

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 3911T016 Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Testování korozní odolnosti heterogenního svaru

Autor: **Bc. Adéla Procházková**

Vedoucí práce: **Ing. Ondřej Chocholatý Ph.D.**

Akademický rok 2019/2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Adéla PROCHÁZKOVÁ**
Osobní číslo: **S17N0052P**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie**
Téma práce: **Testování korozní odolnosti heterogenního svaru**
Zadávací katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

Zásady pro vypracování

1. Svařování, heterogenní svary
2. Korozní problematika svarových spojů
3. Metody protikorozní ochrany svarových spojů
4. Metodika testování korozní odolnosti svarových spojů
5. Příprava vzorků
6. Korozní testování a vyhodnocení
7. Diskuze výsledků a závěr

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

Seznam doporučené literatury:

JONES, D.A. *Principles and prevention of corrosion*, New York: Prentice Hall, 1996, ISBN-13: 978-01-33-5999-30

REVIE, W., R., *Corrosion and Corrosion Control*, Willey Interscience 2008, ISBN: 978-0-471-73279-2

DAVIS, J., R., *Corrosion of Weldments*, ASM International, 2006, ISBN-13: 978-0-87170-841

ASTM_A262-15_1.9.2015, *Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels*

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Ondřej Chocholatý, Ph.D.**
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

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

Datum zadání diplomové práce: **5. října 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2020**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



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

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 diplomovou práci s názvem „Testování korozní odolnosti heterogenního svaru“ vypracovala samostatně a použila k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k diplomové práci.

V Plzni dne:

Bc. Adéla Procházková

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

| | | | |
|----------------------|--|------------------------|---------------------------------|
| AUTOR | Příjmení Procházková | Jméno Adéla | |
| STUDIJNÍ OBOR | 3911T016 „Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“ | | |
| VEDOUcí PRÁCE | Příjmení (včetně titulů) Ing. Chocholatý, Ph.D. | Jméno Ondřej | |
| PRACOVISŤE | ZČU - FST - KMM | | |
| DRUH PRÁCE | DIPLOMOVÁ | BAKALÁŘSKÁ | Nehodící se škrtněte |
| NÁZEV PRÁCE | Testování korozní odolnosti heterogenního svaru | | |

| | | | | | |
|----------------|---------|----------------|-----|------------------------|------|
| FAKULTA | strojní | KATEDRA | KMM | ROK ODEVZD. | 2020 |
|----------------|---------|----------------|-----|------------------------|------|

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

| | | | | | |
|---------------|----|---------------------|----|--------------------------|---|
| CELKEM | 84 | TEXTOVÁ ČÁST | 76 | GRAFICKÁ ČÁST | 8 |
|---------------|----|---------------------|----|--------------------------|---|

| | |
|--|---|
| STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY | Práce je zaměřena na heterogenní svarové spoje feriticko-perlitické oceli a austenitické korozivzdorné oceli. Tyto spoje jsou součástí potrubních tras parogenerátoru jaderných elektráren, na kterých byla zjištěna problematika korozního praskání pod napětím. Experimentální část práce je právě zaměřena na tuto problematiku. Cílem je navrhnout a provést testování koroze pod napětím. Přínosem práce je ověření technologie svařování heterogenních svarových spojů s náchylností ke koroznímu praskání pod napětím, pomocí navržené metody. |
| KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE | heterogenní svarový spoj, strukturní nestabilita svarového spoje, problematika heterogenních svarových spojů parogenerátoru v jaderné elektrárně, korozní odolnost, korozní praskání pod napětím, zkouška koroze pod napětím, svařování heterogenních spojů |

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

| | | | |
|--------------------------|---|-----------------------|-----------------------------------|
| AUTHOR | Surname Procházková | Name Adéla | |
| FIELD OF STUDY | 3911T016 „Materials Engineering and Engineering Metallurgy“ | | |
| SUPERVISOR | Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Chocholatý, Ph.D. | Name Ondřej | |
| INSTITUTION | ZČU - FST - KMM | | |
| TYPE OF WORK | DIPLOMA | BACHELOR | Delete when not applicable |
| TITLE OF THE WORK | Corrosion resistance testing of heterogeneous weld | | |

| | | | | | |
|----------------|------------------------|-------------------|-----|---------------------|------|
| FACULTY | Mechanical Engineering | DEPARTMENT | KMM | SUBMITTED IN | 2020 |
|----------------|------------------------|-------------------|-----|---------------------|------|

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

| | | | | | |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|---|
| TOTALLY | 84 | TEXT PART | 76 | GRAPHICAL PART | 8 |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|---|

| | |
|---|--|
| BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS | The thesis is focused on heterogeneous welded joints of ferritic-pearlitic steel and austenitic stainless steel. These connections are part of the pipelines of the steam generator of nuclear power plants, where the problem of stress corrosion cracking was found. The experimental part of the work is just focused on this issue. The aim is to design and perform corrosion testing under load. The contribution of the work is the verification of the welding technology of heterogeneous welded joints with susceptibility to stress corrosion cracking, using the suggested method. |
| KEY WORDS | heterogeneous welded joint, structural instability of welded joint, problematics of heterogeneous welded joints of steam generator in nuclear power plant, corrosion resistance, stress corrosion cracking, corrosion testing under load, welding of heterogeneous joints |

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala vedoucímu práce Ing. Ondřeji Chocholatému, Ph.D. za odborné doprovázení, ochotu a lidský přístup. Děkuji konzultantovi Ing. Petru Samkovi, IWE za všestrannou pomoc, poskytnutí konzultací a podkladů k psaní práce. Dále panu Ing. Karlu Berglovi za návrh, pomoc a zkušenosti při sestrojování přípravku a také za cenné rady. Poděkovat bych chtěla prof. Dr. Ing. Antonínu Křížovi, IWE za podporu a ochotu při studiu, za osobitý přístup ke studentům, a především optimismus v době pandemie COVID-19. Děkuji zaměstnancům ZČU, kteří se podíleli na přípravě vzorků a dalších měření, které byly důležité pro experimentální část práce. V neposlední řadě patří obrovské poděkování mé rodině, partnerovi a kamarádům, kteří mě motivovali a podporovali během celého studia.

Diplomová práce vznikla na základě řešení studentského projektu SGS – 2018-051 „Aplikace nových postupů úpravy a testování povrchu i objemových materiálů za účelem zvýšení uplatnitelnosti konstrukčního celku nebo pracovního nástroje v průmyslové praxi“. K realizaci diplomové práce bylo využito přístrojové vybavení finančně podpořeno Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy-projekt LQ1603 Výzkum pro SUSEN. Práce byla realizována v infrastruktuře Udržitelná energetika (SUSEN) vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0108 a CZ.02.1.01/0.0/0.0/15_008/0000293.

Obsah

| | |
|--|----|
| Úvod..... | 11 |
| 1 Problematika heterogenních svarových spojů..... | 13 |
| 1.1 Definice heterogenního svarového spoje..... | 13 |
| 1.2 Materiálové kombinace a aplikace heterogenních svarových spojů | 14 |
| 1.3 Technologie svařování heterogenních spojů | 15 |
| 1.3.1 Obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu (TIG)..... | 17 |
| 1.3.2 Laserové svařování | 19 |
| 1.4 Heterogenní svarové spoje v jaderné elektrárně..... | 21 |
| 1.4.1 Popis a funkce parogenerátoru | 22 |
| 1.5 Korozní problematika heterogenních svarových spojů | 23 |
| na jaderné elektrárně Temelín | 23 |
| 1.5.1 Korozní praskání pod napětím | 26 |
| 1.5.2 Galvanická koroze..... | 29 |
| 1.5.3 Bodová a štěrbinová koroze | 29 |
| 1.5.4 Další korozní poškození..... | 30 |
| 1.6 Návrh korozního opatření HSS..... | 30 |
| 1.6.1 Opatření při výrobě | 30 |
| 1.6.2 Opatření při provozu | 31 |
| 1.6.3 Opatření během odstávky zařízení | 31 |
| 2 Korozní testování | 32 |
| 2.1 Korozní testování v solné mlze | 32 |
| 2.2 Korozní testování při mechanickém zatížení..... | 33 |
| Experimentální část práce | 35 |
| 3 Návrh experimentu..... | 35 |
| 3.1 Charakteristika základních a přídavných materiálů trubek | 36 |
| 3.1.1 Korozivzdorná chromniklová austenitická ocel..... | 37 |
| 3.1.2 Jakostní uhlíková konstrukční ocel..... | 39 |
| 3.1.3 Přídavné materiály | 39 |
| 3.2 Výroba a parametry svařování trubek | 40 |
| 3.2.1 Laserové svařování | 41 |
| 3.2.2 Obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu..... | 41 |
| 3.3 Odběr a příprava vzorků | 41 |

| | |
|--|----|
| 3.4 Přípravek pro testování | 44 |
| 4 Zkoušky před korozním testováním | 46 |
| 4.1 Příčná zkouška tahem | 46 |
| 4.2 Nedestruktivní testování | 47 |
| 5 Testování koroze pod napětím | 49 |
| 5.1 Předepnutí vzorků do přípravků | 49 |
| 5.2 Korozní zkouška v solné mlze | 52 |
| 6 Vyhodnocení testu koroze pod napětím | 53 |
| 6.1 Vizuální vyhodnocení | 53 |
| 6.2 Nedestruktivní testování | 56 |
| 6.3 Metalografická analýza | 56 |
| Diskuse | 64 |
| Závěr | 67 |
| Použitá literatura | 69 |
| Seznam obrázků | 74 |
| Seznam tabulek | 76 |

Seznam použitých zkratek

| | |
|---------|---|
| CT | Počítačová tomografie (Computer Tomograph) |
| ETE | jaderná elektrárna Temelín |
| HSS | heterogenní svarový spoj |
| I.O. | primární okruh |
| IC | Inspekční certifikát |
| II.O. | sekundární okruh |
| JE | jaderná elektrárna |
| MAAE | Mezinárodní agentura pro atomovou energii |
| MAG | Metal Active Gas (metoda svařování 135 dle EN ISO 4063) |
| MIG | Metal Inert Gas (metoda svařování 131 dle EN ISO 4063) |
| MKK | mezikrystalová koroze |
| Nd:YAG | YAG dopovaný ionty neodymu (Nd) |
| NDT | Non-Destructive testing, nedestructivní testování |
| PG | parogenerátor |
| PM | přídavný materiál |
| PT | Kapilární zkouška (NDT) |
| RT | Radiografická zkouška (NDT) |
| SCC | Stress Corrosion Cracking, korozní praskání pod napětím |
| SÚJB | Státní úřad pro jadernou bezpečnost |
| TIG/WIG | Tungsten Inert Gas /Wolfram Inert gas |
| TOO | tepelně ovlivněná oblast |
| VT | Vizuální kontrola (NDT) |
| VVER | Vodo-vodňaný energetičeskij reaktor, Vodo-vodný energetický reaktor |
| WANO | World Association of Nuclear Operators |
| YAG | Yttrium Aluminium Granát (pevnolátkový laser) |
| Yb:YAG | YAG dopovaný ionty ytterbia (Yb) |
| ZM | základní materiál |

Úvod

Pro volbu materiálů konstrukcí a výrobků jsou určující požadavky na vlastnosti a prostředí, kterému jsou materiály vystavovány. U složitějších konstrukcí, jako jsou např. mostní konstrukce, části lodí, letadel, automobilů, elektráren, napojení potrubí atd. je zapotřebí vyřešit návaznost zcela odlišných materiálů, které jsou vystaveny různým podmínkám. Nejrozšířenějším procesem pro vytvoření nerozebíratelného a pevného spojení je dnes technologie svařování. Jako každá jiná technologie výroby přináší i technologie svařování a výsledný svarový spoj mnoho výhod, ale také i rizika. Značnou výhodou heterogenních svarových spojů (HSS) je především úspora a kombinace materiálů a odlehčení konstrukce. Rizikem jsou změny mechanických a chemických vlastností v oblasti svarového spoje, které mohou být spojovány s dalšími možnými problémy, jako je např. odlišná korozní odolnost. Korozní porušení je nejen u kovových materiálů, mimo únavového porušení, častou příčinou havárií, škod, odstávek nebo reklamací. Vhodnými opatřeními ke snížení korozního rizika svarových spojů jsou především volba optimální technologie svařování, postup a parametry svařování, regulace vlivů okolního prostředí, popřípadě zamezení kontaktu okolního media a svarového spoje. Sekundárním opatřením jsou včasné a pravidelné kontroly svarových spojů během výroby a při provozu konstrukce. Konstrukce a volba materiálů nejen pro heterogenní svarové spoje musí být z hlediska bezpečnosti, spolehlivosti a životnosti vyzkoušeny a kvalifikovány pro provoz v daném prostředí. Velký důraz na spolehlivost, bezpečnost a životnost svarových spojů je prioritou jaderných elektráren, které jsou v pod drobnohledem úřadů SÚJB, MAAE, WANO a dalších.

Diplomová práce se zaměřuje na problematiku heterogenních svarových spojů na sekundárním okruhu a jeho pomocných systémech jaderných elektráren, konkrétně na nátrubcích parogenerátoru. Impulsem k psaní této diplomové práce jsou události z roku 2016, kdy došlo k úniku provozního media v důsledku porušení nátrubku N5 na parogenerátoru 2. hlavního výrobního bloku JE Temelín. Jednalo se o heterogenní svarový spoj mezi nátrubkem z feritické oceli 22K (GOST 5520-79) a tvarovkou z austenitické oceli 08CH18N10T (GOST 5632-72). Porucha si vyžádala odstavení celého výrobního bloku a vzhledem k závažnosti situace bylo nutné provést rozsáhlou analýzu a stanovit příčinu porušení nátrubku. Experimentální program byl prováděn na několika výzkumných pracovištích v ČR. Ze závěrečných zpráv vyplývá, že u HSS spojů je životnost nižší oproti homogenním svarovým spojům. Kombinace přídavného materiálu (byl použit

Cr16Ni25Mo6), napětí od rozdílné teplotní roztažnosti materiálů a přítomnost vodného prostředí, jsou hlavními parametry, které vedou k mechanismu korozního praskání pod napětím (Stress Corrosion Cracking, SCC). Mimo tyto faktory hraje roli i heterogenita materiálů, která je vnášena tavným svařováním. Problematika HSS je velmi obsáhlá a poznatky řešené v souvislosti s uvedenou událostí odkazují na to, že je nutné řešit HSS komplexně.

V teoretické části práce bude čtenář seznámen s problematikou HSS, technologií svařování vhodnou pro HSS, korozní problematikou a korozním testováním HSS. Zaměření praktické části diplomové práce je na technologie svařování (konkrétně 141 a 521, dle EN ISO 4063) heterogenních svarových spojů materiálů P265GH (ČSN EN 10028-2) a 1.4541(Wr. N.). Cílem experimentální části práce je navrhnout metodu testování heterogenních svarových spojů při simulaci jednoosého zatížení v korozním prostředí a ověřit citlivost těchto spojů na korozi pod napětím (SCC) v laboratorních podmínkách. Navrhnutá metoda destruktivního korozně mechanického testování by do budoucna mohla být přínosem pro ověřování technologie svařování výroby heterogenních svarových spojů s náchylností ke korozi pod napětím.

1 Problematika heterogenních svarových spojů

Svarové spoje jsou důležité ve všech průmyslových oblastech včetně jaderné energetiky a jejich aplikace je klíčová pro výrobu a výstavbu konstrukcí. Zároveň však představují potenciální rizika, které mohou být hrozbou pro člověka a životní prostředí. V JE představují rizika zcela nepředstavitelné dopady, a proto jsou na svarové spoje kladeny nejvyšší nároky z hlediska technologie svařování a také bezpečnostních opatření. Podmínky pro zabezpečení jaderného zařízení jsou předepsány atomovým zákonem č. 263/2016 Sb. Úskalím svarových spojů je technologie výroby, aplikace a následný provoz. Je tedy velmi důležité navrhovat a používat materiály a technologie, které tvoří pevný a houževnatý spoj, který odolá deformačním účinkům, provoznímu zatížení, koroznímu prostředí, působícím tlakům, aj. Parogenerátor (PG) spadá do bezpečnostní třídy 1., proto požadavky na dodržení kvality a technické bezpečnosti nerozebíratelných spojů uvádí vyhláška č. 358/2016 Sb. Cílem je dodržet předepsané postupy a vytvořit takové spoje, aby obsahovali co nejméně vnitřních defektů a metalurgických tvářecích vad, čímž může být eliminováno možné riziko havárie.

1.1 Definice heterogenního svarového spoje

Abychom definovali a lépe pochopili heterogenní svarový spoj (HSS) je dobré uvést i definici homogenního svarového spoje.

Homogenním svarovým spojem jsou nazývány spoje, jichž základní svařované materiály jsou stejného chemického složení nebo velmi podobného chemického a fázového složení. Ačkoliv polotovary mohou být vyrobeny odlišnou technologií, důležité je stejné či obdobné chemické složení. Přídavný materiál (PM) je taktéž stejného nebo podobného složení jako základní materiály (ZM). Oproti heterogenním spojům jsou homogenní spoje méně problematické a nabízí se i více metod svařování. [1]

Svařováním chemicky a strukturně fázově odlišných materiálů (př. austenit-ferit, Ti a Al) získáváme **spoje heterogenní (HSS)**, kde dochází k promíšení PM a dvou zcela odlišných základních materiálů. Jelikož podstatou výroby svarových spojů je vnesení určité formy energie a vytvoření meziatomových vazeb, je žádoucí, aby ovlivnění PM a ZM u HSS bylo co nejmenší a byla dodržena co největší strukturní stálost. Tyto parametry ovlivňuje zvolená technologie svařování a PM, který musí mít dostatečnou vzájemnou rozpustnost s oběma základními

materiály. Zároveň musí být splněny požadavky na mikrostrukturu a mechanické vlastnosti svarového spoje. [2, 3]

Spojování odlišných materiálů sebou přináší úskalí nejen při výrobě, ale i během provozu. Problematika heterogenních svarových spojů je často řešena v mnoha technických odvětvích, jelikož spojované materiály jsou jednak vystaveny rozdílnému namáhání, tepelným cyklům, odlišným mediím, a jednak vlivem lokálního ohřevu v průběhu svařování může dojít k degradaci vlastností spoje se kterými souvisí následující mechanismy:

- **redistribuce uhlíku** – tak vznikají oduhličené/ nauhličené zóny spoje, s odlišnými mechanickými, fyzikálními, korozními vlastnostmi. Např. nauhličené oblasti mají vyšší pevnost, tvrdost a nižší vrubovou houževnatost, naopak u oduhličených zón dochází ke snížení pevnosti.
- **plastické deformace** – vyčerpání plasticity vede k iniciaci trhlin
- **korozní napadení** – rozdílnost elektrochemického potenciálu ZM a PM, působící provozní medium a vyšší teploty vedou často ke koroznímu napadení méně legovaného ZM

Většinou k poškození dochází vlivem několika degradačních mechanismů za působení okolních podmínek, a proto HSS nelze řešit obecně. Vhodnost zvolených materiálů, svařovací technologie a parametry svařování mají zásadní vliv na celkové chování spojů a konstrukcí. [5]

1.2 Materiálové kombinace a aplikace heterogenních svarových spojů

Účelem HSS je úspora materiálů a napojení segmentů konstrukce, které mají rozdílné vlastnosti a požadavky na provozní prostředí (změny teplot, tlaku, koroze atd.). Komplikovanější konstrukce nemusí být nutně vystaveny v celém svém rozsahu stejným mechanickým podmínkám, stejnému koroznímu prostředí nebo pracovní teplotě. Dalším kritériem především pro automobilový a letecký průmysl, je odlehčení celkové konstrukce za předpokladu dodržení bezpečnostních kritérií.

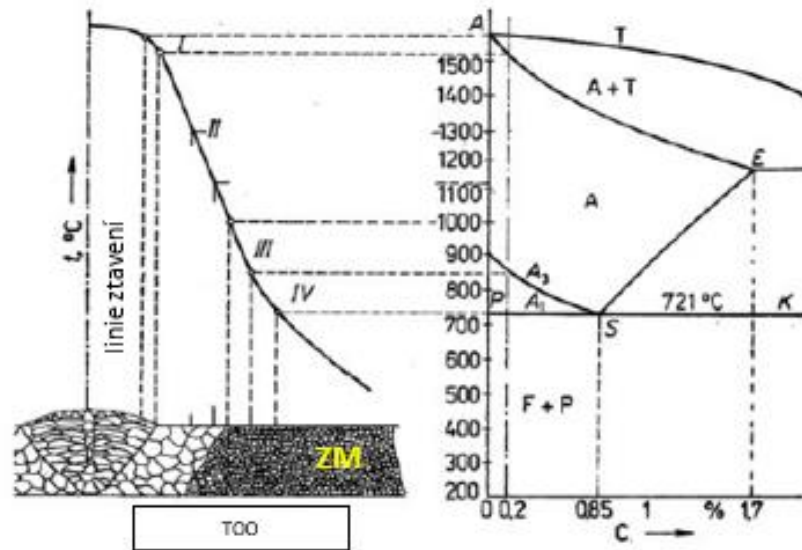
V letectví jsou např. řešeny HSS materiálů Ti-Al, Ti s ocelí, Ti-Mg, popřípadě rozdílné slitiny titanu jako jsou α a β , které jsou svařovány pomocí laserové technologie. Dalším příkladem napojení odlišných slitin hořčíku a hliníku s vysokopevnostní ocelí je u karoserií automobilů. Mezi hojně využívané technologie svařování se v automobilovém odvětví využívá metod TIG, MIG/MAG a laserového svařování. Obdobně je tomu

tak i při sestavování nosných částí konstrukcí lodí, kde se využívá materiálů s nižším obsahem uhlíku a pro vnitřní nosné části se využívá slitin hliníku. Heterogenní svarové spoje jsou často řešeny také u potrubí v chemickém a petrochemickém průmyslu, kde dochází napojení austenitických ocelí s feritickými, bainitickými a martenzitickými ocelemi, dle protékajícího média a sousedního prostředí. [5, 6, 7]

1.3 Technologie svařování heterogenních spojů

Podmínkou pro svařování heterogenních spojů je minimální vnesené množství tepla, aby gradient chemické koncentrace uhlíku mezi základními materiály svarovým kovem byl co nejnižší a strukturní stálost svarového spoje byla nejvyšší. Mezi nejpříznivější technologie s minimálním vneseným teplem patří svařování laserem, elektronovým paprskem, třením a mikroplazmou a obloukové svařování s nižšími tepelnými příkony. Postup a technologie svařování se volí dle obtížněji svařitelného materiálu. [2]

Při tavném svařování dochází k velkým teplotním rozdílům a důsledkem toho jsou strukturní změny mezi základním materiálem a svarovým kovem, které ovlivňují vlastnosti svarového spoje. Degradace jednoho z materiálů je u těchto svarových spojů nevyhnutelná. U HSS je podstatné promísení a s tím spojené difuzní procesy, při kterých dochází k redistribuci intersticiálních prvků (tj. C, N, popřípadě H), což vede ke snížení strukturní stability. Pro zamezení nebo snížení difuzních pochodů se využívá principu polštářování nebo tzv. přechodného materiálu, tato problematika je přiblížena v kapitole 1.3.1. Promísení má dopad na strukturní stav i celkové vlastnosti spoje. Výsledná struktura spoje má vazbu na chemické složení a na historii základního materiálu i přídavného (předešlé tepelné zpracování, přehřev, mechanické zpracování). Na obr. 1. jsou znázorněny oblasti svarového spoje, která tvoří citlivá místa, a ta mohou vést ke vzniku trhlin během procesu svařování a následně nepříznivě ovlivnit pevnost spoje a korozní odolnost, popřípadě mohou být cestou k dalšímu šíření defektů a nehomogenit. Tyto vady jsou primárně spojeny se změnou mikrostruktury, mechanických, chemických a fyzikálních vlastností. Nejnáchylnější oblastí k těmto změnám je fúzní zóna (linie ztavení). [9, 10]



Obr. 1. Tepelně ovlivněné oblasti (TOO) svarového spoje včetně části metastabilního diagramu Fe – Fe₃C (nelegovaná ocel 0,2 hm. % C), kde I. je oblast částečného natavení, II. přehřátí, III. normalizace, IV. částečná překrystalizace [11]

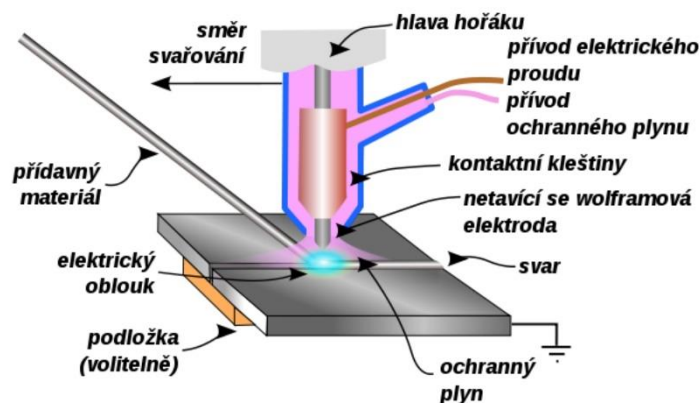
Heterogenní svarové spoje jsou v JE nejčastěji svařovány metodou TIG (141, dle EN ISO 4063), se kterou je spojována problematika příliš velkého vneseného tepla a vysokého promíšení. Další používanou metodou např. v ruských JE konstrukcí typu VVER jsou HSS svařovány ruční obalenou elektrodou (111, dle EN ISO 4063) s bazickými elektrodami, a ačkoliv je při svařování vnášeno menší teplo, problém nastává při odstávkách, kdy dochází ke kontaktu svarových spojů s kyslíkem. Pro odstranění těchto nedostatků a zajištění větší bezpečnosti spojů probíhají testy, kde jsou HSS svařovány laserem. Dalším opatřením k lepší bezpečnosti, životnosti a defektoskopické kontrole svarů je svařování HSS v dílenských podmínkách. Cílem je, aby výsledný svarový spoj byl o nejvyšší čistotě a následně v provozních podmínkách byly svařovány už jen homogenní svarové spoje. Nevýhodou je však zvýšení celkového počtu svarových spojů, které musí být periodicky kontrolovány. Snahou je navrhnout takové postupy oprav, aby technologická náročnost byla co nejnižší a zároveň životnost HSS byla co nejvyšší. [12, 13]

Připravované vzorky pro experimentální část byly svařované metodou obloukového svařování TIG (141, dle EN ISO 4063) a pomocí pevnolátkového laserového svařování (521, dle EN ISO 4063). Použité metody jsou přiblíženy v následujících kapitolách.

1.3.1 Obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu (TIG)

Metodou obloukového svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu (TIG Tungsten Inert Gas, známá také jako WIG Wolfram Inert Gas; označení dle EN ISO 4063 metoda 141) získáváme svarové spoje vysoké kvality, neboť díky ochraně svarové lázně je zamezeno oxidaci (tvorbě strusky). Metoda je aplikovatelná ve všech oborech svařovaných konstrukcí a technických zařízení pro svařování materiálů. Především u materiálů korozivzdorných a vysokolegovaných, ale i nízkolegovaných ocelí a neželezných kovů. [3]

Hlavním principem metody je hoření elektrického oblouku mezi základním materiálem a netavící se wolframovou elektrodou (která nepřechází do svarové lázně). Elektroda je pomocí kleštin upevněna do hlavičky hořáku. Skrz kleštiny je přenášén svařovací proud. Okolo elektrody je keramickou hubicí přenášén inertní plyn do místa svaru a vytváří ochranou atmosféru, která chrání lázeň před okolní atmosférou. Schéma metody je uvedeno na obrázku 2. [2, 3]



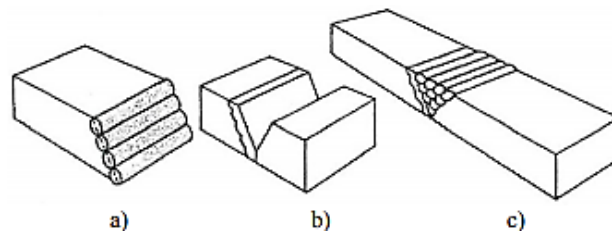
Obr. 2. Schéma metody TIG [14]

Zdroj proudu se využívá střídavý, stejnosměrný (s přímou/nepřímou polaritou) nebo impulsní, který je vhodný pro svařování vysokolegovaných ocelí a umožňuje svařování větších tlouštěk a materiálů citlivých na přehřátí. Korozivzdorné a uhlíkové oceli jsou nejčastěji svařovány stejnosměrným proudem s přímou polaritou, která zajišťuje stabilní oblouk a úzký hluboký průvar. [2, 3, 15]

Ochranný plyn se používá argon nebo helium a jejich směs. Inertní plyn chrání elektrodu, svarovou lázeň a přilehlý základní materiál před okolní atmosférou a brání především oxidaci. Pozitivní vliv mají i na zapálení oblouku a nesení tepla. Standardně používaná čistota argonu pro TIG je označována 4.5 (99,995 %), pro materiály s vysokou afinitou ke kyslíku (Ti,

Ta, Zr) vyžadují vyšší čistotu ochranného plynu. Pro naše svařované vzorky byl ve všech případech použit argon s označením čistoty 4.6 (99.996 % obj.) a 5.0 (99,999 % obj.). Helium hůře zapaluje oblouk, proto je plynu větší spotřeba. Helium se využívá pro jeho vysokou čistotu, avšak cena plynu je zhruba pětikrát dražší než argon, proto je používán jen pro nejnáročnější konstrukce. Často se však využívá v kombinaci s argonem. Z důvodu nebezpečí vzniku trhlin, pórovitosti a praskání za studena, nesmí být materiály s Ti, Zr, martenzitické a feritické CrNi oceli, svařovány v plynné směsi s vodíkem. Pro svařování trubek je nutné přivádět ochranný plyn i do oblasti kořene svarového spoje, aby tvořící se plynový válec vytěsnil vzduch bez promísení. [15]

Pro metodu TIG je důležitá volba PM, který se používá za účelem doplnění objemu svarového spoje (tvar) a k dolegování. PM je volen dle chemického složení a mechanických vlastností základního materiálu. Požadavkem je, aby výsledný svarový spoj měl stejné nebo lepší vlastnosti než ZM. Chemické složení PM by mělo být podobné jako ZM, což pro heterogenní svarové spoje není možné dodržet, a proto se využívá přechodového materiálu nebo tzv. polštářování, které působí jako protidifuzní bariéra. Přechodovým materiálem (svarový kov s obsahem chromu mezi chemickým gradientem chromu v základních materiálech) je dosaženo dvou difuzních oblastí, které rozdělují chemický gradient mezi základními oceli na dva menší intervaly. Polštářování (nanášení housenek na potřebnou stranu svarového úkosu) je patrné na obr.3. Důvodem aplikace je rozdílnost v teplotě tavení a intervalu tuhnutí dvou odlišných materiálů. Například méně legovaná ocel má vyšší teplotu tavení než ocel austenitická (více legovaná). Austenitická ocel má také širší interval tuhnutí než konstrukční oceli. Důsledkem teplotních rozdílů v tavení je praskání na straně materiálu s nižší teplotou tavení, což je možné řešit právě pomocí polštářování na straně materiálu s vyšší teplotou tavení. V případě materiálů austenitického a feritického je nanesen polštář na stranu feritickou. Kromě polštářování, které se dělá převážně u svarových spojů pracujících nad teplotu 350 °C, je možné aplikovat přechodový materiál s vyšším obsahem niklu než 60 hm. % a 20 hm. % Cr. Výplňovým materiálem svarového spoje je austenitická ocel s nízkým obsahem uhlíku. U korozi-vzdorných ocelí legovaných titanem by měl být PM stabilizovaný niobem. Důvodem je nižší propal při průchodu el. oblouku. [5, 10, 15, 16]



Obr. 3. Princip polštářování feritické oceli s austenitickou korozivzdornou ocelí, kde a) nanesení polštáře (housesek) na hranu feritické oceli, b) zarovnání polštáře, c) zhotovení výsledného svarového spojení [16]

Ruční svařování metodou TIG je vhodné pro materiály obtížně svařitelné jinými metodami tavného svařování. Umožňuje svařování ve všech polohách. Podmínkou je precizní příprava svarových ploch, kde hlavní roli hraje tloušťka, tvar úkosů a druh svařovaného materiálu. Oproti automatizovanému svařování metodou TIG je promíšení návaru větší a dochází i k většímu tepelnému ovlivnění. Strojní (automatizované) svařování je výhodnější i z ekonomického hlediska (produktivity) a od ručního svařování se liší také kvalitnějším provedením svaru (nekolísání svarového oblouku, rychlosti, plynová ochrana). Metoda je zcela kontrolovatelná. U automatizované metody lze využít svařování horkým drátem (PM), který je předehříván odporovým teplem (blížíci se teplotě tavení) a přiváděn do tavné lázně. Předehřátím PM pozitivně ovlivníme vyšší výkon navaření, zajistíme lepší přenos legujících prvků, sníží se riziko studených spojů a pórovitosti, a především zmenšíme oblast TOO. Mechanizované orbitální svařování se využívá v oblasti spojování trubek a trubkovic, velkých i malých průměrů. Pro jaderné a tepelné elektrárny, kotle, chemický, petrochemický a potravinářský průmysl. [15, 17]

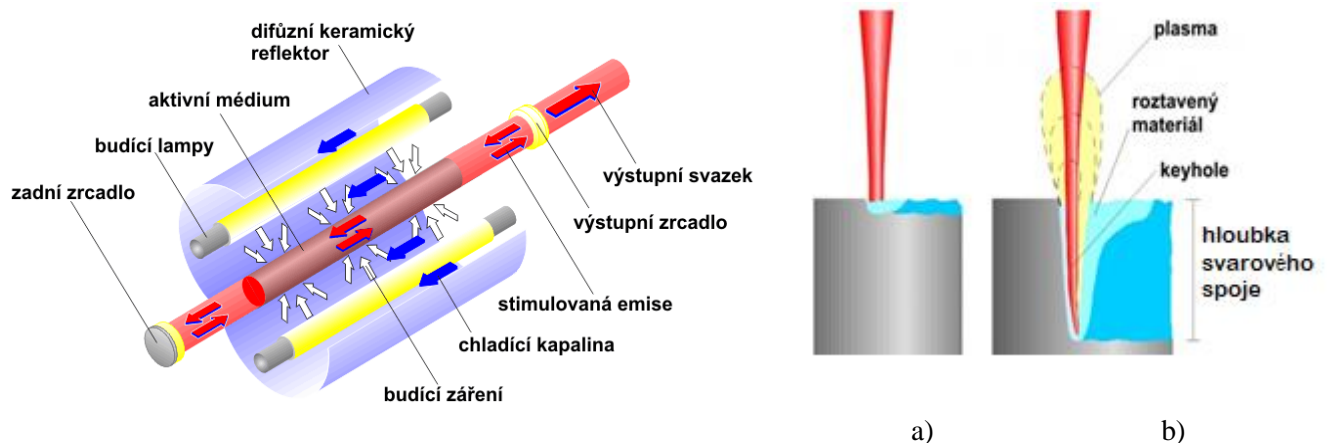
1.3.2 Laserové svařování

Mezi technologie svařování s minimálním množstvím vneseného tepla patří i svařování pomocí laseru. Ve strojírenství se mimo svařování využívá také pro obrábění, navařování, kalení, gravírování, vrtání i řezání. S rozvojem laserů a nových materiálů je technologie svařování laserem žádanější. Největší uplatnění této technologie je v automobilovém průmyslu. V energetice se využívá např. pro pouzdra kontejnerů pro vyhořelé jaderné palivo. Výhodou laserového svařování, oproti obloukovému svařování, je vzhled, čistota svaru a přesnost, velmi malá TOO, rychlost svařování (až 10 m/min), tenzometrické ovlivnění, a tím rozhodující deformace a vnitřní pnutí. Metoda laserového svařování je tichá, vhodná pro automatizaci, a umožňuje svařovat tloušťky řádově od 10^{-6} až po 10^{-3} m. Lze svařovat

v ochranné atmosféře. Vhodná je pro svařování titanových, zirkonových a chromniklových slitin. Nevýhodou je vyšší pořizovací cena a cena provozu. Dále pak složité přípravy a nastavování optimálních parametrů svařování. [3, 15, 18, 19, 20]

Lasery se dělí nejčastěji dle aktivního prostředí na pevnolátkové, plynné, kapalné, polovodičové, plazmové, excimerové a vláknové. Z pevnolátkových laserů, využívaných pro svařování, tvoří nejčastěji matici YAG krystal (ytrium aluminium granát) dopovaný ionty neodymu (Nd:YAG) popřípadě yterbia (Yb:YAG). Výhodou pevnolátkových laserů je vedení fokusovaného paprsku pomocí světlovodných kabelů, což je u plynných CO₂ laserů obtížnější. [18]

Základní princip pevnolátkového laseru tkví v procesu, kdy se náhodně vybuzené atomy z aktivního prostředí vrací do svého energetického základního stavu, a přitom vyzařují foton. Pro buzení se nejčastěji využívá výbojky nebo laserové diody, která má vyšší účinnost. Foton následně stimuluje emisi u dalších atomů. S přibývajícimi fotony se tvoří silnější paprsek koherentního laserového světla, které pomocí rezonátoru (rovnoběžných propustných a nepropustných zrcadel) a aktivního prostředí vystupuje. Schéma laseru je znázorněno na obr. 4. [21]



Obr. 4. Vlevo: Schéma pevnolátkového laseru [18]; Vpravo: Mechanismy laserového svařování: a) povrchové; b) hloubkové svařování [22]

Při interakci vystupujících fotonů (energie) a základního materiálu, dochází k rozvibrování krystalové mřížky a tím dochází ke zvýšení teploty v materiálu. Pouze část energie svazku je využita na ohřev materiálu a zbylá část se odrazí nebo v minimální míře projde skrz materiál. Kolik energie materiál pohltí a jaká bude hloubka průniku, záleží na vlnové délce,

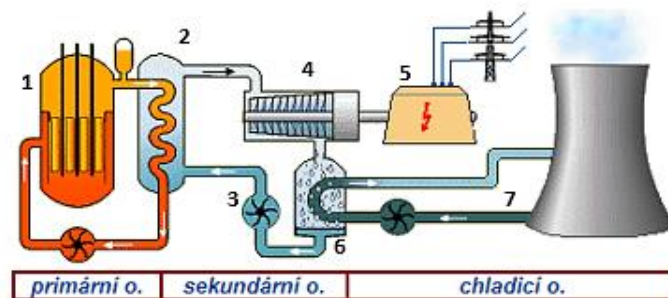
vodivosti materiálu, frekvenci záření a výkonu zdroje. Laserové svařování lze rozdělit na povrchové a hloubkové svařování (keyhole). Znázorněné na obr. 4 vpravo. [18, 22]

- a) Povrchovým svařováním vzniká průvar malé hloubky, ale rychlost svařování může být vyšší. [22]
- b) Vyšší plošná hustota výkonu laseru zapříčiní tvorbu par kovů svařovaného materiálu a vytvoří se plasma. Laserový svazek v materiálu vytvoří kapiláru, jejichž tvar je ovlivněn plasmou a tlaky plynů. Skrz stěny kapiláry je vedena energie paprsku hluboko do základního materiálu a vytváří se tzv. keyhole, která má 1,5krát větší průměr než ohniskový laserový svazek. V tomto místě je vysoká koncentrace energie a rychlost ohřevu je mnohonásobně větší než odvod tepla. Při pohybu laseru je posouván i keyhole a tavenina svarového spoje je vytlačována z přední do zadní části, kde tuhne a vytvoří svarový spoj. Výsledný svar ovlivňuje rovnováha keyhole, rychlost svařování, svařovací parametry a materiál. Popřípadě i asistenční plyny (Ar, He). [22, 23]

Laserové svařování je možné kombinovat i s metodou TIG. Pak se jedná o laser hybrid svařování, které se využívá po svařování tenkých plechů v automobilovém průmyslu. Pro optimální výsledky svaru hraje roli mnoho faktorů, které se při hybridním svařování musí nastavovat. [19]

1.4 Heterogenní svarové spoje v jaderné elektrárně

V rámci diplomové práce je myšlenka HSS zaměřena na problematiku spojovanou s jadernými elektrárnami, konkrétně na problematiku parogenerátorů. V JE jsou HSS součástí konstrukce i celého potrubního systému, který spojuje primární, sekundární i chladicí okruh. Pro představu je na obr.5. uvedeno schéma jaderné elektrárny.



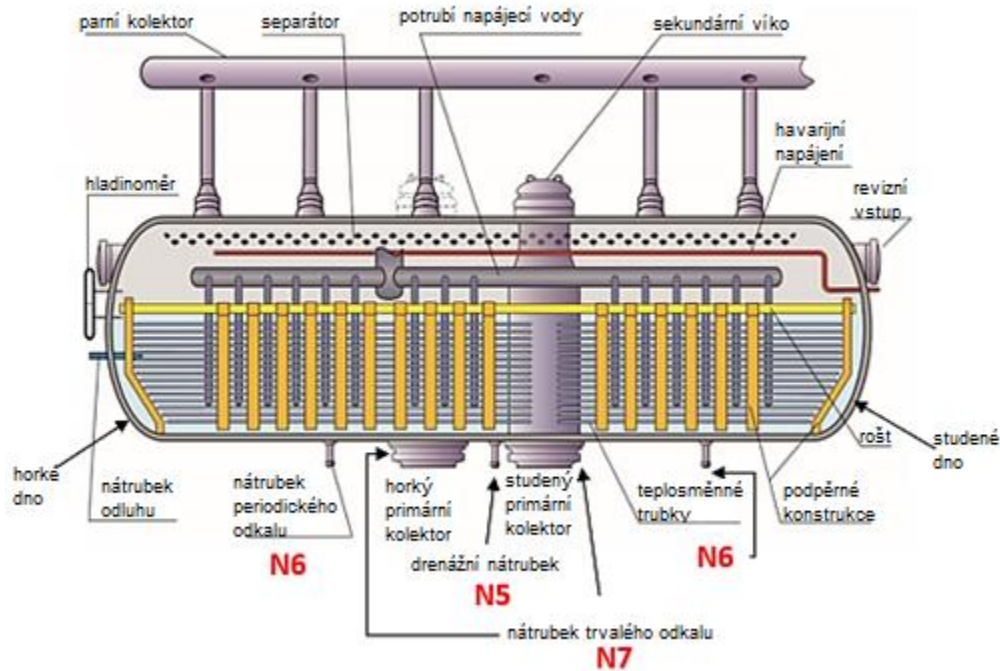
Obr. 5. Schéma JE (1. reaktor, 2. parogenerátor, 3. čerpadlo, 4. turbína, 5. generátor, 6. kondenzátor, 7. přívod a odvod chladicí vody) [8]

Do primárního okruhu (I.O.) je dávkována kyselina boritá, která slouží pro řízení reaktivity v aktivní zóně reaktoru. Materiály zařízení, které přichází do styku s médiem primárního okruhu tak musí být z materiálů, které odolávají její aciditě a jsou korozně odolné ve specifických podmínkách I.O. Proto je zařízení ve styku s prim. médiem z austenitických korozivzdorných ocelí stabilizovaných titanem, případně z nízkolegovaných konstrukčních ocelí s ochranným austenitickým návarem. Médium sekundárního okruhu (II.O.) je značně odlišné. Dochází zde k zahušťování rozpuštěných iontů, které jsou velmi agresivní vůči korozivzdorným ocelím (podporují MKK). Parogenerátor je konstrukční uzel, který odděluje média primárního a sekundárního okruhu, což má za důsledek nutnost kombinovat různé konstrukční materiály. To s sebou nese i nutnost jejich spojování.

1.4.1 Popis a funkce parogenerátoru

Parogenerátor (PG) je jednotělesový horizontální tepelný výměník, který slouží k přenosu tepelné energie chladiva I.O do napájecí vody II.O. Médium z I.O. vstupuje do horkého kolektoru PG, který jej rozděluje do jednotlivých teplosměnných trubek. Voda II.O. se v PG vaří a přeměňuje se na páru. Voda z I.O. se vrací zpět do reaktoru přes čerpadlo studeným primárním kolektorem. Pára z PG je odváděna přes paroseparační zařízení na turbogenerátor pomocí parovodů. [5, 24, 25, 26, 27]

PG je tvořen celosvařovanou jednoplášťovou tlakovou nádobou eliptického tvaru. Materiál pláště je u PGV-1000M (u VVER 1000) z oceli 10GN2MFA. Teplosměnné trubky a trubky rozvodů jsou z austenitické korozivzdorné oceli 08CH18N10T. Nátrubky, které slouží pro napojení těchto korozivzdorných trubek jsou z materiálu nízkolegované uhlíkové oceli 22K. Napojení materiálů je řešeno pomocí svarových spojů, které jsou součástí celého složitého potrubního systému. Návaznost systémů je následující: parovody, napájecí potrubí, systém havarijního napájení, systém odluhu a odkalu, odvodu vzdušného, systém odběru vzorků a hlavního cirkulačního potrubí. Schéma horizontálního PG je uvedeno na obr. 6. [5, 24, 25, 26, 27, 50]



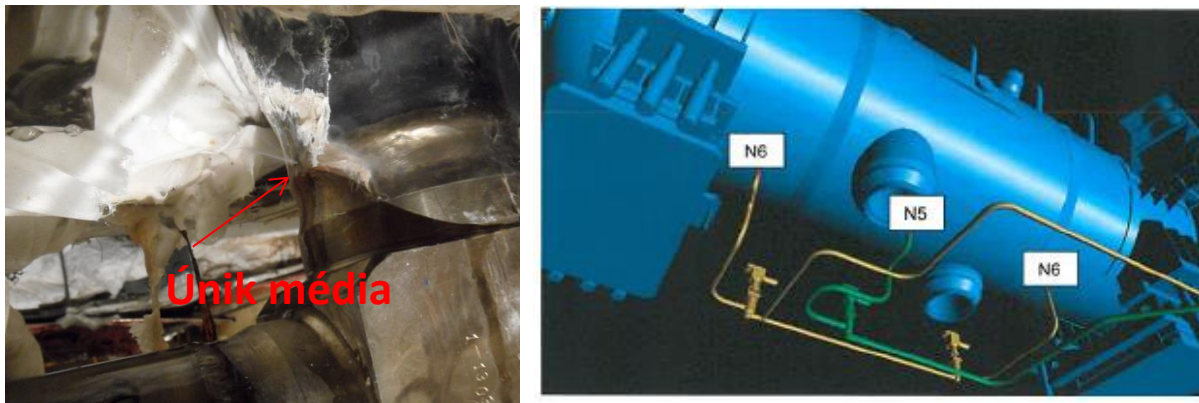
Obr. 6. Schéma horizontálního parogenerátoru a umístění nátrubků N5 a N6; upraveno z [28]

Označené nátrubky N5 a N6 jsou právě spojovány s korozní problematikou HSS, která je popisována v následující kapitole 1.5. Oba nátrubky slouží k vodochemickému režimu II.O. parogenerátoru a k jeho vypouštění. Nátrubky N6 o průměru DN80 slouží k pravidelnému (periodickému) odvodu pevných částic a koncentrací solí ze spodní části parogenerátoru. Nátrubek N5 o průměru DN100, který slouží jako drenážní, je používán jen v případě suchých odstávek, kdy dochází k drenážování PG. Suchá odstávka je spíše výjimečná, protože je nežádoucí, aby se do potrubí drenáže dostával vzduch (kyslík), který může způsobovat korozní poškození. Častěji je volena odstávka za mokra, při které v PG zůstává voda s amoniakem a hydrazinem. Při poklesu hladiny vody v PG je nutné uvolněný objem zaplnit dusíkem o mírném přetlaku. [5, 24, 25, 26, 27]

1.5 Korozní problematika heterogenních svarových spojů na jaderné elektrárně Temelín

Na trase systému RY (odlihu a odkalu) parogenerátoru ETE na 2. hlavním výrobním bloku došlo v roce 2016 k porušení HSS a vlivem netěsnosti k úniku neaktivního media ze sekundárního okruhu do kontejnmentu (obr.7. vlevo). Konkrétněji se jednalo o drenážní nátrubek N5 mezi tvarovkou z feritické oceli (22K, dle GOST) DN100 a trubky z austenitické oceli (08CH18N10T, dle GOST), patrné na obr. 7 vpravo. Spoj byl svařován metodou TIG a PM byl použit Sv-10CH16N25AM6 (GOST). Následně byly provedeny NDT kontroly

na všech HSS a na porušených HSS nátrubkách byla provedena rozsáhlá experimentální činnost. Na poškozených segmentech bylo provedeno zaslepení a v současnosti se odkal a drenážování provádí pomocí jiných nátrubků. Obecně je poškozená část nahrazována mezikusem s HSS, který je svařován v dílenských podmínkách. Bylo zjištěno, že problematika HSS je závažnější a objevuje se mimo nátrubků N5 a N6 na všech HSS sekundárního okruhu, kde dochází kontaktu s pracovním médiem. [29, 30]

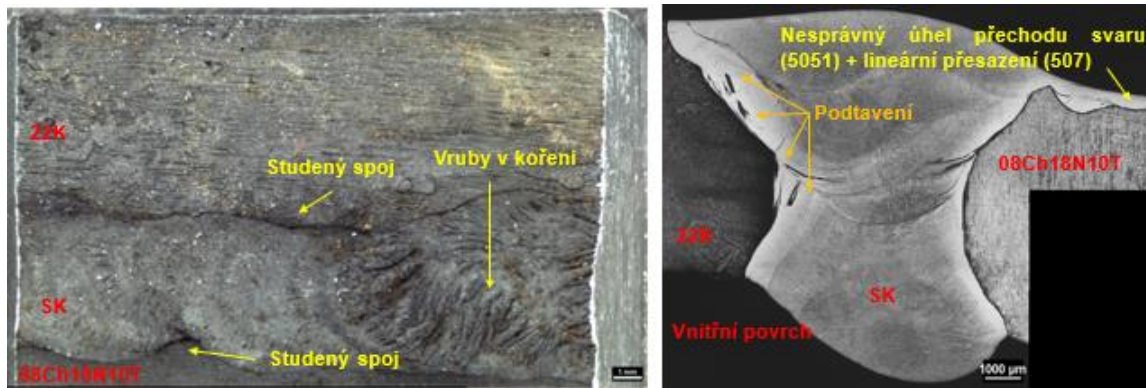


Obr. 7. Vlevo: únik provozního média na PG1 – HSS – nátrubku N5; vpravo: spodní část PG a uvedení potrubních tras vedených z N5 a N6. [29]

Ke stanovení příčiny poruchy byly na několika vědeckých pracovištích v ČR provedeny analýzy: NDT, CT měření, posouzení korozních produktů a kalu, vyhodnocování mikrostruktury a makrostruktury, chemické analýzy, posouzení lomových ploch a degračních mechanismů a měření mikrotvrdosti. [29, 31]

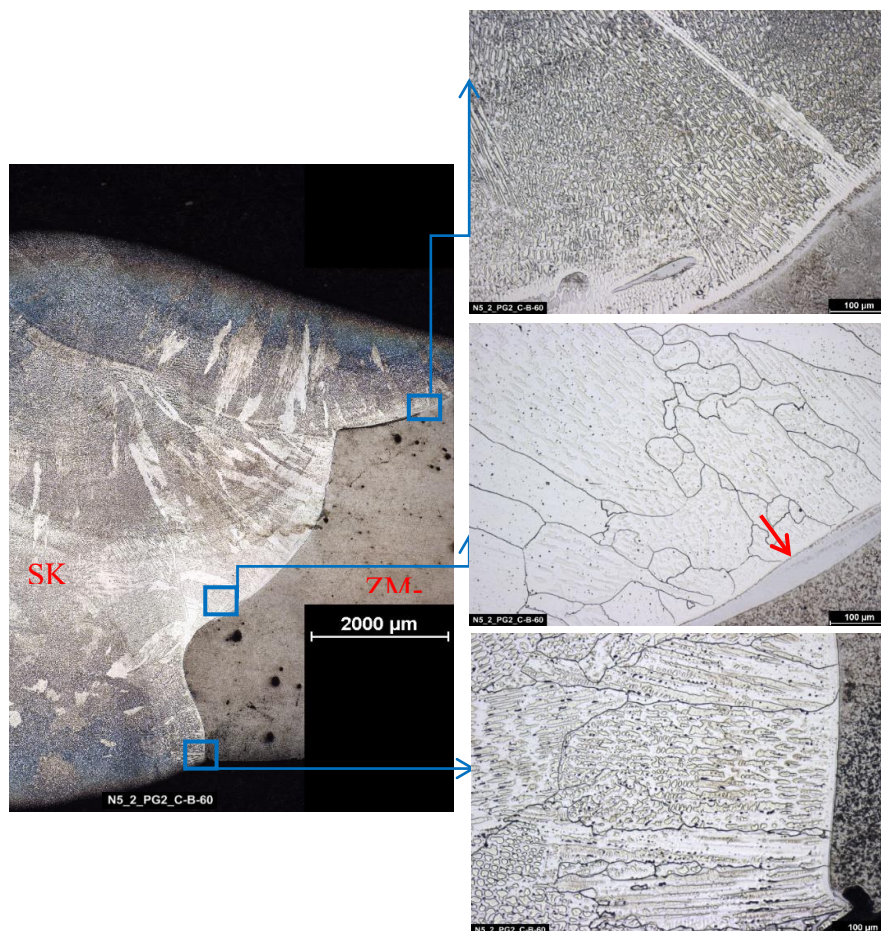
Z výsledků nelze jednoznačně a konkrétně stanovit jediný degrační mechanismus, který vedl k poškození HSS. Faktory ze zjištěných analýz, které vedli k celkovému poškození HSS jsou uvedeny v následujících bodech:

- Provedení HSS montážním způsobem → horší technologické provedení a ovlivnění kvality svaru; větší pravděpodobnost vad (koncentratoru napětí); nerovnoměrnost tuhnutí svarového kovu (staženiny, póry, necelistvosti). Vady svařování jsou parné na obr. 8.



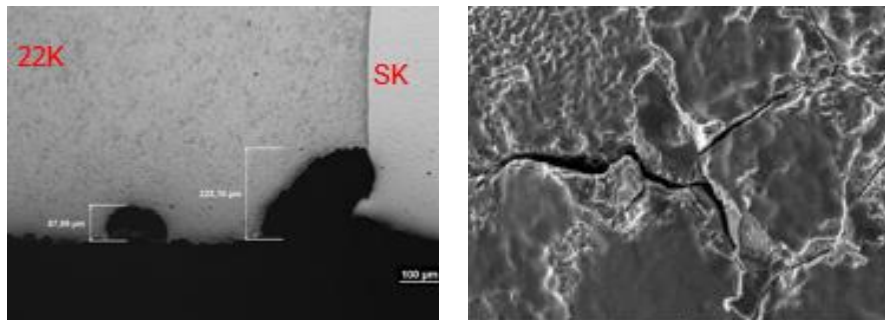
Obr. 8. Vady svarového spoje [32]

- Nedodržené svařovací podmínky → velké vnesené teplo, které zvětšuje šířku nauhličených zón (větší náchylnost k praskavosti).
- Nevhodně zvolený PM (Sv-10CH16N25AM6) → s ocelí 22K vykazuje zvýšenou citlivost mezidendritických hranic. V přechodové oblasti došlo ke změnám hlavních legujících prvků, klesá obsah chromu, současně narůst uhlíku, síry a fosforu. Tyto prvky vedou k tvorbě heterogenit a jsou cestou pro šíření trhliny (obr. 9.).



Obr. 9. Makrostruktura a mikrostruktura svarového kovu a svarového spoje nátrubku svařovaným PM Sv-10 [33]

- Etapové šíření trhlin → z fraktografických analýz nebylo potvrzeno, že by se jednalo o únavové poškození (bez striací a postupových čar). K porušení došlo transkrystalickou i interkrystalickou dekohezí (obr. 10. vpravo). Stabilní šíření probíhalo podél hranice ztavení mezi ZM 22K a PM
- Nález korozních produktů → na vnitřní straně nátrubků (korozní důlky a puchýře, obr. 10. vlevo); mohou působit jako iniciační vruby pro vznik trhlin.

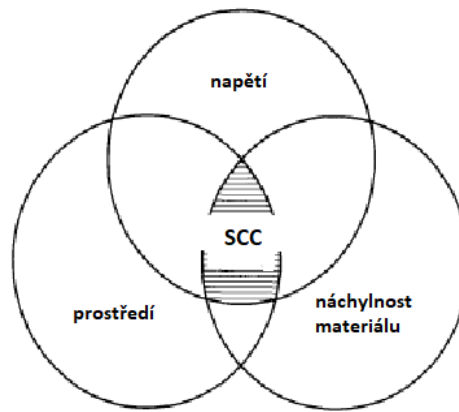


Obr. 10. Vlevo: Korozní důlky na svarovém spoji; vpravo: interkrystalická dekoheze materiálu 22K [32]

Závěrečné zprávy studie uvádí, že kořenovou příčinou poškození jsou materiálové kombinace, napěťové či deformační zatížení a přítomnost vodného prostředí. Výsledný charakter zjištěných poruch byl označen jako **korozní praskání pod napětím** (SCC, Stress Corrosion Cracking). [5, 29, 31]

1.5.1 Korozní praskání pod napětím

Korozní praskání pod napětím (SCC) je časově závislým procesem, ve kterém dochází k předčasnému praskání citlivého materiálu, v důsledku interakce korozního prostředí a působením napětí. Příčinou SCC u parogenerátorů je vliv **korozního prostředí** (chemické složení odpovídající odluhu, tedy voda a ionty $\text{Cl} < 0,001 \text{ mg/l}$, $\text{SO}_4 \text{ } 0,004\text{-}0,010 \text{ mg/l}$), **náchylnost materiálu** (korozivzdorná ocel náchylná k MKK; uhlíková ocel s nízkou korozní odolností; PM), **napětí** (vnější a vnitřní napětí). Na obr. 11 je uvedené schéma těchto parametrů, které mají za následek vznik SCC. Podle odborných článků je porušení SCC nejčastěji řešeným problémem v JE a může mít vážné následky. [2, 34, 35, 36]



Obr. 11. Vliv parametrů ke vzniku korozního praskání pod napětím SCC. [37]

Jedná se o křehké porušení, bez ztráty materiálu a viditelných korozních produktů. Podle struktury se šíří po hranicích zrn (interkrystalicky) nebo skrz zrna (transkrystalicky). V materiálu se může vyskytovat transkrystalické i interkrystalické porušení současně. Trhliny jsou kolmé k tahovému napětí a nejpravděpodobnějším výchozím bodem vzniku trhlin jsou zóny ovlivněné svařovacím teplem nebo štěrbinami na povrchu. [34, 38, 39]

K porušení většinou dochází při malém tahovém napětí (nad určitou prahovou hodnotou, pod mezí kluzu). Napětí může být vyvoláno vnějším zatížením nebo i kombinací se zbytkovým napětím, které je vnesené při tepelném zpracování, z výroby nebo vlivem svařování. Vlivem mechanického napětí dochází ke zrychlení korozních pochodů. [36]

Častěji na SCC poškození reagují slitiny v konkrétním korozním prostředí. Tak je tomu u parogenerátorů, kde vlivem horkých vodních roztoků s obsahem chloridových iontů, dochází k praskání korozivzdorných austenitických ocelí, ale nedochází k porušení feritické oceli. Struktura s menšími zrnky je méně citlivá k SCC. Návrh ochrany proti SCC je velmi obtížný, jelikož zahrnuje mnoho úvah z hlediska korozního prostředí, snížení tahového napětí a volbu vhodného materiálu. Vztah pro proces SCC uvádí vzorec 1., který závisí na mnoha parametrech, kde b , m , n , p , q jsou upravené konstanty, Q je tepelná aktivační energie, R univerzální plynová konstanta, T je teplota, A je faktor mikrostruktury, K je faktor mechanický, H^+ je aktivita vodíku (pH), E a E_0 je elektronový a korozní potenciál a x jsou inhibitory nebo znečišťující látky v roztoku. Faktor mikrostruktury A zahrnuje chemické složení, hranice a velikost zrn, segregace, vliv tepelného zpracování (šíření karbidů), vliv zpracování za studena (určení meze kluzu). Faktor mechanický K se vztahuje ke zbytkovému napětí, rychlosti a velikosti deformace. [34, 35, 36, 40]

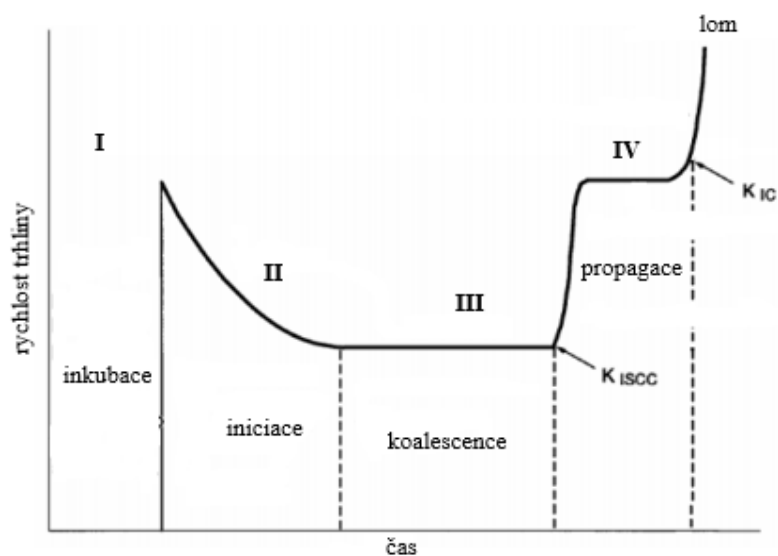
$$x = A [H^+]^n [x]^p K^m e^{\frac{E-E_0}{b}} e^{\frac{Q}{RT}} t^q \quad (1)$$

hloubka SCC poškození
pH faktor prostředí
elektroodový potenciál korozní potenciál teplota
faktor struktury a chem. složení
mechanický faktor
čas

Mechanismus SCC lze klasifikovat do dvou skupin:

- Anodická SCC – řídí se rozpouštěním anodického kovu
- Katodická SCC – řídí se prostupem vodíku do materiálu a vede k vodíkové křehkosti

Následující graf 1. znázorňuje časový vývoj SCC, který lze rozdělit do 3 stádií. Osa x znázorňuje čas a osa y představuje rychlost trhliny. Prvním stadiem je inkubace, kdy dochází k prvotním viditelným změnám, jako jsou důlky, skluzová pásma a další. Ve druhém iniciačním stadiu dochází k podnícení trhlin a snižuje se rychlost růstu trhlin v důsledku klesající rychlosti deformace. Ve třetím stádiu dochází ke koalescenci (spojování) trhlinek a až ve čtvrtém stadiu propagace se vytvoří jedna magistrální trhlina, která vede k lomu a poškození součásti. V bodě K_{IC} se přisuzuje růst trhlin spíše vlivu mechanického působení než vlivu prostředí. [40]



Graf 1. Časový vývoj SCC, kde K_{IC} je lomová houževnatost [upraveno z 40]

Testy citlivosti k SCC nám umožňují předpovídat chování sledovaných materiálů v relativně krátkém čase. Podmínky testování musí být nasimulovány tak, aby korozní parametry byly kritické. Zrychlení zkoušky se provádí zvýšením teploty, koncentrací, pH a elektrochemickou stimulací. Pro vyhodnocování je potřeba vztahovat působící napětí a v případě tvářeného materiálu také zahrnout směr orientace zrn. [36 ,40]

1.5.2 Galvanická koroze

U heterogenních svarů je bimetalická (galvanická) koroze typická. Jedná se o nerovnoměrné poškození, kdy při styku dvou různorodých materiálů, z nichž jeden je ušlechtilější, dochází ke vzniku galvanického článku. Elektrolytem se stává okolní prostředí (pára, vlhkost), méně ušlechtilý kov se chová jako anoda (rozpouští se jako v našem případě materiál 22K) a ušlechtilější jako katoda (08Ch18N10T). Přídavným materiálem vnášíme do svaru heterogenity a tím vznikají další mikročlánky. Zabránit tomu lze vhodně zvoleným PM, aby katodicky chránil ZM s vyšším korozním potenciálem. Rychlost koroze záleží na velikosti styku ploch, okolní teplotě a složení elektrolytu. Je-li korozivzdorná ocel svařovaná k uhlíkové oceli, musí protikorozní ochrana dílce z uhlíkové oceli přesahovat vlastní svarovou oblast nejméně o 20 mm do korozivzdorné oceli. [41, 42]

1.5.3 Bodová a štěrbinová koroze

Štěrbínová koroze se vyskytuje ve spárách a trhlinách materiálu (kapilárách). Koroze může vznikat na konstrukčních uzlech (např. trubka-trubkovnice) nebo na výrobních defektech (neprůvar, studený spoj), ale i za provozu součástí. Povrch kapiláry se vlivem špatného oběhu prostředí stává koncentračním článkem, ve kterém anodu tvoří okraj štěrbin. Stejně tak je tomu i u bodové (důlkové) koroze, která vzniká na místech s porušenou pasivovanou vrstvou. Bodová koroze se od důlkové koroze se liší v průměru důlků, který je u bodové menší než jeho hloubka. K bodové korozi jsou náchylné uhlíkové oceli i korozivzdorné oceli, pokud je porušena povrchová vrstva materiálu. Zvýšené teploty a chloridové ionty, poškrábání povrchu, technologické defekty svarových spojů (zápaly, vruby), nečistoty a zbytky strusky přispívají a podporují vznik štěrbinové či bodové (důlkové) korozi, která je koncentrátorem napětí a může přispívat k další degradaci např. k SCC. [2, 42, 43]

U korozivzdorných ocelí se důlkové korozi lze vyvarovat pomocí molybdenu v rozsahu 2-3 hm. %. Je-li rozsah překročen, zhoršují se technologické vlastnosti oceli a mohou se tvořit intermetalické fáze. [44]

1.5.4 Další korozní poškození

Vlivem anodického rozpouštění kovu může docházet katodickou reakcí nebo termickou disociací (při svařování) ke vzniku atomárního vodíku. Malá velikost atomárního vodíku umožňuje vstoupit do krystalové mřížky kovu, kde dochází k rekombinaci na molekulu H_2 a tím vzniká uvnitř velké pnutí (energie), čímž dochází k vodíkové křehkosti. Vodíková křehkost nastává při nižších teplotách (-50 až 100 °C) a nedochází k interakci s jinými prvky. Oproti tomu vodíková koroze nastává za vyšších teplot a vodík reaguje s uhlíkem i jinými prvky v mřížce. Nejčastěji vstupuje vodík do tzv. vodíkových pastí (dislokace, hranice zrn, vměstky, dutiny, trhliny). Feritická struktura (těsnější uspořádání mřížky) je náchylnější k rozpustnosti vodíku v kovu. Vlivem působení vodíků dochází ke změnám mechanických vlastností. Mění se mez kluzu a pevnosti. [41]

1.6 Návrh korozního opatření HSS

Na základě výsledků zjištěných poruch z experimentálních analýz byl charakter poškození HSS u nátrubků parogenerátoru trasy RY stanoven SCC. Ke zvýšení životnosti a bezpečnosti těchto spojů je nutné se zaměřit na tři hlavní spouštěče, které vedou k SCC. Primárně je zapotřebí zaměřit se na vyšší odolnost spojů, dále zamezit kontaktu HSS s okolním médiem a popřípadě zvolit jiné složení media.

1.6.1 Opatření při výrobě

Odolnější HSS je možné připravit dílensky, kde je dodržena větší čistota a dodržení svařovacích podmínek. Pro lepší provedení svarů by bylo vhodné zvážit i jinou technologii, při které je vnášeno menší tepelné ovlivnění. Dle zkušeností z Ruska vyplývá, že použití PM Sv-10CH16N25AM6 není vhodnou volbou. Je doporučeno použít jiný typ PM s vyšším obsahem chromu a nižším obsahem niklu. V případě použití stejného PM (Sv-10CH16N25AM6) je zapotřebí chránit vzniklý svarový kov před stykem s pracovním médiem. Ochranu svarového kovu lze provést závarem z jiného PM s vyšší korozní odolností vůči médiu II.O., popřípadě ošetřit kořen jinou povrchovou úpravou. Povrchovou úpravou

nesmí dojít k velkému teplotnímu ovlivnění a je třeba co nejvíce snížit porozitu. Jako povrchové úpravy jsou vhodné např. laserové návary, cold spray a filmotvorné inhibiční přípravky. [29, 32, 45]

1.6.2 Opatření při provozu

Prostředí uvnitř parogenerátoru lze ovlivnit zamezením přístupu kyslíku a dodržováním předepsané relativní vlhkosti (<50 %). Při revizích je vhodné zkrátit dobu otevřeného stavu PG na minimum. Popřípadě zvážit úpravu rozvodů napájecí vody uvnitř PG, aby teplotní zatížení ve spodní části PG bylo co nejmenší a zároveň byly omezeny teplotní změny při změnách výkonu bloku. [32]

1.6.3 Opatření během odstávky zařízení

V neposlední řadě by bylo vhodné provádět častější NDT kontroly (jednou za 4 roky), jestliže poruchovost těchto svarů se objevuje v rozmezí 6-8 let (dle Ruských statistik). Při odstávkách minimalizovat dobu trvání režimů s výskytem kyslíku v parovzdušné směsi. Ke konzervaci je možné použít odstávkové aminy ve vodním režimu. [32]

2 Korozní testování

Korozní zkoušky jsou prováděny za účelem zjišťování korozní náchylnosti sledovaného materiálu při stanovených podmínkách. Metod testování existuje mnoho a pro vyhodnocování a postupy zkoušek platí určitá kritéria, která jsou stanovena normami. Výsledky z různých zkoušek nelze mezi sebou porovnávat. Zkoušky se dělí podle toho, zda se testují v laboratoři nebo v provozních podmínkách. Obě metody testování jsou destruktivní. Výsledky testu jsou vyhodnocovány pomocí vizuálního hodnocení, popřípadě pomocí hmotnostních úbytků, změn mechanických vlastností a pomocí metalografie. Mezi další metody testování koroze spadají elektrochemické zkoušky (měření korozního potenciálu, elektrochemického šumu, lineárního odporu).

Zkoušky přímo v provozních podmínkách (atmosférách, vodních prostředí, půdách) jsou dlouhodobé, levné, jednoduché a často slouží k ověřování výsledků laboratorních zkoušek. Výhodou je možnost testování více vzorků najednou a k vyhodnocení může dojít i bez odstávky zařízení. Nevýhodou je neprojevení se některých korozních poškození před vyndáním vzorků, ačkoliv byly splněny podmínky. Zároveň na malých vzorcích nemusí korozní napadení odpovídat skutečnému napadení na reálné součásti. Může dojít i ke kontaminaci korozními produkty, které jsou např. v potravinářském či medicínském prostředí nepřijatelné. [35]

Laboratorní testy jsou rozšířenější a umožňují urychlit dobu expozice korozního prostředí a nastavovat kritické parametry. Omezením je velikost (rozměry) vzorků, u kterých platí, že čím větší exponovaná plocha, tím jsou výsledky zkoušky reprezentativnější. Další nevýhodou zrychlených laboratorních zkoušek je obtížná interpretace výsledků, jelikož v některých případech není možné navodit reálné podmínky korozního procesu. Z laboratorních testů korozního testování je nejpoužívanější korozní testování v solné mlze. [2, 46]

2.1 Korozní testování v solné mlze

Nejstarší a nejpoužívanější metodou korozního testování je v solné mlze. Dle normy EN ISO 9227 se dělí dle pH v neutrální solné mlze NSS (pH 6,5-7,2), v okyselené solné mlze AASS (pH 3,1-3,3) a v okyselené solné mlze s chloridem měďnatým CASS (pH jako u AASS). Testování probíhá v korozní komoře při teplotě 35 °C, kde je rozprašován roztok chloridu

sodného NaCl o koncentraci 50 g/l. Doba trvání zkoušky je specifikována zkoušeným materiálem a během předepsané doby se rozprašování nesmí přerušit. [2, 46]

2.2 Korozní testování při mechanickém zatížení

Korozní zkoušky za současného mechanického namáhání umožňují určit vliv namáhání a ověřit použitelnost konstrukce. Důvodem zkoušek je zjištění náchylnosti ocelí ke koroznímu praskání pod napětím. Jak bylo zmíněno v kapitole 1.5.2, SCC praskání je příčinou vážných nehod v důsledku náhlých selhání, které je velmi obtížné predikovat. [2, 36]

Obvykle jsou zkoušky korozního praskání pod napětím prováděny dle norem např. ASTM G49, NACE TM0177.6, která popisuje 4 metody zkoušení (a-d).

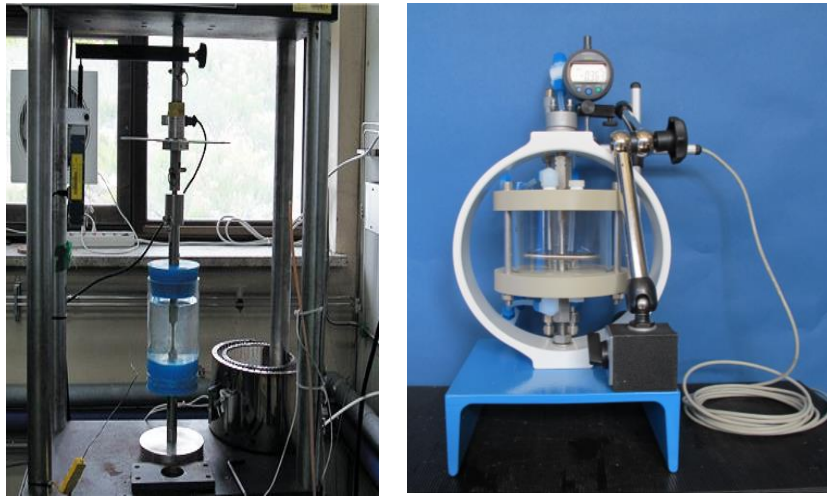
- | | |
|---------------------------|-----------------------------|
| a) jednoosé zkoušky tahem | c) C-kroužek |
| b) zkouška ohybem | d) DCB test (4 bodový ohyb) |

Zkouška se provádí v prostředí (např. H₂S), tak aby bylo nasimulováno nejagresivnější prostředí. Důvodem je urychlení testování. Problematika je řešena u potrubí pro plyn, ropu a v petrochemickém průmyslu, kde je materiál vystavován velmi silným kyselinám. Pro testování části parogenerátoru v praktické části budeme simulovat prostředí mírnější, a to v solné mlze o 5 % koncentraci chloridu sodného. [49]

Jednoosé zkoušky tahem v korozním prostředí jsou nejvšestrannější metodou. Norma ASTM G49 povoluje značnou flexibilitu při výběru typu a velikosti vzorků, postupů, velikostí a rozsahu napětí. K vyhodnocení potřebujeme mít vzorky vystavené koroznímu prostředí bez zatížení a se zatížením, abychom mohli sledovat a porovnat vliv tahového napětí. Aplikované zatížení může být konstantní nebo proměnlivé. Nesmí docházet ke zkroucení a ohýbání vzorku (neosové zatížení). Doba trvání zkoušky může být až 720 hodin. Nevýhodou je, že se během testování a vystavení vzorku koroznímu prostředí může na vzniku koroze podílet vodíková křehkost. Ta může podpořit vznik SCC. [47]

V praxi jsou pro testování SCC používány přístroje, které připomínají trhačí stroje, do kterého je umístěna cela s upevněným vzorkem a okolním médiem, které simuluje agresivní korozní prostředí. Princip zkušebního stroje a testování je uveden na obr.12. Výhodou zařízení je možnost simulovat rostoucí prodloužení za konstantní rychlosti deformace až do dolomení vzorku. Během testování lze sledovat měřené hodnoty a upravovat parametry okolního media. Výsledkem testu je diagram závislosti deformace na čase. Vzorky pro testování jsou obdobné

jako vzorky pro tahovou zkoušku. Omezením tohoto zařízení je časová náročnost v případě velkého množství vzorků. Do komory s mediem je umisťován vždy jeden vzorek a doba testování může trvat několik hodin až dnů. [47]



Obr. 12. Princip metody testování SCC dle NACE TM0177.6 [48, 64]

V experimentální části práce se budeme zaměřovat právě na jednoosé namáhání v korozních podmínkách, a aby bylo vyvoláno SCC u předložených HSS. Bohužel zařízení jako je uvedeno na obr.12 je cenově nákladné a ve škole je takovéto zařízení nedostupné. Cílem práce bude tedy nejen testovat a nasimulovat u předložených HSS korozi pod napětím, ale i především navrhnout levnější a dostupnější metodu testování SCC na HSS v laboratorních podmínkách.

Experimentální část práce

3 Návrh experimentu

Zaměření experimentální části práce, jakožto i název diplomové práce, je korozní testování heterogenních svarových spojů. Konkrétněji je zacíleno na korozní testování HSS pod napětím (SCC), které je uváděno dle předchozích studií jako možná příčina poškození nátrubků parogenerátoru na JE Temelín. Zmíněná problematika je popisována v kapitole 1.5. Cílem experimentální části práce je navrhnout laboratorní metodu urychleného testování HSS při jednoosém tahovém zatížení a nasimulovat takové podmínky, které přispívají ke vzniku SCC. Metodou následně ověřit správnost technologie svařování u předložených vzorků a zjistit jejich náchylnost k SCC.

Pro experimentální část práce byly předloženy již hotové svařené trubky ze základních materiálů P265GH (ČSN EN 10028-2) a 1.4541 (Wr.N.), které byly externě připravovány a svařovány metodami 521 a 141 (označení dle EN ISO 4063). Při svařování metodou 141 byly použity přídavné materiály SV-07CH25N13 (dle GOST 2246-70), SV-10CH16N25AM6 (dle GOST-2246-70), UTP 068HH (Wr.Nr. 2.4648), 316LSi (dle AWS A 5.9) a NiCrMo₃ (dle AWS 5.9). Použité materiály pro experimentální část jsou schválenými materiálovými ekvivalenty pro použití na JE dle NTD A.S.I. sekce II. Pro vyvolání jednoosého předeprnutí na připravených vzorcích byl použit přípravek závitové matice (popsán v kapitole 3.4). Korozní prostředí bylo simulováno pomocí solné mlhy v korozní komoře Q-FOG CCT, ve které byly umístěny přípravky s předeprnutými vzorky a vzorky bez zatížení. Před i po expozici solnou mlhou byly vzorky podrobeny nedestruktivní zkoušce prozařováním (RT). Dále byly vzorky po korozním testování podrobeny metalografii. Experimentální část práce byla realizována na pracovišti Západočeské univerzity v Plzni na fakultě strojní v rámci studentského projektu SGS 2018-051.

3.1 Charakteristika základních a přídatných materiálů trubek

Jedním ze základních materiálů trubek byla použita korozivzdorná austenitická ocel stabilizovaná titanem 1.4541 (dle Wr.N.). Druhým základním materiálem byla nízkouhlíková nelegovaná jakostní ocel P265GH (dle ČSN EN 10028-2). Další označení ZM je uvedeno v následující tabulce 1. Pro trubky svařované metodou 141 byly použity přídatné materiály Sv-07CH25N13 (dle GOST 2246-70, dále značeno ve zkratce SV07) a Sv-10CH16N25AM6 (dle GOST 2246-70, dále značeno ve zkratce SV10), 2.4648 (dle Wr.Nr.), 316LSi (dle AWS 5.9) a NiCrMo₃ (dle AWS 5.9).

Tabulka 1. Značení svařovaných základních materiálů [51, 52]

| ČSN | EN | DIN (W. Nr.) | GOST | USA |
|------------------|-----------------------------|----------------------|--------------|----------------------------|
| 17 248 17 247 | X6CrNiTi18-10 (EN 10088) | 1.4541 | 08Ch18N10T | AISI 321 |
| 11416 11418 | P265GH (EN 10028-2) | 1.0425 HII St45.8 | 16 K 20 K | A414E A516Gr.60 Gr.A |

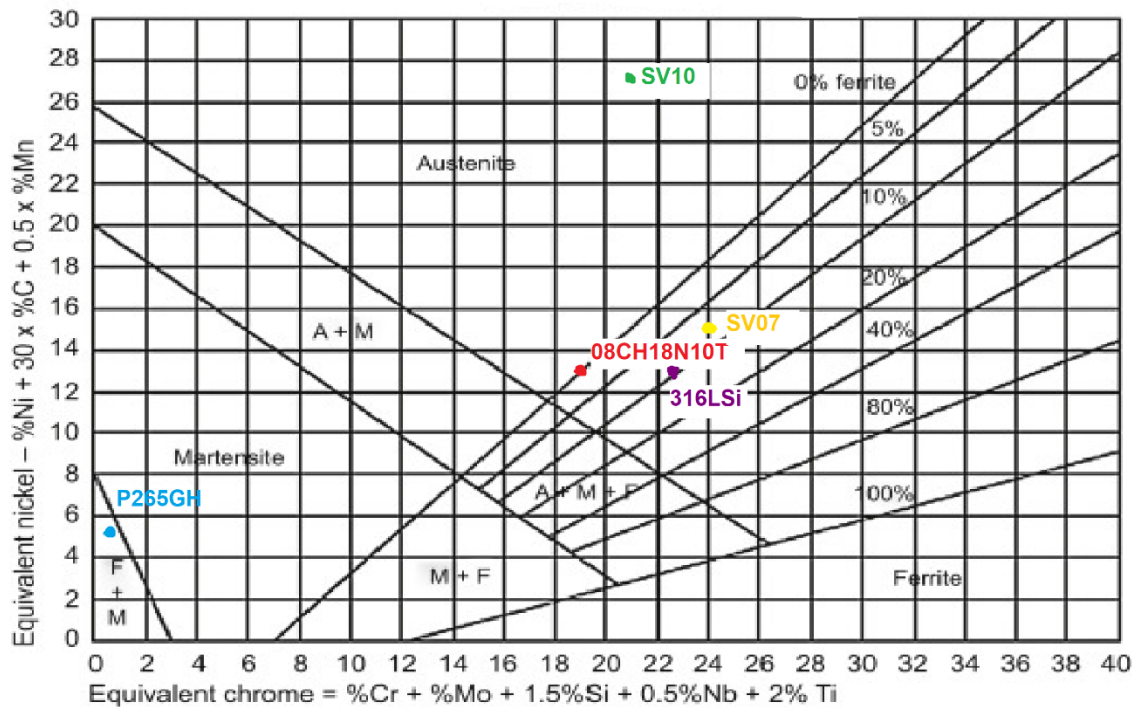
Struktura použitých materiálů je uvedena v Schaefflerově diagramu na obr. 13. K určení výsledné struktury materiálů byly vypočteny ekvivalenty chromu Cr_E a niklu Ni_E (dle vzorečků 2 a 3) z chemického složení dodaných materiálů (tabulka 16. uvedena v příloze A). Výpočty jsou uvedeny v tabulce 2. Při svařování však záleží na promísení, které určuje výslednou strukturu svarového spoje. [2, 53]

$$Cr_E = Cr + Mo + 1,5 \cdot Si + 0,5 \cdot Nb + 2 \cdot Ti \quad (2)$$

$$Ni_E = Ni + 30 \cdot C + 0,5 \cdot Mn \quad (3)$$

Tabulka 2. Ekvivalent Cr a Ni použitých materiálů pro určení struktury ze Schaefflerova diagramu obr. 13.

| materiál | 1.4541 | P265GH | SV07 | SV10 | 316LSi | 2.4648 | NiCrMo ₃ |
|-----------------------------------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|---------------------|
| ekvivalent niklu Ni _E | 13,02 | 5,47 | 15,7 | 27,97 | 13,8 | 72,13 | 65,22 |
| ekvivalent chromu Cr _E | 19,09 | 0,35 | 24,11 | 21,45 | 19,95 | 22,2 | 32,89 |



Obr. 13. Schaefflerův diagram, A – austenit, M – martenzit, F – ferit [54]

3.1.1 Korozivzdorná chromniklová austenitická ocel

Korozivzdorná chromniklová austenitická ocel je aplikována z důvodů vysoké odolnosti proti elektrochemické korozi v oxidačním prostředí. Odolnost zajišťuje obsah chromu nad 12 hm.%. Austenitická struktura materiálu má lepší tažnost a houževnatost než uhlíkové a nízkolegované oceli. Ze skupiny korozivzdorných ocelí jsou CrNi oceli nejlépe svařitelné. Zásadně jsou svařovány bez předehřevu, aby nedošlo ke vzniku trhlin za horka v TOO a svarovém kovu. Slabší stránkou materiálu je nižší mez kluzu, špatná tepelná vodivost, obtížná obrobitelnost, sklon ke koroznímu praskání pod napětím a také vysoká cena (dáno vyšším obsahem Ni). Vlivem větší tepelné roztažnosti a nižší tepelné vodivosti mají CrNi oceli sklon pro větší napětí uvnitř struktury, vznik deformací a zbytkového pnutí. [2, 53, 55]

Pro zamezení a snížení rizika MKK (ochuzování materiálu o chrom vlivem precipitace karbidů chromu Cr_23C_6 na hranicích zrn) je austenitická ocel 1.4541 legována titanem. Titan tvoří karbidy (vyšší afinita k uhlíku než chrom) a zabraňuje tak ochuzování o chrom po hranicích zrn. Pro stabilizaci legujícími prvky (Ti, Nb, Ta) musí platit poměr, který je uveden ve vzorci 4. V našem případě poměr legujícího prvku Ti a C u oceli 1.4541 vyhovuje (6,561). [2, 53]

$$\frac{Ti}{C} \geq 4 \quad \frac{Nb}{C} \geq 8 \quad \frac{Ta}{C} \geq 8 \quad \frac{Ta + Nb}{C} \geq 8 \quad (4)$$

Titan má vysokou afinitu ke kyslíku a během svařování vyhořívá, tím pádem se problematika MKK přesouvá do pásem TOO, kde dochází k tzv. nožové korozi (MKK). Pro zamezení kontaktu s kyslíkem při svařování se používá ochranný plyn. Svařuje se bez předehřevu, z důvodu ovlivnění korozní odolnosti spoje. Austenitické oceli nejsou náchylné na vznik studených trhlin. Jsou však náchylné k tvorbě teplých trhlin, z toho důvodu je doporučován tepelný příkon do 1,5 kJ/mm a nepřekročení teploty interpassu 150 °C. Svarová lázeň nesmí být větší než 1,5násobek poměru šířky/hloubky. [2]

Použitá ocel 1.4541 pro trubky parogenerátoru splňuje požadavky dle normy GOST 6032. Chemické složení a mechanické vlastnosti materiálu jsou uváděny v následujících tabulkách 3. a 4.

Tabulka 3. Chemické složení základního materiálu 1.4541 v hm.% [56]

| C | Mn | Si | P | S | Ni | Cr | Ti | N |
|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,057 | 1,84 | 0,450 | 0,020 | 0,001 | 10,39 | 17,61 | 0,374 | 0,010 |

Tabulka 4. Mechanické vlastnosti chromniklové austenitické oceli 1.4541 [56]

| | |
|--|-----------|
| Mech. Vlastnosti při teplotě T [°C] | 20 |
| Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa] | 334 |
| Pevnost v tahu R_m [MPa] | 598 |
| Tažnost A2 [%] | 40 |
| Tažnost A5 [%] | 43 |
| Tvrdość HRB | 77 |
| Velikost zrna G | 7 |

3.1.2 Jakostní uhlíková konstrukční ocel

Druhým základním materiálem trubek je ušlechtilá uhlíková ocel P265GH (dle ČSN EN 10028-2), tzv kotlová ocel. Jedná se o žárovečnou konstrukční ocel, se zaručenou hodnotou meze kluzu za vyšších teplot. Má zaručenou svařitelnost. Běžně se svařuje bez předehřevu s přídavnými materiály, které chrání svarový kov proti stárnutí. V TOO vzniká vnitřní pnutí vlivem zvýšení tvrdosti. Není odolná koroznímu a oxidačnímu prostředí. Ocel je používána v tepelně zpracovaném stavu po normalizačním žhání (890-950 °C). V JE se využívá jako nosná ocel pro konstrukce a je součástí nátrubků parogenerátorů. Tabulka 5. a 6. uvádí chemické složení a mechanické vlastnosti uhlíkové oceli použité pro výrobu trubek experimentu. [2, 57, 58]

Tabulka 5. Chemické složení základního materiálu P265GH v hm.% [59]

| C | Mn | Si | P | S | Cu | Ni | Cr | Al | Mo |
|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|
| 0,17 | 0,69 | 0,197 | 0,008 | 0,095 | 0,05 | 0,02 | 0,05 | 0,034 | 0,003 |

Tabulka 6. Mechanické vlastnosti základního materiálu P265GH [59]

| | |
|---|-----------|
| Mech. Vlastnosti při teplotě T [°C] | 20 |
| Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa] | 360 |
| Pevnost v tahu R_m [MPa] | 480 |
| Tažnost A5 [%] | 35,2 |

3.1.3 Přídavné materiály

Při svařování metodou 141 byly použity přídavné svařovací dráty z materiálů SV07Ch25N13 (značení podle GOST 2246-70) a SV10Ch16N25AM6. V obou případech se jedná o austenitickou ocel. Odlišností těchto materiálů je obsah chromu a niklu. Dalšími použitými přídavnými materiály byly UTP068HH (2.4648 dle Wr.Nr.), 316LSi (dle AWS 5.9) a NiCrMo₃ (dle AWS 5.9). Chemické složení a mechanické vlastnosti použitých přídavných materiálů jsou uvedeny v tabulce č. 16 a 17 v příloze A. Hodnoty jsou uvedeny z inspekčních certifikátů dodaných PM, kromě materiálu UTP 068 HH (uvedeno z katalogu materiálu).

Ze Schaefflerova diagramu lze přibližně odhadnout, že v případě PM SV-10, UTP 068 HH a NiCrMo₃ se jedná o strukturu austenitickou, u PM SV-07 a 316LSi se vyskytuje struktura austenitu a do 10 % feritické struktury. Výsledná struktura svarového kovu záleží

na procentu promíšení mezi PM a ZM. V příloze A na grafech 3. až 7. jsou uvedeny Schaefflerovy diagramy přídavných materiálů s promíšením 25 %. Z hlediska mechanických vlastností má PM NiCrMo₃ nejvyšší pevnost v tahu R_m (při 20 °C). Nižší tažnost oproti ostatním má PM SV10.

3.2 Výroba a parametry svařování trubek

Pro experimentální část práce byly předloženy bezešvé trubky dvou základních materiálů 1.4541 a P265GH, které byly svařovány metodou 521 a 141 (dle EN ISO 4063). Rozměry trubek byly pro obě metody svařování stejné. Tloušťka obou základních materiálů byla 2,6 mm a průměr trubek 44,5 mm. Dodané trubky svařované metodou 141 jsou uvedeny na obr. 14.



Obr. 14. Dodané trubky svařované metodou 141

3.2.1 Laserové svařování

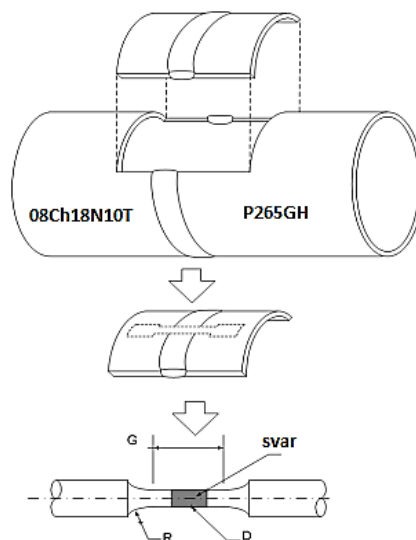
Předložené trubky (3 ks) svařované pomocí metody 521 byly připraveny v zakázkovém středisku LaserTherm spol s.r.o. Označení těchto tří svařovaných trubek je 523/1, 523/2 a 523/3. Parametry svařování jsou uvedeny v tabulce 18. a obr. 49 přiložených v příloze B. Odlišným parametrem přípravy vzorků byl výkon paprsku.

3.2.2 Obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu

Pro další testování bylo předloženo pět kusů trubek svařovaných metodou 141 (EN ISO 4063). Trubky pro experimentální část byly dodány již ve svařeném stavu od zadavatele projektu. Svařovací parametry pro tyto trubky jsou uvedeny v tabulce 19 v příloze B.

3.3 Odběr a příprava vzorků

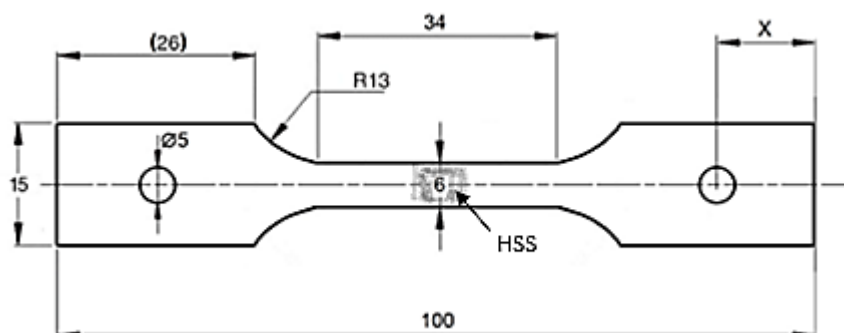
K testování bylo nutné svařované trubky rozřezat na proužky a dále upravit na požadovaný tvar. Odebrané proužky obsahují svařový spoj a obě strany základních materiálů (obdobně jako na obr. 15).



Obr. 15. Schéma postupu odběru vzorků pro experimentální část [upraveno z 62]

Následně z proužků byly vyřezány pomocí metody EDM (elektroerozivní drátové řezání) konečné rozměry vzorků. Tvar vzorků je obdobný jako pro zkoušku tahem, avšak rozměry jsou upraveny tak, aby bylo možné vzorky upevnit do přípravku pro korozní testování pod napětím. Tloušťka vzorků je zachována (2,6 mm). Šířka vzorku byla zvolena 6 mm. Posledním krokem

bylo nutné do vzorků, které byly zatěžovány, vyvrtat otvory pro uchycení pomocí šroubů (M5). Rozměry a tvar vzorku jsou uvedeny na obr. 16. Plocha vzorku není dále mechanicky upravována a je nutné počítat s tím, že není zcela rovná, jelikož se jedná o výřezy z trubek. Pro zjednodušení testování jsou parametry vyhovující.



Obr. 16. Rozměry a tvar vzorku pro testování koroze pod napětím

V případě trubek, které byly svařovány pomocí laseru metodou 521, bylo ze 3 kusů trubek s označením (523/1, 523/2 a 523/3) odebráno 12 vzorků (z každé trubky 4 proužky, obr. 17). Jeden vzorek z každé trubky byl použit pro tahovou zkoušku. Zbylé vzorky byly použity pro korozní testování. Pro přehlednost a označování vzorků svařovaných laserem je uvedena tabulka 7. Barevné označení je zavedeno pro lepší orientaci metalografických výbrusů.

Tabulka 7. Označování vzorků svařovaných metodou 521

| vzorek | 523/1 (bílá) | 523/2 (modrá) | 523/3 (zelená) |
|--------------------------------|--------------|---------------|----------------|
| korozní testování bez zatížení | 1x (A) | 1x (B) | 1x (C) |
| korozní testování se zatížením | 2x (A1, A2) | 2x (B1, B2) | 2x (C1, C2) |
| tahová zkouška | 1x | 1x | 1x |



Obr. 17. Příprava vzorků (svařované metodou 521) pro testování. vzorky jsou nezkrácené a bez otvorů pro uchycení.

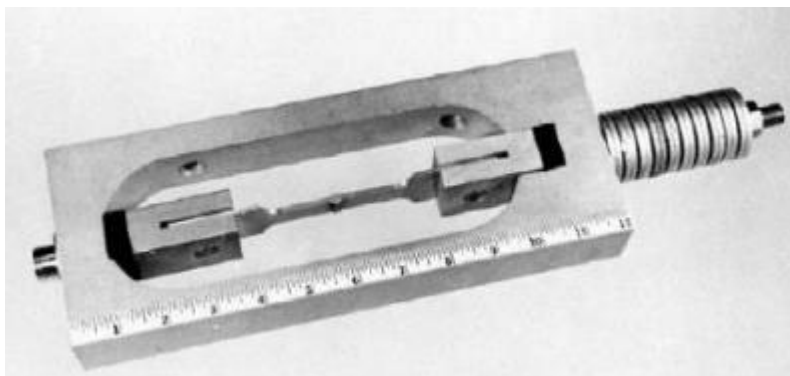
Trubek svařovaných metodou 141 bylo k testování pro SCC předloženo celkem 5 kusů. Označení vzorků z těchto trubek uvádí tabulka 8. Pro testování byly z každé trubky odebrány tři vzorky, z nichž jeden nebyl upnut do napínací matice sloužil jako referenční vzorek. Vzorky pro tahovou zkoušku nebyly odebrány, z důvodu nedostatku materiálu.

Tabulka 8. Označování vzorků svařovaných metodou 141

| Vzorek s označením | 34 | 37 | 38 | 41 | 42 |
|--------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| korozní testování bez zatížení | 34 C | 37 C | 38 C | 41 C | 42 C |
| korozní testování se zatížením | 34 A, 34 B | 37 A, 37 B | 38 A, 38 B | 41 A, 41 B | 42 A, 42 B |

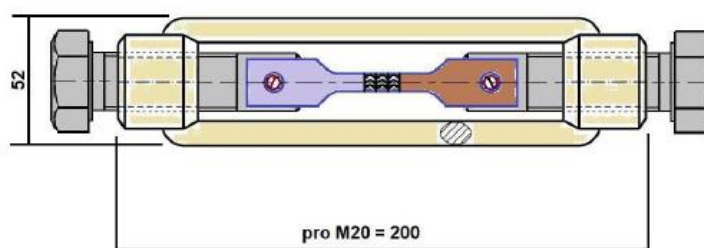
3.4 Přípravek pro testování

Pro vyvolání tahového zatížení na vzorcích byly použity napínací matice a závitové tyče. Princip přípravku je založen na samotném testování dle ASTM G49, kde pro vyvolání konstantního tahového zatížení je možné použít zařízení, které je uvedeno na následujícím obr. 18.



Obr. 18. Pružinový rám pro kalibraci napětí nebo pro SCC testování [63]

Zařízení se skládá z pružin s kroužky a používá se běžně pro kalibraci napětí nebo pro testování SCC. Pro testování SCC je do rámu umístěn autokláv, kde je simulováno korozní prostředí. Jelikož pro testování bylo předloženo více vzorků a korozní prostředí nebylo možné simulovat jen v oblasti svaru, bylo navrženo testování pomocí napínacích matic, které byly s předepnutým vzorkem umístěvány celé do korozní komory (obr.19. a 22).



Obr. 19. Přípravek napínací matice pro vyvolání tahového napětí

Napínací matice je ocelový rám, který je normovaný (DIN 1480:2005-09). V běžné praxi má využití především ve stavitelství, např. pro napínání lan při svazování konstrukcí. Tělo napínáku je galvanicky pozinkováno, aby odolávalo abrazi a bylo alespoň částečně zabráněno korozi během testování a byla tak prodloužena životnost přípravku. Do závitů napínací matice jsou umístěny protilehlé šrouby z nerezové oceli. Otáčením matice vyvoláme tahové nebo tlakové zatížení (dle směru otáčení matice), aniž by došlo k natočení obou šroubů (tím nedojde ke zkroucení vzorků). Přípravek a schéma přípravku s upnutým vzorkem je znázorněn na obr. 19.

Výhodou navrženého přípravku je, že se jedná o standardizovaný díl, a tedy v případě testování více vzorků lze zaručit reprodukovatelnost. Celý přípravek je kompaktní, relativně lehký a snadno ovladatelný. Výhodou je také velikost přípravku, jelikož lze do korozní komory umístit více přípravků najednou a tím pádem zajistit testování více vzorků současně (při jednom testovacím programu). Značnou výhodou, v porovnání se zkušebním zařízením, které je určeno pouze pro jeden vzorek, je nízká pořizovací cena a dostupnost napínacích matic na trhu.

Nevýhodou je, že kolem upevněného vzorku v matici je málo místa např. pro umístění tenzometrů a nelze změřit přesné zatížení vzorku. Dle normy ASTM G49 u rámu, které neobsahují žádné mechanismy pro měření zatížení je žádoucí stanovit úroveň napětí. Pokud bude napětí pod elastickou mezí materiálu, lze průměrné lineární napětí vypočítat z Hookova zákona (vzoreček 7.). Dále není možné řídit rychlost deformace a po ukončení testování nezískáváme žádné měřené hodnoty. Pro uchycení vzorku je nutné upravit závitové tyče a vytvořit plošky pro uchycení vzorků. Během sestavování přípravku byl také problém sehnat levotočivý šroub z korozivzdorné oceli, proto byl komponent nahrazen závitovou levotočivou tyčí a kontramaticí.

Vyvolání tahového napětí na upnutém vzorku v napínací matici bylo docíleno tak, že nejprve byl přípravek z jedné strany uchycen napevno do svěráku za tělo šroubu a druhá protilehlá strana byla držena pomocí klíče za matici na závitové tyči. Otočením těla napínací matice došlo k jednoosému tahovému zatížení. Půl otáčka matice znamená posunutí o jeden závit (1/2 stoupání závitu z každé strany). Vzorek během otáčení matice nebyl zkroucen ani pootočen. Z každé strany šroubu/závitové tyče byla dotažena kontramatice, tak aby nedocházelo k uvolnění předpětí.

4 Zkoušky před korozním testováním

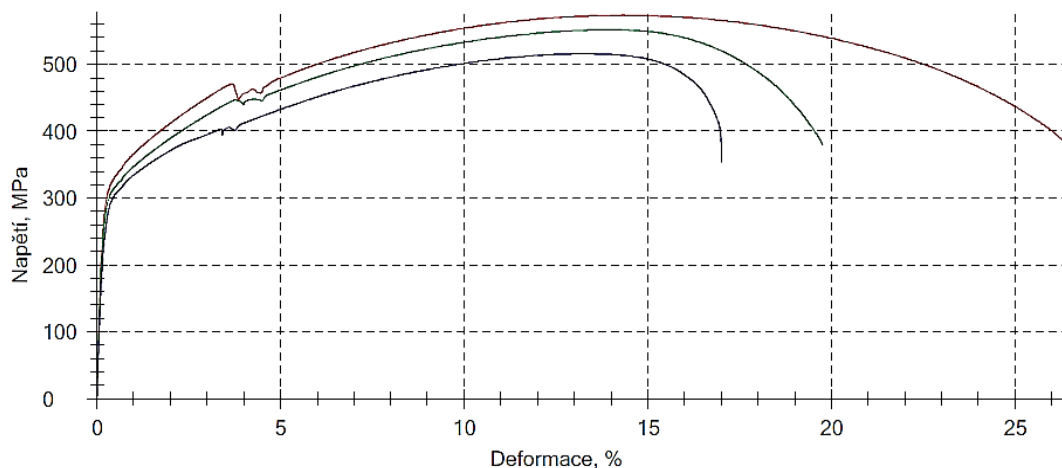
4.1 Příčná zkouška tahem

Před samotným zahájením korozního testování pod napětím byly vyčleněné vzorky podrobeny destruktivní příčné zkoušce tahem, pomocí zkušebního systému Zwick Roell Z250. postup zkoušky byl proveden dle normy ČSN EN ISO 6892-1. Tvar a rozměry vzorku pro tahovou zkoušku byl vzhledem k výřezu z trubek odlišný od požadavků dle normy ČSN EN ISO 4136. Dále nebylo odstraňováno převýšení svaru, jak je uváděno v normě. Cílem tahové zkoušky bylo zjistit mez kluzu a v jakém místě dojde k přetržení vzorku.

Parametry a výsledky příčné zkoušky tahem pro vzorky svařované metodou 521 jsou uvedeny v tabulkách 9. a 10. a grafu 2.

Tabulka 9. Parametry testu příčné tahové zkoušky

| | | | | | |
|------------------------------------|-----------|-----|---------------------------------|----------|-----|
| Zkušební systém : Zwick Roell Z250 | | | | | |
| Předzatížení | : 3 | MPa | Rychlost zkoušky | : 0,0067 | 1/s |
| Rychlost pro E-Modul | : 0,00025 | 1/s | Měřená délka (standardní kanál) | : 25 | mm |
| Rychlost do meze kluzu | : 0,00025 | 1/s | | | |



Graf 2. Příčná tahová zkouška vzorků s označením 523

Tabulka 10. Legenda a výsledky příčné tahové zkoušky vzorků s označením 523

| Legenda | Popis zkoušky | a ₀ mm | b ₀ mm | R _{p0.2} MPa | R _m MPa | A ₂₅ % | A _g % |
|--------------------------------------|---------------|----------------------|----------------------|--------------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|
| ■ | 523/1 | 2,59 | 5,99 | 319 | 573 | 26,1 | 14,0 |
| ■ | 523/2 | 2,71 | 5,97 | 305 | 552 | 19,5 | 13,6 |
| ■ | 523/3 | 2,7 | 5,95 | 294 | 516 | 16,8 | 12,9 |

K přetržení vzorků došlo v oblasti uhlíkové oceli P265GH mimo TOO, jak je patrné na obr. 20. Důvodem je nižší tažnost a mez pevnosti v tahu u ZM uhlíkové oceli ($R_m = 480$ MPa, $A_5 = 35,2$ %) než u korozivzdorné austenitické oceli 1.4541, jak je uváděno v tabulce 6. v kapitole 3.1.2.



Obr. 20. Příčná zkouška tahem (vlevo materiál 1.4541, vpravo P265GH)

4.2 Nedestruktivní testování

Na předložených trubkách, byly před odběrem vzorků provedeny nedestruktivní zkoušky. Důvodem provedení zkoušek bylo odhalení možných vad během výroby a svařování trubek, které by mohli ovlivnit výsledky zkoušky koroze pod napětím. Vizuální kontrolou (VT), kapilární zkouškou (PT) a radiografickou kontrolou (RT) byli zjištěny některé referenční vady dle EN ISO 6520-1, které uvádí tabulka 11. U trubek svařovaných metodou 521 se jednalo především o dutiny (200), neprůvary (402), neúplné vyplnění svarů (511), souvislý a nesouvislý zápal (5011, 5012). V případě trubek svařovaných 141 se jednalo nejčastěji o neprovařený kořen (4021), vady tvaru, dutinu, vady odtavení a závaru. Tyto vady mohou být a nemusí být obsaženy v odebraném vzorku, jelikož nebyl dodržen správný postup pro označení vady na vzorku. Z tohoto důvodu je pravděpodobné, že některé z těchto vad se mohou objevit i v odebraných vzorcích a mít vliv na celkové hodnocení výsledků (jak tomu je např. u vzorku 523/1 A).

Tabulka 11. Referenční vady dle EN ISO 6520-1 při nedestruktivním testování dodaných trubek svařované metodou 521

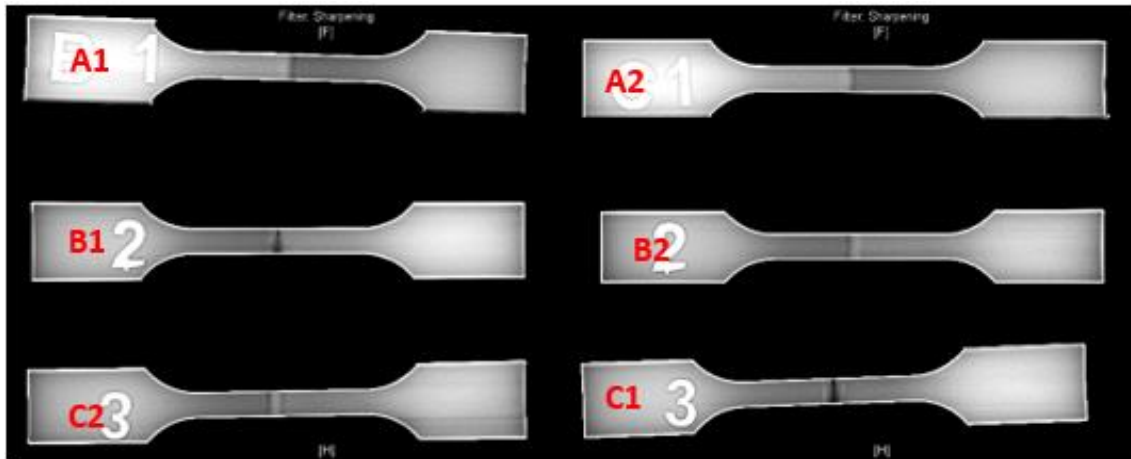
| Označení trubky | VT (ČSN EN ISO 17637) | PT (ČSN EN ISO 3452-1) | RT (ČSN EN ISO 10675-1) |
|-----------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 523/1 | 200 | 200 | 402, 511 |
| 523/2 | 511 | bez indikací | 402, 511, 5012, 5011 |
| 523/3 | 511 | bez indikací | 402, 511, 5012, 5011 |

Tabulka 12. Referenční vady dle EN ISO 6520-1 při nedestruktivním testování dodaných trubek svařované metodou 141. (P-výskyt v oblasti krycí vrstvy svaru, K-výskyt v oblasti kořene svaru)

| označení trubky | VT (ČSN EN ISO 17637) | PT (ČSN EN ISO 3452-1) | RT (ČSN EN ISO 10675-1) |
|--------------------|--------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 34 | 505, 517, 2017 (P) | bez indikací | bez indikací |
| 37 | 505,517,100, 2017 (P) 4021 (K) | bez indikací | 4021 |
| 38 | 5011,505 (P) | bez indikací | 4021 |
| 41 | 513, 2017 (P) | 2017 (P) | 2017 (K) |
| 42 | 505, 513, 2017 (P) | bez indikací | 4021 |

Výhodou radiografické prozařovací metody pro heterogenní svarové spoje je, že se řídí stejnými postupy jako pro zkoušení a kontroly homogenních svarových spojů. Z tohoto důvodu je ze všech základních NDT metod nejvýhodnější, a proto také byla zvolena v rámci experimentální části práce. Ultrazvukové zkoušení by bylo vlivem vysokého rozptylu ultrazvukových vln problematické a náročné. K analýze by bylo nutné vytvořit mapu anizotropie svaru, což by obnášelo vyhodnocení metalografie v jednotlivých řezech (destruktivní testování). Vzhledem k omezenému počtu testovaných trubek, by byl průběh experimentu zkomplikován.

Před samotným zahájením testování byly připravené a odebrané vzorky z trubek kontrolovány pomocí NDT RT kolmou technikou a snímky byly zaznamenávány pomocí digitálního detektoru (dle ČSN EN ISO 17636-2). Výhodou digitálního záznamu oproti radiografickým filmům je následná úprava a filtrace snímku. U vzorků B1 a C1 (svařováno metodou 521) byly na snímcích i vizuálně patrné neprůvary v kořenové části svaru. Jiné vnitřní vady objeveny nebyly. Na obr. 21. jsou snímky z prozařovací zkoušky, před upnutím vzorků (523) do přípravků.



Obr. 21. Snímek NDT RT vzorků 523 před zahájením testu

5 Testování koroze pod napětím

5.1 Předepnutí vzorků do přípravků

Před upnutím vzorků do přípravku, byly vzorky v místě svaru odmaštěny a vysušeny. Přípravek byl před korozním testováním opatřen voskovým nástřikem (ochranný nástřik dutin LIQUI-MOLY) a závity přípravku před samotným upevněním vzorku natřeny plastickým mazivem (mogulem), pro lepší ochranu a následné rozebrání přípravku.

Nejprve byl vzorek upevněn do přípravku bez zatížení. Na povrchu vzorku byly vyznačeny dvě rysky, které vyznačovali počáteční délku l_0 (zvolena 30 mm). Otáčením napínací matice bylo docíleno prodloužení (podélné deformaci) vzorku o $\Delta l = 1$ mm (pro vzorky 523) a tím vyvoláno zatížení. V případě druhé sady testovaných vzorků (svařovaných metodou 141) bylo prodloužení různé a požadavkem bylo vyvolat co největší napětí (uvedeno v tabulce 13.) Ze vzorce 5. a 6. bylo vypočteno poměrné prodloužení ε a následně z Hookova zákona (vzorec 7.) a deformační rovnice (vzorec 8.) velikost napětí v tahu σ_t a velikost síly F namáhající vzorek na tah (vztah 9.).

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (5)$$

$$\Delta l = l - l_0 \quad (6)$$

$$\sigma_t = E \cdot \varepsilon \quad (7)$$

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (8)$$

$$F = E \cdot \frac{l - l_0}{l_0} \cdot S \quad (9)$$

Kde l je konečná délka po prodloužení (31 mm), E je Youngův modul pružnosti materiálu v tahu (počítáno pro uhlíkovou ocel 210 MPa), S je plocha průřezu namáhající součást na tah (tloušťka vzorku 2,6 mm krát šířka vzorku v zúžené části 6 mm).

Ukázka výpočtu pro vzorky s označením 523:

$$[F] = 210 \cdot \frac{1}{30} \cdot (2,6 \cdot 6)$$

$$F = \underline{109,2 \text{ N}}$$

$$[\sigma_t] = \frac{109,2}{15,6}$$

$$\sigma_t = \underline{7 \text{ MPa}}$$

Velikost síly namáhající upnuté vzorky na tah byla v případě prvního testování (vzorky 523) 109,2 N a velikost napětí v tahu 7 MPa. Z výsledků z tahové zkoušky je patrné, že bychom se v případě vzorků 523, při zvoleném předepnutí měli pohybovat značně pod smluvní mezí kluzu $R_{p0,2}$. Předepnuté vzorky jsou na obr. 22 a 23. V tabulce 13. jsou uvedeny hodnoty prodloužení Δl , které byly naměřeny při co největším vyvolaném tahovém napětí.

Tabulka 13. prodloužení vzorků svařovaných metodou 141 a vypočtené tahové napětí

| vzorek | 34 A | 34 B | 37 A | 38 A | 38 B | 41 A | 41 B | 42 A | 42 B |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| prodloužení Δl [mm] | 2,9 | 2,5 | 2,2 | 2,6 | 2,5 | 2,5 | 1,8 | 2,5 | |
| vypočtené napětí v tahu σ_t [MPa] | 20,3 | 17,5 | 15,4 | 18,2 | 17,5 | 17,5 | 12,6 | 17,5 | |



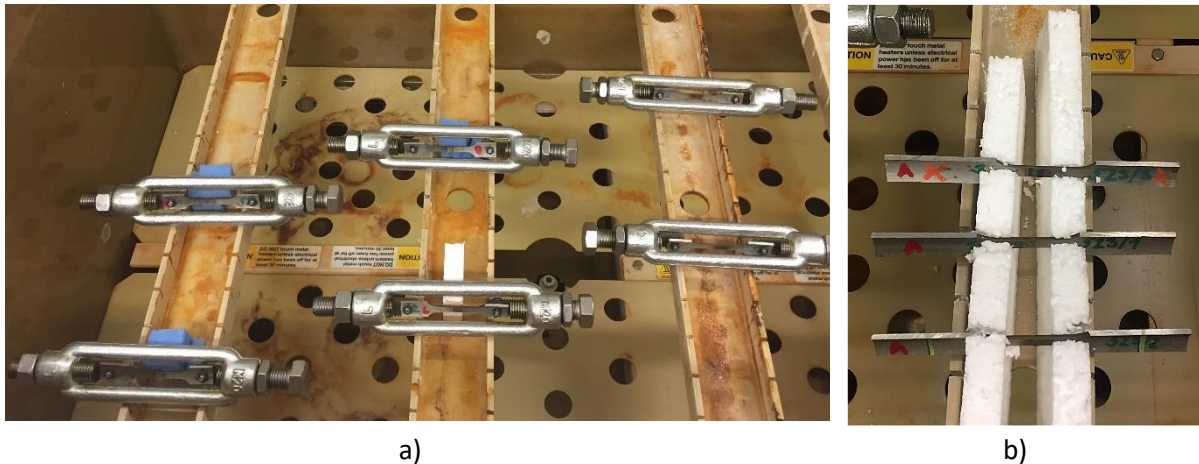
Obr. 22. Předepnuté vzorky 523 před umístěním do korozní komory



Obr. 23. Předepnuté vzorky 141 před umístěním do korozní komory

5.2 Korozní zkouška v solné mlze

Upnuté vzorky v přípravcích byly umístěny do korozní komory Q-FOG Clinic Corrosion Tester model CCT. Svarové spoje byly v komoře umisťovány horizontálně, a tak aby plocha vzorku byla orientována pod úhlem 45° ke dnu korozní komory. Umístění a orientace vzorků v komoře (vzorky s označením 523) je patrné na obr. 24. Vzorky svařované metodou 141 jsou uvedeny na obr. 50. v příloze C.



Obr. 24. Umístění předepnutých (a) a nezátížených vzorků (b) do korozní komory Q-FOG CCT

Vzorky byly vystaveny agresivnímu koroznímu prostředí solné mlhy vytvořené z roztoku $5 \pm 1\%$ NaCl. Parametry korozního testování odpovídaly normě ČSN EN ISO 9227: NSS a jsou uvedeny v následující tabulce 14. Během rozprašování solné mlhy nebylo testování přerušeno.

Tabulka 14. Parametry korozního testování v solné mlze

| test | čas testování [hodin] | teplota [°C] | pH [-] | koncentrace NaCl [g/l] | Spád solné mlhy na ploše 80 cm ² [ml/h] |
|--------------|-----------------------|--------------|--------|------------------------|--|
| vzorky 523 | 168 | 35 | 7,1 | 50 | 1,5 |
| Vzorky (141) | 235 | 35 | 7,0 | 50 | 1,5 |

Po doběhnutí testu byly vzorky z komory odebrány a očištěny ethanolem a vysušeny. Předepnuté vzorky byly opatrně uvolněny a vyjmuty z přípravků. Korozní komora byla vyčištěna pro další testování.

6 Vyhodnocení testu koroze pod napětím

6.1 Vizuální vyhodnocení

Po expozici v solné mlze byly na vzorcích i na přípravcích patrné korozní produkty na povrchu. Vyšší korozní odolnosti odolávala austenitická ocel, ostatně jak bylo předpokládáno. Značné korozní poškození bylo patrné na oceli uhlíkové i na přípravku (napínací matici), přestože byl chráněn zinkovou vrstvou a voskovým nástřikem. Korozní napadení na přípravcích a vzorcích je vidět na obr. 25 až 29. Detailnější snímky vzorků (obr. 51. až 53.) po expozici jsou uvedeny v příloze C. Během testování nedošlo k porušení celistvosti vzorků a nebyla identifikována viditelná trhлина. Kolem svarového kovu byly korozní produkty. Ve druhé etapě (testování vzorků svařovaných metodou 141) bylo náročnější odejmout vzorek z přípravku, jelikož šrouby (M5) držící vzorek v přípravku byly usmýknuté (viz obr. 30.).



Obr. 25. Předepnuté vzorky (523) v přípravcích po ukončení testu



Obr. 26. Vyjmuté vzorky 523 z přípravků po ukončení korozního testování



Obr. 27. Vzorky 523 bez předepnutí po ukončení korozního testování



Obr. 28. Vzorky svařované metodou 141 s aplikovaným předepnutím po ukončení korozního testování a odejmutí z přípravku



Obr. 29. Vzorky svařované metodou 141 s bez předepnutí po ukončení korozního testování



Obr. 30. Usmýknuté šrouby M5 pro uchycení vzorku do přípravku (po expozici)

6.2 Nedestruktivní testování

Vzorky po expozici byly podrobeny opět prozařovací zkoušce RT (ČSN EN ISO 17636-2), jako tomu bylo i před spuštěním testu, dle stejného postupu. Porovnáním snímků před a po korozním testování nebyly patrné žádné odlišnosti.

6.3 Metalografická analýza

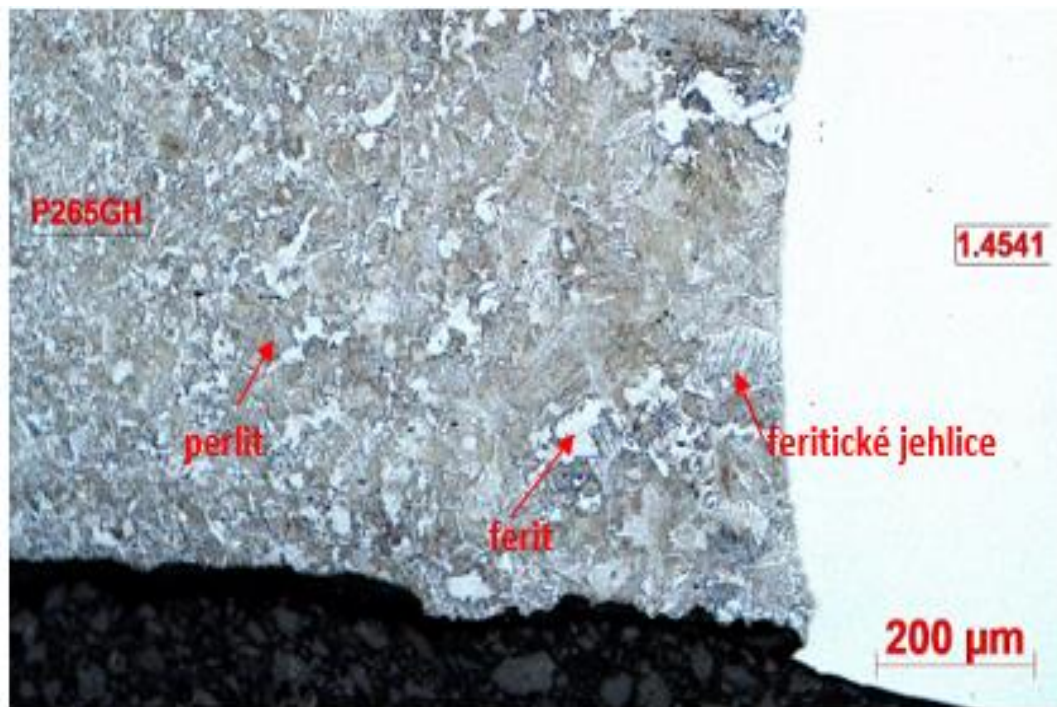
Pro přípravu metalografických výbrusů HSS, byly vzorky rozřezány na metalografické pile Struers Discotom-6. Vzorky byly zality hmotou MultiFast pomocí listu Struers-Citopress10. Při zalévání vzorku bylo nutno zajistit stabilitu vzorku pomocí fixačního c-kroužku, abychom zabránili naklopení vzorku. Broušení a leštění probíhalo na automatické brusce a leštičce Struers LaboForce-100. Z důvodu dvou odlišných materiálů bylo zvoleno dvoufázové leptání. Nejprve byla naleptána strana uhlíkové oceli P265GH pomocí leptadla 1% Nitalu. Nižší koncentrace leptadla byla zvolena z důvodu mikrotrhlin mezi vzorkem a zalévací hmotou, ve kterých by leptadlo mohlo vzlínat a ovlivnit pozorování. Po naleptání uhlíkové oceli byla pozorována mikrostruktura oceli pomocí světelného mikroskopu Zeiss Axio Vert.A1. Druhá fáze leptání byla zaměřena na zvýraznění struktury svarového kovu a austenitické oceli 1.4541, pro kterou bylo doporučeno leptadlo o složení 10 ml destilované H₂O, 10 ml HNO₃ a 10 ml HCl. Použití leptadla bylo časově omezené (30-40 min), jelikož docházelo k jeho degradaci.

Snímky mikrostruktury všech vzorků jsou nahrány na přiloženém CD. Ve vytištěné formě diplomové práce jsou uváděny jen některé z pořízených snímků. Snímky nejsou součástí příloh, vzhledem ke zhoršení kvality snímku tiskem.

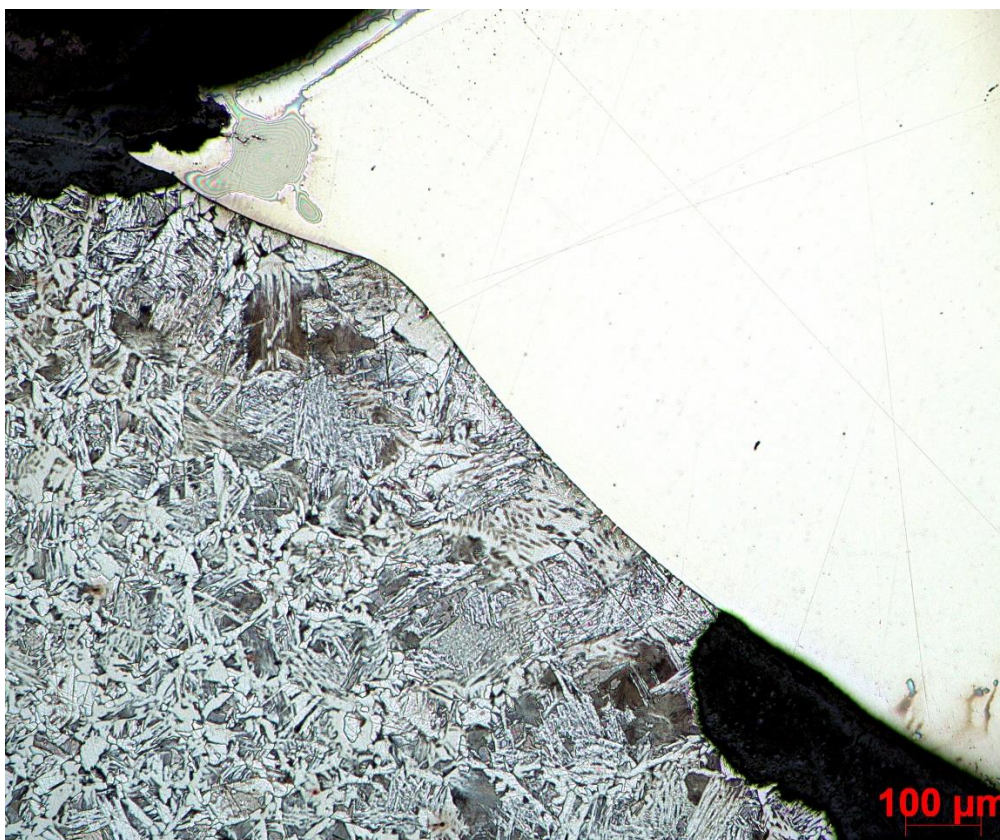
Ze strany základního materiálu P265GH byla pozorována válcovaná feriticko-perlitická struktura, která přecházela v tepelně ovlivněnou oblast svarového spoje (obr. 33., 35. a 37. při zvětšení 25x). Při větším zvětšení bylo viditelné zhrubnutí zrna v tepelně ovlivněné oblasti (směrem od ZM ke svarovému kovu) a patrná byla i Widmannstättenova struktura (feritické jehlice), které mohli vzniknout nejspíše rychlým přechlazením (obr. 31). Feritické jehlice byly podstatně výraznější u vzorků svařovaných metodou 141. (obr. 32). Tato struktura může být příčinou nežádoucí křehkosti.

U nezátíženého vzorku 523/1 A byla vidět dutina a s tím související korozní napadení ze strany uhlíkové oceli (obr. 33. a 34.). Na snímcích mikrostruktury z trubky 523/1, které byly pořízeny z jiných vzorků stejné trubky, nebyly dohledány žádné dutiny ani póry. Je tedy pravděpodobné, že odběr vzorku z trubky byl proveden z místa, kde byla indikována nedestruktivní zkouškou dutina (200), popřípadě se mohlo jednat o neúplné vyplnění svaru. U zatíženého vzorku 523/2 B2 byl po metalografickém výbrusu na světelném mikroskopu pozorován vrub u kořene svarového spoje ze strany uhlíkové oceli (obr. 36). Mohlo by se jednat o studený spoj nebo popřípadě o nerovnoměrné korozní napadení vlivem galvanického rozpouštění méně ušlechtilého kovu.

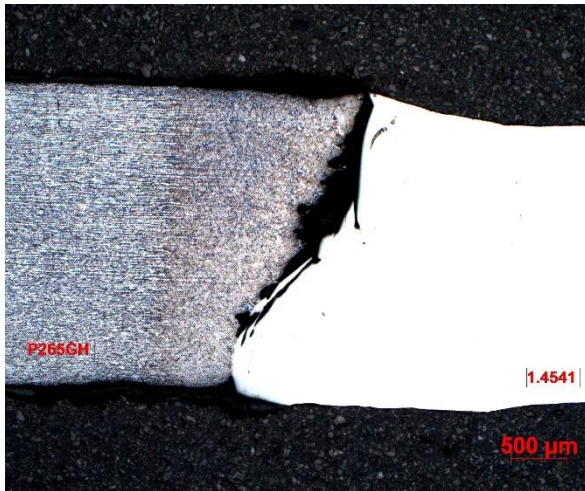
Obdobně tomu bylo i u vzorku svařovaných metodou 141. Délka přechodu v hrubozrnnou strukturu uhlíkové oceli byla např. u vzorku 34A cca 3,8 mm. Na úzké hranici linie ztavení ZM a svarového kovu převažovala spíše feritická struktura (jehlice). U vzorků byly pozorovány vruby v místě kořene svaru a u vzorků 34C, 37C, 38B, 38C byly patrné dutiny (obr. 32., 37.). Dutiny se objevovaly jak u zatížených vzorků, tak i u vzorků bez aplikovaného tahového napětí. Ze strany uhlíkové oceli P265GH byla na povrchu přítomna nerovnoměrná koroze.



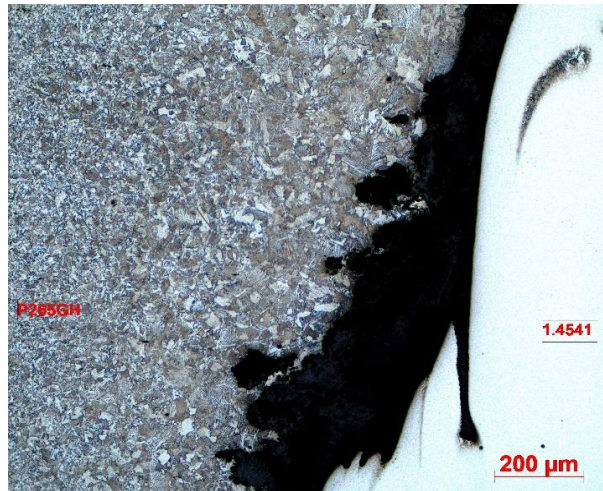
Obr. 31. Vzorek 523/3 C – zvětšeno 100x, feriticko-perlitická struktura materiálu P265GH, v TOO patrná Widmannstättenova struktura a zhrubnutí zrna, rovnoměrná koroze



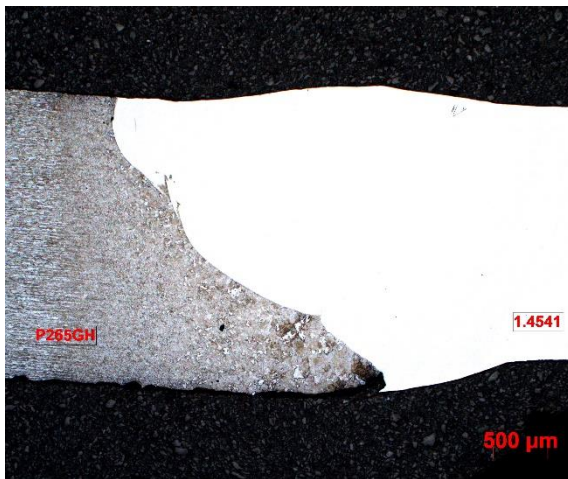
Obr. 32. Vzorek 37C, zvětšeno 100x, feriticko-perlitická struktura, feritické jehlice, zhrubnutí zrna, úbytek materiálu ve střední a vrchní části svarového spoje ze strany ZM P265GH



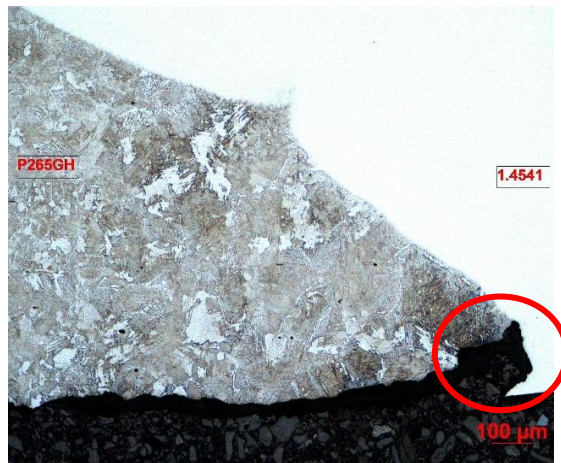
Obr. 33. Mikrostruktura vzorku 523/1 A-zvětšeno 25x, dutina a korozní napadení v TOO



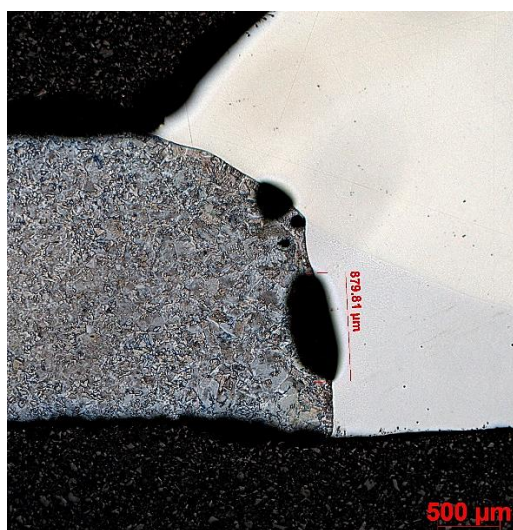
Obr. 34. Mikrostruktura vzorku 523/1 A-zvětšeno 100x



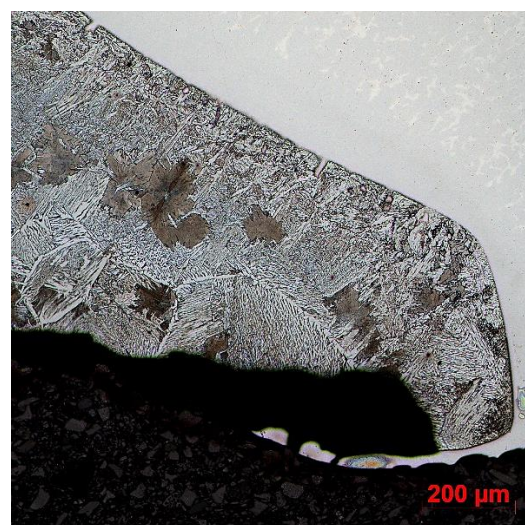
Obr. 35. Mikrostruktura vzorku 523/2 B2 – ze strany ZM P265GH, zvětšeno 25x



Obr. 36. Mikrostruktura vzorku 523/2 B2 –ze strany ZM P265GH, zvětšeno 100x



Obr. 37. Vzorek 38B, zvětšeno 25x, přechod v hrubozrnnou feriticko-perlitickou strukturu

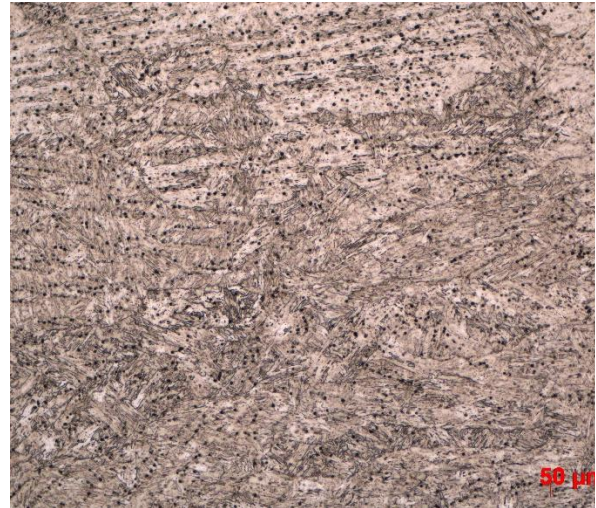


Obr. 38. Vzorek 34A, zvětšeno 100x, kořen svaru

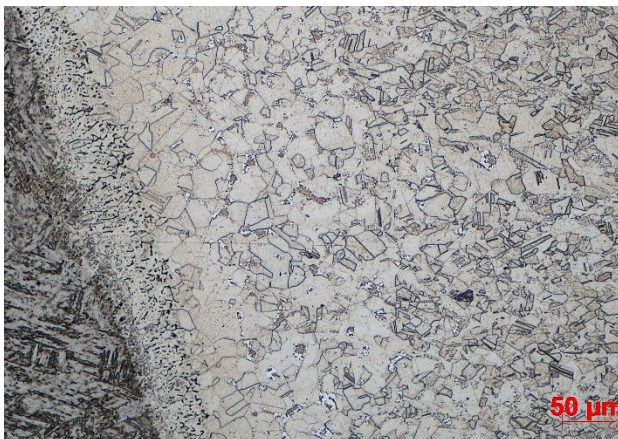
Naleptáním austenitické oceli byla zvýrazněna i struktura svarového kovu (promísení dvou ZM u vzorků 523). Na obr. 39 jsou ve svarovém kovu patrné póry a segregační pásma. Ve svarovém kovu byly pozorovány karbidy (u vzorků 523), které byly orientovány podélně přes svarový kov (obr. 40). Z pohledu materiálu 1.4541 byla pozorována austenitická struktura s občasnými vměstky. V TOO docházelo ke zhrubnutí austenitického zrna, dvojčatění a podél linie ztavení byly patrné komplexní karbidy po hranicích austenitických zrn, kde docházelo k difuzi uhlíku (obr. 41. až 43.). Tato místa by mohla být cestou vzniku mezikystalové koroze.



Obr. 39. Svarový kov vzorku 523/3 C – zvětšeno 25x, póry, segregační pásma



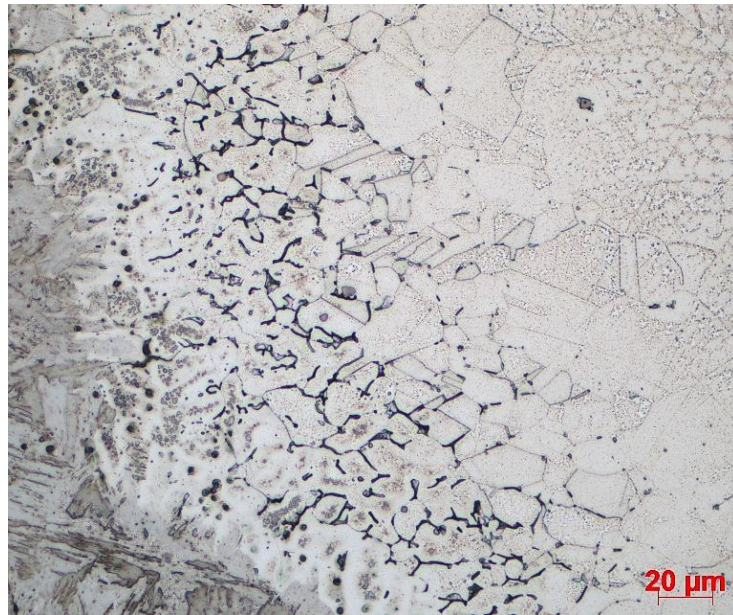
Obr. 40. Svarový kov vzorku 523/3 C2 – zvětšeno 100x,



Obr. 41. Mikrostruktura vzorku 523/3 C2-ze strany ZM 1.4541, zvětšeno 200x, TOO, zhrubnutí zrna

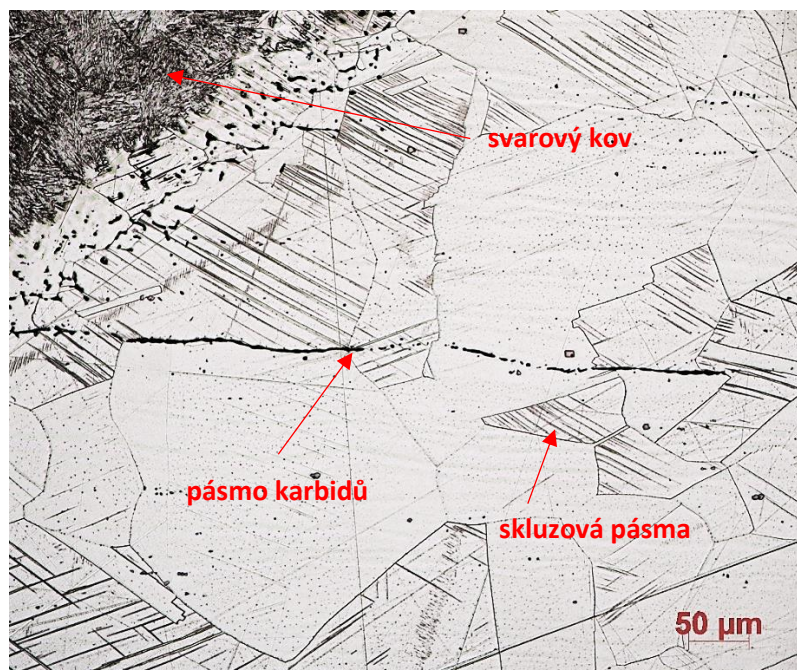


Obr. 42. Mikrostruktura vzorku 523/3 C1-ze strany ZM 1.4541, zvětšeno 200x, TOO, zhrubnutí zrna, dvojčatění, vměstky

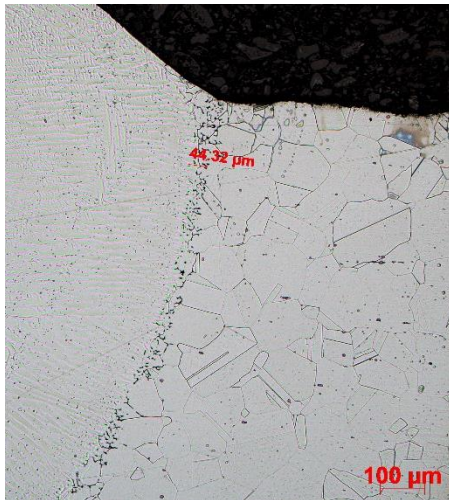


Obr. 43. Mikrostruktura vzorku 523/3 C2- ze strany ZM 1.4541, zvětšeno 500x, komplexní karbidy

U vzorků svařovaných metodou 141 bylo pásmo karbidů vznikajících podél linie ztavení užší (obr. 45). Širší naopak byla oblast přechodu z jemnozrné struktury austenitu na hrubozrnnou (obr. 46). Výraznější oblast karbidů byla patrná u kořene svaru. U vzorku 42B byl pozorován pás, který přecházel přes hranice austenitického zrna (délka 584 μm), patrné na obr. 44. Další pozorovanou odlišností u vzorku 42B byla výraznější dvojačatová skluzová pásma, která vznikla vlivem deformace.



Obr. 44. Vzorek 42B, zvětšeno 100x, pásmo karbidů, skluzová pásma (dislokace)



Obr. 45. Vzorek 37C, zvětšeno 100x, karbidy v okolí linie ztavení

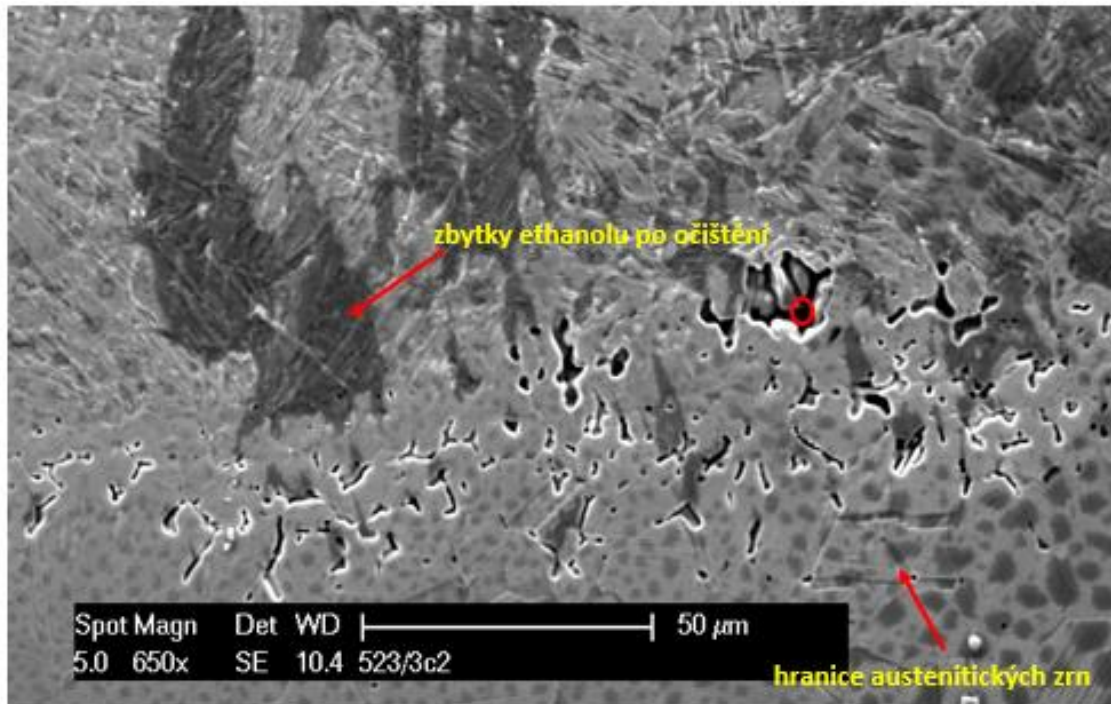


Obr. 46. vzorek 37C, zvětšeno 25x, přechod jemnozrnné oblasti v hrubozrnnou (ze strany ocelu 1.4541)

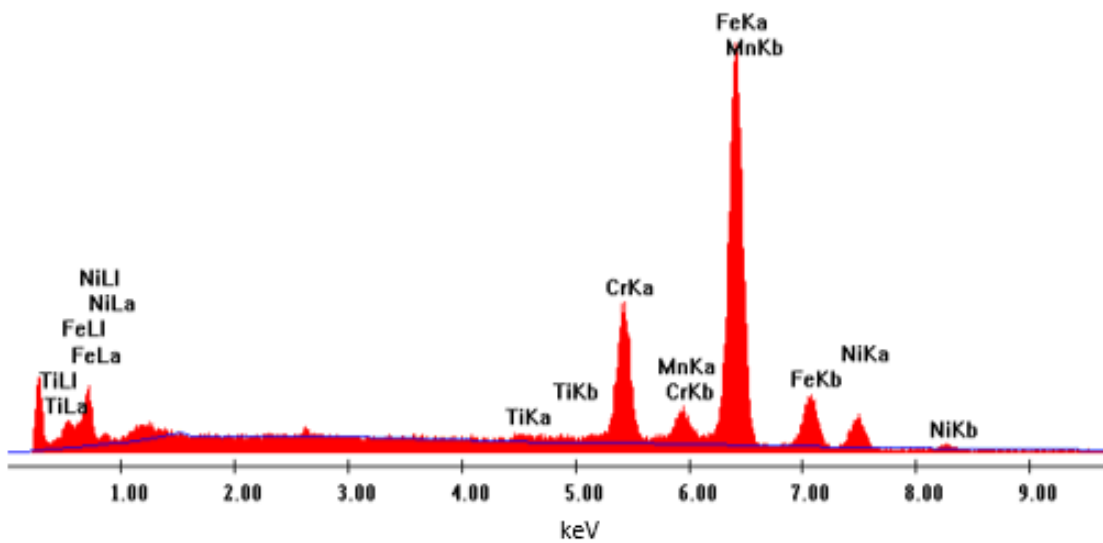
Pro detailnější analýzu karbidů v jednotlivých částech metalografických výbrusů byl použit řádkovací elektronový mikroskop. Na obr. 47 jsou při větším zvětšení (650x) patrné hranice austenitických zrn a částice karbidů (ze strany mat. 1.4541). Vlivem špatného očištění vzorku jsou na obr. přítomny zbytky ethanolu (tmavé fleky). Na obr. 48 je znázorněno energetické spektrum EDX analýzy z oblasti na vyznačené kroužkem na obr.47. Do hodnocení chemického složení nebyl promítnut uhlík, jelikož jeho přesné hodnoty nelze touto metodou změřit a nepříznivě ovlivňuje zastoupení jiných prvků, avšak s jeho přítomností je počítáno. Chemické složení této oblasti je uvedeno v tabulce 15, ze které vyplývá, že se jedná především o karbidy železa a chromu v případě vzorků svařovaných metodou 521.

Tabulka 15. Chemické složení sledovaného místa vzorku 523/3 C2

| chem. prvek | Ti | Cr | Mn | Fe | Ni |
|-------------------------|------|-------|------|-------|------|
| hmotnostní procento hm% | 0,99 | 15,56 | 3,14 | 71,40 | 8,91 |



Obr. 47. vzorek 523/3 C2 zobrazen pomocí SEM, patrné komplexní karbidy



Obr. 48. EDX analýza chemického složení z místa označeného červenou šipkou z obr. 47

Diskuse

Prioritou experimentální části diplomové práce bylo navrhnout přípravek pro testování koroze pod napětím a následně jej využít pro testování předložených trubek obsahujících heterogenní svarové spoje. Podnětem k testování HSS jsou události řešené na JE Temelín, kde došlo k poškození HSS na potrubních trasách PG vlivem SCC (viz kapitola 1.5). V praxi se běžně k testování SCC využívá zařízení, která jsou přímo navržena pro toto testování a je možné v rámci měření sledovat a nastavovat různé parametry. Např. zatížení vzorku, čas do poškození, změna teploty, simulace konstantního napětí, cyklickou únavu aj. Nevýhodou je, že zařízení pojme pouze jeden vzorek (specifického tvaru) a z hlediska kvantity testovaných vzorků by bylo měření časově náročné. Bohužel laboratoře na FST KMM ZČU tímto zařízením nedisponují, proto bylo požadavkem navrhnout přípravek k testování SCC v laboratorních podmínkách. Předlohou pro sestavení přípravku byla norma ASTM G49, kde rám pro usazení vzorku je obdobný jako závitová matice, která byla použita v našem případě (obr. 19.). Značnou výhodou je dostupnost napínacích matic, cena, velikost, manipulovatelnost, a především se jedná se o unifikovaný díl. Přípravkem (kapitola 3.4), do kterého je upevněn sledovaný vzorek, je pootáčeno po závitové tyči a tím docíleno tahové napětí na vzorku, aniž by došlo ke zkroucení vzorku. Následně je přípravek s upnutým vzorkem umístěn do korozní komory a vystaven agresivnímu koroznímu prostředí (dle normy ČSN EN ISO 9227: NSS). Přípravků do korozní komory může být umístěno více a tím je možné testovat více vzorků najednou. Během testu nelze však sledovat parametry, jako je tomu u zařízení pro tento účel navržený. Jediným možným sledovaným parametrem je velikost prodloužení při upínání vzorku. Vzhledem k malému prostoru mezi vzorkem a napínací maticí nebylo možné umístit tenzometry a sledovat tak kritické hodnoty tahového napětí během korozního testování. Šrouby M5 pro uchycení vzorků a závitové tyče jsou z nerezové oceli. Závitová matice, přestože byla galvanicky zinkována a opatřena voskovým nástřikem, byla po ukončení korozního testu značně napadena korozními produkty (na snížení tahového napětí by korozní napadení nemělo mít vliv, vzhledem k tloušťce materiálu přípravku). Vzorky (ve formě trubek) byly dodány od zadavatele projektu. Jednalo se o trubky materiálu chromniklové austenitické oceli 1.4541 a uhlíkové feriticko-perlitické oceli P265GH svařovaných metodami 141 a 523 (dle EN ISO 4063). Při svařování metodou 141 byly aplikovány přídavné materiály SV-07CH25N13 (GOST 2246-70), SV-10CH16N25AM6 (GOST-2246-70), 2.4648 (Wr.Nr.), 316LSi (dle AWS 5.9) a NiCrMo3 (dle AWS 5.9). Tyto materiály jsou schválenými materiálovými ekvivalenty pro použití na JE dle NTD A.S.I. sekce II. Před odběrem vzorků

z trubek byly provedeny NDT VT, RT a PT (tabulka 11. a 12.). Na předložených trubkách byly identifikovány neprůvary, póry, neúplně výplně svarů a neprovařený kořen. Z hlediska vyhodnocení se jednalo o nepřípustné vady a celkové výsledky kontroly s ohledem na požadovaný stupeň přípustnosti byly nevyhovující. Z tohoto důvodu výsledky z hodnocení testu koroze pod napětím nemají vypovídající hodnotu o kvalitě svaru a nelze zcela jednoznačně rozhodnout, jaká metoda svařování (nebo volba PM), by byla odolnější vůči vzniku SCC. V rámci experimentu pro ověření a nastavení přípravku byly trubky dostačující. Z trubek byly vyříznuty vzorky tvaru podobného tahové zkoušce, avšak rozměry vzorku byly upraveny, aby bylo možné umístit vzorky do přípravků. Šířka vzorku v místě svaru byla zvolena 6 mm, aby plocha k vyhodnocování korozního napadení byla optimální. Dále bylo nutné počítat s úběrem materiálu při přípravě metalografického výbrusu. Při takto zvolené šířce je zapotřebí pro vyvolání tahového napětí pomocí napínací matice vyvinout velkou sílu při otáčení matice. U vzorku svařovaných metodou 521 bylo aplikované tahové zatížení (7MPa) velmi malé a pohybují se značně pod mezí kluzu (dle tahové zkoušky pro vzorky 523). Po ukončení testu nebyly pozorovány žádné trhliny ani jiné změny související s SCC. U druhé sady předložených vzorků svařovaných metodou 141 bylo cílem vyvolat vyššího tahového napětí a vyvolat kritické podmínky pro vznik SCC. Ve druhém případě, kdy nejvyšší aplikované zatížení u vzorků 34A bylo 20,3 MPa a doba testování byla prodloužena na 235 hodin, nedošlo k iniciaci trhliny. Jediná změna byla u vzorku 42B (zatížení 17,5 MPa), kde byla metalografickou analýzou pozorována dvojčatová skluzová deformační pásma ze strany chrominiklové oceli 1.4541 v blízkosti linie ztavení. Tato pásma by dle kapitoly 1.5. 1 a grafu 1. mohla být primární inkubační fází, která vede k rozvoji SCC. Tyto pásma mohla být ovšem také zapříčiněna vyšší přitlačnou silou při broušení a leštění vzorku. K objasnění by bylo nutné tento vzorek podrobit dalšímu zkoumání.

Při metalografické analýze byla pozorována ze strany materiálu P265GH feriticko-perlitická struktura materiálu P265GH, v TOO patrná Widmannstättenova struktura a zhrubnutí zrna v TOO. Důsledkem galvanické koroze se na povrchu uhlíkové oceli se vyskytovala nerovnoměrná koroze a ostré přechody by mohly vést k iniciaci trhliny. U nezatíženého vzorku 523/1 A byla vidět dutina a s tím související korozní napadení ze strany uhlíkové oceli. Na vzorku 523/2 B byl v kořeni svaru patrný studený spoj, který by mohl být iniciátorem trhliny. U vzorků svařovaných metodou 141 byly taktéž patrné dutiny a nerovnoměrná koroze. Ze strany chrominiklové oceli byla pozorována austenitická struktura s občasnými vměstkami. V TOO docházelo ke zhrubnutí austenitického zrna, dvojčatění a podél linie ztavení byly patrné

komplexní karbidy po hranicích austenitických zrn, kde docházelo k difuzi uhlíku. Pomocí EDX analýzy bylo zjištěno, že se jedná o komplexní karbidy železa a chromu (u vzorků 523). U vzorků svařovaných metodou 141 bylo pásmo karbidů podél linie ztavení užší oproti vzorkům 523. Více karbidů bylo pozorováno převážně u kořene svarového spoje ze strany austenitické oceli. To mohlo být ovlivněno vyšším svařovacím proudem použitého pro svařování kořene.

Pro další postup testování by bylo nutné upravit rozměry testovaných vzorků, popřípadě vyvolat na vzorcích větší tahové napětí, aby hodnoty byly blíže k hodnotám meze kluzu. Ke sledování chování vzorků při simulaci SCC a pro získání více měřených parametrů by bylo vhodné použít zařízení, které je pro toto testování uzpůsobeno, např. proofring od společnosti Cormet.

Závěr

V teoretické části diplomové práce byla uvedena obecná problematika heterogenních svarových spojů a problematika spojovaná s poškozením HSS, řešená na potrubních trasách parogenerátoru JE Temelín. V teoretické části jsou popsány metody svařování, kterými byly svařovány dodané trubky pro experimentální část práce. V kapitole 2. je popsáno korozní testování a testování koroze pod napětím (SCC). Uvedené v předchozích expertízách jako hlavní příčina poškození nátrubků parogenerátoru v JE Temelín (kapitola 1.5). Cílem experimentální práce bylo testovat předložené trubky obsahující HSS v korozním prostředí pod jednoosým tahovým napětím v laboratorních podmínkách a ověřit citlivost HSS spojů k náchylnosti k SCC poškození. Pro testování byl navržen přípravek dle normy ASTM G49. Pomocí napínacích matic (kapitola 3.4) bylo na upnutých vzorcích aplikováno tahové zatížení. Korozní prostředí bylo simulováno korozní komorou dle normy ČSN EN ISO 9227: NSS. Předložené trubky byly ze základního materiálu uhlíkové oceli P265GH (ČSN EN 10028-2) a austenitické chromniklové oceli 1.4541 (Wr. N.), svařovány metodami 141 a 521 (dle EN ISO 4063). Dle NDT kontroly celých trubek obsahovaly HSS nepřijatelné vady, které z hlediska vyhodnocování a ověřování náchylnosti k SCC mají zásadní vliv. Z tohoto důvodu nebylo možné rozhodnout, jaká metoda svařování a popřípadě jaký přídavný materiál je odolnější vůči aplikovanému zatížení v korozním prostředí. Pro nastavení přípravku navrhované metody testování byly vzorky dostačující. Do přípravku bylo nutné trubky rozřezat a připravit požadovaný tvar vzorků tak, aby byly vzorky umístitelné do přípravku. Šířka vzorků byla v obou případech testování (testování vzorků 523 a 141) zvolena 6 mm a maximální tahové zatížení bylo vyvoláno u vzorku 141R/34A (20,3 MPa). Tato hodnota napětí je značně pod mezí kluzu materiálu. Po testování byly provedeny nedestruktivní prozařovací zkoušky a metalografie. Z vyhodnocení nebylo prokázáno, že by došlo k trhlinám. Ze strany uhlíkové oceli byly přítomny dutiny, vruby a nerovnoměrná koroze vlivem galvanického rozpouštění méně ušlechtilějšího kovu. Ze strany materiálu 1.4541 byla pozorována podél linie ztavení pásma karbidů, která v případě vzorků svařovaných metodou 141 byla užší (mimo kořen svaru, kde byla oblast výraznější). V okolí TOO docházelo ke zhrubnutí zrn. U vzorku 42B byla pozorována skluzová pásma, která mohou být spojována s inkubačním obdobím vývoje SCC poškození. Obsažené vady (póry, dutiny, vměstky), hrubozrnná struktura, feritické jehlice jsou zdrojem vnitřního napětí materiálu a potenciálním rizikem pro vyvolání koroze pod napětím.

K ověření navrhovaného přípravku a metody testování by bylo vhodné testovat vzorky s jinými rozměry tak, aby bylo možné otočením matice nasimulovat větší tahové zatížení. Pro ověření metody svařování testovat vzorky bez nepřijatelných vad. K získání více měřených parametrů je vhodné použít přístroj pro testování koroze pod napětím, popřípadě použít kombinaci trhačského zařízení a korozní cely, ve které by bylo simulováno agresivní korozní prostředí.

Použitá literatura

- [1] KUČERA, J.: *Teorie svařování I / II. Skriptum* VŠB TU Ostrava, Ostrava 1994
- [2] Kolektiv autorů, František Ing. KRISTOFORY, CSc., Václav Prof. Ing. PILOUS, DrSc a Vladislav Ing. OCHODEK. *Materiály a jejich svařitelnost: Učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava, 1999. ISBN 80-85771-63-2.
- [3] KOVAŘÍK, Rudolf a František ČERNÝ. *Technologie svařování*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-708-2697-5.
- [4] PILOUS, Václav a Karel STRÁNSKÝ. *Strukturní stálost návarů a svarových spojů v energetickém strojírenství*. Praha: Academia, 1989. Studie ČSAV, 1989, č. 7. ISBN 80-200-0007-0.
- [5] ING. DUCHÁČEK IWE, Petr, Michal ING. JUNEK a Jiří DOC.ING. JANOVEC CSC. *Připojovací heterogenní svarové spoje parogenerátorů (22K - 08CH18N10T)* [online]. 9.12.219 [cit. 2020-03-27]. Dostupné z:
- [6] WEISS, Lauren, Julien ZOLLINGER a Pierre SALLAMAND. *Proceedings of the 13th World Conference on Titanium: Microstructure and property of titanium heterogeneous laser welding* [online]. TMS. Canada: John Wiley, 2016 [cit. 2020-03-27]. ISBN 978-1-119-29366-8. Dostupné z:
<https://books.google.cz/books?id=5swVDAAAQBAJ&pg=PA317&lpg=PA317&dq=heterogeneous+weld+in+aviation&source=bl&ots=jwli9PrTXz&sig=ACfU3U17PS7Im7j8GV5gms8vpCjAcATgHg&hl=cs&sa=X&ved=2ahUKEwitwOeJxMnnAhUHiFwKHTgQBnMQ6AEwDnoECAcQAQ#v=onepage&q=heterogeneous%20weld%20in%20aviation&f=false>
- [7] HAGSHENAS, M. a A.P. GERLICH. *Engineering Science and Technology, an International Journal: Joining of automotive sheet materials by friction-based welding methods: A review* [online]. 2018, , 130-148 [cit. 2020-03-27]. ISSN 2215-0986. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215098617314921>
- [8] Princip jaderné elektrárny. In: *Cez.cz* [online]. [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: https://www.cez.cz/eede/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/princip_2.html
- [9] BYSTRIANSKÝ, J.; LEVÝ, M.; ŠEFL, V.: *Alternativní poškozující děj heterogenních svarových spojů ve vodném prostředí. Pracovní protokol – průběžná zpráva pro zpracování dílčího cíle TA 02011179V010*, pracoviště VŠCHT Praha za rok 2016
- [10] DUCHÁČEK, P.: *Heterogenní svarové spoje nových žárovevných ocelí pro vysokoparametrické elektrárny. [Diplomová práce], FS ČVUT v Praze, 2013*
- [11] KUNCIPÁL J. et al.: *Teorie svařování*, SNTL, Praha, 1986, 272 s.
- [12] HAJDÍK, Jiří. *ROZSAH POŠKOZENÍ HETEROGENNÍCH SVAROVÝCH SPOJŮ NA PG 4.RB*. In: Pracovní seminář PG ETE a EDU, ETE – AB 257. 2018

- [13] VOZÁBAL, Jaroslav. *Akční plán na snížení degradačních mechanismů PG*. In: Příčiny poškození heterogenních svarových spojů na PG VVER 1000MW a VVER 440MW. 2018
- [14] Svařování TIG-seznámení. In: *Svarecky-elektrody.cz* [online]. [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: <https://www.svarecky-elektrody.cz/svarovani-tig-zakladni-seznameni/t-39/t-120>
- [15] *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-857-7181-0.
- [16] HRIVŇÁK, Ivan. *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*. V Bratislave: Slovenská technická univerzita, 2009. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-3167-6
- [17] Prodej a rozvoz výčepních a technických plynů. In: *Bomby.cz* [online]. Praha [cit. 2019-11-27]. Dostupné z: <https://bomby.cz/>
- [18] ING. KOŘÁN, Pavel. *Seriál na téma lasery: Hlavní typy laserů používaných v průmyslu* [online]. 19.2. 2013 [cit. 2019-11-27]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
- [19] VALENTIN BÎRDEANU, Aurel, Cristian CIUCĂ a Alexandru PUICEA. *Pulsed LASER-(micro)TIG hybrid welding: Process characteristics* [online]. 2012, 890-902 [cit. 2019-11-27]. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013611003463>
- [20] LASERTHERM S.R.O. *Laserové svařování* [online]. 2019 [cit. 2019-11-27]. Dostupné z: <http://www.lasertherm.cz/technologie/laserove-technologie/laserove-svarovani>
- [21] RNDR. KUSALA, Jaroslav. *Součást vzdělávacího programu SVĚT ENERGIE: Jak funguje laser-princip laseru* [online]. 2004 [cit. 2019-11-27]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k22.htm>
- [22] ING. KOŘÁN, Pavel. *Seriál na téma lasery: Laserové svařování (Laser welding)* [online]. 18.2. 2013 [cit. 2019-11-27]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery--laserove-svarovani-i-laser-welding-134>
- [23] TURŇA, Milan a Pavel KOVAČÓCY. *Zváranie laserovým lúčom*. V Bratislave: Vydavateľstvo STU, 2003. Edícia monografií. ISBN 80-227-1921-8
- [24] TONAROVÁ, Dana, Petr BRABEC, Jaroslav BURDA a Miroslava ERNESTOVÁ. *Hodnocení heterogenního svarového spoje odebraného z nátrubků PG HVB2*. ÚJV Řež, a. s., 2016.
- [25] ING. NOREK, Pavel, Pavel ING. MATĚJKA, Tomáš ING. ONDRUŠ a Miroslav ING. KIBUS. *ITS108 Systémový provozní předpis: provozní předpis pro parogenerátor a související systém*. ČEZ jaderná elektrárna Temelín.
- [26] *Parogenerátor* [online]. In: . Copyright Simopt, 1999 [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/parogenerator.html>

- [27] DUCHÁČEK, P.: *Experimentální program na odřezaném vzorku s vadou z heterogenního svarového spoje č. 305 na nátrubku N5 potrubní trasy 2RY31Z01 na 2.HVB. [Zpráva ČEZ SK zvláštní procesy a TK strojní JE], Temelín, září 2016.*
- [28] DOLEŽAL, Jaroslav. *Jaderné a klasické elektrárny* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011 [cit. 2019-11-24]. ISBN 978-80-01-04936-5.
- [29] ING. JUNEK, PH.D., Lubomír. *Závěrečná zpráva k experimentálnímu programu na vybraných heterogenních svarových spojích z nátrubků N5 a N6 parogenerátoru na 2. HVB. Ústav aplikované mechaniky Brno, s.r.o., 2017.*
- [30] BYSTRIANSKÝ, Jaroslav. *Posouzení podmínek, ovlivňujících životnost ocelí v heterogenních svarových spojích v různých pozicích sekundárního okruhu. In: Příčiny poškození heterogenních svarových spojů na PG VVER 1000MW a VVER 440MW. 2018.*
- [31] *Příloha č.1, Experimentální program na vybraných vyjmutých heterogenních svarových spojích z nátrubků N5 a N6 parogenerátorů na 2.HVB. Ústav aplikované mechaniky Brno, s.r.o., ČEZ.*
- [32] TONAROVÁ, D., J. BURDA a M. ERNESTOÁ. *Hodnocení příčiny poškození HSS na nátrubcích N5 a N6 PG (2.HVB). ÚJV Řež, a. s. Řež, 2017.*
- [33] DOC. ING. JANOVEC, CSC, Jiří. *Analýza heterogenních svarových svarů nátrubků N5.2, N6.1 a N6.2 parogenerátoru 2. HVB ETE: TECHNICKÁ ZPRÁVA č. 12-17. Strojní fakulta ČVUT v Praze, 2017.*
- [34] ZHANG, Hongyan a Jacek SENKARA. *Resistance welding: fundamentals and applications*. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, c2012. ISBN 978-143-9853-719.
- [35] DAVIS, J. R. a Jacek SENKARA. *Corrosion of weldments: fundamentals and applications*. 2nd ed. Materials Park, OH: ASM International, c2006. ISBN 978-0-87170-841-0.
- [36] GERHARDUS H. KOCH. *Tests for Stress-Corrosion* [online]. Dublin, Ohio: CC Technologies, 2001 [cit. 2019-12-13]. Dostupné z: <https://www.asminternational.org/documents/10192/1755223/amp15908p036.pdf/026e7c61-4606-424e-9ade-3455865aba71>
- [37] ROBERTS, J. T. A. Metallurgical improvements for enhanced stress corrosion performance of light water reactor structural materials. In: *Journal of Materials for Energy Systems* [online]. 1982, 4(3), s. 142-153 [cit. 2019-12-15]. DOI: 10.1007/BF02833406. ISSN 0162-9719. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/BF02833406>
- [38] NOVÁK, P. *Koroze a ochrana materiálu: Druhy koroze kovů* [online]. Ústav kovových materiálů a korozního inženýrství VŠCHT Praha, 2005 [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/KPU/koroze%20druhy%20vscht.PDF
- [39] CHATZIDAKIS, STYLIANOS & JARRELL, J & SCAGLIONE, JOHN. *High-resolution Ultrasound Imaging Using Model-Based Iterative Reconstruction for Canister Degradation Detection*. [online]. 2017 [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/317703277_Highresolution_Ultrasound_Imaging_Using_ModelBased_Iterative_Reconstruction_for_Canister_Degradation_Detection

- [40] F., O. a M. MATTAR. Stress Corrosion Cracking. In: *Developments in Corrosion Protection* [online]. InTech, 2014, 2014-02-20 [cit. 2019-12-13]. DOI: 10.5772/57349. ISBN 978-953-51-1223-5. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/developments-in-corrosion-protection/stress-corrosion-cracking>
- [41] NOVÁK, Pavel. *Koroze kovů* [online]. Ústav kovových materiálů a korozního inženýrství, Fakulta chemické technologie Vysoká škola chemicko-technologická v Praze [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: <https://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Koroze%20kov%C5%AF.pdf?redirected>
- [42] Charakteristika korozivzdorných materiálů a základní informace o použití, zpracování, svařování a možné korozi. In: *Italinox* [online]. [cit.2019-12-15]. Dostupné z: <https://www.italinox.cz/plechy/charakteristika-materialu/strana-3>
- [43] ČÍHAL, Vladimír. *Mezikrystalová koroze ocelí a slitin*. 3., přeprac. a dopl. vyd. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1984.
- [44] MALENÍK, K. a J. BYSTRIANSKÝ. *Korozní problémy energetického strojírenství: Vliv molybdenu na odolnost korozivzdorných ocelí k lokálnímu porušení* [online]. 1989 [cit. 2019-12-15]. Dostupné z: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/22/088/22088527.pdf
- [45] SAMEK, Petr. *Korozní odolnost heterogenních svarů na jaderných elektrárnách* [online]. Plzeň, 2018 [cit.2020-03-27]. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/31617/1/SAMEK_DP.pdf. Diplomová práce. FST ZČU. Vedoucí práce Ing. Chocholatý Ondřej, Ph.D.
- [46] ČSN EN ISO 9227. *Korozní zkoušky v umělých atmosférách: Zkoušky solnou mlhou*. Český normalizační institut, 2007.
- [47] BRANDI N. CLARK, ROSS RENTZ, J. DAVID MCCOLSKEY a JEFFREY W. SOWARDS. *Using Digital Image Correlation to Improve Stress-Corrosion Cracking Evaluation by NACE TM0177-B**. Houston: NACE International., 2017.
- [48] Research & Development: Stress Corrosion Crack. In: *Daihananchorchain.com* [online]. 2019 [cit. 2019-12-16]. Dostupné z: <http://www.daihananchorchain.com/chain-research-development.html>
- [49] NACE TM0177 – Sour test metod. In: *Twi-global.com: Job Knowledge 149* [online]. TWI, 2020 [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/nace-tm0177-sour-test-methods-149>
- [50] WWER-1000 Steam generator integrity: A publication of the extrarudgerary programme on the safety of WWER and RRMK nuclear power plants [online]. Vídeň: IAEA, 1997 [cit. 2020-05-06]. ISSN 1025-2762. Dostupné z: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/30/011/30011319.pdf
- [51] Equivalent grades of steel X6CrNiTi18-10 (1.4541): X6CrNiTi18-10 (1.4541). In: European Steel and Alloy Grades / Numbers Searchable Database [online]. 2011-2019 [cit. 2019-12-02]. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=102

- [52] Worldwide equivalents of grade St45.8 (Germany: DIN, WNr). In: European Steel and Alloy Grades / Numbers Searchable Database [online]. 2011-2019 [cit. 2019-12-03]. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/equivalent_steel_iron_eu.php?zname_id=5364
- [53] Vlastnosti korozivzdorných ocelí [online]. Lucembursko: Euro Inox, 2002 [cit. 2019-12-03]. ISBN 2-87997-082-2. Dostupné z: http://www.cedinox.es/opencms901/export/sites/cedinox/.galleries/publicaciones-tecnicas/StainlessSteelProperties_CZ.pdf
- [54] DI GIANFRANCESCO, Augusto. Materials for ultra-supercritical and advanced ultra-supercritical power plants [online]. Amsterdam: Elsevier ; Woodhead Publishing, [2017] [cit. 2019-12-02]. ISBN 978-0-08-100552-1. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/schaeffler-diagram>
- [55] Charakteristika jednotlivých skupin korozivzdorných ocelí. In: Bohdan Bolzano, s.r.o. [online]. Kladno, 2019 [cit. 2019-12-03]. Dostupné z: <https://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/vyrobky-z-korozivzdornych-a-zaruvzdornych-oceli/vyrobky-z-oceli-korozivzdornych/charakteristika-skupin-korozivzdornych-oceli>
- [56] Protokol o vstupní kontrole 16TKT5554: Inspekční certifikát EN 10204. 3.7. ADW2. TÜV SÜD.
- [57] ING. FOJTA a ING. HERZÁNOVÁ. Specifikace materiálů parogenerátoru. ČEZ.ETE dokumentace. Vítkovice, 1982.
- [58] Normy technických dodacích předpisů (TDP): Ploché výrobky pro tlakové nádoby a zařízení z legovaných a nelegovaných ocelí pro vyšší teploty Technické dodací podmínky. In: Bohdan Bolzano, s.r.o. [online]. 2019 [cit. 2019-12-03]. Dostupné z: https://www.bolzano.cz/assets/files/TP/Ploche_vyrobky/MOP_EN10028-2TDP_4.pdf
- [59] Protokol o vstupní kontrole 16TKT5322: Inspekční certifikát EN 10204. 3.1.
- [60] Protokol o vstupní kontrole 16VKT6071: Inspekční certifikát EN 10204. 3.2.
- [61] Inspekční certifikát 3.2: protokol č. 17VKT6071. ČEZ.ETE dokumentace. Plzeň, 2011.
- [62] YONG-SANG KIM A JUNG-GU KIM. Influence of Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification on the Corrosion and Stress Corrosion Cracking Behavior of Welded Joint in District Heating Pipe. Suwon, Republic of Korea, 2017.
- [63] ASTM G49
- [64] Loading devices. In: <https://www.cormettestingsystems.com/> [online]. [cit. 2020-07-03]. Dostupné z: <https://www.cormettestingsystems.com/product/loading-devices/>
- [65] Schaeffler diagram - different base materials [online]. In: . 2020 [cit. 2020-07-05]. Dostupné z: <https://www.migal.co/english/service/welding-stainless-steels/schaeffler-diagram-with-different-base-materials/>
- [66] Zkušební zpráva: Certifikát EC25562039. ESAB. Vamberk, 2019.
- [67] Inspekční certifikát 3.1 a zkušební zpráva 2.2: Certifikát 856/2019. ESAB. Vamberk, 2019.
- [68] Přídavné materiály pro svařování nelegovaných a legovaných ocelí: obalené elektrody pro heterogenní spoje In: Böhler Uddeholm CZ s.r.o [online]. [cit. 2020-07-05]. Dostupné z: <https://www.industry-eu.cz/files/companies/845523.pdf>

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obr. 1. Tepelně ovlivněné oblasti (TOO) svarového spoje včetně části metastabilního diagramu Fe – Fe ₃ C (nelegovaná ocel 0,2 hm. % C), kde I. je oblast částečného natavení, II. přehřátí, III. normalizace, IV. částečná překrystalizace [11]..... | 16 |
| Obr. 2. Schéma metody TIG [14]..... | 17 |
| Obr. 3. Princip polštářování feritické oceli s austenitickou korozivzdornou ocelí, kde a) nanesení polštáře (housesek) na hranu feritické oceli, b) zarovnání polštáře, c) zhotovení výsledného svarového spojení [16]..... | 19 |
| Obr. 4. Vlevo: Schéma pevnolátkového laseru [18]; Vpravo: Mechanismy laserového svařování: a) povrchové; b) hloubkové svařování [22]..... | 20 |
| Obr. 5. Schéma JE (1. reaktor, 2. parogenerátor, 3. čerpadlo, 4. turbína, 5. generátor, 6. kondenzátor, 7. přívod a odvod chladicí vody) [8]..... | 21 |
| Obr. 6. Schéma horizontálního parogenerátoru a umístění nátrubků N5 a N6; upraveno z [28]..... | 23 |
| Obr. 7. Vlevo: únik provozního média na PG1 – HSS – nátrubku N5; vpravo: spodní část PG a uvedení potrubních tras vedených z N5 a N6. [29]..... | 24 |
| Obr. 8. Vady svarového spoje [32]..... | 25 |
| Obr. 9. Makrostruktura a mikrostruktura svarového kovu a svarového spoje nátrubku svařovaným PM Sv-10 [33]..... | 25 |
| Obr. 10. Vlevo: Korozní důlky na svarovém spoji; vpravo: interkrystalická dekoheze materiálu 22K [32]..... | 26 |
| Obr. 11. Vliv parametrů ke vzniku korozního praskání pod napětím SCC. [37]..... | 27 |
| Obr. 12. Princip metody testování SCC dle NACE TM0177.6 [48, 64]..... | 34 |
| Obr. 13. Schaefflerův diagram, A – austenit, M – martenzit, F – ferit [54]..... | 37 |
| Obr. 14. Dodané trubky svařované metodou 141..... | 40 |
| Obr. 15. Schéma postupu odběru vzorků pro experimentální část [upraveno z 62]..... | 41 |
| Obr. 16. Rozměry a tvar vzorku pro testování koroze pod napětím..... | 42 |
| Obr. 17. Příprava vzorků (svařované metodou 521) pro testování. vzorky jsou nezkrácené a bez otvorů pro uchycení..... | 43 |
| Obr. 18. Pružinový rám pro kalibraci napětí nebo pro SCC testování [63]..... | 44 |
| Obr. 19. Přípravek napínací matice pro vyvolání tahového napětí..... | 44 |
| Obr. 20. Příčná zkouška tahem (vlevo materiál 1.4541, vpravo P265GH)..... | 47 |
| Obr. 21. Snímek NDT RT vzorků 523 před zahájením testu..... | 49 |
| Obr. 22. Předepnuté vzorky 523 před umístěním do korozní komory..... | 51 |
| Obr. 23. Předepnuté vzorky 141 před umístěním do korozní komory..... | 51 |
| Obr. 24. Umístění předepnutých (a) a nezatížených vzorků (b) do korozní komory Q-FOG CCT..... | 52 |
| Obr. 25. Předepnuté vzorky (523) v přípravcích po ukončení testu..... | 53 |
| Obr. 26. Vyjmuté vzorky 523 z přípravků po ukončení korozního testování..... | 54 |
| Obr. 27. Vzorky 523 bez předepnutí po ukončení korozního testování..... | 54 |
| Obr. 28. Vzorky svařované metodou 141 s aplikovaným předepnutím po ukončení korozního testování a odejmutí z přípravku..... | 55 |

| | |
|---|----|
| Obr. 29. Vzorky svařované metodou 141 s bez předepnutí po ukončení korozního testování | 55 |
| Obr. 30. Usmyknuté šrouby M5 pro uchycení vzorku do přípravku (po expozici) | 56 |
| Obr. 31. Vzorek 523/3 C – zvětšeno 100x, feriticko-perlitická struktura materiálu P265GH, v TOO patrná Widmannstättenova struktura a zhrubnutí zrna, rovnoměrná koroze | 58 |
| Obr. 32. Vzorek 37C, zvětšeno 100x, feriticko-perlitická struktura, feritické jehlice, zhrubnutí zrna, úbytek materiálu ve střední a vrchní části svarového spoje ze strany ZM P265GH | 58 |
| Obr. 33. Mikrostruktura vzorku 523/1 A-zvětšeno 25x, dutina a korozní napadení v TOO | 59 |
| Obr. 34. Mikrostruktura vzorku 523/1 A-zvětšeno 100x | 59 |
| Obr. 35. Mikrostruktura vzorku 523/2 B2 – ze strany ZM P265GH, zvětšeno 25x | 59 |
| Obr. 36. Mikrostruktura vzorku 523/2 B2 –ze strany ZM P265GH, zvětšeno 100x | 59 |
| Obr. 37. Vzorek 38B, zvětšeno 25x, přechod v hrubozrnnou feriticko-perlitickou strukturu | 59 |
| Obr. 38. Vzorek 34A, zvětšeno 100x, kořen svaru | 59 |
| Obr. 39. Svarový kov vzorku 523/3 C – zvětšeno 25x, póry, segregáčn. pásma | 60 |
| Obr. 40. Svarový kov vzorku 523/3 C2 – zvětšeno 100x, | 60 |
| Obr. 41. Mikrostruktura vzorku 523/3 C2-ze strany ZM 1.4541, zvětšeno 200x, TOO, zhrubnutí zrna | 60 |
| Obr. 42. Mikrostruktura vzorku 523/3 C1-ze strany ZM 1.4541, zvětšeno 200x, TOO, zhrubnutí zrna, dvojčatění, vměstky | 60 |
| Obr. 43. Mikrostruktura vzorku 523/3 C2- ze strany ZM 1.4541, zvětšeno 500x, komplexní karbidy | 61 |
| Obr. 44. Vzorek 42B, zvětšeno 100x, pásmo karbidů | 61 |
| Obr. 45. Vzorek 37C, zvětšeno 100x, karbidy v okolí linie ztavení | 62 |
| Obr. 46. vzorek 37C, zvětšeno 25x, přechod jemnozrnné oblasti v hrubozrnnou (ze strany ocelu 1.4541) | 62 |
| Obr. 47. vzorek 523/3 C2 zobrazen pomocí SEM, patrné komplexní karbidy | 63 |
| Obr. 48. EDX analýza chemického složení z místa označeného červenou šipkou z obr. 47 | 63 |
| Obr. 49. Tvar spoje a technika svařování (Mat. 1 = P265GH; mat. 2 = 1.4541) | 81 |
| Obr. 50. Vzorky (141) vložené do korozní komory před spuštěním testu. | 83 |
| Obr. 51. Detail vzorků svařovaných metodou 141 po expozici v solné mlze (235 hodin) | 83 |
| Obr. 52. Detail vzorků svařovaných metodou 141 po expozici v solné mlze (235 hodin) | 84 |
| Obr. 53. Detail vzorků svařovaných metodou 141 po expozici v solné mlze (235 hodin) | 84 |

Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| Tabulka 1. Značení svařovaných základních materiálů [51, 52]..... | 36 |
| Tabulka 2. Ekvivalent Cr a Ni použitých materiálů pro určení struktury ze Schaefflerova diagramu obr. 13. | 36 |
| Tabulka 3. Chemické složení základního materiálu 1.4541 v hm.% [56] | 38 |
| Tabulka 4. Mechanické vlastnosti chromniklové austenitické oceli 1.4541 [56] | 38 |
| Tabulka 5. Chemické složení základního materiálu P265GH v hm.% [59] | 39 |
| Tabulka 6. Mechanické vlastnosti základního materiálu P265GH [59]..... | 39 |
| Tabulka 7. Označování vzorků svařovaných metodou 521 | 42 |
| Tabulka 8. Označování vzorků svařovaných metodou 141 | 43 |
| Tabulka 9. Parametry testu příčné tahové zkoušky | 46 |
| Tabulka 10. Legenda a výsledky příčné tahové zkoušky vzorků s označením 523 | 46 |
| Tabulka 11. Referenční vady dle EN ISO 6520-1 při nedestruktivním testování dodaných trubek svařované metodou 521 | 47 |
| Tabulka 12. Referenční vady dle EN ISO 6520-1 při nedestruktivním testování dodaných trubek svařované metodou 141. (P-výskyt v oblasti krycí vrstvy svaru, K-výskyt v oblasti kořene svaru)..... | 48 |
| Tabulka 13. prodloužení vzorků svařovaných metodou 141 a vypočtené tahové napětí..... | 50 |
| Tabulka 14. Parametry korozního testování v solné mlze | 52 |
| Tabulka 15. Chemické složení sledovaného místa vzorku 523/3 C2..... | 62 |
| Tabulka 16. Chemické složení přídatných materiálů [60, 61, 66, 67, 68]..... | 77 |
| Tabulka 17. Mechanické vlastnosti přídatných materiálů [60, 61, 66, 67, 68] | 77 |
| Tabulka 18. Parametry svařování metodou 521 (EN ISO 4063) | 81 |
| Tabulka 19. Parametry svařování metodou 141 (EN ISO 4063) | 82 |

Příloha A: Parametry přídavných materiálů (pro metodou svařování 141)

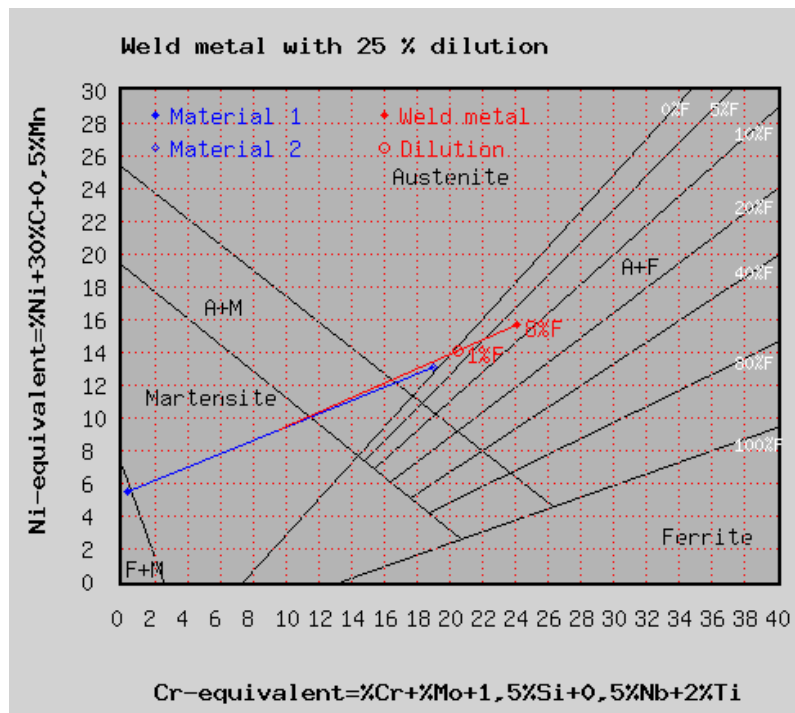
Tabulka 16. Chemické složení přídavných materiálů [60, 61, 66, 67, 68]

| Přídavný materiál | obsah prvků v hm. % (dle IC, mimo PM UTP068HH) | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|--|------|------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-----|------|-----|------|------|------|-------|
| | C | Mn | Si | P | S | Ni | Cr | Mo | Co | Nb | Cu | Al | N | Fe | Ti | Ta |
| SV07 | 0,052 | 1,85 | 0,48 | 0,015 | 0,005 | 13,21 | 23,39 | - | 0,037 | - | - | - | - | - | - | - |
| SV10 | 0,08 | 1,4 | 0,28 | 0,021 | 0,007 | 24,87 | 15,21 | 5,82 | 0,038 | - | - | - | - | - | - | - |
| 316LSi | 0,01 | 1,8 | 0,9 | 0,015 | 0,01 | 12,2 | 18,4 | 2,6 | - | - | 0,12 | - | 0,05 | - | - | - |
| NiCrMo3 | 0,007 | 0,02 | 0,07 | 0,003 | 0,002 | 65 | 22,23 | 8,5 | - | 3,5 | 0,02 | 0,1 | - | 0,23 | 0,15 | 0,141 |
| UTP 068 HH | 0,025 | 5,0 | 0,4 | - | - | 68,87 | 19,0 | 1,5 | - | 2,2 | - | - | - | - | - | - |

Tabulka 17. Mechanické vlastnosti přídavných materiálů [60, 61, 66, 67, 68]

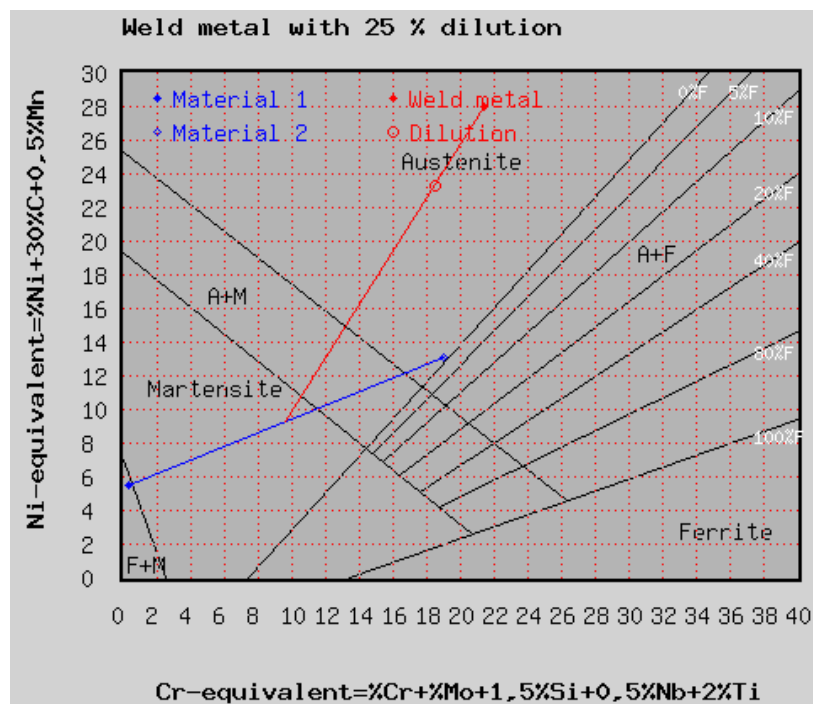
| Přídavný materiál | SV07 | | SV10 | | 316LSi | NiCrMo3 | UTP068HH |
|------------------------------------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|----------|
| | +20 °C | +350 °C | +20 °C | +350 °C | | | |
| Mech. Vlastnosti při teplotě T | | | | | | | |
| Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa] | 475 | 380 | 488 | 368 | 450 | 550 | 420 |
| Pevnost v tahu R_m [MPa] | 595 | 440 | 655 | 525 | 600 | 780 | 680 |
| Tažnost A_5 [%] | 38 | - | 27 | - | 35 | 40 | 40 |
| Kontrakce Z [%] | 63 | - | 47 | - | - | - | - |

Přídavný materiál SV07Ch25N13



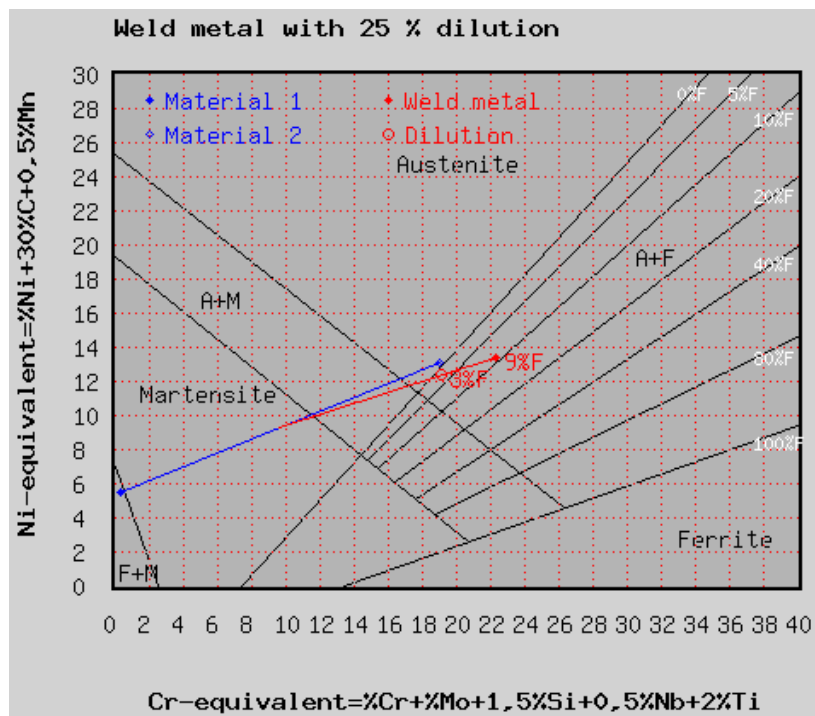
Graf 3. Schaeffleruv diagram PM SV07Ch25N13 (Material 1 = P265GH; Materiál 2 = 1.4541; weld metal = svarový kov, Dilution = promíšení) Cre svarového kovu = 20,51; Nie svarového kovu = 14,08; vzorek 34 [65]

Přídavný materiál SV10Ch16N25AM6



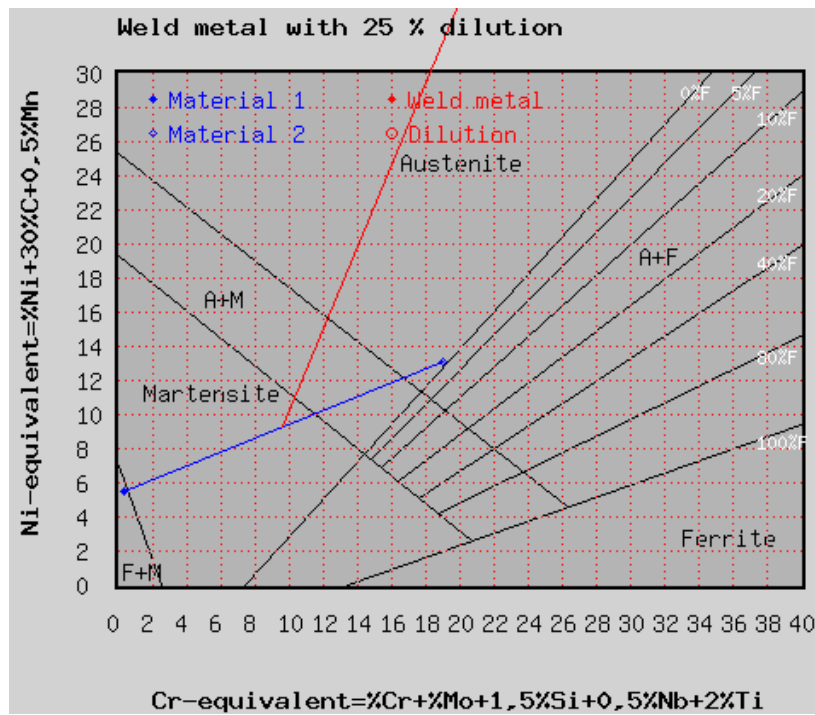
Graf 4. Schaeffleruv diagram PM SV10Ch16N25AM6 (Material 1 = P265GH; Materiál 2 = 1.4541; weld metal = svarový kov, Dilution = promíšení) Cre svarového kovu = 18,51; Nie svarového kovu = 23,29; vzorek 37 [65]

Přídavný materiál OK Autrod316LSi



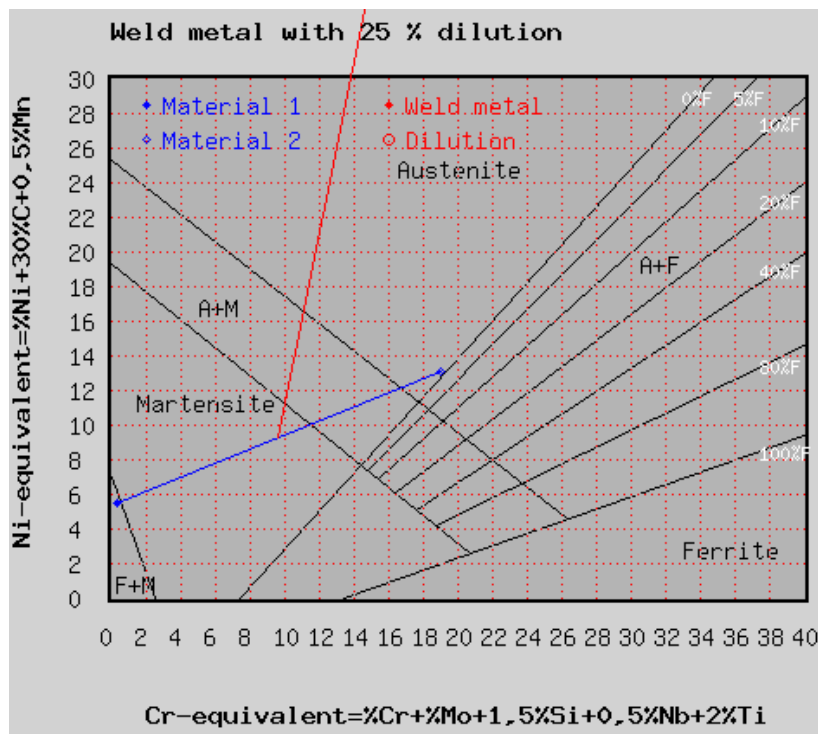
Graf 5. Schaeffleruv diagram PM 316LSi (Material 1 = P265GH; Materiál 2 = 1.4541; weld metal = svarový kov, Dilution = promíšení) Cre svarového kovu = 19,19; Nie svarového kovu = 12,36; vzorek 41 [65]

OK Tigrod NiCrMo3



Graf 6. Schaeffleruv diagram PM 316LSi (Material 1 = P265GH; Materiál 2 = 1.4541; weld metal = svarový kov, Dilution = promíšení) Cre svarového kovu = 27,09; Nie svarového kovu = 51,23; vzorek 42 [65]

Přídavný materiál UTP 068 HH

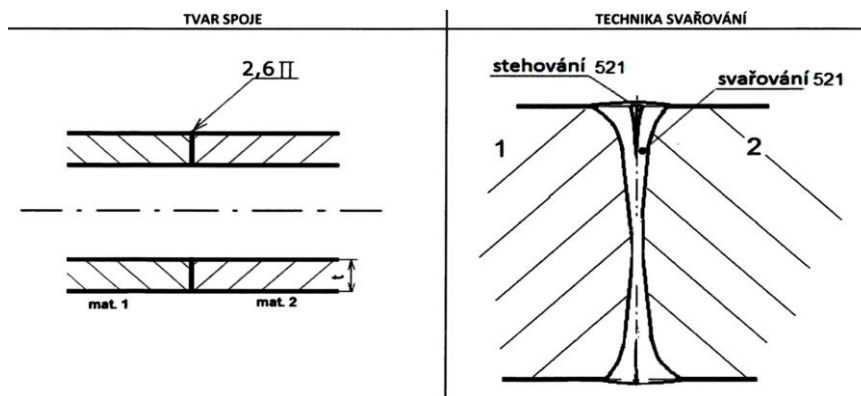


Graf 7. Schaefflerův diagram PM 316LSi (Material 1 = P265GH; Materiál 2 = 1.4541; weld metal = svarový kov, Dilution = promíšení) Cre svarového kovu = 19,07; Nie svarového kovu = 56,41; vzorek 38 [65]

Příloha B: Svařovací parametry dodaných trubek

Tabulka 18. Parametry svařování metodou 521 (EN ISO 4063)

| | | | |
|-----------------------------|-------------------------|-------|-------|
| označení vzorku | 523/1 | 523/2 | 523/3 |
| výkon paprsku [W] | 4000 | 4100 | 4200 |
| svařovací zařízení | LASERLINE LDF 10000-100 | | |
| laserový zdroj | přímý vláknový laser | | |
| systém přenosu paprsku | optickým vláknem | | |
| typ zařízení | CW (kontinuální) | | |
| typ paprsku | Gaussovský | | |
| přídavný materiál | NE | | |
| typ spoje | tupý | | |
| poloha svařování | PA | | |
| upínací přípravek | Sklíčidlo SKL-315 | | |
| příprava svarových ploch | Obrobení, odmaštění | | |
| stehování | Metodou 521, bez PM | | |
| svařovací rychlost [cm/min] | 50 | | |
| pracovní vzdálenost [mm] | 150 | | |
| ochranný plyn | Argon 5.0 | | |
| průtok [l/min] | 18 | | |
| předfuk/dofuk [s] | 2 | | |
| předehřev/dohřev | NE | | |

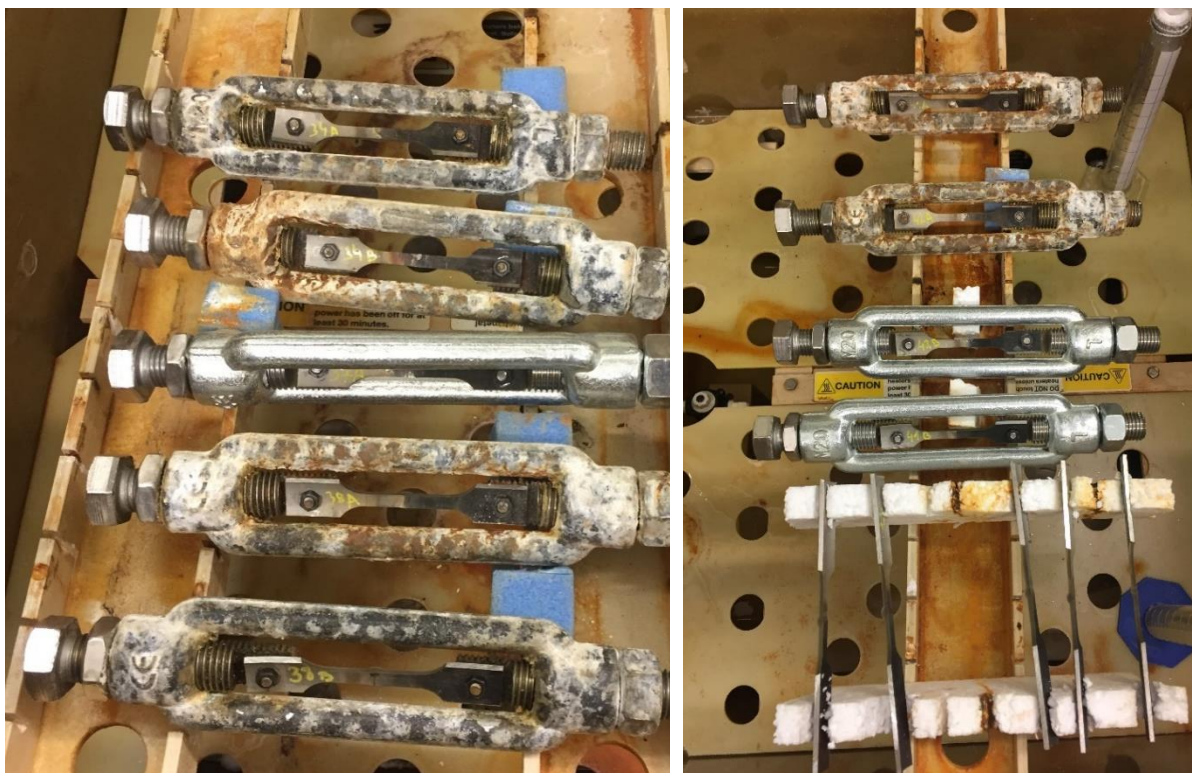


Obr. 49. Tvar spoje a technika svařování (Mat. 1 = P265GH; mat. 2 = 1.4541)

Tabulka 19. Parametry svařování metodou 141 (EN ISO 4063)

| označení trubek | 141R/34 | 141R/37 | 141R/38 | 141R/41 | 141R/42 |
|---------------------------------|---|---|-----------------------|-------------------|-------------------------------|
| metoda svařování | 141 ruční v otočném polohovadle | | | | |
| poloha | PA | | | | |
| základní materiál (ZM) | 1.4541 + P265GH | | | | |
| rozměr ZM | Ø44,5 x 2,6 | | | | |
| tvar úkosu | "V" 70° | | | | |
| výška otupení | 1 mm | | | | |
| mezera v kořeni | 1 mm | | | | |
| přídavný materiál (PM) | Sv07Ch25N13 dle GOST 2246-70; ø2mm | Sv10Ch16N25AM6 dle GOST 2246-70; ø2mm | UTP 068 HH ø2mm | 316 LSi ø1,6mm | NiCrMo ₃ ø1,6mm |
| sušení PM | ne | | | | |
| počet svarových vrstev | 2 | | | | |
| svařovací proud [A] (kořen) | 65 | | | | |
| svařovací proud [A] (krycí) | 62 | | | | |
| interpass | max. 100 °C | | | | |
| elektroda | ISO 6848 WCe 20; ø2mm | | | | |
| ochranný plyn | Argon 4.6 | | | | |
| průtok přímá ochrana [l/min] | 12 | | | | |
| průtok kořenová ochrana [l/min] | 8 | | | | |
| doba svařování kořene [s] | 109 | 124 | 115 | 102 | 86 |
| doba svařování krycí [s] | 222 | 285 | 277 | 211 | 241 |

Příloha C: Doplnující snímky z experimentu



a) b)
Obr. 50. Vzorky (141) vložené do korozní komory před spuštěním testu.



Obr. 51. Detail vzorků svařovaných metodou 141 po expozici v solné mlze (235 hodin)



Obr. 52. Detail vzorků svařovaných metodou 141 po expozici v solné mlze (235 hodin)



Obr. 53. Detail vzorků svařovaných metodou 141 po expozici v solné mlze (235 hodin)