6 - Bainitic steels and alloys for power plants. In: SHIRZADI, Amir; JACKSON, Susan (ed.). *Structural Alloys for Power Plants*. Woodhead Publishing, 2014, s. 153–187. Woodhead Publishing Series in Energy. ISBN 978-0-85709-238-0. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857097552.2.153>.
18. GUIMARÃES, José Roberto Costa; RIOS, Paulo Rangel. Microstructural Path Analysis of Martensite Dimensions in FeNiC and FeC Alloys. *Material Research* [online]. 2015, roč. 3, č. 18, s. 3 [cit. 2020-11-21]. ISSN 1980-5373. Dostupné z: [https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext%5C&pid=S1516-14392015000300595](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext%5C&pid=S1516-14392015000300595).
19. ŠINDELÁŘ, Martin. ARA a IRA diagramy a jejich využití. In: [online]. [N.d.], s. 18 [cit. 2020-11-21]. Dostupné z: [https://www.moodle-trebesin.cz/pluginfile.php/19113/mod\\_resource/content/1/IRA%5C%2C%5C%20ARA%5C%20diagramy.pdf](https://www.moodle-trebesin.cz/pluginfile.php/19113/mod_resource/content/1/IRA%5C%2C%5C%20ARA%5C%20diagramy.pdf).
20. MACKENZIE, Scott. *Continuous Cooling Transformation Diagrams: CCT diagrams allow predictions of hardness and microstructure in simple shapes quenched in oil, water, or other quenchants*. [Online] [cit. 2020-11-21]. Dostupné z: <https://gearsolutions.com/departments/hot-seat/continuous-cooling-transformation-diagrams/>.
21. *Overview of Post Weld Heat Treatment (PWHT)* [online] [cit. 2020-11-12]. Dostupné z: <https://inspectioneering.com/tag/postweld+heat+treatment>.

22. JAYANTI, S. *Tempering of Steel: 4 Stages | Heat Treatment | Metallurgy* [online] [cit. 2020-11-14]. Dostupné z: <https://www.engineeringenotes.com/metallurgy/steel/tempering-of-steel-4-stages-heat-treatment-metallurgy/26172>.
23. JAYANTI, S. *Tempering of Steel: Stages and Classification | Heat Treatment | Metallurgy* [online] [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: <https://www.engineeringenotes.com/metallurgy/steel/tempering-of-steel-stages-and-classification-heat-treatment-metallurgy/26205>.
24. TOMKÓW, Jacek; ROGALSKI, Grzegorz; FYDRYCH, Dariusz; ŁABANOWSKI, Jerzy. Advantages of the Application of the Temper Bead Welding Technique During Wet Welding. *Materials*. 2019.
25. SPERKO, Walter. Exploring Temper Bead Welding. *Welding Journal*. 2005.
26. ENGINEERS, EPRI. *Temper Bead Welding Process in Operating NPP's*. Vienna, [n.d.].
27. ALORAIEB, A.; AL-MAZROUEE, A.; PRICE, J.W.H.; SHEHATA, T. Weld repair practices without post weld heat treatment for ferritic alloys and their consequences on residual stresses: A review. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2010, s. 127–133.
28. ČSN EN ISO 4063. *Svařování a příbuzné procesy - Přehled metod a jejich číslování*. Praha, 2011.
29. *BPVC Section IX-Welding, Brazing, and Fusing Qualifications*. BPVC-IX - 2017. New York, NY: The American Society of Mechanical Engineers, 2017. ISBN 9780791871003.
30. *TIG svařování I - základní principy*. [Online] [cit. 2020-11-12]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocclanku=2008011702>.
31. *What is Tungsten Inert Gas (GTAW or TIG) Welding?* [Online] [cit. 2020-11-12]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/tungsten-inert-gas-tig-or-gta-welding-006>.
32. KOLAŘÍK, Ladislav. *Elektrický oblouk*. Praha, 2020. Dostupné také z: [https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/83978/mod\\_resource/content/1/5\\_oblouk\\_tsv\\_2016.pdf](https://moodle-vyuka.cvut.cz/pluginfile.php/83978/mod_resource/content/1/5_oblouk_tsv_2016.pdf).
33. ANTONINI, James. 8.04 - Health Effects Associated with Welding. In: HASHMI, Saleem; BATALHA, Gilmar Ferreira; VAN TYNE, Chester J.; YILBAS, Bekir (ed.). *Comprehensive Materials Processing*. Oxford: Elsevier, 2014, s. 49–70. ISBN 978-0-08-096533-8. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00807-4>.
34. *EN ISO 6848. Obloukové svařování a řezání - Netavící se wolframové elektrody - Klasifikace*. Praha, 2016.

35. *Tungsten* [online]. Midwest Tungsten Service, 540 Executive Drive, Willowbrook, IL 60527 [cit. 2020-11-12]. Dostupné z: <https://www.tungsten.com/materials/tungsten/>.
36. *Druhy a použití W-elektrod* [online]. QUICK - SERVIS, spol. s r.o. Brodská 26 261 01 Příbram [cit. 2020-11-12]. Dostupné z: <https://www.svarecky-elektrody.cz/druhy-a-pouziti-wolframovych-elektrod/t-30/t-107>.
37. *Wolframové elektrody pro TIG svařování*. [Online] [cit. 2020-11-12]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocclanku=2006111201>.
38. *Geometry of the electrode in orbital TIG welding* [online] [cit. 2020-11-12]. Dostupné z: <https://www.axxair.com/en/blog/geometry-of-the-electrode-in-orbital-tig-welding>.
39. ELIZZARAZ, Jim. Winning preparation: Proper preparation of tungsten electrodes for arc welding begins with the fundamentals. In: [online]. [N.d.], s. 7 [cit. 2020-11-12]. Dostupné z: <https://diamondground.com/WinningPreparation.pdf>.
40. *Tungsten Guidebook: Guidebook for the Proper Selection and Preparation of Tungsten Electrodes for arc Welding* [online] [cit. 2020-11-12]. Dostupné z: <https://44s8c5wyz4734tca273b41tn-wpengine.netdna-ssl.com/TungstenGuidebook.pdf>.
41. EGERLAND, Stephan. A Contribution to Arc Length Discussion. *Soldagem & Inspeção*. 2015, s. 367–380.
42. ČSN EN ISO 14175. *Svařovací materiály - Plyny a jejich směsi pro tavné svařování a příbuzné procesy*. Praha, 2009.
43. *Klasifikace ochranných plynů* [online] [cit. 2020-11-12]. Dostupné z: [https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR\\_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a\\_RmSdJyeRjH%20vvhWt6GT3USX1r0HEn2FF1tCydFs9o07V4p5J75N8MGgz73w](https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a_RmSdJyeRjH%20vvhWt6GT3USX1r0HEn2FF1tCydFs9o07V4p5J75N8MGgz73w).
44. *Proper Shielding Gas Coverage Is Key to Success in GTAW* [online] [cit. 2020-11-12]. Dostupné z: <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/proper-shielding-gas-coverage-is-key-to-success-in-gtaw>.
45. SÖLKEN, Werner. *Orbital Welding*. 2021. Dostupné také z: [http://www.wermac.org/others/welding\\_orbit.html](http://www.wermac.org/others/welding_orbit.html).
46. *Polysoude*. Vídeň, 2020. Dostupné také z: <https://www.global-welding-technologies.com/en/polysoude>.
47. ČSN EN ISO 17635. *Nedestruktivní zkoušení svarů - Obecná pravidla pro kovové materiály*. Praha, 2018.
48. ČSN EN ISO 5817. *Svařování - Svarové spoje oceli, niklu, titanu a jejich slitin zhotovené tavným svařováním (kromě elektronového a laserového svařování) - Určování stupňů kvality*. Praha, 2014.

49. ČSN EN ISO 6520. *Svařování a příbuzné procesy - Klasifikace geometrických vad kovových materiálů - Část 1: Tavné svařování*. Praha, 2008.
50. ČSN EN ISO 17367. *Nedestruktivní zkoušení svarů - Vizuální kontrola tavných svarů*. Praha, 2018.
51. KUDĚLKA, Vladimír; NEJTKOVÁ, Pavla; OPLETAL, Jan. *Instrukce pro provádění vizuální I rozměrové kontroly svarových spojů dle požadavků čsn en iso 17637*. 2019-05. Dostupné také z: <https://www.technicka-zarizeni.cz/instrukce-pro-provadeni-vizualni-i-rozmerove-kontroly-svarovych-spoju-dle-pozadavku-csn-en-iso-17637/>.
52. ČSN EN ISO 3452-1. *Nedestruktivní zkoušení - Kapilární zkouška - Část 1: Obecné zásady*. Praha, 2015.
53. ČSN EN ISO 23277. *Nedestruktivní zkoušení svarů - Zkoušení kapilární metodou - Stupně přípustnosti*. Praha, 2016.
54. *Penetrační zkouška (PT)*. 2017. Dostupné také z: <https://www.gamalux.cz/pouzivane-metody/penetracni-zkouska/>.
55. ČSN EN ISO 17638. *Nedestruktivní zkoušení svarů - Zkoušení magnetickou metodou práškovou*. Praha, 2017.
56. ČSN EN ISO 23278. *Nedestruktivní zkoušení svarů - Zkoušení magnetickou práškovou metodou - Stupně přípustnosti*. Praha, 2016.
57. *Magnetická prášková zkouška (MT)*. 2017. Dostupné také z: <https://www.gamalux.cz/pouzivane-metody/magneticka-praskova-zkouska/>.
58. ČSN EN ISO 17643. *Nedestruktivní zkoušení svarů - Zkouška svarů vířivými proudy analýzou komplexní roviny*. Praha, 2016.
59. *ET - Služby a zkoušení*. Dostupné také z: <https://www.atg.cz/ndt-152>.
60. KOTRBA, Matěj. *Zjišťování a ověřování deformačních procesů u tvářených ocelí vybranými NDT metodami*. Plzeň, 2015.
61. ČSN EN ISO 17636-1. *Nedestruktivní zkoušení svarů - Radiografické zkoušení - Část 1: Metody rentgenového a gama záření využívající film*. Praha, 2013.
62. ČSN EN ISO 17636-2. *Nedestruktivní zkoušení svarů - Radiografické zkoušení - Část 2: Metody rentgenového a gama záření využívající digitální detektory*. Praha, 2013.
63. ČSN EN ISO 10675-1. *Nedestruktivní zkoušení svarů - Kritéria přípustnosti pro radiografické zkoušení - Část 1: Ocel, nikl, titan a jejich slitiny*. Praha, 2018.
64. ČSN EN ISO 10675-2. *Nedestruktivní zkoušení svarů - Kritéria přípustnosti pro radiografické zkoušení - Část 2: Hliník a jeho slitiny*. Praha, 2019.
65. *Radiografická zkouška (RT)*. 2017. Dostupné také z: <https://www.gamalux.cz/pouzivane-metody/radiograficka-zkouska/>.

66. ČSN EN ISO 17640. *Nedestruktivní zkoušení svarů - Zkoušení ultrazvukem - Techniky, třídy zkoušení a hodnocení.* Praha, 2020.
67. ČSN EN ISO 10863. *Nedestruktivní zkoušení svarů - Zkoušení ultrazvukem - Použití difrakční techniky měření doby průchodu (TOFD).* Praha, 2021.
68. ČSN EN ISO 13588. *Nedestruktivní zkoušení svarů - Zkoušení ultrazvukem - Využití automatizované techniky phased array.* Praha, 2020.
69. ČSN EN ISO 23279. *Nedestruktivní zkoušení svarů - Zkoušení ultrazvukem - Charakterizace diskontinuit ve svarech.* Praha, 2018.
70. ČSN EN ISO 11666. *Nedestruktivní zkoušení svarů - Zkoušení ultrazvukem - Úrovně přípustnosti.* Praha, 2019.
71. ČSN EN ISO 9712. *Nedestruktivní zkoušení - Kvalifikace a certifikace pracovníků NDT.* Praha, 2013.
72. *Ultrazvuková zkouška (UT).* 2017. Dostupné také z: <https://www.gamalux.cz/pouzivane-metody/ultrazvukova-zkouska/>.
73. ČSN EN ISO 4136. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Příčná zkouška tahem.* Praha, 2013.
74. ČSN EN ISO 5178. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Podélná zkouška tahem svarového kovu tavných svarových spojů.* Praha, 2020.
75. ČSN EN ISO 9018. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkouška tahem křížových a přeplátovaných spojů.* Praha, 2016.
76. ČSN EN ISO 148-1. *Kovové materiály - Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy - Část 1: Zkušební metoda.* Praha, 2017.
77. ČSN EN ISO 9016. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkouška rázem v ohybu - Umístění zkušebních tyčí, orientace vrubu a zkoušení.* Praha, 2013.
78. ČSN EN ISO 5173. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkoušky ohybem.* Praha, 2010.
79. ČSN EN ISO 9017. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkouška rozlomením.* Praha, 2018.
80. KOPECKÝ, Lukáš. *Destruktivní metody kontroly svarových spojů.* Brno, 2014. Dostupné také z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=84906](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=84906).
81. ČSN EN ISO 6507-1. *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda.* Praha, 2006.
82. ČSN EN ISO 6506-1. *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Brinella - Část 1: Zkušební metoda.* Praha, 2015.



83. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkoušení tvrdosti - Část 1: Zkouška tvrdosti spojů svařovaných obloukovým svařováním.* Praha, 2011.
84. *Zkoušení tvrdosti svarových spojů.* 2018. Dostupné také z: <https://www.testsysteme.cz/zkouseni-tvrdosti-svarovych-spoju>.
85. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkoušení tvrdosti - Část 2: Zkoušení mikrotvrdosti svarových spojů.* Praha, 2018.
86. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů.* Praha, 2014.
87. *ČSN EN ISO 9000. Systémy managementu kvality - Základní principy a slovník.* Praha, 2016.
88. *ČSN EN ISO 3834-1. Požadavky na jakost při tavném svařování kovových materiálů - Část 1: Kritéria pro volbu odpovídajících požadavků na jakost.* Praha, 2006.
89. *Zákon č. 263/2016 Sb. Atomový zákon a související předpisy.* Praha, 2016.
90. *Soubor norem PNAE G.* Moskva, [n.d.].
91. *RSE-M. In-Service Inspection Rules for Mechanical Components of PWR Nuclear Islands.* [N.d.].
92. *RCC-M. Design and Construction Rules for Mechanical Components of PWR Nuclear Islands.* [N.d.].
93. *OP 1513-72. Základní předpisy pro svařování a navařování uzlů konstrukcí jaderných elektráren, experimentálních a výzkumných jaderných reaktorů a souborů OP 1513-72.* Praha, 1976.
94. *PK 1514-72. Předpisy pro kontrolu svarových spojů a návarů uzlů a konstrukcí jaderných elektráren, experimentálních a výzkumných jaderných reaktorů a souborů.* Moskva, 1974.
95. KOLEKTIV AUTORŮ. *Svařování zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER.* Praha, 2020.
96. *Asociace strojních inženýrů ČR, Praha.* 2020. Dostupné také z: <http://www.asicr.cz/>.
97. *ČSN EN ISO 15614. Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů.* Praha, 2017.
98. *ČSN EN ISO 15613. Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Kvalifikace na základě předvýrobní zkoušky svařování.* Praha, 2017.
99. *ČSN EN ISO 9606-1. Zkoušky svářečů - Tavné svařování - Část 1: Oceli.* Praha, 2014.
100. PALÁN, Marek. *Ústní sdělení.* 2021.

101. A.S., ČEZ. *Technologie a zabezpečení*. 2021. Dostupné také z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/jaderna-energetika/jaderna-energetika-v-ceske-republice/ete/technologie-a-zabezpeceni-1>.
102. PALÁN, Marek. *Studium dopadu svařování metodou popouštěcí housenky na výsledky oprav v jaderných elektrárnách*. Plzeň, 2020.
103. AUREMO. *Steel 10GN2MFA*. 2021. Dostupné také z: <https://auremo.biz/materials/stal-10gn2mfa.html>.
104. STEELUN. *22K High quality structural carbon steel*. 2021. Dostupné také z: <https://www.steelun.com/22k-high-quality-structural-carbon-steel/>.
105. ČSN EN 10216-2. *Bezešvé ocelové trubky pro tlakové účely - Technické dodací podmínky - Část 2: Trubky z nelegovaných a legovaných ocelí se stanovenými vlastnostmi při zvýšených teplotách*. Praha, 2020.
106. WORLDIRONSTEEL. *Trubice P265GH Superheater*. 2021. Dostupné také z: <http://cz.worldironsteel.com/others-pipe/p265gh-superheater-tube.html>.