

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N0715A270014 Materiálové inženýrství a výrobní technologie

# **Diplomová práce**

Orbitální svařování heterogenních svarových spojů

Autor: **Bc. Ondřej LUKÁŠEK**  
Vedoucí práce: **Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž, IWE**

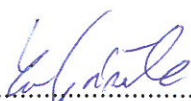
Akademický rok 2020/2021

## Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne: 26.5.2021

  
.....  
podpis autora

## Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce Prof. Dr. Ing. Antonínu Křížovi za rady a náměty při zpracování práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Ondřeji Stachovi za rady týkající se orbitálního svařování, paní Haně Pasiarové a Luděku Vojtovi za rady při zpracování metalografických výbrusů a v neposlední řadě konzultantovi diplomové práce Ing. Petru Samkovi.

Velký dík patří také mé rodině, která mě podporovala během celého období studia.

Ondřej Lukášek

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2020/2021

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej LUKÁŠEK**  
Osobní číslo: **S19N0238P**  
Studijní program: **N0715A270014 Materiálové inženýrství a výrobní technologie**  
Studijní obor: **Materiálové inženýrství a výrobní technologie**  
Téma práce: **Orbitální svařování heterogenních svarových spojů**  
Zadávající katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

### Zásady pro vypracování

1. Heterogenní svarové spoje
2. Vady a degradace heterogenních spojů
3. Využití orbitálního svařování
4. Svařování heterogenních materiálů trubek orbitálním svařováním
5. Porovnání vlivu druhu stehování, úkosu a přídavného materiálu
6. Vyhodnocení kvality svaru z hlediska předepsaných norem
7. Závěr

Rozsah diplomové práce: **50-60 stran**  
Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

*The orbital Welding handbook Original edition*: , 2009 – Polysoude Nantes France SAS

ASM handbook:, *Welding, brazing and soldering. 10th ed.*, Materials Park: ASM International, c1990-. ISBN 08-717-0382-3.

KOU, Sindou., *Welding Metallurgy.*, Wiley-Interscience. 2002. ISBN-13: 978-0471434917

FOLDYNA, Václav., *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svařečských inženýrů a technologů. 2. upr. vyd.*, Ostrava: ZEROSS, 2001., ISBN 80-857-7185-3.

LAYUS, Pavel, Paul KAH, Elena KHLUSOVA a Victor ORLOV., *Study of the sensitivity of high-strength cold-resistant shipbuilding steels to thermal cycle of arc welding.* International Journal of Mechanical and Materials Engineering [online]. 2018, 13(1), 2. ISSN 1823-0334

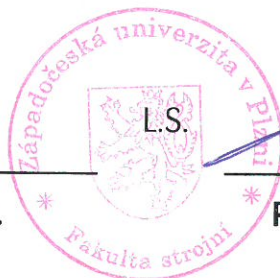
Vedoucí diplomové práce: **Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž, IWE**  
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Konzultant diplomové práce: **Ing. Petr Samek, IWE**  
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Datum zadání diplomové práce: **6. října 2020**  
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2021**



**Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.**  
děkan



**Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž, IWE**  
vedoucí katedry

# ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

|                      |  |                       |                                 |
|----------------------|--|-----------------------|---------------------------------|
| <b>AUTOR</b>         | Příjmení<br>Lukášek  | Jméno<br>Ondřej       |                                 |
| <b>STUDIJNÍ OBOR</b> | N0715A270014 - Materiálové inženýrství a výrobní technologie |                       |                                 |
| <b>VEDOUCÍ PRÁCE</b> | Příjmení (včetně titulů)<br>Prof. Dr. Ing. Kříž, IWE         | Jméno<br>Antonín      |                                 |
| <b>PRACOVISŤE</b>    | ZČU – FST – KMM  |                       |                                 |
| <b>DRUH PRÁCE</b>    | <b>DIPLOMOVÁ</b>   | <del>BAKALÁŘSKÁ</del> | <b>Nehodící se<br/>škrtněte</b> |
| <b>NÁZEV PRÁCE</b>   | Orbitální svařování heterogenních svarových spojů            |                       |                                 |

|                |         |                |     |                    |      |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|
| <b>FAKULTA</b> | strojní | <b>KATEDRA</b> | KMM | <b>ROK ODEVZD.</b> | 2021 |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

|               |     |                     |    |                          |    |
|---------------|-----|---------------------|----|--------------------------|----|
| <b>CELKEM</b> | 114 | <b>TEXTOVÁ ČÁST</b> | 65 | <b>GRAFICKÁ<br/>ČÁST</b> | 49 |
|---------------|-----|---------------------|----|--------------------------|----|

|                      |  |
|----------------------|--|
| <b>STRUČNÝ POPIS</b> | Diplomová práce se zabývá optimalizací parametrů orbitálního svařování pro heterogenní svarové spoje mezi austenitickou a uhlíkovou ocelí. V teoretické části je popsáno chování heterogenních svarových spojů při svařování, technologie TIG svařování a orbitální svařování. Experimentální část je věnována optimalizaci svařovacích parametrů a jejich následné hodnocení pomocí nedestruktivních a destruktivních metod kontroly. |
| <b>KLÍČOVÁ SLOVA</b> | Heterogenní svarové spoje, TIG svařování, orbitální svařování, optimalizace svařovacích parametrů  |

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

|                              |  |                 |                                       |
|------------------------------|--|-----------------|---------------------------------------|
| <b>AUTHOR</b>                | Surname<br>Lukášek   | Name<br>Ondřej  |                                       |
| <b>FIELD OF STUDY</b>        | N0715A270014 – Materials Science and Manufacturing<br>Technology |                 |                                       |
| <b>SUPERVISOR</b>            | Surname (Inclusive of Degrees)<br>Prof. Dr. Ing. Kříž, IWE       | Name<br>Antonín |                                       |
| <b>INSTITUTION</b>           | ZČU – FST – KMM  |                 |                                       |
| <b>TYPE OF WORK</b>          | <b>DIPLOMA</b>   | <b>BACHELOR</b> | <b>Delete when not<br/>applicable</b> |
| <b>TITLE OF THE<br/>WORK</b> | Orbital welding of heterogeneous welds                           |                 |                                       |

|                |                           |                   |     |                     |      |
|----------------|---------------------------|-------------------|-----|---------------------|------|
| <b>FACULTY</b> | Mechanical<br>engineering | <b>DEPARTMENT</b> | KMM | <b>SUBMITTED IN</b> | 2021 |
|----------------|---------------------------|-------------------|-----|---------------------|------|

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

|                |     |                  |    |                           |    |
|----------------|-----|------------------|----|---------------------------|----|
| <b>TOTALLY</b> | 114 | <b>TEXT PART</b> | 65 | <b>GRAPHICAL<br/>PART</b> | 49 |
|----------------|-----|------------------|----|---------------------------|----|

|                          |  |
|--------------------------|--|
| <b>BRIEF DESCRIPTION</b> | The diploma thesis deals with the optimization of orbital welding parameters for heterogeneous welded joints between austenitic and carbon steel. The theoretical part describes the behavior of heterogeneous welded joints during welding, TIG welding and technology of orbital welding. The experimental part is devoted to the optimization of welding parameters and evaluation using non-destructive and destructive methods. |
| <b>KEY WORDS</b>         | Heterogeneous welded joints, TIG welding, orbital welding technology, optimization of welding parameters   |

# Obsah

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>ÚVOD</b> .....  | <b>16</b> |
| <b>2</b> | <b>HETEROGENNÍ SVAROVÝ SPOJ</b> .....                          | <b>17</b> |
| 2.1      | VLASTNOSTI HETEROGENNÍCH SVAROVÝCH SPOJŮ .....                 | 17        |
| 2.2      | VLIV GEOMETRIE SVAROVÝCH PLOCH .....                           | 20        |
| 2.3      | SVAŘOVÁNÍ DVOU DRUHŮ OCELÍ .....                               | 24        |
| 2.3.1    | <i>Polštářování</i> .....                                      | 25        |
| 2.4      | DEGRADACE HETEROGENNÍCH SVAROVÝCH SPOJŮ .....                  | 26        |
| <b>3</b> | <b>TIG SVAŘOVÁNÍ</b> .....                                     | <b>30</b> |
| 3.1      | ELEKTRODY .....  | 30        |
| 3.2      | OCHRANNÉ A FORMOVACÍ PLYNY .....                               | 33        |
| 3.3      | PARAMETRY TIG SVAŘOVÁNÍ .....                                  | 35        |
| <b>4</b> | <b>ORBITÁLNÍ SVAŘOVÁNÍ</b> .....                               | <b>37</b> |
| 4.1      | ZAŘÍZENÍ PRO ORBITÁLNÍ SVAŘOVÁNÍ .....                         | 37        |
| 4.2      | VLIV A URČOVÁNÍ PARAMETRŮ SVAŘOVÁNÍ .....                      | 38        |
| 4.3      | PŘÍPRAVA A SVAŘITELNOST POLOTOVARŮ .....                       | 40        |
| <b>5</b> | <b>ÚVOD DO EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI</b> .....                      | <b>41</b> |
| <b>6</b> | <b>POPIS A PŘÍPRAVA POUŽITÝCH MATERIÁLŮ A POLOTOVARŮ</b> ..... | <b>43</b> |
| 6.1      | ZÁKLADNÍ MATERIÁL P265GH .....                                 | 43        |
| 6.2      | ZÁKLADNÍ MATERIÁL WR.N. 1.4541.....                            | 44        |
| 6.3      | PŘÍDAVNÝ MATERIÁL SV07CH25N13 .....                            | 45        |
| 6.4      | PŘÍDAVNÝ MATERIÁL EXATON Ni72HP .....                          | 45        |
| 6.5      | SCHAEFFLEROVI DIAGRAMY .....                                   | 45        |
| 6.6      | ROZMĚRY A PŘÍPRAVA ÚKOSŮ .....                                 | 47        |
| <b>7</b> | <b>POUŽITÉ ZAŘÍZENÍ A PRACOVNÍ POSTUP</b> .....                | <b>48</b> |
| 7.1      | ZAŘÍZENÍ A POSTUP PRO SVAŘOVÁNÍ.....                           | 48        |
| 7.2      | ZAŘÍZENÍ A POSTUP PRO NDT ZKOUŠENÍ.....                        | 50        |
| 7.3      | ZAŘÍZENÍ A POSTUP PRO DT ZKOUŠENÍ .....                        | 51        |
| <b>8</b> | <b>OPTIMALIZACE SVAŘOVACÍCH PARAMETRŮ</b> .....                | <b>53</b> |
| 8.1      | SVARY T1SV – T4SV.....   | 54        |
| 8.2      | SVARY T5SV – T8SV.....   | 55        |
| 8.3      | SVARY T9SV – T10SV.....  | 56        |
| 8.4      | SVARY V2SV – V5SV .....  | 56        |



|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 8.5       | SVARY T1EX – T4EX.....                   | 57        |
| 8.6       | SVARY V1EX – V4EX .....                  | 58        |
| <b>9</b>  | <b>VYHODNOCENÍ SVAROVÝCH SPOJŮ .....</b> | <b>59</b> |
| <b>10</b> | <b>DISKUZE.....</b>                      | <b>65</b> |
| <b>11</b> | <b>ZÁVĚR .....</b>                       | <b>68</b> |
| <b>12</b> | <b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>   | <b>69</b> |
| <b>13</b> | <b>PŘÍLOHY .....</b>                     | <b>72</b> |

## Seznam obrázků

|   |    |
|---|----|
| Obrázek 1 - Schéma úkosů využitých v experimentu diplomové práce, nalevo V úkos, napravo U úkos (tulipán); detail viz. Obrázek 18 .....   | 20 |
| Obrázek 2 - Oblasti promíšení svaru v příčném řezu [2] .....  | 21 |
| Obrázek 3 - Teplotní cyklus vícevrstvého svařování [1] .....  | 22 |
| Obrázek 4 - Závislost stupně podchlazení na výsledné struktuře [7] .....  | 23 |
| Obrázek 5 - Popis vlivu tepla na jednotlivé části tepelně ovlivněné zóny [8] .....  | 24 |
| Obrázek 6 - Postup technologie polštářování [2] .....   | 25 |
| Obrázek 7 - Dlouhodobě namáhaný svarový spoj [1] .....  | 26 |
| Obrázek 8 - Příklad krystalizačních trhlin; nalevo vnitřní centrální trhlina, napravo vnější centrální trhlina [10] .....   | 27 |
| Obrázek 9 - Příklad trhlin za studena; nalevo trhlina v oblasti kořene svaru, na hranici ztavení, napravo trhliny vedoucí od paty svaru [12] .....  | 28 |
| Obrázek 10 - Velikost a broušení elektrody .....  | 32 |
| Obrázek 11 - Vliv druhu svařovacího proudu na tvar svarové lázně [2] .....  | 35 |
| Obrázek 12 – Porovnání polarity proudu DCEN A DCEP [2] .....  | 36 |
| Obrázek 13 - Příklad svařovacích hlav pro orbitální svařování; nalevo uzavřená svařovací hlava, napravo otevřená svařovací hlava [14,15] .....  | 38 |
| Obrázek 14 - Svařovací polohy dle ČSN EN ISO 6947 [16] .....  | 39 |
| Obrázek 15 - Základní materiál P265GH, zvětšeno 100x, leptáno 1 % Nitalem, feriticko perlitická struktura .....   | 43 |
| Obrázek 16 - Základní materiál Wr. N. 1.4541, zvětšeno 200x, leptáno roztokem H <sub>2</sub> O, HCl a HNO <sub>3</sub> , austenitická struktura s vměstky .....                                     | 44 |
| Obrázek 17 - Schaefflerův diagram [1] .....   | 46 |
| Obrázek 18 - Parametry úkosů použitých v experimentální části diplomové práce; nalevo V úkos; napravo U úkos (tulipán) .....  | 47 |
| Obrázek 19 - Sestehované trubky laserem, V úkos .....   | 47 |
| Obrázek 20 - U úkos s laserovým stehováním .....  | 47 |
| Obrázek 21 - Bruska na elektrody ESG Plus .....   | 48 |
| Obrázek 22 - Svařovna a komponenty využitě pro svařování; 1 - svařovací zdroj P6, 2 - svařovací hlava MUIV 115, 3 - podavač drátu P3, 4 - dálkové ovládání, 5 - lahev s argonem, 6 – svařelec ..... | 49 |
| Obrázek 23 - Barevný kapilární set Sherwin [22] .....   | 50 |

|   |    |
|---|----|
| Obrázek 24 - Nalevo metalografická pila, uprostřed elektrohydraulický lis, napravo automatická bruska.....                              | 51 |
| Obrázek 25 - Světelný optický mikroskop Carl Zeiss Obeserver Z1M [23] .....   | 51 |
| Obrázek 26 –Schéma snímání struktury v metalografickém výbrusu.....   | 52 |
| Obrázek 27 - Princip zkoušky, geometrie vnikacího tělesa a vtisku podle Vickerse [26] .....   | 52 |
| Obrázek 28 - Struers - Durascan G5 .....  | 52 |
| Obrázek 29 - Rozdělení trubky na sektory, číselník označuje délku svaru v mm .....  | 53 |
| Obrázek 30 - Označení pozice odběru vzorků .....  | 60 |
| Obrázek 31 - Makro vzorku T7Sv - 7/1, zvětšeno 25x, leptáno roztokem HCl, H <sub>2</sub> O a HNO <sub>3</sub> ..                        | 62 |
| Obrázek 32 - Makro vzorku T7Sv - 7/4, zvětšeno 25x, leptáno roztokem HCl, H <sub>2</sub> O a HNO <sub>3</sub>                           | 62 |
| Obrázek 33 - Makrosnímek vzorku T7Sv - 7/4, zvětšeno 100x, leptáno 1% Nitalem; přechod svarového kovu do ZM P265GH, struktura TOO ..... | 62 |
| Obrázek 34 - Vzorek T7Sv/4, zvětšeno 100x, leptáno roztokem HCl, H <sub>2</sub> O a HNO <sub>3</sub> .....                              | 63 |
| Obrázek 35 - Vzorek T7Sv/4, zvětšeno 100x, leptáno roztokem HCl, H <sub>2</sub> O a HNO <sub>3</sub> .....                              | 63 |
| Obrázek 36 - Vzorek T7Sv/4, zvětšeno 100x, leptáno roztokem HCl, H <sub>2</sub> O a HNO <sub>3</sub> .....                              | 63 |
| Obrázek 37 - Vzorek T7Sv/4, zvětšeno 100x, leptáno roztokem HCl, H <sub>2</sub> O a HNO <sub>3</sub> .....                              | 63 |
| Obrázek 38 - Hranice ztavení ZM P265GH a SK, zvětšeno 100x, oblast oduhličené zóny.....   | 63 |
| Obrázek 39 - Snímek vtisku na hranici ztavení v oblasti SK.....   | 63 |
| Obrázek 40 - Makrosnímek vzorku T7Sv 7/3, stav po provedení zkoušky mikrotvrdosti, červeně je vyznačen směr měření .....                | 64 |
| Obrázek 41 - Vzorek T7Sv/3, zvětšeno 200x, leptáno roztokem HCl, H <sub>2</sub> O a HNO <sub>3</sub> .....                              | 64 |

## Seznam tabulek

|   |    |
|---|----|
| Tabulka 1 - Fyzikální vlastnosti austenitické oceli Wr. N. 1.4541 a uhlíkové oceli P 265 GH.. | 18 |
| Tabulka 2 - Označování elektrod dle chemického složení [5] .....                              | 31 |
| Tabulka 3 - Vyráběné rozměry netavicích se elektrod [5] .....                                 | 32 |
| Tabulka 4 - Vliv otupení elektrody [13] .....   | 33 |
| Tabulka 5 - Proudová zatížitelnost wolframových elektrod [5].....                             | 33 |
| Tabulka 6 - Druhy a využití ochranných a formovacích plynů [4] .....                          | 35 |
| Tabulka 7 - Použití jednotlivých druhů proudů na konkrétní materiály .....                    | 35 |
| Tabulka 8 - Testované technologie stehování, přídavných materiálů a úkosů.....                | 41 |
| Tabulka 9 - Přehled svařených vzorků a provedených metod hodnocení.....                       | 42 |
| Tabulka 10 - Chemické složení oceli P265GH.....   | 43 |
| Tabulka 11 - Chemické složení oceli Wr.N. 1.4541.....   | 44 |
| Tabulka 12 - Chemické složení přídavného materiálu Sv07Ch25N13 .....                          | 45 |
| Tabulka 13 - Chemické složení přídavného materiálu Exaton Ni72HP .....                        | 45 |
| Tabulka 14 - Hodnoty ekvivalentu chromu $Cr_e$ a niklu $Ni_e$ pro ZM a PM.....                | 46 |
| Tabulka 15 - Rozdělení trubky na sektory .....  | 53 |
| Tabulka 16 - Výchozí parametry dle ČEZ Energoservis .....                                     | 53 |
| Tabulka 17 - Počet metalografických výprusů pro jednotlivé klíčové vzorky .....               | 59 |
| Tabulka 18 - Svařovací parametry pro vzorek T7Sv .....  | 59 |
| Tabulka 19 – Vyhodnocení vizuální kontroly vzorku T7Sv.....                                   | 60 |
| Tabulka 20 - Vyhodnocení kapilární zkoušky vzorku T7Sv.....                                   | 60 |
| Tabulka 21 - Výsledek prozařovací zkoušky vzorku T7Sv .....                                   | 61 |

## Seznam příloh

|   |     |
|---|-----|
| Příloha 1 - Svarový spoj T1SV .....                               | 72  |
| Příloha 2 – Svarový spoj T2Sv .....                               | 74  |
| Příloha 3 - Svarový spoj T3Sv .....                               | 76  |
| Příloha 4 - Svarový spoj T4Sv .....                               | 80  |
| Příloha 5 - Svarový spoj T5Sv .....                               | 82  |
| Příloha 6 - Svarový spoj T6Sv .....                               | 84  |
| Příloha 7 - Grafy průběhu mikrotvrdosti svarového spoje T7Sv..... | 86  |
| Příloha 8 - Svarový spoj T8Sv .....                               | 87  |
| Příloha 9 - Svarový spoj T9Sv .....                               | 89  |
| Příloha 10 - Svarový spoj T10Sv .....                             | 91  |
| Příloha 11 - Svarový spoj V2Sv .....                              | 95  |
| Příloha 12 - Svarový spoj V3Sv.....                               | 97  |
| Příloha 13 - Svarový spoj V4Sv.....                               | 99  |
| Příloha 14 - Svarový spoj V5Sv.....                               | 103 |
| Příloha 15 - Svarový spoj T2Ex.....                               | 105 |
| Příloha 16 - Svarový spoj T3Ex.....                               | 107 |
| Příloha 17 - Svarový spoj T4Ex.....                               | 109 |
| Příloha 18 - Svarový spoj V2Ex .....                              | 111 |
| Příloha 19 - Svarový spoj V3Ex .....                              | 113 |

## Seznam použitých zkratek a symbolů

| Zkratka          | Jednotky | Název  |
|------------------|----------|--|
| A <sub>1</sub>   | [°C]     | Teplota eutektoidní přeměny                    |
| A <sub>3</sub>   | [°C]     | Teplota transformace austenitu na ferit        |
| AC               | -        | Alternating current                            |
| AVC              | -        | Arc voltage control                            |
| B                | -        | Bór  |
| Cr               | -        | Chrómování                                     |
| Cr <sub>e</sub>  | -        | Ekvivalent chromu                              |
| Cu               | -        | Měď  |
| DCEN             | -        | Direct current electrode negative              |
| DCEP             | -        | Direct current electrode positive              |
| DT               | -        | Destructive testing                            |
| Fe               | -        | Železo   |
| H.C.S            | [%]      | Náchylnost svarového spoje k trhlinám za horka |
| H <sub>2</sub> O | -        | Voda   |
| HCl              | -        | Kyselina chlorovodíková                        |
| HNO <sub>3</sub> | -        | Kyselina dusičná                               |
| HV               | -        | Hardness Vickers                               |
| I                | [A]      | Elektrický proud                               |
| I <sub>p</sub>   | [A]      | Pulzní (horní) proud                           |
| I <sub>z</sub>   | [A]      | Základní (dolní) proud                         |
| K                | -        | Oblast výskytu vady - kořen                    |
| KMM              | -        | Katedra materiálů                              |
| Mn               | -        | Mangan   |
| Mo               | -        | Molybden                                       |
| Nb               | -        | Niob   |
| NDT              | -        | Non-destructive testing                        |
| Ni               | -        | Nikl   |
| Ni <sub>e</sub>  | -        | Ekvivalent niklu                               |
| O                | -        | Kyslík   |
| Ø                | [mm]     | Průměr   |
| P                | -        | Oblast výskytu vady - povrch                   |
| PA               | -        | Pozice vodorovná shora                         |

|                 |          |                                    |
|-----------------|----------|------------------------------------|
| PB              | -        | Pozice vodorovná šikmo shora       |
| PC              | -        | Pozice vodorovná                   |
| PD              | -        | Pozice vodorovná šikmo nad hlavou  |
| PE              | -        | Pozice vodorovná nad hlavou        |
| PM              | -        | Přídavný materiál                  |
| PT              | -        | Penetrant testing                  |
| Q               | [kJ/mm]  | Množství tepla na jednotku délky   |
| Q <sub>e</sub>  | [kJ/mm]  | Efektivní výkon                    |
| RT              | -        | Radiographic testing               |
| S               | -        | Síra                               |
| Si              | -        | Křemík                             |
| SK              | -        | Svarový kov                        |
| Ti              | -        | Titan                              |
| TiC             | -        | Karbid titanu                      |
| TIG             | -        | Tungsten Inert Gas                 |
| TOO             | -        | Tepelně ovlivněná zóna             |
| U               | [V]      | Elektrické napětí                  |
| v               | [mm/s]   | Svařovací rychlost                 |
| v <sub>dr</sub> | [mm/min] | Rychlost podávání přídavného drátu |
| v <sub>ot</sub> | [mm/min] | Rychlost otáčení svařovací hlavy   |
| VT              | -        | Visual testing                     |
| ZČU             | -        | Západočeská univerzita             |
| ZM              | -        | Základní materiál                  |
| Z <sub>z</sub>  | [%]      | Zaručená hodnota kontrakce         |
| η               | -        | Koeficient účinnosti svařování     |

# 1 Úvod

Svařování je jednou z nejsložitějších výrobních technologií. Při tomto procesu je kombinováno mnoho vědních odvětví, které mají zásadní vliv pro získání co nejlepšího výsledku. Jde o spojení metalurgie, termodynamiky, elektrotechniky, materiálové chemie nebo lomové mechaniky. V dnešní době je svařování stále jednou z nejvyužívanějších technologií ve výrobě nerozebíratelných spojů. Díky tomuto pomyslnému vrcholu je této technologii věnována značná pozornost a vývoj. Důraz je kladen na automatizaci svařování. Ta probíhá hned z několika důvodů. Jedním z nich je nedostatek řádně kvalifikovaných svářečů. Dalším faktorem je potřeba plnit stále se zvyšující nároky na kvalitu a opakovatelnost svaru. Díky své jedinečnosti má svařování mnoho využití v odvětvích jako automobilní průmysl, potravinářský průmysl nebo třeba energetika. Díky této široké škále využití bude docházet i dalšímu rozvoji a zdokonalování této technologie.

Orbitální svařování je odvětvím obloukového svařování, které vznikalo v období šedesátých let minulého století. Za vznik této metody může potřeba zkvalitnění svařování trubkových spojů. Tento spoj je při svařování velmi specifický a vyžaduje od svářeče velkou zručnost při ručním svařování. Kvůli náročnosti se od sebe jednotlivé spoje často lišily a nebyla zaručena konstantní kvalita svarového spoje. Zde přišla myšlenka na automatizaci svařování takovýchto spojů, a tak vzniklo orbitální svařování. Za 60 let existence orbitálního svařování byla tato technika optimalizována a dnes se těší velkého využití v mnoha odvětvích. Pro konstantní kvalitu vytvářených svarů se orbitální svařování využívá i v jaderné energetice.

Kvalita heterogenních svarových spojů je zásadně závislá na hodnotě promíšení mezi základním materiálem a svarovým kovem. Promíšení je závislé na množství vneseného tepla, chemickém složení základních a přídavných materiálů i na druhu úkosu svarového spoje. Nejslabším článkem svarových spojů mezi austenitickou a uhlíkovou ocelí je oblast mezi uhlíkovým základním materiálem a svarovým kovem. V této oblasti dochází k oduhličování základního materiálu a tím degradaci jeho vlastností. Uhlík, jež difundoval do svarového kovu pak může být činitelem vytvářejícím křehké struktury, což vede ke snížení únavové odolnosti svarového spoje. Praktická část této diplomové práce byla věnována optimalizaci parametrů orbitálního svařování. Cílem je minimalizace vlivu výše popsaných úskalí heterogenních svarových spojů.



## 2 Heterogenní svarový spoj

Heterogenní svarový spoj je složen ze dvou různých základních materiálů a materiálu přídavného. Vlastnosti svarového kovu jsou závislé na složení přídavného materiálu, druhu svařování a promíšení se základními materiály. Heterogenní svařování navíc zanechává dvě odlišné tepelně ovlivněné zóny. Tyto rozdíly v mechanických i fyzikálních vlastnostech svarového kovu i tepelně ovlivněné zóny musí být brány v potaz při využití v konkrétním provozu [1].

Jelikož se svary využívají v různých odvětvích za odlišných pracovních podmínek, je nutné dbát i na výběr vhodných materiálů s různými strukturami a jejich vlastnostmi. Při návrhu těchto heterogenních svarů je nutné brát v potaz mnoho svařovacích parametrů a jejich vzájemné působení pro specifické aplikace [1].

Aby docházelo k co nejmenšímu nalegování svarového kovu, je dobré přenášet do svaru co nejméně tepla na jednotku délky svaru. Při TIG svařování je dobré provádět svařování s nižšími hodnotami svařovacího proudu a vyššími rychlostmi svařování kvůli snížení hodnoty vneseného tepla [1].

Svařování ocelí, které jsou tvořeny rozdílnými strukturálními bázemi dochází vždy k degradaci buď jednoho nebo obou svařovaných materiálů. Důvodem je natavená neboli fúzní zóna svarového kovu, která má smíšené chemické složení. Ta následně způsobuje degradaci mechanických, fyzikálních, termodynamických a chemických vlastností. Při teplotách vyšších, než je 350 °C probíhá difuze mezi základními materiály a svarovým kovem. To platí zejména pro uhlík a tím mohou vznikat oduhličené nebo nauhličené oblasti spoje. V těchto oblastech dochází k degradaci vlastností a tím se snižuje spolehlivost a trvanlivost spoje [1].

### 2.1 Vlastnosti heterogenních svarových spojů

Při tavném svařování heterogenních svarových spojů jsou nejdůležitějšími parametry chemické složení svarového kovu a jeho vlastnosti. Složení závisí na druhu základních materiálů, zvoleném přídavném materiálu, a především na jejich vzájemném promíšení. Složení svarového kovu nebývá jednotné. Liší se u přechodů mezi základními materiály a svarovým kovem v důsledku gradientu chemického složení. Rozdíly ve struktuře je možné pozorovat i v každé vrstvě při vícevrstevném svařování [1,2].

Pokud jsou provozní podmínky svaru nižší než 400 °C, svařování je prováděno austenitickými elektrodami. Je též možné využít elektrody nízkolegované s malým obsahem uhlíku [2].

Nejčastějšími faktory způsobující vady heterogenního svaru při obloukovém svařování jsou mimo jiné tyto:

- Obecné problémy se složením svařovaných kovů (vytvoření křehké fáze a omezená vzájemná rozpustnost)
- Výrazně odlišné body tání základních materiálů
- Rozdílné koeficienty tepelné roztažnosti
- Rozdíl v tepelné vodivosti základních materiálů

Na rozhraní mezi základním materiálem a svarovým kovem vznikají napětí od rozdílu mezi koeficientem tepelné roztažnosti. Dalším problémem je difuze uhlíku z uhlíkové feritické oceli do austenitické korozivzdorné oceli. Tím dochází k oslabování tepelně ovlivněné zóny feritické

oceli. Zároveň je nutné brát v potaz i korozi na rozhraní, která je umocněna přítomností zbytkových napětí [2].

### Teplota tání

Jedním z parametrů při svařování dvou rozdílných kovů je teplota jejich tání. Při tavném svařování je do svaru vnášeno velké teplo, které může způsobit, že jeden materiál bude roztaven daleko dříve než druhý. To může vyústit až v prasklinu materiálu s nižší teplotou tání. Tuhnutí a smršťování kovu s vyšší teplotou tání způsobuje napětí v druhém materiálu, když je ještě ve stavu měkké, částečně tuhé fázi. Tento problém se řeší návarem, kdy se na úkos materiálu s vyšší teplotou tání navaří přídatný materiál se střední hodnotou teploty tání základních materiálů. Polštářování zároveň slouží jako přechod mezi materiály s rozdílným koeficientem tepelné roztažnosti. Další vlastností polštářové vrstvy je, že zabraňuje nechtěné difúzi prvků ze základního materiálu do svarového kovu při vyšších provozních teplotách nebo tepelném zpracování [2,3].

### Tepelná vodivost

Tepelná vodivost je řešena pouze v případě jejího velkého rozdílu mezi svařovanými materiály. Může způsobit nerovnoměrné natavení svarového kovu z důvodu rychlejšího odvodu tepla do jednoho ze základních materiálů. Řešením je zaměření tepelného zdroje (oblouku) vůči materiálu s větší tepelnou vodivostí. Tím se zajistí vyšší teplotní rovnováha [2,3].

Dalším řešením může být předeřev základního materiálu s vyšší tepelnou vodivostí. Tím se zároveň sníží i rychlost ochlazování a tím může dojít ke stabilizaci vznikající struktury. Při vícevrstevném svařování je dobré kontrolovat i tzv. interpass teplotu. V době mezi svařování jednotlivých vrstev teplota materiálu s vyšší tepelnou vodivostí chladne rychleji, což může způsobit nerovnoměrnost zbytkových napětí a vzniklé struktury. [2].

### Tepelná roztažnost

Velké rozdíly v tepelné vodivosti spojovaných materiálů se během ochlazování projeví jako tahové napětí pro jeden a tlakové napětí pro druhý základní materiál. Kov, ve kterém působí tahová napětí má větší náchylnost k trhlinám za tepla nebo může dojít k prasklinám za studena. Náprava může být provedena mechanicky nebo tepelně k uvolnění těchto napětí. Tento parametr je nebezpečnější v pracovních prostředích o vyšších teplotách, kde dochází k teplotnímu kolísání. Běžným příkladem je svarový spoj trubek z austenitické nerezové oceli a feritické oceli v energetickém průmyslu [2,3].

Tabulka 1 - Fyzikální vlastnosti austenitické oceli Wr. N. 1.4541 a uhlíkové oceli P 265 GH

| Fyzikální vlastnosti ocelí   | P 265 GH              | Wr. N. 1.4541         |
|--|-----------------------|-----------------------|
| Tepelná roztažnost $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ]                     | 11 x 10 <sup>-6</sup> | 16 x 10 <sup>-6</sup> |
| Tepelná vodivost $\lambda_t$ [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ] | 53,5                  | 15                    |

## Difúze uhlíku

Ve svarovém kovu je velká pravděpodobnost vzniku gradientu chemického složení zejména v oblastech rozhraní se základním materiálem. Při provozu za zvýšených teplot může docházet k difúzi mezi svarovým a základním kovem, čímž může opět dojít ke změně mikrostruktury svarového kovu a tepelně ovlivněné zóny. Tento problém je typický pro heterogenní svařování nízkolegované oceli s nerezovou austenitickou ocelí s nerezovým austenitickým přídavným materiálem [2].

Austenitické oceli mají výrazně větší rozpustnost uhlíku než oceli feritické. Proto běžně dochází k difúzi uhlíku z uhlíkových nebo nízkolegovaných ocelí do ocelí austenitických. Tento princip je nutný brát v potaz při výběru přídavného materiálu. Pro snížení difuze uhlíku lze použít jako přídavný materiál slitinu Ni-Cr-Fe. Difúzi uhlíku můžeme pozorovat na rozhraní uhlíkové oceli se svarovým kovem v tepelně ovlivněné oblasti. V uhlíkové oceli dojde k oduhličení a ve svarovém kovu se v příčném řezu objeví nauhličená oblast [2].

Během provozu, kde dochází k cyklickým změnám teploty může kvůli rozdílům koeficientu tepelné roztažnosti docházet k smykovým napětím, která by mohla být iniciátorem únavového lomu v oduhličených pásmech na rozhraní základního materiálu a svarového kovu [2].

## Schaefflerův diagram

Aby nedocházelo k degradaci vlastností v přechodech svarového kovu a základního materiálu, je nutné zajistit stabilitu těchto přechodů. Stabilita se určuje z provozních parametrů jako je teplota, doba a druh namáhání svarového spoje [1,2].

Z upraveného Schaefflerova diagramu lze určit v závislosti na chemickém složení struktura materiálu. Struktura zároveň závisí i na rychlosti ochlazování. Z diagramu lze tedy vyčíst i přibližný druh struktury v přechodu mezi svarovým kovem a základním materiálem [1].

Mezi feritickou a austenitickou strukturou může vznikat struktura martenzitická. Martenzit v závislosti na obsahu uhlíku může výrazně znesnadnit postup svařování. Tam, kde hrozí vznik martenzitické struktury je nutné základní materiál předehtřívát. Předehtříváním dochází k popouštění martenzitu a sníží se tím vnitřní pnutí svaru. Martenzit, který vzniká z austenitu za nízkých teplot je velmi křehký a může být zdrojem trhlin za studena [1,2].

## Výběr vhodného přídavného materiálu

Výběr vhodného přídavného materiálu při heterogenním svařování je základem kvalitního svarového spoje. Správnou volbou se může předejít nežádoucím metalurgickým jevům, které jsou pro heterogenní svařování typické. Takový přídavný materiál by měl být kompatibilní s oběma základními materiály a měl by být schopen minimalizovat stupeň promíšení. Nejdůležitější kritéria přídavného materiálu jsou mechanické vlastnosti na úrovni slabšího ze základních materiálů a svařitelnost s ohledem na promíšení, teplotu tání a jiné fyzikální vlastnosti svaru [2].

## 2.2 Vliv geometrie svarových ploch

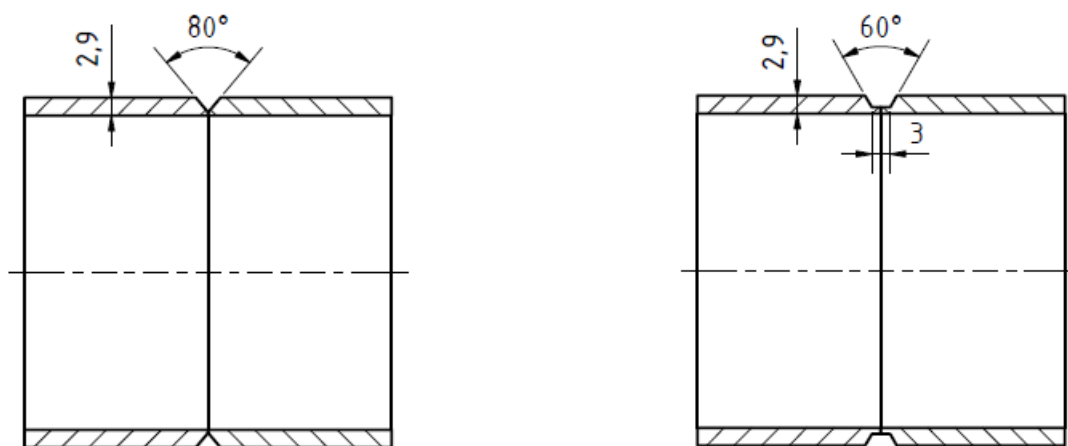
Tuhnutí svarového kovu je ovlivňováno stupněm promíšení svarové lázně poblíž základních materiálů. Promíšení je nutné brát v potaz hlavně z důvodu hrozby vzniku trhlin za tepla [2].

Pro určení vlastností výsledné struktury spoje při návrhu heterogenních svarů je nutné znát fázové diagramy základních materiálů. Aby mohl být spoj úspěšně proveden, je nutné, aby mezi základními materiály existovala vzájemná rozpustnost. Při malé nebo dokonce žádné rozpustnosti není možné svarový spoj uskutečnit. Nejen z tohoto důvodu je dobré používat přídavný materiál. Přídavným materiálem lze umožnit vzájemnou rozpustnost základních materiálů. V tomto případě by měly být známy intermetalické sloučeniny tvořící se mezi základními materiály a určit jejich citlivost na trhliny, jejich tažnost nebo náchylnost ke korozi. Tyto vlastnosti jsou ovlivňovány mikrostrukturou těchto intermetalických sloučenin [1,2].

### Tvar spoje

Tvar spoje výrazně ovlivňuje charakteristiku tavení materiálu a promíšení svarového kovu. Velké úkosy u tupého svaru snižují promíšení, zlepšují kontrolu nad svarovou lázní a poskytují prostor pro lepší manipulaci s obloukem pro správné natavení. Úkos by měl umožnit správné promíšení svarového kovu u prvních housenek na hranici ztavení se základním materiálem. Nesprávné promíšení by mohlo vést k nevyhovujícím mechanickým vlastnostem svarového spoje. Geometrie úkosů u heterogenních svarů se využívá totožná, jako u svarů homogenních [2,3].

Po procesu svařování bývá většinou spoj ponechán v neupraveném stavu. Nicméně je možné odstranit převýšení kořene svaru. Tím dojde k eliminaci vrubů nebo štěrbin a zároveň se tím usnadní proveditelnost nedestruktivních zkoušek. Ze stejných důvodů je možné odstraňovat i hlavu svaru [2,3].

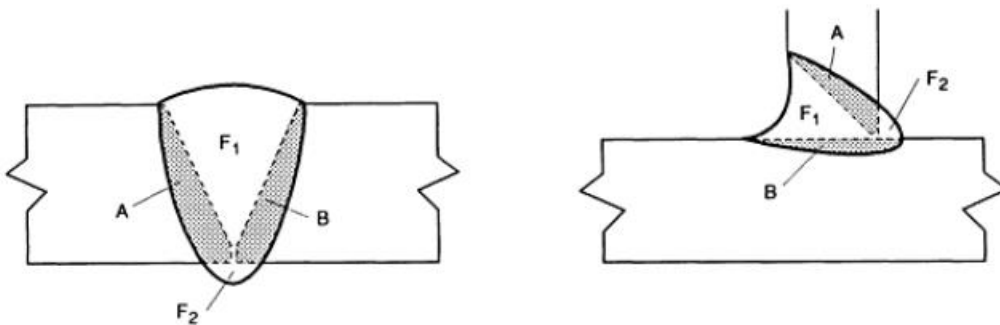


Obrázek 1 - Schéma úkosů využitých v experimentu diplomové práce, nalevo V úkos, napravo U úkos (tulipán); detail viz. Obrázek 18

## Promíšení

Při heterogenním svařování musí být přídavný materiál snadno rozpustný se základními materiály, aby mohlo dojít k vytvoření spojitě tvárné fáze svarového kovu. Toto promíšení by mělo probíhat bez vzniku mikrostruktury citlivé na praskliny. Vzniklá mikrostruktura by měla být stabilní za provozních podmínek svaru. Kvalitní heterogenní svar by měl mít stejné nebo lepší mechanické vlastnosti než slabší ze dvou základních materiálů [2,3].

Při vícevrstevném svařování by mělo být zaručeno rovnoměrné složení jednotlivých housenek. Rozdílu však nelze úplně zamezit především mezi kořenovou housenkou a housenkami podél jednotlivých základních kovů. Poměrné složení svarového kovu lze přibližně vypočítat dle vzorce 1,2,3. Promíšení svarového kovu může být založeno na měření plochy v příčném řezu [2,3].



Obrázek 2 - Oblasti promíšení svaru v příčném řezu [2]

Vzorce pro pomíšení:

$$\text{Promíšení kovem A,} \quad \% = \frac{A}{A+B+(F_1+F_2)} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Promíšení kovem B,} \quad \% = \frac{B}{A+B+(F_1+F_2)} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{Úplné promíšení,} \quad \% = \frac{A+B}{A+B+(F_1+F_2)} \times 100 \quad (3)$$

## Struktura svaru a tepelně ovlivněná zóna

Teplotní cyklus svařování vyjadřuje chování materiálu při působení intenzivního lokálního zdroje tepla. Takto vnesená energie mění skupenství malého objemu kovu na kapalné. Kvůli tepelné vodivosti kovu následně dochází i k ohřevu okolí v oblasti materiálu základního. Výše teploty může vyvolat několik změn v materiálu. Může docházet k fyzikálně chemickým reakcím, změnám ve struktuře v oblasti svarového spoje, ke změnám objemu z důvodu tepelné roztažnosti nebo změny fázové, které jsou způsobeny výše zmíněným tavením základního a přídavného materiálu [1].

Tyto změny jsou závislé nejen na materiálových charakteristikách a technologii svařování, ale hlavně na množství tepla, které je vneseno do materiálu během vlastního procesu svařování [1].

Množství tepla na jednotku délky je vyjádřitelné pomocí vztahu:

$$Q = \frac{U \cdot I}{10^3 \cdot v} \quad [\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (4),$$

kde  $U$  je svařovací napětí [V],  $I$  je svařovací proud v [A],  $v$  je svařovací rychlost [ $\text{mm/s}^{-1}$ ]

Efektivní výkon je pak nutné vynásobit koeficientem účinnosti pro dané svařování dle vzorce:

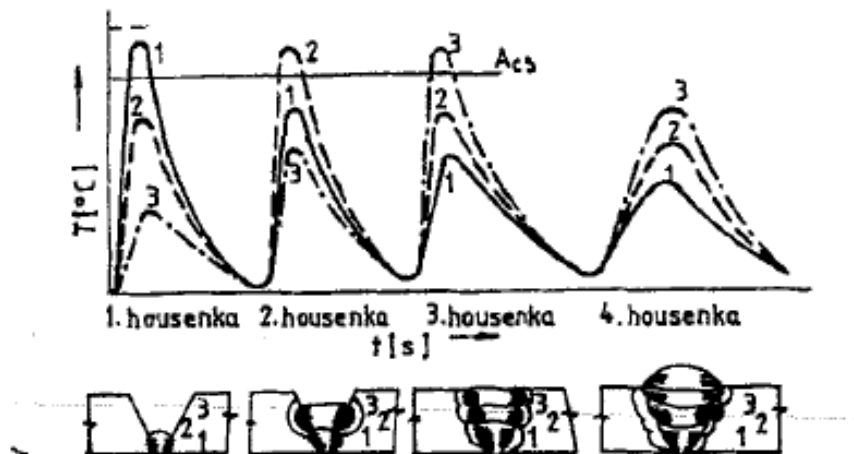
$$Q_e = \eta \cdot Q \quad [\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (5)$$

Pro svařování TIG je hodnota koeficientu  $\eta$  v rozmezí mezi 0,48 – 0,65 [1].

Vlastní teplotní cyklus je popisován hlavně kvůli změnám strukturním a fázovým v teplem ovlivněné oblasti (dále jen TOO). Charakteristiky teplotního cyklu jsou hodnoceny dle 4 základních parametrů:

- Rychlost ohřevu [ $\text{K/s}$ ]
- Maximální teplota cyklu [ $\text{K}$ ]
- Doba výdrže na dané teplotě [ $t$ ]
- Rychlost ochlazování [ $\text{K/s}$ ]

U obloukových technologií svařování se rychlost ohřevu pohybuje okolo  $400 \text{ }^\circ\text{C/s}$ . Kvůli vysokým rychlostem ohřevu se teploty  $A_1$  a  $A_3$  posouvají výše o 50 až  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ . Maximální teplota a výdrž na ní mají význam hlavně strukturální. Při svařování vícevrstevného svaru je tvar teplotního cyklu složitější z důvodu opakovaného vnášení tepla a ochlazování. Teplotní pole lze stanovit pomocí termočlánků, termovizí nebo lze provést simulaci pro daný svarový spoj [1,2].



Obrázek 3 - Teplotní cyklus vícevrstvého svařování [1]

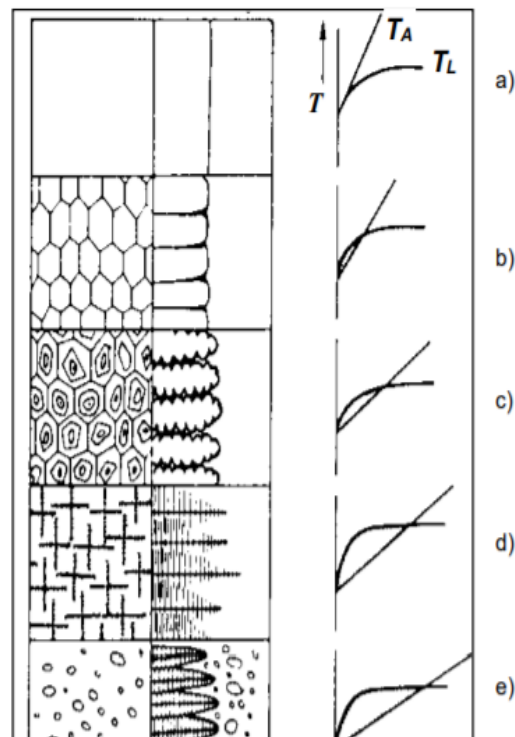
### Svarový kov

Proces vzniku svarového kovu je ztavením základního a přídavného materiálu, které se při ohřevu nad teplotu tavení promíchávají pomocí turbulentního proudění. Každý druh svařování má určitý poměr stupně promíšení. Objem svarové lázně a její tvar je přímo závislý na dodávaném teple. Šířka je ovlivňována výrazně svařovacím napětím a hloubka svařovacím proudem. Mezi délkou a hloubkou existuje poměrový koeficient. Tvar svarové lázně nebo vzniklé housenky je závislý na hlavně na rychlosti svařování [1,2].

Při ochlazování svarová lázně dochází ke krystalizaci svaru, během kterého probíhá ve svaru segregace v důsledku promíšení materiálů. Krystalizace probíhá většinou heterogenní nukleací na rozhraních se základním materiálem. Zrna ztuhlého kovu rostou ve směru gradientu teploty. Chemické složení, maximální teplota a intenzita ochlazování svarového kovu určuje jeho výslednou strukturu. Pro celulární strukturu je typický pomalejší ohřev bez upřednostňované krystalografické orientace. Dendritická struktura vzniká při vyšším stupni podchlazení svarového kovu a růst je orientován i mimo směr maximálního teplotního gradientu. Poměr celulární struktury je zvyšován úpravou parametrů nebo využitím pulzního proudu [1,3].

Na obrázku 4 jsou vyobrazeny výše zmíněné struktury v závislosti na stupni podchlazení [7].

- Rovinné rozhraní
- Hexagonální buněčné rozhraní
- Dendritické útvary
- Dendrity dlouhoosé, rovnoosé a sférické
- Kašovitité dendrity dvoufázového pásma



Obrázek 4 - Závislost stupně podchlazení na výsledné struktuře [7]

Vzniklý svarový kov má většinou nižší houževnatost oproti základním materiálům. Jeho vlastnosti jsou ovlivňovány druhem mikrostruktury, velikostí zrna nebo segregáčními procesy. Licí struktura nebo povrchové vady svarového kovu snižují jeho únavové vlastnosti [1].

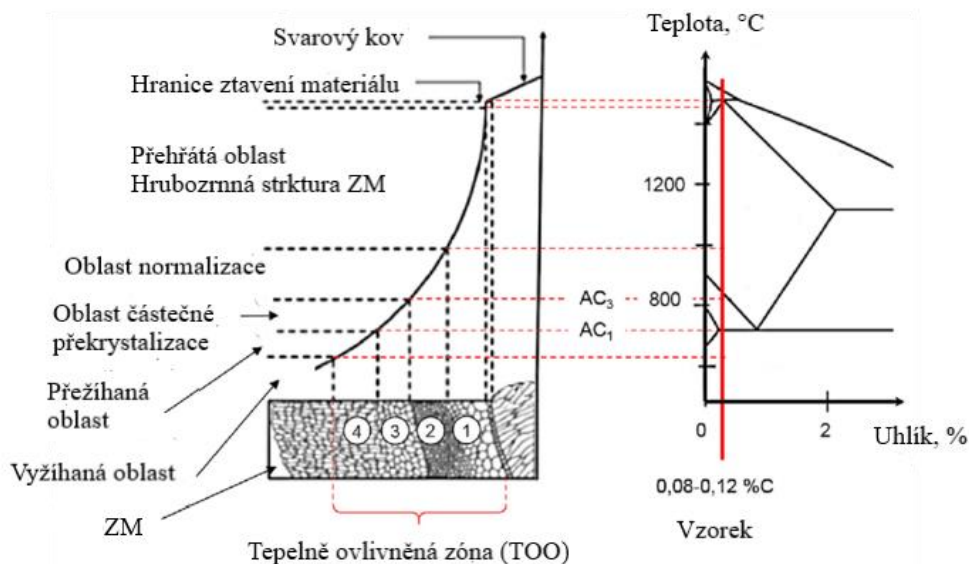
### Tepelně ovlivněná oblast

Teplem ovlivněná oblast (TOO) je oblast svarového spoje, ve které dojde ke změně v mikrostrukturu základního materiálu kvůli vnesenému teplu při procesu svařování. Změna mikrostruktury neprobíhá u slitin bez polymorfni přeměny. U takovýchto slitin probíhají změny pouze substrukturní. Zároveň dochází k rekrystalizaci a růstu zrna [1,8].

U materiálů s polymorfni přeměnou  $\alpha \Rightarrow \gamma \Rightarrow \alpha$  je možné TOO dělit na charakteristická pásma.

- Oblast přechodu z TOO do svarového kovu, která se vyznačuje částečným natavením. Kvůli malému rozdílu teplot mezi solidem a likvidem se tato oblast nazývá i hranice ztavení.
- Oblast s teplotami nad  $A_3$  označovaná jako oblast přehřátí, se vyznačuje výrazným růstem primárních zrn.
- V oblasti nad teplotu  $A_3$  dochází k úplné transformaci  $\alpha \Rightarrow \gamma \Rightarrow \alpha$
- Oblast mezi  $A_1$  a  $A_3$  s neúplnou polymorfni přeměnou
- Oblast nejnižších teplot, tedy pod teplotou  $A_1$  se vyznačuje pouze substrukturními změnami

Velikost TOO se liší dle jednotlivých technologií. Primární však zůstává hodnota vneseného tepla  $Q$ , a tedy svařovacích parametrů. Změny vlastností v TOO jsou znatelné ve snížení hodnot pevnosti. Tak se děje u legovaných nebo tepelně zpracovaných ocelí. Pevnost v TOO je zkoušena buď přímo na simulovaných vzorcích nebo nepřímo měřením tvrdosti. Obvykle je hodnota tvrdosti svarového spoje vyžadována mezi hodnotami  $HV = 340$  až  $450$ . Růst zrn, ke kterému dochází v pásmu přehřátí, je závislý na chemickém složení, přímém tepelném ovlivnění a době ochlazování. S tím souvisí i tepelná vodivost základního materiálu, která ovlivňuje teplotní gradient. Hrubá struktura napomáhá vzniku Widmannstättenovy struktury a tím se zvyšuje náchylnost k praskání [1,2,8].



Obrázek 5 - Popis vlivu tepla na jednotlivé části tepelně ovlivněné zóny [8]

## 2.3 Svařování dvou druhů ocelí

Při návrhu svaru austenitické oceli s uhlíkovou ocelí je důležitým krokem výběr přídavného materiálu. Správný výběr přídavného materiálu závisí na provozních podmínkách svaru a na účinku promíšení složení svarového kovu [2].

Při provozních teplotách do  $400$  °C se běžně využívá austenitický korozivzdorný přídavný drát. Vhodný je také drát na bázi Ni-Cr-Fe, ale jeho využití by mělo být dobře zdůvodněno, protože jeho cena je výrazně vyšší než cena přídavného drátu z austenitické oceli. Výběr austenitického přídavného materiálu pro heterogenní svary závisí na odhadu chování chemického složení svarového kovu a výsledné mikrostruktury při promíšení se základním materiálem. U vícevrstvých svarů může dojít u každé vrstvy k rozdílnému promíšení se základním materiálem a tím se mohou odlišovat i vlastnosti výsledného svarového kovu. Pro zaručení kvality svaru je možné využít i více druhů přídavných materiálů, pro každou vrstvu jiný. Tím by se zaručila jednotnost vlastností svarového spoje. Zároveň by se tím však výrazně zvýšila pracnost výroby takového svarového spoje [2].

Austenitické, feritické nebo martenzitické nerezové oceli lze běžně tavě svařovat s uhlíkovými nebo nízkolegovanými oceli za použití přídavného materiálu. Při svařování musí být zaručena vzájemná rozpustnost a tolerance v promíšení kovů bez vad. Běžně se pro toto uplatnění

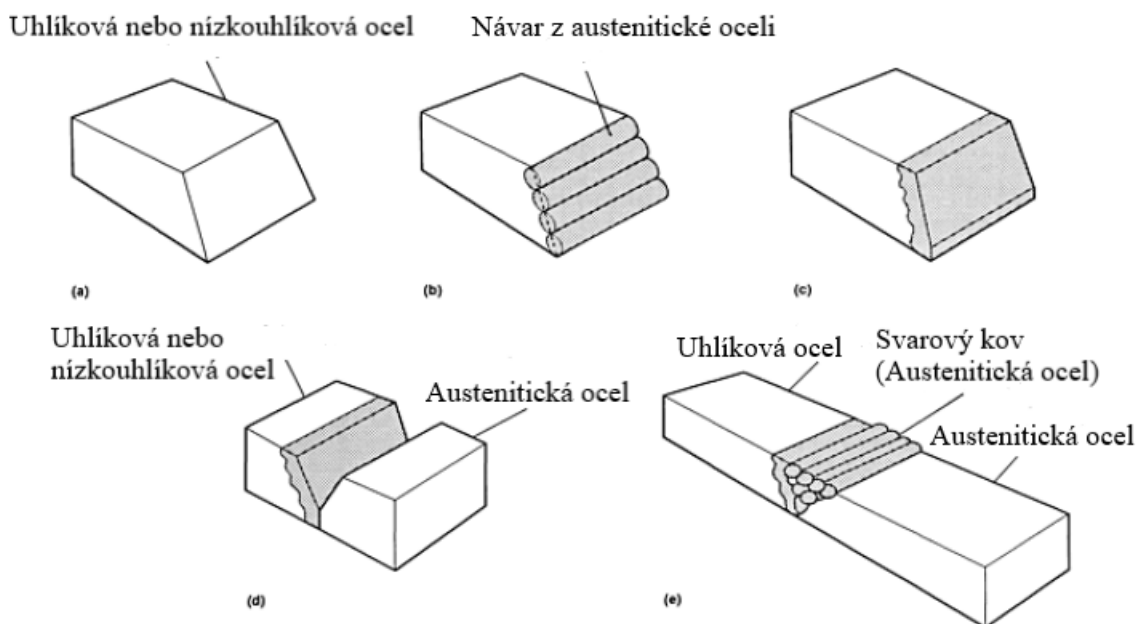


používají jako přídavný materiál austenitické nerezové oceli nebo slitiny niklu. Pro vyšší teploty a cyklické změny je lepší využívat přídavný materiál ze slitin niklu. Výhodou těchto slitin jsou dobré mechanické vlastnosti, značné snížení efektu oduhličení uhlíkové oceli do svarového kovu a zároveň mají podobný koeficient tepelné roztažnosti jako uhlíkové oceli. Díky těmto vlastnostem předchází využití niklových slitin častým potížím s prasklinami za tepla [2].

### 2.3.1 Polštářování

Pokud je teplota pracovního prostředí svaru nižší než 350 °C, je možné svařovat takzvaným polštářováním. Název polštářování je přeloženo z anglického slova pillow. V podstatě se jedná o návar materiálu. To je prováděno tak, že se na stranu základního materiálu z uhlíkové oceli navaří tenká vrstva například nízkolegovaného a nízkouhlíkového přídavného materiálu. Tím se zabrání nauhličování svarového kovu od uhlíkové oceli. Tento návar musí být dostatečně silný, aby dosahoval dostatečných mechanických vlastností. Dle Schaefflerova diagramu se vyskytují v přechodu mezi svarovým kovem a návarem struktury jak feritické, tak i austenitické. Tento spoj je ale dostatečně houževnatý a za teplot do 350 °C a strukturně stálý. Na přechodu se při rychlém ochlazení vytváří nízkouhlíkový martenzit, který má tolerovatelnou houževnatost [2].

Metoda polštářování je s výhodou využívána tam, kde by při svařování docházelo k nevhodnému promíšení mezi přídavným materiálem z nerezové austenitické oceli a základním materiálem z uhlíkové oceli. Samotné polštářování znamená navaření jedné až dvou vrstev z nerezové oceli dle obrázku 6. Následný svar již může probíhat dle běžného svařování, jelikož jsou obě strany z nerezové oceli. Zároveň je možné po provedení polštářového návaru tepelně zpracovat základní materiál z uhlíkové oceli. Austenitická ocel je při tepelném zpracování náchylnější na mezikrystalickou korozi a tímto způsobem je možné se jejímu tepelnému zpracování vyhnout [2].



Obrázek 6 - Postup technologie polštářování [2]

## 2.4 Degradace heterogenních svarových spojů

### Heterogenní svarové spoje z pohledu složení a struktury

Vzhledem k rozdílným součinitelům tepelné roztažnosti mezi základními materiály a svarovým kovem na austenitické bázi dochází při tepelném namáhání k poruše svarového spoje. Tato porucha vzniká v přechodu mezi oduhličenou a nauhličenou oblastí. Příkladem dlouhodobě namáhaného spoje je na obrázku 7 [1].

Toto je důvod, proč je nutné volit přídatný materiál při heterogenním svařování ocelí tak, aby byly co nejvíce potlačeny difuzní jevy, které vytvářejí oduhličená a nauhličená pásma. Snížením gradientu koncentrace uhlíku mezi svarovým kovem a základními materiály zajistí strukturní stálost spoje [1].

### Tepelné zpracování

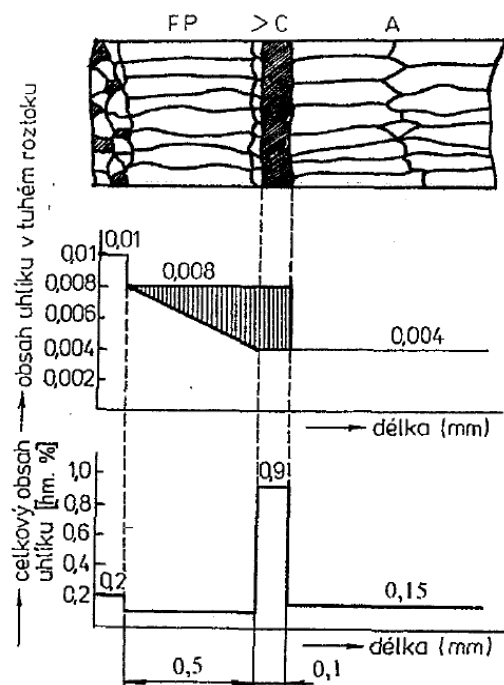
Výběr vhodného předehřevu nebo tepelného zpracování může u heterogenních svarů představovat velký problém. Vhodné tepelné zpracování pro jeden základní materiál pro provozní podmínky může mít negativní dopad na materiál druhý [2].

Příkladem je třeba vytvrditelná slitina na bázi nikl-chróm svařená austenitickou nerezovou ocelí. Při procesu stárnutí by docházelo u austenitické oceli ke snížení její odolnosti vůči mezikrystalické korozi. Řešením by bylo použít stabilizovanou austenitickou korozivzdornou ocel. Další možností by bylo provedení polštářování nikl-chromové oceli podobnou slitinou, na kterou stárnutí nemá vliv. Následně po provedení stárnutí by došlo k svaření s austenitickou ocelí [2].

### Koroze

Svarový kov a základní materiály mají každý vlastní specifické korozní chování. Je nutné dávat při návrhu heterogenních svarů pozor na možnost vzniku galvanických článků. Galvanický článek může způsobit korozi anodického kovu nebo fáze. Z pohledu mikrostruktury máme ve svaru několik druhů fází, a právě mezi nimi může k této korozi docházet. Tento problém se řeší tím, že se upravuje chemické složení svarového spoje tak, aby poskytoval katodickou ochranu. Nesmí tím však dojít ke snížení mechanických vlastností [2].

Kompoziční variace na rozhraní mezi základním materiálem a svarovým kovem mohou při provozu za vyšších teplot a přítomnosti napětí vést k selektivní oxidaci. Ta může následně způsobovat zářezy. Takovéto zářezy mohou fungovat jako koncentrátoři napětí a tím snižovat pevnostní vlastnosti svaru obzvláště pak při cyklických teplotních změnách [2].

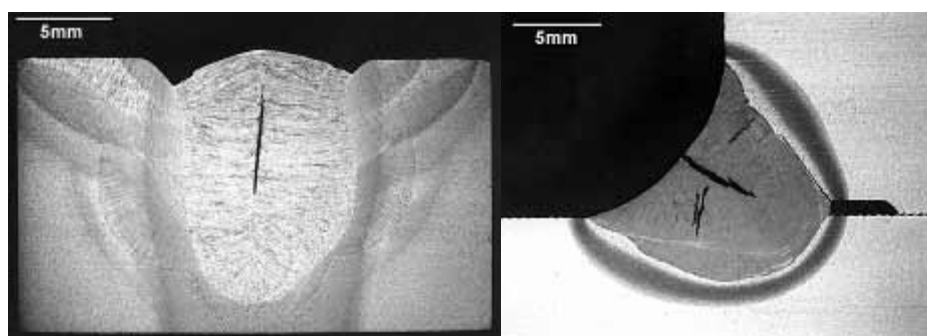


Obrázek 7 - Dlouhodobě namáhaný svarový spoj [1]

## Trhliny za tepla

Při ochlazování svarového kovu nebo TOO může dojít ke vzniku trhlin za horka. Z jejich názvu je patrné, že tyto trhliny vznikají za vyšších teplot, například u ocelí nad teploty 850 °C. Základní dělení těchto trhlin za horka je:

- Krystalizační, které vznikají během tuhnutí svarového kovu.
- Likvační, které vznikají v přehřáté oblasti pod svarovými housenkami při vícevrstevném svařování nebo v TOO v oblasti přehřátého základního materiálu.
- Polygonizační, které jsou typické pro austenitické oceli a slitiny niklu. Vznik je zapříčiněn poklesem tažnosti v oblastech likvačních.



Obrázek 8 - Příklad krystalizačních trhlin; nalevo vnitřní centrální trhlina, napravo vnější centrální trhlina [10]

Trhliny za tepla jsou závislé hlavně na zbytkovém napětí a citlivosti vzniklé struktury. Krystalizační trhliny vznikají snížením tažnosti v oblasti teploty solidu, zatímco polygonizační jsou projevem poruch na hranicích zrn v oblasti rekrystalizačních teplot. Prvky jako S, P, B, Nb, Ti, Si tvoří se Fe nízkotavitelná eutektika. A právě tyto eutektika mohou být příčinami krystalizačních a likvačních trhlin. Proto je obecně doporučovaná hodnota součtu hmotnostního podílu S a P menší než 0,02 hm. % [1,9].

Náchylnost svarového spoje k trhlinám za horka lze odhadnout pomocí parametrické rovnice:

$$H.C.S = \frac{c \cdot (S+P + \frac{Si}{25} + \frac{Ni}{100}) \cdot 10^3}{3 \cdot Mn + Cr + Mo + V} \quad [\%] \quad (6)$$

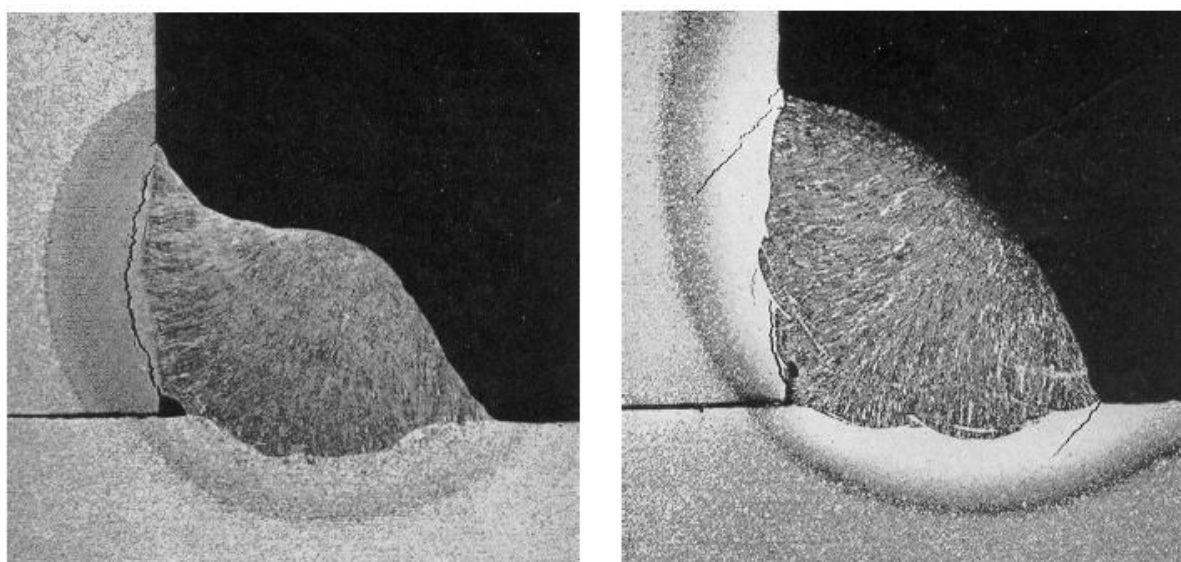
Hodnoty se porovnávají dle druhu oceli. Pro nelegované oceli platí  $H.C.S > 4$  a u nízkolegovaných ocelí  $H.C.S > 1,6$ . Existují i experimentální zkoušky. Příkladem těchto zkoušek je například zkouška s vlastní tuhostí, s vynucenou tuhostí nebo zkouška se simulovaným svařovacím cyklem [1].

Pro zamezení vzniku těchto trhlin existuje několik způsobů, které se liší dle jednotlivých aplikací. Je možné snížit měrný příkon svařování, používat přídatné dráty o vysoké čistotě, omezit deformace použitím správné technologie při návrhu tvaru svarového spoje. Vhodná teplota předehřevu nebo svařování s užším obloukem, zejména v kořenové části svaru může vést ke kladnému ovlivnění ochrany proti těmto trhlinám [2,9].

## Trhliny za studena

Při teplotách do 200 °C se mohou ve svaru vyskytovat studené trhliny, zbržděné lomy nebo trhliny způsobené přítomností vodíku. Nejčastější výskyt těchto trhlín je v oblasti pod svarovou housenkou, nicméně je možný výskyt i v kořenové oblasti svaru. Jejich výskyt není orientačně podmíněný. Od trhlín za horka se liší lesklým a neoxidovaným povrchem. Příčin vzniku těchto trhlín je hned několik. Přítomnost vodíku, popřípadě struktury na vodík citlivé nebo přítomnost tahových zbytkových napětí [2,11].

Výskyt vodíku je většinou způsoben vlhkostí, kterou svarový kov přijme z atmosféry nebo třeba obalu elektrody. Vlastní rozpustnost vodíku v kovu pak ovlivňuje teplota, koncentrace vměstků, dislokací, makro i mikropórů a rychlost ochlazování. Náchylnost ocelí na vznik trhlín za studena lze vyjádřit stejným vztahem, který je využíván pro uhlíkový koeficient [1].



Obrázek 9 - Příklad trhlín za studena; nalevo trhlina v oblasti kořene svaru, na hranici ztavení, napravo trhliny vedoucí od paty svaru [12]

Hodnocení vzniku trhlín za studena je možné provádět i experimentálně. Zkoušky jsou prováděny na stejném principu jako zkoušky pro hodnocení za tepla [1].

Trhlinám vznikajícím za studena lze zabránit několika způsoby. Příkladem je využití nízkovodíkových technologií svařování, sušení přídavných materiálů před použitím, nebo použití úpravy technologického postupu předehřevem nebo dohřevem. Zlepšení může být dosaženo i minimalizací zbytkových pnutí volbou vhodného postupu nebo tepelného zpracování. Dalším důležitým faktorem je minimalizace počtu ostrých vad, které fungují jako koncentrátoři napětí a mohou fungovat jako iniciátory trhlín [2].

## Lamelární trhliny

Tento druh trhlín může vznikat v základním materiálu i v TOO. Tvar těchto trhlín může být kaskádovitý nebo stupňovitý, nicméně je většinou orientován rovnoběžně s povrchem materiálu, kde působí namáhání ve směru tloušťky. Mohou být způsobeny přítomností rozválcovaných vměstků, nejčastěji vměstků na bázi síry. Další možnosti jsou nevhodné plastické vlastnosti materiálu ve směru tloušťky. Iniciátory může být nevhodný postup

svařování, špatná konstrukce uzlu nebo obsah difuzního vodíku. Ač vznik těchto trhlin může souviset s procesy, které probíhají při vyšších teplotách, řadíme je mezi studené trhliny [1].

Hodnocení náchylnosti konstrukce je prováděno parametrickými rovnicemi založenými na vlivu chemického složení materiálu a zejména jeho čistoty. Tyto rovnice však neberou v potaz mnoho faktorů, a proto je využíváno k hodnocení náchylnosti k lamelárnímu praskání experimentálních zkoušek [1].

Jednou z metod zamezení vzniku trhlin je kontrola zaručené hodnoty kontrakce. Udává se hodnota  $Z_z \geq 15\%$ . Čistota oceli by měla snížit počet sirných vměstků a snížení obsahu vodíku. Další možností je upravení konstrukce svarového spoje a technologii svařování tak, aby se snížilo působení tahového napětí, které je jednou z příčin vzniku těchto trhlin [1,2].

### **Žíhací trhliny**

Dle názvu vznikají žíhací trhliny při tepelném zpracování v teplotních oblastech mezi 200-300 °C při ohřívání nebo pak v oblasti žíhacích teplot 600-650 °C. Vznikat mohou i při vícevrstevném svařování pod návary nízkolegovaných ocelí při plátování austenitickou navařovací páskou [1,2].

Nízkoteplotní trhliny tedy může způsobovat rychlý ohřev na žíhací teploty, kdy je velký rozdíl mezi teplotou povrchu a teplotou jádra svaru. Takto může dojít k součtu termálních napětí se strukturními napětími. Vysokoteplotní typ se vyskytuje v podhousenkové oblasti a je iniciován růstem zrn. Při růstu zrna dochází k segregaci prvků na povrch zrn a může vést k precipitačnímu vytvrzování, a tedy ke zkřehnutí. Tento typ trhlin se vyskytuje u ocelí na bázi CrMo, CrMoV nebo u mikrolegovaných ocelí. Podnávarové trhliny vznikají při návaru austenitické výstelky na konstrukční ocel [1,2].

Hodnocení náchylnosti k těmto trhlínám je parametricky posuzováno pomocí chemického složení, kde je sledován obsah určitých výše zmíněných prvků jako je Cr, Mo, V nebo Cu. Experimentální metody jsou pak založeny na provedení svaru a následné zkoumání metalografických vzorků nebo podrobení tahovým zkouškám. Lze provádět i žíhací cykly, čímž se simulují výrobní podmínky [1].

Pro zamezení vzniku žíhacích trhlin je většinou upravována technologie žíhacích režimů. Snížením rychlosti ohřevu na hodnotu přibližně mezi 15 až 30 °C/h pro velké tloušťky je možné zamezit nízkoteplotním žíhacím trhlínám. Lze také upravit technologii na vícevrstevný ohřev nebo ochlazování, pokud je svařovaná ocel náchylnější k žíhacím trhlínám. Proti podnávarovým trhlínám je možné použít dvojvrstevný návar. Druhá vrstva by měla za optimalizovaných parametrů vyžít vrstvu první [1,2].

### 3 TIG svařování

TIG svařování nebo také GTAW (Gas-Tungsten Arc Welding) bylo vynalezeno ke konci roku 1930 pro svařování hořčíkových slitin. První svařování tohoto druhu bylo provedeno použitím inertního plynu helia a wolframové elektrody. Poté, co se metoda osvědčila se začala díky svým přednostem používat v leteckém průmyslu pro svařování hliníkových součástí. Od té doby se tato metoda vyvinula, ale princip tavení pomocí elektrického oblouku z wolframové elektrody za působení ochranného inertního plynu zůstal stejný [2].

Teplota tavení je tedy dosažena elektrickým obloukem mezi netavicí se wolframovou elektrodou a svařencem. Teplota tavné lázně dosahuje teploty až 2500 °C. Dnes se jako inertní plyn, který chrání svarovou lázeň před kontaminací z atmosférického prostředí běžně používá spíše argon, helium, popřípadě jejich směs [2].

#### Výhody TIG svařování

Mezi výhody TIG svařování patří výroba velmi kvalitních svarů o vysoké čistotě při malých tepelných následcích. Zároveň je při této metodě výrazně menší rozstřík oproti ostatním konvenčním obloukovým metodám. Tato metoda dovoluje svařování jak s přídavným materiálem, tak i svařování bez něj. TIG metoda nabízí možnost svařovat téměř všechny druhy kovů včetně svařování heterogenních svarů. S výhodou se využívá pro přesné ovlivňování vneseného svarového tepla a tím i kontrolu nad svarovou lázní a TOO. Svářeč má během svařování krásný přehled nad lázní, jelikož během svařování nevznikají výpary a kouř [2].

#### Nevýhody TIG svařování

Jednou z nevýhod je rychlost svařování, která je nižší než u svařování tavnou elektrodou. Svářeč pro svařování metodou TIG potřebuje větší šikovnost. Koordinace pohybů při TIG svařování je výrazně náročnější než u svařování tavnou elektrodou, pokud jde o manuální svařování. Pro materiály s větší tloušťkou je ekonomičtější využít metodu tavné elektrody. Ekonomičnost je v tomto případě na zvažení vůči kvalitě svaru. K problému při svařování může dojít, pokud je nutné svařovat v prostředí s možným průvanem, který může narušit inertní ochranu plynu a tím snížit kvalitu vzniklého spoje [2].

Dalšími problémy při TIG svařování je například přijetí wolframu svarovým kovem, pokud dojde k dotyku elektrody se svarovou lázní. Může dojít ke kontaminaci svarového kovu při nevhodném udržování plynné ochrany přídavného materiálu. Dbát se musí i na chemickou čistotu přídavného materiálu a základního materiálu. Tolerance pro kontaminaci je velmi nízká. Pokud je hořák chlazen vodou, může docházet ke kontaminaci nebo porozitě v důsledku úniku chladicí kapaliny [2].

#### 3.1 Elektrody

Pro TIG jsou využívány wolframové elektrody nebo elektrody z wolframových slitin. Nejběžnější elektrodou je wolframová elektroda s 2 % příměsí oxidu thoria. Tato slitina má skvělé pracovní vlastnosti s dobrou stabilitou. Thorium je radioaktivní, a to se musí brát v potaz během broušení elektrod, kdy se musí zabránit vdechnutí odbroušeného prachu. Tento prach je v některých státech brán jako nebezpečný odpad pro životní prostředí. Dalšími slitinami jsou třeba yttrium nebo lanthan. Tyto slitiny jsou většinou využívány pro nízkonapěťové svařování. Využívá se i slitina wolframu s cérem. Tato slitina se vyznačuje lepším zápalem oblouku

a rychlostí tavení. Čisté wolframové elektrody v obloukovém svařování jsou nejvyžívanější a zároveň mají nejvyšší spotřebu. Využívané jsou také slitiny s příměsí zirkonu [2,4,5].

Tabulka 2 - Označování elektrod dle chemického složení [5]

| Označená elektrody | Barva    | Legování                       |
|--------------------|----------|--------------------------------|
| WP                 | Zelená   | Čistý wolfram 99,8 %           |
| WT 10              | Žlutá    | Thorium 1 % ThO <sub>2</sub>   |
| WT 20              | Červená  | Thorium 2 % ThO <sub>2</sub>   |
| WT 30              | Fialová  | Thorium 3 % ThO <sub>2</sub>   |
| WT 40              | Oranžová | Thorium 4 % ThO <sub>2</sub>   |
| WC 20              | Šedá     | Cerium 2,0 % CeO <sub>2</sub>  |
| WL 10              | Černá    | Lanthan 1 % LaO <sub>2</sub>   |
| WL 15              | Zlatá    | Lanthan 1,5 % LaO <sub>2</sub> |
| WL 20              | Modrá    | Lanthan 2 % LaO <sub>2</sub>   |
| WZ 08              | Bílá     | Zirkon 0,8 % ZrO <sub>2</sub>  |

### Využití jednotlivých druhů elektrod

Čistý wolfram (WP): Tato elektroda se využívá při svařování slitin hliníku. Při svařování střídavým proudem drží dobrou stabilitu oblouku. Nevhodná je pro svařování stejnosměrným proudem a neprovádí se u ní broušení do špičky [5].

Elektroda legovaná thoriem (WT): Takto legovaná elektroda se vyznačuje sníženou výstupní prací zvýšením emise elektronů. Čím vyšší je zastoupení thoria, tím se zlepšují zapalovací vlastnosti, trvanlivost a proudová zatížitelnost elektrody. Těmito elektrodami se za stejnosměrného proudu svařují vysoce legované oceli a korozivzdorné oceli. Je nutné brát v potaz radioaktivitu thoria a jejich zdravotní závadnosti zejména při vdechnutí prachu z broušení [5].

Elektroda legovaná cerem (WC): Jedná se o univerzální elektrody s využitím jak pro stejnosměrný, tak i střídavý proud. Lze je využít pro svařování nelegovaných i legovaných ocelí, slitin hliníku, mědi, niklu, titanu nebo hořčíku. Vlastnostmi se velmi blíží elektrodám WT. Jejich výhodou je jejich podstatně vyšší bezpečnost pro svářeče a menší zatížení životního prostředí [5].

Elektroda legovaná lanthanem (WL): Tyto elektrody jsou podobně univerzální jako WC elektrody. WC elektrody předstihují při svařování za nižšího napětí. Vyšší podíl lanthanu se používá pro automatizované svařování jako například orbitální nebo robotické kvůli zlepšení zapalování oblouku [5].

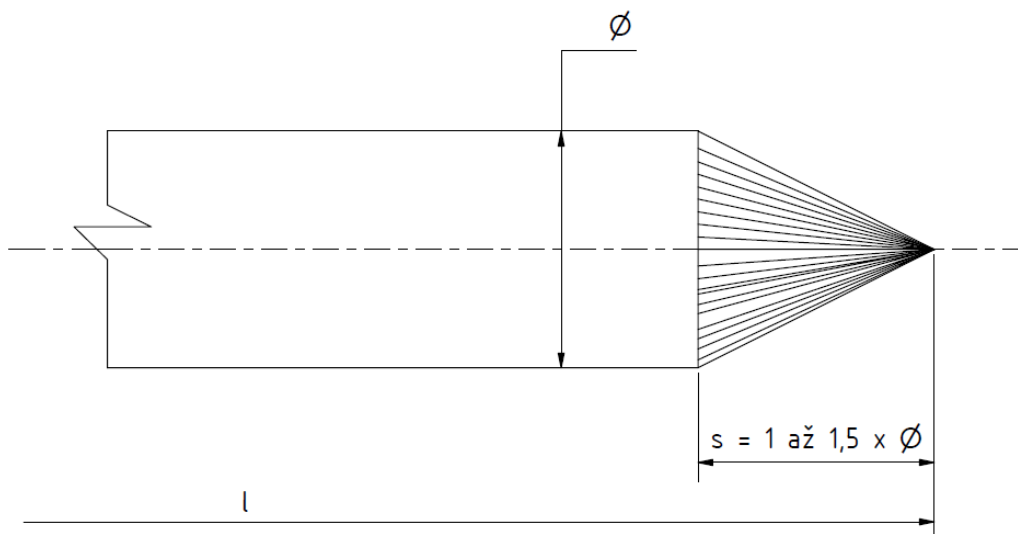
Elektroda legovaná zirkonem (WZ): Využití těchto elektrod je pro střídavý proud tedy pro slitiny hliníku jako náhrada WP elektrod. Pro stejnosměrný proud se nevyžívají [5].

Elektrody se standartně vyrábějí o velikostech:

Tabulka 3 - Vyráběné rozměry netavicích se elektrod [5]

|             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Průměr [mm] | 1,0 | 1,6 | 2,0 | 2,4 | 3,2 | 4,0 | 4,8 | 6,0 | 6,4 |
| Délka [mm]  | 50  |     | 75  |     | 150 |     | 175 |     |     |

Výrobci elektrod je doporučováno, aby vzdálenost elektrody od základního materiálu byla přibližně stejně velká jako průměr elektrody. Délka špičky pak má být 1-1,5 násobek průměru elektrody. Špička má být po broušení otupena. Toto otupení snižuje namáhání špičky a tím zvyšuje životnost. Před samotným broušením by měla být provedena kontrola elektrody proti nalomení nebo naříznutí. Elektrody mají tendenci k tvorbě trhlin podél zrn. Vysoká teplota při samotném procesu svařování může způsobovat vytvoření trhlin na špičce [5].



Obrázek 10 - Velikost a broušení elektrody

Broušení elektrod musí probíhat nadmíru opatrně, aby nedošlo k mechanické deformaci. Z toho důvodu ruční broušení nepřipadá v úvahu. Broušení musí být prováděno pouze lehkým tlakem na strojních bruskách s jemnozrnnými brusnými kotouči. Obvykle se používají diamantové kotouče nebo kotouče korundové. Ideální je využití specializovaných brusek pro wolframové elektrody, které zajistí nejlepší brusné podmínky a zároveň i přesnost broušených úhlů a povrchu [5].

Broušení by mělo být prováděno podélně tak, aby vrypy byly rovnoběžné s podélnou osou. Příčné broušení elektrod může způsobit nestabilitu oblouku nebo vylamování částec elektrody, což může ovlivnit složení svarové lázně. Dalším atributem elektrody při broušení je správné vystředění špičky vůči ose elektrody. Případná excentricita by mohla způsobovat nestabilitu oblouku. Tato excentricita se může výrazně projevit u strojního svařování, kdy je elektroda pevně uchycena a svařovací energie následně nepůsobí na požadované místo. Další parametr je úhel nabroušení elektrody. Čím je úhel elektrody užší, tím je přesnější fokusace oblouku. Ostrý úhel tedy přenáší energii na malou plochu a tupý úhel elektrody přenáší energii na plochu větší [5].



V rámci údržby je nutné elektrody přebroušovat v pravidelných intervalech. Tím se zabrání jistému snižování kvality svaru z důvodu opotřebení elektrod. Přebroušení je též nutné, pokud dojde k dotyku elektrody se svarovou lázní [5].

Tabulka 4 - Vliv otupení elektrody [13]

|                             |                                     |
|-----------------------------|-------------------------------------|
| Ostřejší elektroda          | Otupená elektroda                   |
| Jednodušší zápal oblouku    | Náročnější zápal oblouku            |
| Snese nižší proudovou zátěž | Snese vyšší proudovou zátěž         |
| Širší tvar oblouku          | Přímější tvar oblouku               |
| Dobrá stabilita oblouku     | Větší šance na proměnlivost oblouku |
| Nižší stupeň provaření      | Vyšší stupeň provaření              |
| Nižší životnost elektrody   | Vyšší životnost elektrody           |

Jelikož každý svářeč, který brousí elektrody má jiný cit a využívá jinou sílu při broušení, vznikají tím i nerovnoměrně broušené elektrody. Proto jsou vyráběny předbroušené elektrody, které zaručují jednotnou kvalitu materiálu, stylu broušení i následného otupení špičky elektrody. Zároveň dokáží elektrody upravit a dodat přesně podle potřeby zákazníka například dle tabulek 4 a 5 [13].

Tabulka 5 - Proudová zatížitelnost wolframových elektrod [5]

| Proudová zatížitelnost wolframových elektrod |                     |          |       |          |                |          |
|--|---------------------|----------|-------|----------|----------------|----------|
| Průměr elektrody v [mm]                      | Stejnoseměrný proud |          |       |          | Střídavý proud |          |
|  | - pól               |          | + pól |          | WP             | Legované |
|  | WP                  | Legované | WP    | Legované |                |          |
| 1,0  | do 65               | do 75    | -     | -        | do 25          | do 30    |
| 1,6  | 45-90               | 60-160   | do 20 | do 20    | 30-90          | 30-120   |
| 2,4  | 80-160              | 50-250   | 10-25 | 10-25    | 80-140         | 100-210  |
| 3,2  | 150-290             | 220-330  | 15-30 | 15-30    | 130-190        | 150-260  |
| 4,0  | 180-260             | 310-490  | 25-45 | 25-45    | 180-270        | 240-350  |
| 4,8  | 240-450             | 460-640  | 40-60 | 40-60    | 250-350        | 310-450  |
| 6,4  | 350-800             | 480-850  | 50-90 | 50-90    | 320-460        | 380-530  |

## 3.2 Ochranné a formovací plyny

### Ochranné plyny

Jako původní ochranný plyn při TIG svařování bylo využíváno helium. Dnes je nejběžnější volbou svařování pod ochranou argonu. Využívány jsou i směsi těchto dvou plynů. V některých případech je možné využít i směsi argonu s vodíkem nebo dusíkem [2].

## Argon

Běžně užívaný ochranný plyn při TIG svařování. Poskytuje výbornou ochranu oblouku, jeho stabilitu i při nízkých napětích a přímé usměrnění energie oblouku. Ochrana je způsobena hustotou, která je 1,4x vyšší než vzduch. Díky jeho inertnosti je kompatibilní s mnoha druhy základních materiálů. Zároveň je argon nejlevnější ze všech inertních plynů. Běžný průtok argonu při svařování je přibližně 7-14 l/min [2,4,5].

Pro běžné využití se používá argon 4.5 o čistotě 99,995 %. Kovy nebo slitiny, u kterých je požadována vyšší ochrana jsou chráněny argonem 4.8 o čistotě 99,998 %. Příkladem mohou být slitiny titanu, tantalu nebo zirkonu. Aby se zvýšila výstupní energie oblouku, je možné přidat do argonu vodík. Vytvářeny jsou směsi od 2 % do 5 % vodíku. Tato směs může navýšit vstupní energii až o 20 %, čímž je možné docílit vyšších průvarů a vyšších svařovacích rychlostí. Směs argonu a vodíku funguje jako redukční činidlo, které brání vlivu okolní oxidační atmosféry. Nízkouhlíkové oceli však mohou absorbovat vodík, což může mít za následek porozitu svaru nebo vyústění ke vzniku studených trhlin. Běžně jsou také využívány směsi argonu a helia o obsahu helia 20 %, 50 % nebo 70 %. Další směsí je argon s dusíkem, která je využívána primárně při svařování duplexních ocelí [2,4,5].

## Helium

Helium je dnes využíváno hlavně ve směsích s argonem. Čisté helium je pak s výhodou využíváno při svařování titanových nebo hliníkových slitin. Má téměř stejné vlastnosti přenosu tepla jako argon. Napětí oblouku je však výrazně vyšší při svařování s héliovou ochranou atmosférou. To zvyšuje energii oblouku, což způsobuje vyšší penetraci a větší plochu působení. Tím, že je helium výrazně lehčí než argon, jeho spotřeba pro zajištění ochrany oblouku je 2x až 3x větší. Běžný průtok helia při svařování je přibližně 14 l/min [2,4].

## Formovací plyny

Ochrana svarového kovu předchází vzniku vad jako jsou trhliny nebo porozita. Plyn, který vychází z hořáku chrání však pouze vrchní stranu svaru. Proto je využíván tzv. formovací plyn, který zabraňuje vnikání kyslíku do kovu a zároveň předchází výše zmíněným vadám. Aby se definoval objem prostoru vyplňovaný formovacím plynem, používají se například balóny nebo vrstva vodorozpustné papírové ochrany. Pro udržení formovacího plynu se také využívají měděné nebo keramické nádoby. Pro materiály, které jsou reaktivní nebo svary, které vyžadují přesnou technologii je pak možné ochranu přizpůsobit. Tato ochrana bývá vytvářena jednoduchým zařízením, které zajišťuje konstantní ochranu. Další možností je pak speciální svařovací komora s čistěčem atmosféry a kontrolními čidly. V praxi se osvědčily velké plastové pytle [2,4].

Při orbitálním svařování je bezpodmínečně nutné využívat ochrany v podobě formovacího plynu, aby bylo dosaženo požadované kvality v oblasti kořene svaru. Jestliže se má předejít nebezpečí oxidace, je třeba, aby byl vzduch v trubce nahrazen formovacím plynem. V závislosti na svařovaném materiálu je možné použít i redukční směs formovacího plynu s dusíkem nebo vodíkem [4].

Následující tabulka popisuje vhodnost jednotlivých plynů a jejich směsí pro materiály a jejich slitiny. Vhodnost je vyjádřena hvězdičkami, čím více se hodí, tím více hvězd.

Tabulka 6 - Druhy a využití ochranných a formovacích plynů [4]

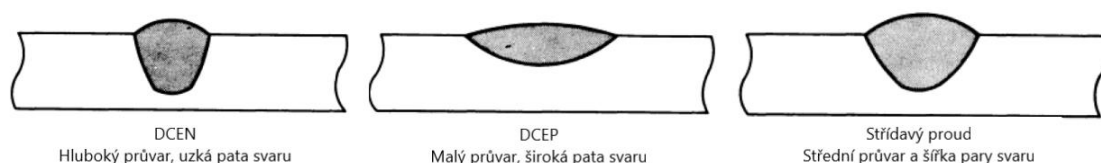
|                 | Ochranné plyny |                     |         |                     |     | Formovací plyny |                |                                     |
|-----------------|----------------|---------------------|---------|---------------------|-----|-----------------|----------------|-------------------------------------|
|                 | Ar             | Ar + H <sub>2</sub> | Ar + He | Ar + N <sub>2</sub> | He  | Ar              | N <sub>2</sub> | Ar + H <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> |
| Uhlíkové o.     | ***            | **                  | **      | *                   | **  | ***             | ***            | *                                   |
| Austenitické o. | ***            | **                  | **      | **                  | **  | ***             | ***            | ***                                 |
| Duplexní o.     | **             | **                  | **      | ***                 | **  | **              | ***            | **                                  |
| Měď             | **             |                     | ***     | **                  | *** | ***             | **             | **                                  |
| Hliník          | ***            |                     | ***     | *                   | *** | ***             | *              |                                     |
| Titan           | ***            |                     | ***     |                     | *** | ***             |                |                                     |

### 3.3 Parametry TIG svařování

Svařovací proud

Volba svařovacího proudu je nejdůležitějším parametrem při TIG svařování, protože ovlivňuje hloubku provaření, svařovací rychlost nebo kvalitu svaru. Je možné použít jednu ze tří možností [2].

- DCEN – Direct current electrode negative – přímý proud se zápornou elektrodou
- DCEP – Direct current electrode positive – přímý proud s kladnou elektrodou
- AC – Alternating current – střídavý proud



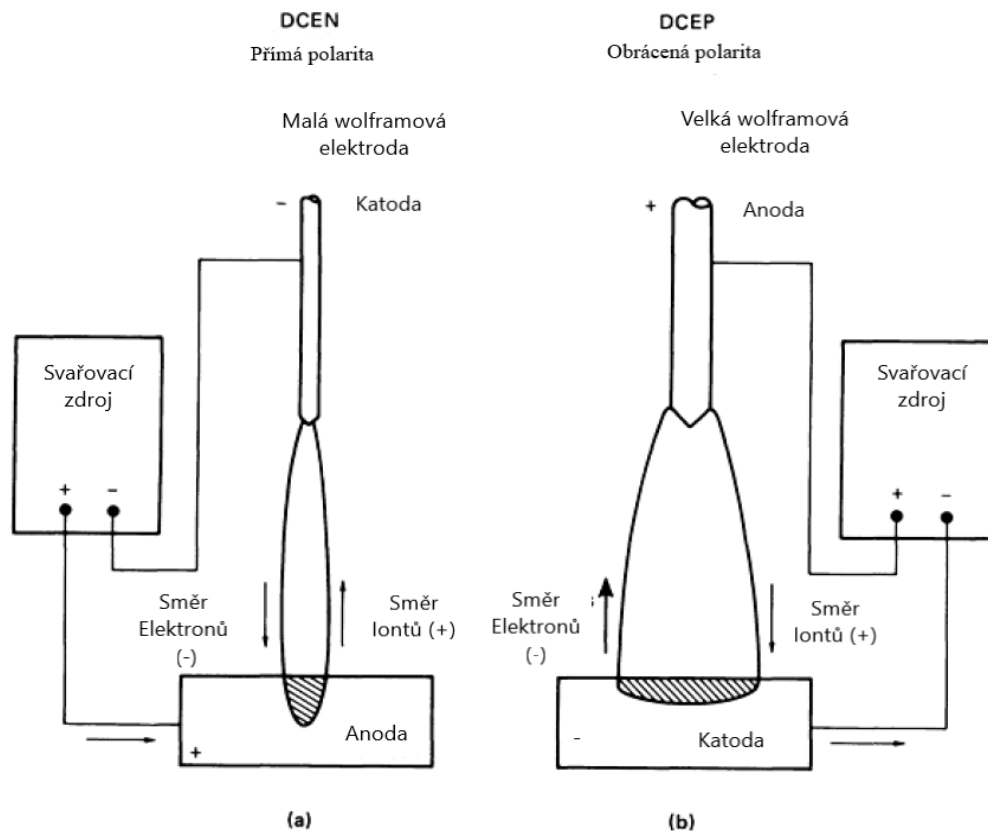
Obrázek 11 - Vliv druhu svařovacího proudu na tvar svarové lázně [2]

V informačním zdroji [2] je sepsána tabulka vhodnosti jednotlivých druhů svařovacích proudů pro některé druhy materiálů a jejich slitin. Níže uvedená tabulka je zjednodušená pro potřeby svařování materiálů k diplomové práci [2].

Tabulka 7 - Použití jednotlivých druhů proudů na konkrétní materiály

| Svařovaný materiál  | AC             | DCEN    | DCEP           |
|---------------------|----------------|---------|----------------|
| Nízkouhlíková ocel  |                |         |                |
| 0,38-0,76 mm        | Dobrý          | Výborný | Nedoporučovaný |
| 0,76-3,18 mm        | Nedoporučovaný | Výborný | Nedoporučovaný |
| Vysokouhlíková ocel | Dobrý          | Výborný | Nedoporučovaný |
| Nerezová ocel       | Dobrý          | Výborný | Nedoporučovaný |
| Žáruvzdorná ocel    | Dobrý          | Výborný | Nedoporučovaný |

Při metodě DCEN je negativní polaritou způsobeno, že se 70 % procent spotřebované energie přemění na teplo ve svaru, což odpovídá účinnosti 0,7 (využitá energie/spotřebovaná energie). DCEP je využívám pouze ve speciálních případech při svařování hliníku a jeho slitin. Tím, že je při tomto proudu změněna polarita, tepelný výkon se vytváří na elektrodě, a to je důvod, proč musí mít při DCEP zapojení elektrody velký průměr v porovnání s DCEN [2].



Obrázek 12 – Porovnání polarity proudu DCEN A DCEP [2]

Při střídavém proudu se polarita konstantě mění z negativní na pozitivní frekvencí 50 Hz. Tyto rapidní změny polarit způsobují katodické očištění, což je výhodné proti oxidům při svařování hliníku nebo hořčíku. Při střídavém proudu je nutné využívat silnější elektrody ze stejného důvodu jako u DCEP. Nejvíce je ale využívána metoda TIG DCEN [2].

Odvětvím ve využívání proudu je takzvaný pulzní proud. Standartně je využíván konstantní proud, ale pulzní má pár výhod, které v praxi nacházejí uplatnění. Při využití pulzního proudu se maximalizuje průvar, ale minimalizuje se vnesené teplo do svaru. Pulzování zároveň umožňuje ochlazení svarové lázně mezi jednotlivými pulzy [2].

## 4 Orbitální svařování

Orbitální svařování je specializovaný typ TIG svařování určený pro svařování kruhových svarů. Svařování je prováděno strojně, kdy je elektroda vedena okolo trubek mechanickým systémem. Název orbitální svařování je podle kruhového pohybu okolo svařence. Rozlišujeme běžně dvě metody orbitálního svařování, a to trubka k trubce a trubka do nátrubku. Složitostí této metody je, že při svařování dochází ke změně pozice elektrody vůči svařenci, čemuž musí být přizpůsobeny svařovací parametry. [4,6].

Prvně se orbitální svařování objevilo v 60 letech 20. století v leteckém průmyslu na výrobu co nejkvalitnějšího hydraulického vedení. Tato technologie se díky možnosti procesní kontroly v čase ukázala jako účinnější než manuální svařování. Proto se tato metoda začala rozšiřovat do dalších průmyslů. Pro rozšíření metody začaly být vyráběny menší přenosné zdroje. Dnes je tato metoda běžně využívána v potravinářském, farmaceutickém nebo jaderném průmyslu. Moderní orbitální svařování probíhá pod kontrolou počítače, který snímá vstupní i výstupní parametry svaru [4,6].

Mezi výhody orbitálního svařování patří vysoká kvalita a opakovatelnost svarů nebo rychlost svařování. Dosažitelná kvalita u součástí svařovaných orbitálním svařováním je vyšší v porovnání se svařováním ručním. Při ručním svařování je více faktorů, které ovlivňují kvalitu výsledného svaru. Používání technologie orbitálního svařování nevyžaduje tak náročný trénink jako svařování ruční. To snižuje náklady na školení svářeče. Tím, že je celý proces automatizovaný se dosahuje vysoké produktivity této technologie. Produktivitu zvyšuje i opakovatelnost jednotlivých svarů. Svařování lze provádět v prostředích s omezenou viditelností nebo s možným bezpečnostním rizikem pro svářeče díky dálkovému ovládání. Pro ovládací konzole se vyrábí i kamerový systém, který snímá prostor tavné lázně během svařování. Během procesu lze snímat jednotlivé parametry, čímž se zjednodušuje optimalizace parametrů, pokud jsou ve svaru nalezeny nepřijatelné vady [6].

### 4.1 Zařízení pro orbitální svařování

#### Svařovací zdroj s integrovaným řídicím počítačem

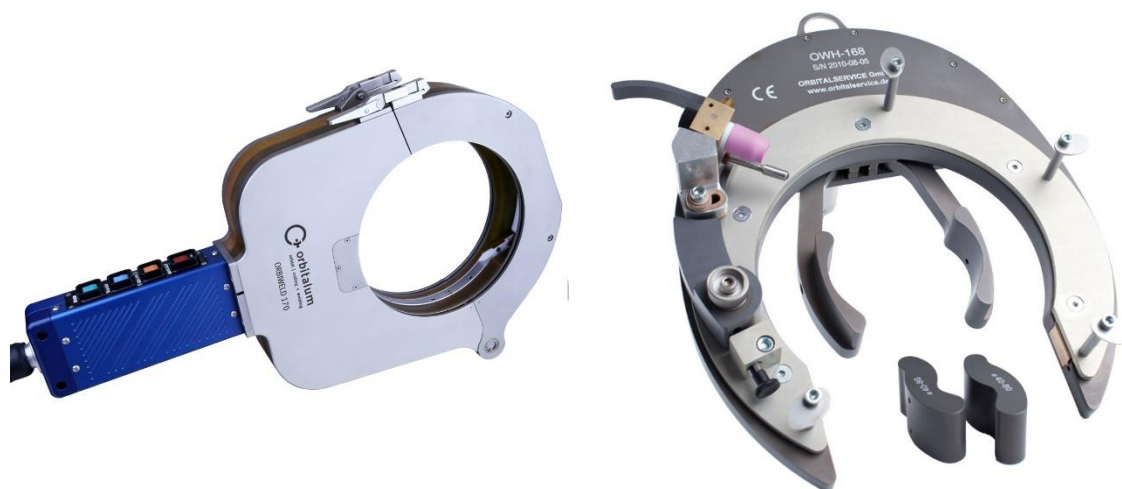
Zdrojem pro orbitální svařování je běžné svařovací zařízení na střídavý nebo stejnosměrný proud, jelikož zařízení bývá vybaveno proudovým měničem. Některá zařízení mají i záložní bateriové zdroje, které se dobíjí během doby, kdy nedochází ke svařování [4,6].

#### Svařovací hlavy otevřené

Otevřené svařovací hlavy pro orbitální svařování jsou vyráběny tak, aby měly co nejmenší velikost. Toho je docíleno tím, že je motor umístěn v hlavním krytu. Velikost hlavy je podstatná z důvodu aplikovatelnosti hlav v malých prostorech, kam by se svářeč běžně nedostal. Tyto hlavy jsou běžně vyráběny s kontrolou napětí oblouku, možností oscilace elektrody a s podavačem přídavného drátu [4,6].

#### Svařovací hlavy uzavřené

Pro rovné trubky o malých průměrech se využívají hlavy uzavřené. Uzavřené hlavy se využívají kvůli svým rozměrům v hůře dostupných místech například ve farmaceutickém nebo potravinářském průmyslu. U těchto svarů je důležité zabránit kontaminaci vnitřku trubek. Uzavřené hlavy mohou být chlazeny vodou, což zvyšuje jejich výdrž během svařování [4,6].



Obrázek 13 - Příklad svařovacích hlav pro orbitální svařování; nalevo uzavřená svařovací hlava, napravo otevřená svařovací hlava [14,15]

## 4.2 Vliv a určování parametrů svařování

Pro orbitální svařování při aplikaci s vysokými nároky na kvalitu jsou většinou předepsané parametry jako typ základního materiálu, průměr trubky, požadavky na pevnost svarového spoje, druh a čistota ochranného plynu, délka elektrického oblouku, složení wolframové elektrody, geometrie elektrody a směr jejího broušení. Každé zařízení pro orbitální svařování má jiná specifika, a tudíž se i tyto základní parametry mohou lišit v závislosti na odzkoušené praxi nebo doporučení výrobce [13].

Většina výrobců má v základu nastavenou sérii programů pro různé průměry trubek, síly stěn a materiálů. Při vytváření vlastního programu je vhodné vycházet z těchto základních programů. V průmyslové praxi se tedy využívá změn jen několika základních parametrů. Pomocí experimentu a jeho vyhodnocování se hodnoty parametru upravují do nejvhodnějších čísel [13].

### Délka svařovacího oblouku

Délka svařovacího oblouku závisí na svařovacím proudu, stabilitě oblouku a kruhovitosti trubky. Cílem je zajistit, aby byla elektroda v konstantní vzdálenosti od povrchu trubky, která zabezpečuje, aby nedošlo k přitavení s přídavným materiálem. Běžně se udává vzdálenost 0,25 mm plus polovina tloušťky stěny trubky, popřípadě hodnota požadované hloubky provaření [2,13].

### Rychlost svařování

Rychlost svařování závisí na rychlosti tavení materiálu a na tloušťce stěny. Nejvýhodnější je svařovat co nejrychleji při dobré kvalitě svaru. Čím rychleji se svařuje, tím méně je vnášeno tepla do základních materiálů, a tím se snižuje ovlivnění jejich struktury. Pro tenčí materiály je rychlost vyšší než pro materiály tlustostěnné [1,13].

## Svařovací proud

Svařovací proud závisí na základních materiálech, tloušťce stěny, svařovací rychlosti a na druhu ochranného plynu. Pro svařovací proud je nejdůležitější dosažení dostatečného provaření materiálu a svarů bez vad. Při orbitálním svařování je využíváno sektorování trubky. Pokud by byl stejný svařovací proud během celého procesu, docházelo by k postupnému nárstu penetrace z důvodu akumulace tepla v základních materiálech. Proto je po počátečním sektoru postupně snižována hodnota svařovacího proudu a tím se kompenzuje vliv vneseného tepla [13].

## Pulzní proud

Pulzní proud vzniká v napájecím zdroji velmi rychlým střídáním vysokého a nízkého svařovacího proudu. Tento postup vytvoří housenku překrývajících se bodových svarů. Touto technikou se snižuje vnášené teplo do svaru, což může zlepšit kvalitu a opakovatelnost svaru. Další výhodou pulzního proudu u orbitálního svařování je snížení vlivu gravitační síly na svarovou lázeň. Během doby vysokého svařovacího proudu dojde k natavení kovu a jeho promíšení. Hned však následuje doba nízkého svařovacího proudu, která umožňuje ztuhnutí kovu. Díky tomu se minimalizuje v pozici 6 dle hodin vyboulení svaru ve směru gravitace a v pozici 3 a 9 k stékání kovu [4,13].

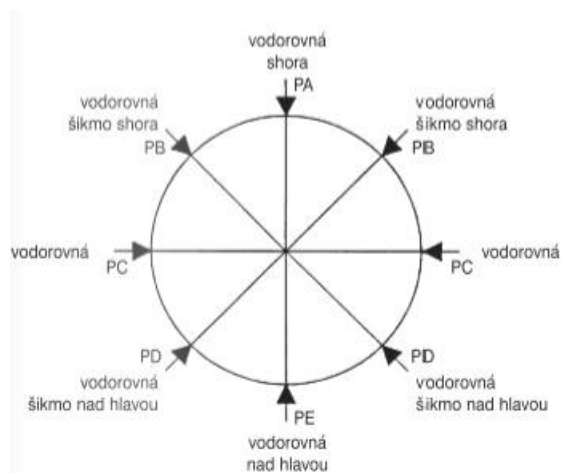
Poměr pulzních svařovacích proudů je v praxi používán od rozpětí 2:1 až do 5:1. Běžně se začíná při poměru 3:1 a od tohoto poměru se parametry upravují dle výsledných struktur. Frekvence pulzů závisí na požadavku překryvání jednotlivých bodů. Výchozí hodnotou bývá 75 % hodnota překryvu jednotlivých bodů. Pro slabostěnné trubky bývá hodnota frekvence udávaná v pulzech za sekundu rovna 25x rychlosti svařování udávané v milimetrech za minutu. Doba pulzu závisí na termodynamických vlastnostech svařovaného materiálu. Pro tepelně ovlivnitelnější kovy je lepší využívat nižší dobu vysokého proudu. Běžná doba vysokého proudu je mezi 20 až 50 % [4,13].

## Polohy elektrody při orbitálním svařování a jejich sektorování

V mnoha případech by využití pulzního proudu pro získání potřebné kvality svarového spoje nestačilo. Parametry musí být přizpůsobeny aktuálním požadavkům svarové lázně. Z tohoto důvodu je svařovací cyklus rozdělen do několika sektorů. Pro každý z těchto sektorů se parametry liší [4].

Jedním z důvodů, proč se parametry liší jsou síly působící na svarovou lázeň během svařování. V poloze PA dle obrázku 14 působí gravitační síla tak, že podporuje tavení lázně a zlepšuje tím stupeň penetrace oblouku. Obráceně je tomu však v poloze PE, kdy je ze stejných důvodů penetrace oblouku oslabena. Dalším faktorem je postupné ohřívání polotovaru. Pokud začínáme v poloze PA, během svařování se akumuluje v základních materiálech teplo, a tudíž je možné o něco понížít hodnotu svařovacího proudu [4].

Sektory jsou často v praxi rozděleny nerovnoměrně a jejich počet se může lišit dle konkrétních aplikací [4].



Obrázek 14 - Svařovací polohy dle ČSN EN ISO 6947 [16]

### 4.3 Příprava a svařitelnost polotovarů

Volba materiálů závisí primárně na pracovním prostředí svaru. Určujícími faktory jsou mechanická, tepelná a chemická odolnost a stabilita. Pro určení správného typu materiálu je nutné materiály testovat a stanovit jejich mezní stavy. Každá část svarové housenky má rozdílné chemické složení včetně rozdílu v obsahu stopových prvků. Ale i stopové prvky mohou ovlivňovat tepelnou vodivost a chování svarové lázně. Proto je nutné během svařování kontrolovat chování svarové lázně a během procesu případně upravit hodnoty svařovacího proudu [13].

Příprava svarových ploch pro specifické svary zahrnuje požadavky na kruhovitost trubek, konkávnost svaru nebo výztuže a podložky v kořeni svaru. Pokud nejsou nutná žádná opatření, tavná lázeň musí vyplnit a kompenzovat všechny chyby nebo mezery ve svarovém spoji. Tloušťka stěny by měla být rovnoměrná u každé součásti. Rozdíl v poloměrech trubek a jejich kruhovitosti může vést k nepřípustným vadám. Obecné rady pro nerovnosti a mezery mezi trubkami jsou tyto [13]:

- a) Každá mezera by měla být menší než 5 % z tloušťky stěny. Je možné svařovat trubky i s větší mezerou nad 10 %, ale může tím dojít ke snížení kvality svaru a případné opakovatelnosti.
- b) Tloušťka stěny by se neměla v oblasti svaru lišit o více-méně 5 % nominální tloušťky stěny. Opět lze toto pravidlo porušit, ale je nutné brát v potaz opakovatelnost, která tím výrazně klesá.
- c) Nevhodné sestavení trubek k sobě lze předejít využitím pomocí stojanů s vhodnými přípravky, které vyrovnají trubky k svařování [13].



## 5 Úvod do experimentální části

Experimentální část se zabývá optimalizací parametrů orbitálního svařování heterogenních svarů. Cílem bylo zajištění co nejvyšší kvality svaru s ohledem na vysoké nároky na bezpečnost, která je vyžadována v jaderném průmyslu. Krom optimalizace svařovacích parametrů byl zároveň zkoumán i vliv druhu stehování trubek, druh přídavného materiálu a rozdíl v druhu úkosu svařovaných trubek.

Tabulka 8 - Testované technologie stehování, přídavných materiálů a úkosů

| Optimalizovaný proces | Technologie stehování | Přídavný materiál | Úkos             |
|-----------------------|-----------------------|-------------------|------------------|
| Druh                  | MicroTIG              | Sv07Ch25Ni3       | Tvar U (tulipán) |
|                       | Laser                 |                   |                  |
|                       | Ruční TIG             | Exaton Ni72HP     | Tvar V           |

Svařené vzorky byly podrobeny jak NDT, tak DT zkouškám. Z NDT metod byly použity vizuální zkouška VT, kapilární zkouška PT a zkouška rentgenová RT. Z destruktivních metod metalografie a zkoumání mikrostruktury a měření mikrotvrdomosti. V tabulce 9 jsou shrnuty metody zkoušení materiálu pro jednotlivé vzorky. Výsledky zkoušecích metod pro jednotlivé vzorky je možné nalézt v přílohách označených dle tabulky 9.

Tabulka 9 - Přehled svařených vzorků a provedených metod hodnocení

| Přehled vzorků a použitých metod hodnocení |                  |                       |                 |               | Druh kontroly  |    |    |              |              |
|--|------------------|-----------------------|-----------------|---------------|----------------|----|----|--------------|--------------|
|  |                  |                       |                 |               | Nedestruktivní |    |    | Destruktivní |              |
| Přídavný materiál                          | Druh úkosu       | Technologie stehování | Označení vzorku | Číslo přílohy | VT             | PT | RT | Metalografie | Mikrotvrdost |
| Sv07Ch25Ni13                               | Tvar U (tulipán) | MicroTIG              | T1Sv            | 1             | +              | +  | +  | -            | -            |
|  |                  |                       | T2Sv            | 2             | +              | +  | +  | -            | -            |
|  |                  |                       | T3Sv            | 3             | +              | +  | +  | +            | +            |
|  |                  |                       | T4Sv            | 4             | +              | +  | +  | -            | -            |
|  |                  | Laser                 | T5Sv            | 5             | +              | +  | +  | -            | -            |
|  |                  |                       | T6Sv            | 6             | +              | +  | +  | -            | -            |
|  |                  |                       | T7Sv            | 7             | +              | +  | +  | +            | +            |
|  |                  |                       | T8Sv            | 8             | +              | +  | +  | -            | -            |
|  |                  | Ruční TIG             | T9Sv            | 9             | +              | +  | +  | -            | -            |
|  |                  |                       | T10Sv           | 10            | +              | +  | +  | +            | +            |
|  | Tvar V           | Laser                 | V1Sv            | -             | -              | -  | -  | -            | -            |
|  |                  |                       | V2Sv            | 11            | +              | +  | +  | -            | -            |
|  |                  |                       | V3Sv            | 12            | +              | +  | +  | -            | -            |
|  |                  |                       | V4Sv            | 13            | +              | +  | +  | +            | +            |
| V5Sv                                       |                  |                       | 14              | +             | +              | +  | -  | -            |              |
| Exaton Ni72HP                              | Tvar U           | Laser                 | T1Ex            | -             | -              | -  | -  | -            | -            |
|  |                  |                       | T2Ex            | 15            | +              | +  | +  | -            | -            |
|  |                  |                       | T3Ex            | 16            | +              | +  | +  | -            | -            |
|  |                  |                       | T4Ex            | 17            | +              | +  | +  | -            | -            |
|  | Tvar V           |                       | V1Ex            | -             | -              | -  | -  | -            | -            |
|  |                  |                       | V2Ex            | 18            | +              | +  | +  | -            | -            |
|  |                  |                       | V3Ex            | 19            | +              | +  | +  | -            | -            |
|  |                  |                       | V4Ex            | -             | -              | -  | -  | -            | -            |

## 6 Popis a příprava použitých materiálů a polotovarů

Heterogenní svar byl v rámci experimentu diplomové práce složen ze dvou základních materiálů. Nízkouhlíková ocel P265GH a nerezová ocel Wr.N. 1.4541. Tyto základní materiály byly vybrány jako ekvivalenty pro materiály využívané v praxi jaderné elektrárny Temelín. Použité přídatné materiály byly Sv07Ch25N13 a Exaton Ni72HP.

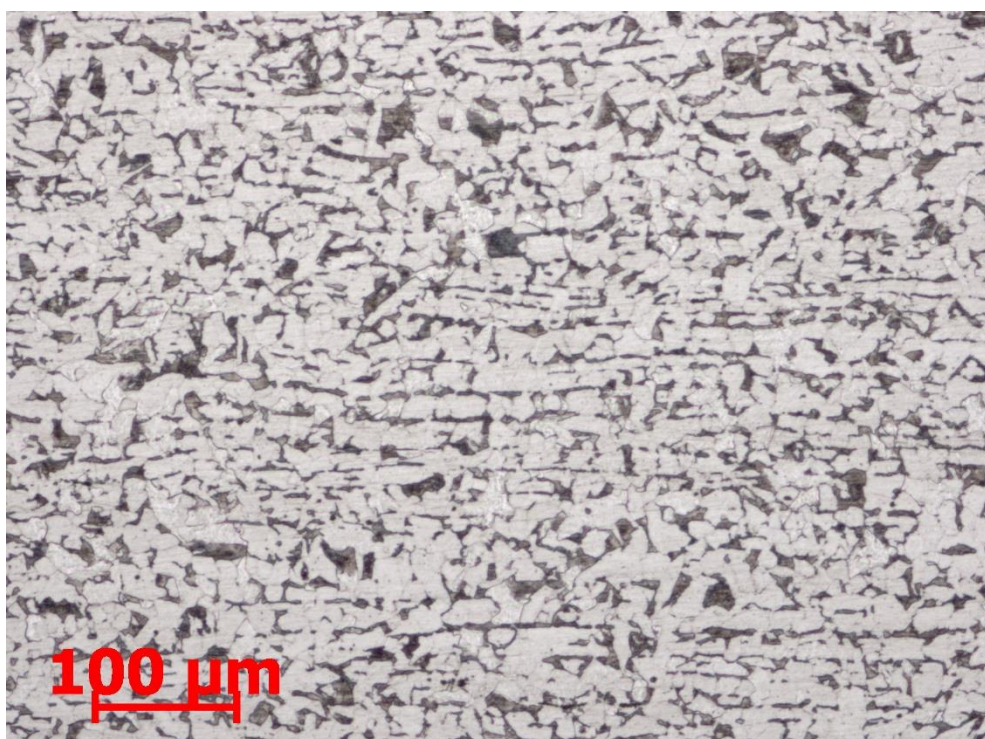
### 6.1 Základní materiál P265GH

Jedná se o neušlechtilou, nízkouhlíkovou nelegovanou ocel se zaručenou svařitelností. Využívá se na součásti kotlů pro její žárupevnost za vyšších teplot. Dále je využívána na součásti v energetickém průmyslu na tepelně namáhané součásti a pro výrobu tlakových nádob. Není vhodná pro styk s chemicky agresivními látkami [17,18].

Tabulka 10 - Chemické složení oceli P265GH

| Prvek [hm. %]     | C       | Mn      | Si       | Cr      | Ni      | Cu      | Cr+Ni+Cu | P        | S        |
|-------------------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| Materiálové listy | max 0,2 | min 0,5 | max 0,35 | max 0,3 | max 0,3 | max 0,3 | max 0,7  | max 0,04 | max 0,04 |
| Spektroskopie     | 0,19    | 0,65    | 0,22     | -       | -       | -       | -        | 0,02     | 0,02     |

Při kontrole chemického složení oceli P265GH byl zjištěn vyšší obsah Mn, než je uváděno v materiálových listech. Mangan obecně zpomaluje transformaci austenitu v perlitické a bainitické oblasti. Další vlastností je dobrá afinita k S a O.



Obrázek 15 - Základní materiál P265GH, zvětšeno 100x, leptáno 1 % Nitalem, feriticko perlitická struktura

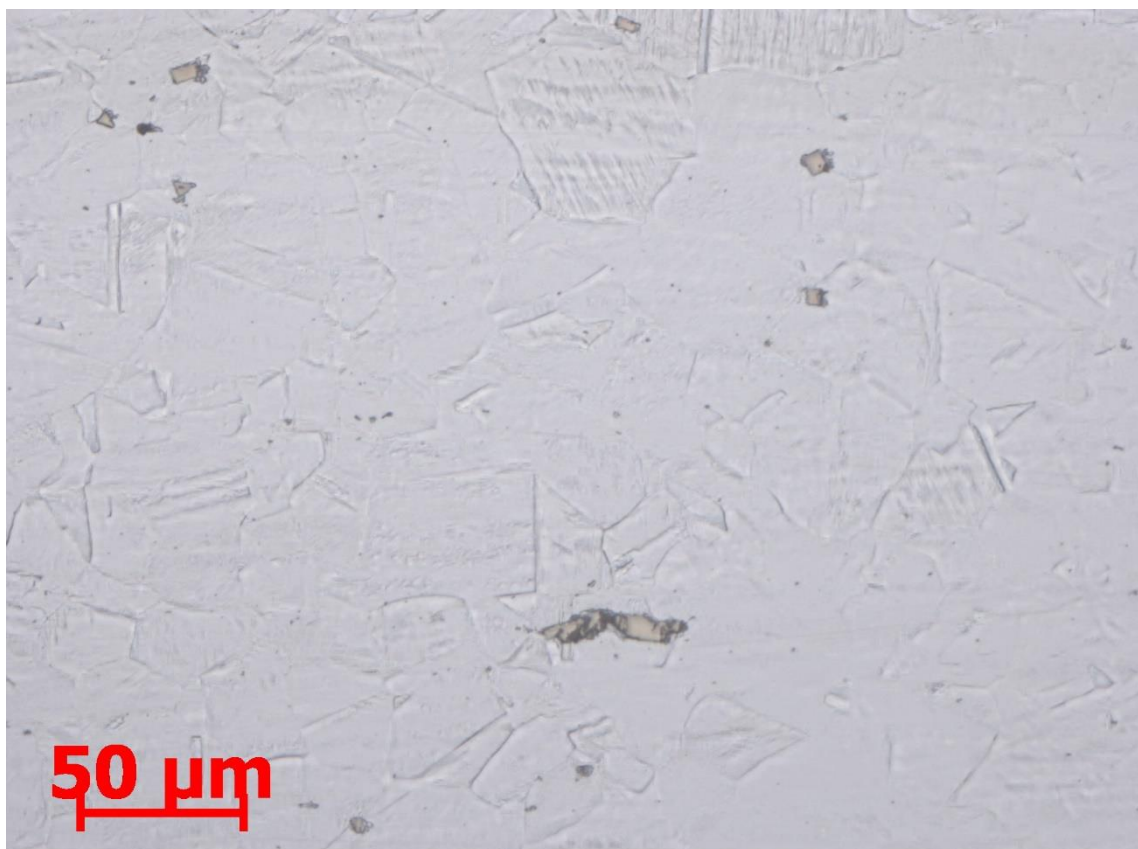
## 6.2 Základní materiál Wr.N. 1.4541

Ocel Wr.N. 1.4541 patří mezi chromniklové, austenitické oceli. Je stabilizovaná titanem. Je vhodná pro svařování, protože je odolná proti mezikrystalové korozi. Lze ji využívat i pro tlakové nádoby do teplot 400 °C. Lze ji využít v prostředích se silnou oxidační povahou. Tato ocel odolává neorganickým kyselinám v nízkých koncentracích a za běžných teplot. Lépe odolává slabých organickým kyselinám. Proto lze tuto ocel využívat v farmaceutickém, potravinářském nebo energetickém průmyslu [17].

Tabulka 11 - Chemické složení oceli Wr.N. 1.4541

| Prvek [hm. %]     | C       | Mn      | Si      | Cr        | Ni         | Ti         | P         | S        | Cu   |
|-------------------|---------|---------|---------|-----------|------------|------------|-----------|----------|------|
| Materiálové listy | max 0,1 | min 2,0 | max 1,0 | max 17-19 | max 9,5-12 | min 5x % C | max 0,045 | max 0,03 | -    |
| Spektroskopie     | 0,095   | 1,15    | 0,53    | 15,92     | 9,52       | 0,22       | 0,04      | 0,01     | 0,22 |

Kontrola chemického složení oceli Wr.N. 1.4541 objevila nižší obsah Cr. To může být způsobeno lokálním nedostatkem Cr. Při kontrole byl objeveno větší než stopové množství mědi, která by se v této oceli neměla vyskytovat. Její obsah může být závislý na několika faktorech. Jedním je využití nevhodného materiálového standardu, což by mohlo vést k zavádějící interpretaci výsledků měření. Další možností může být překryv spektra s jiným prvkem, a tudíž rozložení koncentračního podílu. Důvodem by ale mohla být nedostatečná čistota tavby při odlévání materiálu.



Obrázek 16 - Základní materiál Wr. N. 1.4541, zvětšeno 200x, leptáno roztokem H<sub>2</sub>O, HCl a HNO<sub>3</sub>, austenitická struktura s vměstkami

### 6.3 Příkladný materiál Sv07Ch25N13

Tento svařovací přídatný materiál je chromniklová austenitická ocel. Využívá se pro jeho dobrou korozní odolnost. Je vhodný pro použití pro svařování heterogenních svarů.

Tabulka 12 - Chemické složení přídatného materiálu Sv07Ch25N13

| Prvek   | C     | Mn   | Si   | Cr    | Ni    | Co    | P     | S     |
|---------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| [hm. %] | 0,052 | 1,85 | 0,48 | 23,39 | 13,31 | 0,037 | 0,015 | 0,005 |

### 6.4 Příkladný materiál Exaton Ni72HP

Příkladný materiál Exaton Ni72HP je určený pro svařování slitin na bázi nikl-chrom-železo nebo pro heterogenní svařování korozivzdorných niklových ocelí s oceli uhlíkovými. Zajišťuje vysokou pevnost a odolnost proti korozi, oxidaci a odolnost proti tečení materiálu. Je určený pro prostředí, kde by mohlo docházet ke korozi pod napětím. Tímto přídatným materiálem lze svařovat za extrémních teplot od kryogenních po zvýšené teploty. Proto je využíván v petrochemickém nebo energetickém průmyslu [19].

Tabulka 13 - Chemické složení přídatného materiálu Exaton Ni72HP

| Prvek   | C    | Si  | Mn | Cr | Ni | Nb  | Ti  | Al  | P a S    |
|---------|------|-----|----|----|----|-----|-----|-----|----------|
| [hm. %] | 0,03 | 0,1 | 3  | 20 | 73 | 2,5 | 0,4 | 0,4 | max 0,01 |

### 6.5 Schaefflerovi diagramy

Při svařování heterogenních svarů je využíván tzv. Schaefflerův diagram. V tomto diagramu jsou vyobrazeny strukturální stavy, které se mohou v oceli při daném chemickém složení vyskytovat. Tyto struktury jsou závislé na rychlosti ochlazování z teplot okolo 1050 °C na teploty pokojové. V praxi je tedy využíván ke stanovení druhu struktury mezi základním materiálem a svarovým kovem [20].

Během svařování mohou tedy vznikat struktury austenitické, feritické a martenzitické. Zejména martenzitická struktura může v závislosti na obsahu uhlíku znesnadňovat postup svařování. Pokud by mohlo dojít ke vzniku martenzitu, je třeba předehřívát svařovanou součást, pokud to technologie a svařovaný materiál dovolují. Předehřevem se může zamezit trhlinám vznikajícím při přeměně austenitu na martenzit [1].

Tento diagram byl jeden z prvních, který byl využíván k popisu vztahu mezi chemickým složením a obsahem feritu ve svarovém kovu. Na obrázku 17 je zobrazen diagram závislosti vznikající struktury na chromovém a niklovém ekvivalentu. Chromový ekvivalent je dán z feritotvorných prvků, jako je Cr, Mo, Si nebo Nb. Niklový ekvivalent je determinován koncentrací austenitotvorných prvků Ni, C nebo Mn. Mezi austenitotvorné prvky lze počítat i N. Dle informačního zdroje [20] může mít vliv příměsí N<sub>2</sub> do Ar ochranného plynu. Tato příměs může snižovat podíl feritu ve svarovém kovu.

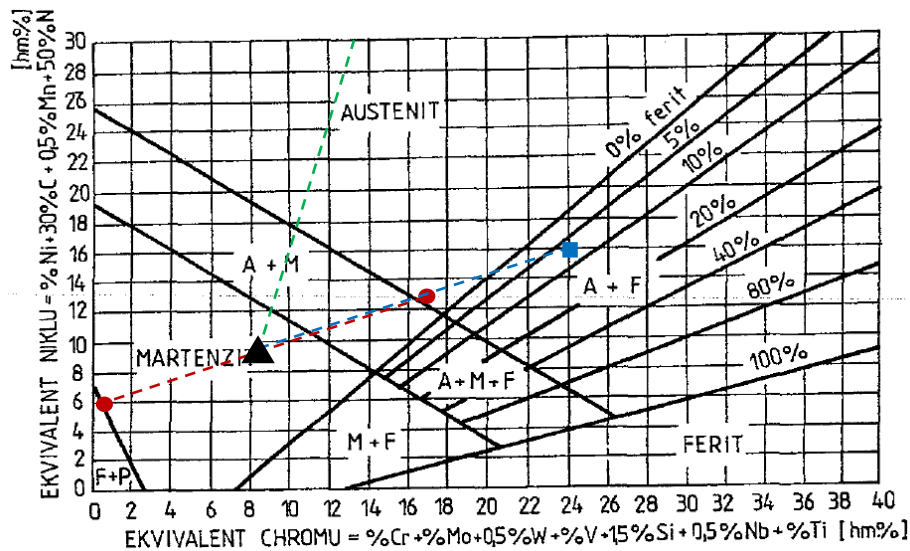
Dle vzorců 7 a 8 byly vypočítány Cr<sub>e</sub> a Ni<sub>e</sub> pro základní a přídatné materiály. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 14 a zaneseny do obrázku 17.

$$Cr_e = \% Cr + \% Mo + 0,5 * \% W + \% V + 1,5 * \% Si + 0,5 * \% Nb + \% Ti \quad (7)$$

$$Ni_e = \% Ni + 30 * \% C + 0,5 * \% Mn + 50 * \% N \quad (8)$$

Tabulka 14 - Hodnoty ekvivalentu chromu  $Cr_e$  a niklu  $Ni_e$  pro ZM a PM

|        | P265GH | Wr. N. 1.4541 | Sv07Ch25N13 | Exaton Ni72HP |
|--------|--------|---------------|-------------|---------------|
| $Cr_e$ | 0,33   | 17,16         | 24,11       | 22,2          |
| $Ni_e$ | 6,03   | 12,94         | 15,80       | 75,40         |

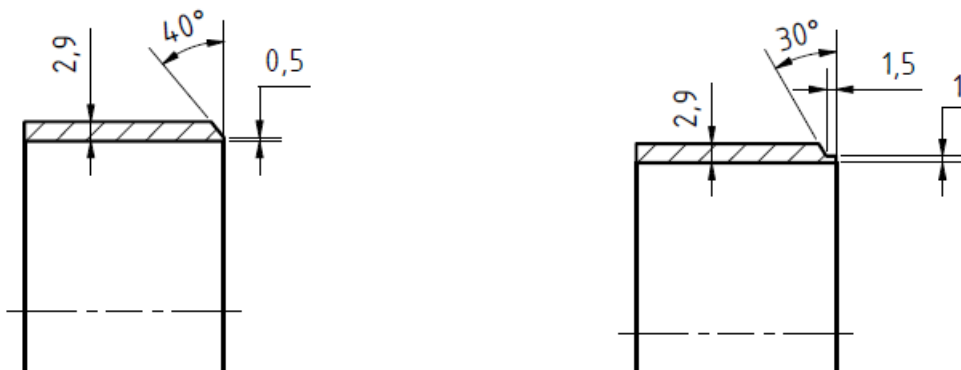


Obrázek 17 - Schaefflerův diagram [1]

Na obrázku 17 jsou vyznačeny body pro základní a přídavné materiály v závislosti na jejich ekvivalentu chromu a niklu. Červené tečky znázorňují základní materiály. Pro názornost je předpokládáné promíšení základních materiálů 50 %. Bod s tímto promíšením je označen černým trojúhelníkem. Do tohoto bodu jsou zavedeny další dvě přímky, a to modrá od přídavného materiálu Sv07Ch25N13 a zelená od přídavného materiálu Exaton Ni72HP. Podle promíšení směsi základních materiálů s jednotlivými přídavnými materiály je možné přibližné určení vzniklé struktury svarového kovu. Pro přídavný materiál Sv07Ch25N13 je v oblasti s přibližně 50 % promíšením struktura austeniticko martenzitická. Pro přídavný materiál Exaton Ni72HP za stejných podmínek je struktura austenitická, což by odpovídalo chemickému složení tohoto přídavného materiálu.

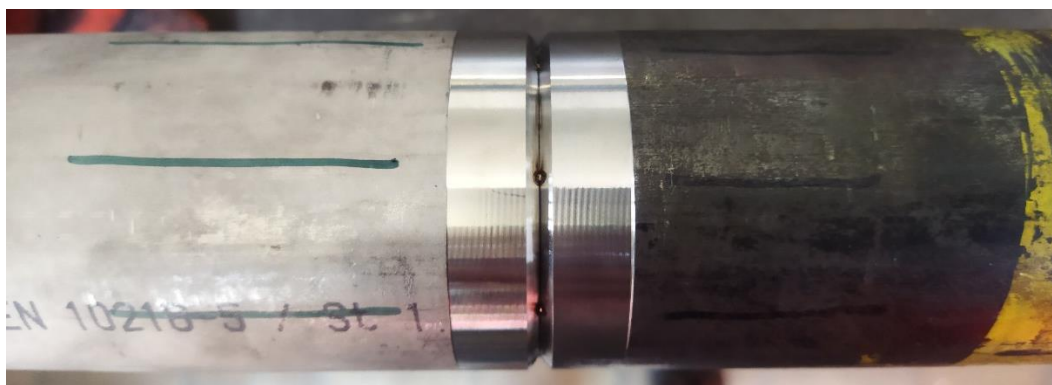
## 6.6 Rozměry a příprava úkosů

Polotovarem pro experimentální část diplomové práce byly trubky o průměru 57 mm a síle stěny 2,9 mm. Délka jedné trubky byla 200 mm, po svaření tedy 400 mm. Každá trubka byla na jedné straně opatřena úkosem dle obrázku 18.



Obrázek 18 - Parametry úkosů použitých v experimentální části diplomové práce; nalevo V úkos; napravo U úkos (tulipán)

Při obrábění úkosů se projevila nevhodná kruhovitosť trubek z výroby. To způsobilo rozdílnou hodnotu otupení úkosu okolo trubky. Trubky byly následně očištěny broušením, odmaštěním a následně nastehovány. Stehování bylo provedeno třemi způsoby. Metodou microTIG, laserem a ručním TIG svařováním. Pro microTIG a laser bylo na sestehování trubek použito 8 stehů ve vzdálenosti 45° od sebe. Pro ruční TIG stehování byly použity 3 stehy po 120°. Obrázky 41-43 zobrazují jednotlivé druhy stehování pro úkos typu U.



Obrázek 19 - Sestehované trubky laserem, V úkos

V rámci ovlivnění základních materiálů je již z vizuální kontroly znatelně větší ovlivněná plocha u ručního TIG stehování. Výhodou pro laserovou i microTIG metodu je jejich automatizace, kdy se dosahuje vždy velmi podobných výsledků. U ručního stehování nebylo tak přesné sesazení trubek vůči sobě jako u vzorků s mikroTIGovými nebo laserovými stehy. Problém se sesazením by šel jistě vyřešit volbou vhodnějšího přípravku při ručním TIG stehování trubek. Důležitým parametrem pro hodnocení stehů je i to, že všechny tři druhy stehů dokázaly udržet svařovací hlavu před a během procesu orbitálního svařování.

U každé trubky byly vyznačeny pozice stehování kvůli metalografickým výbrusům.



Obrázek 20 - U úkos s laserovým stehováním

## 7 Použité zařízení a pracovní postup

Experimentální program se dělí celkem na 3 hlavní části. První je vlastní orbitální svařování, které probíhalo ve svařovně KMM v areálu ZČU. Dalšími částmi jsou destruktivní a nedestruktivní zkoušení svařených vzorků. Toto zkoušení probíhalo v laboratořích KMM na tamních strojích.

### 7.1 Zařízení a postup pro svařování

#### Svařovací zdroj Polysoude P6

Jedná se o svařovací zdroj francouzské výroby. Tento invertorový zdroj je napájen třífázovou soustavou s napětím 400 V s frekvencí 50 Hz. Uvedený pracovní proud konstantní nebo pulzní se pohybuje v rozpětí 5-300 A. Přesnost svařovacího proudu je udávána do 100 A v hodnotách  $\pm 1$  a pro hodnoty nad 100 A  $\pm 1\%$ . Ochranný a formovací plyn je regulován pomocí bezpečnostního ventilu. Kvůli bezpečnosti a udržování výkonu je vybaven nucenou ventilací. Tento zdroj je má vestavěnou tiskárnu, díky které může obsluha po dokončení svařovacího procesu získat průběžně hodnoty svařovacího proudu, napětí, rychlosti svařovací hlavy, rychlosti podávání přídavného drátu v závislosti na pozici elektrody v úhlových jednotkách [4,21].

#### Svařovací hlava MUIV 115

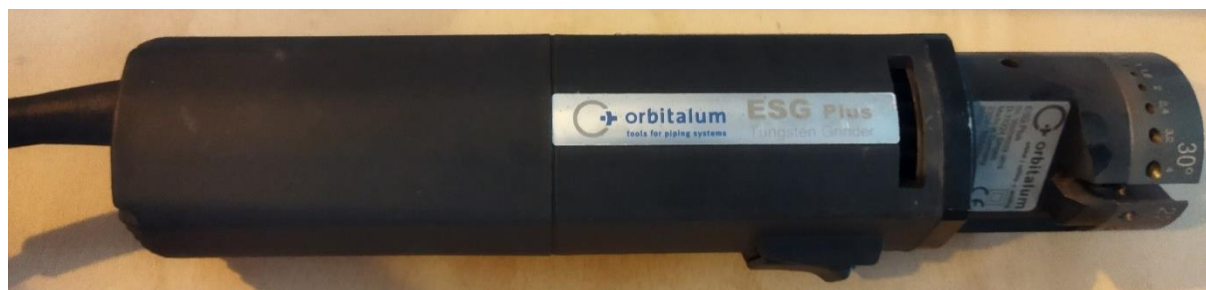
Tato svařovací hlava patří mezi otevřené hlavy typu U. Tímto typem je možné svařovat trubky o průměrech mezi 50 a 115 mm. U typ svařovací hlavy je opatřen vodou chlazenou elektrodou s plynovým vyústěním, které zaručuje dostatečnou ochranu oblouku během svařování. Otevřenost hlavy nabízí přímou kontrolu procesu svařování operátorem, který může ovládat některé svařovací parametry pomocí dálkového ovládání a tím optimalizovat výsledek i během procesu svařování. Hlava použitá pro experimentální část diplomové práce zároveň nabízí motorizovaný pohyb elektrody vůči svařenci. AVC (Arc voltage control) kontroluje přes hodnotu napětí správnou výšku elektrody a zároveň se elektroda pohybuje i příčně při oscilaci [4].

#### Podavač drátu P3

Jedná se o externí podavač přídavného drátu, který vyžaduje vlastní napájení.

#### Bruska na elektrody ESG Plus

Jedná se o ruční brusku pro wolframové elektrody na obrázku 21. Touto bruskou mohou být broušeny elektrody pod úhlem 15°, 18°, 22,5°, 30° o průměru elektrody 1, 1,8, 2, 2,4 a 3,2 mm. Zároveň lze na čele této brusky provést otupení elektrody. Správně nabroušená elektroda je klíčovým aspektem pro vytvoření kvalitního svaru.



Obrázek 21 - Bruska na elektrody ESG Plus





Obrázek 22 - Svařovna a komponenty využití pro svařování; 1 - svařovací zdroj P6, 2 - svařovací hlava MUIV 115, 3 - podavač drátu P3, 4 - dálkové ovládání, 5 - lahev s argonem, 6 – svařenec

### Postup svařování

Před vlastním procesem svařování bylo nutné nastehované trubky zbavit oxidové vrstvy jemným obroušením. Obroušené trubky pak byly odmaštěny a dočištěny pomocí hadru namočeného do acetonu. Takto předpřipravená trubka byla upnuta za austenitickou ocel na svářečský stůl pomocí dvou upínek. Konce trubek byly ucpány pryžovými ucpávkami. Skrze jednu z těchto ucpávek byl dovnitř aplikován formovací plyn argon s průtokovou rychlostí 2 l/min. Z druhé strany odcházel skrze malý otvor přebytečný původní vzduch.

Příprava svařovací hlavy sestává z kontroly a nabroušení elektrody. Pro experiment byla použita wolframová elektroda s příměsí lanthanu. Pro správné a jednotné nabroušení a otupení elektrody byla použita bruska na elektrody viz. obrázek 21. Dalším krokem je kontrola úhlu ústí přídavného materiálu vůči elektrodě, který by se měl pohybovat mezi 70-80°. Počáteční výlev drátu by měl být okolo 8 mm. Po kontrole těchto parametrů byla svařovací hlava usazena na svařované trubky tak, aby byla elektroda uprostřed mezi úkosy trubek. Pomocí dálkového ovládání svařovací hlavy pak byla dopravena vzdálenost od úkosů a elektrody od svařence. Zároveň je nutné namotat kabely okolo svařovací hlavy pomocí poloautomatizovaného pohybu svařovací hlavy v protisměru svařování, aby se mohly během svařování bezpečně odmotávat.

Po této přípravě došlo k vlastnímu procesu svařování. Na zdroji byl zvolen program pro svařování kořene. Po spuštění programu je nutné kontrolovat svarovou lázeň. Komplikace mohou nastat například kvůli nevhodnému odtavování přídavného materiálu nebo jeho

zachytávání se na hranách úkosů. Operátor může díky ovladači regulovat rychlost přidávaného materiálu i hodnoty svařovacího proudu. Kontrola svarové lázně je tedy nutná i u již optimalizovaných programů pro dané materiály a polotovary.

Poté, co byla svařena kořenová vrstva byly odejmuty pryžové ucpávky, jelikož už není potřebná ochrana formovacím plynem. Na svařené kořenové vrstvě se následně provedla předběžná vizuální kontrola, která měla za cíl objevit nejzávažnější vady zejména v kořenové části svaru. Hrubosti či vady byly zapsány dle polohy, aby mohlo dojít k optimalizaci svařovacích hodnot v programu pro daný sektor. Pro vzorky, které byly svařovány po vzorku T8Sv byla měřena interpass teplota pomocí termočlánku TC-08 od firmy Omega. Měření teploty bylo prováděno vždy před spuštěním programu pro svařování krycí vrstvy.

Před svařováním krycí vrstvy bylo nutné opětovné kontrolování wolframové elektrody, délky výlevu přidávaného materiálu a namotání kabelů na svařovací hlavu. Poté byl spuštěn program pro svařování krycí hlavy. Během svařování bylo nutné kontrolovat svarovou lázeň s přidávaným materiálem stejně jako u krycí vrstvy. Když byl dokončen proces svařování, byla odejmuta svařovací hlava ze svařence a opět vyčištěny a připraveny její komponenty. Svařenec byl vyjmut z přípravků a následně podroben NDT a DT kontrolám.

## 7.2 Zařízení a postup pro NDT zkoušení

### Vizuální zkouška (VT)

Pro vizuální zkoušku v oblasti kořene svaru bylo použito inspekční zrcátko a svítilna. Po provedení NDT kontrol byly svařence rozřezány pro DT kontroly. Poté byly svary v oblasti kořene svaru ještě dokontrolovány.

Vizuální zkouška probíhala dle normy ČSN EN 17 637. Provedena byla na označených svarech dle tabulky 9. Jakost svaru byla kontrolována po celém povrchu svarového spoje po svaření obou vrstev. Kontrolu prováděl kvalifikovaný komisař. Hodnocení a klasifikace geometrických vad svaru byla provedena dle normy ČSN EN ISO 6520-1 [27,28].

### Kapilární zkouška (PT)

K provedení této zkoušky byl využit barevný kapilární set. Tento set se skládá z SHERWIN DR-60, SHERWIN DP-50, SHERWIN D-100.

Kapilární zkouška byla provedena dle normy ČSN EN ISO 3452-1. Vyhodnocení této zkoušky bylo provedeno dle normy ČSN EN ISO 23277. Zkouška je zahájena přípravou zkoušené plochy očištěním, odmaštěním a sušením zkoumaného povrchu. Poté je nanesen kapilárně aktivní detekční prostředek, který pronikne do povrchových vad. Následuje odstranění přebytečné detekční látky z povrchu. Vlivem kapilárních sil detekční látka vzlíná na povrch, na který je již nanesena vývojka. Odstraněním přebytečného množství vývojky dojde ke zviditelnění necelistvostí povrchu svarového spoje. Takto připravený svar je připraven pro zhodnocení.



Obrázek 23 - Barevný kapilární set Sherwin [22]

### Prozařovací zkouška (RT)

Pro RTG kontrolu svarů trubek byl použit RTG systém s digitálním detektorem obrazu GE DXR 250c-w. Pro zvýšení obrazového kontrastu pak byla použita obrazová filtrace. Vzdálenost RTG zdroje od objektu byla pro vzorky T1Sv-T10Sv 500 mm a pro vzorky V2Sv-V5Sv,

T1Ex-T4Ex a V1Ex-V4Ex 620 mm. Přepětí bylo 120 kV a žhavicí proud 5 mA. Doba expozice jednoho snímku byla 0,3 s. Aby bylo zaručeno pokrytí celého obvodu svaru a zároveň došlo k prozáření obou stěn, bylo nutné provést snímání v excentrické pozici a to dvakrát. Druhá pozice vznikla pootočením svaru o 90° proti směru svařování.

### 7.3 Zařízení a postup pro DT zkoušení

#### Metalografie

Pro zpracování metalografických výbrusů byla použita metalografická pila Struers - Discatom 6, elektrohydraulický lis Struers - Citopress 10 a automatická bruska Struers - Laboforce 100, které jsou vyobrazeny na obrázku 24.



Obrázek 24 - Nalevo metalografická pila, uprostřed elektrohydraulický lis, napravo automatická bruska

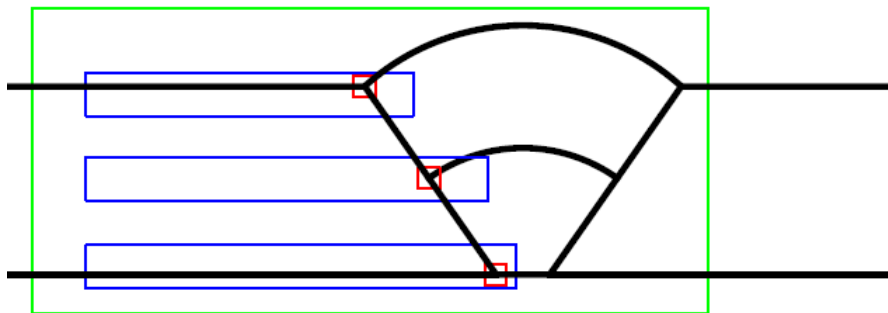
Nejdříve byly vzorky rozřezány pomocí metalografické pily Struers – Discatom 6. Poté bylo provedeno zalisování vzorku do elektricky vodivé hmoty o průměru 50 mm označované pod obchodním názvem Multifast. Pro broušení byly použity magnetické brusné kotouče MD Piano o hrubosti 300, 500 a 1200. Leštění bylo provedeno na leštícím plátně s diamantovou suspenzí 3  $\mu\text{m}$  a 1  $\mu\text{m}$ . Dalším krokem v přípravě metalografického vzorku bylo zviditelnění struktury. Jelikož se jedná o heterogenní svar, každý metalografický vzorek byl leptán dvakrát, aby se předešlo poškození více náchylné uhlíkové oceli. Uhlíková ocel byla leptána 1% roztokem  $\text{HNO}_3$  v ethanolu zvaným Nital 1 %. Svarový kov a austenitická část svarového spoje byly naleptány roztokem  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HNO}_3$  v poměru 1:1:1. Leptání bylo kombinováno namáčením vzorku do leptadla s jemným roztíráním leptadla po leptané ploše pomocí vaty namáčené v tomtéž roztoku. Struktura svaru byla pozorována na světelném mikroskopu Carl Zeiss Observer Z1M.



Obrázek 25 - Světelný optický mikroskop Carl Zeiss Observer Z1M [23]

Pro každý vzorek, který byl kontrolován pomocí metalografického výbrusu dle tabulky 9 bylo vyfoceno minimálně 14 snímků. Každá z vybraných trubek pro metalografické hodnocení byla

rozdělena na více metalografických výbrusů z různých pozic. Pro každou stranu svarového spoje 7 snímků dle obrázku 26. Zelený rámeček označuje makrosnímek, který byl vyfocený při zvětšení 25x. Modře vytyčená oblast byla snímána při zvětšení 100x. Takto vyfocený pás vede od svarového kovu přes celou tepelně ovlivněnou zónu až do oblasti neovlivněného základního materiálu. Červeně vyznačené oblasti jsou mikrosnímky struktury na hranicích ztavení. Tyto snímky byly pořízeny při zvětšení 200x. Pokud byla u vzorku v metalografickém výbrusu zaznamenána neobvyklá struktura, bylo pořízeno více snímků s danou anomálií.

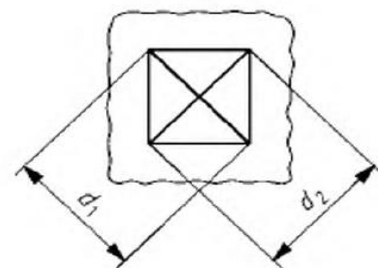
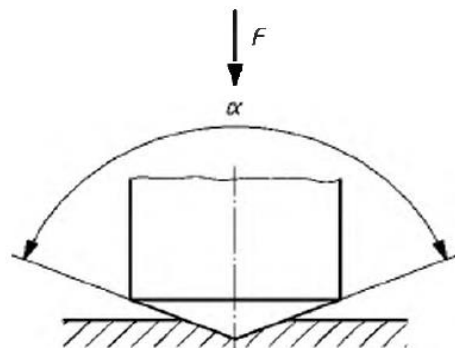


Obrázek 26 – Schéma snímání struktury v metalografickém výbrusu

### Zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse

Indentorem pro měření mikrotvrdosti dle Vickerse je diamantový čtyřboký jehlan o vrcholovém úhlu  $136^\circ$ . Mikrotvrdost je určována dle vzdálenosti mezi úhlopříčkami vtisku dle obrázku 27 [24].

Zkouška byla provedena na mikrotvrdoměru Struers – Durascan G5. Jedná se o zkušební stroj dle který je schopen vyvinout stanovené zatížení v požadovaném rozsahu dle normy ISO 6507-1 [26].



Obrázek 28 - Struers - Durascan G5

Obrázek 27 - Princip zkoušky, geometrie vnikacího tělesa a vtisku podle Vickerse [26]

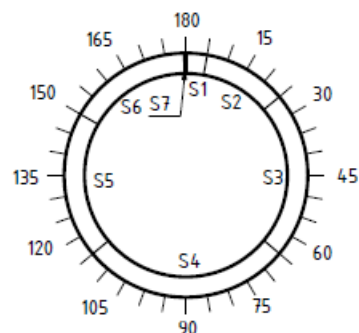
Měření mikrotvrdosti bylo prováděno ve třech liniích příčných k ose svarového spoje a v oblasti ztavení svarového kovu a základního materiálu P265GH. Zkouška byla provedena při nominální hodnotě zkušebního zatížení 0,9807 N. Tato hodnota odpovídá značení mikrotvrdosti HV 0,1 [26].

## 8 Optimalizace svařovacích parametrů

V rámci experimentálního programu se optimalizovala hodnota pulzního proudu a množství přidavného materiálu. Vlastní proces svařování je rozdělen do 7 sektorů, pro které se některé parametry lišily. Sektory byly rozděleny dle tabulky 15 a obrázku 29. Toto rozdělení sektorů je jednotné pro všechny svarové spoje vytvořené v rámci experimentálního programu.

Tabulka 15 - Rozdělení trubky na sektory

| Sektor | Úhel [°] |
|--------|----------|
| S1     | 0-10     |
| S2     | 10-50    |
| S3     | 50-130   |
| S4     | 130-230  |
| S5     | 230-300  |
| S6     | 300-359  |
| S7     | 359-370  |



Obrázek 29 - Rozdělení trubky na sektory, číselník označuje délku svaru v mm

Výchozí parametry pro experimentální část byly převzaty z dat vytvořeny firmou ČEZ Energoservis a jsou uvedeny v tabulce 16. Tyto parametry však byly vytvořeny pro trubky o menším průměru a slabší tloušťce stěny trubky. Z tohoto důvodu byly upraveny parametry již při prvním experimentálním svaru. Zachováno bylo rozdělení trubky do 7 sektorů, průtok ochranného a formovacího plynu, rychlost otáčení svařovací hlavy. Pro svařování byla použita elektroda s příměsí lanthanu o průměru 2,4 mm s úhlem nabroušení 30° a otupením na 0,2 mm. Svarový spoj se skládá z kořenové a krycí vrstvy.

Tabulka 16 - Výchozí parametry dle ČEZ Energoservis

| Výchozí svar dle ČEZ Energoservis |                          |          |     |     |     |     |     |     |  |
|-----------------------------------|--------------------------|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| Parametry                         | Sektor                   | S1       | S2  | S3  | S4  | S5  | S6  | S7  |  |
|                                   | Průtok ochranného plynu  | 14 l/min |     |     |     |     |     |     |  |
|                                   | Průtok formovacího plynu | 2 l/min  |     |     |     |     |     |     |  |
|                                   | Kořenová vrstva          |          |     |     |     |     |     |     |  |
|                                   | $I_p$ [A]                | 110      | 105 | 105 | 95  | 95  | 90  | 100 |  |
|                                   | $I_z$ [A]                | 60       | 60  | 58  | 55  | 55  | 55  | 58  |  |
|                                   | $V_{dr}$ [mm/min]        | 250      | 250 | 300 | 300 | 300 | 300 | 350 |  |
|                                   | U [V]                    | 8        | 7,9 | 7,8 | 7,8 | 7,8 | 7,9 | 8   |  |
|                                   | $V_{ot}$ [mm/min]        | 50       | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  |  |
|                                   | Krycí vrstva             |          |     |     |     |     |     |     |  |
|                                   | $I_p$ [A]                | 70       | 65  | 64  | 62  | 60  | 57  | 62  |  |
|                                   | $I_z$ [A]                | 40       | 40  | 40  | 40  | 40  | 40  | 42  |  |
|                                   | $V_{dr}$ [mm/min]        | 350      | 330 | 280 | 200 | 250 | 270 | 280 |  |
|                                   | U [V]                    | 8,6      | 8,4 | 8,4 | 8,4 | 8,5 | 8,5 | 8,5 |  |
|                                   | $V_{ot}$ [mm/min]        | 40       | 40  | 40  | 40  | 40  | 40  | 40  |  |

Pro každý ze svarů jsou uvedeny v příloze parametry, kterými byl daný svarový spoj proveden. Svary jsou označeny a seřazeny dle tabulky 7.

## 8.1 Svary T1Sv – T4Sv

Tyto svarové spoje byly stehovány metodou MicroTIG, polotovary byly upraveny do svarového úkosu tvaru U a použitým přídavným materiálem byl Sv07Ch25N13.

### T1Sv

Pro kořenovou vrstvu byly použity parametry dle předlohy uvedené v tabulce 16. Tím bylo dosaženo pro U úkos po první neodborné vizuální kontrole v oblasti kořene svaru dobrých výsledků. V oblasti zápalu oblouku byla znatelná v kořenové vrstvě svarového spoje užší kořenová část. Zúžení však bylo zanedbatelné. Ve vnější vrstvě kořenové části docházelo k rovnoměrnému natavování hran úkosu na vrchní straně úkosu.

Pro krycí vrstvu byly upraveny základní parametry dle tabulky 16 a to tak, že k hornímu svařovacímu proudu  $I_p$  bylo přidáno 10 A a pro dolní svařovací proud  $I_z$  bylo přidáno 5 A. Dále bylo přidáno 50 mm/min k rychlosti posuvu přídavného  $v_{dr}$ . Tyto změny byly provedeny pro všechny sektory. V základním nastavení byl pozměněn rozkmit wolframové elektrody na 5,5 mm. Po svaření těmito parametry vznikla krycí vrstva s jemnou strukturou a malým převýšením hlavy svaru.

### T2Sv

Kořenová vrstva svaru byla svařena stejnými parametry jako u vzorku T1Sv. Svarová lázeň se během procesu svařování chovala odlišněji, než u vzorku číslo jedna. Rozdíl spočíval v nenatavení úkosové hrany jako tomu bylo u vzorku T1Sv. Příčinou mohlo být rozdílné sesazení trubek.

U krycí vrstvy byla navýšena hodnota rychlosti podávání přídavného drátu  $v_{dr}$  o 25 mm/min. Toto navýšení bylo provedeno z důvodu dosažení vyššího převýšení hlavy svaru. V průběhu svařování byl pak přidán svařovací proud a rychlost podávání přídavného drátu viz příloha 2. Navýšení parametrů během svařování mělo za účel zjišťování limitních hodnot svařitelnosti, limitních hodnot natavování přídavného materiálu.

### T3Sv

Kořenová vrstva byla svařena dle stejných parametrů jako u vzorku T1Sv. U tohoto vzorku bylo dbáno na vyšší čistotu svarových ploch, a proto byly opětovně očištěny jemným broušením a přečištěny acetonem. Hned po zápalu oblouku byla elektroda pomocí dálkového ovládání přisunuta od 0,1 mm ke korozivzdorné části svařence. Předběžná vizuální kontrola neobjevila žádné vady v kořenové oblasti svaru.

V krycí vrstvě byla navýšena pro sektory S3 až S7 rychlost podávání drátu  $v_{dr}$  o 25 mm/min. Tím bylo dosaženo výrazného převýšení hlavy svaru.

Tento vzorek byl vybrán pro kontrolu metalografickým výbrusem a měřením mikrotvrdomosti.

## T4Sv

Kořenová vrstva byl svařena stejnými parametry jako u vzorku T1Sv. Rozdíl byl v posunu elektrody ke korozivzdorné oceli jako u vzorku T3Sv o 0,1 mm.

Pro krycí vrstvu bylo přidáno v sektoru S1 a S2 25 mm/min k hodnotě posuvu přidavného drátu  $v_{dr}$ . Hned v sektoru S1 došlo k namočení elektrody do přidavného materiálu, a tudíž ke zkratu. Po odstranění přebytečného přidavného materiálu, očištění a nabroušení elektrody byla rychlost podávání přidavného drátu v sektoru S1 a S2 ponížena o 25 mm/min. Poté byl svar úspěšně svařen dle upravených parametrů.

## 8.2 Svary T5Sv – T8Sv

Svarové spoje s tímto označením byly stehovány laserem. Tvar úkosu polotovaru byl U a přidavný materiál s označením Sv07Ch25N13. Svary T6Sv a T8Sv nebyly svařeny celé.

### T5Sv

Parametry byly použity totožné jako u vzorku T3Sv. Posun elektrody ke korozivzdorné straně svarového spoje byl navýšen na 0,3 mm.

### T6Sv

U kořenové vrstvy byla pro sektory S1 a S2 přidána rychlost posuvu přidavného materiálu  $v_{dr}$  o 25 mm/min. Posuv elektrody k korozivzdorné oceli byl pro vzorek T6Sv 0,1 mm. Z předběžné vizuální kontroly byla kořenová vrstva dobře provařena.

Krycí vrstva byla svařována dle parametrů vzorku T5Sv. V oblasti mezi přechodem ze sektoru S3 a S4 došlo k namočení elektrody do svarové lázně. Od této pozice byla svařovaná trubka otočena o 10° a byl program znovu spuštěn od začátku. Tím vnikla na povrchu svarová proláklina. Na druhý start však v oblasti přechodu mezi S3 a S4 k zalepení elektrody nedošlo. Jednalo se tedy nejspíše o nahodilý jev.

### T7Sv

Použité parametry pro svar T7Sv vycházely z parametrů pro T3Sv. V kořenové vrstvě bylo přidáno pro sektory S1 a S2 25 mm/min k rychlosti podávání přidavného drátu  $V_{dr}$ . Pro krycí vrstvu byl navýšen horní svařovací proud  $I_p$  o 5 A v sektorech S2 a S3.

Tento vzorek byl vybrán pro kontrolu metalografickým výbrusem a měřením mikrotvrdomosti.

### T8Sv

Výchozími parametry pro tento svar byly parametry ze vzorku T7Sv. V kořenové vrstvě byly přidány 2 A k hornímu svařovacímu proudu  $I_p$  v sektoru S1 a S2. Tím došlo k vizuálnímu zlepšení struktury v oblasti kořene svaru.

Pro krycí vrstvu byly použité stejné parametry jako u vzorku T7Sv. Při svařování krycí vrstvy došlo nejdříve k přitavení elektrody k přidavnému materiálu a poté při opětovném spuštění přitavení konce drátu přidavného materiálu k materiálu základnímu. Tato skutečnost nastala i když bylo svařováno stejnými parametry jako u vzorku T7Sv. Důvodem by mohlo být rozdílná interpass teplota. Mezi svařováním kořenové a krycí vrstvy tohoto svaru byla velká prodleva, kdy byla prováděna úprava programů ve svařovacím zdroji. Během této doby se teplota svařence výrazně snížila, téměř až k teplotě okolí. Proto byl pro další vzorky používán termočlánek TC-08 od firmy Omega pro orientační měření interpass teploty.

### 8.3 Svary T9Sv – T10Sv

Takto označené svarové spoje byly stehovány ručně metodou TIG. Polotovary byly obrobeny do úkosu U. Použitým přídavným materiálem byl Sv07Ch25Ni3.

#### T9Sv

U tohoto vzorku byly použity pro kořenovou vrstvu parametry shodné s programem pro T8Sv. Ze spodní strany kořene byly znatelné nečistoty zanesené do svarového kovu. Tyto nečistoty po broušení pravděpodobně nebyly dostatečně očištěny před stehováním trubek.

Před svařováním krycí vrstvy byla naměřená interpass teplota 2 cm od rohu úkosu na uhlíkové straně svarového spoje 51 °C.

Parametry pro krycí vrstvu byly upraveny. Horní svařovací proud  $I_p$  v sektoru S3 byl navýšen na 85 A. Během svařování došlo k uchycování přídavného materiálu k materiálu základnímu, takže bylo nutné navýšit svařovací proud manuálně o 10 A. Následně pak došlo dvakrát k mírnému rozstříku svarové lázně.

#### T10Sv

Kořenová vrstva byla svařena dle parametrů použitých pro T9Sv. Čistota kořene svaru opět odpovídala kvalitě očištění stejně jako u předchozího vzorku.

Interpass teplota mezi vrstvou kořenovou a krycí byla 75 °C.

Pro krycí vrstvu byla upravena hodnota posuvu přídavného materiálu. V sektoru S1 a S2 byla hodnota  $v_{dr}$  snížena o 25 mm/min a pro sektor S3 byla tato hodnota snížena o 15 mm/min.

### 8.4 Svary V2Sv – V5Sv

Svarové spoje s tímto označením byly stehovány laserovou metodou. Použitý úkos byl tvaru V a přídavným materiálem byl materiál s označením Sv07Ch25Ni3. Níže sepsaným vzorkům předcházely vzorky V0Sv a V1Sv, které sloužily pro základní orientaci v chování svarové lázně při svařování úkosu tvaru V. Tyto vzorky neměly výpovědní hodnotu, a proto nebyly použity pro NDT a DT testování.

#### V2Sv

Kořenová vrstva byla svařena dle parametrů uvedených v příloze 11. Tyto parametry byly úspěšně odzkoušeny u předchozích vzorků V0Sv a V1Sv.

Orientační hodnota teploty interpass byla 80 °C.

Krycí vrstva byla svařena dle parametrů přílohy 11. Řešena zde byla hodnota rychlosti posuvu přídavného drátu, kterou se v předešlých dvou vzorcích nepodařilo dostatečně odladit. Pro zkoušené parametry měla krycí vrstva z předběžné vizuální kontroly uspokojivé parametry.

#### V3Sv

Svar V3Sv byl svařen dle stejných parametrů jako vzorek V2Sv. Lišila se interpass teplota mezi jednotlivými svary. U vzorku V3Sv byla interpass teplota 70 °C. Stejnými parametry bylo svařováno z důvodu ověření účinnosti předchozích parametrů.

#### V4Sv

Kořenová vrstva byla svařena podle parametrů V3Sv. Přibližná interpass teplota byla 60 °C.

Pro krycí vrstvu svaru byla upravena hodnota rychlosti  $v_{dr}$  pro sektory S1 a S2 na 190 mm/min.



## V5Sv

U kořenové vrstvy svaru V5Sv byl snížen parametr horního svařovacího proudu pro sektory S1 až S5 o hodnotu 2,5 A. Účelem bylo ponížení vneseného tepla do svařované součásti. Přibližná interpass teplota byla 105 °C.

Krycí vrstva byla svařena pro sektory S1 až S6 rychlostí posuvu přídavného materiálu 195 mm/min a pro sektor S7 rychlostí 210 mm/min. Touto úpravou parametrů došlo k vyvážení šíře kresby krycí vrstvy svaru.

## 8.5 Svary T1Ex – T4Ex

Vzorky s označením T1Ex – T4Ex byly svařeny s přídavným materiálem Exaton Ni72HP. Svařované trubky byly upraveny úkosem typu U a stehovány laserem. Vzorek T1Ex byl pouze zkušební bez výpovědní hodnoty.

### T2Ex

Kořenová vrstva byla svařena dle parametrů vzorku T10Sv. Při předběžné vizuální kontrole kořene svaru byla objevena nestálá kresba. V oblasti sektorů S5 až S7 výrazně zhrubělá. Tato kresba mohla vzniknout v důsledku rozdílné viskozity mezi použitými přídavnými materiály. Změřená interpass teplota byla 115 °C.

Parametry pro krycí vrstvu byly přejaty od vzorku T7Sv. Parametr rychlosti podávání přídavného drátu  $v_{dr}$  byl pro sektory S1 a S2 ponížen o 75 mm/min a pro sektory S3 až S7 ponížen o 50 mm/min. Svar proběhl úspěšně bez průvodních problémů během svařování.

### T3Ex

U kořenové vrstvy byla kvůli tvaru kořenové vrstvy vzorku T2Ex upravena hodnota horního svařovacího proudu  $I_p$  pro polohy S5 až S7 o 2 A. Při předběžné vizuální kontrole bylo pozorováno zlepšení struktury kořene svaru v této oblasti. Interpass teplota byla 100 °C.

V krycí vrstvě byla ubrána hodnota rychlosti podávání přídavného drátu  $v_{dr}$  pro sektory S3 až S7 o 25 mm/min. Od sektoru S3 došlo ke kontaminaci wolframové elektrody přídavným materiálem. Navzdory této komplikaci byl proces svařování úspěšně dokončen. Kontaminace wolframové elektrody byla způsobena zachycením přídavného drátu na hranici úkosu a jeho následné vymrštění do elektrody, kde se natavil a tím došlo ke kontaminaci.

### T4Ex

Kvůli zlepšení tvaru kořene svaru u vzorku T3Ex díky změně parametrů byly hodnoty horního svařovacího proudu  $I_p$  pro polohy S4 a S5 sníženy o 2 A a poloha S6 o 1 A. Zároveň byla upravena poloha vyústění přídavného drátu vůči elektrodě. Úhel byl navýšen na 80°. Interpass teplota mezi vrstvami byla 85 °C.

Krycí vrstva byla svařena dle parametrů vzorku T3Ex. Úpravou úhlu ústí podavače drátu bylo zamezeno zachytávání přídavného materiálu o materiál základní. Úpravou tohoto úhlu bylo docíleno plynulejšího natavování přídavného materiálu.

## 8.6 Svary V1Ex – V4Ex

Vzorky svarového spoje označeny V1Ex – V4Ex byly svařeny přídavným materiálem Exaton Ni72HP. Tvar úkosu pro tyto vzorky byl typ V. Stehování těchto trubek bylo provedeno laserovou technologií.

### V1Ex

Kořenová vrstva byla svařena podle parametrů vzorku V4Sv. Přídavný materiál nebyl těmito parametry dostatečně rychle natavován a přídavný drát byl ohýbán mezi V úkosem a svarovou lázní. Interpass teplota byla změřena na 110 °C.

Krycí vrstva byla svařena dle parametrů vzorku V5Sv. V oblasti 90° došlo k přilepení přídavného materiálu a elektrody. Před dalším svařováním byl upraven úhel ústí podavače přídavného drátu vůči elektrodě na 80°. Po této úpravě byl stejnými parametry vzorek úspěšně svařen. Krycí vrstva však už neměla kvalitativní výpovědní hodnotu.

### V2Ex

Před svařováním byl upraven úhel ústí podavače drátu vůči elektrodě na 75°. Pro kořenovou vrstvu byla snížena hodnota parametru  $v_{dr}$  pro sektor S3 o 25 mm/min. Tím se snížil rozdíl hodnot mezi sektorem S2 a S3, který byl v předchozím vzorku 50 mm/min a způsoboval přeplnění svarové lázně. Interpass teplota byla 130 °C.

Pro krycí vrstvu byly navýšeny parametry horního svařovacího proudu  $I_p$  pro sektory S1 až S3 o hodnotu 2,5 A. Svar byl v oblasti S4 výrazněji převýšen vůči ostatním sektorům svaru.

### V3Ex

Pro vzorek V3Ex byla zvýšena hodnota horního svařovacího proudu  $I_p$  o 2,5 A pro sektory S1 až S3 u kořenové vrstvy. Interpass teplota byla 130 °C.

Pro krycí vrstvu byly upraveny hodnoty podávání přídavného materiálu kvůli rozdílům převýšení hlavy svaru v krycí vrstvě svaru. Pro sektory S1 až S3 byla hodnota  $v_{dr}$  navýšena o 15 mm/min a pro sektory S5 až S7 navýšena o 10 mm/min. U sektoru S4 byla tato veličina snížena o 10 mm/min.

### V4Ex

Vzorek V4Ex byl svařen dle stejných parametrů jako V3Ex. Stejná byla i interpass teplota mezi jednotlivými housenkami. Na tomto vzorku nebyla provedena NDT ani DT kontrola.

## 9 Vyhodnocení svarových spojů

Hodnocení kvality svarových spojů bylo posuzováno nedestruktivními a destruktivními metodami zkoušení. Popis vad nalezených při NDT hodnocení svarů byl proveden dle normy ČSN EN 6520-1. Pro každou sérii vzorků byl určen jeden klíčový vzorek, u kterého byly provedeny destruktivní metody kontroly. Ty měly za účel posoudit šířku TOO, výskyt vměstků a s hodnocením mikrotvrdosti určit i druh vzniklé struktury v oblasti svarového spoje. Metalografické hodnocení a zkouška mikrotvrdosti byla provedena i kvůli kontrole vzniku nežádoucích zákalných struktur. Klíčovými vzorky byly vzorky s označením T3Sv, T7Sv, T10Sv a V4Sv.

Tabulka 17 - Počet metalografických výprusů pro jednotlivé klíčové vzorky

| Svarový spoj                   | T3Sv | T7Sv | T10Sv | V4Sv |
|--------------------------------|------|------|-------|------|
| Počet metalografických výprusů | 4    | 4    | 3     | 2    |

Pro ukázkou výsledků kontroly a hodnocení byl zvolen svařovaný vzorek s označením T7Sv. Hodnoty svařovacích parametrů, výsledky NDT a DT zkoušek ostatních vzorků jsou uvedeny v přílohách dle tabulky číslo 9.

### Hodnocení vzorku T7Sv

Vzorek s označením T7Sv byl svařen dle parametrů uvedených v tabulce 17. Postup k optimalizaci těchto parametrů je popsán v kapitole 8.2.

Tabulka 18 - Svařovací parametry pro vzorek T7Sv

| Svar T7Sv (Pk7/21) |                   |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------------|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Parametry          | Sektor            | S1  | S2  | S3  | S4  | S5  | S6  | S7  |
|                    | Kořenová vrstva   |     |     |     |     |     |     |     |
|                    | $I_p$ [A]         | 110 | 105 | 105 | 95  | 95  | 90  | 100 |
|                    | $I_z$ [A]         | 60  | 60  | 58  | 55  | 55  | 55  | 58  |
|                    | $V_{dr}$ [mm/min] | 275 | 275 | 300 | 300 | 300 | 300 | 350 |
|                    | U [V]             | 8   | 7,9 | 7,8 | 7,8 | 7,8 | 7,9 | 8   |
|                    | $V_{ot}$ [mm/min] | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  |
|                    | Krycí vrstva      |     |     |     |     |     |     |     |
|                    | $I_p$ [A]         | 80  | 80  | 80  | 75  | 70  | 70  | 75  |
|                    | $I_z$ [A]         | 45  | 45  | 45  | 45  | 45  | 45  | 47  |
|                    | $V_{dr}$ [mm/min] | 425 | 405 | 380 | 300 | 350 | 370 | 380 |
|                    | U [V]             | 8,6 | 8,4 | 8,4 | 8,4 | 8,5 | 8,5 | 8,5 |
|                    | $V_{ot}$ [mm/min] | 40  | 40  | 40  | 40  | 40  | 40  | 40  |

Pro tento vzorek byla provedena vizuální, kapilární a prozařovací zkouška. Zároveň byly připraveny 4 metalografické výbrusy dle tabulky 17 a provedena zkouška mikrotvrdosti.

Při vizuální kontrole byla objevena vada s označením 515 dle normy ČSN EN ISO 6520-1. Vadou je tedy hubený kořen. Tato vada byla nalezena v sektoru S1 v oblasti zápalu oblouku. Tato vada by měla být snadno napravitelná zvýšením horního svařovacího proudu  $I_p$ . Jedná se o vadu přípustnou. Znázornění a popis vady je zaznamenán v tabulce číslo 19.



Obrázek 30 - Označení pozice odběru vzorků

Tabulka 19 – Vyhodnocení vizuální kontroly vzorku T7Sv

| Vizuální zkouška |                |  |                      |  |
|------------------|----------------|--|----------------------|--|
| Pořadové číslo   | Oblast výskytu | Číselné označení dle ČSN EN ISO 6520-1 | Poloha indikace (mm) |  |
| 1                | K              | 515                                    | 180-0                |  |
|                  |                |  |                      |  |
|                  |                |  |                      |  |
|                  |                |  |                      |  |

Po provedení kapilární zkoušky po celém obvodu svarového spoje nebyly na zkušebním vzorku nalezeny žádné indikace. Svar byl tedy v rámci této kontroly bez povrchových vad. Záznam z kapilární zkoušky je v tabulce 20.

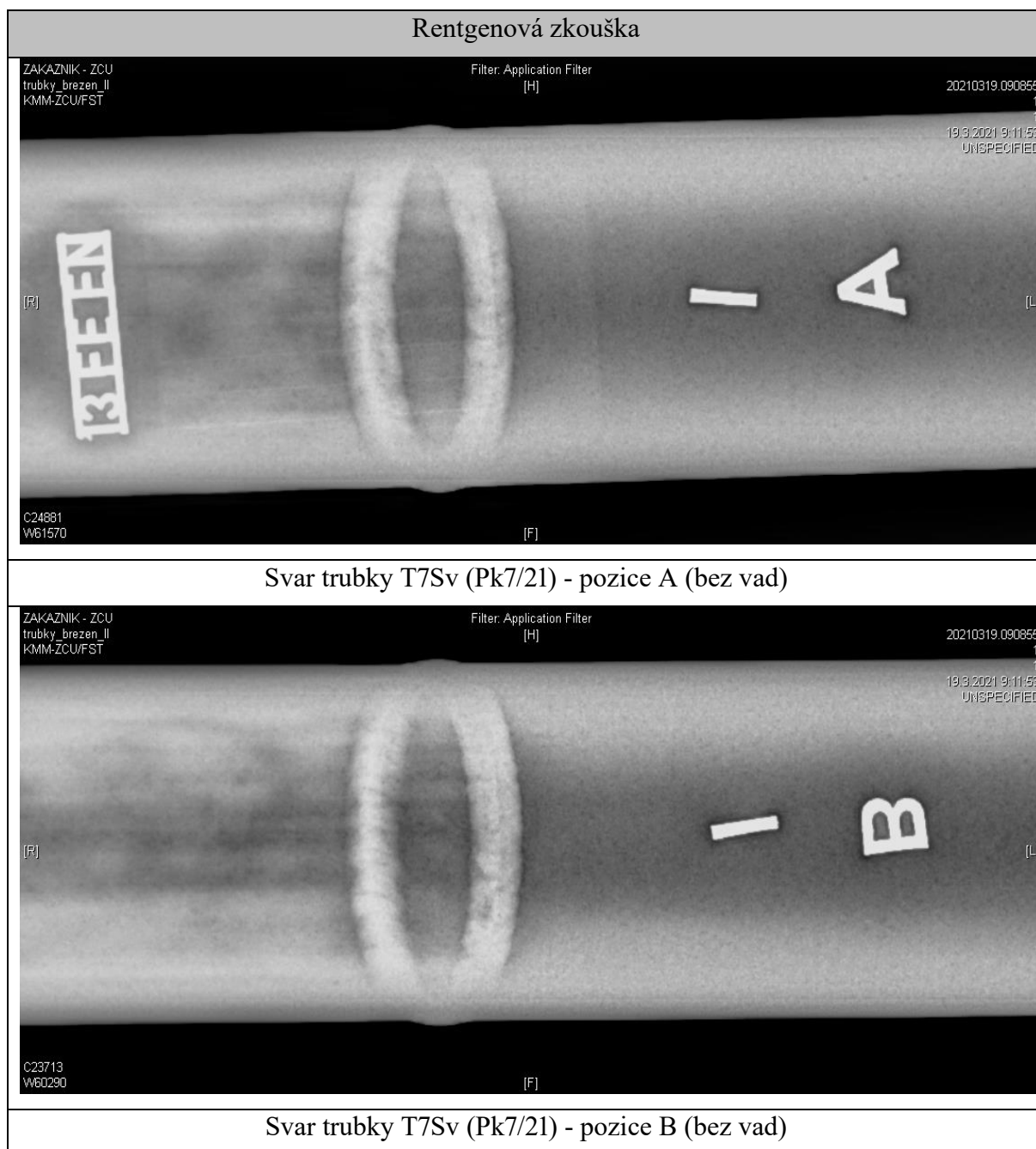
Tabulka 20 - Vyhodnocení kapilární zkoušky vzorku T7Sv

| Kapilární zkouška  |  |
|--|--|
|  |  |
| Výsledek kapilární zkoušky vzorku T7Sv (Pk7/21), (bez vad) |  |

V tabulce číslo 21 jsou vyobrazeny výsledky z prozařovací zkoušky. Na snímcích nebyla objevena žádná vada.

Dále byly provedeny 4 metalografické výbrusy pro různé svařovací polohy. Výbrusy 7/1 byl odebrán z sektoru S2, 7/2 ze sektoru S3 a výbrusy 7/3 a 7/4 byly odejmuty ze oblasti sektoru S4. Oblast sektoru je podstatná z důvodu výrazného ovlivnění svarové lázně působením gravitační síly. Gravitační síla komplikuje provaření kořene svaru.

Tabulka 21 - Výsledek prozařovací zkoušky vzorku T7Sv



Z obrázku 31 a 32 je pozorovatelný rozdíl mezi provařením kořene svaru mezi výbrusy 7/1 a 7/4. Na obrázku 31 je vidět TOO u uhlíkové strany oceli, tak i u strany austenitické. V oblasti austenitu došlo k viditelnému zhrubnutí zrna. V oblasti odebrání vzorku 7/1 je viditelné přesné sesazení trubek. Tento faktor je pro úspěšné provaření kořene svaru velmi podstatný. Z obrázku 32 je patrné, že v této oblasti nebylo přesné sesazení trubek před stehováním. To má za následek nerovnoměrné rozložení průřezu svarového kovu. Převýšení svarového kovu obou zmíněných vzorků je dostatečné. Přechody mezi ZM a SK jak u kořenové, tak u krycí vrstvy byly pro všechny metalografické výbrusy vzorku T7Sv plynulé.



Obrázek 31 - Makro vzorku T7Sv - 7/1, zvětšeno 25x, leptáno roztokem HCl, H<sub>2</sub>O a HNO<sub>3</sub>



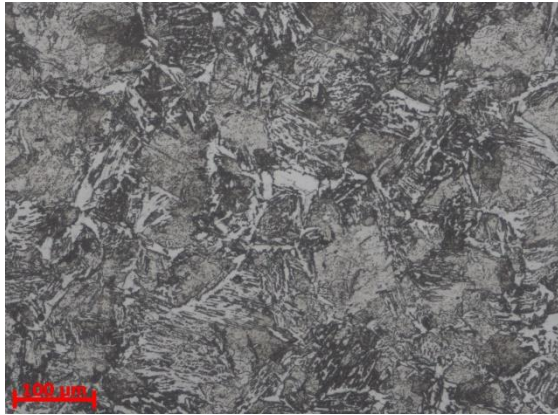
Obrázek 32 - Makro vzorku T7Sv - 7/4, zvětšeno 25x, leptáno roztokem HCl, H<sub>2</sub>O a HNO<sub>3</sub>

Pomocí metalografického výbrusu byla určována struktura svarového spoje. Nejpodstatnější oblastí pro pozorování byla oblast uhlíkové oceli v blízkosti svarového kovu, kde mohlo dojít k strukturní přeměně ZM z feriticko-perlitické na martenzitickou. Pro určení této přeměny bylo nutné vybrat výbrus s největší TOO, kde je nejvyšší pravděpodobnost výskytu této přeměny. Po nasnímání struktury byl pak tento vzorek podroben zkoušce mikrotvrdosti pro zjednodušení strukturní analýzy.

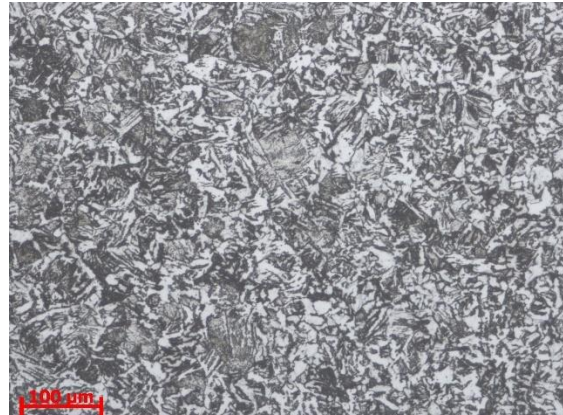


Obrázek 33 - Makrosnímek vzorku T7Sv - 7/4, zvětšeno 100x, leptáno 1% Nitalem; přechod svarového kovu do ZM P265GH, struktura TOO

Na obrázku 33 je na přechodu mezi SK a ZM pozorovatelné oduhličené pásmo na straně uhlíkové oceli. To je způsobeno výrazně vyšší rozpustností uhlíku v austenitu než ve feritu. Obrázky 34-37 zobrazují nejčastější strukturu vznikající při svařování popisovaných svarových spojů. Obrázky 34-36 postupně vyobrazují struktury v TOO směrem od SK do ZM. Na obrázku 35 je vidět přehřátá hrubozrnná struktura složená převážně z Widmanstättenovi struktury. Ta snižuje pevnost a houževnatost této oblasti. Widmanstättenova struktura obsahuje jehlice feritu směřující od hranic původních zrn dovnitř a dále strukturu perlitickou. Směrem od SK se velikost zrna zmenšuje až do oblasti normalizační oblasti. Na obrázku 35 je pozorovatelná jemnější Widmanstättenova struktura s vyšším zastoupením feritu. Obrázek 36 je vyfocen na hranici tepelně ovlivněné oblasti a základního neovlivněného materiálu.



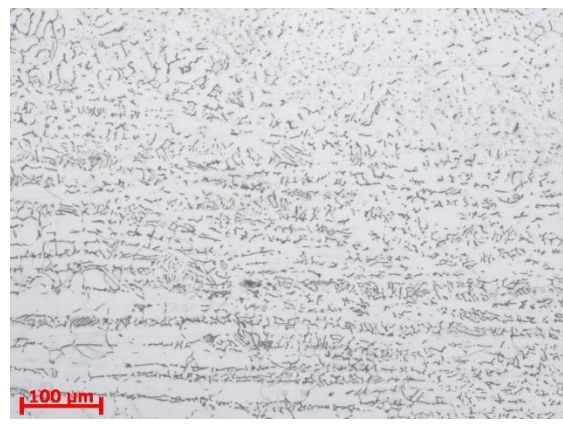
Obrázek 34 - Vzorek T7Sv/4, zvětšeno 100x,  
leptáno roztokem HCl, H<sub>2</sub>O a HNO<sub>3</sub>



Obrázek 35 - Vzorek T7Sv/4, zvětšeno 100x,  
leptáno roztokem HCl, H<sub>2</sub>O a HNO<sub>3</sub>



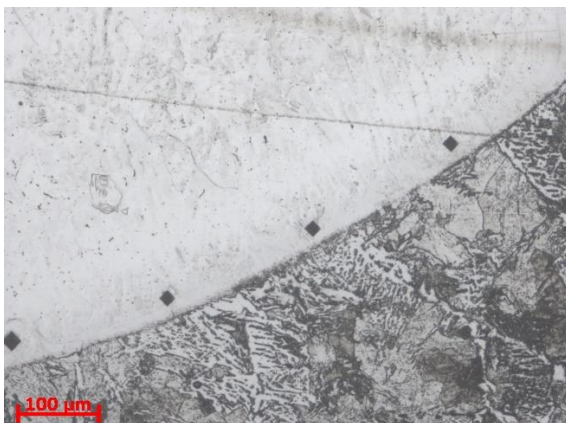
Obrázek 36 - Vzorek T7Sv/4, zvětšeno 100x,  
leptáno roztokem HCl, H<sub>2</sub>O a HNO<sub>3</sub>



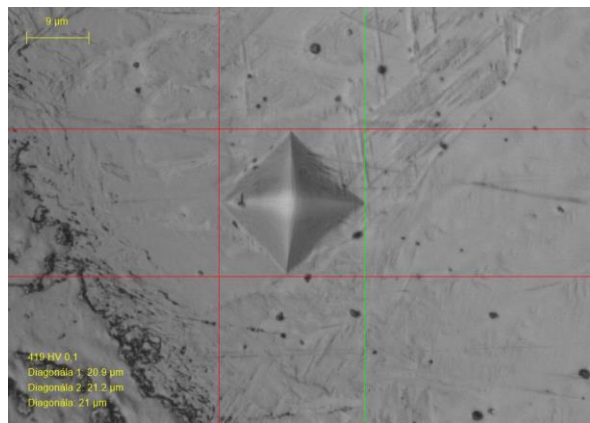
Obrázek 37 - Vzorek T7Sv/4, zvětšeno 100x,  
leptáno roztokem HCl, H<sub>2</sub>O a HNO<sub>3</sub>

Obrázek 37 vyobrazuje strukturu mezi SK a ZM Wr.N. 1.4541. Struktura je převážně austenitická s  $\delta$  feritem. Tmavé pole je právě zmíněný  $\delta$  ferit, jehož vznik je podmíněn vylučováním feritotvorných karbidů chromu. Vyšší podíl  $\delta$  feritu může způsobit zkřehnutí a náchylnost austenitu k tvorbě trhlin za horka.

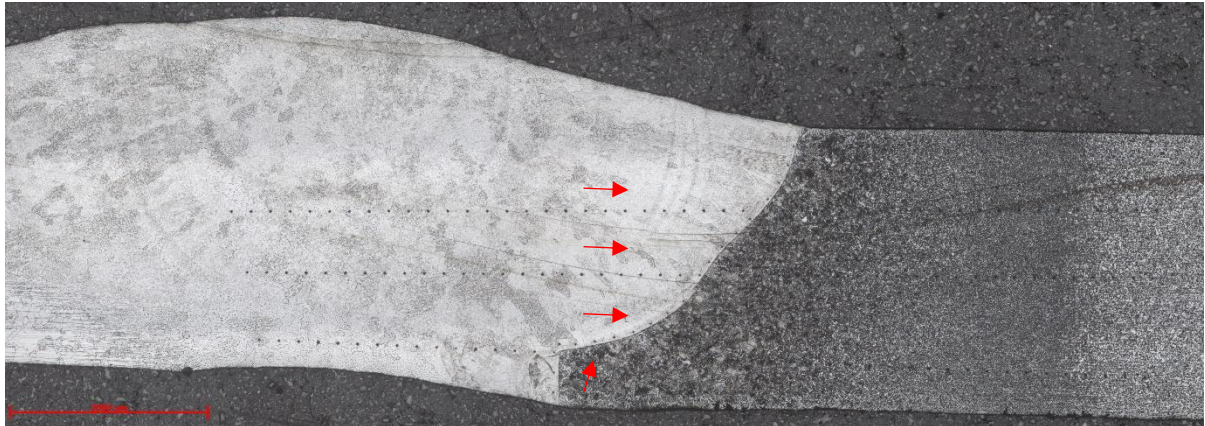
Následně bylo na výbrusu 7/3 provedeno měření mikrotvrdosti HV 0,1.



Obrázek 38 - Hranice ztavení ZM P265GH a SK, zvětšeno 100x, oblast oduhličené zóny

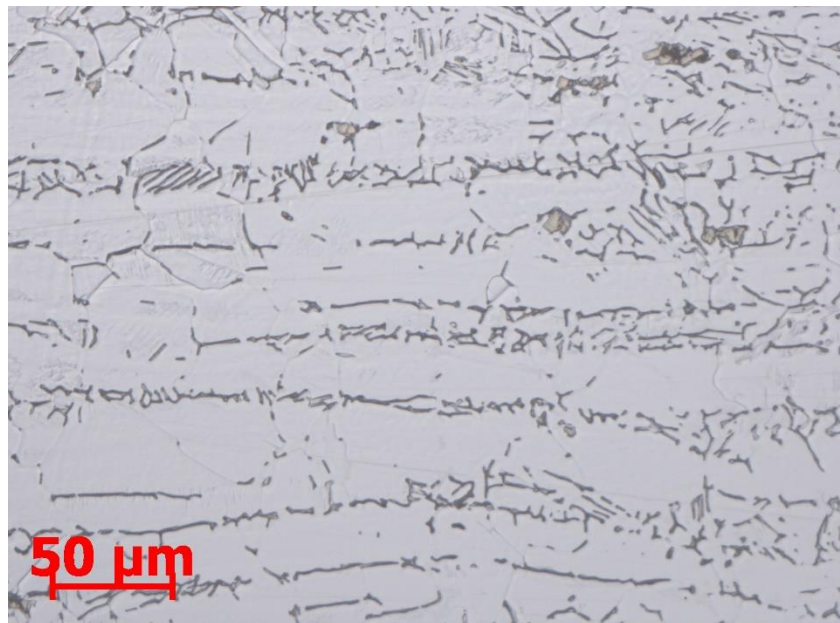


Obrázek 39 - Snímek vtisku na hranici ztavení v oblasti SK



Obrázek 40 - Makrosnímek vzorku T7Sv 7/3, stav po provedení zkoušky mikrotvrdomosti, červeně je vyznačen směr měření

Mikrotvrdomost byla měřena na straně základního materiálu P265GH. Smyslem měření byla pomoc při analýze hodnocené struktury svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti. Hodnoty mikrotvrdomosti jednotlivých linií jsou uvedeny v příloze 7. Na hranici ztavení ZM a SK na straně SK byla naměřena zvýšená tvrdost dosahující místy hodnoty až 450 HV 0,1, což by mohlo odpovídat pásmu karbidů. Pro přesné určení struktury by bylo nutné podrobit vzorky podrobnější materiálové analýze. Toto pásmo je vyobrazeno na obrázku 38. V TOO konkrétně v přehřáté oblasti s hrubým zrnem se tvrdost pohybovala okolo 200 HV 0,1, což by odpovídalo tvrdosti Widmanstättenovi struktury. Hodnota tvrdosti v oblasti základního materiálu P265GH na rozhraní ZM a SK značí lokální přítomnost zákalných struktur. Po přechodu do normalizačně vyžívané struktury tvrdost klesla na hodnoty okolo 170 HV 0,1.



Obrázek 41 - Vzorek T7Sv/3, zvětšeno 200x, leptáno roztokem HCl, H<sub>2</sub>O a HNO<sub>3</sub>

Na obrázku 41 je vyobrazeno rozhraní mezi ZM Wr.N. 1.4541 a SK. Na obrázku je patrný výskyt vměstků. Dle tvaru a barvi lze předpokládat, že se jedná o vměstky na bázi TiC nebo TiN.



## 10 Diskuze

Cílem diplomové práce byla optimalizace parametrů orbitálního svařování pro heterogenní svarové spoje na trubkách o průměru 59 mm. V rámci optimalizace byly vyzkoušeny 3 druhy stehování, 2 druhy úkosu a 2 druhy přídavných materiálů. Pro přehlednost jsou všechny provedené svarové spoje uvedeny v tabulce 9. V této tabulce jsou uvedeny pro každý svarový spoj svařovací parametry a výsledky NDT a DT metod hodnocení.

Základem pro dosažení kvalitního svarového spoje při automatizovaném svařování je příprava. Příprava zahrnuje přesnost polotovarů zejména jejich kruhovitost. Při sestavování trubek pro stehování je kruhovitost zásadním parametrem. Pokud trubky nejsou řádně vyrobeny, znesnadňuje to nejen přípravu v podobě stehování, ale i kvalitu vlastního svarového spoje. Přesazením trubek může dojít k nedokonalému provaření kořene svaru nebo naopak velkému převýšení v oblasti hlavy svaru. Neprovaření kořene svaru je vada nepřípustná, a tudíž může tímto způsobem dojít k výrobě vadných svařenců. Před stehováním i vlastním svařováním je nutné svarové plochy řádně obrousit, zejména uhlíkovou část svarového spoje. Dalším krokem je odmaštění svařovaných ploch například acetylenem.

Pro porovnání byly vyzkoušeny 2 typy úkosu. Úkos tvaru U (tulipán) a úkos tvaru V s úhlem 80°. Při výpočtu průřezu těchto úkosů je teoreticky pro vyplnění U úkosu třeba více přídavného materiálu. Tvaru U má však výhodu lepší přístupnosti elektrody k svařované ploše. Tím je pro svářečského operátora snazší manipulace jak při stehování, tak při vlastním procesu svařování. Úkos V je však jednodušší a levnější pro výrobu. Z hlediska svařených vzorků nelze dle metod zkoušení jednoznačně zhodnotit rozdíl kvality mezi těmito úkosy. Pro získání jednoznačných hodnot k porovnání by musely být provedeny rozsáhlejší mechanické zkoušky pro sérii stejně svařených vzorků.

Stehování bylo provedeno 3 způsoby, a to metodou microTIG, laser a ruční stehování metodou TIG. Stehování bylo provedeno bez použití přídavného materiálu. Největší ovlivnění úkosu bylo způsobeno ruční TIG metodou. U laserové a microTIG technologie je nutné vyzdvihnout i pravidelnost a přesnost stehování z důvodu automatizace těchto procesů. U ručního TIG stehování nebylo dosaženo tak kvalitního sesazení trubek jako u dvou výše zmíněných automatizovaných metod. Problém se sesazením trubek při ručním stehování by jistě mohl být napraven volbou vhodnějšího přípravku. U stehování je podstatné, aby vytvořené stehy udržely váhu svařovací hlavy. Pro úkos tvaru U byly tyto podmínky splněny. Trubky s V úkosem byly stehovány všechny laserovou metodou. U dvou sestehovaných polotovarů, během kterých bylo prováděno svařování kořenové vrstvy byla slyšitelná akustická emise, která by mohla být přirovnávána k praskání stehů. Tato emise proběhla však pouze u dvou vzorků a nevedla po kontrole NDT zkouškami k druhotným vadám. Je však nutné brát na pevnost nastehovaného spoje ohled, jelikož zatížení svařovací hlavou je při procesu svařování značné.

Po přípravě trubek následoval vlastní proces svařování. Pro první svarové spoje se vycházelo z parametrů programu od firmy ČEZ Energioservis. Tyto parametry musely být upraveny pro podmínky experimentu. Zachován byl postup svařování na dvě vrstvy, tedy na kořenovou a krycí vrstvu. Prvních deset vzorků bylo svařeno stejným přídavným materiálem Sv07Ch25N13 a se stejným úkosem U, ale s rozdílnými druhy techniky stehování. K optimalizaci docházelo jak v rámci jednotlivých skupin druhů stehování, tak i v rámci svařování s výše zmíněným přídavným materiálem pro úkos tvaru U. Poté byl změněn tvar úkosu na V a pro tento tvar úkosu byl vytvořen nový program. Pro úkos V byly svařeny nejdříve dva vzorky svarového spoje pro rámcový odhad svařovacích parametrů. Až poté došlo k optimalizaci parametrů. V poslední fázi experimentu byl vyměněn přídavný materiál za

Exaton Ni72HP. Pro tento přídavný materiál byly použity parametry využitě pro materiál Sv07Ch25Ni13. Tyto parametry musely být však optimalizovány. Důvodem je například rozdíl ve viskozitě svarové lázně použitých přídavných materiálů, kdy u niklových slitin je viskozita nižší. Zároveň se tyto přídavné materiály liší i v tepelné roztažnosti.

Kromě optimalizace základních parametrů jako je svařovací proud horní (pulzní) a dolní (základní) nebo rychlost podávání přídavného materiálu byla pozorována důležitost i jiných parametrů ovlivňujících kvalitu svaru. Jednou z těchto metod je čistota svařovaných polotovarů a elektrody. Z toho důvodu byla po svaření každé vrstvy kontrolována čistota svařovací elektrody. Dalším podstatným parametrem se ukázal úhel mezi wolframovou elektrodou a ústím podavače přídavného materiálu. Tento úhel byl podstatný zejména při svařování krycí vrstvy, kde docházelo k zachytávání přídavného materiálu po stranách svarového kovu kořenové vrstvy. Od vzorku s označením T8Sv byla pozorována interpass teplota jako významný parametr pro dosažení konzistentních výsledků.

Optimalizace parametrů však primárně probíhala v závislosti na provaření kořene svaru v jednotlivých sektorech. Gravitační síla, jež působí v poloze PE výrazně ovlivňuje chování svarové lázně, a tudíž byla kontrola provaření kořene v této poloze nejpodstatnější. Nejčastěji byly optimalizovány parametry horního svařovacího proudu a rychlosti podávání přídavného materiálu. Nedostatečné provaření kořene bylo zjištěno z metalografického výbrusu u vzorku T3Sv.

Po svařování následovala kontrola nedestruktivními metodami zkoušení NDT. Zkoušky byly prováděny na svarových spojkách dle tabulky 9. V rámci kontroly povrchu svarového spoje byly provedeny vizuální a kapilární zkouška. Pro zjišťování vad objemových byla použita metoda prozařovací. V kořenové oblasti se nejčastěji vyskytovaly vady jako hubený kořen 515 nebo studený spoj 4013. Pro krycí vrstvu to byly zejména vady typu vrub (zápal) 501 nebo vadné napojení 517. Kapilární zkouškou nebyly objeveny žádné vady. Z toho je možné usuzovat, že se nikde podél svarového spoje nevyskytovaly trhliny. Pomocí prozařovací zkoušky byly objeveny vady jako neprovařený kořen u vzorku T2Sv, přítomnost vměstků u vzorku T4Sv a V4Sv nebo studený spoj ve svaru V3Sv.

Poté byly vybrány klíčové vzorky T3Sv, T7Sv, T10Sv a V4Sv pro které byly vytvořeny metalografické výbrusy dle tabulky 17 a zároveň pro ně byly provedeny zkoušky mikrotvrdomosti. Pro vzorky svařované přídavným materiálem Exaton Ni72HP byla provedena optimalizace svařovacích parametrů pouze na základě NDT zkoušek.

Mezi jednotlivými vzorky byly mírné rozdíly v převýšení na přechodu mezi ZM a SK v oblasti hlavy svaru. Výjimečně byly pozorovány mírné vruby, které byly uvedeny jako vady v hodnocení vizuální kontroly. Při pozorování makrostruktury však byly pozorovány problémy s provařením kořene svaru, zejména v oblastech, kde se při vizuální kontrole objevovala vada hubeného kořene 515. Tato vada je nepřijatelná, jednalo se však spíše o lokální výskyt. Tato vada je řešitelná zvýšením hodnot svařovacího proudu, čímž dojde k lepšímu provaření kořenové části svaru.

Složení struktury svarového kovu a zejména tepelně ovlivněné zóny základního materiálu P265GH bylo pro většinu vzorků stejné. Mezi SK a ZM P265GH na hranici ztavení na straně ZM byla pozorovatelná oduhličená zóna způsobená difuzí uhlíku do austenitu, který má výrazně vyšší rozpustnost uhlíku než struktura ferito-perlitická. V tomto oduhličeném pásmu je pravděpodobnější projev plastické deformace při provozu součásti. Na oduhličenou část struktury navazuje část TOO s hrubozrnnou strukturou. V případě pozorovaných struktur například vzorku T7Sv byla znatelná hrubozrnná Widmannstättenova struktura. Pro tuto strukturu jsou typické feritické jehlice vznikající od hranic původních austenitických zrn. Následně

feritické jehlice směřují do perlitické struktury. Kvůli tvaru feritických jehlic dochází v této oblasti ke snížení houževnatosti.

Na straně svarového kovu na hranici ztavení mezi ZM P265GH a SK vznikalo karbidické pásmo. Toto pásmo se vyznačuje vyšší tvrdostí a zvyšuje výrazně křehkost struktury. Pásmo vzniká přechodem uhlíku z ZM do SK. Pro popis této struktury by musela být provedena přesnější analýza. Při této analýze by mohlo být upřesněno i chemické složení vměstků obsažených na austenitické straně svarového spoje. Vzhledem k tvaru těchto vměstků se pravděpodobně jedná o vměstky na bázi TiC nebo TiN.

Pro přesnější určení druhu struktur ve svarovém kovu a zejména pro určení struktur v TOO základního materiálu P265GH byla provedena zkouška mikrotvrdomosti HV0,1. Nejvyšší hodnoty tvrdosti byly naměřeny na straně SK po hranici ztavení v oblasti výskytu karbidického pásma. Hodnoty mikrotvrdomosti zde dosahovaly hodnoty místy až 450 HV 0,1. Norma ČSN EN ISO 15 614 uvádí maximální hodnotu tvrdosti tepelně nezpracované oceli 380 HV 10 pro ocel P265GH [29]. Pro přídavný austenitický přídavný materiál není tato hodnota specifikována. Hodnoty mikrotvrdomosti HV 0,1 z důvodu nižšího zatížení bývají vyšší, než hodnoty tvrdosti HV 10. Rozdíl mezi hodnotami je ale moc vysoký. Na uhlíkové straně oceli se pak v hrubozrnné TOO byla měřena hodnota mikrotvrdomosti okolo 200 HV 0,1. Tyto hodnoty naznačují minimální výskyt základních struktur. V normalizačně žíhané části tepelně ovlivněné oblasti pak byla průměrná hodnota mikrotvrdomosti okolo 170 HV 0,1.

Pro hodnocení kvality vyrobených svarových spojů a potvrzení vhodnosti použitých svařovacích parametrů by bylo vhodné provést ověření metodiky na vyšším počtu vzorků. Zároveň by bylo vhodné doplnit metody testování svarových spojů například o tahovou zkoušku pro získání komplexnějších informací o mechanických vlastnostech svarového spoje.

## 11 Závěr

Diplomová práce měla za úkol optimalizaci parametrů orbitálního svařování pro heterogenní svarové spoje. Parametry byly optimalizovány pro 3 druhy stehování, 2 druhy úkosů a 2 druhy přídavného materiálu. Svařeno bylo celkem 23 vzorků s různými kombinacemi výše zmíněných parametrů. Pro všechny vzorky byla provedena NDT kontrola. Pro každou kombinaci parametrů byl vždy zvolen jeden klíčový vzorek, na kterém byly provedeny i DT metody kontroly. Základní program, na kterém byla následně prováděna optimalizace byl převzat od firmy ČEZ Energioservis.

V první sérii svarů byly vyzkoušeny 3 druhy technologie stehování pro přídavný materiál Sv07Ch25N13 a úkos tvaru U. Následující svarové spoje byly stehovány už jen laserovou metodou. Poté byly navrženy a optimalizovány parametry pro svary s tvarem úkosu V. V poslední řadě došlo k výměně přídavného materiálu za Exaton Ni72HP. Pro tento přídavný materiál byly svařeny vzorky s tvarem úkosu U i V.

Nejčastější vadou objevující se při hodnocení NDT metodami a vyskytující se na provedených svarových spojích byla vada hubeného kořene 515 nebo 5013. Tato vada byla známkou neprovařeného kořene svaru. Většinou se jednalo o lokální vadu pro určitý sektor orbitálního svařování. Tato vada je nepřijatelná, ale v rámci optimalizace parametrů svařování řešitelná. Pro zvýšení průvaru v kořenové oblasti je třeba navýšit hodnotu pulzního proudu. Je však nutné brát v potaz následky v podobě vneseného tepla do struktury svaru.

Při metalografickém hodnocení struktur a měření mikrotvrdosti byly zjištěny nevhodné struktury na rozhraní mezi SK a ZM P265GH. Tyto struktury vznikaly oduhličováním ZM P265GH, kdy uhlík difundoval do SK. Kvůli tomuto jevu byl na rozhraní pozorován výrazný nárůst mikrotvrdosti. Z hodnoty mikrotvrdosti a mikroskopických snímků by se mohlo jednat o karbidické pásy. Tyto struktury mohou výrazně ovlivňovat únavové vlastnosti svarového spoje. Pro bližší určení důsledků by však bylo nutné provést podrobnější analýzu vzniklých struktur a podrobení vzorků širší škále mechanických zkoušek.

Z výsledků NDT a DT metod vyšly nejlépe svary T7Sv a V4Sv. Svar T7Sv byl stehován laserovou metodou a svařen přídavným materiálem Sv07Ch25N13 s tvarem úkosu U. Svarový spoj V4Sv se lišil pouze ve tvaru úkosu V. I když byly u těchto svarů vizuální metodou nalezeny vady, jedná se o vady řešitelné. Pokud by došlo k mírným úpravám ve svařovacích parametrech, mohly by být tyto vady eliminovány.

## 12 Seznam použité literatury

- [1] FOLDYNA, Václav. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 2. upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-857-7185-3.
- [2] *ASM handbook: Welding, brazing and soldering*. 10th ed. Materials Park: ASM International, c1990-. ISBN 08-717-0382-3.
- [3] KEARNS, W.H., ed. *Welding Handbook: Metals and Their Weldability*. 4. Miami: AMERICAN WELDING SOCIETY, 1997. ISBN 0-87171-218-0.
- [4] The orbital welding handbook. *Polysoude* [online]. Polysoude Nantes SAS, 2016, 01/2016 [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: <https://www.polysoude.com/orbital-weldinghandbook/>
- [5] *Elektrody a ochranné plyny* [online]. Česká republika: Svarbazar.cz, 2005 [cit. 2020-12-17]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocianku=200611201>
- [6] *Technology Development In Welding - Orbital Welding* [online]. Vol. 7. Andhra Pradesh, India: Department of Power Engineering, GMR Institute of Technology, 2019 [cit. 2020-12-17]. ISSN 2321-9939. Dostupné z: <https://www.ijedr.org/papers/IJEDR1901057.pdf>
- [7] KUCHAR, L. a J. DRÁPALA. *Segregační jevy při krystalizaci a jejich vliv na strukturní charakteristiky krystalů*. Škola růstu krystalů 2002 [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - TU Ostrava, 2002, 2002, s. 12-19 [cit. 2021-01-05]. Dostupné z: [https://csacg.fzu.cz/func/viewpdf.php?file=2002\\_12Kuchar.pdf](https://csacg.fzu.cz/func/viewpdf.php?file=2002_12Kuchar.pdf)
- [8] LAYUS, Pavel, Paul KAH, Elena KHLUSOVA a Victor ORLOV. Study of the sensitivity of high-strength cold-resistant shipbuilding steels to thermal cycle of arc welding. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering* [online]. 2018, **13**(1), 2 [cit. 2021-01-08]. ISSN 1823-0334. Dostupné z: doi:10.1186/s40712-018-0090-1
- [9] KOLAŘÍK, Ladislav. *Vznik trhlin za tepla při konvenčním TIG svařování*. Praha, 2016. Habilitační přednáška. ČVUT v Praze
- [10] Solidification cracking. In: *TWI Ltd.* [online]. Cambridge: TWI, 2021 [cit. 2021-01-10]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-hot-cracking-solidification-cracking>
- [11] BARTÁK, Jiří. Typy vad , příčiny jejich vzniku a hodnocení. *Česká svářečská společnost ANB* [online]. Praha: Česká svářečská společnost ANB, 2006, 1.3.2012 [cit. 2021-01-12]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384>
- [12] Hydrogen induced cracks. In: *Piping Engineering* [online]. Mumbai: Piping Engineering, 2015 [cit. 2021-02-02]. Dostupné z: <https://www.pipingengineer.org/weld-imperfections-hydrogen-induced-cracks/hydrogen-induced-cracks-01/>

- [13] MANNION, Bernard a Jack HEINZMAN. Setting up and determining Parameters for Orbital Tube Welding. Pro-Fusion [online]. Knoxville: Elderfield & Hall, 2015 [cit. 2021-03-02]. Dostupné z: <https://www.pro-fusiononline.com/feedback/fab-may99.htm>
- [14] Uzavřená hlava pro orbitální svařování. *Orbital Technik* [online]. Puchong: Orbital Technik Sdn Bhd, 2021 [cit. 2021-03-03]. Dostupné z: <https://orbitechnik.com/product/orbiweld-170/>
- [15] Otevřená hlava pro orbitální svařování. In: *Orbitalservice* [online]. Heimbuchenthal: Orbitalservice, 2021 [cit. 2021-03-03]. Dostupné z: <https://orbitalservice-group.com/en/os/open-weld-heads/>
- [16] Použité symboly pro polohy svařování a jejich značení dle norem. In: *Yumpu* [online]. Švýcarsko: Yumpu.com, 2014 [cit. 2021-03-03]. Dostupné z: <https://www.yumpu.com/xx/document/read/15919547/pouzite-symboly-pro-polohy-svarovani-a-jejich-znaceni-dle-norem->
- [17] JECH, Jaroslav. *Tepelné zpracování oceli: metalografická příručka : určeno [také] pro studenty středních průmyslových škol hutnických*. 3., upr. a dopl. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1977. Řada hutnické literatury.
- [18] Jakosti ocelí. *Feromat* [online]. Brno: Feromat Brno s.r.o, 2021 [cit. 2021-3-27]. Dostupné z: [http://www.feromat.cz/jakosti\\_oceli](http://www.feromat.cz/jakosti_oceli)
- [19] ERNiCr-3 Datasheet. *Norco Inc.* [online]. United States: Norco, 2020 [cit. 2021-3-27]. Dostupné z: <https://www.norco-inc.com/ASSETS/DOCUMENTS/ITEMS/EN/SOW-093NICRT-SpecSheet.pdf>
- [20] KOU. *Welding metallurgy*. 2nd ed. Hoboken: Wiley-Interscience, c2003. ISBN 04-714-3491-4.
- [21] P6 series. *Polysoude* [online]. Nantes: Polysoude Nantes SAS, 2021 [cit. 2021-4-5]. Dostupné z: [https://www.polysoude.com/wp-content/uploads/2019/10/DOC\\_Broch\\_P6\\_EN.pdf](https://www.polysoude.com/wp-content/uploads/2019/10/DOC_Broch_P6_EN.pdf)
- [22] Sherwin Step 2 Cleaner/Remover DR-60. Industrial & Automotive parts [online]. Chipping Norton, New South Wales 2170: IAP, 2019 [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: <https://industrialautomotiveparts.com.au/product/sherwin-step-2-cleaner-remover-dr-60-400ml?pid=800091>
- [23] Optický mikroskop. In: Zeiss [online]. USA, 2018 [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/microscopy/us/products/light-microscopes/axio-observer-for-materials.html>
- [24] SKÁLOVÁ, Jana, Rudolf KOVAŘÍK a Vladimír BENEDIKT. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 4. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2010. ISBN 978-80-7043-417-8.
- [25] Durascan. Struers [online]. Česká republika: Struers, 2021 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: <https://documents.uow.edu.au/content/groups/public/@web/@aiim/documents/doc/uow155169.pdf>

- [26] Technická norma ČSN EN ISO 6507-1:2018. *Kovové materiály – zkouška tvrdosti podle Vickerse – Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018
- [27] Technická norma ČSN EN ISO 17637:2016. *Nedestruktivní zkoušení svarů – Vizuální kontrola tavných svarů*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016
- [28] Technická norma ČSN ISO 6520-1:2008. *Svařování a příbuzné procesy - Klasifikace geometrických vad kovových materiálů - Tavné svařování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2008.
- [29] Technická norma ČSN EN ISO 15614-1:2018. *Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Zkouška postupu svařování - Část 1: Obloukové a plamenové svařování oceli a obloukové svařování niklu a slitin niklu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.

## 13 Přílohy

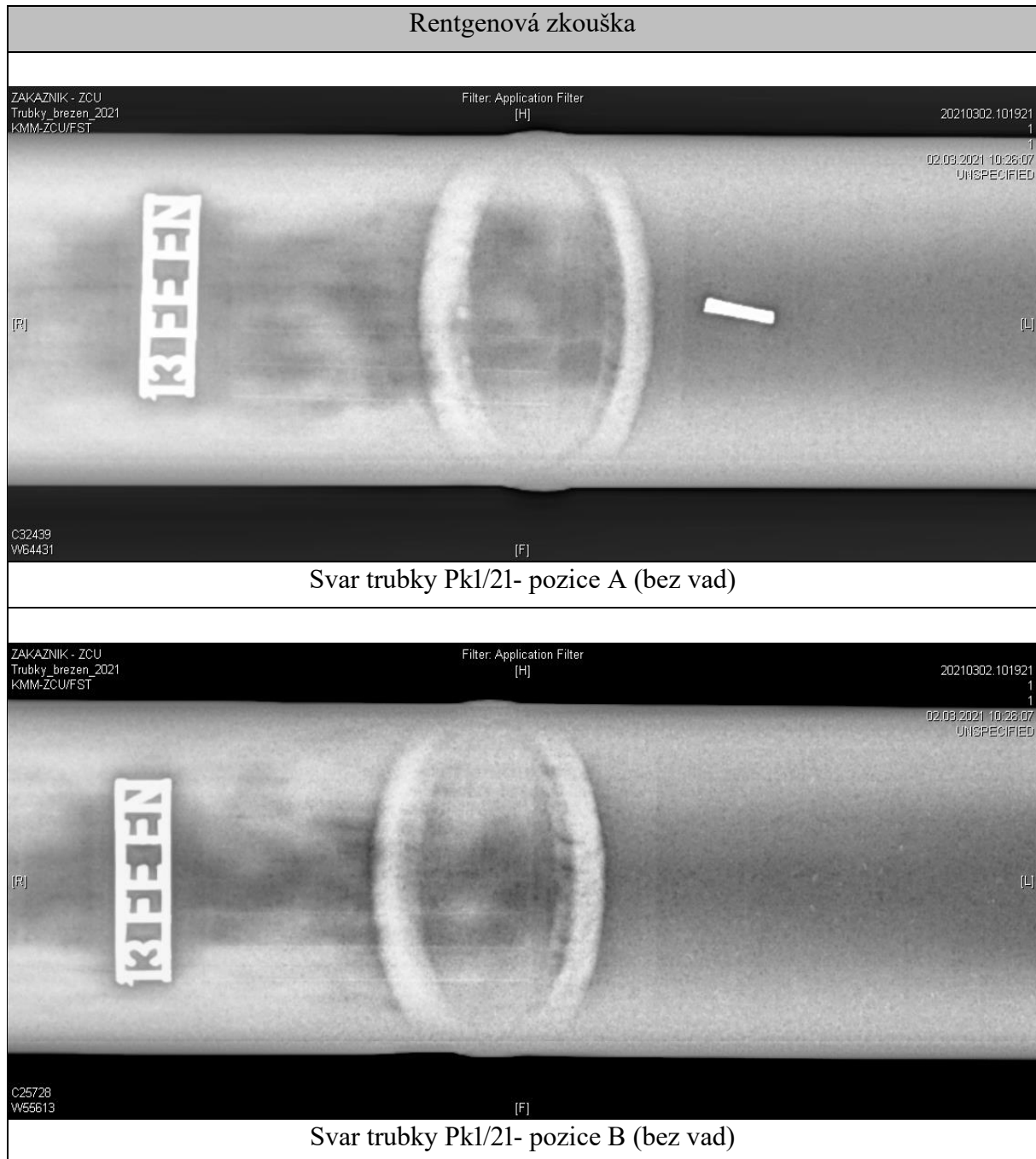
### Příloha 1 - Svarový spoj T1SV

| Svar T1SV (Pk1/21) |                   |     |     |     |     |     |     |     |  |
|--------------------|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| Parametry          | Sektor            | S1  | S2  | S3  | S4  | S5  | S6  | S7  |  |
|                    | Kořenová vrstva   |     |     |     |     |     |     |     |  |
|                    | $I_p$ [A]         | 110 | 105 | 105 | 95  | 95  | 90  | 100 |  |
|                    | $I_z$ [A]         | 60  | 60  | 58  | 55  | 55  | 55  | 58  |  |
|                    | $V_{dr}$ [mm/min] | 250 | 250 | 300 | 300 | 300 | 300 | 350 |  |
|                    | U [V]             | 8   | 7,9 | 7,8 | 7,8 | 7,8 | 7,9 | 8   |  |
|                    | $V_{ot}$ [mm/min] | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  |  |
|                    | Krycí vrstva      |     |     |     |     |     |     |     |  |
|                    | $I_p$ [A]         | 80  | 75  | 75  | 75  | 70  | 70  | 75  |  |
|                    | $I_z$ [A]         | 45  | 45  | 45  | 45  | 45  | 45  | 47  |  |
|                    | $V_{dr}$ [mm/min] | 400 | 380 | 330 | 250 | 300 | 320 | 380 |  |
|                    | U [V]             | 8,6 | 8,4 | 8,4 | 8,4 | 8,5 | 8,5 | 8,5 |  |
|                    | $V_{ot}$ [mm/min] | 40  | 40  | 40  | 40  | 40  | 40  | 40  |  |

| Vizuální zkouška |                |  |                      |  |
|------------------|----------------|--|----------------------|--|
| Pořadové číslo   | Oblast výskytu | Číselné označení dle ČSN EN ISO 6520-1 | Poloha indikace (mm) |  |
| 1                | P              | 2017                                   | 175-5                |  |
| 2                | P              | 517                                    | 50                   |  |
| 3                | K              | 5013, 515                              | 175-5                |  |
|                  |                |  |                      |  |



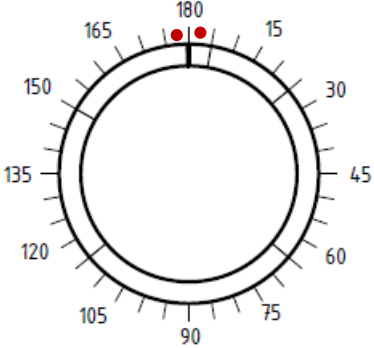


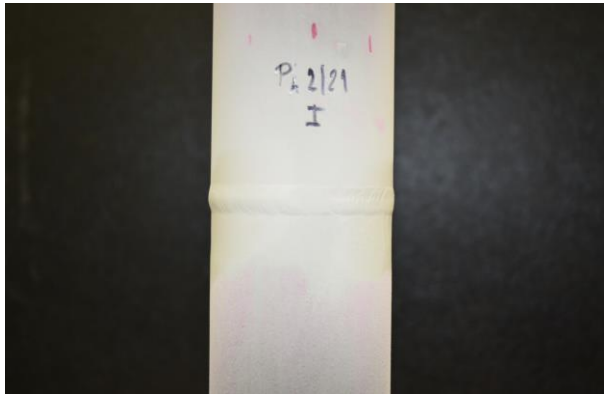
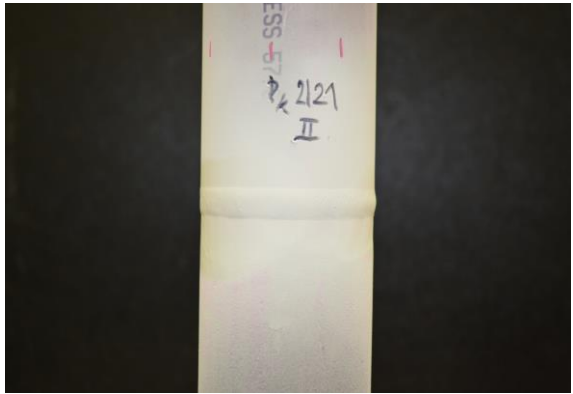


Příloha 2 – Svarový spoj T2Sv

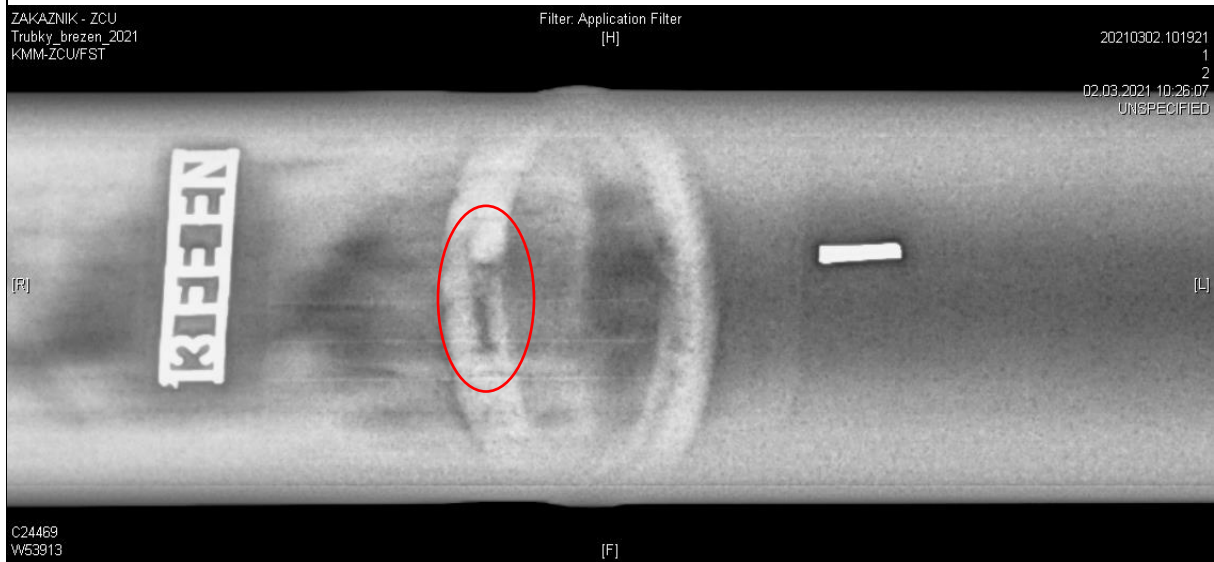
| Svar T2Sv (Pk2/21) |                   |     |     |         |              |              |              |              |
|--------------------|-------------------|-----|-----|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Parametry          | Sektor            | S1  | S2  | S3      | S4           | S5           | S6           | S7           |
|                    | Kořenová vrstva   |     |     |         |              |              |              |              |
|                    | $I_p$ [A]         | 110 | 105 | 105     | 95           | 95           | 90           | 100          |
|                    | $I_z$ [A]         | 60  | 60  | 58      | 55           | 55           | 55           | 58           |
|                    | $V_{dr}$ [mm/min] | 250 | 250 | 300     | 300          | 300          | 300          | 350          |
|                    | U [V]             | 8   | 7,9 | 7,8     | 7,8          | 7,8          | 7,9          | 8            |
|                    | $V_{ot}$ [mm/min] | 50  | 50  | 50      | 50           | 50           | 50           | 50           |
|                    | Krycí vrstva      |     |     |         |              |              |              |              |
|                    | $I_p$ [A]         | 80  | 75  | 75 (80) | 75 (80)      | 70 (75)      | 70 (75)      | 75 (80)      |
|                    | $I_z$ [A]         | 45  | 45  | 45 (50) | 45 (50)      | 45 (50)      | 45 (50)      | 47 (52)      |
|                    | $V_{dr}$ [mm/min] | 425 | 405 | 355     | 275<br>(325) | 325<br>(375) | 345<br>(420) | 405<br>(480) |
|                    | U [V]             | 8,6 | 8,4 | 8,4     | 8,4          | 8,5          | 8,5          | 8,5          |
|                    | $V_{ot}$ [mm/min] | 40  | 40  | 40      | 40           | 40           | 40           | 40           |

| Vizuální zkouška |                |  |                      |
|------------------|----------------|--|----------------------|
| Pořadové číslo   | Oblast výskytu | Číselné označení dle ČSN EN ISO 6520-1 | Poloha indikace (mm) |
| 1                | P              | 2017                                   | 175-5                |
| 2                | K              | 5013                                   | 175-5                |
|                  |                |  |                      |
|                  |                |  |                      |

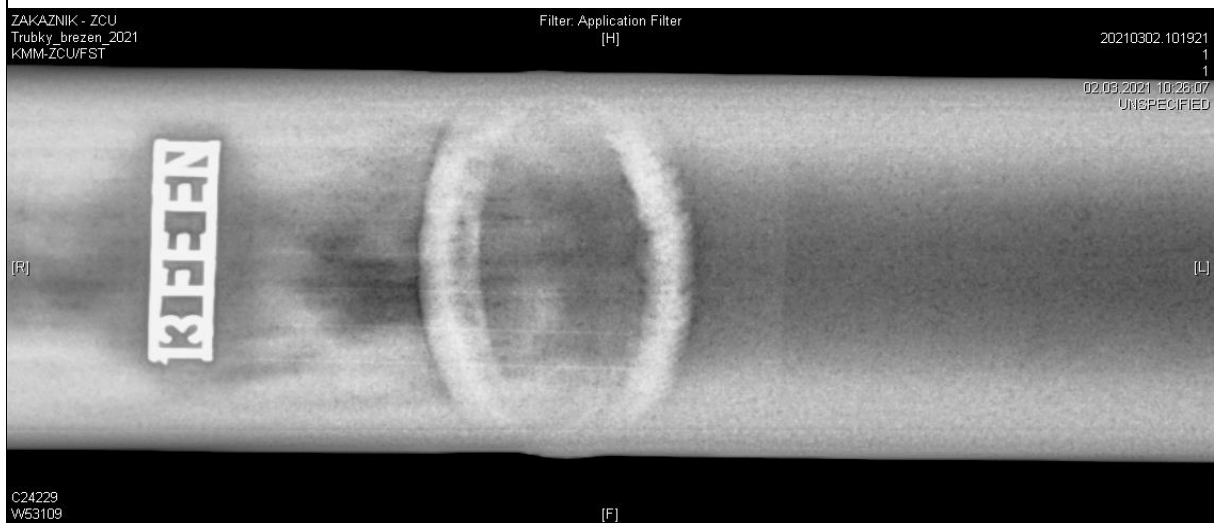


| Kapilární zkouška   |  |
|---|--|
|  |  |
| Výsledek kapilární zkoušky vzorku Pk2/21 (bez vad)                                  |  |

### Rentgenová zkouška



Svar trubky Pk2/21- pozice A – patrné neprovaření kořene (402)



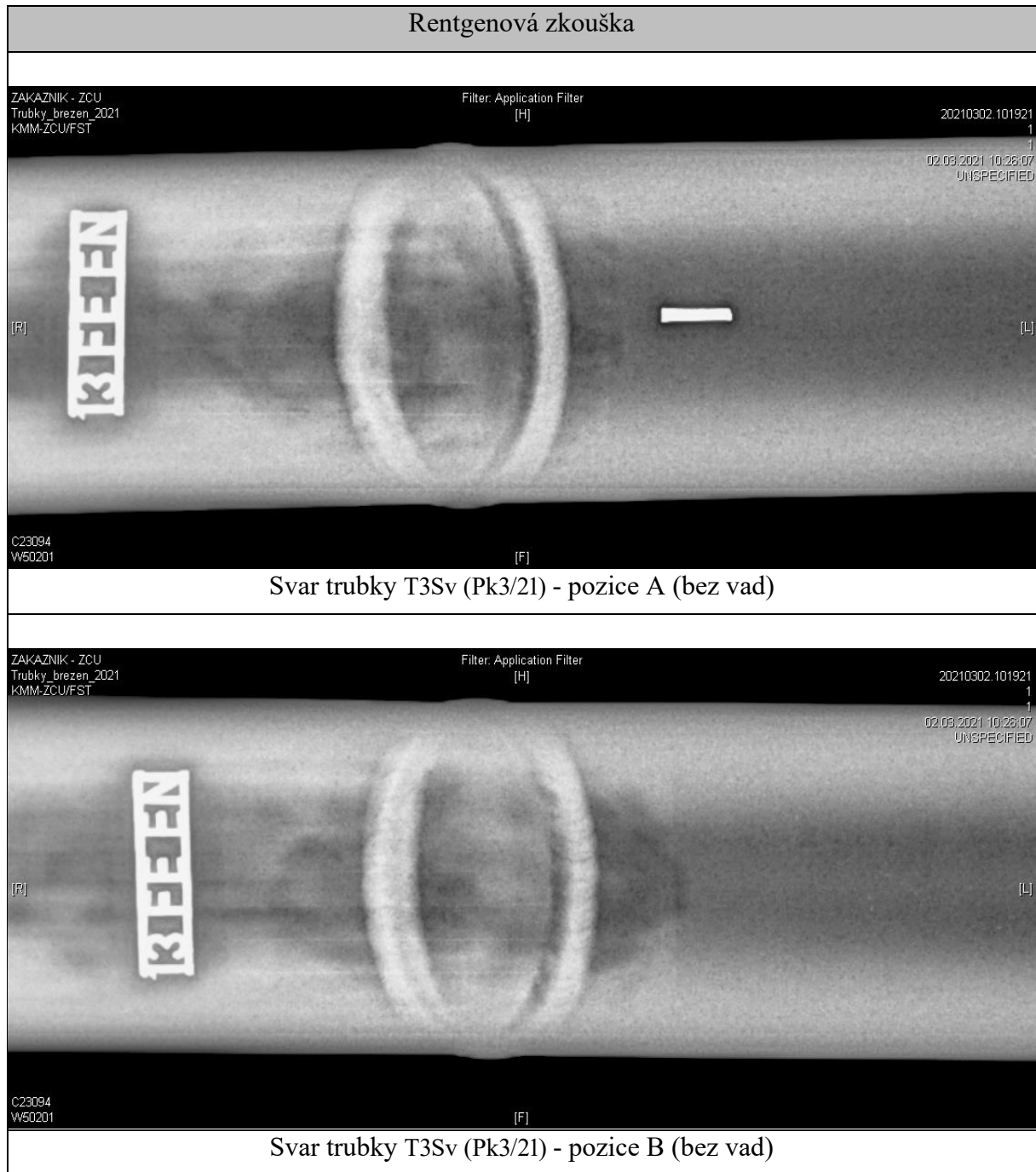
Svar trubky Pk2/21- pozice B (bez vad)


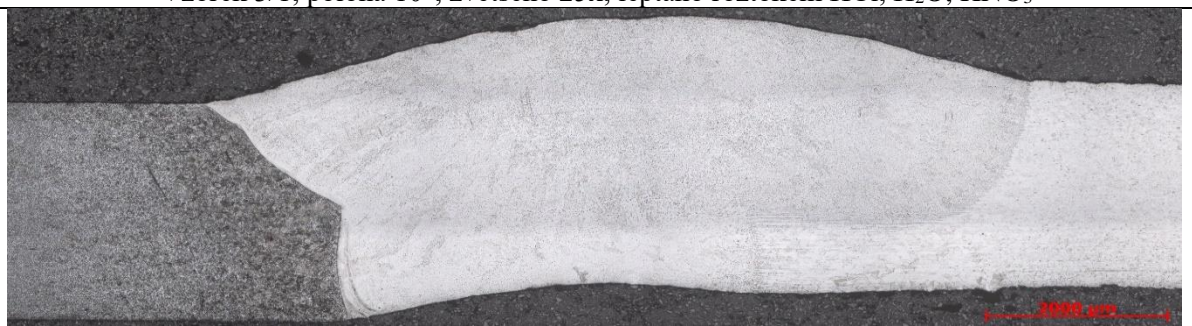
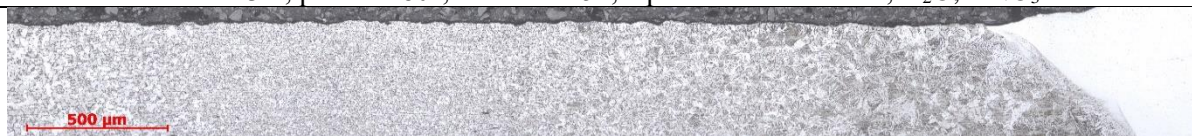


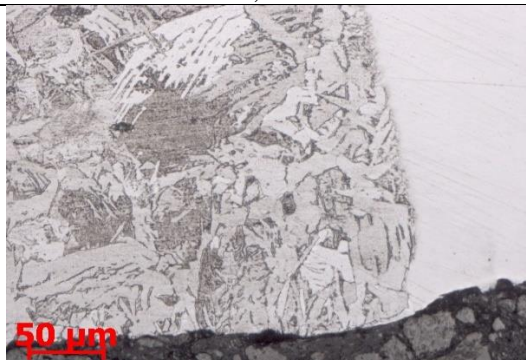
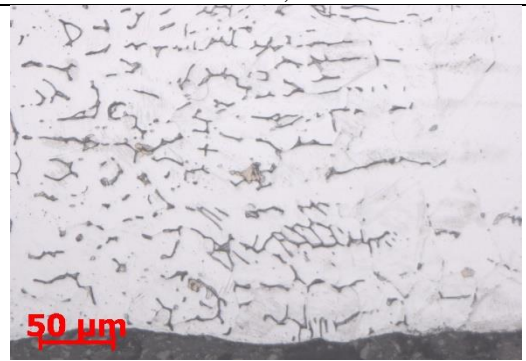
Příloha 3 - Svarový spoj T3Sv

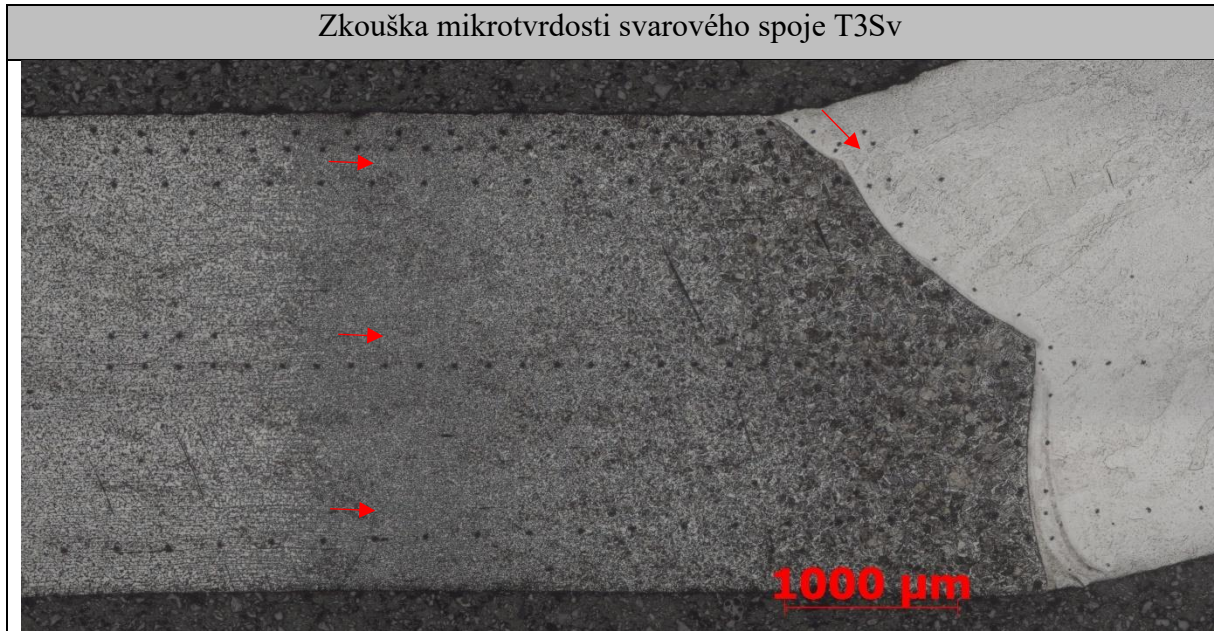
| Svar T3Sv (Pk3/21) |                   |     |     |     |     |     |     |     |  |
|--------------------|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| Parametry          | Sektor            | S1  | S2  | S3  | S4  | S5  | S6  | S7  |  |
|                    | Kořenová vrstva   |     |     |     |     |     |     |     |  |
|                    | $I_p$ [A]         | 110 | 105 | 105 | 95  | 95  | 90  | 100 |  |
|                    | $I_z$ [A]         | 60  | 60  | 58  | 55  | 55  | 55  | 58  |  |
|                    | $V_{dr}$ [mm/min] | 250 | 250 | 300 | 300 | 300 | 300 | 350 |  |
|                    | U [V]             | 8   | 7,9 | 7,8 | 7,8 | 7,8 | 7,9 | 8   |  |
|                    | $V_{ot}$ [mm/min] | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  |  |
|                    | Krycí vrstva      |     |     |     |     |     |     |     |  |
|                    | $I_p$ [A]         | 80  | 75  | 75  | 75  | 70  | 70  | 75  |  |
|                    | $I_z$ [A]         | 45  | 45  | 45  | 45  | 45  | 45  | 47  |  |
|                    | $V_{dr}$ [mm/min] | 425 | 405 | 380 | 300 | 350 | 370 | 380 |  |
|                    | U [V]             | 8,6 | 8,4 | 8,4 | 8,4 | 8,5 | 8,5 | 8,5 |  |
|                    | $V_{ot}$ [mm/min] | 40  | 40  | 40  | 40  | 40  | 40  | 40  |  |

| Vizuální zkouška |                |  |                      |  |
|------------------|----------------|--|----------------------|--|
| Pořadové číslo   | Oblast výskytu | Číselné označení dle ČSN EN ISO 6520-1 | Poloha indikace (mm) |  |
| 1                | P              | 2017                                   | 10                   |  |
| 2                | P              | 517                                    | 110-112              |  |
| 3                | K              | 5013                                   | 90-100               |  |
|                  |                |  |                      |  |

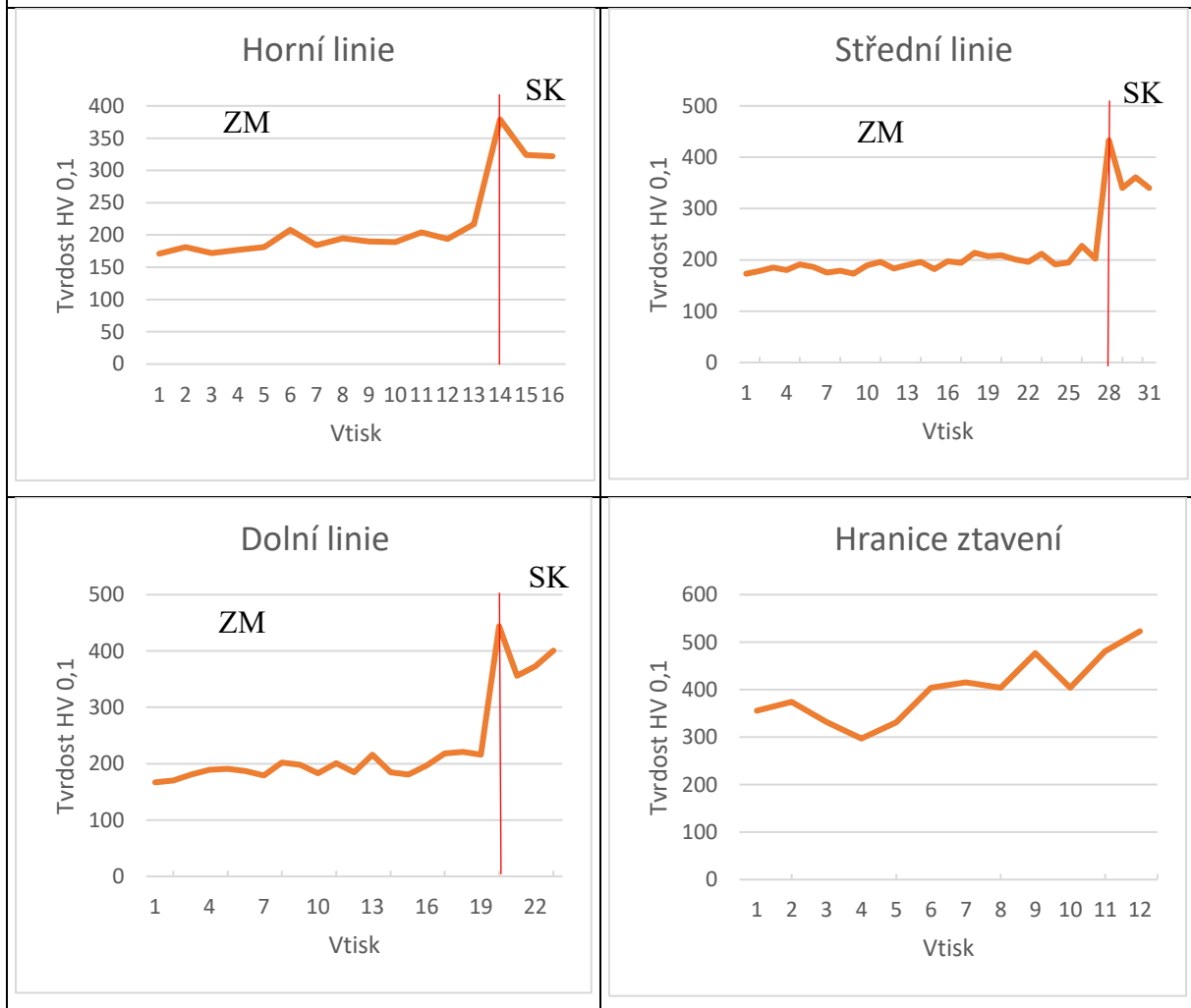
| Kapilární zkouška   |  |
|---|--|
|   |  |
| Výsledek kapilární zkoušky vzorku T3Sv (Pk3/21) (bez vad) |  |



| Metalografické snímky svarového spoje T3Sv  |  |
|---|--|
|               |  |
| Vzorek 3/1, poloha 10°, zvětšeno 25x, leptáno roztokem HCl, H <sub>2</sub> O, HNO <sub>3</sub>  |  |
|               |  |
| Vzorek 3/4, poloha 180°, zvětšeno 25x, leptáno roztokem HCl, H <sub>2</sub> O, HNO <sub>3</sub> |  |
|              |  |
| Vzorek 3/4, poloha 180°, zvětšeno 100x, leptáno roztokem Nital 1%, TOO oceli P265GH             |  |
|              |  |
| Vzorek 3/4, zvětšeno 200x, hranice ztavení SK s P265GH, hlava svaru                             | Vzorek 3/4, zvětšeno 200x, hranice ztavení SK s Wr.N. 1.4541, hlava svaru            |
|              |  |
| Vzorek 3/4, zvětšeno 200x, hranice ztavení SK s P265GH, kořen svaru                             | Vzorek 3/4, zvětšeno 200x, hranice ztavení SK s Wr.N. 1.4541, kořen svaru            |



Snímek makrostruktury po provedení mikrotvrdost HV0,1; červeně je vyznačen směr měření



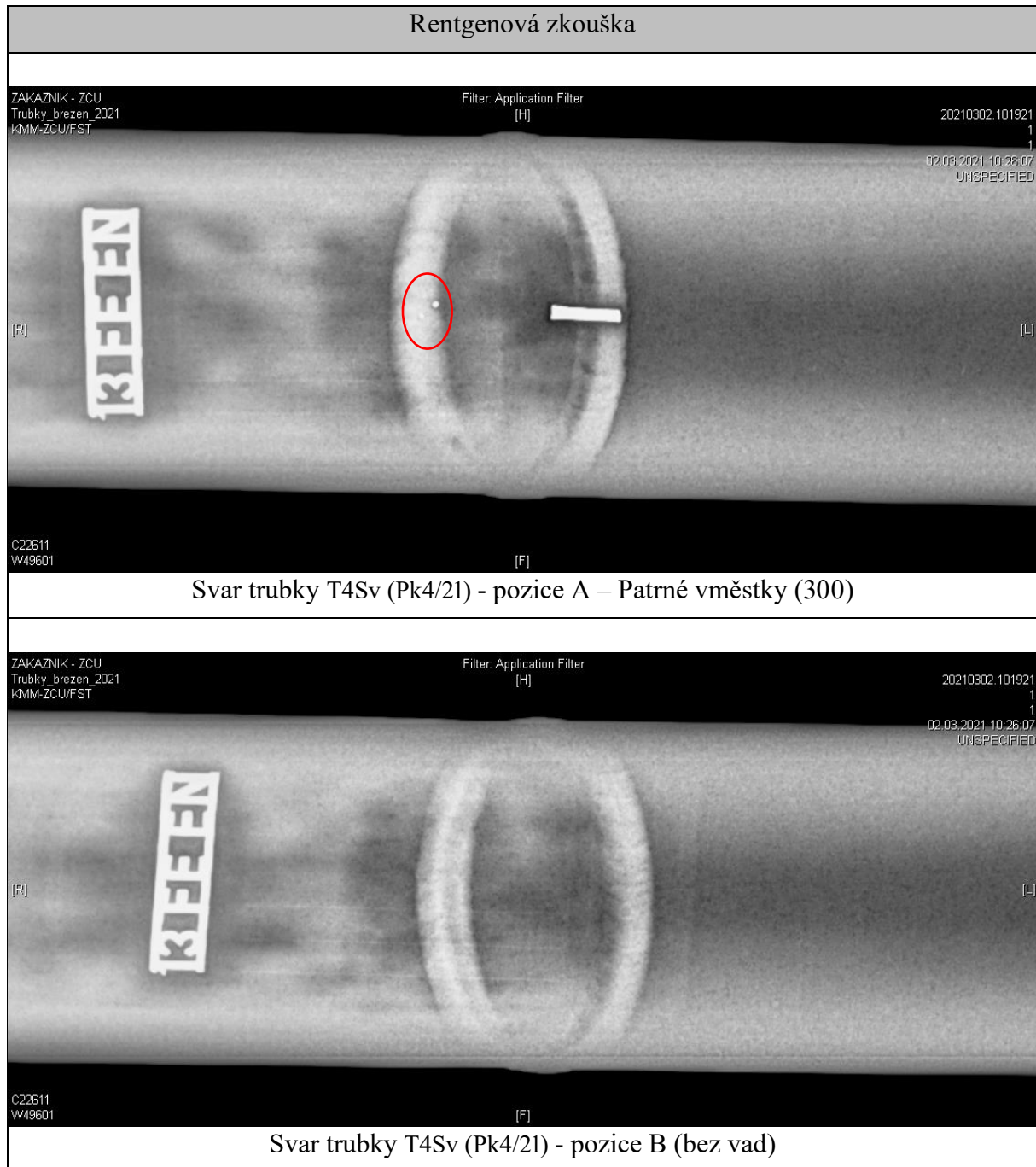
Příloha 4 - Svarový spoj T4Sv

| Svar T4Sv (Pk4/21) |                   |     |     |              |              |              |              |              |
|--------------------|-------------------|-----|-----|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Parametry          | Sektor            | S1  | S2  | S3           | S4           | S5           | S6           | S7           |
|                    | Kořenová vrstva   |     |     |              |              |              |              |              |
|                    | $I_p$ [A]         | 110 | 105 | 105          | 95           | 95           | 90           | 100          |
|                    | $I_z$ [A]         | 60  | 60  | 58           | 55           | 55           | 55           | 58           |
|                    | $V_{dr}$ [mm/min] | 250 | 250 | 300          | 300          | 300          | 300          | 350          |
|                    | U [V]             | 8   | 7,9 | 7,8          | 7,8          | 7,8          | 7,9          | 8            |
|                    | $V_{ot}$ [mm/min] | 50  | 50  | 50           | 50           | 50           | 50           | 50           |
|                    | Krycí vrstva      |     |     |              |              |              |              |              |
|                    | $I_p$ [A]         | 80  | 75  | 75           | 75           | 70           | 70           | 75           |
|                    | $I_z$ [A]         | 45  | 45  | 45           | 45           | 45           | 45           | 47           |
|                    | $V_{dr}$ [mm/min] | 425 | 405 | 405<br>(380) | 325<br>(300) | 375<br>(350) | 395<br>(370) | 405<br>(380) |
|                    | U [V]             | 8,6 | 8,4 | 8,4          | 8,4          | 8,5          | 8,5          | 8,5          |
|                    | $V_{ot}$ [mm/min] | 40  | 40  | 40           | 40           | 40           | 40           | 40           |

| Vizuální zkouška |                |  |                      |  |
|------------------|----------------|--|----------------------|--|
| Pořadové číslo   | Oblast výskytu | Číselné označení dle ČSN EN ISO 6520-1 | Poloha indikace (mm) |  |
| 1                | P              | 517                                    | 180                  |  |
| 2                | P              | 517                                    | 70-80                |  |
| 3                | P              | 2017                                   | 30                   |  |
| 4                | K              | 515, 511                               | 30                   |  |

| Kapilární zkouška   |  |
|---|--|
|   |  |
| Výsledek kapilární zkoušky vzorku T4Sv (Pk4/21) (bez vad) |  |



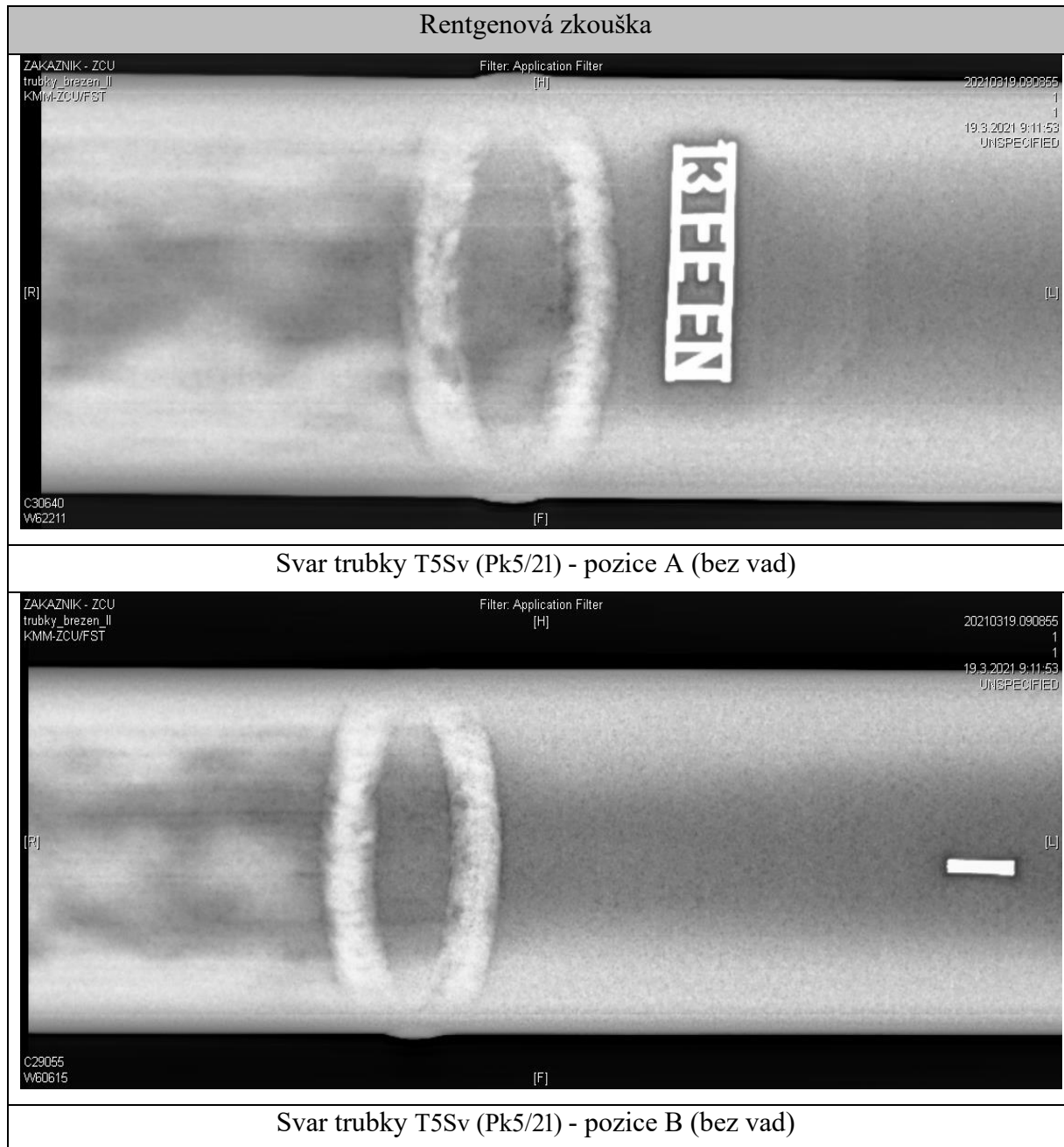


Příloha 5 - Svarový spoj T5Sv

| Svar T5Sv (Pk5/21) |                   |     |     |     |     |     |     |     |
|--------------------|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Parametry          | Sektor            | S1  | S2  | S3  | S4  | S5  | S6  | S7  |
|                    | Kořenová vrstva   |     |     |     |     |     |     |     |
|                    | $I_p$ [A]         | 110 | 105 | 105 | 95  | 95  | 90  | 100 |
|                    | $I_z$ [A]         | 60  | 60  | 58  | 55  | 55  | 55  | 58  |
|                    | $V_{dr}$ [mm/min] | 250 | 250 | 300 | 300 | 300 | 300 | 350 |
|                    | U [V]             | 8   | 7,9 | 7,8 | 7,8 | 7,8 | 7,9 | 8   |
|                    | $V_{ot}$ [mm/min] | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  |
|                    | Krycí vrstva      |     |     |     |     |     |     |     |
|                    | $I_p$ [A]         | 80  | 75  | 75  | 75  | 70  | 70  | 75  |
|                    | $I_z$ [A]         | 45  | 45  | 45  | 45  | 45  | 45  | 47  |
|                    | $V_{dr}$ [mm/min] | 425 | 405 | 380 | 300 | 350 | 370 | 380 |
|                    | U [V]             | 8,6 | 8,4 | 8,4 | 8,4 | 8,5 | 8,5 | 8,5 |
|                    | $V_{ot}$ [mm/min] | 40  | 40  | 40  | 40  | 40  | 40  | 40  |

| Vizuální zkouška |                |  |                      |  |
|------------------|----------------|--|----------------------|--|
| Pořadové číslo   | Oblast výskytu | Číselné označení dle ČSN EN ISO 6520-1 | Poloha indikace (mm) |  |
| 1                | P              | 5014                                   | 50-100               |  |
| 2                | K              | 515                                    | 20-30                |  |
| 3                | K              | 515                                    | 170                  |  |
|                  |                |  |                      |  |

| Kapilární zkouška   |  |
|---|--|
|   |  |
| Výsledek kapilární zkoušky vzorku T5Sv (Pk5/21) (bez vad) |  |

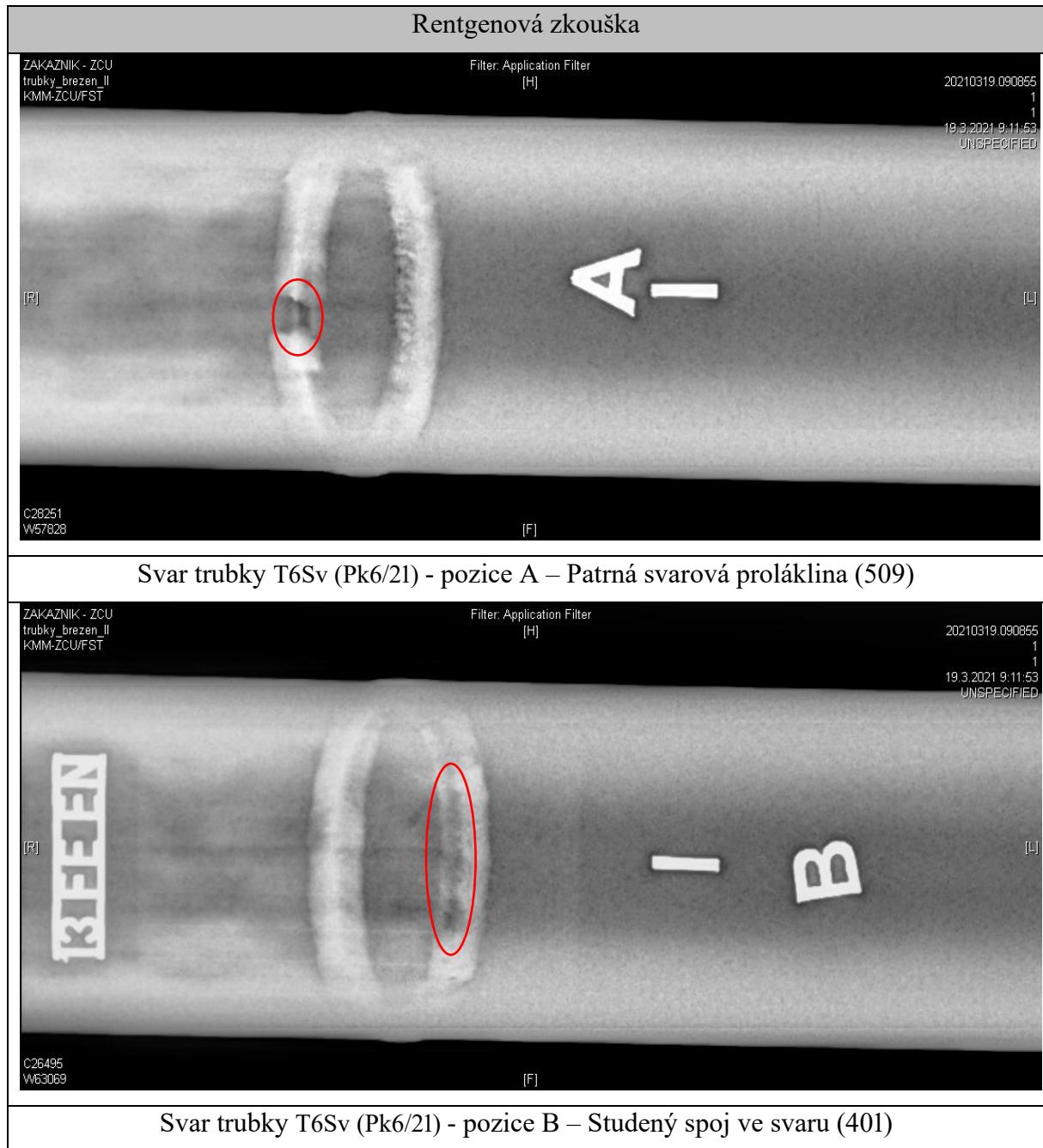


Příloha 6 - Svarový spoj T6Sv

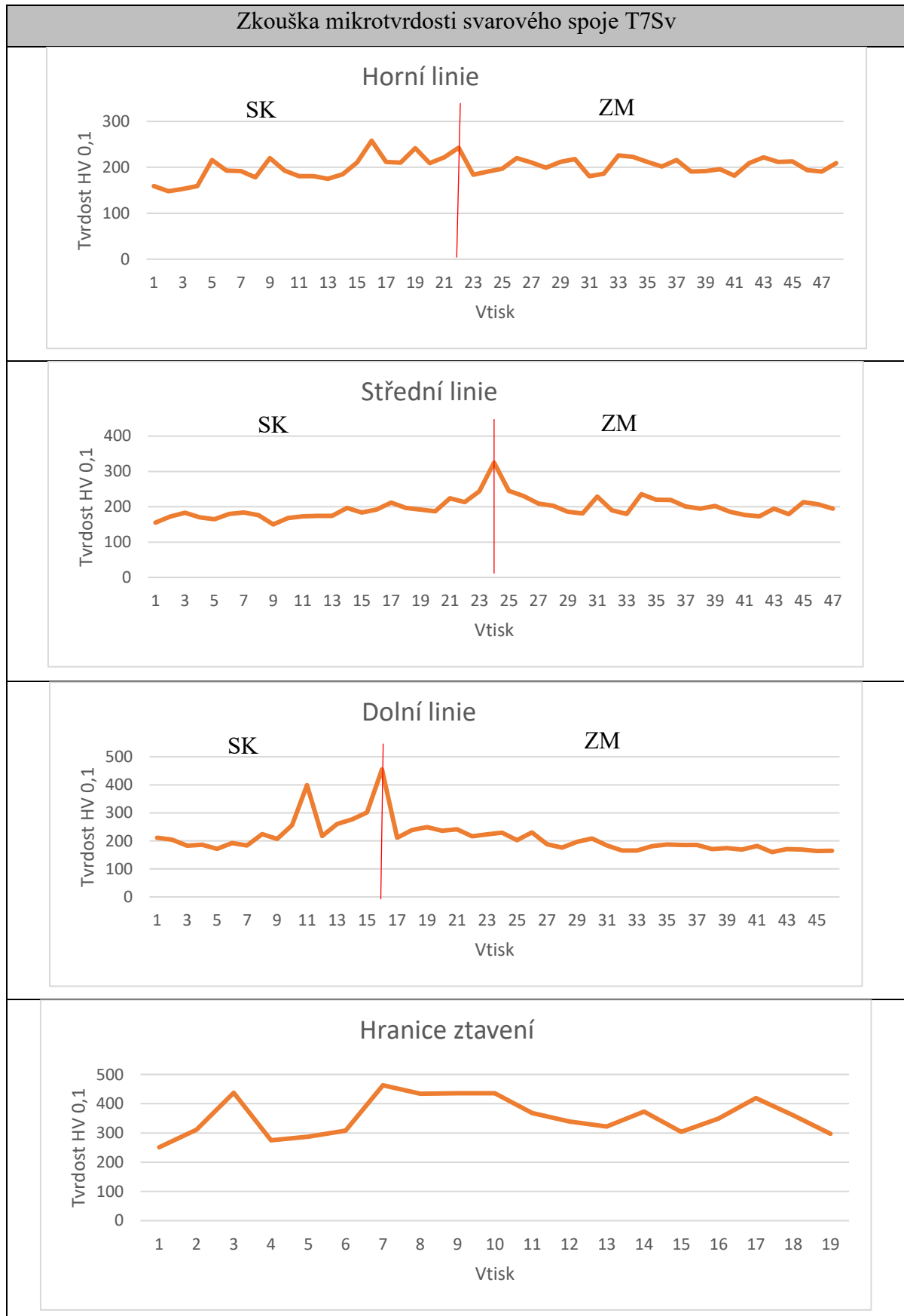
| Svar T6Sv (Pk6/21) |                   |     |     |     |     |     |     |     |  |
|--------------------|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| Parametry          | Sektor            | S1  | S2  | S3  | S4  | S5  | S6  | S7  |  |
|                    | Kořenová vrstva   |     |     |     |     |     |     |     |  |
|                    | $I_p$ [A]         | 110 | 105 | 105 | 95  | 95  | 90  | 100 |  |
|                    | $I_z$ [A]         | 60  | 60  | 58  | 55  | 55  | 55  | 58  |  |
|                    | $V_{dr}$ [mm/min] | 275 | 275 | 300 | 300 | 300 | 300 | 350 |  |
|                    | U [V]             | 8   | 7,9 | 7,8 | 7,8 | 7,8 | 7,9 | 8   |  |
|                    | $V_{ot}$ [mm/min] | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  |  |
|                    | Krycí vrstva      |     |     |     |     |     |     |     |  |
|                    | $I_p$ [A]         | 80  | 75  | 75  | 75  | 70  | 70  | 75  |  |
|                    | $I_z$ [A]         | 45  | 45  | 45  | 45  | 45  | 45  | 47  |  |
|                    | $V_{dr}$ [mm/min] | 425 | 405 | 380 | 300 | 350 | 370 | 380 |  |
|                    | U [V]             | 8,6 | 8,4 | 8,4 | 8,4 | 8,5 | 8,5 | 8,5 |  |
|                    | $V_{ot}$ [mm/min] | 40  | 40  | 40  | 40  | 40  | 40  | 40  |  |

| Vizuální zkouška |                |  |                      |  |
|------------------|----------------|--|----------------------|--|
| Pořadové číslo   | Oblast výskytu | Číselné označení dle ČSN EN ISO 6520-1 | Poloha indikace (mm) |  |
| 1                | P              | 401                                    | 180-0                |  |
| 2                | P              | 2017                                   | 110                  |  |
| 3                | K              | 401                                    | 30-40                |  |
| 4                | K              | 401                                    | 170                  |  |

| Kapilární zkouška   |  |
|---|--|
|   |  |
| <p>Výsledek kapilární zkoušky vzorku T6Sv – Zjištěna proláklina svarového spoje (509)</p> |  |



Príloha 7 - Grafy průběhu mikrotvrdoosti svarového spoje T7Sv



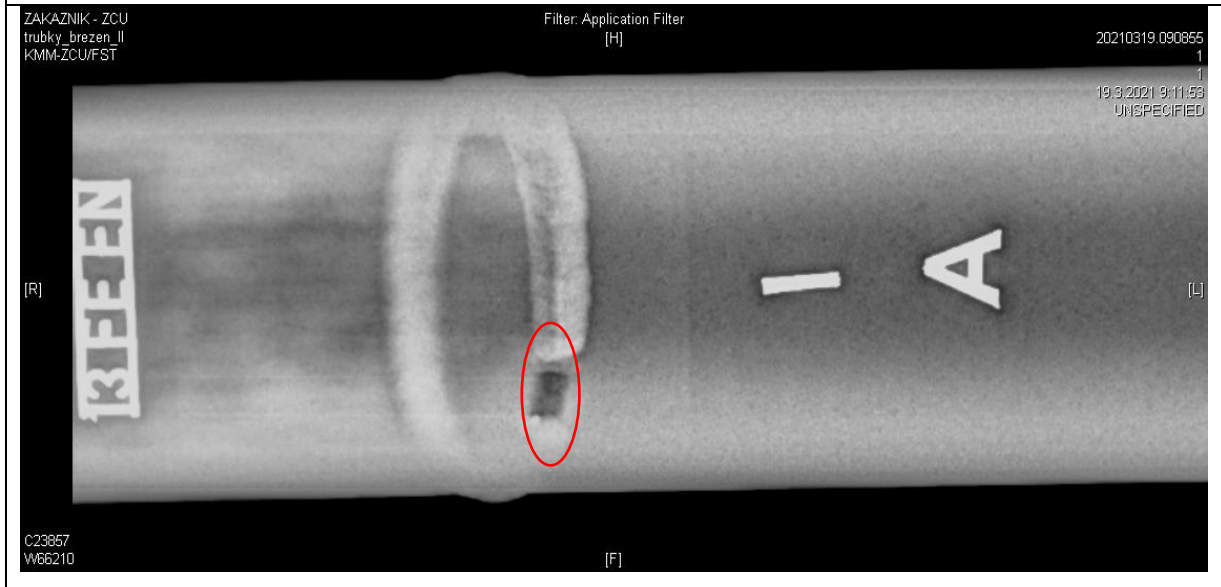
Příloha 8 - Svarový spoj T8Sv

| Svar T8Sv (Pk8/21) |                   |     |         |         |         |         |        |        |
|--------------------|-------------------|-----|---------|---------|---------|---------|--------|--------|
| Parametry          | Sektor            | S1  | S2      | S3      | S4      | S5      | S6     | S7     |
|                    | Kořenová vrstva   |     |         |         |         |         |        |        |
|                    | $I_p$ [A]         | 112 | 107     | 105     | 95      | 95      | 90     | 100    |
|                    | $I_z$ [A]         | 60  | 60      | 58      | 55      | 55      | 55     | 58     |
|                    | $V_{dr}$ [mm/min] | 275 | 275     | 300     | 300     | 300     | 300    | 350    |
|                    | U [V]             | 8   | 7,9     | 7,8     | 7,8     | 7,8     | 7,9    | 8      |
|                    | $V_{ot}$ [mm/min] | 50  | 50      | 50      | 50      | 50      | 50     | 50     |
|                    | Krycí vrstva      |     |         |         |         |         |        |        |
|                    | $I_p$ [A]         | 80  | 80 (85) | 80 (95) | 75 (85) | 70 (85) | 70 (-) | 75 (-) |
|                    | $I_z$ [A]         | 45  | 45 (50) | 45 (55) | 45 (55) | 45 (55) | 45 (-) | 47 (-) |
|                    | $V_{dr}$ [mm/min] | 425 | 405     | 380     | 300     | 350     | 370    | 380    |
|                    | U [V]             | 8,6 | 8,4     | 8,4     | 8,4     | 8,5     | 8,5    | 8,5    |
|                    | $V_{ot}$ [mm/min] | 40  | 40      | 40      | 40      | 40      | 40     | 40     |

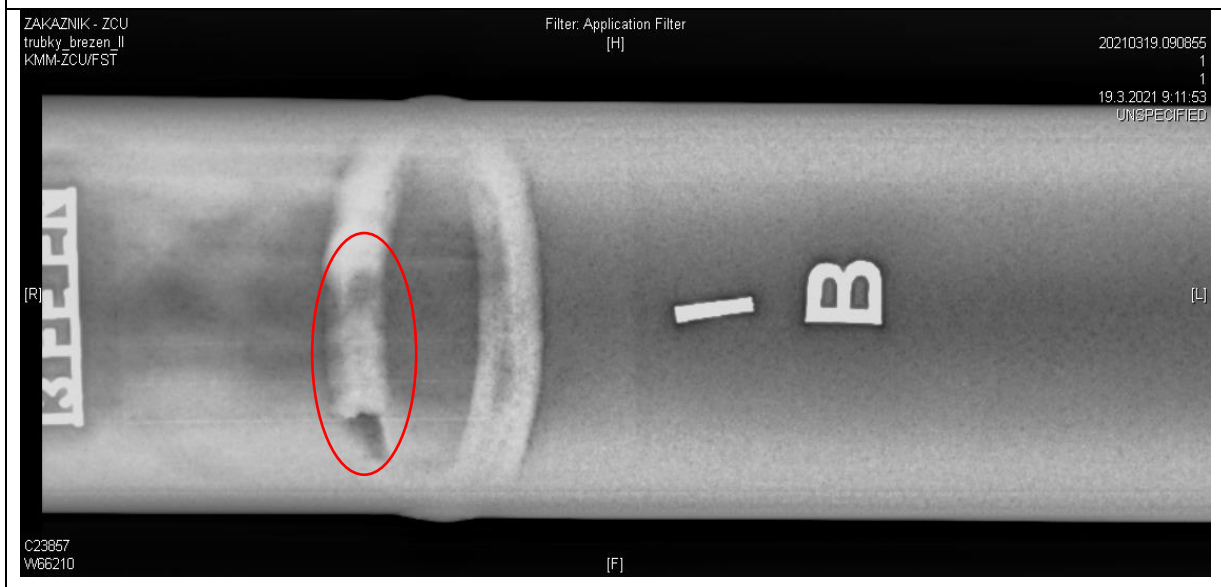
| Vizuální zkouška |                |  |                      |  |
|------------------|----------------|--|----------------------|--|
| Pořadové číslo   | Oblast výskytu | Číselné označení dle ČSN EN ISO 6520-1 | Poloha indikace (mm) |  |
| 1                | P              | 401                                    | 0-10                 |  |
| 2                | K              | 515                                    | 16                   |  |
|                  |                |  |                      |  |
|                  |                |  |                      |  |

| Kapilární zkouška  |  |
|--|--|
|  |  |
| Výsledek kapilární zkoušky vzorku T8Sv - Zjištěna proláklina svarového spoje (509) |  |

### Rentgenová zkouška



Svar trubky T8Sv (Pk8/21) - pozice A - Patrná svarová proláklina (509)



Svar trubky T8Sv (Pk8/21) – pozice B - Patrná svarová proláklina (509)

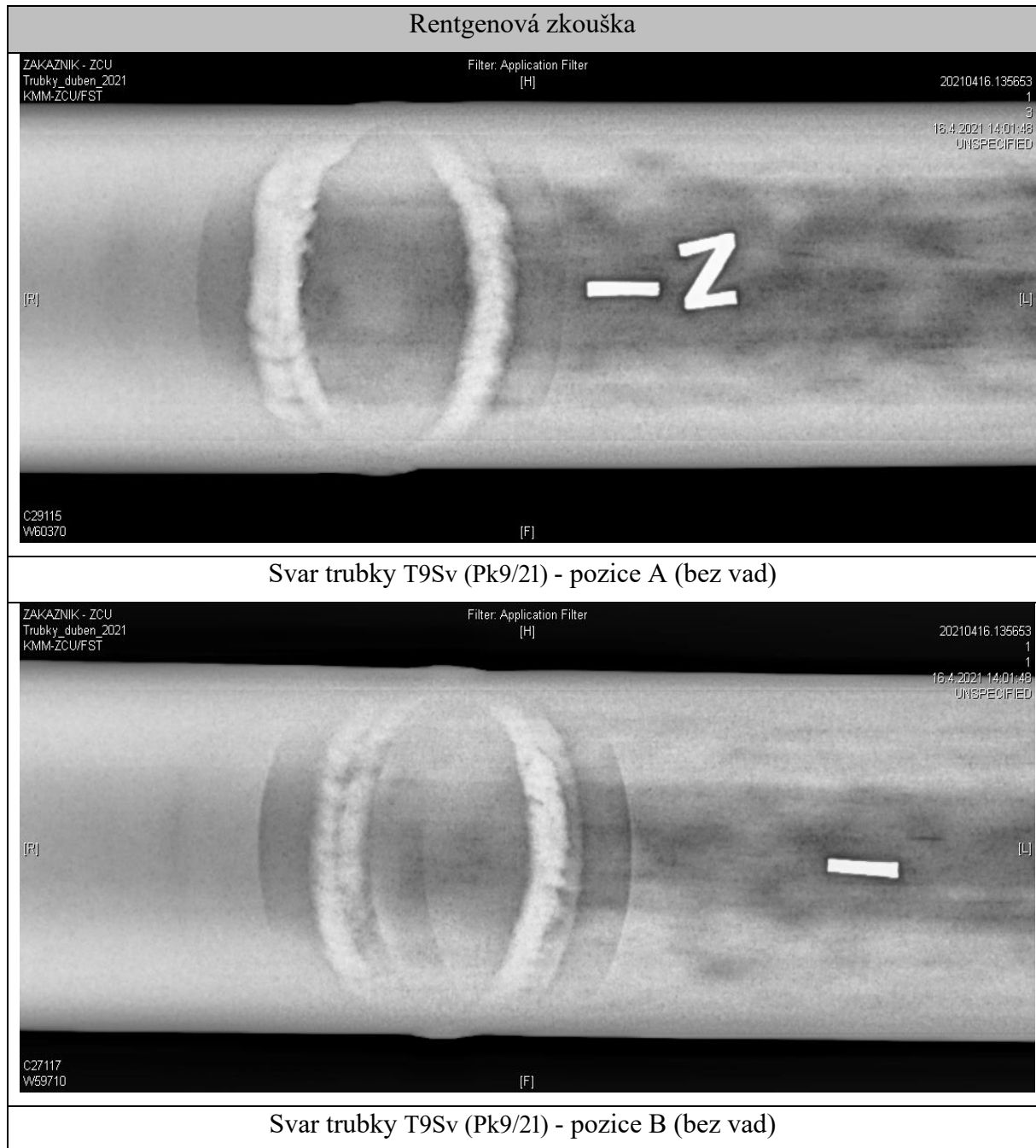


Příloha 9 - Svarový spoj T9Sv

| Svar T9Sv (Pk9/21) |                   |     |         |         |         |         |         |         |
|--------------------|-------------------|-----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Parametry          | Sektor            | S1  | S2      | S3      | S4      | S5      | S6      | S7      |
|                    | Kořenová vrstva   |     |         |         |         |         |         |         |
|                    | $I_p$ [A]         | 112 | 107     | 105     | 95      | 95      | 90      | 100     |
|                    | $I_z$ [A]         | 60  | 60      | 58      | 55      | 55      | 55      | 58      |
|                    | $V_{dr}$ [mm/min] | 275 | 275     | 300     | 300     | 300     | 300     | 350     |
|                    | U [V]             | 8   | 7,9     | 7,8     | 7,8     | 7,8     | 7,9     | 8       |
|                    | $V_{ot}$ [mm/min] | 50  | 50      | 50      | 50      | 50      | 50      | 50      |
|                    | Krycí vrstva      |     |         |         |         |         |         |         |
|                    | $I_p$ [A]         | 80  | 80 (90) | 85 (95) | 75 (85) | 70 (80) | 70 (80) | 75 (85) |
|                    | $I_z$ [A]         | 45  | 45 (50) | 45 (50) | 45 (50) | 45 (50) | 45 (50) | 47 (52) |
|                    | $V_{dr}$ [mm/min] | 425 | 405     | 380     | 300     | 350     | 370     | 380     |
|                    | U [V]             | 8,6 | 8,4     | 8,4     | 8,4     | 8,5     | 8,5     | 8,5     |
|                    | $V_{ot}$ [mm/min] | 40  | 40      | 40      | 40      | 40      | 40      | 40      |

| Vizuální zkouška |                |  |                      |  |
|------------------|----------------|--|----------------------|--|
| Pořadové číslo   | Oblast výskytu | Číselné označení dle ČSN EN ISO 6520-1 | Poloha indikace (mm) |  |
| 1                | P              | 500                                    | 15-17                |  |
| 2                | K              | 517                                    | 2                    |  |
|                  |                |  |                      |  |
|                  |                |  |                      |  |



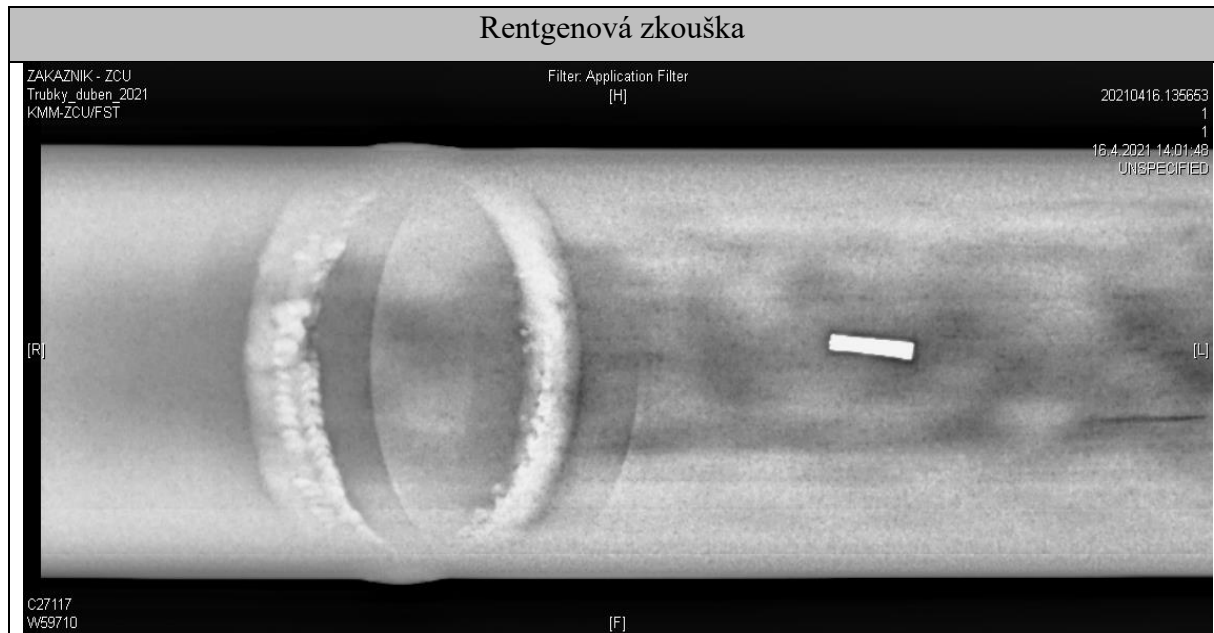


Příloha 10 - Svarový spoj T10Sv

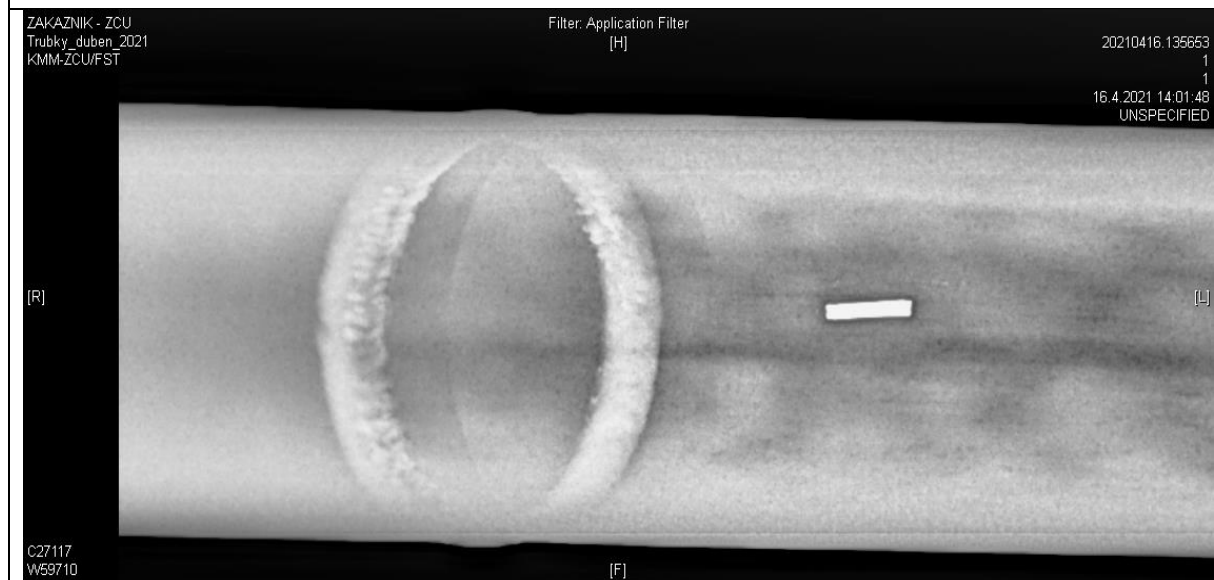
| Svar T10Sv (Pk10/21) |                   |     |     |     |     |     |     |     |
|----------------------|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Parametry            | Sektor            | S1  | S2  | S3  | S4  | S5  | S6  | S7  |
|                      | Kořenová vrstva   |     |     |     |     |     |     |     |
|                      | $I_p$ [A]         | 112 | 107 | 105 | 95  | 95  | 90  | 100 |
|                      | $I_z$ [A]         | 60  | 60  | 58  | 55  | 55  | 55  | 58  |
|                      | $V_{dr}$ [mm/min] | 275 | 275 | 300 | 300 | 300 | 300 | 350 |
|                      | U [V]             | 8   | 7,9 | 7,8 | 7,8 | 7,8 | 7,9 | 8   |
|                      | $V_{ot}$ [mm/min] | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  |
|                      | Krycí vrstva      |     |     |     |     |     |     |     |
|                      | $I_p$ [A]         | 80  | 80  | 85  | 75  | 70  | 70  | 75  |
|                      | $I_z$ [A]         | 45  | 45  | 45  | 45  | 45  | 45  | 47  |
|                      | $V_{dr}$ [mm/min] | 400 | 380 | 355 | 300 | 350 | 370 | 380 |
|                      | U [V]             | 8,6 | 8,4 | 8,4 | 8,4 | 8,5 | 8,5 | 8,5 |
|                      | $V_{ot}$ [mm/min] | 40  | 40  | 40  | 40  | 40  | 40  | 40  |

| Vizuální zkouška |                |  |                      |  |
|------------------|----------------|--|----------------------|--|
| Pořadové číslo   | Oblast výskytu | Číselné označení dle ČSN EN ISO 6520-1 | Poloha indikace (mm) |  |
| 1                | P              | 501                                    | 17-18                |  |
| 2                | K              | 515                                    | 17                   |  |
|                  |                |  |                      |  |
|                  |                |  |                      |  |




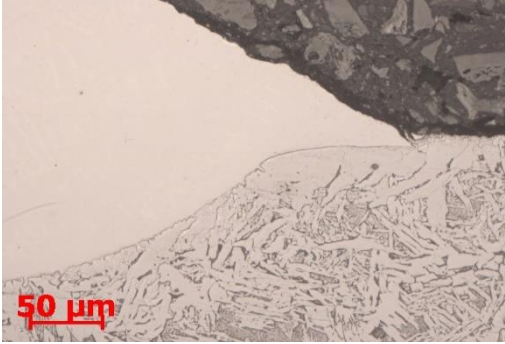

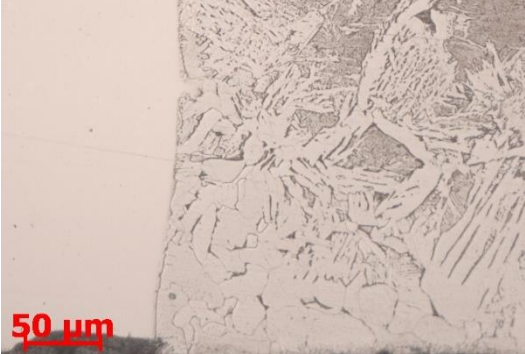

| Kapilární zkouška   |  |
|---|--|
|   |  |
| Výsledek kapilární zkoušky vzorku T10Sv (Pk10/21) (bez vad) |  |

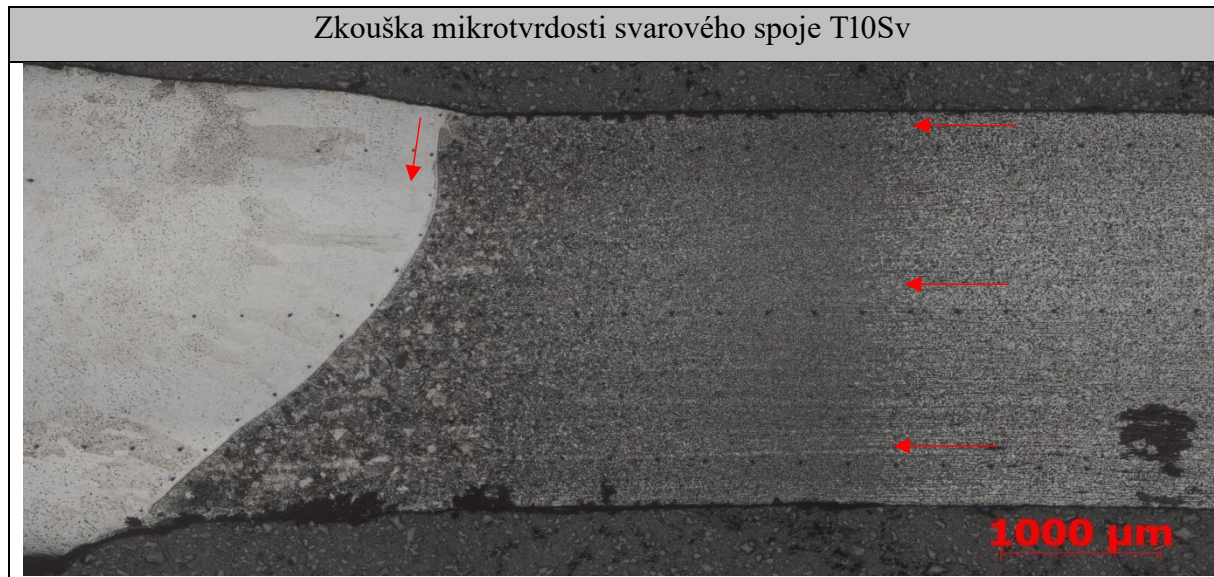


Svar trubky T10Sv (Pk10/21) - pozice A - Patrná je vada tvaru kořene (500)

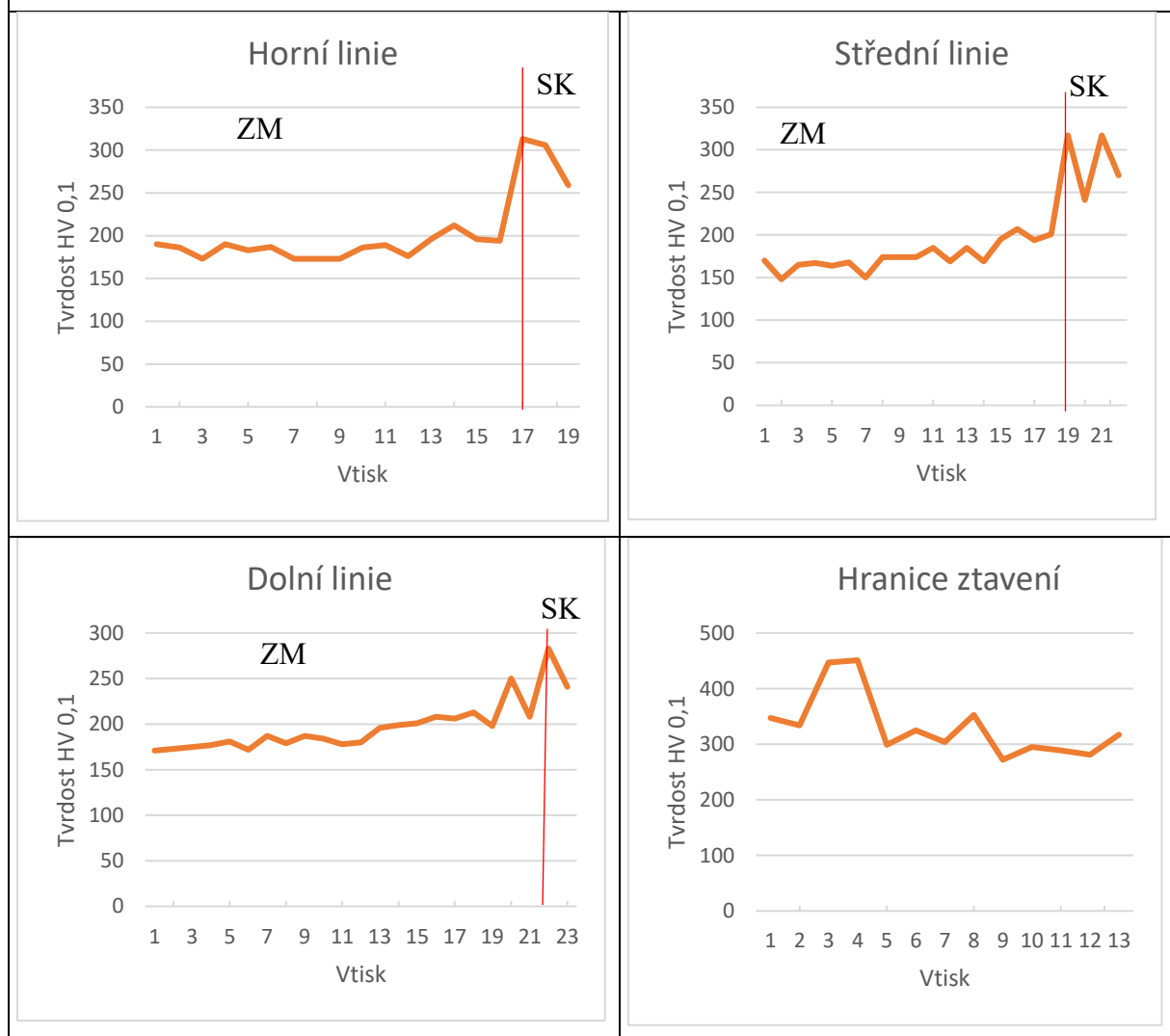


Svar trubky T10Sv (Pk10/21) - pozice B - Patrná je vada tvaru kořene (500)

| Metalografické snímky svarového spoje T10Sv  |  |
|--|--|
|                |  |
| Vzorek 10/1, poloha 1°, zvětšeno 25x, leptáno roztokem HCl, H <sub>2</sub> O, HNO <sub>3</sub>   |  |
|                |  |
| Vzorek 10/3, poloha 310°, zvětšeno 25x, leptáno roztokem HCl, H <sub>2</sub> O, HNO <sub>3</sub> |  |
|               |  |
| Vzorek 10/4, poloha 180°, zvětšeno 100x, leptáno roztokem Nital 1%, TOO oceli P265GH             |  |
|               |  |
| Vzorek 10/3, zvětšeno 200x, hranice ztavení SK s P265GH, hlava svaru                             | Vzorek 10/3, zvětšeno 200x, hranice ztavení SK s Wr.N. 1.4541, hlava svaru           |
|               |  |
| Vzorek 10/3, zvětšeno 200x, hranice ztavení SK s P265GH, kořen svaru                             | Vzorek 10/3, zvětšeno 200x, hranice ztavení SK s Wr.N. 1.4541, kořen svaru           |



Snímek makrostruktury po provedení mikrotvrdost HV0,1; červeně je vyznačen směr měření

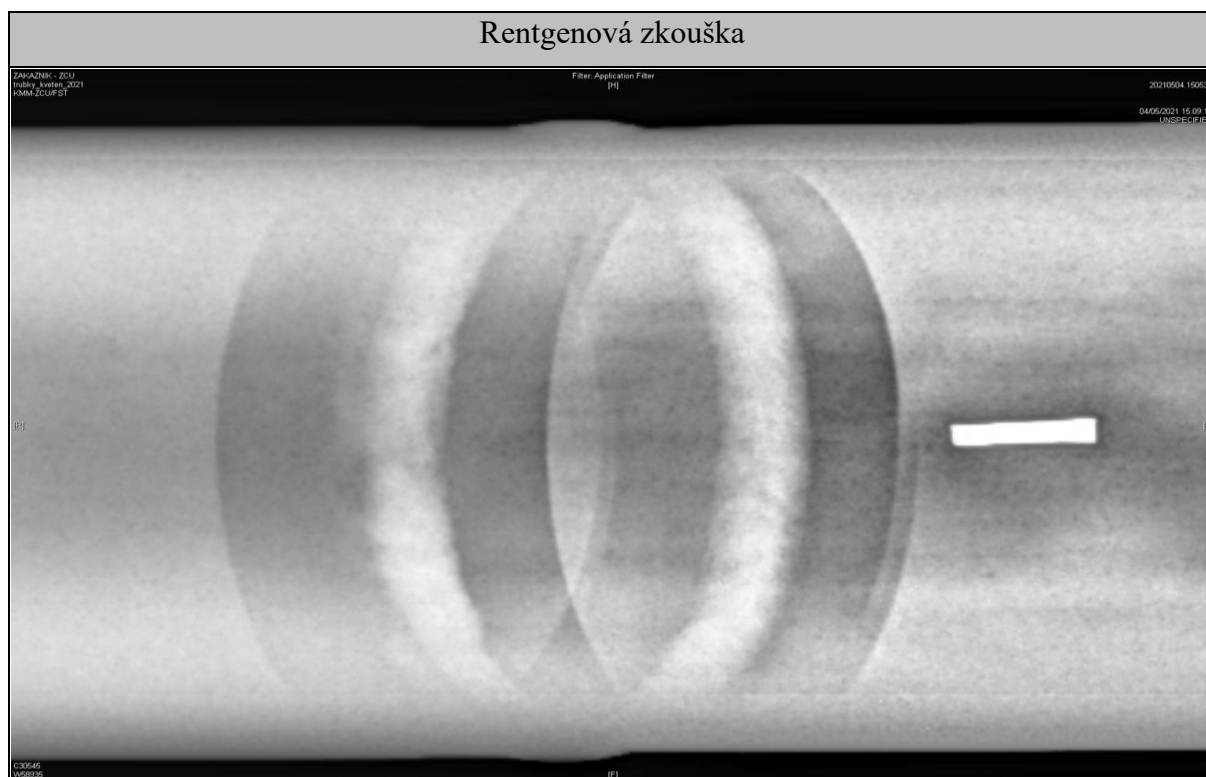


Příloha 11 - Svarový spoj V2Sv

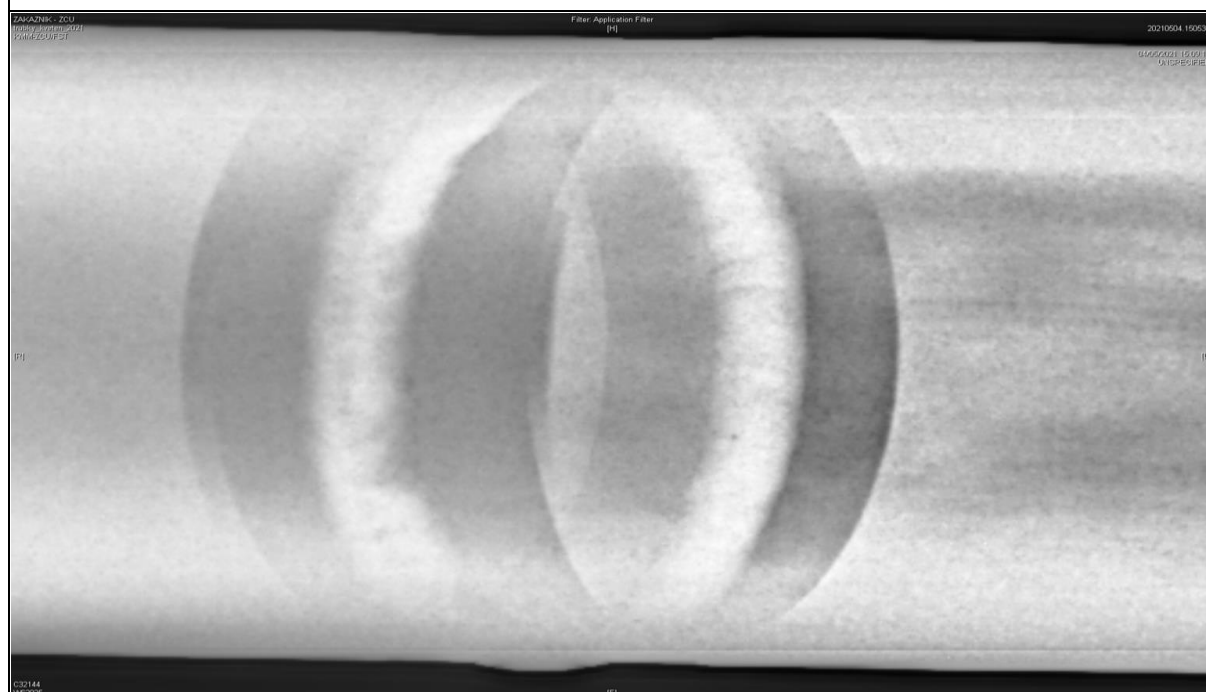
| Svar V2Sv         |                   |     |     |     |     |     |     |     |
|-------------------|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Parametry         | Sektor            | S1  | S2  | S3  | S4  | S5  | S6  | S7  |
|                   | Kořenová vrstva   |     |     |     |     |     |     |     |
|                   | $I_p$ [A]         | 125 | 120 | 115 | 110 | 110 | 105 | 110 |
|                   | $I_z$ [A]         | 60  | 60  | 58  | 55  | 55  | 55  | 58  |
|                   | $V_{dr}$ [mm/min] | 150 | 150 | 200 | 200 | 200 | 200 | 250 |
|                   | U [V]             | 8   | 7,9 | 7,8 | 7,8 | 7,8 | 7,9 | 8   |
|                   | $V_{ot}$ [mm/min] | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  |
|                   | Krycí vrstva      |     |     |     |     |     |     |     |
|                   | $I_p$ [A]         | 80  | 75  | 75  | 80  | 75  | 72  | 77  |
|                   | $I_z$ [A]         | 45  | 45  | 45  | 45  | 45  | 45  | 45  |
|                   | $V_{dr}$ [mm/min] | 195 | 195 | 200 | 200 | 200 | 200 | 210 |
|                   | U [V]             | 8,6 | 8,4 | 8,4 | 8,4 | 8,5 | 8,5 | 8,5 |
| $V_{ot}$ [mm/min] | 40                | 40  | 40  | 40  | 40  | 40  | 40  |     |

| Vizuální zkouška |                |  |                       |  |
|------------------|----------------|--|-----------------------|--|
| Pořadové číslo   | Oblast výskytu | Číselné označení dle ČSN EN ISO 6520-1 | Položka indikace (mm) |  |
| 1                | K              | 515                                    | 15-17                 |  |
|                  |                |  |                       |  |
|                  |                |  |                       |  |
|                  |                |  |                       |  |

| Kapilární zkouška                                |  |
|--|--|
|  |  |
| Výsledek kapilární zkoušky vzorku V2Sv (bez vad) |  |



**Svar trubky V2Sv - pozice A (bez vad)**



**Svar trubky V2Sv - pozice B (bez vad)**



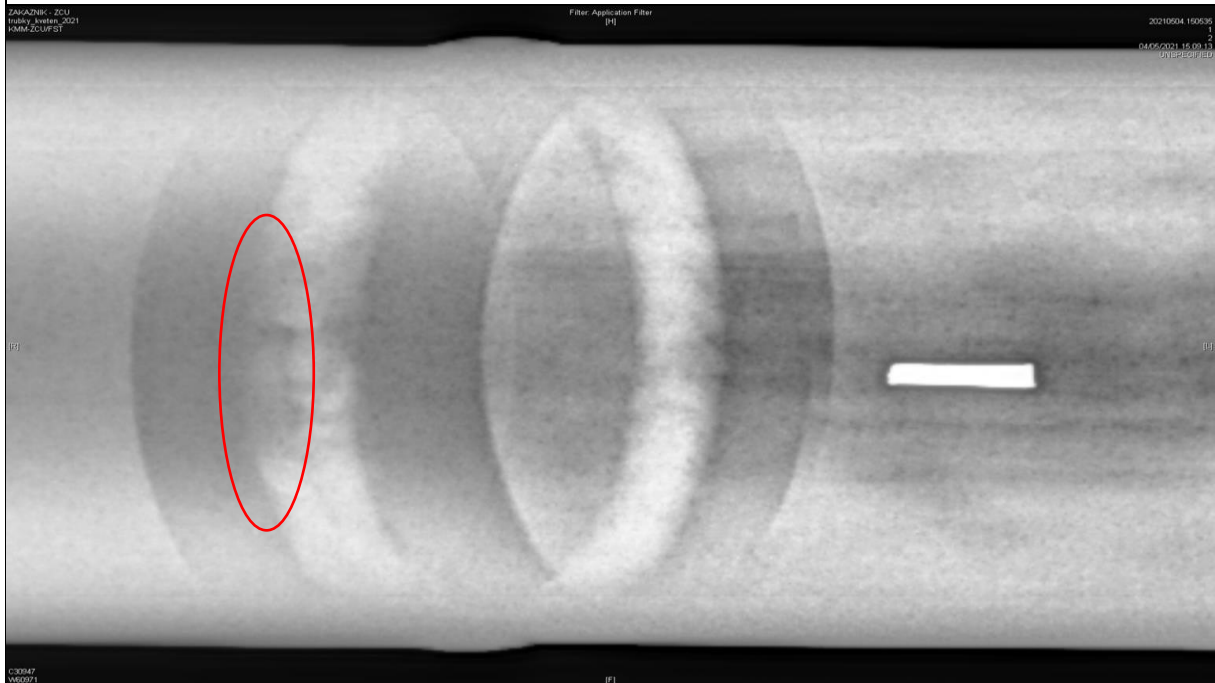
Příloha 12 - Svarový spoj V3Sv

| Svar V3Sv |                   |     |     |     |     |     |     |     |
|-----------|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Parametry | Sektor            | S1  | S2  | S3  | S4  | S5  | S6  | S7  |
|           | Kořenová vrstva   |     |     |     |     |     |     |     |
|           | $I_p$ [A]         | 125 | 120 | 115 | 110 | 110 | 105 | 110 |
|           | $I_z$ [A]         | 60  | 60  | 58  | 55  | 55  | 55  | 58  |
|           | $V_{dr}$ [mm/min] | 150 | 150 | 200 | 200 | 200 | 200 | 250 |
|           | U [V]             | 8   | 7,9 | 7,8 | 7,8 | 7,8 | 7,9 | 8   |
|           | $V_{ot}$ [mm/min] | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  |
|           | Krycí vrstva      |     |     |     |     |     |     |     |
|           | $I_p$ [A]         | 80  | 77  | 75  | 80  | 75  | 72  | 77  |
|           | $I_z$ [A]         | 45  | 45  | 45  | 45  | 45  | 45  | 45  |
|           | $V_{dr}$ [mm/min] | 195 | 195 | 200 | 200 | 200 | 200 | 210 |
|           | U [V]             | 8,6 | 8,4 | 8,4 | 8,4 | 8,5 | 8,5 | 8,5 |
|           | $V_{ot}$ [mm/min] | 40  | 40  | 40  | 40  | 40  | 40  | 40  |

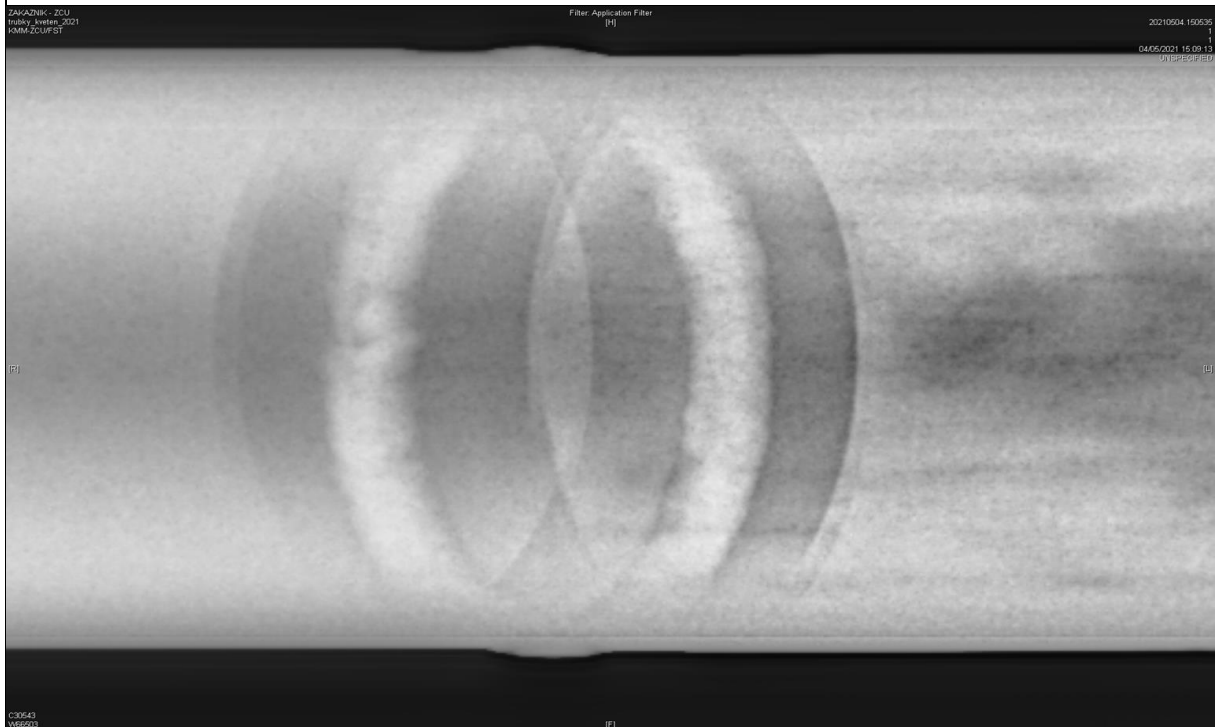
| Vizuální zkouška |                |  |                      |  |
|------------------|----------------|--|----------------------|--|
| Pořadové číslo   | Oblast výskytu | Číselné označení dle ČSN EN ISO 6520-1 | Poloha indikace (mm) |  |
| 1                | P              | 517                                    | 15                   |  |
| 2                | P              | 602                                    | 0                    |  |
| 3                | K              | 515                                    | 5-6                  |  |
|                  |                |  |                      |  |

| Kapilární zkouška                                |  |
|--|--|
|  |  |
| Výsledek kapilární zkoušky vzorku V3Sv (bez vad) |  |

### Rentgenová zkouška



### Svar trubky V3Sv- pozice A - Patrný studený spoj (401)

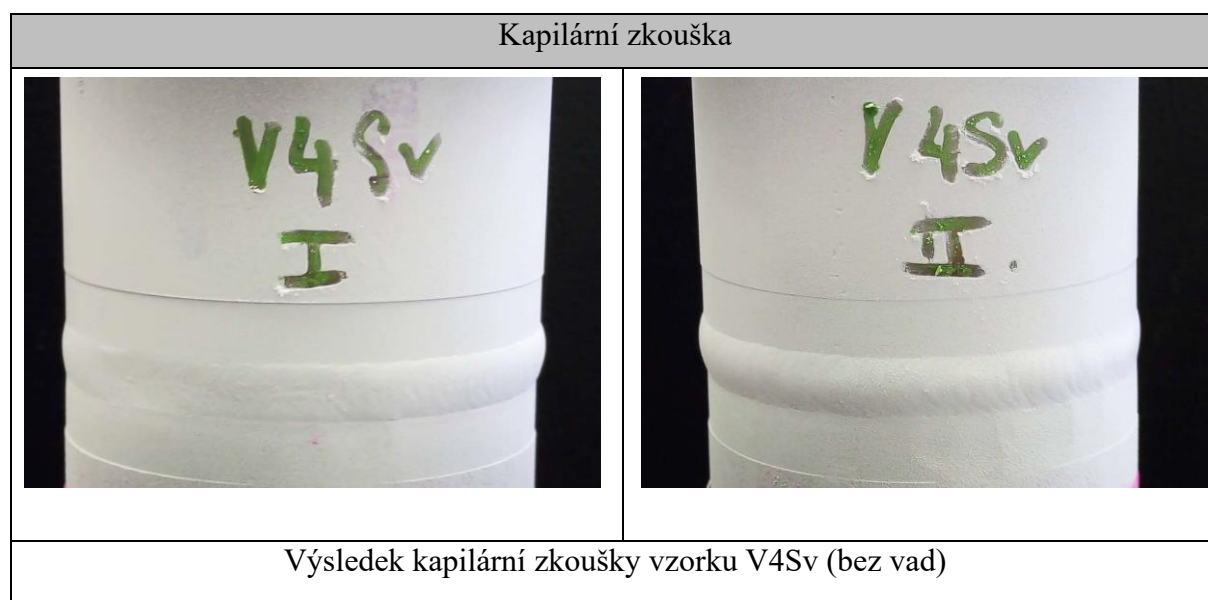


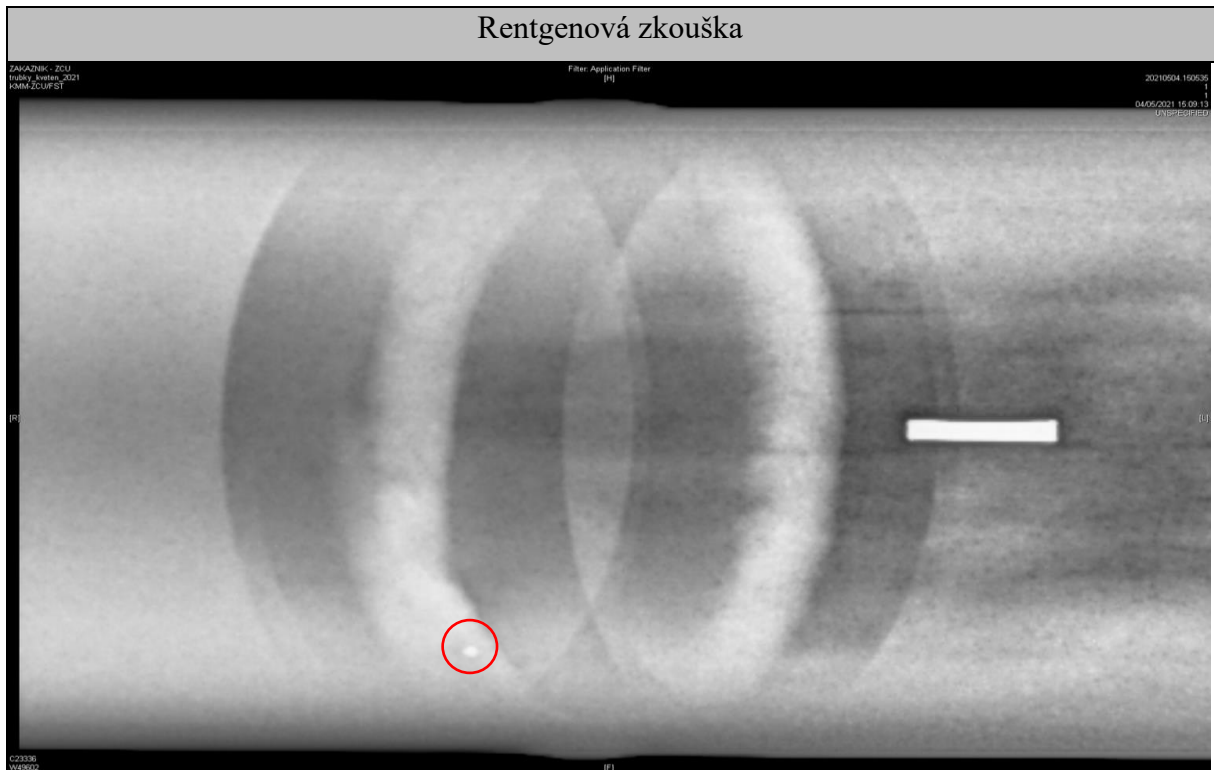
### Svar trubky V3Sv - pozice B (bez vad)

Příloha 13 - Svarový spoj V4Sv

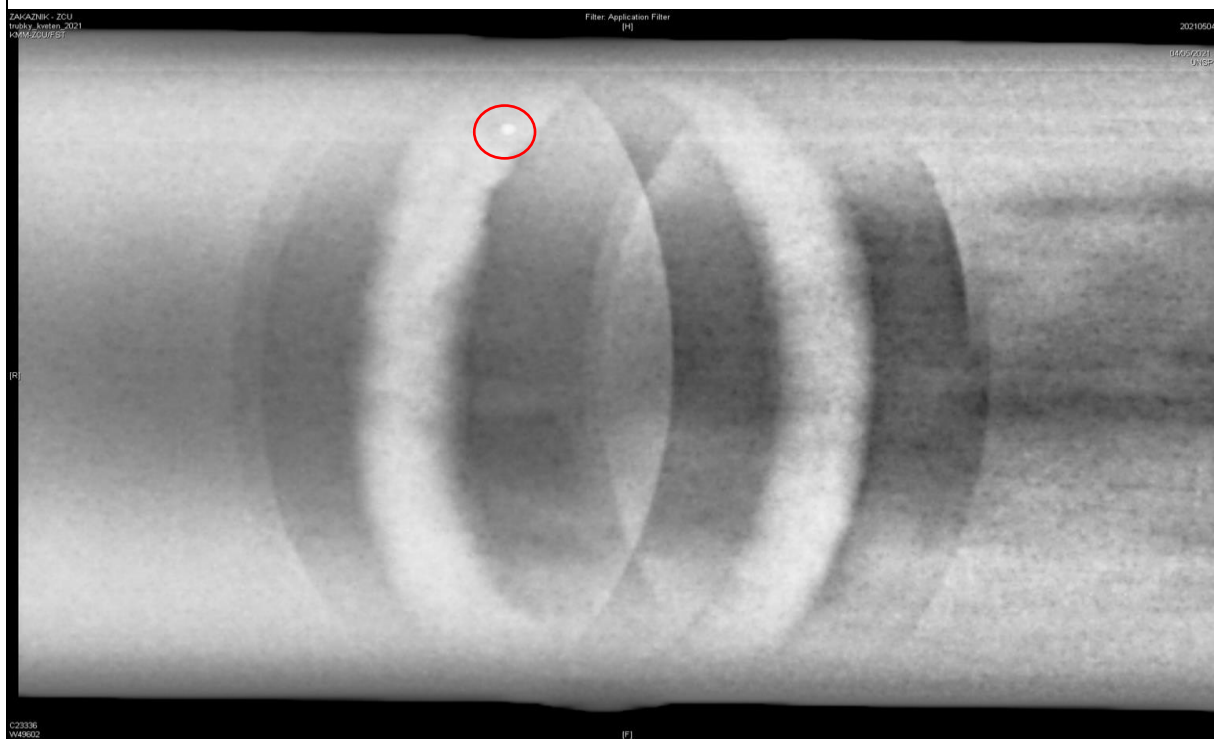
| Svar V4Sv         |                   |     |     |     |     |     |     |     |
|-------------------|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Parametry         | Sektor            | S1  | S2  | S3  | S4  | S5  | S6  | S7  |
|                   | Kořenová vrstva   |     |     |     |     |     |     |     |
|                   | $I_p$ [A]         | 125 | 120 | 115 | 110 | 110 | 105 | 110 |
|                   | $I_z$ [A]         | 60  | 60  | 58  | 55  | 55  | 55  | 58  |
|                   | $V_{dr}$ [mm/min] | 150 | 150 | 200 | 200 | 200 | 200 | 250 |
|                   | U [V]             | 8   | 7,9 | 7,8 | 7,8 | 7,8 | 7,9 | 8   |
|                   | $V_{ot}$ [mm/min] | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  |
|                   | Krycí vrstva      |     |     |     |     |     |     |     |
|                   | $I_p$ [A]         | 80  | 77  | 75  | 80  | 75  | 72  | 77  |
|                   | $I_z$ [A]         | 45  | 45  | 45  | 45  | 45  | 45  | 45  |
|                   | $V_{dr}$ [mm/min] | 190 | 190 | 200 | 200 | 200 | 200 | 210 |
|                   | U [V]             | 8,6 | 8,4 | 8,4 | 8,4 | 8,5 | 8,5 | 8,5 |
| $V_{ot}$ [mm/min] | 40                | 40  | 40  | 40  | 40  | 40  | 40  |     |

| Vizuální zkouška |                |  |                      |  |
|------------------|----------------|--|----------------------|--|
| Pořadové číslo   | Oblast výskytu | Číselné označení dle ČSN EN ISO 6520-1 | Poloha indikace (mm) |  |
| 1                | P              | 517                                    | 0-1                  |  |
| 2                | K              | 515                                    | 13-17                |  |
|                  |                |  |                      |  |
|                  |                |  |                      |  |




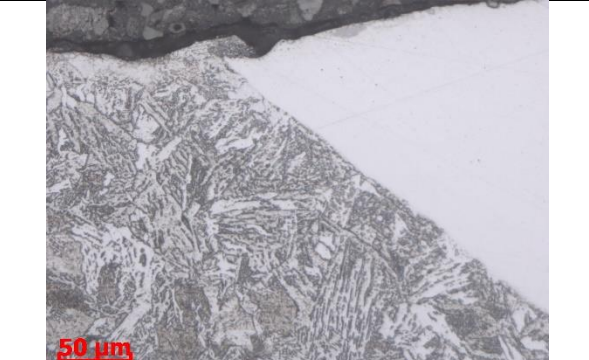
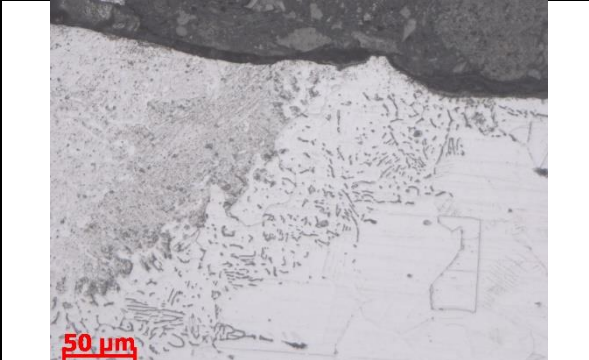
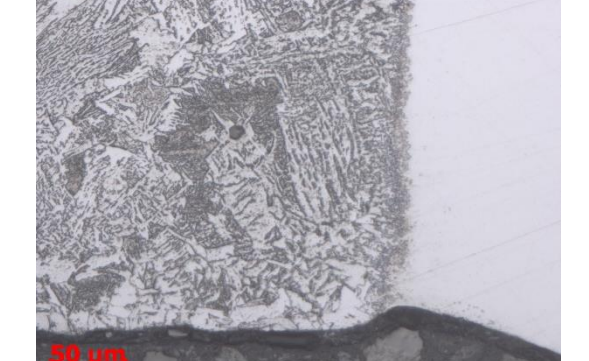



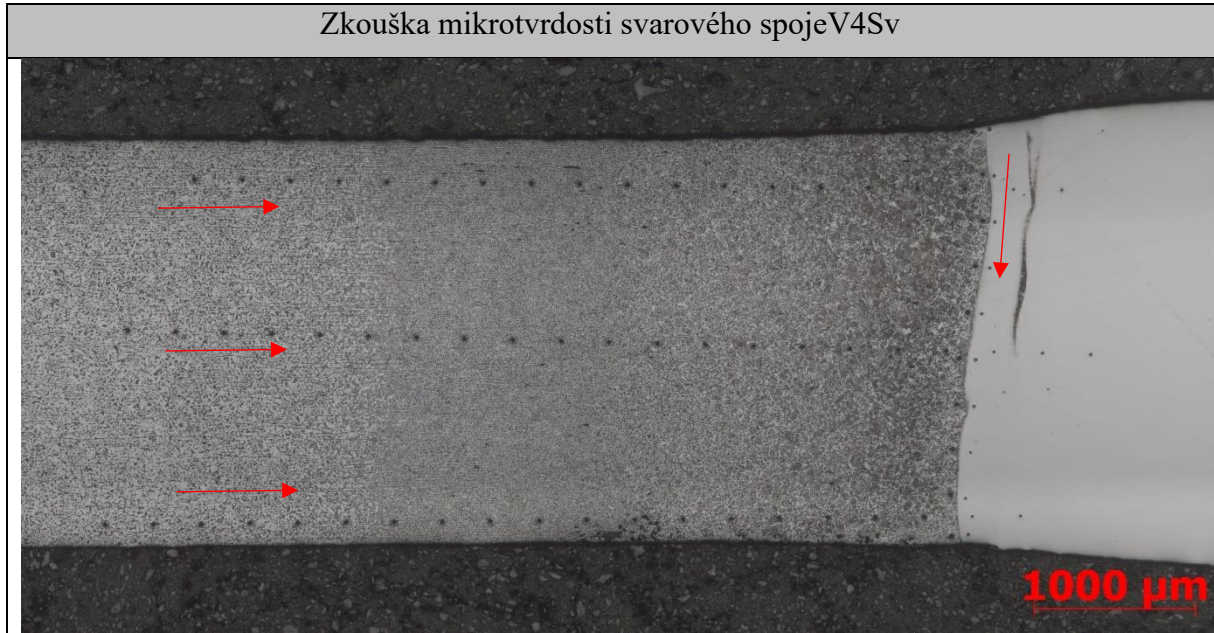


Svar trubky V4Sv- pozice A - Přítomen vměstek (300)

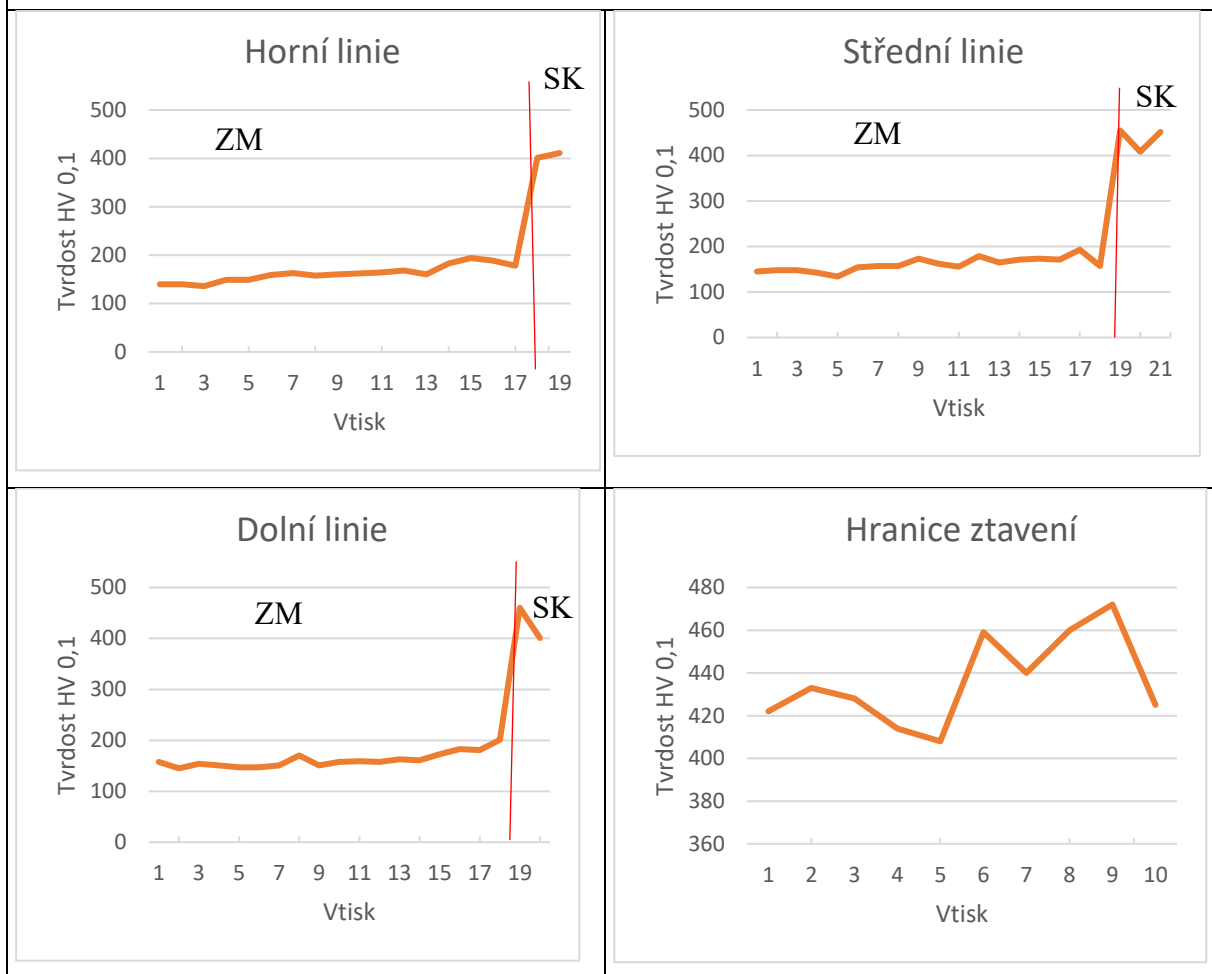


Svar trubky V4Sv - pozice B - Přítomen vměstek (300)

| Metalografické snímky svarového spoje V4Sv   |  |
|--|--|
|                |  |
| Vzorek V4/1, poloha 10°, zvětšeno 25x, leptáno roztokem HCl, H <sub>2</sub> O, HNO <sub>3</sub>  |  |
|                |  |
| Vzorek V4/2, poloha 180°, zvětšeno 25x, leptáno roztokem HCl, H <sub>2</sub> O, HNO <sub>3</sub> |  |
|               |  |
| Vzorek V4/1, poloha 10°, zvětšeno 100x, leptáno roztokem Nital 1%, TOO oceli P265GH              |  |
|               |  |
| Vzorek V4/1, zvětšeno 200x, hranice ztavení SK s P265GH, hlava svaru                             | Vzorek V4/1, zvětšeno 200x, hranice ztavení SK s Wr.N. 1.4541, hlava svaru           |
|               |  |
| Vzorek V4/1, zvětšeno 200x, hranice ztavení SK s P265GH, kořen svaru                             | Vzorek V4/1, zvětšeno 200x, hranice ztavení SK s Wr.N. 1.4541, kořen svaru           |



Snímek makrostruktury po provedení mikrotvrdost HV0,1; červeně je vyznačen směr měření

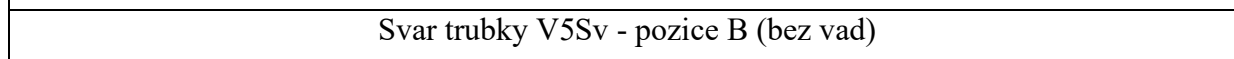
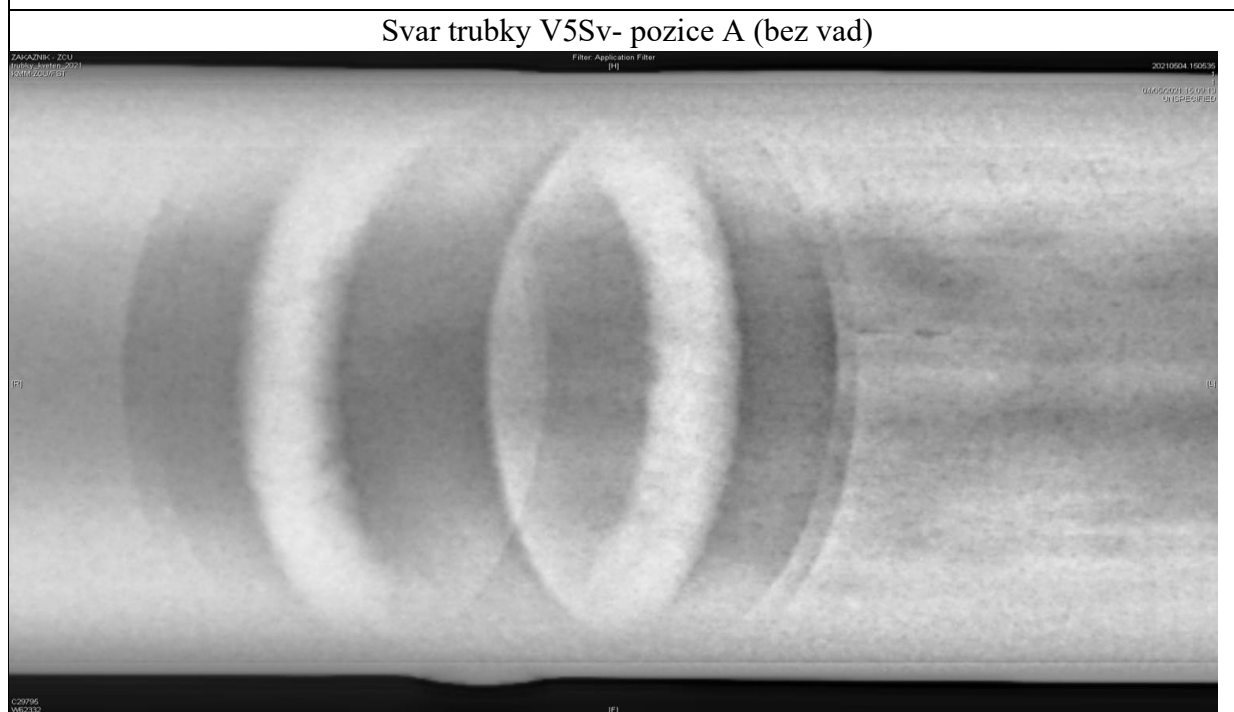
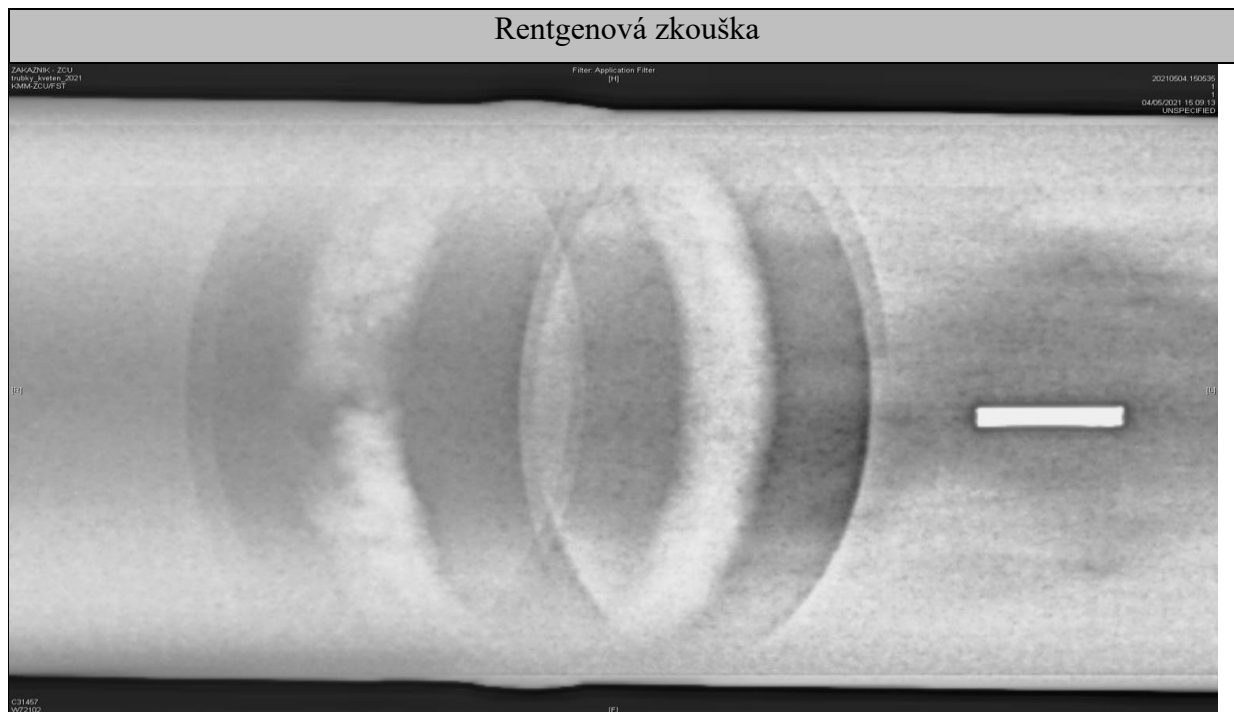


Příloha 14 - Svarový spoj V5Sv

| Svar V5Sv |                   |       |       |       |       |       |     |     |
|-----------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-----|
| Parametry | Sektor            | S1    | S2    | S3    | S4    | S5    | S6  | S7  |
|           | Kořenová vrstva   |       |       |       |       |       |     |     |
|           | $I_p$ [A]         | 122,5 | 117,5 | 112,5 | 112,5 | 107,5 | 105 | 110 |
|           | $I_z$ [A]         | 60    | 60    | 58    | 55    | 55    | 55  | 58  |
|           | $V_{dr}$ [mm/min] | 150   | 150   | 200   | 200   | 200   | 200 | 250 |
|           | U [V]             | 8     | 7,9   | 7,8   | 7,8   | 7,8   | 7,9 | 8   |
|           | $V_{ot}$ [mm/min] | 50    | 50    | 50    | 50    | 50    | 50  | 50  |
|           | Krycí vrstva      |       |       |       |       |       |     |     |
|           | $I_p$ [A]         | 82    | 79    | 75    | 80    | 75    | 72  | 77  |
|           | $I_z$ [A]         | 45    | 45    | 45    | 45    | 45    | 45  | 45  |
|           | $V_{dr}$ [mm/min] | 195   | 195   | 195   | 195   | 195   | 195 | 210 |
|           | U [V]             | 8,6   | 8,4   | 8,4   | 8,4   | 8,5   | 8,5 | 8,5 |
|           | $V_{ot}$ [mm/min] | 40    | 40    | 40    | 40    | 40    | 40  | 40  |

| Vizuální zkouška |                |  |                      |  |
|------------------|----------------|--|----------------------|--|
| Pořadové číslo   | Oblast výskytu | Číselné označení dle ČSN EN ISO 6520-1 | Poloha indikace (mm) |  |
| 1                | K              | 515                                    | 5-6                  |  |
|                  |                |  |                      |  |
|                  |                |  |                      |  |
|                  |                |  |                      |  |

| Kapilární zkouška                                |  |
|--|--|
|  |  |
| Výsledek kapilární zkoušky vzorku V5Sv (bez vad) |  |



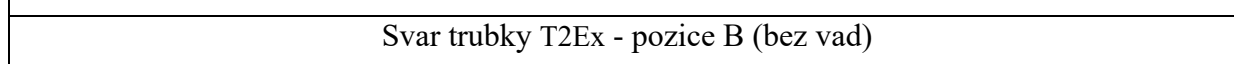
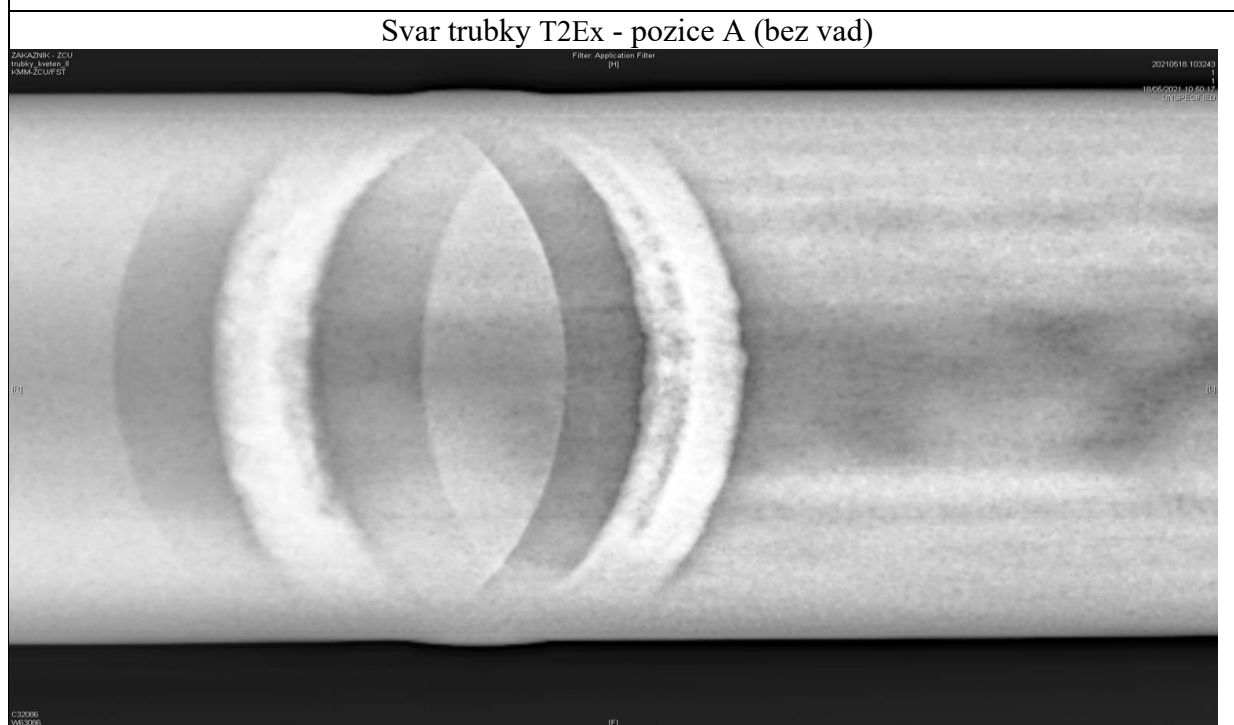
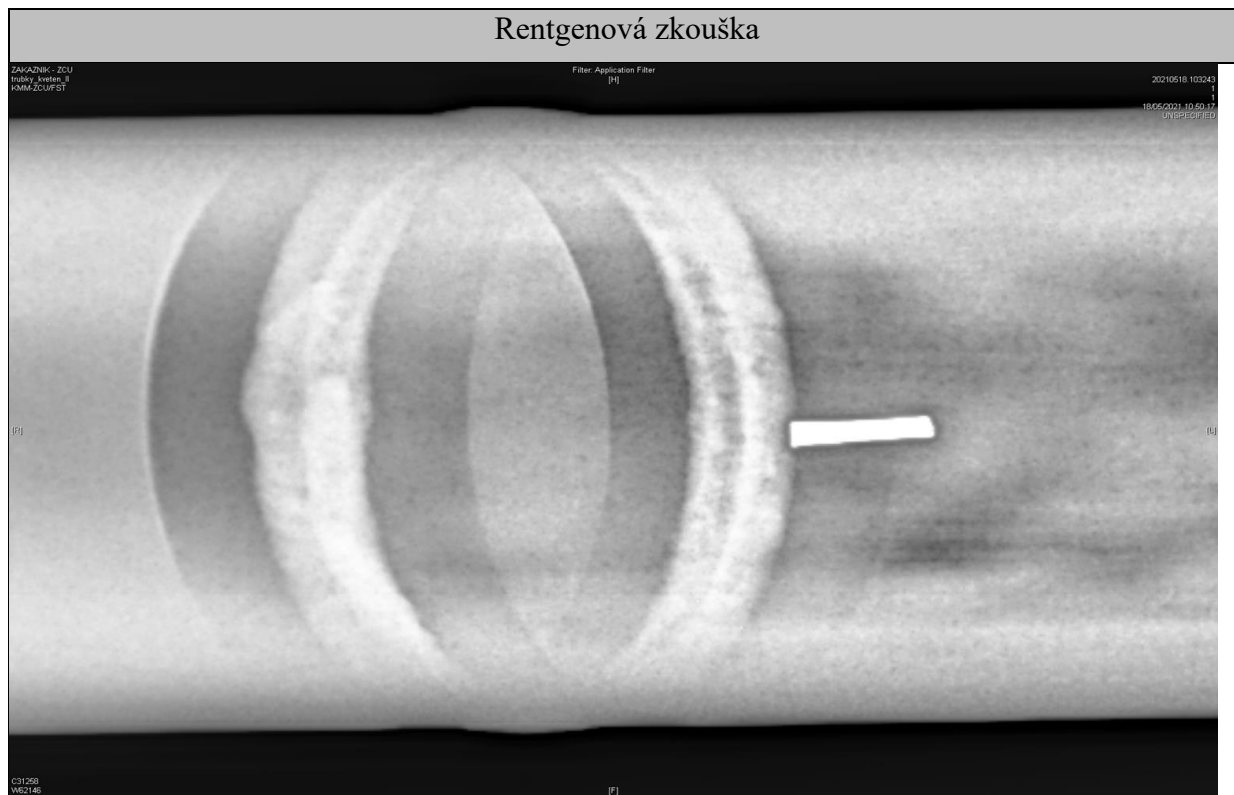


Příloha 15 - Svarový spoj T2Ex

| Svar T2Ex         |                   |     |     |     |     |     |     |     |
|-------------------|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Parametry         | Sektor            | S1  | S2  | S3  | S4  | S5  | S6  | S7  |
|                   | Kořenová vrstva   |     |     |     |     |     |     |     |
|                   | $I_p$ [A]         | 112 | 107 | 105 | 95  | 95  | 90  | 100 |
|                   | $I_z$ [A]         | 60  | 60  | 58  | 55  | 55  | 55  | 58  |
|                   | $V_{dr}$ [mm/min] | 275 | 275 | 300 | 300 | 300 | 300 | 350 |
|                   | U [V]             | 8   | 7,9 | 7,8 | 7,8 | 7,8 | 7,9 | 8   |
|                   | $V_{ot}$ [mm/min] | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  |
|                   | Krycí vrstva      |     |     |     |     |     |     |     |
|                   | $I_p$ [A]         | 80  | 80  | 80  | 75  | 70  | 70  | 75  |
|                   | $I_z$ [A]         | 45  | 45  | 45  | 45  | 45  | 45  | 47  |
|                   | $V_{dr}$ [mm/min] | 350 | 330 | 330 | 250 | 300 | 320 | 330 |
|                   | U [V]             | 8,6 | 8,4 | 8,4 | 8,4 | 8,5 | 8,5 | 8,5 |
| $V_{ot}$ [mm/min] | 40                | 40  | 40  | 40  | 40  | 40  | 40  |     |

| Vizuální zkouška |                |  |                      |  |
|------------------|----------------|--|----------------------|--|
| Pořadové číslo   | Oblast výskytu | Číselné označení dle ČSN EN ISO 6520-1 | Poloha indikace (mm) |  |
| 1                | P              | Hrubší housenka                        | 30-40                |  |
|                  |                |  |                      |  |
|                  |                |  |                      |  |
|                  |                |  |                      |  |

| Kapilární zkouška                                |  |
|--|--|
|  |  |
| Výsledek kapilární zkoušky vzorku T2Ex (bez vad) |  |

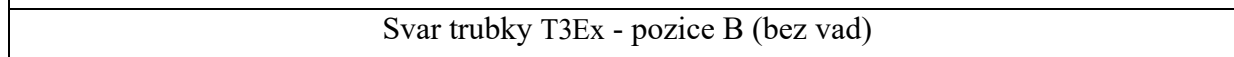
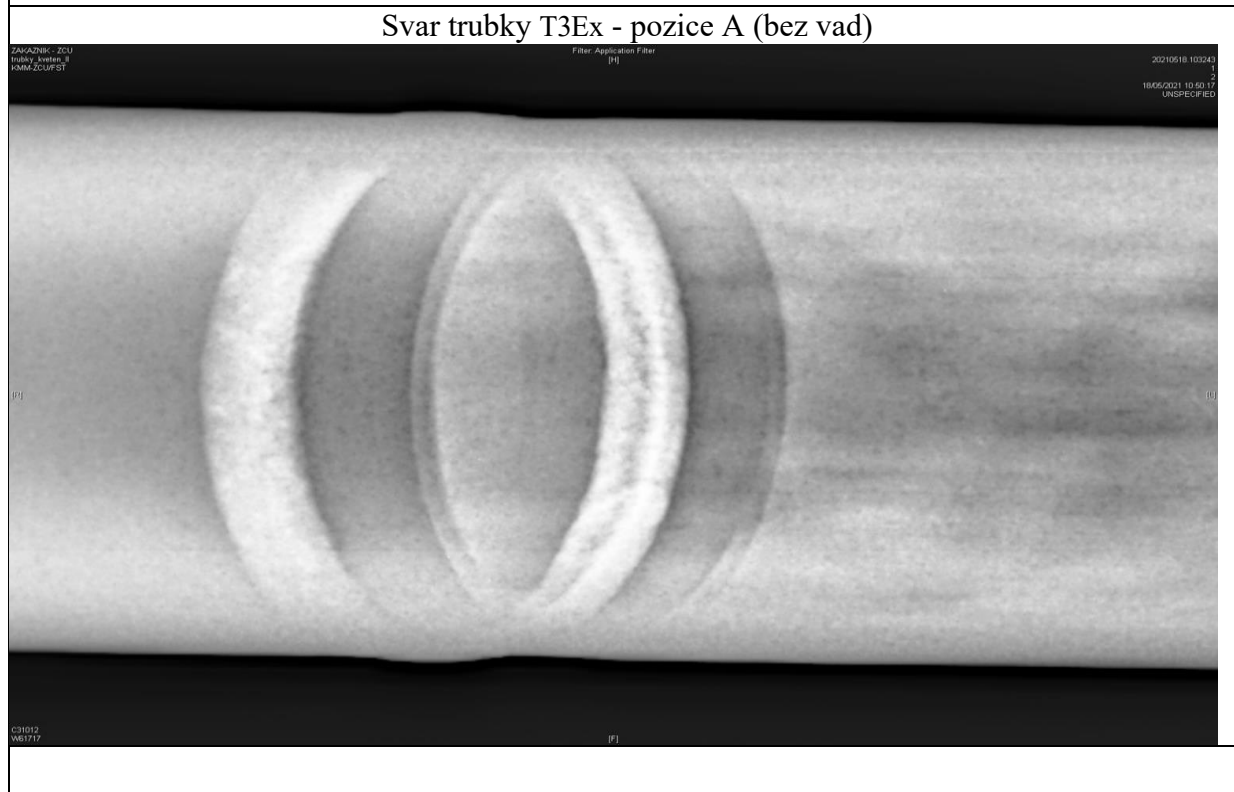
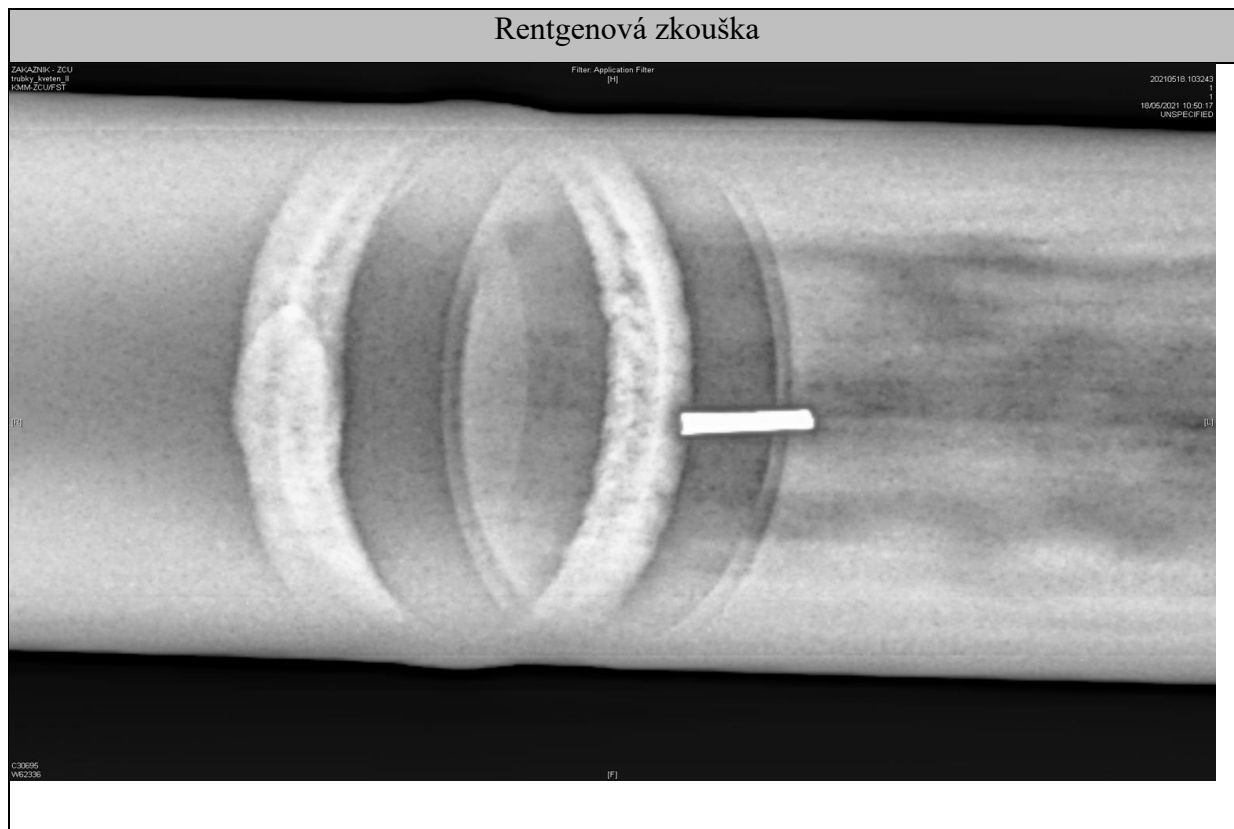


Příloha 16 - Svarový spoj T3Ex

| Svar T3Ex |                   |     |     |     |     |     |     |     |
|-----------|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Parametry | Sektor            | S1  | S2  | S3  | S4  | S5  | S6  | S7  |
|           | Kořenová vrstva   |     |     |     |     |     |     |     |
|           | $I_p$ [A]         | 112 | 107 | 105 | 95  | 93  | 88  | 98  |
|           | $I_z$ [A]         | 60  | 60  | 58  | 55  | 55  | 55  | 58  |
|           | $V_{dr}$ [mm/min] | 275 | 275 | 300 | 300 | 300 | 300 | 350 |
|           | U [V]             | 8   | 7,9 | 7,8 | 7,8 | 7,8 | 7,9 | 8   |
|           | $V_{ot}$ [mm/min] | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  |
|           | Krycí vrstva      |     |     |     |     |     |     |     |
|           | $I_p$ [A]         | 80  | 80  | 80  | 75  | 70  | 70  | 75  |
|           | $I_z$ [A]         | 45  | 45  | 45  | 45  | 45  | 45  | 47  |
|           | $V_{dr}$ [mm/min] | 350 | 330 | 305 | 225 | 275 | 295 | 305 |
|           | U [V]             | 8,6 | 8,4 | 8,4 | 8,4 | 8,5 | 8,5 | 8,5 |
|           | $V_{ot}$ [mm/min] | 40  | 40  | 40  | 40  | 40  | 40  | 40  |

| Vizuální zkouška |                |  |                      |  |
|------------------|----------------|--|----------------------|--|
| Pořadové číslo   | Oblast výskytu | Číselné označení dle ČSN EN ISO 6520-1 | Poloha indikace (mm) |  |
| 1                | P              | 501                                    | 40-70                |  |
| 2                | K              | 515                                    | 180-0                |  |
|                  |                |  |                      |  |
|                  |                |  |                      |  |

| Kapilární zkouška                                |  |
|--|--|
|  |  |
| Výsledek kapilární zkoušky vzorku T3Ex (bez vad) |  |

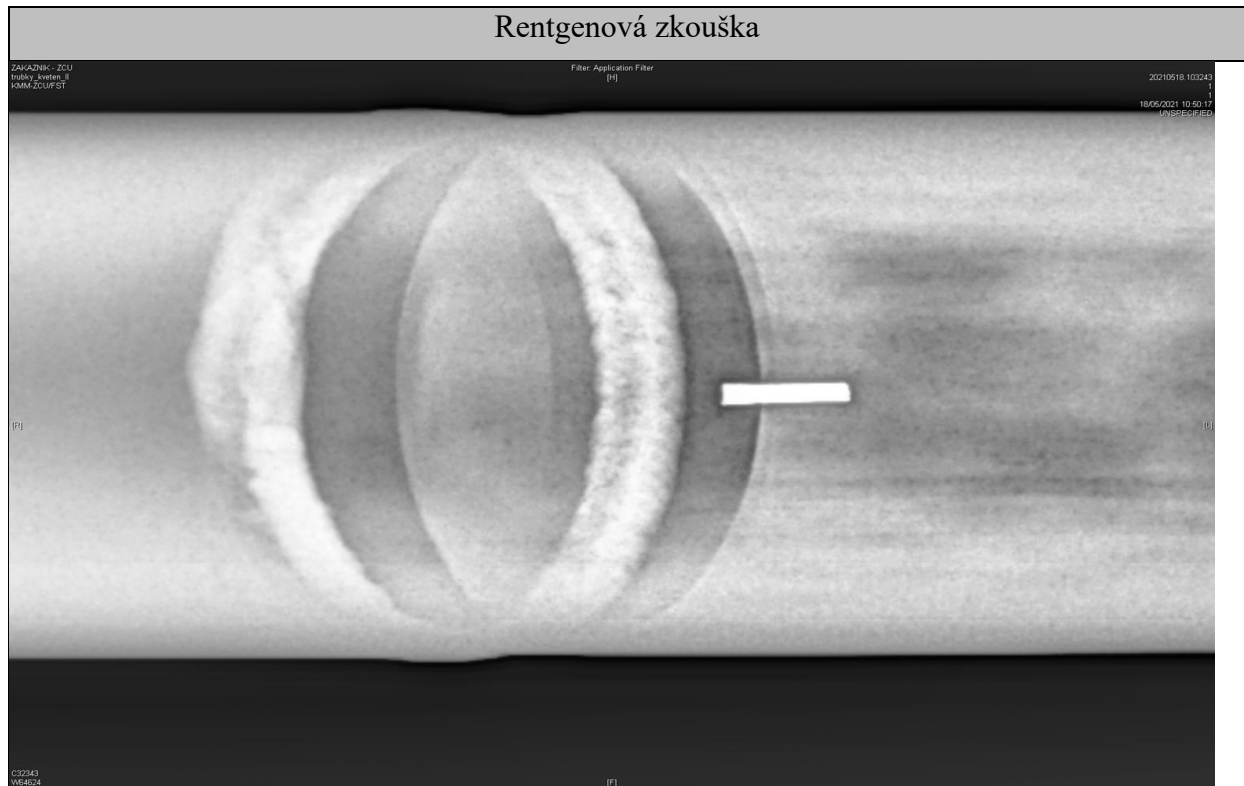


Příloha 17 - Svarový spoj T4Ex

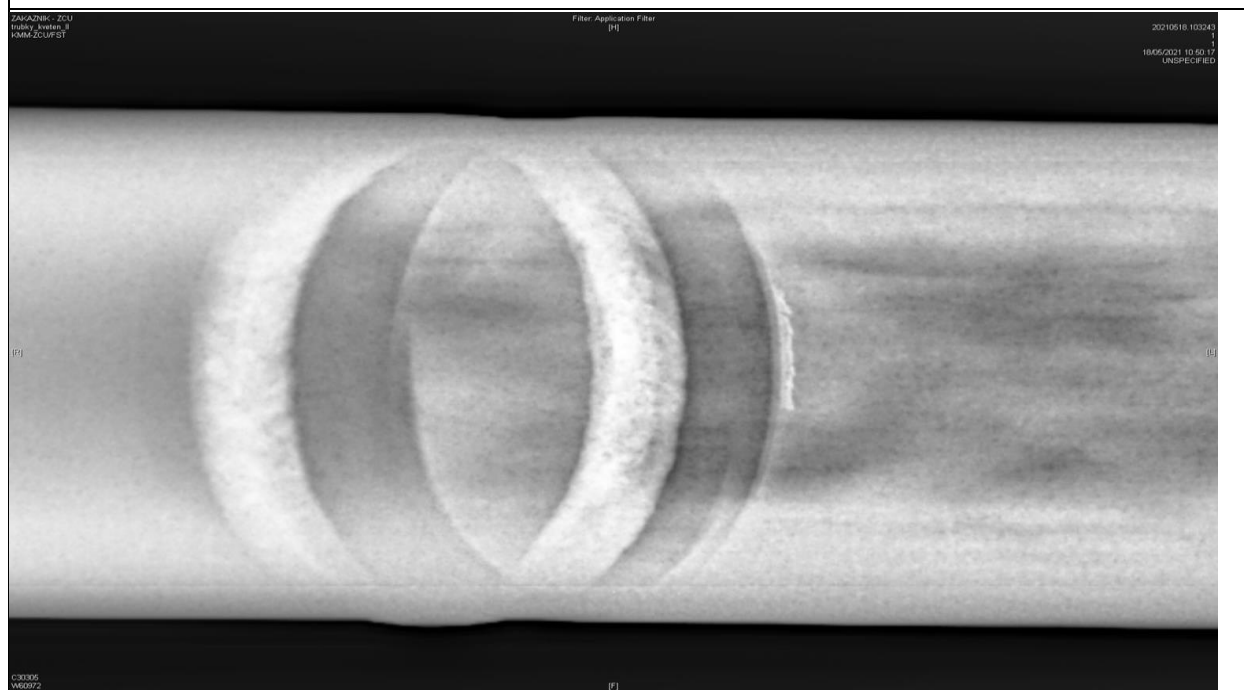
| Svar T4Ex |                   |     |     |     |     |     |     |     |
|-----------|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Parametry | Sektor            | S1  | S2  | S3  | S4  | S5  | S6  | S7  |
|           | Kořenová vrstva   |     |     |     |     |     |     |     |
|           | $I_p$ [A]         | 112 | 107 | 105 | 93  | 91  | 87  | 98  |
|           | $I_z$ [A]         | 60  | 60  | 58  | 55  | 55  | 55  | 58  |
|           | $V_{dr}$ [mm/min] | 275 | 275 | 300 | 300 | 300 | 300 | 350 |
|           | U [V]             | 8   | 7,9 | 7,8 | 7,8 | 7,8 | 7,9 | 8   |
|           | $V_{ot}$ [mm/min] | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  | 50  |
|           | Krycí vrstva      |     |     |     |     |     |     |     |
|           | $I_p$ [A]         | 80  | 80  | 80  | 75  | 70  | 70  | 75  |
|           | $I_z$ [A]         | 45  | 45  | 45  | 45  | 45  | 45  | 47  |
|           | $V_{dr}$ [mm/min] | 350 | 330 | 305 | 225 | 275 | 295 | 305 |
|           | U [V]             | 8,6 | 8,4 | 8,4 | 8,4 | 8,5 | 8,5 | 8,5 |
|           | $V_{ot}$ [mm/min] | 40  | 40  | 40  | 40  | 40  | 40  | 40  |

| Vizuální zkouška |                |  |                      |  |
|------------------|----------------|--|----------------------|--|
| Pořadové číslo   | Oblast výskytu | Číselné označení dle ČSN EN ISO 6520-1 | Poloha indikace (mm) |  |
| 1                | K              | 515                                    | 180-0                |  |
|                  |                |  |                      |  |
|                  |                |  |                      |  |
|                  |                |  |                      |  |

| Kapilární zkouška                                |  |
|--|--|
|  |  |
| Výsledek kapilární zkoušky vzorku T4Ex (bez vad) |  |



Svar trubky T4Ex - pozice A (bez vad)

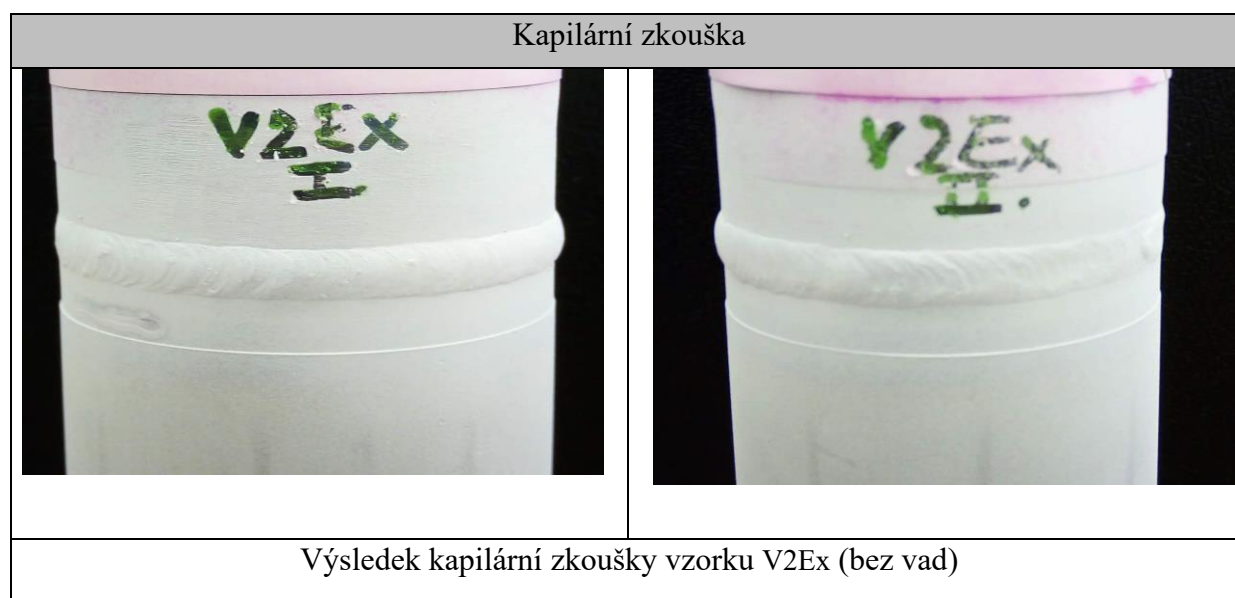


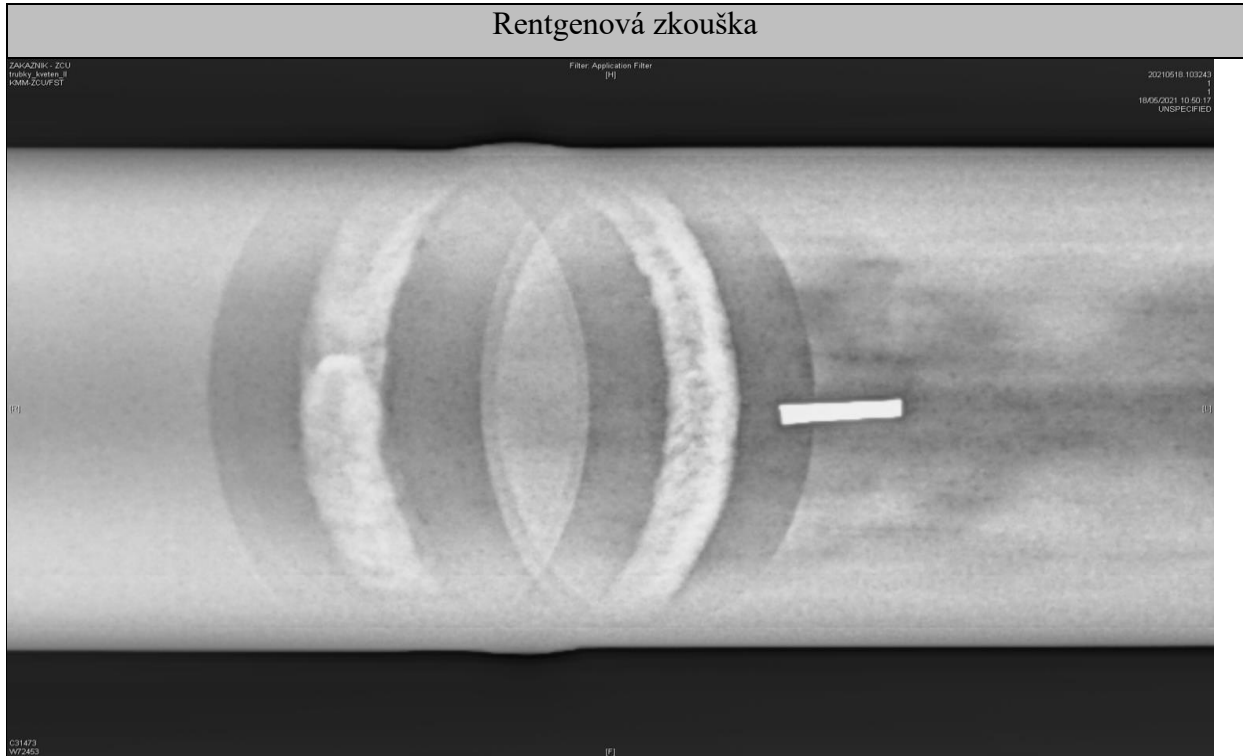
Svar trubky T4Ex - pozice B (bez vad)

Příloha 18 - Svarový spoj V2Ex

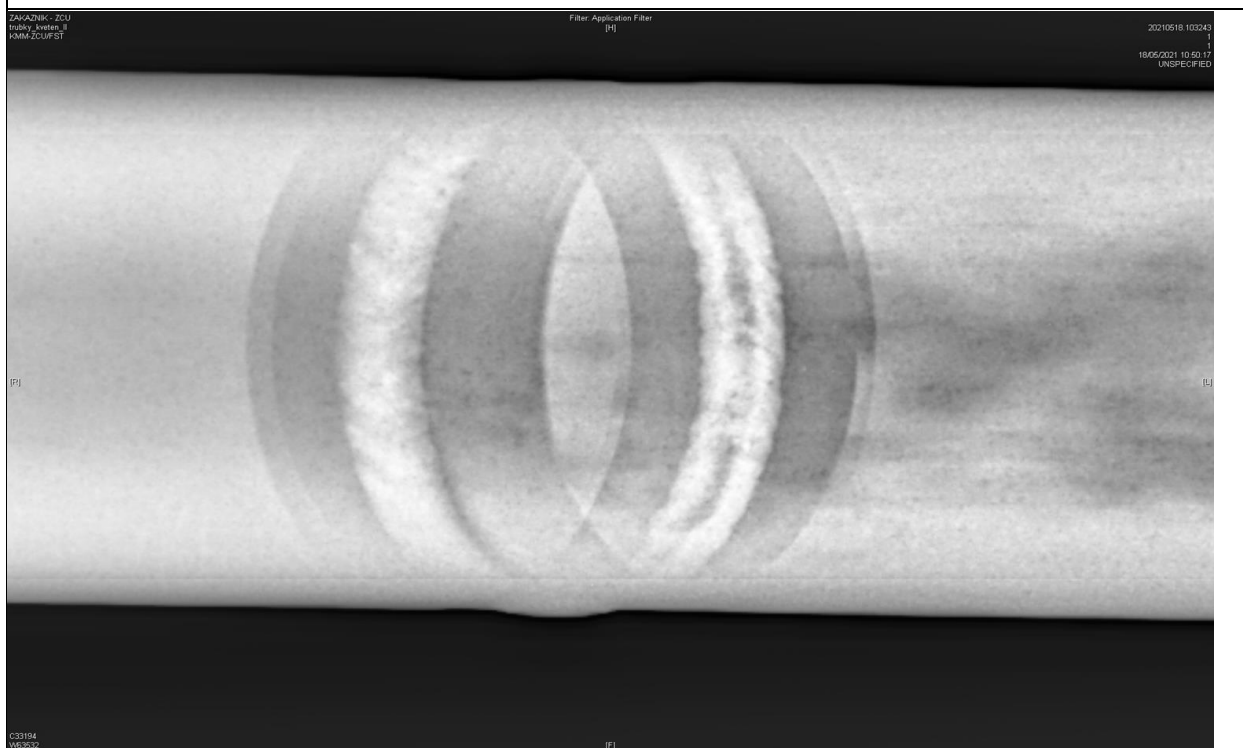
| Svar V2Ex |                   |      |      |      |     |     |     |     |
|-----------|-------------------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|
| Parametry | Sektor            | S1   | S2   | S3   | S4  | S5  | S6  | S7  |
|           | Kořenová vrstva   |      |      |      |     |     |     |     |
|           | $I_p$ [A]         | 125  | 120  | 115  | 110 | 110 | 105 | 110 |
|           | $I_z$ [A]         | 60   | 60   | 58   | 55  | 55  | 55  | 58  |
|           | $V_{dr}$ [mm/min] | 150  | 150  | 175  | 200 | 200 | 200 | 250 |
|           | U [V]             | 8    | 7,9  | 7,8  | 7,8 | 7,8 | 7,9 | 8   |
|           | $V_{ot}$ [mm/min] | 50   | 50   | 50   | 50  | 50  | 50  | 50  |
|           | Krycí vrstva      |      |      |      |     |     |     |     |
|           | $I_p$ [A]         | 84,5 | 81,5 | 77,5 | 80  | 75  | 72  | 77  |
|           | $I_z$ [A]         | 45   | 45   | 45   | 45  | 45  | 45  | 45  |
|           | $V_{dr}$ [mm/min] | 195  | 195  | 195  | 195 | 195 | 195 | 210 |
|           | U [V]             | 8,6  | 8,4  | 8,4  | 8,4 | 8,5 | 8,5 | 8,5 |
|           | $V_{ot}$ [mm/min] | 40   | 40   | 40   | 40  | 40  | 40  | 40  |

| Vizuální zkouška |                |  |                      |  |
|------------------|----------------|--|----------------------|--|
| Pořadové číslo   | Oblast výskytu | Číselné označení dle ČSN EN ISO 6520-1 | Poloha indikace (mm) |  |
| 1                | K              | 515                                    | 180-0                |  |
| 2                | P              | Hrubší housenka                        | 70-80                |  |
| 3                | P              | 501                                    | 180-0                |  |
|                  |                |  |                      |  |





Svar trubky V2Ex - pozice A (bez vad)



Svar trubky V2Ex - pozice B (bez vad)



Příloha 19 - Svarový spoj V3Ex

| Svar V3Ex |                   |       |       |       |     |     |     |     |
|-----------|-------------------|-------|-------|-------|-----|-----|-----|-----|
| Parametry | Sektor            | S1    | S2    | S3    | S4  | S5  | S6  | S7  |
|           | Kořenová vrstva   |       |       |       |     |     |     |     |
|           | $I_p$ [A]         | 127,5 | 122,5 | 117,5 | 110 | 110 | 105 | 110 |
|           | $I_z$ [A]         | 60    | 60    | 58    | 55  | 55  | 55  | 58  |
|           | $V_{dr}$ [mm/min] | 150   | 150   | 175   | 200 | 200 | 200 | 250 |
|           | U [V]             | 8     | 7,9   | 7,8   | 7,8 | 7,8 | 7,9 | 8   |
|           | $V_{ot}$ [mm/min] | 50    | 50    | 50    | 50  | 50  | 50  | 50  |
|           | Krycí vrstva      |       |       |       |     |     |     |     |
|           | $I_p$ [A]         | 84,5  | 81,5  | 77,5  | 80  | 75  | 72  | 77  |
|           | $I_z$ [A]         | 45    | 45    | 45    | 45  | 45  | 45  | 45  |
|           | $V_{dr}$ [mm/min] | 210   | 210   | 210   | 185 | 205 | 205 | 220 |
|           | U [V]             | 8,6   | 8,4   | 8,4   | 8,4 | 8,5 | 8,5 | 8,5 |
|           | $V_{ot}$ [mm/min] | 40    | 40    | 40    | 40  | 40  | 40  | 40  |

| Vizuální zkouška |                |  |                      |  |
|------------------|----------------|--|----------------------|--|
| Pořadové číslo   | Oblast výskytu | Číselné označení dle ČSN EN ISO 6520-1 | Poloha indikace (mm) |  |
| 1                | K              | 515                                    | 180-0                |  |
|                  |                |  |                      |  |
|                  |                |  |                      |  |
|                  |                |  |                      |  |

| Kapilární zkouška                                |  |
|--|--|
|  |  |
| Výsledek kapilární zkoušky vzorku V3Ex (bez vad) |  |

