

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Povrchové úpravy jako protikoroziční ochrana heterogenního svaru

Autor: **Lucie JAROLÍMOVÁ**

Vedoucí práce: **Ing. Ondřej CHOCHOLATÝ, Ph. D.**

Akademický rok 2019/2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Lucie JAROLÍMOVÁ**
Osobní číslo: **S19B0418P**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie**
Téma práce: **Povrchové úpravy jako protikorozi ochrana heterogenního svaru**
Zadávající katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

Zásady pro vypracování

1. Svařování, heterogenní svary
2. Korozi problematika svarových spojů
3. Metodika testování korozi odolnosti svarových spojů
4. Návrh vhodných protikorozi postupů
5. Příprava vzorků
6. Korozi testování a vyhodnocení
7. Diskuze výsledků a závěr

Rozsah bakalářské práce: **30-40 stran**
Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Multimediální výukový projekt Korozní inženýrství. [online] [cit 26-10-2018]. Dostupné z: http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/korozni_inzenyrstvi_se/koroze/s_iproje.htm

JONES, D.A. *Principles and prevention of corrosion*, Prentice Hall, New York 1996, ISBN 1:978-013359930

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

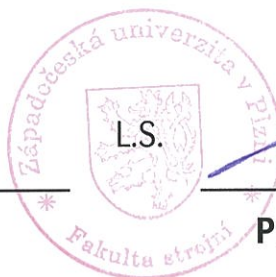
DAVIS, J., R., *Corrosion of Weldments*, ASM International, 2006, ISBN-13: 978-0-87170-841

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

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ondřej Chocholatý, Ph.D.**
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Petr Samek**
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Datum zadání bakalářské práce: **5. října 2019**
Termín odevzdání bakalářské 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 bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne: 23.7.2020


.....
podpis autora

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Jarolímová	Jméno Lucie		
STUDIJNÍ OBOR	„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	Povrchové úpravy jako protikorozní ochrana heterogenního svarového spoje			

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

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	53	TEXTOVÁ ČÁST	48	GRAFICKÁ ČÁST	5
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	<p>Bakalářská práce se zabývá problematikou koroze heterogenních svarových spojů parogenerátoru v prostředí jaderné elektrárny. V teoretické části je popsána korozní problematika svarových spojů, kde jsou podrobněji vysvětleny jednotlivé druhy koroze, následně je zde obsažena metodika testování korozní odolnosti a ochrana proti korozi. V experimentální části je testována korozní odolnost organické nátěrové hmoty na vzorcích heterogenního svarového spoje s několika různými povrchovými předúpravami.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	<p>Heterogenní svarový spoj, povrchová úprava, nátěrová hmota, koroze</p>

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Jarolímová	Name Lucie	
FIELD OF STUDY	„Materials Engineering and Engineering Metallurgy“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Chocholatý, Ph. D.	Name Ondřej	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKS		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Surface treatment as corrosion protection of dissimilar welded joints		

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

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	53	TEXT PART	48	GRAPHICAL PART	5
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The bachelor's thesis deals with the issue of corrosion of dissimilar welded joints of a steam generator in the environment of a nuclear power plant. The theoretical part describes the corrosion issues of welded joints, where the various types of corrosion are explained in more detail, followed by a methodology for testing corrosion resistance and corrosion protection. In the experimental part, the corrosion resistance of organic coating is tested on samples of dissimilar welded joint with several different surface pretreatments.
KEY WORDS	Dissimilar welded joints, finishes, coating, corrosion

Poděkování

Zde bych ráda poděkovala svému vedoucímu práce, panu Ing. Ondřeji Chocholatému, Ph.D. za odborné vedení, vstřícný přístup a cenné rady. Dále bych ráda poděkovala paní Ing. Petře Čejkové, za věcné připomínky.

Obsah

Obsah.....	8
Úvod.....	10
1. Svařování, heterogenní svary	11
1.1. Svařování.....	11
1.1.1. Tavné obloukové svařování	11
1.1.2. Tepelně ovlivněná oblast (TOO).....	12
1.2. Homogenní svarové spoje	12
1.3. Heterogenní svarové spoje (HSS).....	12
1.4. Problematika svařování HSS	13
1.5. HSS v jaderné energetice.....	13
1.6. Problematika HSS v české jaderné energetice.....	13
2. Korozní problematika svarových spojů.....	15
2.1. Koroze	15
2.2. Degradace strukturními změnami.....	15
2.3. Galvanická koroze	16
2.4. Bodová koroze	16
2.5. Štěrbínová koroze	17
2.6. Mezikrystalová koroze	17
2.7. Prostředím indukované praskání (EIC)	18
2.7.1. Korozní praskání pod napětím (SCC)	19
2.7.2. Korozní únavové praskání (CFC)	19
2.7.3. Vodíkem indukované praskání (HIC)	20
2.8. Radiací indukované korozní praskání (IASCC)	21
3. Metodika testování korozní odolnosti svarových spojů.....	21
3.1. Expoziční zkoušky.....	21
3.2. Elektrochemické zkoušky.....	22
3.2.1. Měření lineárního polarizačního odporu (LPR).....	22
3.2.2. Elektrochemická impedanční spektroskopie (EIS)	22
3.2.3. Elektrochemický šum (EN).....	22
3.2.4. Korozní potenciál	22
3.3. Nedestruktivní testování	23
4. Ochrana proti korozi.....	23
4.1. Volba materiálu	23

4.2.	Konstrukční a technologické úpravy	24
4.3.	Úprava korozního prostředí	24
4.4.	Ochrana povlaky	24
4.4.1.	Anorganické povlaky	24
4.4.2.	Kovové povlaky	25
4.4.3.	Slitinové povlaky.....	25
4.4.4.	Kompozitní povlaky	25
4.5.	Organické povlaky.....	26
4.5.1.	Složení nátěrových hmot.....	26
4.5.2.	Rozdělení nátěrových hmot.....	27
4.5.3.	Protikorozní nátěry	28
5.	Experimentální část	29
5.1.	Návrh experimentu	29
5.2.	Materiály vzorků.....	29
5.2.1.	Austenitická ocel 1.4541	29
5.2.2.	Uhlíková ocel 1.0425	30
5.2.3.	Přídavný materiál Sv 07Ch25N13 (dle GOST 2246-70)	31
6.	Příprava vzorků	31
6.1.	Zvolené povrchové předúpravy vzorků	32
6.2.	Vizuální zkouška svaru.....	35
6.3.	Nátěrová hmota.....	35
7.	Metalografický rozbor.....	36
8.	Testování v solné komoře	41
9.	Vyhodnocení vzhledu po zkoušce	41
10.	Diskuze výsledků a závěr	44
11.	Závěr.....	45
	Seznam literatury.....	46

Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou koroze v jaderném průmyslu, konkrétně korozi heterogenních svarových spojů, které v provozu jaderných elektráren představují kritickou část zařízení. Korozní napadení heterogenního svaru na parogenerátoru bývá příčinou odstávky jaderné elektrárny. Neplánované odstávky takového zařízení případně jeho havárie se buď nepřímo dotknou téměř každého z nás. Proto jsou zmíněná zařízení pod velmi přísným státním i mezinárodním dozorem, přičemž musí splňovat velmi přísné bezpečnostní požadavky. Vhodnou povrchovou úpravou je možno zvýšit životnost svarového spoje a zásadně prodloužit čas mezi jednotlivými odstávkami.

Bakalářská práce je rozdělena na dvě hlavní části, část teoretickou a část experimentální. V teoretické části je popsána korozní problematika svarových spojů, kde jsou podrobněji vysvětleny jednotlivé druhy koroze, následně je zde obsažena metodika testování korozní odolnosti a ochrana proti korozi.

Cílem práce je testování korozní odolnosti na dodaných svařencích ocelových trubek. Tomuto testování je věnována celá experimentální část. Trubky jsou složeny ze dvou základních materiálů, konkrétně z oceli 1.4541 a 1.0425, které jsou spojeny v heterogenní svar pomocí přídavného materiálu Sv 07Ch25N13. Vzorky jsou upraveny několika způsoby povrchové předúpravy a následně natřeny vrstvou zvoleného protikorozního nátěru.

1. Svařování, heterogenní svary

1.1. Svařování

Svařování nebo sváření je technologický proces, při kterém dochází ke vzniku nerozebíratelného spojení strojních součástí i celých konstrukcí ze součástí jednoduchých tvarů. Tyto součásti jsou nejčastěji z hutních polotovarů (tyče, pásy, plechy, profily) někdy i výkovků a odlitků. Během svařování je nutné dosáhnout takových termodynamických podmínek, při kterých je umožněn vznik nových meziatomárních vazeb. Těchto podmínek lze dosáhnout působením tlaku, tepla nebo obou faktorů najednou. Obecně platí závislost, že čím vyšší tlak působí na spojovaný materiál, tím je zapotřebí menšího množství vneseného tepla a naopak. Při svařování vždy dochází ke změně mechanických nebo fyzikálních vlastností základního materiálu v oblasti spoje. Sváret lze materiály kovové i nekovové, materiály podobných i různých vlastností.

Svařování se dělí do dvou základních skupin. První z nich je tavné svařování, při kterém se přivádí energie pouze ve formě tepla a ke spojení materiálů dochází při jejich roztavení. Mezi tavné svařování patří např. obloukové svařování, svařování pod tavidlem, plamenové svařování, elektronové svařování a další. Druhou skupinou je tlakové svařování, které je charakterizováno působením jak tlaku, tak i tepla za vzniku plastických deformací, při kterých dochází ke spojení již částečně natavených materiálů. Jako tlakové svařování je označováno např. odporové svařování, svařování třením, kovářské svařování, svařování výbuchem a další. Dále existuje také typ tlakového svařování za studena, kdy ke spojení dojde v tuhém stavu materiálu (svařování ultrazvukem, svařování tlakem za studena). [1][2][3]

1.1.1. Tavné obloukové svařování

Tavné obloukové svařování je jednou z klíčových technologií pro energetiku. Využívá se jak pro výrobu, tak i pro montáž, opravy a údržbu. Velmi specifickou oblastí energetiky je jaderná energetika, jelikož uvnitř zařízení se nachází radioaktivní médium, jehož únik by mohl představovat katastrofické následky pro člověka i pro životní prostředí. Z tohoto důvodu jsou na bezpečnost provozu těchto zařízení kladeny velmi vysoké nároky, stejně jako na zvláštní procesy, kam bezesporu patří i technologie svařování.

Svarové spoje patří mezi nejkritičtější body systému, konstrukcí a komponent zařízení jaderných elektráren. Geometrickou a strukturální diskontinuitu představují zejména heterogenní svarové spoje na komponentech a potrubních systémech jaderných elektráren. Geometrická diskontinuita je vyvolána defekty a výrobními nepřesnostmi, zatímco strukturální diskontinuita je nejčastěji vyvolána spojováním ocelí různého fázového složení. Kvůli tomu se svarové spoje často stávají prvkem přímo určujícím životnost a bezpečnost jaderné elektrárny. [4]

Svařování TIG

Touto metodou je označováno svařování wolframovou elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu. K tavení spojovaných dílů slouží elektrický oblouk, který hoří mezi wolframovou elektrodou a základním kovem. Elektroda se netaví a jakýkoli přídavný kov potřebný k vytvoření profilu svaru je přidáván odděleně.

Před přístupem vzduchu je pomocí ochranné atmosféry inertního plynu chráněn roztavený kov v místě svařování, špička přídavného drátu a také horká elektroda. Nejčastěji se používá argon, avšak na některé aplikace lze použít čisté hélium nebo jeho směs s argonem. Směs argonu s vodíkem může být použita pro korozivzdornou ocel. [5]

Zmíněná metoda byla použita v experimentální části této bakalářské práce pro svaření trubek materiálů 1.4541 a 1.0425, pomocí přídavného materiálu Sv 07Ch25N13.

1.1.2. Tepelně ovlivněná oblast (TOO)

Tepelně ovlivněnou oblastí (TOO) je označována oblast svarového spoje, ve které působením zdroje tepla při svařování dojde ke změnám mikrostruktury. V případě svařování kovů a slitin bez polymorfni přeměny (Cu, Ni, Al,) nedochází v TOO ke změně mikrostruktury a probíhají pouze substrukturní změny a rekrytalizace, to znamená růst nebo zjemnění zrna. V kovech a ve slitinách s polymorfni přeměnou (oceli) dochází v TOO k výrazným strukturním změnám, které mají vliv na vlastnosti svarových spojů. Při svařování nelegovaných, případně legovaných ocelí s polymorfni přeměnou můžeme TOO rozdělit na charakteristická pásma (Obr. 1).



Obr. 1: Charakteristická pásma tepelně ovlivněné oblasti [41]

- Oblast částečného natavení – tvoří přechod z TOO do svarového kovu. U většiny ocelí se tato oblast redukuje na linii stavení, jelikož rozdíl mezi teplotou solidu a likvidu je minimální.
- Oblast přehřátí – oblast s teplotami vysoko nad A_3 , při kterých dochází k intenzivnímu růstu zrn.
- Oblast normalizace – oblast vyžhátá nad teplotu A_{c3} s úplnou transformací.
- Oblast částečné překrytalizace – oblast s neúplnou polymorfni přeměnou (mezi teplotami A_1 až A_3).
- Oblast pod teplotou A_1 , ve které probíhají změny buď v rámci tuhého roztoku F, případně substrukturní změny. [1]

1.2. Homogenní svarové spoje

Pod pojmem homogenní svarový spoj je označováno místo, kde pomocí tavného způsobu svařování dojde ke spojení konstrukčních prvků vyrobených z materiálů stejného, nebo velmi podobného chemického a fázového složení. Pro zaručení požadovaných mechanických vlastností svarového spoje, je volen přídavný materiál chemickým složením blízký základnímu materiálu. Při dodržení technologického postupu výroby zmiňovaného svaru, se v provozu jeví jako spolehlivé a nepřináší výraznější problémy. [6]

1.3. Heterogenní svarové spoje (HSS)

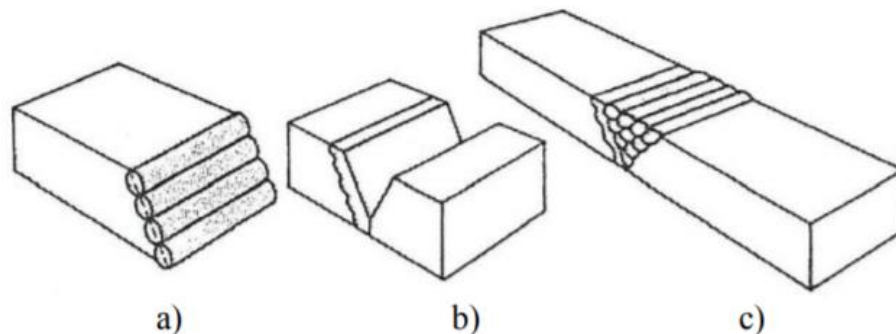
Heterogenním svarovým spojem se označuje místo součásti či konstrukce, kde dochází pomocí tavného způsobu svařování ke spojení dvou či více materiálů rozdílného jak chemického, tak i fázového složení. Mezi další odlišné vlastnosti svařovaných materiálů patří

např.: rozdílná mikrostruktura, mechanické vlastnosti, požadavky na technologické zpracování (TZ) po svaření a koeficienty teplotní roztažnosti. Kvůli těmto vyjmenovaným vlastnostem se heterogenní svar stává kritickým místem každého energetického zařízení, proto se doporučuje před zahájením výroby odzkoušet krátkodobé vlastnosti – záznam o kvalifikaci postupu svařování (WPQR) a dlouhodobé vlastnosti – tečení materiálu (creep), korozní vlastnosti.

Při spojování dvou materiálů různého chemického složení je potřeba zvolit vhodný přídatný materiál, který má dostatečnou vzájemnou rozpustnost s oběma spojovanými základními materiály. Výsledný svarový spoj tak bude mít požadované mechanické vlastnosti, mikrostrukturu a další parametry. [7]

1.4. Problematika svařování HSS

Během svařování ocelí s rozdílnými strukturálními bázemi musíme uvažovat jejich různé teploty tavení. Více legované oceli, zejména austenitické oceli, mají nižší teplotu tavení než oceli méně legované. Austenitické oceli dále mají širší interval tuhnutí než konstrukční oceli. Praskání na straně oceli s nižší teplotou tavení často způsobují velké rozdíly těchto teplot, jelikož smrštění svaru u konstrukční oceli zapříčiňuje působení přechodných termálních napětí u austenitické oceli, jejichž teploty jsou ještě v teplotním intervalu křehkosti za tepla. Zmíněný problém lze vyřešit nanesením jedné nebo více housenek na stranu konstrukční oceli s vyšší teplotou tavení. To je známo pod pojmem polštářování neboli navařování hrany feritické oceli. (obr. 2) [8]



Obr. 2: Postup svařování feritické oceli s korozivzdornou austenitickou ocelí; a) zhotovení polštáře (návaru) na hranu feritické oceli; b) zarovnání polštáře (návaru); c) zhotovení vlastního svaru [8]

1.5. HSS v jaderné energetice

Ke svařování heterogenních svarových spojů v JE se využívají různé typy přídatných materiálů. Kombinace těchto materiálů jsou navrženy podle původního předpisu OP 1513-72 pro svařování a navařování uzlů a konstrukcí jaderných elektráren, experimentálních a výzkumných jaderných reaktorů, a dále podle předpisu PK 1514-72 pro jejich kontrolu a hodnocení. [9][10]

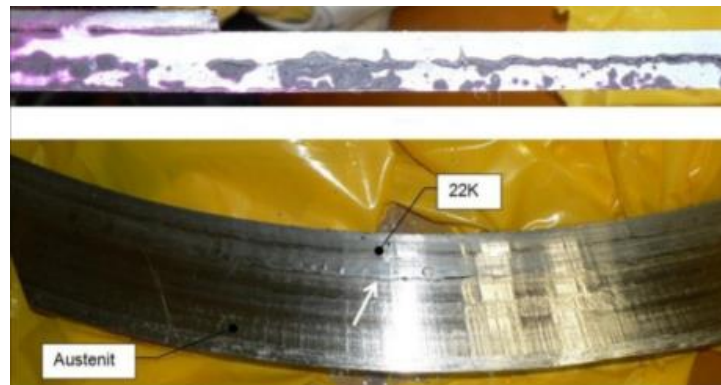
1.6. Problematika HSS v české jaderné energetice

Během ultrazvukových kontrol provedených na HSS kolektorů PG DN 1100 (obr. 2), byly objeveny vady, blížíící se svojí velikostí maximálně přípustným. Kvůli zajištění dalšího bezporuchového provozu, musely být vady HSS DN 1100 opraveny.



Obr. 3: Parogenerátor PGV 213 - JE typu VVER 440 (EDU); (vlevo) celkový pohled na PG; (vpravo) HSS DN 1100 kolektoru PG [12]

V průběhu opravy poškozeného HSS PG mezi pláštěm z materiálu 22K a kolektorem z materiálu 08CH18N10T byl odříznut celoobvodový vzorek s vadou. Již během příprav technologie oprav byla naplánována na odřezaném vzorku verifikace příčiny poškození HSS kolektoru s pláštěm PG. Testovaný vzorek byl odříznut z kořenové části svarového spoje, kde zůstala zachována část vady. [11]



Obr. 4: Vyříznutý vzorek s vadou pro analýzu příčiny poškození [11]

Na jednom z odřezaných vzorků lze vidět pouhým okem detekovanou vadu v kořeni s celoobvodovým charakterem. Kvůli rozšíření dosavadních znalostí o HSS DN1100 PG EDU degradovaným provozem, ověření hypotézy a zpřesnění příčiny poškození tohoto svaru, byl uskutečněn experimentální program. Z odebraného vzorku s vadou byly vytvořeny experimentální polotovary, které byly předány různým řešitelským pracovištím. Ve zkoumaném vzorku s označením 2B se vyskytovala průchozí trhlinka, kvůli které se vzorek po odříznutí rozpadl na dvě části (obr. 5). Lomové plochy byly vystaveny fraktografické analýze, zaměřené na pozorování mechanismů rozvoje a vzniku trhliny. [11]



Obr. 5: Odříznutý vzorek 2B v dodaném stavu: oběalíce „průchozí“ trhliny [11]

Experimentálním programem bylo stanoveno korozní praskání, jako hlavní degradační mechanismus HSS DN1100. Daný svarový spoj je považován za konstrukční uzel s komplikovaným stavem zbytkových technologických vlastních napětí, která během provozu mohou působit v interakci s teplotními poli a dilatačními účinky v místech styku materiálů s rozdílnou roztažností. Pozorovány byly jen následky zmíněných napěťových účinků, které dále působili v kombinaci s agresivním korozním prostředím. Jako mechanismus lomu bylo stanoveno korozní praskání materiálu 1. návaru, v důsledku kombinace faktorů napětí, materiálu a prostředí. [13]

HSS JE Temelín

Výrobní a montážní HSS na zařízeních primárního okruhu jsou zařazeny do bezpečnostní třídy 1 a 2 dle vyhlášky č. 132/2008 Sb. Převážně se jedná se o HSS oceli 10GN2MFA s ocelí 08Ch18N10T, kdy na straně oceli 10GN2MFA jsou dvě austenitické přechodové boční vrstvy. Na ocel 10GN2MFA je na vnitřním straně povrchu navařen dvouvrstvý protikorozní návar. [14][15]

HSS JE Dukovany

Výrobní a montážní HSS na zařízeních primárního okruhu, jsou stejně jako u JE Temelín, zařazeny do bezpečnostní třídy 1 a 2 dle vyhlášky č. 132/2008 Sb. Nejčastěji se zde vyskytuje HSS mezi ocelí 22K a ocelí 08Ch18N10T, kdy na straně oceli 22K jsou dvě austenitické přechodové boční vrstvy. [15][16]

2. Korozní problematika svarových spojů

U každého svarového spoje použitého v JE nestačí, aby byla správně zvládnutá technologie výroby, musí také splňovat požadavky na životnost a na bezpečnost. V této kapitole se věnuji degradačním mechanismům, které ovlivňují zmiňovanou životnost spoje.

2.1. Koroze

Koroze je nežádoucí jev, při kterém dochází k samovolnému, postupnému rozrušování kovu, následkem jeho chemické nebo elektrochemické reakce s okolním prostředím.

V přírodě se atomy kovu vyskytují ve formě chemických sloučenin (nerostů). Množství energie potřebné k oddělení kovu od jejich nerostů odpovídá množství energie uvolněné během chemické reakce, která zapříčiňuje vznik koroze. [17]

2.2. Degradace strukturními změnami

Strukturní stálost je definována jako neměnnost mechanických, fyzikálních, antikorozních a dalších vlastností po dobu plánované životnosti zařízení. Strukturní stálost tedy vyjadřuje schopnost materiálu odolávat vlivům vyvolaným vnějšími podmínkami, například vlivu tlaku, teploty, korozního prostředí, ozáření a dalších účinků, které působí během provozu zařízení. Při změně struktury materiálu, kdy součást není schopna přenášet navržené namáhání, dojde k lomu, z důvodu vyčerpání životnosti materiálu. V daném případě je strukturní stálost materiálu shledána jako nevyhovující. [4]

Pokud se během snížení strukturní stálosti, rychlost mikrostrukturních změn, rovná rychlosti cyklické plastické deformace a velikosti lokálních změn mikrostruktury materiálu, které je řádově shodná s lineárními rozměry zón, v nichž dochází k poškození, je možné, že se procesy lokálního poškození svarových spojů budou nejprve soustřeďovat do oblastí snížené strukturní stability svarů. Do takových míst, ve kterých spoje prodělávají největší a

zároveň z hlediska namáhání nejméně příznivé strukturní změny. Pokud jsou navíc takovéto změny situovány do přednostně orientovaných oblastí makrostruktury součásti (např. do pásem dendritického odmíšení, hranic zrn a fází, vycezenin, přechodových pásem a rozhraní svarových spojů, či do jednotlivých housenek), je možné, že procesy poškozování a porušování soudržnosti materiálu se přednostně umístí do zmíněných makro oblastí. [18]

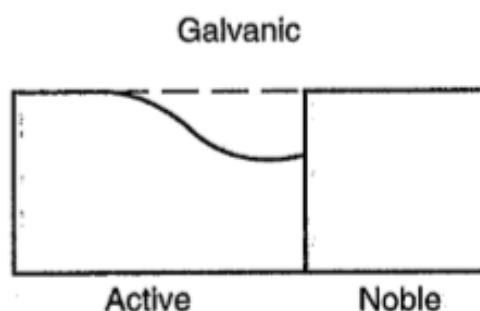
Strukturní stálost ocelí závisí hlavně na difúzních procesech, probíhajících mezi ocelemi tvořící svarový spoj, jak při jejich svařování, tak během jejich provozu. Difúzním procesem, nejvíce ovlivňujícím strukturní stálost svarových spojů, je označována redistribuce intersticiálních prvků, zejména uhlíku, dále také vodíku a dusíku. [4]

Hlavní příčinou degradace struktury řešeného HSS označujeme redistribucí intersticiálních prvků, zejména uhlíku, kvůli kterému ve svarovém spoji vznikají nauhličené a oduhličené oblasti a následně se vytvoří makronehomogenity. Plastické deformace se během cyklických změn teplot a zatížení lokalizují do oduhličených odpevněných zón, následně dojde k vyčerpání jejich plasticity a ke zvýšení se potenciální náchylnosti ke vzniku trhlin. [4]

2.3. Galvanická koroze

Galvanická koroze označuje korozní poškození, kdy jsou dva rozdílné kovy spojeny v korozivním elektrolytu. Jeden ze spojovaných kovů přednostně koroduje, zatímco druhý je před korozí chráněn. [19]

Elektrochemickou korozi nejméně ušlechtilého kovu často zapříčiňují galvanické články, které vznikají při spojení vysoce legovaného svarového kovu se základními materiály rozdílného elektrodového potenciálu. U svarů obsahujících více strukturních složek různého potenciálu, může dojít k elektrochemické korozi jednotlivých mikrostrukturních složek. Vhodnou úpravou chemického složení svarového kovu lze předejít zmíněnému napadení tak, že bude katodicky chránit základní materiál, který má nejvyšší korozní potenciál. Tímto řešením však může docházet k vodíkovému zkřehnutí materiálu, které spolu se zbytkovým napětím v TOO svaru, vyvolává korozní praskání pod napětím. [19]

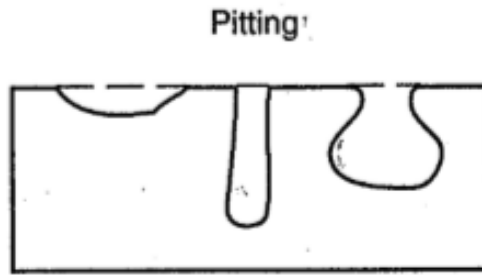


Obr. 6: Galvanická koroze [19]

2.4. Bodová koroze

Jedná se o hloubkovou korozi, kdy v kovu vznikají hluboké důlky, ve kterých se vlivem koncentrace korozivního prostředí tato reakce ještě urychluje. Zmíněný typ koroze nastává při bodovém porušení pasivační vrstvy svarového kovu nebo TOO, převážně ve vodném prostředí. Obvykle vzniká pouze na menších plochách, kde se koncentruje například

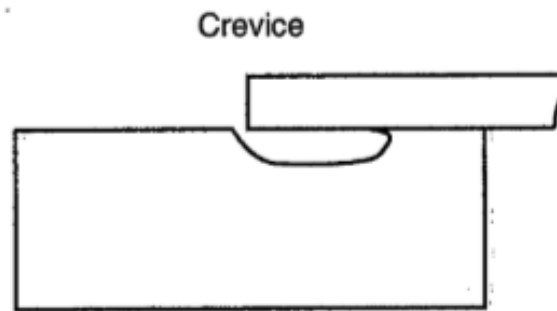
sražená sůl. Korozní důlky se častou místem iniciace dalších degradačních procesů. [20][21]



Obr. 7: Bodová koroze [20]

2.5. Štěrbínová koroze

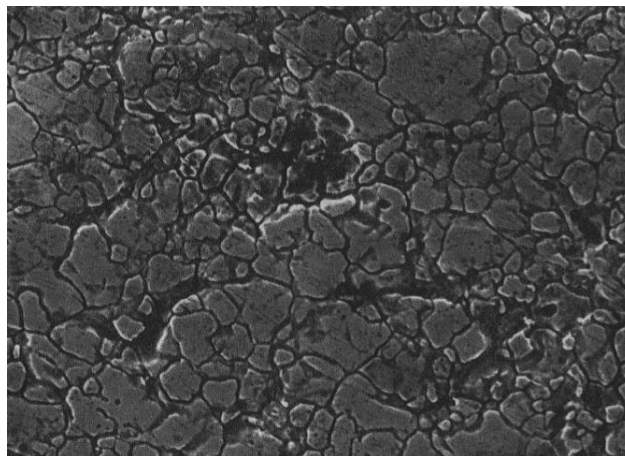
Tato koroze má stejný princip jako koroze bodová, s tím rozdílem, že může napadat větší oblasti. Štěrbínovou korozi mohou často vyvolávat povrchové vady svaru, mezi které patří například zbytky tavidla, horké trhliny, či mikrotrhliny, které vznikají během tuhnutí svarového kovu. Štěrbínová koroze výrazně ovlivňuje korozní odolnost svaru. [20][22]



Obr. 8: Štěrbínová koroze [20]

2.6. Mezikrystalová koroze

Mezikrystalová koroze vzniká u austenitických korozi odolných ocelí, kdy na hranicích zrn vlivem snížení obsahu chromu, dojde ke vzniku oblastí s chromovými karbidy. Chrom následně v materiálu není rozptýlen rovnoměrně, což má za následek snížení pevnosti, narušení pasivní vrstvy a následný vznik koroze v místech s nižší koncentrací. [21][22]

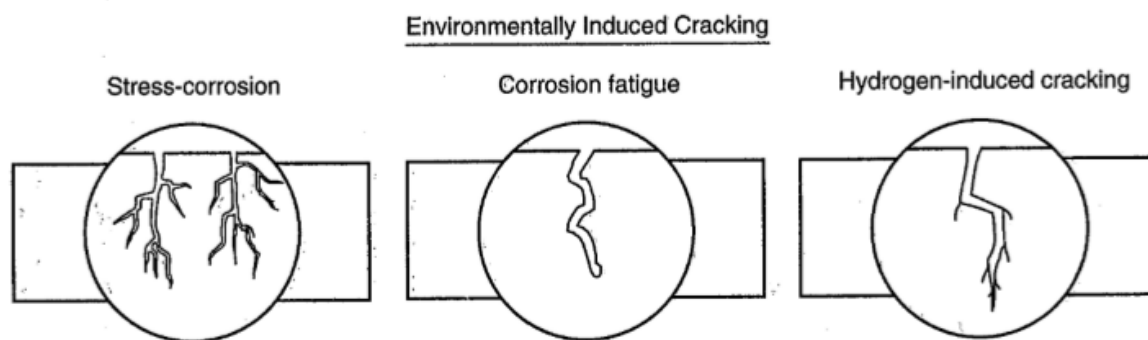


Obr. 9: Mezikrystalová koroze austenitické korozi odolné oceli [19]

2.7. Prostředím indukované praskání (EIC)

Zkratkou EIC je označováno křehké poškození materiálu, které vzniká působením tahového napětí a korozního prostředí současně. Křehké poškození se může vytvořit i za předpokladu, kdy je tahové napětí pod mezí kluzu a korozní úbytky jsou malé. Pod pojem prostředím indukované praskání se řadí tři typy [19]:

- Korozní praskání pod napětím (SCC)
- Korozní únavové praskání (CFC)
- Vodíkem indukované praskání (HIC)



Obr. 10: Korozní praskání pod napětím (vlevo), korozní únavové praskání (uprostřed), vodíkem indukované praskání (vpravo) [19]

Tab. 1: Charakteristika prostředím indukovaného praskání [19]

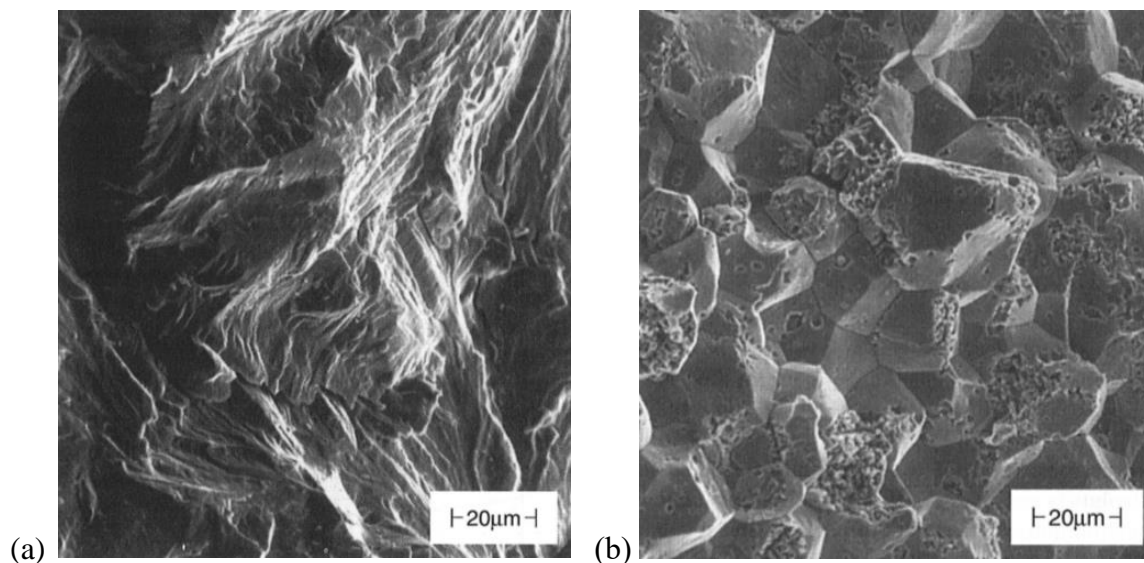
Charakteristika	SCC	CFC	HIC
napětí	Statické tahové	Cyklické s malým tahovým	Statické tahové
Vodné korozní prostředí	Specifické pro slitiny	žádné	žádné
Vzrůstající teplota	zrychluje	zrychluje	Vzrůstá do RT, poté klesá
Čistý kov	Více odolný	náchylný	náchylný
Typ praskliny	TG nebo IG rozvětvená ostrá	TG nerozvětvená tupá	TG nebo IG nerozvětvená ostrá
Koncentrátory napětí v trhlině	Chybějící (většinou)	přítomné	Chybějící (většinou)
Vzhled povrchu trhliny	Jako prasklina	Beach marks nebo striace	Jako prasklina
Katodická polarizace	Potlačuje (většinou)	potlačuje	urychluje
Poblíž meze pevnosti	Citlivý, ale HIC často převládne	urychluje	urychluje

(*RT – poková teplota, *TG – transkrystalický, *IG – interkrystalický)

2.7.1. Korozní praskání pod napětím (SCC)

Pojmem korozní praskání pod napětím, je označováno křehké porušení slitiny vystavené vlivu korozního prostředí, při působení statického tahového napětí. Čisté kovy jsou proti těmto účinkům odolnější nežli slitiny. Daný mechanismus koroze se často vyskytuje u spojení konkrétních slitin, spolu s konkrétním korozním prostředím. Praskliny se šíří kolmo na tahovou složku napětí. Průběh korozního praskání pod napětím může být jak interkystalický, tak transkystalický. Pro transkystalické šíření praskliny je specifické, šíření určitými krystalovými rovinami, jako jsou např. $\{100\}$, $\{110\}$ a $\{210\}$. Interkystalické porušení naopak kopíruje hranice zrn, přičemž se v daných oblastech převážně musí vyskytovat určitá nehomogenita, jako je např. segregace síry a fosforu na hranicích zrn. Oba zmíněné typy se mohou vyskytovat v tom samém materiálu. [20]

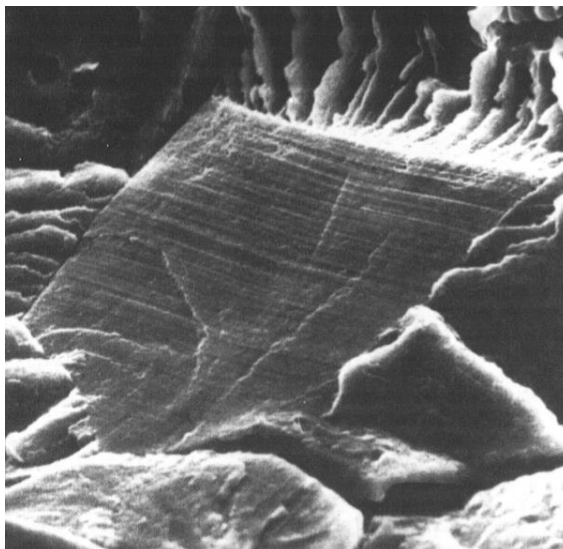
Proti koroznímu praskání pod napětím se lze vyhnout odstraněním korozního prostředí, tahového napětí (deformací povrchu, žíháním) nebo použitím nenáchylné slitiny. [20]



Obr. 11: Snímek z řádkovacího elektronového mikroskopu korozního praskání pod napětím; (a) transkystalický lom austenitické koroziodolné oceli, (b) interkystalický lom uhlíkové oceli [19]

2.7.2. Korozní únavové praskání (CFC)

Pod pojmem korozní únavové praskání je označované křehké porušení tuhého roztoku vyvolané působením proměnlivého tlaku v korozivním prostředí. Dané porušení má v provozu poměrně pomalou rychlost šíření. V trhlínách vzniklých při únavovém praskání je typický výskyt korozních produktů. Z mikroskopického snímku lomové plochy (obr. 12) lze pozorovat striace, které ilustrují nerovnoměrný průběh trhliny během cyklu. [19]



Obr. 12: Únavový lom na povrchu niklové slitiny 800 [19]

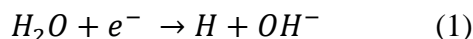
Důležitým vlivem ovlivňujícím korozní únavové praskání je frekvence cyklického namáhání, kdy nižší frekvence vede k většímu postupu trhliny za jeden cyklus. Pomalu se měnící cyklus v delším časovém úseku, vyvolává počátek korozního praskání pod napětím. Naopak velmi vysoké frekvence eliminují vliv korozního prostředí.

Vruby nebo vysoká hrubost povrchu zvyšují možnost vzniku korozního únavového praskání. Silné vruby mají větší vliv na životnost únavy nežli koroze samotná. Pokud má materiál malou drsnost povrchu, dojde k jeho zdrsňení účinky korozního prostředí. Trhliny jsou často iniciovány z korozních důlků, které opět slouží jako koncentrátoři povrchového napětí.

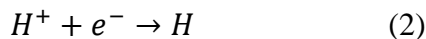
Korozní únavové praskání je v několika ohledech velmi podobné koroznímu praskání pod napětím, zejména tím, že oba mechanismy způsobují křehký lom u slitin, které jsou za normálních podmínek houževnaté. Napětí je u CFC spíše cyklické než konstantní, přičemž musí mít alespoň jednu tahovou složku, stejně jako u SCC. [19]

2.7.3. Vodíkem indukované praskání (HIC)

Vodíkem indukované praskání neboli vodíková křehkost, způsobuje křehké porušení, vyvolané průnikem a difuzí atomárního vodíku do krystalografické mřížky materiálu. Vodík je přítomen z redukce vody nebo kyseliny pomocí



a



v neutrálním a zásaditém prostředí. Po určitém časovém úseku se může, hlavně na povrchu vměstků nebo uvnitř vnitřních vad, zpět formulovat na molekulu H_2 , čímž dojde ke zvětšení jejího objemu a následnému vzniku vnitřního napětí. Poté vznikne defekt, známý jako „fish eye“.

Vodíkem indukované praskání většinou převládá nad korozním praskáním pod napětím v nízkoaloyovaných ocelích, korozivzdorných ocelích, hliníkových slitinách a dalších. HIC snižuje životnost únavy ve velmi pevných slitinách, které jsou testovány pro kosmický průmysl a zbraně. [19][20]

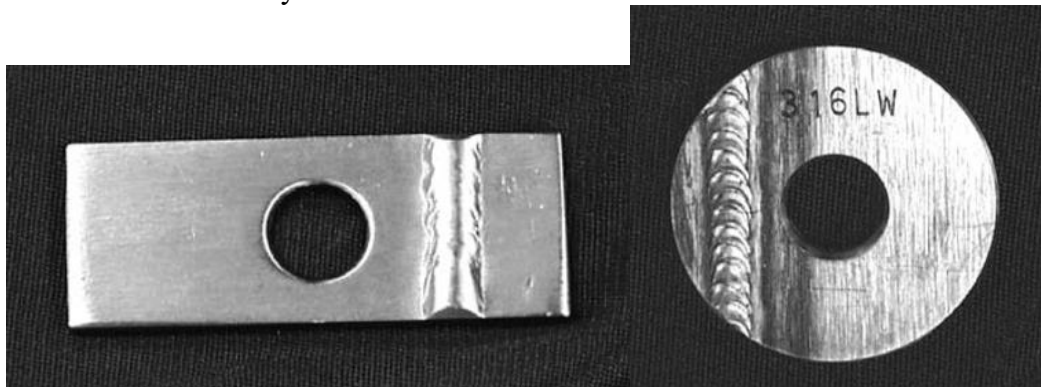
2.8. Radiací indukované korozní praskání (IASCC)

Druh mezikrystalového korozního praskání, které se vytváří v austenitických nerezových ocelích po ozáření. Praskání vzniká při ozáření nad prahovou dávkou (1-3 dpa neutronů), určité deformaci a zatížení nad limitní hodnotu, která je polovina meze kluzu po ozáření. K iniciaci trhlin nejspíš dochází na hranicích zrn oslabených vlivem radiací indukovaného usazování (RIS). Trhlina vzniká působením napětí, které je vyvoláno nahromaděnými dislokacemi v dislokačním kanálu a vlivem vodního prostředí, jako je difúze vodíku. [23]

3. Metodika testování korozní odolnosti svarových spojů

Monitorování je neodmyslitelnou součástí každého systému protikorozní ochrany. Žádný protikorozní systém není zcela spolehlivý, a v mnoha případech, mohou být následky jeho selhání přímo katastrofální jak pro životní prostředí, nebo naše zdraví tak pro ekonomiku. Naopak správně provedené korozní zkoušky mohou ušetřit ohromné částky. Jejich hlavním významem je, abychom se vyvarovali použití materiálu v nevhodných podmínkách, nebo abychom nepoužili dražší materiál, než který požadujeme. Korozní zkoušky také napomáhají ve vývoji nových slitin, které se jeví levnější, účinnější, s delší životností, nebo větší bezpečností než ty, které se zrovna používají. V nynější době několik způsobů, jak korozní odolnost testovat, jsou to například tyto metody: [20]

- Expoziční zkoušky
- Elektrochemické zkoušky
- Nedestruktivní zkoušky



Obr. 13: Vhodné vzorky pro korozní monitorování a testování [20]

3.1. Expoziční zkoušky

Poměrně levnou a jednoduchou metodou pro zhodnocení korozní odolnosti materiálu, je přímé testování vzorků, neboli expoziční zkoušky. V průběhu testů jsou vzorky vystaveny koroznímu prostředí po určitý čas a následně jsou vyhodnoceny měřením hmotnostního úbytku a dalších podrobnějších zkoušek. Tyto zkoušky nejsou určeny k náhradě laboratorních testů. Obvykle jsou navrženy k určení agresivity korozního prostředí, nebo také slouží pro zkoušení návrhů alternativního materiálu.

Přímé testování vzorků přináší několik výhod, oproti laboratorním testům. Jednou z nich je vysoký počet testovaných vzorků najednou, díky čemuž lze hodnotit rozptýlené měření. Další výhodou je například sledování degračních procesů, které ke svému vzniku potřebují dlouhý expoziční čas (štěrbinová a důlková koroze, SCC, atd.)

Naopak mezi nevýhody patří nemožnost vyhodnocení rychlých změn v korozním prostředí. Dále není jisté, i při splnění podmínek pro vznik, projevení lokalizované koroze před vydáním vzorků.

Ke zhotovení expozičních zkoušek je nezbytný správný návrh vzorků. Při tvorbě takového návrhu je důležité se zaměřit na faktory ovlivňující korozní napadení, jako je drsnost povrchu, tvar vzorku a vnitřní metalurgické procesy. Vhodné je odebírat vzorky ze svarů skutečné velikosti nežli svařovat malé vzorky. Svarový kov a TOO jsou totiž závislé na parametrech, jako jsou tloušťka materiálu, počet housenek, svařovací poloha, použitá metoda a další. K testování korozní odolnosti svarových spojů přispívá fakt, že jsou kritickými místy veškerých konstrukcí. [20]

3.2. Elektrochemické zkoušky

K monitorování a detekování náchylnosti materiálu k určitému mechanismu porušení se využívá velké množství elektrochemických zkoušek. Jejich hlavní výhodou je, že k provedení testů stačí pouze krátká doba vystavení vzorků vlivům korozního prostředí. V následující části budou zmíněny pouze ty metody, které se využívají pro testování svarů.

3.2.1. Měření lineárního polarizačního odporu (LPR)

Díky této metodě lze odhadnout rychlost koroze na základě Stern-Gearyovy rovnice. Tato metoda pojednává o tom, že korozní rychlost kovu je nepřímo úměrná polarizačnímu odporu. Polarizační křivkou můžeme vyjádřit grafickou závislost mezi potenciálem elektrody a rychlosti reakce. Pomocí anodické, resp. katodické větve křivky lze určit Tafelovy směrnice, které jsou závislé na teplotě, chemickém složení a koncentraci elektrolytu. Zkoumaný vzorek je postupně polarizován externím zdrojem elektrické energie o 10mV na obou stranách korozního potenciálu. Sklon mezi indukovaným potenciálem a celkovým proudem je interpretován jako polarizační odpor. Čas potřebný pro stanovení korozní odolnosti daného materiálu je v řádech minut. Omezení této metody je takové, že pro správné provedení musíme mít dostatečně vodivý elektrolyt. Zmíněná metoda není vhodná k určení lokalizované koroze nebo SCC. [20]

3.2.2. Elektrochemická impedanční spektroskopie (EIS)

Elektrochemická impedanční spektroskopie sleduje proudové odezvy pracovní elektrody, na kterou se přivede sinusový signál malé amplitudy. K měření se využívá rozsáhlých frekvencí (0.1 Hz – 100 kHz), díky kterým lze zachytit nejen rychlé, ale i pomalé děje. Tato metoda je vhodná i pro elektrolyty s nízkou vodivostí, jako je parní kondenzát. EIS se využívá pouze pro měření rovnoměrného korozního napadení. [20]

3.2.3. Elektrochemický šum (EN)

Touto metodou lze měřit fluktuaci signálu elektrochemického potenciálu a korozního proudu, který je indukovaný korodujícím kovem. Kvůli malému rozsahu těchto fluktuací je nutné použít citlivé měřicí přístroje. Každý korozní princip je doprovázen specifickým elektrochemickým šumem. Pro současné měření elektrochemického potenciálu a šumu se využívá tří – elektrodový senzor. EN metoda se využívá pro sledování koroze za provozu zařízení, nebo zvláštních korozních principů. [20]

3.2.4. Korozní potenciál

Měření korozního potenciálu je základní metoda využívaná k monitorování koroze ocelových výztuží v betonu nebo pro monitorování podzemních produktovodů pod katodickou

ochranou. Zmíněná metoda je vhodná i v případě, že kovy vykazují aktivní i pasivní korozní chování. Například nerezová austenitická ocel může dosahovat skvělé korozní odolnosti, do té doby dokud zůstane pasivovaná. Při styku s některými chloridy přejde do aktivního stavu, přičemž dojde k urychlení korozního napadení. Měření korozního potenciálu může indikovat změnu z pasivovaného do aktivního stavu.

Úspěšné měření korozního potenciálu závisí na dlouhodobé stabilitě elektrod. Pomocí těchto elektrod lze měřit korozi během provozu zařízení. Použití elektrod je však limitováno teplotou, tlakem, složením elektrolytu, pH a dalšími proměnnými. [20]

3.3. Nedestruktivní testování

Mechanickými a technologickými zkouškami lze ověřit vhodnost materiálu na zkušebních vzorcích, vybraných z určitého místa testovaného výrobku, z přídatku připojeného k výrobku, anebo se zkouší celý výrobek. Během těchto zkoušek však dojde k destrukci vzorku anebo zkoušeného výrobku. Takto prováděné zkoušky nemohou poskytnout záruku, že vlastností zjištěných u zkušebních vzorků bude dosaženo u všech vyrobených součástí, případně jejich objemu. Naopak nedestruktivními zkouškami, kdy nedojde k porušení testovaného materiálu, se může provést kontrola podle potřeby všech výrobků, jak ve vybraném, tak i v celém objemu. Díky tomu tyto zkoušky umožňují stoprocentní kontrolu vlastností výrobků.

Největší význam ve strojírenské výrobě mají zkoušky defektoskopické, které umožňují určit defekty v materiálech a výrobcích, případně mohou předpovědět možnosti vzniku materiálových poruch při provozu.

Společným rysem těchto zkoušek je aplikace vybraných fyzikálních principů, které testovaný předmět mechanicky ani tepelně nepoškodí. Mezi tyto fyzikální principy patří například elektromagnetické záření, akustické jevy, elektromagnetická indukce, magnetická indukce ve feromagnetických materiálech a principy kapilarity a smáčení zkoušeného předmětu polárně aktivní kapalinou. Podle uvedených principů se nedestruktivní zkoušky dělí na: [20][24]

- Zkoušky prozařovací
- Zkoušky zvukem a ultrazvukem
- Zkoušky magnetické a elektrické
- Zkoušky kapilární

4. Ochrana proti korozi

V předešlých kapitolách byly uvedeny základní poznatky o jednotlivých druzích korozi a jejich možnostech testování. Zmíněné poznatky lze využít, pro volbu vhodných způsobů, jak zpomalit tvorbu, či dokonce zabránit vzniku jednotlivých forem degradace povrchu materiálů vlivem okolního prostředí. Tato kapitola se věnuje různým možnostem ochrany kovů vůči korozi. Kvůli rozdílným podmínkám, kterými jsou konstrukční materiály vystavovány, nelze použít univerzální systém ochrany, nýbrž je nutné tento systém volit pro každý případ zvlášť.

4.1. Volba materiálu

Je zřejmé, že různé kovové materiály za totožných korozních podmínek korodují odlišnou rychlostí nebo odlišnými morfologickými formami. Při volbě vhodných materiálů se využívá jejich specifických vlastností, převážně jejich stálost v různých prostředích. Mezi materiály s nejlepší stálostí jsou řazeny ušlechtilé kovy, jejich slitiny nebo korozivzdorné oceli.

Pokud nelze určit, který materiál je nevhodnější, lze provést korozní zkoušky, které jsou určeny normou. [25]

4.2. Konstrukční a technologické úpravy

V praxi dochází k častému výskytu výrobků, jejichž technologické nebo konstrukční provedení způsobuje nebo urychluje korozi. Mezi nejčastější chyby patří místní přehřívání materiálu, vytváření korozních makročlánků, nevhodné tvary z hlediska předpokládané ochrany povlaky, nevhodné provedení svarů a nevhodná kombinace korozních a mechanických namáhání.

Mezi nejužívanější konstrukční úpravy patří například:

- Zabránění usazování nečistot vhodnou konstrukcí ocelových nádob
- Zabránění vzniku makročlánků při svařování vhodnou volbou elektrod a přídavného materiálu
- Na místech, kde dochází k úbytkům průřezu materiálů, je dán přídavek na korozi, který odpovídá znehodnocení materiálu během předpokládané životnosti výrobku

Mezi technologické úpravy patří například:

- Tepelné zpracování ke snížení vnitřního pnutí
- Dokončovací metody obrábění, které zvyšují odolnost proti opotřebení a mez únavy i odolnost proti korozi [25]

4.3. Úprava korozního prostředí

Korozní odolnost kovů lze navýšit také tím, že se přizpůsobí korozní prostředí korozním vlastnostem kovů. Upravují se tak kapalná i plynná prostředí. Agresivitu daného prostředí můžeme snížit třemi základními způsoby, které lze vzájemně kombinovat.

- Snížení koncentrace korozně aktivních látek – v plynném prostředí se snižuje vlhkost pomocí vysoušedel, v kapalném prostředí se snižuje množství plynů, zejména kyslíku
- Změna fyzikálních parametrů prostředí – zejména teplota
- Pomocí inhibitorů, které brzdí korozní proces [25][26]

4.4. Ochrana povlaky

V nynější době je při navrhování nových technologií povrchových úprav rozhodujícím hlediskem kromě obecných požadavků na odpovídající kvalitu, životnost, výrobovou skladbu apod. také ochrana životního prostředí. Technologie povrchových úprav kovů a slitin můžeme rozdělit do několika skupin. [27]

- Anorganické povlaky
- Kovové povlaky
- Slitinové povlaky
- Kompozitní povlaky
- Organické povlaky

4.4.1. Anorganické povlaky

Jedná se o úpravu kovů a slitin pomocí vhodných chemických roztoků za vzniku vrstev a povlaků s požadovanými vlastnostmi. Tyto povlaky mohou být vytvořeny hned několika způsoby.

Chemická a elektrochemická oxidace

Na povrchu výrobků z různých kovů dochází k vytvoření povlaků ponorem do horkých, vysoce alkalických roztoků s obsahem oxidačních látek. Tímto způsobem vzniká například černění (ocel a litiny), pasivace (měď, mosaz, stříbro) nebo chromátování a eloxování (hliník a jeho slitiny). [28]

Fosfátování

Tento proces úpravy probíhá působením kyseliny fosforečné na kov, převážně na železo, zinek a mangan. Povlaky vzniklé fosfátováním jsou elektricky nevodivé, a proto snižují velikost korozního proudu. Nejsou rozpustné ve vodě ani v organických rozpouštědlech. Kromě vytváření dobré antikorozi ochrany kovových součástí jsou vhodné také jako elektrické izolátory, slouží ke snížení tření nebo pro zlepšení přilnavosti povrchu před lakováním. [29]

Pasivace

Během pasivace dochází řízeně či samovolně (elektrochemická/chemická) ke vzniku ochranné vrstvy na povrchu kovu. Tato vzniklá vrstva snižuje reaktivitu základního kovu a tím zvyšuje odolnost vůči korozi a narušení povrchu kovu, například tmavnutí stříbra. Pasivační vrstva je velmi slabá, často dokonce neviditelná a má pouze omezenou ochrannou účinnost (mezioperační ochrana při přepravě a skladování).

4.4.2. Kovové povlaky

Kovové povlaky nechrání povrch materiálu pomocí neprůchodné bariéry, která mechanicky chrání základní kov od korozního prostředí. Jejich hlavní vlastnost je chování povlaku k podkladovému kovu. Podle jejich vzájemného vztahu lze povlaky rozdělit na anodové a katodové.

Anodové povlaky

Tyto povlaky elektrochemicky chrání podklad tím, že přednostně korodují - „obětovaná anoda“. Posouvají potenciál podkladového (základního) kovu do oblasti přijatelné korozní rychlosti. Patří sem hlavně zinkové povlaky na oceli.

Katodové povlaky

Katodové povlaky se chovají jako katoda a základní kov je brán jako „obětovaná anoda“, která koroduje. Mezi zmíněné povlaky patří kovy, které jsou elektrochemicky ušlechtilejší než železo (měď, olovo, nikl, cín, stříbro, zlato) nebo kovy, které v dané prostředí lehce pasivují (chrom, hliník).

4.4.3. Slitinové povlaky

Jedná se o kovové depozity, které po nanesení na povrch dosahují zcela nových vlastností. Těchto vlastností je dosaženo vhodnou volbou legujících prvků, jejich optimálním obsahem a vhodným způsobem zhotovování. Mezi tyto povlaky řadíme například slitinové povlaky železo-nikl, které mají dobrou rozměrovou stabilitu při změnách teploty (letecký průmysl).

4.4.4. Kompozitní povlaky

Jsou to v podstatě klasické povlaky kovů nebo slitin, ve kterých je obsažena jedna či více nekovových fází. Patří sem kompozitní povlaky nikl-fosfor-karbid křemíku, které pro svou vysokou tvrdost a odolnost vůči opotřebení často nachází uplatnění v automobilovém, námořním či leteckém průmyslu. [26][27][28]

V následující podkapitole budou rozebrány nejrozšířenější způsoby ochrany materiálů proti korozi, kterými jsou organické povlaky. V návaznosti na diplomovou práci pana Ing. Petra Samka, který se zabýval testováním žárových nástřiků, bude experimentální část věnovaná organickým povlakům, konkrétně nátěrovým hmotám. Díky tomuto faktu je nátěrovým hmotám kladena veškerá pozornost.

4.5. Organické povlaky

Díky vlastnostem organických hmot lze vytvářet povlaky různých tloušťek či různých ochranných účinností. Z tohoto důvodu se organické povlaky řadí mezi nejrozšířenější a nejvýznamnější povrchové úpravy používané ve všech odvětvích průmyslu. S různou tloušťkou vytvořeného povlaku se pak tyto ochrany dělí na:

- Obklady deskami z plastu a pryží
- Vrstvy tmelu a štěrkových hmot
- Povlaky z plastu a pryží
- Nátěry
- Vrstvy olejů, vazelín a vosku

Jedním z nejpoužívanějších typů vyjmenovaných ochranných jsou nátěrové hmoty.

4.5.1. Složení nátěrových hmot

Nátěrová hmota neboli barva je chemická směs tvořená z převažující části filmotvornou látkou. Povlaky mohou být tekuté, těstovité nebo práškové formy. U práškových nátěrových hmot se kapalného nebo alespoň plastického stavu dosahuje při ohřevu během vytvrzování nátěru. Po nanesení nátěrové hmoty na chráněný povrch (podklad) následuje fáze, během níž vzniká relativně kompaktní a soudržný film, který vykazuje měřitelnou soudržnost v rovnoběžném směru i směru kolmém k povrchu a měřitelnou přilnavost k povrchu nebo předchozí vrstvě nátěru. [30]

Poměr obsažených hlavních složek tvořící nátěrové hmoty je velice důležitý, jelikož ovlivňuje mnoho vlastností vzniklých povlaků. Mezi hlavní složky nátěrových hmot patří:

Pojiva

Pojiva se nejčastěji vyskytují ve formě pravého nebo koloidního roztoku či disperzí. Jsou tvořeny suspenzí pigmentu a filmotvorné látky. Po aplikaci nátěrové hmoty vytváří pojivo vlastní ochranný film, určující základní vlastnosti nátěru. [31]

Pojidla

Roztoky nebo disperze pojiva a rozpouštědla.

Filmotvorné složky

- Vysychavé oleje – tuhnou polymerací a pohlčováním vzdušného kyslíku
- Polovysychavé oleje – vzniklý povlak je elastický a neprotvrdá
- Nevysychavé oleje – nátěry zůstávají stále lepivé
- Přírodní pryskyřice – výroba lihových a olejových nátěrových hmot
- Syntetické pryskyřice – hlavní složka většiny nátěrových hmot
- Asfalty a smoly – jsou svařovány s vysychavými oleji
- Zvláčňovadla – zvyšují vláčnost povlaků, snižují křehkost a možnost tvorby trhlin
- Sušidla – urychlují zasychání

Těkavé složky

- Rozpouštědla – organické kapaliny, které slouží k rozpuštění filmotvorných látek
 - Pravá – přímo rozpouštějí filmotvornou látku
 - Nepravá – filmotvornou látku rozpouštějí ve směsi s pravým rozpouštědlem, dále ovlivňují rychlost vytěkání při schnutí nátěru
- Ředidla – ředí nátěrové hmoty před jejich použitím

Pigmenty

Prášky různých barev, které dávají nátěru požadovaný barevný odstín. Dále ovlivňují také krycí schopnost povlaků, jejich odolnost vůči korozi a další. Pigmenty nelze rozpustit ve vodě, pojidlech a organických rozpouštědlech, ve kterých jsou dispergovány. Tyto barevné prášky musí být dokonale jemné s velmi vysokou kryvostí. Pigmenty se dělí na:

- Anorganické pigmenty, které jsou tvořeny oxidy a sulfidy kovů
- Organické pigmenty složené z těl rostlin a živočichů
- Kovové pigmenty, které jsou tvořeny jemně rozemletými kovy

Plnidla

Prísady práškovitého typu, které nelze rozpustit. V pojidle musí být dobře dispergované, částice musí být velmi jemné. Vylepšují nátěrové hmoty o další funkční a technologické vlastnosti jako je například zlepšení odolnosti vůči korozi, usazování a hoření.

Barviva

Barviva jsou organické sloučeniny, které jsou rozpustné v pojidlech. Slouží k výrobě obarvených laků a spolu s pigmentem vytváří požadovaný barevný odstín barev.

Aditiva

Jejich přidáním se zlepšují vlastnosti nátěrových hmot. Jedná se například odpěňovače, smáčedla a jiné. [27]

4.5.2. Rozdělení nátěrových hmot

Podle druhu rozpouštědla

- Vodouředitelné – ředí se vodou
- Rozpouštědlové – ředí se ředidlem

Podle obsahu pigmentů a plniv

- Pigmentované – tvoří neprůhledné vrstvy s různým stupněm kryvosti a barevného odstínu
 - Email – nízký obsah pigmentů
 - Barva – vysoký obsah pigmentů
 - Tmel – vysoký obsah plnidel
- Transparentní – tvoří průhledné nátěrové filmy, které mohou být bezbarvé nebo obarvené rozpuštěnými barvivami
 - Laky
 - Fermaže
 - Napouštědla

Podle odolnosti nátěru

- Venkovní – odolné atmosférickým vlivům

- Vnitřní – dekorativní
- Speciální – chemicky odolné nátěry (pro vysoké teploty, elektroizolační, elektrovedivé apod.)

Podle druhu podkladového materiálu

- Dřevo – nábytek
- Kov – stavební konstrukce
- Beton, omítky

Podle způsobu nanášení

- Štětcem
- Válečkem
- Máčení – polévání
- Navalování
- Stříkání (vysokotlaké, pneumatické, elektrostatické)

Podle způsobu tvorby nátěrového systému

- Fyzikální zasychání – odpaří se molekuly rozpouštědla, makromolekuly pojiva jsou pouze uloženy na sobě
- Zasychání s oxidačním vytvrzením – odpaří se molekuly rozpouštědla, následně se reakcí se vzdušným kyslíkem propojí molekuly pojiva kyslíkovými můstky
- Chemické vytvrzování – po smíchání barvy a tužidla obsahuje směs dva druhy molekul (dlouhé molekuly – pojivo, krátké molekuly – tužidlo), chemickou reakcí vzniknou příčné vazby a tím i síťová struktura [32]

Podle způsobu sušení a vytvrzování

- Schnoucí na vzduchu za normálních podmínek okolního prostředí 5-30°C.
- K přisoušení při teplotách 60-90°C.
- Vypalovací, kdy se nátěr vytváří za zvýšené teploty chemickou reakcí 90-180°C.
- Vytvrzované jinými způsoby například UV zářením.

Podle počtu složek

- Jednosložkové – k zasychání nebo vyvrzení nepotřebují další složku
- Dvousložkové – k zasychání nebo vytvrzení potřebují další složku označovanou podle typu nátěrové hmoty jako katalyzátor, iniciátor nebo tužidlo

4.5.3. Protikoroziční nátěry

K ochraně kovových materiálů před vlivy koroze se používají protikoroziční nátěry, které se řídí normou EN ISO 12944 „Nátěrové hmoty – Protikoroziční ochrana ocelových konstrukcí ochrannými nátěrovými systémy“. Nátěrové hmoty se rozdělují na čtyři pásma životnosti, které jsou:

- | | |
|---------------------------------|-------------|
| ➤ Nízká (L = low) | < 7 let |
| ➤ Střední (M = medium) | 7 - 15 let |
| ➤ Vysoká (H = high) | 15 - 25 let |
| ➤ Velmi vysoká (VH = very high) | > 25 let |

Účinnost protikorozičních nátěrů spočívá v tom, že izolují kovový základ od vnějšího prostředí. Tyto nátěry chrání kovové povrchy zejména bariérovým, elektrochemickým a inhibičním účinkem. [33]

5. Experimentální část

5.1. Návrh experimentu

V rámci experimentu této bakalářské práce bylo vytvořeno 15 vzorků heterogenního svarového spoje s pěti různými předúpravami povrchu vzorků před nanesením vlastní nátěrové hmoty. Cílem bylo porovnat zvolené předúpravy povrchu základního a svarového materiálu po nanesení organického nátěru a následném testování v solné komoře. Vzorky byly zhotoveny ze tří tyčí (1A, 2A, 3B), na kterých byl vytvořen heterogenní svarový spoj ocelí 1.4541 a 1.0425 s použitím svarového kovu Sv 07Ch25N13. Dané svařence byly očištěny pěti způsoby předúpravy povrchu materiálu a následně natřeny jednou vrstvou zvoleného nátěru. K testování korozní odolnosti svarových spojů byla použita solná komora, ve které byly vzorky vystaveny extrémnímu koroznímu prostředí. Pozorovaným hlediskem byl procentuálně vyjádřený poměr zkorodované části vzorku ku zdravé části. Následně byl vyhodnocen vzniklý blistering podle francouzské normy NF EN ISO 2812-2.

Potřebné vybavení

Metalografická pila (Struers Disco-Tom-6), řezný kotouč (Struers 50A25), metalografický lis (Struers CitoPress-10), stereolupa Zeiss, kádinky na míchání leptadel a roztoku pro moření, protikorozní nátěrová hmota Rokozink antikor, štětec, dřívko na promíchání nátěru, brusný papír s hrubostí 80, bruska z drátěným kotoučem, brusné zařízení, zařízení pro leštění, zařízení pro elektrolytické leštění, metalografický invertovaný mikroskop Zeiss Axio, solná komora (Q-FOG CCT 600).

Použité chemikálie

Nital 1% (100ml ethanol, 1 ml HNO₃), kyselina dusičná 65%, kyselina chlorovodíková 35%.

5.2. Materiály vzorků

5.2.1. Austenitická ocel 1.4541

Prvním materiálem je nerezová austenitická ocel, známá pod číselným označením 1.4541 nebo pod chemickým označením X6CrNiTi18-10 (dle EN 10088). Často se používá na výrobu nástrojů a konstrukčních dílů v potravinářském průmyslu, foto průmyslu a filmu, je vhodná také pro konstrukce elektráren. Tato ocel je uklidněná titanem (Ti), díky kterému je odolnější vůči mezikrystalové korozi také ve svařovaném stavu.

Tuto ocel lze svařovat použitím metody TIG, MAG, svařováním obloukem, svařováním pod tavidlem a svařováním laserem. Pro zmíněnou ocel není nutný předehřev. Tepelné zpracování po svařování není časté. [34]

Chemické složení oceli 1.4541 může být v rozmezí hodnot, které jsou uvedeny v následující tabulce. [35]

Tab. 2: Chemické složení oceli 1.4541 [%]

Materiál	Fe	Cr	Ni	Mn	Si	Ti	C	P	S
1.4541	[%] ÷ [%]			max [%]					
	65,2 ÷ 74	17 ÷ 19	9,0 ÷ 12	0,2	1,0	0,7	0,080	0,045	0,015

V následující tabulce je obsaženo chemické složení dodaných vzorků pro experiment.

Tab. 3: Chemické složení testovaných vzorků oceli 1.4541 [%]

Materiál	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Ti	N
1.4541	0,057	1,84	0,45	0,02	0,001	10,39	17,61	0,374	0,01

Tabulka č. 4 popisuje požadované mechanické vlastnosti oceli 1.4541.

Tab. 4: Požadované mechanické vlastnosti oceli 1.4541

Materiál	Mez kluzu Rp 0.2 [Mpa]	Pevnost v tahu Rm [MPa]	Tažnost A5 [%]
1.4541	205 a více	515 – 680	40 a více

Hodnoty, které se nacházejí v tabulkách č. 3 a č. 4 jsou obsahem inspekčního certifikátu EN 10204 3.1 ADW2. [36]

5.2.2. Uhlíková ocel 1.0425

Druhým materiálem je uhlíková nelegovaná ocel, známá pod číselným označením 1.0425 nebo pod chemickým označením P265GH (dle EN 10028). Materiál je určen pro vysokoteplotní aplikace. Používá se proto především při vysokoteplotních aplikacích v ropném a plynárenském průmyslu, chemickém průmyslu a petrochemickém průmyslu. Je hlavním výrobním materiálem kotlů a tlakových nádob. Ocel lze svařovat běžnými metodami svařování.

Chemické složení oceli 1.0425 je uvedeno v následující tabulce. [37]

Tab. 5: Chemické složení oceli 1.0425 [%]

Materiál	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr
1.0425	max [%]	[%]÷[%]	max [%]					
	0,2	0,4÷0,8	0,4	0,255	0,155	0,3	0,3	0,3
	Al	Mo	Ti	Nb	V	N		
	min [%]	max [%]						[%]÷[%]
	0,02	0,8	0,3	0,02	0,02	0,01÷2,0		

Z tavební chemické analýzy bylo zjištěno chemické složení vzorků určených pro experiment.

Tab. 6: Chemické složení vzorků oceli 1.0425

Materiál	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Al	Mo
1.0425	0,17	0,69	0,197	0,008	0,005	0,05	0,02	0,05	0,034	0,003

Testovaná ocel byla vyrobena kyslíkovým procesem, plně uklidněná a kontinuálně odlévána. [38]

Požadované mechanické vlastnosti oceli 1.0425 jsou uvedeny v tabulce č. 7.

Tab. 7: Mechanické vlastnosti oceli 1.0425

Materiál	Mez kluzu Rp 0,2 [MPa]	Pevnost v tahu Rm [Mpa]	Tažnost A5 [%]
1.0425	265 a více	410 – 570	23,0 a více

Hodnoty v tabulkách č. 6 a č. 7 jsou výsledky inspekčního certifikátu EN 10204:2004/3.1. [38]

5.2.3. Přídavný materiál Sv 07Ch25N13 (dle GOST 2246-70)

Svarovým materiálem je nestabilizovaná austenitická ocel, která je často využívána pro výrobu svařovacích drátů. Přídavný materiál Sv 07Ch25N13 je charakteristický svým vysokým obsahem chromu a také svou dobrou odolností vůči korozi. [39]

Chemické složení přídavného materiálu Sv 07Ch25N13 je uvedeno v následující tabulce.

Tab. 8: Chemické složení Sv 07Ch25N13 [%]

Materiál	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P
Sv 07Ch25N13	max [%]			[%]÷[%]		max [%]	
	0,1	1	0,8÷2	22÷26,5	11,5÷14	0,02	0,03

Minimální požadované mechanické vlastnosti přídavného materiálu Sv 07Ch25N13 jsou uvedeny v tabulce č. 9.

Tab. 9: Minimální požadované mechanické vlastnosti Sv 07Ch25N13

Materiál	Mez kluzu Rp 0,2 [Mpa]	Pevnost v tahu Rm [Mpa]	Tažnost A5 [%]
Sv 07Ch25N13	441	284	25

6. Příprava vzorků

Pro experimentální část této práce byly použity vzorky bezešvých trubek o rozměrech 44,5 x 2,60 x 150 mm (vnější průměr x tloušťka stěny x délka), které se skládali ze dvou různých materiálů, austenitické oceli 1.4541 a uhlíkové oceli 1.0425 spojené v heterogenní svařový spoj přídavným materiálem Sv 07Ch25N13. Pro svaření daných materiálů byla použita metoda TIG. Trubky byly následně nařezány na jednotlivé vzorky o rozměrech 10 x 100 x 2,6 mm (ŠxVxT).



Obr. 14: Dodané trubky pro vzorky

6.1. Zvolené povrchové předúpravy vzorků

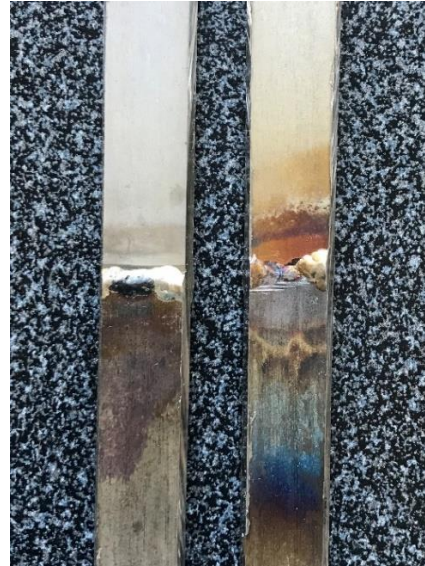
Pro očištění vzorků od okují, nečistot a mastnoty byly použity níže vyjmenované povrchové předúpravy. Jejich přiřazení k jednotlivým vzorkům lze nalézt tabulce č. 10. Ke zvoleným povrchovým předúpravám jsou vždy přiloženy pořizované fotografie vzorků z vnější i vnitřní strany po zhotovení dané úpravy.

Bez úpravy

Pro vzorky 1B a 3B nebyla zvolena žádná povrchová předúprava. Tyto vzorky byly pouze ručně zbaveny špon vzniklých při řezání.



Obr. 15: Vzorky 1B, 3B vnější strana



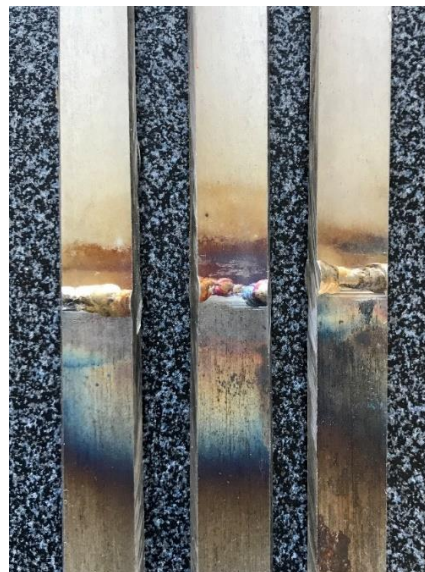
Obr. 16: Vzorky 1B, 3B vnitřní strana

Odmaštění

Vzorky 1L1, 1L2 a 3L byly očištěny od špon po řezání a následně byly zbaveny nečistot a mastnot pomocí ethanolu.



Obr. 17: Vzorky 1L1, 1L2 a 3L vnější strana



Obr. 18: Vzorky 1L1, 1L2 a 3L vnitřní strana

Broušení

Jako povrchová předúprava pro vzorky 1S, 2S a 3S bylo zvoleno ruční broušení v oblasti svaru pomocí brusného papíru s hrubostí 80. Vzorky byly následně odmaštěny ethanolem.



Obr. 19: Vzorky 1S, 2S a 3S vnější strana



Obr. 20: Vzorky 1S, 2S a 3S vnitřní strana

Kartáčování

Pro vzorky 1K1, 1K2 a 3K byla zvolena mechanická předúprava povrchu v oblasti svaru pomocí drátěného kartáče. Okartáčované vzorky byly odmaštěny opět ethanolem.



Obr. 21: Vzorky 1K1, 1K2 a 3K vnější strana



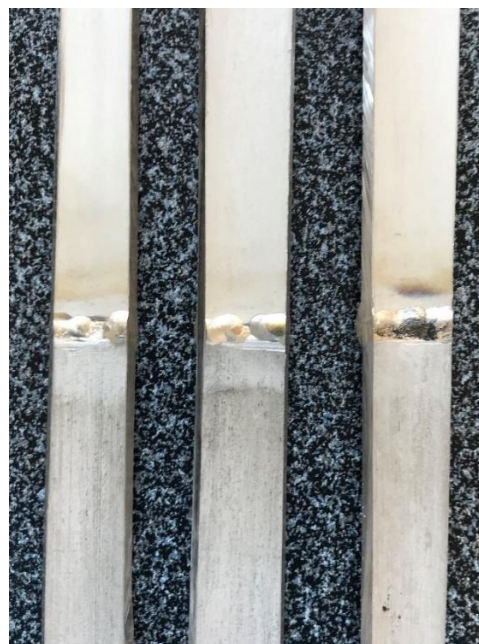
Obr. 22: Vzorky 1K1, 1K2 a 3K vnější strana

Moření

Vzorky 1M, 2M a 3M byly nejprve zbaveny špon, poté odmaštěny ethanolom a nakonec byly po dobu 90 vteřin ponořeny do mořicího roztoku kyseliny chlorovodíkové 35% v poměru 1:2 (voda:kyselina chlorovodíková 35%).



Obr. 23: Vzorky 1M, 2M a 3M vnější strana



Obr. 24: Vzorky 1M, 2M a 3M vnější strana

Tab. 10: Vzorky

Označení vzorků	Původní označení trubek	Povrchová předúprava
1V	1A	vzorek pro výbrus bez úpravy
1B	1A	Bez úpravy
3B	3B	Bez úpravy
1L1	1A	Odmaštění ethanolom
1L2	1A	Odmaštění ethanolom
3L	3B	Odmaštění ethanolom
1S	1A	Ruční broušení brusným papírem
2S	2A	Ruční broušení brusným papírem
3S	3B	Ruční broušení brusným papírem
1K1	1A	Mechanické kartáčování drátěným kartáčem
1K2	1A	Mechanické kartáčování drátěným kartáčem
3K	3B	Mechanické kartáčování drátěným kartáčem
1M	1A	Moření
2M	2A	Moření
3M	3B	Moření

Legenda:

první číslice nového značení = původní číselné označení trubky

písmeno = první písmeno zvolené předúpravy (V = výbrus, B = bez úpravy, L = líh (ethanol), S = brusný papír (smirk), K = drátěný kartáč, M = moření)

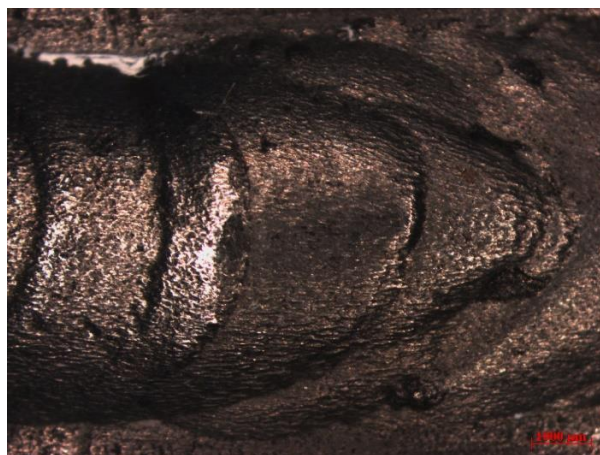
druhá číslice = číselné rozdělení vzorků z totožných trubek

6.2. Vizuální zkouška svaru

Před samotným experimentem byly náhodně vybrány tři vzorky svarů trubek 1A, 2A a 3B u kterých byla pozorována makrostruktura pomocí binokulární stereolupy Zeiss.



Obr. 25: Vnitřní strana svaru trubky 2A



Obr. 26: Vnější strana svaru trubky 1A

Na přiložených fotografiích lze pozorovat makro snímek vnější a vnitřní strany náhodně zvolených vzorků.

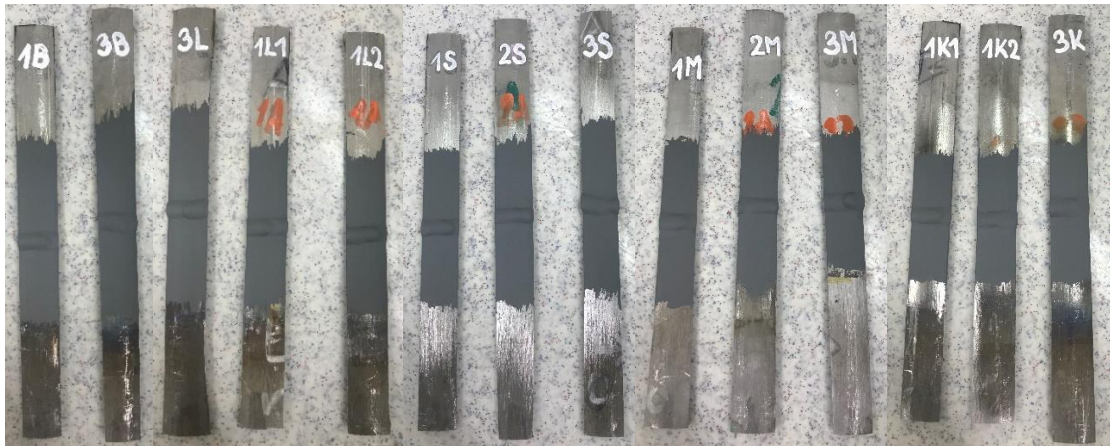
Vizuálním pozorováním nebyly nalezeny žádné vady svaru, které by mohly ovlivnit průběh testování vzorků v solné komoře. Pozorovány však nebyly zcela všechny vzorky, a tak je možné, že pouze nedošlo k nalezení hledaných vad.

6.3. Nátěrová hmota

K ochraně vzorků proti korozi byly zvolena nátěrová hmota Rokozink Antikor s obsahem práškového zinku. Dle popisu barvy se jedná o základní nátěr na povrchovou ochranu kovů i do nejnáročnějšího prostředí. Má vynikající antikorozi vlastnosti. Základní materiál je chráněn dvěma mechanismy. Prvním mechanismem je katodická ochrana pomocí zinku obsaženého v nátěru, kdy přednostně koroduje nátěr jako obětovaná anoda a potenciál základního kovu je posunut do oblasti přijatelné korozní rychlosti. Druhým mechanismem je zabránění pronikání korozního prostředí k materiálu tím, že korozní produkty zinku mají větší objem, než samotný kov.

Nátěrová hmota Rokozink antikor je poměrně levná a snadno dostupná na trhu. Její cena se pohybuje okolo 250 Kč za 1 litr barvy. Nejedná se tedy o náročnou metodu ochrany proti korozi.

Jednotlivé vzorky byly natřeny z obou stran v rozsahu povrchové předúpravy (Obr. 27, Obr. 28). Barva byla nejprve pečlivě promíchána, aby se práškový zinek usazený na dně nádoby rovnoměrně rozprostřel do celého objemu barvy. Samotný nátěr byl proveden štětcem pomocí křížového nátěru. Nátěr se nechal důkladně zaschnout v uzavřené místnosti po dobu tří dnů. Poté byly vzorky připraveny k testování v solné komoře.



Obr. 27: Nátěrová hmota aplikovaná na vnější stranu svaru

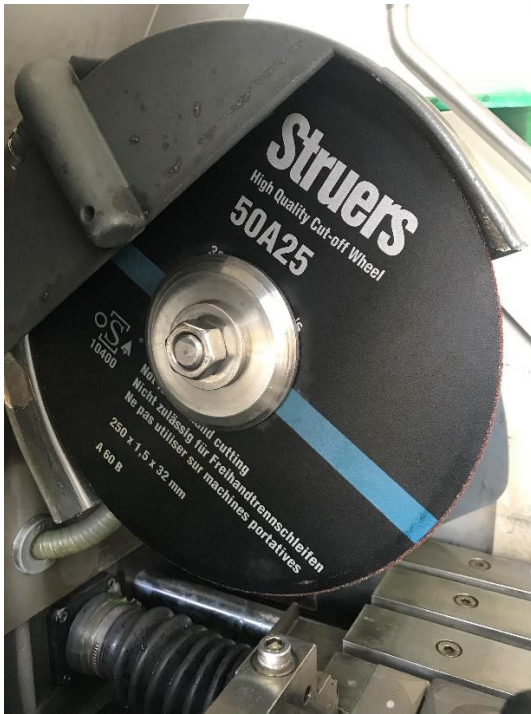


Obr. 28: Nátěrová hmota aplikovaná na vnitřní stranu svaru

7. Metalografický rozbor

Metalografický rozbor byl do experimentu zahrnut kvůli pozorování mikrostruktury jednotlivých částí svaru a základních materiálů.

Pro toto metalografické pozorování byl vybrán vzorek trubky s označením 1V. Vzorek musel být nejprve seříznut na metalografické pile (Struers Disco-Tom-6), pomocí řezného kotouče (Struers 50A25) na požadovanou velikost. Po rozříznutí byl vzorek zalisován do hmoty PolyFast a vytvrzen v metalografickém lisu (Struers CitoPress-10). Po preparaci byl vzorek ručně broušen na brusném zařízení pomocí brusných papírů od hrubosti 80 až po hrubost 2500. Následně byl vzorek leštěn na leštících plátnech MD Mol 0,3 a MD Mol 0,1 s diamantovou pastou. V průběhu byl vzorek elektrolyticky leštěn, aby nedošlo k vzájemné kontaminaci leštících pláten brusnou pastou.



Obr. 29: Řezný kotouč v metalografické pile



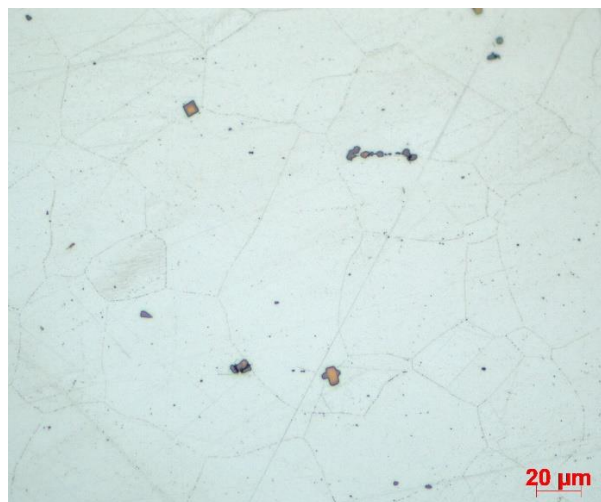
Obr. 30: Metalografický lis

Po vybroušení a vyleštění vzorku následovalo leptání. Kvůli tomu, že se svar skládá z několika oblastí, které mají výrazně odlišnou odolnost vůči leptadlům, musel být vzorek leptán speciálním postupem. Nejprve byla leptána uhlíková ocel, která byla citlivá na leptadlo Nital 1% (roztok složený ze 100 ml ethanolu a 1 ml HNO_3). Proti zmíněnému leptadlu byl svarový kov spolu s austenitickou ocelí 1.4541 odolný. Nepomohla ani prodloužená doba expozice, proto musely být tyto části leptány jiným leptadlem. Vhodné se nakonec ukázalo leptadlo s poměrem 1:1:1 kyseliny dusičné, vody a kyseliny chlorovodíkové. Toto leptadlo bylo bohužel příliš agresivní na uhlíkovou ocel 1.0425, a proto byl zvolen postup, kdy byla nejprve naleptána uhlíková ocel a až po kompletním prozkoumání této oblasti svaru byl doleptán svarový kov spolu s austenitickou ocelí 1.4541.

Metalografický rozbor austenitické oceli 1.4541



Obr. 31: Oblast daleko od svaru (500x)



Obr. 32: Oblast blízko u svaru – TOO (500x)

Z pořízených snímků naleptané mikrostruktury lze pozorovat větší, do oranžova zbarvené částice o velikosti okolo 8 μm . Nejpravděpodobněji se jedná o nitridy titanu (TiN). Ocel je totiž uklidněna titanem (Ti), díky kterému je ocel 1.4541 odolná vůči mezikrystalové korozi i ve svařovaném stavu. Ze snímků je patrný rozdíl ve velikosti zrn, který je způsobený tepelně ovlivněnou oblastí (TOO). Na snímku, který byl pořízen blízko svaru (Obr. 32) jsou patrná hrubá zrna. Naopak na druhém snímku (Obr. 31), který byl pořízen daleko od svaru, lze pozorovat neovlivněný základní materiál, jehož velikost zrn se během procesu svařování nezměnila. Na obou snímcích jsou viditelné karbidy vyloučené po hranicích zrn.



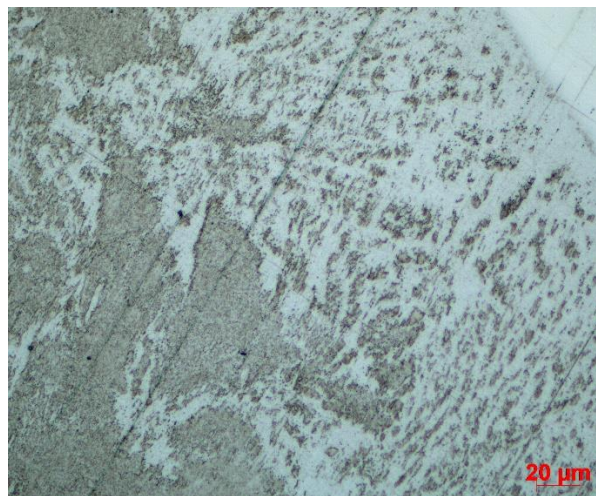
Obr. 33: Tepelně ovlivněná oblast (TOO), (100x)

Na snímku výše (Obr. 33), pořízeném při zvětšení 100x, je zřetelně vidět TOO, kdy nejhrubší zrna, která se vyskytují těsně u svařového materiálu, pozvolně přecházejí v zrna menších rozměrů.

Metalografický rozbor uhlíkové oceli 1.0425



Obr. 34: Uhlíková ocel dál od svaru (500x)



Obr. 35: Uhlíková ocel/svar (500x)

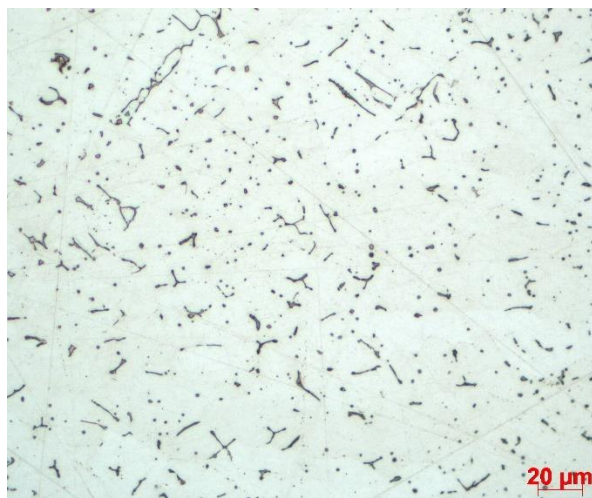
Na snímcích naleptané mikrostruktury uhlíkové oceli (Obr. 34, Obr. 35), lze pozorovat feriticko-perlitickou strukturu. Snímek vlevo (Obr. 34) zachycuje strukturu uhlíkové oceli 1.0425, která je více vzdálená od svarového spoje, a proto mají jednotlivá zrna stejnou velikost. Na rozdíl od snímku, který je zachycen přímo u svaru (Obr. 35), kde je jasně viditelná oblast částečného natavení a přehřátá oblast.

Na snímku níže (Obr. 36), lze pozorovat celou oblast TOO uhlíkové oceli. Od přehřáté oblasti, (pravý kraj snímku), až po neovlivněný základní materiál (levý kraj snímku).



Obr. 36: TOO uhlíkové oceli 1.0425 (25x)

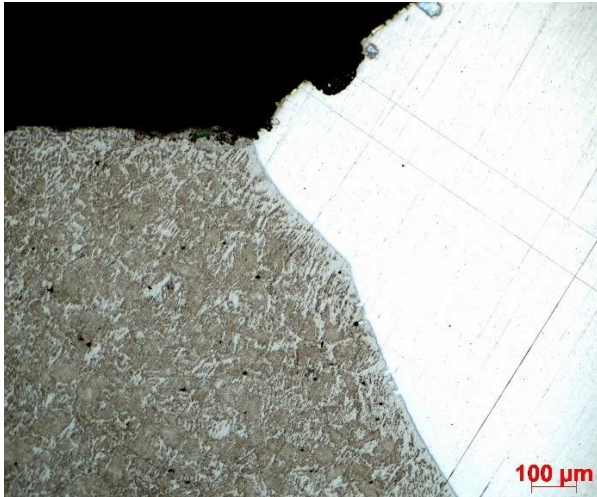
Svarový materiál Sv 07Ch25N13



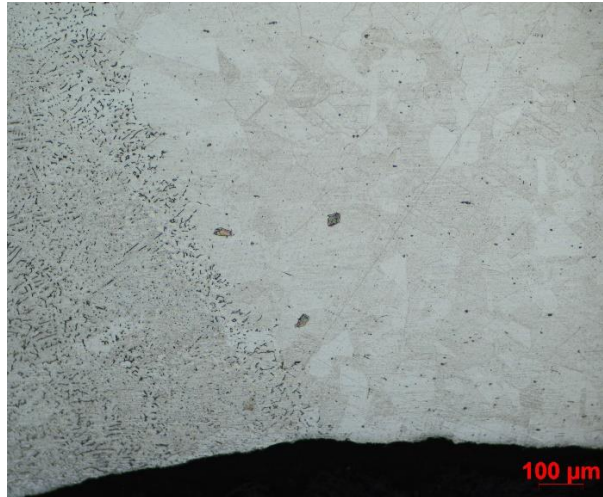
Obr. 37: Svarový kov (500x)

Na výše umístěném snímku (Obr. 37), je vyfocena naleptaná mikrostruktura svarového kovu vzorku, který je svařen pomocí přídavného materiálu Sv 07Ch25N13.

Na snímcích níže (Obr. 38, Obr. 39) jsou naleptaná přechodová pásma, která jsou pozorována pod světelným mikroskopem při zvětšení 100x. Obrázek vlevo zachycuje rozhraní uhlíkové oceli a svarového kovu, obrázek vpravo naopak zachycuje rozhraní svarového kovu a austenitické oceli. V bezprostřední blízkosti linie ztavení je viditelné zhrubnutí zrn. Mezi rozhraním uhlíkové oceli a svarového kovu je jasně viditelná linie ztavení. Jelikož leptání na vyvolání mikrostruktury přednostně rozpouští méně odolné oblasti a fáze, lze usuzovat, že tato oblast bude náchylná ke vzniku koroze. Rozhraní mezi svarovým kovem a austenitickou ocelí není tak výrazné.



Obr. 38: Uhlíková ocel/svar (100x)

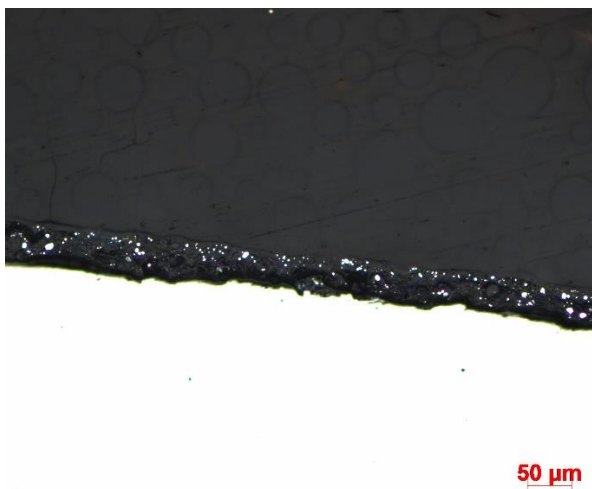


Obr. 39: Svar/austenitická ocel (100x)

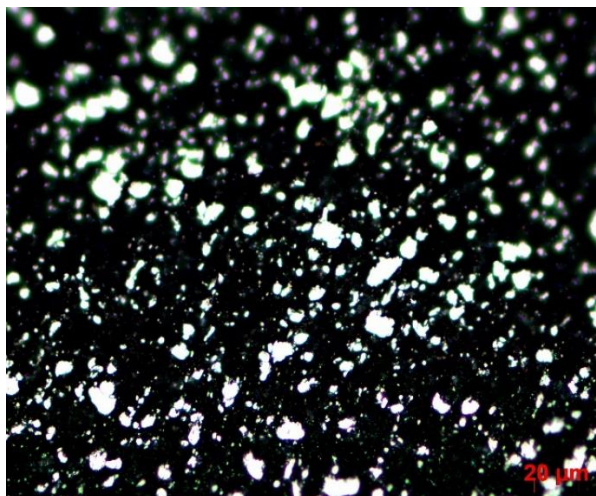
Nátěrová hmota

Na část zbytkového materiálu byl nanesen nátěr v jedné vrstvě, který byl následně vybroušen a vyleštěn stejným postupem jako předešlé metalografické výbrusy. Tento vzorek byl pozorován v nenaleptaném stavu. U nanesené vrstvy nátěrové hmoty (Obr. 40) byla naměřena tloušťka vrstvy okolo 50 μm.

Druhý snímek (Obr. 41) znázorňuje vzhled nátěrové hmoty, kde jsou jasně viditelné částice práškového zinku, které jsou rovnoměrně rozmístěny po celém vzorku. Vzorek byl celý přetřen nátěrovou hmotou a poté rychle zbroušen, aby nedošlo k odstranění vrstvy nátěru.



Obr. 40: Vrstva nátěrové hmoty (200x)

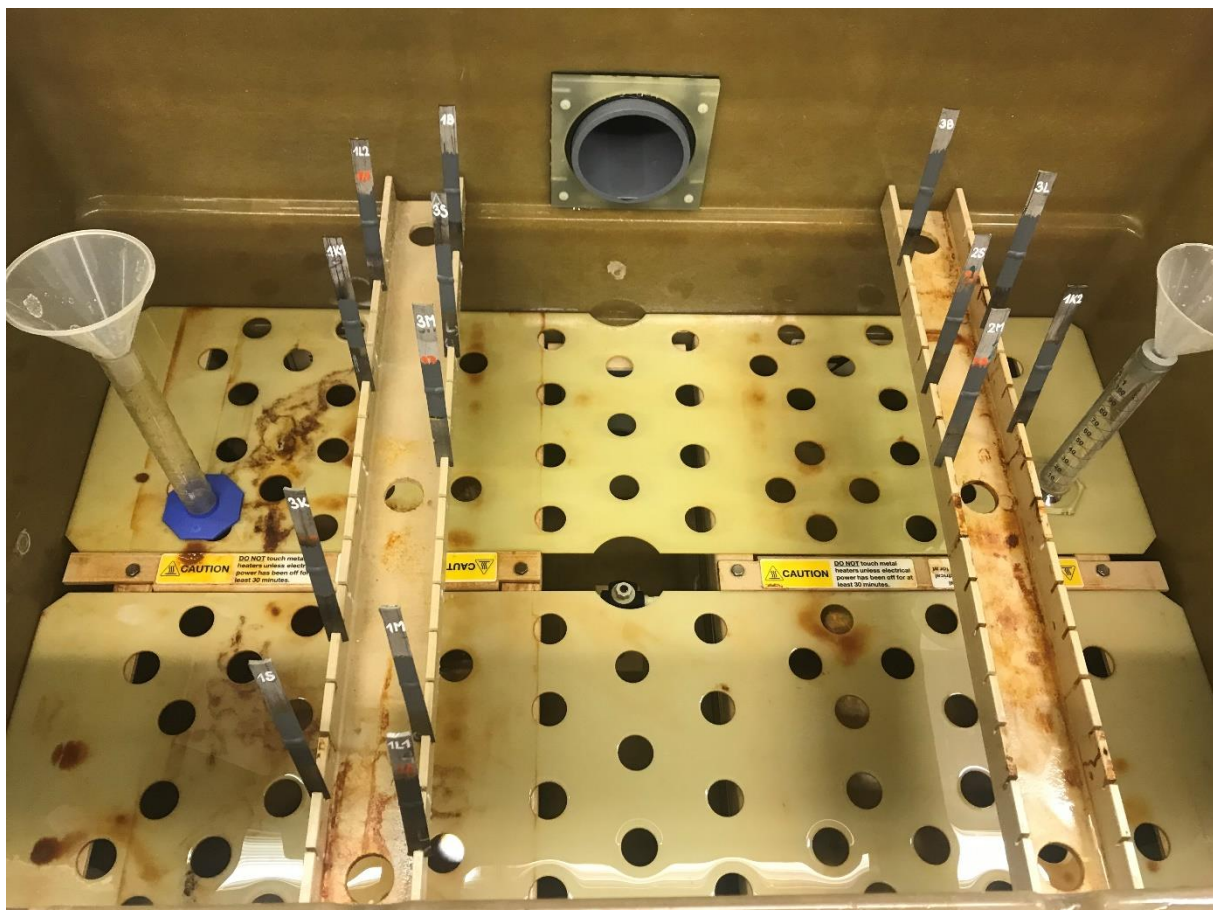


Obr. 41: Nátěrová hmota (500x)

8. Testování v solné komoře

Nejdůležitější částí celého experimentu bylo testování korozní odolnosti připravených vzorků v korozně agresivním prostředí solné mlhy. Zmíněná zkouška je definována normou ČSN EN ISO 9227: Korozní zkoušky v umělých atmosférách – Zkoušky solnou mlhou. Zkoušce korozní odolnosti byly vystaveny všechny vzorky, které jsou obsaženy v tabulce č. 8, kromě vzorku 1V, určeného pro výbrus a leptání bez nátěrové hmoty.

Vzorky byly pravidelně rozmístěny do prostoru solné komory tak, aby jednotlivé povrchové předúpravy byly zastoupeny v co nejvíce místech a nebyly tak umístěny přímo vedle sebe (Obr. 42).



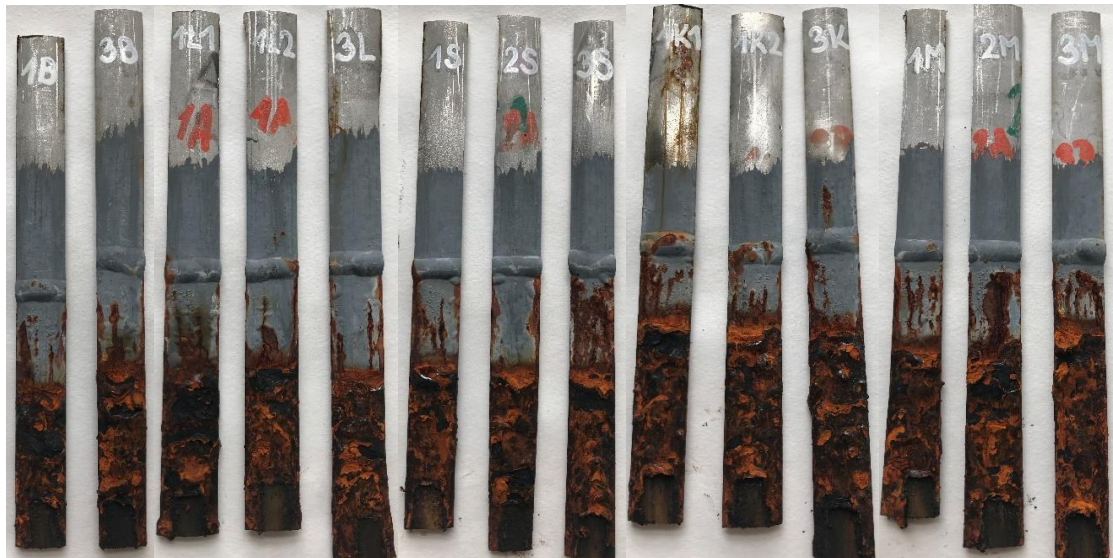
Obr. 42: Rozmístění vzorků v korozní komoře

Vzorky byly exponovány po dobu 400 hodin v neutrální solné mlze, která byla vytvořena z $5\pm 1\%$ solného roztoku. Hodnota pH solného roztoku se pohybovala v rozmezí 6,5-7,2. Teplota v solné komoře byla během testu udržována na $35\pm 2^\circ\text{C}$. Spad roztoku na sběrače o ploše velikosti 80 cm^2 byl $1,5\text{ ml/h}$.

Zkušební zařízení bylo během testu 2x otevřeno z důvodu kontroly množství spadu solného roztoku.

9. Vyhodnocení vzhledu po zkoušce

Vzhled vzorků po expozici v solné mlze byl hodnocen množstvím korozních produktů na povrchu vzorku a změnami tvaru, jako je vznik blisteringu (puchýřkování) pod vrstvou nátěrové hmoty.



Obr. 43: Vnější strana vzorků po zkoušce



Obr. 44: Vnitřní strana vzorků po zkoušce

Na první pohled lze pozorovat opravdu vysokou odolnost vůči korozi austenitické oceli 1.4541, která po testování v solné komoře nevykazovala téměř žádné známky korozního napadení, s výjimkou vzorků, které byly mechanicky očištěny pomocí brusky s drátěným kartáčem.

Procentuální množství korozních produktů na povrchu vzorku bylo hodnoceno pro vnější i vnitřní stranu zvlášť. Každá strana vzorku byla dále rozdělena na oblast austenitické oceli, oblast svaru a oblast uhlíkové oceli. Vizuální hodnocení zkorodované části je uvedeno v tabulce č. 11.

Tab. 11: Hodnocení zkorodované části

Vzorek	Vnější strana vzorku [%]			Vnitřní strana vzorku [%]		
	1.4541	svar	1.0425	1.4541	svar	1.0425
1B	1	5	45	1	10	15
3B	3	1	35	0	5	40
1L1	1	10	45	0	3	20
1L2	3	10	40	0	5	40
3L	1	3	30	0	5	20
1S	0	10	65	0	1	5
2S	0	1	30	0	1	15
3S	1	3	90	0	0	10
1K1	5	50	75	10	20	20
1K2	0	50	50	5	5	10
3K	10	10	30	30	50	30
1M	0	5	50	0	1	5
2M	0	2	70	0	5	10
3M	5	4	80	0	1	10

Výsledky jednotlivých skupin byly seřazeny podle aritmetického průměru od nejvíce po nejméně zkorodované vzorky. Nejvíce zkorodovanou skupinou vyšla sada vzorků nesoucí označení 1K1, 1K2 a 3K. Tomuto jevu přispívá fakt, že během mechanické předúpravy materiálu drátěným kartáčem byla nejspíše odstraněna či porušena pasivní vrstva kovu, a proto byla korozi napadena i austenitická ocel, která u ostatních povrchových předúprav nejevila téměř žádné známky korozního napadení. Ostatní skupiny vzorků dosáhly podstatně nižšího koeficientu zkorodované plochy. O polovinu méně byla napadena skupina vzorků 1M, 2M a 3M, dále 1B a 3B, a poté skupina 1L1, 1L2 a 3L. Nejméně zkorodovaná skupina vzorků byla označena zkratkami 1S, 2S a 3S, kdy se jednalo o ruční broušení pomocí brusného papíru.

Dále byla u testovaných vzorků hodnocena změna tvaru, konkrétně se jednalo o vznik blisteringu (puchýřkování) pod nátěrovou hmotou (Tab. 12). Toto hodnocení bylo provedeno podle francouzské normy NF EN ISO 2812-2. Fotografie znázornění četnosti a velikosti blisteringu, podle kterých byly vzorky hodnoceny jsou součástí přílohy.

Tab. 12: Hodnocení blisteringu

Vzorek	Vnější strana vzorku			Vnitřní strana vzorku		
	1.4541	svar	1.0425	1.4541	svar	1.0425
1B	-	-	5-5 (S4)	2-2 (S3)	-	-
3B	-	-	4-4 (S4)	2-2 (S2)	2-2 (S3)	4-4 (S4)
1L1	-	-	5-5 (S4)	3-3 (S2)	2-2 (S2)	5-5 (S3)
1L2	2-2 (S2)	-	-	3-3 (S2)	2-2 (S2)	5-5 (S2)
3L	-	-	2-2 (S4)	2-2 (S2)	2-2 (S2)	4-4 (S3)
1S	-	-	5-5 (S3)	-	-	4-4 (S3)
2S	-	2-2 (S2)	2-2 (S5)	2-2 (S2)	-	4-4 (S3)
3S	2-2 (S2)	-	4-4 (S4)	2-2 (S2)	-	3-3 (S3)
1K1	3-3 (S2)	3-3 (S3)	5-5 (S3)	5-5 (S3)	2-2 (S3)	5-5 (S3)
1K2	-	3-3 (S3)	5-5 (S3)	5-5 (S2)	-	3-3 (S3)
3K	3-3 (S3)	3-3 (S3)	4-4 (S3)	5-5 (S3)	2-2 (S3)	3-3 (S3)
1M	-	2-2 (S2)	5-5 (S3)	-	-	2-2 (S2)
2M	-	2-2 (S2)	5-5 (S4)	-	-	3-3 (S3)
3M	-	2-2 (S2)	5-5 (S3)	3-3 (S2)	-	3-3 (S3)

Z hodnot uvedených v tabulce je opět viditelné největší korozní napadení vzorků 1K1, 1K2 a 3K, kdy puchýřky sice nedosahovaly nejvyšší četnosti (S3), ale dosahovaly největších rozměrů (5-5).

10. Diskuze výsledků a závěr

Cílem experimentální části této bakalářské práce bylo hodnocení korozní odolnosti ocelových vzorků trubek po nanesení vrstvy nátěrové hmoty a následné porovnání vlivu zvolených předúprav povrchu materiálu na korozní odolnost. Povrchové předúpravy testovaných vzorků byly vybrány následovně. První dva vzorky (1B, 3B) nebyly nijak upravené, pouze zbavené hrubých nečistot, které by bránily v nanesení protikorozního nátěru. Vzorky 1L1, 1L2 a 3L byly zbaveny nečistot a mastnoty pouze odmaštěním pomocí ethanolu. Následují ručně očištěné vzorky brusným papírem (1S, 2S, 3S). Další byly vzorky (1K1, 1K2, 3K), které byly mechanicky očištěny bruskou s drátěným kartáčem. Pro poslední sadu vzorků (1M, 2M, 3M) byla zvolena povrchová předúprava mořením. Veškeré vzorky tří posledních zmiňovaných skupin byly zbaveny mastnoty a drobných nečistot pomocí ethanolu. Testované vzorky byly následně natřeny jednou vrstvou protikorozní nátěrové hmoty s práškovým obsahem zinku. Po řádném zaschnutí byly vzorky exponovány testování v komoře se solnou mlhou definované podle normy ČSN EN ISO 9227 po dobu 400 hodin. Po skončení testu byly vzorky vizuálně vyhodnoceny ve dvou tabulkách (Tab. 11, Tab. 12). První tabulka vyjadřuje podíl zkorodované plochy ku zdravé ploše. Nejvíce zkorodovanou skupinou vzorků byla vyhodnocena mechanická povrchová předúprava brusným kotoučem, kdy zčásti zkorodovala i austenitická ocel. Při broušení pravděpodobně došlo k odstranění pasivní vrstvy, která materiál naopak chrání před korozi. Korozní napadení zbytku vzorků se pohybovalo v podobném rozmezí, z čehož nejlépe dopadla skupina ručně broušená brusným papírem. Druhá zmiňovaná

tabulka vyjadřovala vznik blisteringu. Zde byla opět nejvíce napadena skupina (1K1, 1K2, 3K). Dále lze pozorovat větší množství puchýřků z vnitřní strany vzorku. Puchýřky byly orientovány vždy při okrajích, a tak je možné, že jejich vznik souvisí s ostrou vnitřní hranou řezaného vzorku, kde byla pravděpodobně slabší vrstva nátěrové hmoty než na zbylé ploše.

11. Závěr

Teoretická část bakalářské práce se skládala ze čtyř hlavních kapitol. V první kapitole byl popsán základní princip svařování a byl zde také vysvětlen pojem heterogenní svar. Druhá kapitola byla věnována korozní problematice svarových spojů, jako je například degradace strukturními změnami, bodová, štěrbinová, trhlinová či mezikrystalová koroze. Třetí kapitola popisovala metodiku testování korozní odolnosti svarových spojů pomocí expozičních zkoušek, elektrochemických zkoušek a nedestruktivním testováním. Poslední kapitola seznámila čtenáře s ochranou proti korozi. Jaký vliv má volba materiálu či konstrukční a technologické úpravy. Byly zde také představeny ochranné povlaky, z nichž byla největší pozornost kladena organickým povlakům, konkrétně nátěrovým hmotám, se kterými se pracovalo v experimentální části.

V experimentální části byla testována korozní odolnost zakoupené nátěrové hmoty na svařencích ocelových trubek a následně byl porovnán vliv povrchové předúpravy. Testování probíhalo v prostorách komory se solnou mlhou

Z výsledků experimentálního programu lze říct, že nezáleží na zvolené předúpravě povrchu, pokud při jejím provedení nedojde ke znehodnocení upravovaného materiálu. Podle provedených testů se mechanická úprava drátěným kartáčem jeví jako zcela nevhodná, a proto bych ji při dalším testování nedoporučovala. Ostatní zvolené metody byly o poznání lepší a svými výsledky opravdu blízké. Při jejich hodnocení rozhodovaly pouze detaily.

Z vizuálního pozorování vyplývá, že nátěrová hmota je poměrně vhodná k ochraně heterogenních svarů proti korozi. Lepších výsledků by se však dalo dosáhnout aplikací vícero vrstev, aby výsledná tloušťka nátěru byla min 100 μ m, nebo kombinace základního nátěru s vrstvou vrchního emailu. Dalšího zlepšení, by bylo možné dosáhnout volbou jiné metody nanášení, například vysokotlaké stříkání, kdy dojde k rovnoměrnému nanesení nátěrové hmoty.

Seznam literatury

- [1] BARTÁK, J., KOVAŘÍK, R., PILOUS, V., a kolektiv, *Učební texty pro evropské svářečské specialisty, praktiky a inspektory*, Ostrava, Březen 2002, ISBN 80-85771-97-7
- [2] Svařování [online]. [cit. 8.11.2019] Dostupné z:
<https://www.spszengrova.cz/texty/texty/ZAV/ZAV1-svarovani.pdf>
- [3] Svařovací metody [online]. [cit. 9.11.2019] Dostupné z:
<https://www.schinkmann.cz/svarovaci-metody>
- [4] PILOUS, V., STRÁNSKÝ, K., *Strukturní stálost návarů a svarových spojů v energetickém strojírenství*. Praha: Academia, 1989. Studie ČSAV, 1989, č. 7. ISBN: 8020000070.
- [5] AIR PRODUCTS spol. s.r.o., *Příručka svářeče*, Děčín
- [6] KUČERA, J.: *Teorie svařování I / II*. Skriptum VŠB TU Ostrava, Ostrava 1994
- [7] Heterogenní svarové spoje v energetice [online]. [cit. 8.10.2019] Dostupné z:
<http://www.allforpower.cz/UserFiles/files/2011/Koukal.pdf>
- [8] HRIVŇÁK, I. *Zváranie a zvariteľnosť materiálov* (Edícia vysokoškolských učebníc). Vyd. STU, Bratislava 2009, s. 380-444. ISBN 978-80-227-3167-6.
- [9] OP 1513-72. *Předpisy pro svařování a navařování uzlů a konstrukcí jaderných elektráren, experimentálních a výzkumných jaderných reaktorů a souborů*. Gosgortekhnadzor SSSR, Moskva, 1974.
- [10] PK 1514-72. *Předpisy pro kontrolu svarových spojů a návarů uzlů a konstrukcí jaderných elektráren, experimentálních a výzkumných jaderných reaktorů a souborů*. Gosgortekhnadzor SSSR, Moskva, 1974
- [11] SIEGL, J. a kol. *Analýza vad heterogenního svarového spoje PG*. Zpráva ČVÚT Praha FJFI, V-KMAT-878/13, ČVÚT Praha, 2013. 49 s.
- [12] ČEZ, a. s. *Interní dokumentace společnosti pro přípravu personálu v jaderných elektrárnách, Skripta primární části JE VVER 440, 1000*. Brno, 2008.
- [13] JUNEK, L. *Závěrečná zpráva k výsledkům z experimentálního programu na odřezaném vzorku s vadou z heterogenního svarového spoje z PG46*. Zpráva ÚAM Brno, 5158/13, ÚAM Brno, 2013. 12 s.
- [14] JUNEK, L., DIVIŠ, V. *Zavedení heterogenních svarových spojů do systému DIALIFE*. Zpráva ÚAM Brno, 3606/04, ÚAM Brno, 2004. 70 s.
- [15] Vyhláška č. 132/2008Sb. ze dne 4. dubna 2008. Státního úřadu pro jadernou bezpečnost, *O systému jakosti při provádění a zajišťování činností souvisejících s využíváním jaderné energie a radiačních činností a o zabezpečování jakosti vybraných zařízení s ohledem na jejich zařazení do bezpečnostních tříd*.
- [16] JUNEK, L., DIVIŠ, V., JARÝ, M. *Výzkum rizik heterogenních svarových spojů na JE a vývoj kvalifikovaných postupů jejich oprav*. Zpráva ÚAM Brno, 4880/11, ÚAM Brno, 2011. 37 s
- [17] S. K. Coburn and Y-W. Kim, *Metals Handbook*, Vol. 13, *Corrosion*, 9th ed., ASM International, Metals Park, OH, p. 515, 1987.

- [18] Degradace strukturními změnami [online]. [cit. 8.10.2019] Dostupné z: https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrOHEn2FFltCyduU87NLo-V0zoz27aFII0BA
- [19] JONES, Denny A. *Principles and prevention of corrosion*. New York: Maxwell Macmillan International Pub. Group, c1991. ISBN 0023612150.
- [20] DAVIS, J. R. *Corrosion of weldments*. Materials Park, OH: ASM International, c2006
- [21] Koroze a její rozdělení [online]. [cit. 5.11.2019] Dostupné z: <http://www.vzdelavanirikfer.cz/povrchova-uprava-kovu/koroze-a-jeji-rozdeleni>
- [22] Jak se efektivně bránit korozi nerezové oceli [online]. [cit. 5.11.2019] Dostupné z: <https://www.fasteners-cz.cz/koroze-nerezove-oceli-jak-se-ji-efektivne-branit>
- [23] Radiací indukované praskání [online]. [30.11.2019] Dostupné z: [http://enpedie.cz/wiki/Radiac%C3%AD_indukovan%C3%A9_korozn%C3%AD_prask%C3%A1n%C3%AD_\(IASCC\)](http://enpedie.cz/wiki/Radiac%C3%AD_indukovan%C3%A9_korozn%C3%AD_prask%C3%A1n%C3%AD_(IASCC))
- [24] SKÁLOVÁ, J., KOVAŘÍK, R., BENEDIKT, V., *Základní zkoušky kovových materiálů*, Západočeská univerzita v Plzni, 2010, ISBN 978-80-7043-417-8
- [25] Koroze, Střední průmyslová škola Ostrava-Vítkovice, příspěvková organizace, [online] Copyright © 2010 SciRes. [cit. 19.1.2020] dostupné z: https://www.spszengrova.cz/texty/texty/ZAV/ZAV1-Povrchove_upravy.pdf
- [26] BARTONÍČEK, Robert et al. *Koroze a protikorozi ochrana kovů*. 1. vyd. Praha: Academia, 1966.
- [27] Bc. KULHANOVÁ, Veronika, *Korozi odolnost povrchových úprav polysiloxovanými nátěrovými systémy*, Brno, 2012, Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická
- [28] TULKA, Jaromír. *Povrchové úpravy materiálů*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemické, 2005, 135 s. ISBN 80-214-3062-1.
- [29] Technicoat – Functional Coatings [online]. [cit. 13.2.2020] Dostupné z: <https://www.technicoat.cz/cs/nase-procesy/fofosfatovani/>
- [30] Bc. MARVÁNEK, Ondřej, *Systémy korozi ochrany svarových spojů konstrukčních materiálů*, Brno, 2012, Diplomová práce, Mendelova univerzita v Brně, Agronomická fakulta
- [31] Nátěrové hmoty [online]. [cit. 14.4.2020] Dostupné z: https://www.stavebniklub.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrOM1TL05UgePQTys5C3WiVhgkniCBTIj6JA
- [32] KUBÍČEK, J., *Nátěrové hmoty*, VUT FSI Brno 2018 [online]. [cit. 14.4.2020] Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hpu_renovace_a_povrchove_upravy_naterove_hmoty_2018_kubicek.pdf
- [33] ČSN EN ISO 12944-5, *Nátěrové hmoty – Protikorozi ochrana ocelových konstrukcí ochrannými nátěrovými systémy*
- [34] thyssenkrupp Materials (UK) Ltd, *Stainless Steel 1.4541, Material Data Sheet* [Online]. [cit. 25.4.2020] Dostupné z: <https://www.thyssenkrupp-materials.co.uk/stainless-steel-321-14541.html>
- [35] MakeItFrom.com – EN 1.4541 (X6CrNiTi18-10), [online]. [cit. 25.4.2020] Dostupné z: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/EN-1.4541-X6CrNiTi18-10-Stainless-Steel>

[36] Schoeller Bleckmann, Endelstahlrohr GmbH, Inspection certificate, EN 10204 3.1 ADW2, 2015

[37] Material grades, P265GH Steel [online] Copyright © 2020. [cit. 25.4.2020] Dostupné z: <https://www.materialgrades.com/p265gh-steel-heat-resistant-non-alloy-1944.html>

[38] Bc. Pastucha, Petr, ArcelorMittal Tubular Products Ostrava a.s., Inspekční certifikát, EN 10204:2004/3.1, 2015

[39] Bc. Samek, Petr, *Korozní odolnost heterogenních svarů na jaderných elektrárnách*, Plzeň, 2018, Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní

PŘÍLOHA č. 1

Hodnocení blisteringu dle NF EN ISO 2812-2

