

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

**Studijní program: N0715A270014 – Materiálové inženýrství a
výrobní technologie**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Vliv rostoucí agresivity korozního prostředí na vrubový
účinek korozního poškození svarového spoje**

Autor: Bc. Vilém Veselý

Vedoucí práce: Ing. Petr Beneš, Ph.D.

Akademický rok 2020/2021

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Vilém VESELÝ**
Osobní číslo: **S19N0135P**
Studijní program: **N0715A270014 Materiálové inženýrství a výrobní technologie**
Studijní obor: **Materiálové inženýrství a výrobní technologie**
Téma práce: **Vliv rostoucí agresivity korozního prostředí na vrubový účinek korozního poškození svarového spoje**
Zadávací katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

Zásady pro vypracování

1. Popis a rozdělení korozních jevů a jejich příčin
2. Charakteristické příčiny zvýšené korozní citlivosti svarů
3. Destruktivní a nedestruktivní metody měření
4. Návrh experimentů, definování cílů
5. Popis experimentálních metod
6. Experimentální měření na vzorcích s různým korozním napadením
7. Diskuse výsledků
8. Závěr

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

Seznam doporučené literatury:

P. Novák, *Druhy koroze kovů*, In: *Koroze a ochrana materiálu*, ročník 49, str. 75-82, VŠCHT Praha, 2005

J. R. Davis (editor), *Corrosion of weldments*. ASM International, ISBN: 978-0-87170-841-0, 2006

Kopec, B., *Nedestrukční zkoušení materiálů a konstrukcí*, CERM, Brno, ISBN 978-80-7204-591-4, 2008.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Beneš, Ph.D.**
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Konzultant diplomové práce: **Ing. Jiří Hodač**
Centrum výzkumu Řež s.r.o.

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

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



L.S.

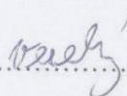
Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž, IWE
vedoucí katedry

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

V Plzni dne: 15.5.2021...

.....

podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Petru Benešovi, Ph.D. za pomoc při vedení diplomové práce. Mé poděkování patří také Ing. Jiřímu Hodačovi za spolupráci při získávání dat pro experimentální část práce, cenné rady a vstřícnost při konzultacích. Děkuji také kolektivu pracovníků na Katedře materiálů a strojírenské metalurgie a Centra výzkumu Řez. s.r.o. za odborné rady a poskytnutí přístupu do laboratoří nezbytném k tvorbě této práce.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Veselý	Jméno Vilém	
STUDIJNÍ PROGRAM	N0715A270014 – Materiálové inženýrství a výrobní technologie		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Beneš, Ph.D.	Jméno Petr	
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KMM		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Vliv rostoucí agresivity korozního prostředí na vrubový účinek korozního poškození svarového spoje		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2021
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	80	TEXTOVÁ ČÁST	67	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)	Práce se zabývá korozi heterogenních svarových spojů. Popisuje známé druhy koroze a korozních prostředí. Popisuje technologii výroby heterogenních svarových spojů a NDT metody využívané pro jejich kontrolu. V práci je navržen a proveden experiment spočívající v podrobení heterogenních svarových spojů korozním testům v modelovém prostředí kotelní vody a v prostředí kotelní vody se zvýšenou koncentrací chloridů. Následně bylo provedeno vyhodnocení pomocí rentgenové prozařovací zkoušky, ultrazvukové zkoušky phased array a metalografie. Jako ukazatel závažnosti korozního poškození bylo na svarech provedeno měření absorbované energie <i>K8</i> na Charpyho kladivu.
ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	
KLÍČOVÁ SLOVA	heterogenní svar, korozní test, koroze, kotelní voda, svarové spoje, NDT svarů, korozní prostředí, radiografická zkouška, ultrazvuková zkouška, PAUT

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Vilém	Name Veselý	
STUDY PROGRAMME	N0715A270014 - Materials Science and Manufacturing Technology		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Beneš, Ph.D.	Name Petr	
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Effect of increasing aggressiveness of the corrosion environment of corrosion damage of the welded joint with the notch		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machine Design	SUBMITTED IN	2021
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	80	TEXT PART	67	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This thesis deals with corrosion of heterogeneous welds. Describes known types of corrosion and corrosive environments. Describes the technology of production of heterogeneous welds and NDT methods used for their inspection. The thesis proposes and performs an experiment consisting in subjecting heterogeneous welds to corrosion tests in a model environment of boiler water. Subsequently, the evaluation was made by X-ray test, a phased array ultrasound test and metallography. As an indicator of the severity of corrosion was measured absorbed energy K_8 of the welds by a Charpy impact test.
KEY WORDS	heterogeneous weld, corrosion testing, corrosion, boiler water, welds, NDT of welds, corrosion environment, radiographic testing, ultrasonic testing, PAUT

Obsah

Přehled použitých zkratk a symbolů.....	3
Seznam obrázků.....	5
Seznam tabulek.....	9
1 Úvod	10
2 Koroze svarových spojů	11
2.1 Faktory ovlivňující korozi svarů.....	13
2.2 Mikrostruktura svarových spojů z pohledu koroze	13
2.2.1 Odolnost strukturních fází proti korozi	14
2.3 Druhy koroze svarů v energetických zařízeních.....	15
2.3.1 Galvanická koroze	15
2.3.2 Štěrbínová koroze	15
2.3.3 Pitting	16
2.3.4 Mezikrystalická koroze.....	16
2.3.5 Korozní praskání pod napětím.....	16
2.3.6 Korozní únava	17
2.3.7 Vodíková křehkost.....	17
2.3.8 Vodíková koroze	17
2.3.9 Mikrobiální koroze	17
2.3.10 Louhová křehkost	18
3 Korozní prostředí.....	19
3.1 Koroze v atmosféře.....	19
3.2 Koroze v půdách.....	19
3.3 Koroze v prostředí vody	19
3.4 Koroze v prostředí páry	21
3.5 Koroze v proudícím prostředí.....	21
3.6 Provozní voda energetických zařízení	21
4 Heterogenní svarové spoje.....	23
4.1 Mikrostruktura heterogenního svaru	23
4.2 Vnitřní pnutí a deformace při svařování.....	24
4.3 Vady svarových spojů	25
4.3.1 Plynové dutiny	25
4.3.2 Inkluze	25
4.3.3 Studený spoj	25
4.3.4 Kořenové vady.....	26
4.3.5 Trhliny	26
4.3.6 Vady povrchu svarů.....	27
4.4 Přídavný materiál.....	27
4.5 Technologie svařování.....	28

4.5.1	Svařování elektrickým obloukem v ochranných plynech.....	28
4.5.2	TIG	28
4.6	Vliv ochranné atmosféry na korozi	29
5	Korozní zkoušky.....	30
6	Lomová houževnatost.....	32
6.1	Zkoušení lomové houževnatosti	32
6.2	Lomová mechanika.....	32
7	NDT.....	34
7.1	Vizuální kontrola svarových spojů.....	35
7.2	Kapilární zkouška	35
7.3	Zkouška ultrazvukem	36
7.3.1	PAUT.....	37
7.4	Radiografická zkouška	37
8	Popis experimentu	40
8.1	Svařované materiály	41
8.2	Příprava vzorků	44
8.3	Korozní test	46
8.4	Vyhodnocení rentgenogramu	49
8.4.1	Výsledky měření vzorku 1.A a 1.B	50
8.4.2	Výsledky měření vzorku 1.C a 1.D	51
8.4.3	Výsledky měření vzorku 1.E a 1.F	52
8.4.4	Výsledky měření vzorku 2.A a 2.B	53
8.4.5	Výsledky měření vzorku 2.C a 2.D	54
8.4.6	Výsledky měření vzorku 2.E a 2.F	55
8.5	Vyhodnocení ultrazvukového zkoušení.....	55
8.5.1	Výsledky měření vzorku 1.A a 1.B	56
8.5.2	Výsledky měření vzorku 1.C a 1.D	58
8.5.3	Výsledky měření vzorku 1.E a 1.F	60
8.5.4	Výsledky měření vzorku 2.A a 2.B	62
8.5.5	Výsledky měření vzorku 2.C a 2.D	64
8.5.6	Výsledky měření vzorku 2.E a 2.F	66
8.6	Metalografie.....	68
8.6.1	Vzorek 1.A	68
8.6.2	Vzorek 2.A	69
8.6.3	Vzorek 1.F	70
8.6.4	Vzorek 2.F	71
8.7	Měření lomové houževnatosti	73
8.8	Diskuse	75
9	Závěr.....	77
	Reference.....	78

Přehled použitých zkratk a symbolů

NDT	–	nedestruktivní testování
PAUT	–	phased array ultrasonics testing – technika zkoušení ultrazvukem
RTG	–	Rentgenové záření
K_8	–	absorbovaná energie získaná zkouškou na Charpyho kladivu na vzorku bez vrubu s rádiusem úderníku 8 milimetrů
V	–	volt
TOO	–	tepelně ovlivněná oblast
hm. %	–	hmotnostní procento
$g \cdot l^{-1}$	–	gram na litr
$^{\circ}C$	–	stupeň celsia
pH	–	potential of hydrogen – vodíkový exponent
mm	–	milimetr
mm/rok	–	milimetr za rok
α	–	strukturní fáze alfa
α	–	koeficient teplotní roztažnosti
γ	–	strukturní fáze gama
δ	–	strukturní fáze delta
ČSN	–	česká státní norma
EN	–	evropská norma
ISO	–	mezinárodní norma
MPa	–	megapascal
A_{c3}	–	teplota počátku přeměny austenitu na ferit při chladnutí oceli
A_{c1}	–	teplota počátku rozpad austenitu na perlit při chladnutí oceli
TIG	–	metoda obloukového svařování netavnou elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu
MIG	–	metoda obloukového svařování tavnou elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu
MAG	–	metoda obloukového svařování tavnou elektrodou v ochranné atmosféře aktivního plynu

MMA	–	metoda obloukového svařování obalenou elektrodou
K_{Ic}	–	charakterizuje odolnost materiálu proti statické iniciaci křehkého porušení při rovinné deformaci v oblasti kořene trhliny
δ_c	–	hodnota rozevření trhliny v okamžiku iniciace nestabilního lomu
J_{Ic}	–	lomová houževnatost určená z J-intergrálu
σ	–	napětí v okolí nekonečně ostré trhliny
K_I	–	součinitel intenzity napětí
r	–	polární souřadnice udávající vzdálenost bodu
θ	–	úhel spojnice mezi daným bodem a počátkem polárního souřadnicového systému
σ_a	–	vnější jednoosé napětí působící na těleso s trhlinou
Y	–	geometrický faktor
c	–	měrná tepelná kapacita
C	–	poloviční délka trhliny
GPa	–	gigapascal
%	–	procento
K^{-1}	–	převrácená hodnota kelvinu
$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	–	joule na kilogram na kelvin
1D	–	jednodimenzionální/ jednorozměrná
2D	–	dvou dimenzionální/ dvou rozměrná
J	–	joule
°	–	úhlový stupeň
m	–	hmotnost
Δm	–	změna hmotnosti
g	–	gram
$R_{p0,2}$	–	smluvní mez kluzu
R_m	–	pevnost v tahu
E	–	Youngův modul pružnosti
A_5	–	tažnost

Seznam obrázků

Obrázek 1: Standardní rovnovážní potenciály kovů při 25 °C (V) [8].....	11
Obrázek 2: Princip elektrochemické koroze na povrchu oceli [3]	12
Obrázek 3: Schematická popis oblastí heterogenního svaru [4].....	23
Obrázek 4: Konstrukce svarových spojů pracujících za teplot vyšších než 350 °C [12]	28
Obrázek 5: Rozdělení korozních zkoušek [12].....	30
Obrázek 6: Schématické znázornění zvýšení dodatečné deformační energie a rozložení napětí v okolí trhliny v polonekonečné desce [19].....	33
Obrázek 7: Technika měření tupých svarů [20]	36
Obrázek 8: Výpočet pro přímý paprsek [20]	37
Obrázek 9: Výpočet pro nepřímý paprsek [20]	37
Obrázek 10: Výkres svaru dle WPS	44
Obrázek 11: Připravené svarové plochy	44
Obrázek 12: Kapilární zkouška při opravě svaru č. 2, svarové plochy jsou bez indikací, indikace na okrajích svarových ploch vznikly v důsledku přítomnosti rýh vzniklých při vybrušování	45
Obrázek 13: Označené svary před dělením, zelená šipka je na straně oceli EN P265GH a ukazuje směr měření PAUT.....	46
Obrázek 14: Ponořené vzorky v elektrolytu při zahájení korozního testu	47
Obrázek 15: Vzorek B (kotlová voda) při ukončení korozního testu.....	48
Obrázek 16: Vzorek D (kotlová voda + 0,05 % NaCl) při ukončení korozního testu ...	48
Obrázek 17: Graf hmotnostního úbytku v jednotlivých prostředích s lineární spojnici trendu tečkovaně.....	49
Obrázek 18: Vizuální hodnocení koroze, horní řada vzorky 1, dolní řada vzorky 2, seřazeny B až F zleva, strana austenitické oceli vždy na levé straně	49
Obrázek 19: RTG snímek neopravovaného svaru před (horní) a po korozních testech (dolní), 1.A výchozí stav, 1.B – kotlová voda.....	50
Obrázek 20: RTG snímek neopravovaného svaru před (horní) a po korozních testech (dolní), 1.C – kotlová voda + 0,005 % NaCl, 1.D – kotlová voda + 0,05 % NaCl	51
Obrázek 21: RTG snímek neopravovaného svaru před (horní) a po korozních testech (dolní), 1.E – kotlová voda + 0,5 % NaCl, 1.F – kotlová voda + 5 % NaCl.....	52
Obrázek 22: RTG snímek opravovaného svaru před (horní) a po korozních testech (dolní), 2.A výchozí stav, 2.B – kotlová voda.....	53
Obrázek 23: RTG snímek opravovaného svaru před (horní) a po korozních testech (dolní), 2.C – kotlová voda + 0,005 % NaCl, 2.D – kotlová voda + 0,05 % NaCl.....	54

Obrázek 24: RTG snímek opravovaného svaru před (horní) a po korozních testech (dolní), 1.E – kotlová voda + 0,5 % NaCl, 1.F – kotlová voda + 5 % NaCl.....	55
Obrázek 25: Vzorek č. 1 (zleva 1.A a 1.B) měřeno ze strany EN P265GH před korozním testem.....	56
Obrázek 26: Vzorek č. 1 (zleva 1.A a 1.B) měřeno ze strany EN P265GH po korozním testu.....	56
Obrázek 27: Vzorek č. 1 (zleva 1.A a 1.B) měřeno ze strany EN X6CrNiTi18-9 před korozním testem	57
Obrázek 28: Vzorek č. 1 (zleva 1.A a 1.B) měřeno ze strany EN X6CrNiTi18-9 po korozním testu	57
Obrázek 29: Vzorek č. 3 (zleva 1.C a 1.D) měřeno ze strany EN P265GH před korozním testem.....	58
Obrázek 30: Vzorek č. 3 (zleva 1.C a 1.D) měřeno ze strany EN P265GH po korozním testu.....	58
Obrázek 31: Vzorek č. 3 (zleva 1.C a 1.D) měřeno ze strany EN X6CrNiTi18-9 před korozním testem	59
Obrázek 32: Vzorek č. 3 (zleva 1.C a 1.D) měřeno ze strany EN X6CrNiTi18-9 po korozním testu	59
Obrázek 33: Vzorek č. 6 (zleva 1.E a 1.F) měřeno ze strany EN P265GH před korozním testem.....	60
Obrázek 34: Vzorek č. 6 (zleva 1.E a 1.F) měřeno ze strany EN P265GH po korozním testu.....	60
Obrázek 35: Vzorek č. 6 (zleva 1.E a 1.F) měřeno ze strany EN X6CrNiTi18-9 před korozním testem	61
Obrázek 36: Vzorek č. 6 (zleva 1.E a 1.F) měřeno ze strany EN X6CrNiTi18-9 po korozním testu	61
Obrázek 37: Vzorek č. 2 (zleva 2.A a 2.B) měřeno ze strany EN P265GH před korozním testem.....	62
Obrázek 38: Vzorek č. 2 (zleva 2.A a 2.B) měřeno ze strany EN P265GH, strana po korozním testu	62
Obrázek 39: Vzorek č. 2 (zleva 2.A a 2.B) měřeno ze strany EN X6CrNiTi18-9 před korozním testem	63
Obrázek 40: Vzorek č. 2 (zleva 2.A a 2.B) měřeno ze strany EN X6CrNiTi18-9 po korozním testu	63
Obrázek 41: Vzorek č. 4 (zleva 2.C a 2.D) měřeno ze strany EN P265GH před korozním testem.....	64

Obrázek 42: Vzorek č. 4 (zleva 2.C a 2.D) měřeno ze strany EN P265GH po korozním testu.....	64
Obrázek 43: Vzorek č. 4 (zleva 2.C a 2.D) měřeno ze strany EN X6CrNiTi18-9 před korozním testem	65
Obrázek 44: Vzorek č. 4 (zleva 2.C a 2.D) měřeno ze strany EN X6CrNiTi18-9 po korozním testu	65
Obrázek 45: Vzorek č. 5 (zleva 2.E a 2.F) měřeno ze strany EN P265GH před korozním testem.....	66
Obrázek 46: Vzorek č. 5 (zleva 2.E a 2.F) měřeno ze strany EN P265GH po korozním testu.....	66
Obrázek 47: Vzorek č. 5 (zleva 2.E a 2.F) měřeno ze strany EN X6CrNiTi18-9 před korozním testem	67
Obrázek 48: Vzorek č. 5 (zleva 2.E a 2.F) měřeno ze strany EN X6CrNiTi18-9 po korozním testu	67
Obrázek 49: Makrosnímek svarového spoje 1.A, neleptáno	68
Obrázek 50: Makrosnímek svarového spoje 1.A, leptadlo Marble	68
Obrázek 51: Snímek kořene svarového spoje 1.A na straně EN P265GH, zvětšeno 100x, leptadlo Marble.....	69
Obrázek 52: Snímek kořene svarového spoje 1.A na straně EN X6CrNiTi18-9, zvětšeno 100x, leptadlo Marble.....	69
Obrázek 53: Makrosnímek svarového spoje 2.A, neleptáno	69
Obrázek 54: Makrosnímek svarového spoje 2.A, leptadlo Marble	69
Obrázek 55: Snímek kořene svarového spoje 2.A na straně EN X6CrNiTi18-9, zvětšeno 100x, leptadlo Marble.....	70
Obrázek 56: Snímek kořene svarového spoje 2.A na straně EN P265GH, zvětšeno 100x, leptadlo Marble.....	70
Obrázek 57: Makrosnímek svarového spoje 1.F, neleptáno.....	70
Obrázek 58: Makrosnímek svarového spoje 1.F, leptadlo Marble.....	70
Obrázek 59: Snímek kořene svarového spoje 1.F na straně EN X6CrNiTi18-9, zvětšeno 100x, leptadlo Marble.....	71
Obrázek 60: Snímek kořene svarového spoje 1.F na straně EN P265GH, zvětšeno 100x, leptadlo Marble.....	71
Obrázek 61: Makrosnímek svarového spoje 2.F, neleptáno.....	71
Obrázek 62: Makrosnímek svarového spoje 2.F, leptadlo Marble.....	71
Obrázek 63: Snímek kořene svarového spoje 2.F na straně EN P265GH, zvětšeno 100x, leptadlo Marble.....	72

Obrázek 64: Snímek kořene svarového spoje 2.F na straně EN X6CrNiTi18-9, zvětšeno 100x, leptadlo Marble.....	72
Obrázek 65: vzorky 2.A po měření <i>K8</i>	73
Obrázek 66: vzorky 2.D po měření <i>K8</i>	73
Obrázek 67: vzorky 2.F po měření <i>K8</i>	73
Obrázek 68: Graf průměrných hodnot absorbované energie <i>K8</i> s lineární spojnicí trendu tečkovaně.....	74

Seznam tabulek

Tabulka 1: Základní třídění vad do skupin a jejich všeobecný popis.....	34
Tabulka 2: Příklad geometrických vad svaru	35
Tabulka 3: Interpretace rentgenogramu.....	38
Tabulka 4: Chemické složení oceli EN P265GH (hm.%)	41
Tabulka 5: Mechanické a fyzikální vlastnosti oceli P265GH (+N) při 20 °C.....	41
Tabulka 6: Chemické složení oceli EN X6CrNiTi18-9 (hm.%)	42
Tabulka 7: Mechanické a fyzikální vlastnosti oceli EN X6CrNiTi18-9 (+N) při 20 °C.....	42
Tabulka 8: Chemické složení přídavného materiálu OK Tigrod 16.95 (hm.%)	42
Tabulka 9: Značení vzorků.....	45
Tabulka 10: Modelové prostředí kotlové vody ($\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$).....	46
Tabulka 11: Měření hmotnostního úbytku	48
Tabulka 12: Hodnoty K_8 získané měřené na vzorcích opravovaných svarů (J)	74

1 Úvod

Pozorování vlivu agresivity korozního prostředí na vrubový účinek korozního poškození svarového spoje pomůže porozumět míře závažnosti korozního poškození svaru. Práce se zabývá zkoumáním koroze v jedné z nejkritičtějších oblastí konstrukce energetických zařízení v heterogenním svaru.

Heterogenní svary jsou tvořeny kovy s rozdílným chemickým složením, mikrostrukturou, mechanickými vlastnostmi a s rozdílnou teplotní roztažností. Kvůli rozdílnosti chemického složení heterogenního svarového spoje vzniká velký potenciál ke vzniku korozních jevů. Pro tyto spoje je charakteristická např. mezikrystalická koroze na straně austenitické nerezové oceli. Dále zde mimo jiné může docházet ke galvanické korozi nebo ke štěrbinové korozi.

Prostředí energetických zařízení je velmi příznivé pro vznik koroze. Je zde snaha korozní děje zpomalovat, nebo jim úplně předcházet. Ke zpomalování koroze v energetických zařízeních bývá používána provozní voda, která je upravena tak, aby na povrchu stěn potrubí vznikala rovnoměrná pasivační vrstva oxidů. Kromě vodního prostředí se v energetických zařízeních také setkáváme s prostředím páry.

Svary jsou v elektrárnách pravidelně kontrolovány pomocí NDT technik. Nejčastěji využívána je zkouška ultrazvukem. Hojně se také využívá prozařování rentgenovým zářením, které bylo v práci využito spolu s PAUT (phased array ultrasound testing).

Cílem práce bylo pozorovat korozní poškození heterogenních svarů v modelovém prostředí kotelní vody se zvýšenou koncentrací chloridů, popsat známé druhy korozního napadení svarových spojů a korozních prostředí v energetických zařízeních, popsat technologii svařování heterogenních svarů a NDT metody použité v experimentální části.

V experimentální části byly vzorky heterogenních svarů podrobeny korozním testům ponorem v modelovém prostředí kotelní vody a v prostředí kotelní vody se zvýšenou koncentrací chloridů. Na vzorcích před a po korozním testu bylo provedeno měření výše zmíněnými NDT metodami, čímž lze porovnat jejich účinnost při odhalování vad. Pro vyhodnocení závažnosti korozního poškození bude na vzorcích svarových spojů provedeno měření absorbované energie $K8$ na Charpyho kladivu.

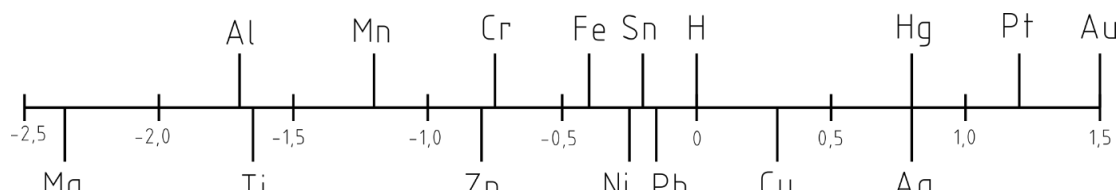
2 Koroze svarových spojů

Svařence jsou nejvíce náchylné na korozi právě v místě svarů. Svar totiž tvoří v materiálu svařence nehomogenitu, která může být iniciátorem nežádoucí koroze. Nehomogenitu můžeme vnímat více pohledy. Z pohledu mikrostruktury, vnitřního napětí v materiálu nebo z pohledu chemického složení v případě volby daného přídavného materiálu, nebo v případě heterogenních svarů.

Koroze vzniká fyzikálně-chemickým působením prostředí na materiál. Jejím působením dochází k znehodnocování materiálu a k degradaci jeho mechanických vlastností. To může vést až k selhání strojní součásti. [1]

Tzv. suchá koroze probíhá především v plynech. Její rychlost se zvyšuje s rostoucí teplotou, která urychluje chemickou reakci. Plyny mají oxidační nebo redukční povahu, Při oxidaci kov ztrácí valenční elektrony a produktem této reakce jsou oxidy. V případě koroze v redukčních plynech oxidy nevznikají. Koroze je způsobována difuzí redukujících plynů do kovu. Následně difundovaný plyn reaguje s nekovovými látkami v materiálu. Příkladem redukujícího plynu je vodík. Působením vodíku může docházet ke dvojitému poškození. K vodíkové křehkosti (viz 2.3.7) nebo k oduhličení, kdy rozpuštěný vodík v oceli reaguje s uhlíkem a tvoří uhlovodíky, což vede k vodíkové korozi (viz 2.3.8). [2]

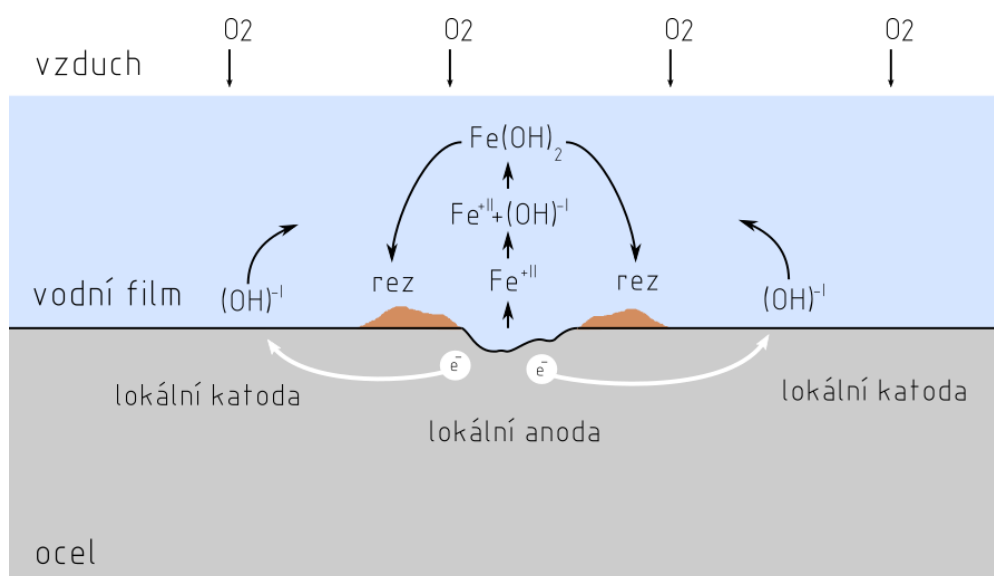
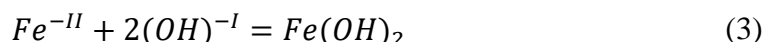
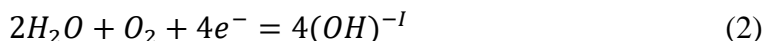
K průběhu procesu elektrochemické koroze je nutnou podmínkou přítomnost elektrolytu a vodivé spojení mezi dvěma korodujícími kovy s rozdílným potenciálem. Elektrolyt umožňuje vznik iontů a vodivé spojení kovů přenos elektronů. Ionty vznikají v elektrolytu disociací. Atomy kovu jsou vypuzovány z povrchu a přecházejí v kladně nabitě ionty. Do elektrolytu jsou vypuzovány rozpouštěcím napětím. Velikost rozpouštěcího napětí nelze změřit. Proto měříme rozdíl potenciálu mezi kovem a srovnávací vodíkovou elektrodou. Čím vyšší má kov kladný potenciál tím více je ušlechtlejší a méně reaktivní. Hodnoty elektrolytického potenciálu se však během koroze mění. Koroze se zpomaluje v důsledku polarizace, při které se zmenšuje rozdíl potenciálů. [2]



Obrázek 1: Standardní rovnovážní potenciály kovů při 25 °C (V) [8]

Každý korozní děj v elektrolytech lze rozdělit na jednotlivé reakce. Výše zmíněná oxidace se nazývá anodickou reakcí. Při anodické reakci kov ztrácí valenční elektrony, které přecházejí do ušlechtilějšího kovu s vyšším potenciálem. Ušlechtilější kov přijímá elektrony – redukuje, je to tzv. depolarizátor. Redukce se v tomto případě nazývá katodickou reakcí, tzn. že dochází k přenosu záporného náboje z materiálu do elektrolytu. [1]

Obr. 2 níže zobrazuje děje pobíhající při elektrolytické korozi v mikroměřítku ve vodním filmu na povrchu oceli. Dochází zde k přesunu elektronů z oblasti s nižší hodnotou elektrochemického potenciálu (lokální anody) do oblasti s vyšším potenciálem (lokální katody). Oxidační reakcí dochází ke vzniku kationtů železa (1). Na katodě dochází k redukci molekul kyslíku a vzniku hydroxylových aniontů (2). Kationty železa a anionty hydroxidu reagují za vzniku hydroxidu železnatého (3), ten dále reaguje s kyslíkem a vodou za vzniku korozních produktů, kterými jsou různé formy oxidů železa. [3]



Obrázek 2: Princip elektrochemické koroze na povrchu oceli [3]

Na povrchu kovových materiálů v atmosféře vznikají vrstvy oxidů. Pokud je vrstva oxidů kompaktní a stabilní, funguje jako pasivační vrstva. Vrstva vytváří bariéru mezi kovem a korozním prostředím, ten se tak neúčastní procesu koroze. Za účelem vytvoření pasivní vrstvy jsou oceli legovány např. vysokým množstvím chromu, který velmi dobře pasivuje. Pasivity lze také dosáhnout podpořením vzniku odolné vrstvy oxidů nebo jinými ochrannými vrstvami, úpravou korozního prostředí apod. [1]

2.1 Faktory ovlivňující korozi svarů

Korozi svarů ovlivňuje velké množství faktorů. Prvním ovlivnitelným faktorem je konstrukce svaru, dále správná volba svařovací metody a ochranné atmosféry, volba přídavného materiálu, případná teplota přehřevu, nebo v případě více housenek teplota interpass. Všechny výše zmíněné parametry mají vliv na finální podobu svaru a tím ovlivňují náchylnost svarů ke korozi. [4]

Faktory způsobující nežádoucí sníženou, nebo nepredikovatelnou životnost svaru vznikají v důsledku špatného návrhu, nebo nedodržení specifikací svařovacího postupu. Je to přítomnost trhlin, pórů, nedokonalé promísení přídavného materiálu a svarového kovu, vnesení vysokého zbytkové napětí a finální povrchová úprava. [4]

2.2 Mikrostruktura svarových spojů z pohledu koroze

Proces ohřevu a chladnutí utváří finální mikrostrukturu svaru, která ovlivňuje korozi svaru. Nerovnoměrné chladnutí oceli mohou doprovázet nežádoucí jevy v mikrostruktuře. V tepelně ovlivněné oblasti (TOO) může docházet k segregaci. Segregace je charakteristická pro vysoce legované oceli, kde dochází k ochuzení hranic zrn o pasivující chrom a jiné prvky. Chrom na hranicích zrn začne společně s uhlíkem precipitovat a tvořit karbidy. Dále v TOO může dojít k růstu zrna, což má za následek především pokles pevnosti svaru. Při svařování také dochází k vypařování legujících prvků, což snižuje odolnost proti korozi. Dalším nebezpečím je vnesení příliš velkého množství vodíku do svaru, znečištění svarové lázně, nebo vznik nepromísené oblasti. [4]

Některých nežádoucích jevů v mikrostruktuře se dá zbavit vhodným tepelným zpracováním, což zvyšuje náklady produkce. Tepelné zpracování po svařování lze využít i v případě potrubních systémů, kde se využívá indukčního ohřevu. Normalizační žíhání se využívá k dosažení shodných chemických, fyzikálních a mechanických vlastností. Obvykle bývá doplněno žíhání ke snížení vnitřního pnutí. V případě vzniku zakalené struktury vlivem vysoké rychlosti ochlazování může být využito popouštění. Pokud dojde

k precipitaci u austenitických ocelí, může být nasazeno austenitizační žíhání, které spočívá v ohřátí nad austenitizační teplotu tak, aby došlo k rozpuštění precipitátů v austenitu a následném rychlém ochlazení, čímž se zabrání opětné precipitaci. Dále se u austenitických ocelí využívá stabilizační žíhání, které má za úkol snížit vnitřní pnutí, čehož se dosáhne disperzním vyloučením karbidů uvnitř zrn. Normalizačním i stabilizačním žíháním předcházíme vzniku mezikrystalické koroze. [5]

2.2.1 Odolnost strukturních fází proti korozi

Legované oceli obsahují kromě fází tvořících matrici, jako ferit, austenit a základní struktury také minoritní strukturní fáze jako sulfidické vměstky MnS a $(Cr_xMn_{1-x})S$, karbidy chromu typu $(Cr_xFe_{1-x})_{23}C_6$ a $(Cr_xFe_{1-x})_7C_3$, karbidy molybdenu Mo_2C a v případě titanem stabilizovaných ocelí také nitrid, karbidy a karbonitridy titanu TiN , TiC , $Ti_4C_2S_2$, $Ti(C,N)$. Množství těchto strukturních fází v kontaktu s vnějším prostředím má významný vliv na její korozivzdornost. [6]

V prostředí HNO_3 (20 hm.%) + HF (2,5 hm.%) při teplotě $35\text{ }^\circ C$ po dobu 20 minut dochází k velmi významnému rozpouštění titanu. Obdobný úbytek lze pozorovat i u minoritních fází obsahujících molybden, uhlík a síru. U železa, chromu a niklu naopak dochází k velmi malému úbytku. Karbidy chromu typu $(Cr_xFe_{1-x})_{23}C_6$ a $(Cr_xFe_{1-x})_7C_3$ pasivují a jsou stabilní. [6]

V prostředí HCl (20 hm.%) při teplotě $50\text{ }^\circ C$ po dobu 30 minut dochází k podstatnému úbytku fází tvořených železem, chromem a niklem. Dále dochází k mírnému úbytku molybdenu a síry. Karbidy chromu se zcela rozpouštějí a dochází k částečnému napadení fáze $Ti_4C_2S_2$, zatímco karbidy TiC a nitridy TiN zůstávají stabilní. [6]

V prostředí HNO_3 (65 hm.%) při teplotě bodu varu po dobu 60 minut dochází k velkému úbytku uhlíku a síry. Podstatně se snižuje obsah železa titanu a molybdenu. Chrom a jeho karbidy v tomto prostředí zůstávají stabilní stejně jako nitrid TiN . TiC a $Ti_4C_2S_2$ společně s fázemi obsahujícími molybden jsou částečně rozpuštěny. Stejně děje lze pozorovat také v prostředí HNO_3 (20 hm.%) při teplotě $80\text{ }^\circ C$ po dobu 60 minut. [6]

V prostředí $KMnO_4$ ($30\text{ g}\cdot l^{-1}$) + $NaOH$ ($50\text{ g}\cdot l^{-1}$) při teplotě $90\text{ }^\circ C$ po dobu 30 minut dochází k mírnému rozpouštění všech fází. Pouze dusík zůstává zachován. [6]

Chemie provozních vod by měla zajistit rozpuštění všech minoritních fází na povrchu nerezové oceli, což umožní vznik rovnoměrné pasivační vrstvy a předejde vzniku selektivní koroze. Nesprávná chemie provozní vody může zvýšit náchylnost nerezových ocelí ke korozi. Sulfidické fáze v titanem stabilizovaných nerezových ocelích jsou mnohem více stabilní za vyšších teplot vody. Sulfidy zde při rozpouštění vytvářejí o něco méně iontů oproti nestabilizovaným ocelím. [6]

2.3 Druhy koroze svarů v energetických zařízeních

K některým druhům koroze jsou svary obzvláště náchylné. A to k těm, které vznikají při výskytu mikrostrukturní nebo chemické nehomogenity, ale i nehomogenity z hlediska vnitřního napětí. Pokud se bavíme o korozi svarů v potrubních systémech. Jedná se převážně o korozi v elektrolytech. Často se jedná o souběžné působení více korozních dějů. [2]

2.3.1 Galvanická koroze

Galvanické korozi je umožněno probíhat díky koroznímu prostředí, které plní funkci elektrolytu. Příčinou vzniku galvanické koroze může být několik. Může vzniknout při vodivém spojení dvou různě ušlechtilých kovů, nebo také dvou rozdílných strukturních fází v elektrolytu. Vzniká tzv. bimetalický článek. Tento článek může vzniknout také mezi dvěma zrními tuhého roztoku stejné strukturní fáze v důsledku koncentračního gradientu mezi zrními. Dále může být příčinou nerovnoměrný kontakt s korozním prostředím. Vzniká tzv. koncentrační článek. [7]

2.3.2 Štěrbínová koroze

Štěrbínová koroze vzniká v místech, kde kvůli tvaru součásti dochází ke špatnému oběhu korozního prostředí a k nerovnoměrnému přístupu kyslíku k celému povrchu součásti. V místě štěrbin dochází ke změně koncentrace elektrolytu. Obsažený kyslík je spotřebován na tvorbu oxidů. K dalšímu přísunu kyslíku do štěrbin však nedochází a ve štěrbině se zvyšuje agresivita elektrolytu. Stěny štěrbin se nejsou schopny dále pasivovat a stávají se anodou. Kov zajišťuje přesun elektronů ze štěrbin k jejímu ústí a ústí štěrbin se stává katodou. Ve štěrbině dochází k rozpouštění kovu, resp. ke vzniku kationtů kovu, které migrují ke katodě a podílejí se na utváření vnější pasivní vrstvy. [7]

2.3.3 Pitting

Pitting nebo také bodová koroze jsou charakteristické pro kovy, které se snadno pasivují. Těmi jsou především železo a chrom, a tedy i korozi-vzdorné oceli. Vzniká především v prostředí obsahujícím chloridové ionty Cl^- , v případě poškození ochranné pasivní vrstvy. Vznikají hluboké důlky s úzkým hrdlem. Procesy probíhající při bodové korozi jsou v podstatě shodné s procesy probíhajícími při štěrbinové korozi. Rozdílem je příčina jejich vzniku. Tento druh koroze může vést až k penetraci stěny součásti. [7]

Vztah termínu bodová a důlková koroze není v literatuře zcela jednoznačný. Anglický výraz pitting popisuje lokalizované napadení korozi-vzdorných ocelí nebo slitin hliníku. Tento výraz je do češtiny překládán jako bodová koroze. Důlková koroze je lokální koroze, jejíž příčinou mohou být jakékoliv druhy korozi-vzdorného napadení, které mají za následek vznik důlků. [7]

2.3.4 Mezikrystalická koroze

Vyskytuje se u korozi-vzdorných austenitických ocelí tam, kde dojde k ochuzení povrchu zrn o chrom pod 12 hm.%, což je hranice pasivovatelnosti. K ochuzení hranic zrn o chrom dochází precipitací karbidů chromu ohřevem oceli na teploty v oblasti 500 °C až 800 °C, k čemuž během svařování nepochybně dochází. Hranice zrn tak dříve podléhají korozi. Karbidy a vzniklou chemickou nerovnováhu v oceli lze odstranit vhodným druhem tepelného zpracování. Mezikrystalická koroze je nebezpečná zejména kvůli obtížnosti jejího odhalení. Nelze ji objevit vizuálním pozorováním. [2, 7]

2.3.5 Korozi-vzdorné praskání pod napětím

Napěťová koroze, resp. korozi-vzdorné praskání pod napětím je způsobeno působením korozi-vzdorného prostředí a statického tahového napětí. Napětí působí jako hnací síla vznikajících trhlin, které se mohou šířit interkrystalicky i transkrystalicky. Častým prostředím, kde dochází k iniciaci trhliny jsou korozi-vzdorné důlky. Působící napětí může být vnější, mnohdy však dostačuje napětí vnitřní pocházející například od svarového spoje. Ochranným opatřením proti korozi-vzdornému praskání je tepelné zpracování na odstranění vnitřního pnutí. [1]

2.3.6 Korozní únava

Korozní únava se od korozního praskání liší tím, že nevzniká za působení statického napětí, ale působením napětí v cyklech. Pro praskliny vzniklé korozní únavou je charakteristické, že se šíří z nehomogenit na povrchu. Trhliny se obvykle šíří transkrystalicky. [1]

2.3.7 Vodíková křehkost

Vodíková koroze je způsobena pronikáním atomárního vodíku do krystalové mřížky kovu. Atomární vodík se může do mřížky dostat díky jeho velikost při katodické redukci iontů vodíku např. při nevhodně provedeném galvanickém pokovování nebo termickou disociací molekul vodíku, uhlovodíků a vody např. při svařování ve vlhkém prostředí, vlhkou elektrodou apod. Vodík snadno difunduje hlouběji do oceli. Tam se hromadí v trhlinách, v pórech, vměstcích, na hranicích zrn, ale i v mřížkových poruchách. Tyto místa se nazývají „vodíkové pasti“. Hromaděním vodíku v těchto prostorech a jeho přechod do molekulární formy zapříčiňuje vznik vysokých lokálních tlaků v materiálu, to vede ke ztrátě pevnosti materiálu. Obecně, těsná uspořádání krystalové mřížky (ferit) jsou více náchylné k vodíkové křehkosti, než struktury s méně těsným uspořádáním (austenit). [8, 2]

2.3.8 Vodíková koroze

Vodíková koroze vzniká reakcí vodíku vzniklého korozní reakcí s uhlíkem obsaženým v karbidech železa. Dochází k ní především v kyselých prostředích. Produktem reakce je metan, který vzniká mezi úsadami a kovem. Dochází tak k oduhličení oceli a k poklesu její pevnosti. Akumulující se metan pod úsadami způsobuje mikrotrhliny v kovu. To může vést až k penetraci stěny potrubí. [1]

2.3.9 Mikrobiální koroze

Mikrobiální koroze je způsobena přítomností některých bakterií. Ty samy o sobě korozi nezpůsobují. Jsou součástí korozních dějů a podporují je. Bakterie na povrchu součásti tvoří biofilm, který zpomaluje přísun kyslíku k povrchu. To může způsobit tvorbu koncentračních článků. Dále korozi může podpořit působení kyselých produktů pocházející z činnosti bakteriálního metabolismu. [9]

Pro vznik biofilmu je velmi vhodné prostředí chladících okruhů energetických zařízení. Parovodní okruhy jsou chráněny díky vysoké provozní teplotě. K zabránění

mikrobiální koroze se využívají biocidy. Využívané sloučeniny s biocidním účinkem jsou kyselina chlorná a kyselina bromná. [1]

2.3.10 Louhová křehkost

Louhová křehkost je způsobována přítomností hydroxidu sodného. Při jeho přítomnosti dochází ke zvyšování pH a k rozpouštění pasivační vrstvy oxidu železnato-železitého, známého jako magnetit, a také k mezikrystalické korozi. U vysoce legovaných ocelí může přítomnost hydroxidu sodného vést ke korozi transkrystalické. Na louhovou křehkost jsou náchylné především oblasti se zvýšeným vnitřním napětím, které může být hnací silou trhlin při korozním praskání, jak je uvedeno v části 2.3.5. [10]

Korozní praskání vlivem přítomnosti hydroxidu sodného je časté u ocelových energetických zařízení. Roztoky hydroxidu sodného jsou používány při úpravě napájecí, resp. kotlové vody. Hydroxid je pak zanesen z odpařovacího zařízení do kotelního systému, kde rozrušuje potrubí přehříváků. Odolnost feritických korozivzdorných ocelí je v tomto případě stejná jako u nelegovaných ocelí. Za vyšších teplot je koroze feritických korozivzdorných ocelí dokonce vyšší. Vysokou odolnost mají austenitické korozivzdorné oceli. [10]

3 Korozní prostředí

Koroze se z hlediska korozního prostředí dělí na korozi atmosférickou, korozi v kapalinách, v plynech, v půdách. Práce se zabývá svary v energetických zařízeních. U těch se nejčastěji setkáváme s prostředími, jako je voda, provozní vody, přehřátá vodní pára, resp. pára provozních vod. Prostředí v potrubních systémech dále ovlivňují jevy fyzikální povahy, které zrychlují, nebo jinak ovlivňují korozi, jako např. zvýšené teploty a proudící prostředí. [2]

3.1 Koroze v atmosféře

Pro atmosférickou korozi je zásadním činitelem kyslík, vzdušná vlhkost a přítomnost nečistot, jako jsou sulfany, sulfidy, chloridy, oxidy, azany, nebo popílek, či prach. Rychlost koroze je určována stupněm ovlhčení povrchu kovu. Stupeň ovlhčení je dán tloušťkou kondenzované vrstvy a frekvencí dosahování rosného bodu v dané atmosféře. V atmosféře dochází k elektrochemické korozi, pokud je kovový povrch pokryt vrstvou elektrolytu. K tomu dochází, pokud je dosažené kritické korozní vlhkosti resp. 60 % relativní vlhkosti. Tloušťka takto vzniklé vrstvy je 0,005 až 0,150 mm. Rychlost průběhu koroze v atmosféře lze odhadnout na základě měření výše zmíněných faktorů. Systém klasifikace korozní agresivity atmosférických prostředí definuje norma ČSN EN ISO 9223 Koroze kovů a slitin – Korozní agresivita atmosfér – Klasifikace, stanovení a odhad. [2]

3.2 Koroze v půdách

Půda je tvořena pevnou, kapalnou a plynnou fází. V půdě tak vzniká elektrolyt, jehož agresivita je ovlivněna složením půdy. Agresivitu také zvyšuje přítomnost bakterií, které způsobují mikrobiální korozi. K ochraně kovu v půdě se používá kromě bariérové ochrany (ochranné povrchy, nátěry, izolace) také katodická ochrana. Katodické ochrany je dosaženo vnějším zdrojem proudu, nebo obětovanou anodou, která je vodivě spojena s chráněním kovem a je tvořena méně elektrochemicky ušlechtilým kovem. Díky tomu dojde k jejímu rozpouštění, k anodické reakci, čímž se vytvoří potřebný elektrický proud k zastavení rozpouštění chráněného kovu. [2]

3.3 Koroze v prostředí vody

Koroze v prostředí vody není způsobena vodou samotnou, ale zejména příměsemi ve vodě rozpuštěnými. Pro posouzení agresivity vody je třeba znát její přesné chemické složení. Příměsemi ovlivňujícími agresivitu mohou být plyny, rozpuštěné soli, organické

látky, ale také mikroorganismy, které svými metabolickými procesy mění chemii vody. Mezi sledované veličiny, díky kterým se dá posoudit agresivita vody, resp. vodného roztoku patří pH, které popisuje množství oxoniových iontů H_3O^+ v roztoku dle vzorce (4). Tvrdost vody, která je ovlivněna chloridy, sírany, hydrogenuhličitanu, a dusičnany alkalických zemin, především hořčíku a vápníku, které mají významný vliv na tvorbu úsad a na korozi. Vodivost, je ukazatelem množství rozpuštěných solí, tzv. solnosti vody. [10]

$$pH = -\log (a_{H_3O^+}) \quad (4)$$

Kyslík je z hlediska koroze nejvýznamnější plynná příměs ve vodě. Zapříčiňuje korozi, ale zároveň je nezbytný pro vytvoření pasivačních oxidických vrstev, které další korozi zmírňují či zastavují. Pokud však dojde k pokrytí vnitřní stěny potrubí úsadami, které zapříčiní nerovnoměrný přísun kyslíku k povrchu, vznikne tzv. korozní články s diferenční aerací. Z počátku koroduje povrch pod úsadou i povrch bez úsad stejnou rychlostí. Z důvodu většího přístupu kyslíku k povrchu bez úsad začne převládat redukce kyslíku. Tento povrch začíná fungovat jako katoda a dochází k migraci aniontů. U povrchu pod úsadou se koncentrace aniontů zvyšuje, povrch pod úsadou se stává anodou a rozpouští se. Tento druh koroze je velmi intenzivní a může způsobit perforaci stěny potrubí. Častěji se vyskytuje v potrubí, kde je tlustá vrstva oxidů a úsad. [10] [8]

Rychlost koroze železa v neprovzdušněné vodě za pokojové teploty je cca 0,005 mm/rok. Rychlost koroze železa ve vodě nasycené kyslíkem je proměnlivá. Z počátku cca 0,5 mm/rok. Později již vzniklá pasivační vrstva oxidů zamezuje přístupu kyslíku, který se tak ke kovu dostává pouze difuzí. Rychlost koroze se ustálí mezi 0,05 – 0,125 mm/rok. Martenzitické a feritické korozivzdorné oceli tvoří na povrchu velmi stabilní pasivační vrstvy. Čisté vodě s vysokým obsahem kyslíku velmi dobře odolávají. Austenitické oceli mají v takovéto vodě tendence ke koroznímu praskání. [10]

Pokud voda obsahuje soli, mění se pH a zvyšuje elektrická vodivost. Přítomnost soli může vést k podpoření vzniku pasivační ochranné vrstvy, nebo ke zmenšení počtu korozních ložisek, koroze ale v tomto případě proniká hlouběji. Přítomnost chloridů bývá často příčinou bodové koroze u korozivzdorných chromových ocelí a příčinou korozního praskání u austenitických ocelí. [10]

3.4 Koroze v prostředí páry

V prostředí páry dochází z důvodu vysoké teploty k tzv. suché korozi, resp. k chemické korozi. V potrubí vzniká díky přítomnosti malého množství kyslíku kompaktní pasivační vrstva magnetitu, která zamezuje další korozi. Přeměna povrchu kovu na vrstvu magnetitu je provázána vznikem vodíku. Pokud je v okruhu vysoký obsah kyslíku, vzniká porézní snadno rozrušitelná vrstva oxidů. Vlivem proudění dochází k rozrušení této vrstvy a vzniká nebezpečí důlkové koroze. Při nízkých obsazích solí dochází na povrchu magnetitu ke vzniku další vrstvy oxidů železa ($\alpha - \text{Fe}_2\text{O}_3$, nebo $\gamma - \text{FeOOH}$). Takto vzniklé oxidy jsou kompaktní a dále snižují rozpustnost pasivační, v tomto případě, dvojvrstvy. [1]

Vliv kyslíku přítomného kyslíku se snižuje s rostoucí ušlechtilostí použité oceli. Nejvýznamnější je u uhlíkových ocelí, ty mají ale v případě omezení přítomnosti kyslíku vlastnosti srovnatelné s ocelmi austenitickými. Rychlost vzniku korozní vrstvy je ovlivňována teplotou. Nejvyšší je při teplotě okolo 150 °C. Nad teplotou 200 °C je přeměna povrchu kovu téměř okamžitá. [1]

Při odpařování kotlové vody dochází ke zvýšení koncentrace solí u stěn potrubí, to umožňuje vznik nežádoucích korozních jevů. V případě přítomnosti nánosu dochází ke zkoncentrování solí pod nánosem, čímž vzniká extrémně korozivní prostředí. Může zde dojít ke vzniku vodíkové koroze a louhového křehkosti. [1]

3.5 Koroze v proudícím prostředí

Proudění vody, nebo páry urychluje korozi. Urychluje totiž přísun reakčních složek k povrchu kovu. Pokud je rychlost proudění příliš vysoká, může docházet k erozi pasivačních vrstev, čímž se rychlost koroze opět zvyšuje. Proudění má také zásadní vliv na druh korozního napadení. Pro pomalé proudění je typická lokální koroze podpořená úsadami. Pro vyšší rychlosti se koroze stává rovnoměrnější kvůli odplavování úsad. [10]

3.6 Provozní voda energetických zařízení

Napájecí voda energetických zařízení je navržena tak, aby v co největší možné míře zpomalovala korozi nebo podporovala tvorbu pasivační vrstvy. Požadavky na kvalitu vody v energetických zařízeních popisují normy:

- ČSN 07 7401 – Voda a pára pro tepelná zařízení s pracovním tlakem páry do 8 Mpa

- ČSN 07 7403 – Voda a pára pro tepelná zařízení s pracovním tlakem páry 8 MPa a vyšším
- ČSN EN 12952-12 – Vodotrubné kotle a pomocná zařízení – Část 12: Požadavky na kvalitu napájecí vody a kotelní vody

Koroze klesá se snižující se koncentrací kyslíku a s růstem pH. Úpravy vody se dosahuje různými korekčními prostředky. Vody se alkalizují a upravuje se obsah rozpuštěného kyslíku. Mezi korekční složky patří fosforečnan sodný s hydroxidem sodným, kde při špatném poměru sodíku a fosforu hrozí vznik příliš agresivního, nebo příliš alkalického prostředí. Hydroxid lithný s hydroxidem sodným, kde je nebezpečí vzniku louhové koroze. Amoniak, hydrazin a další alternativní prostředky obsahující vysokomolekulární aminy. [1]

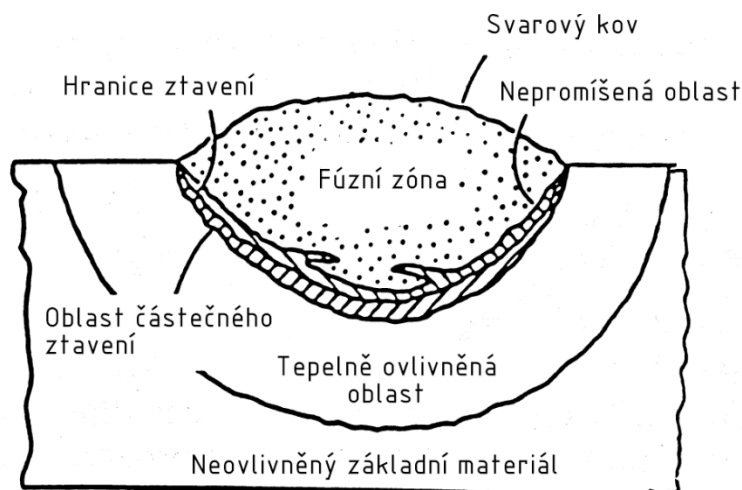
4 Heterogenní svarové spoje

Heterogenní svarové spoje jsou jedním z nejkritičtějších míst každého energetického zařízení. Jsou tvořeny kovy s rozdílným chemickým složením, mikrostrukturou, mechanickými vlastnostmi, s rozdílnými požadavky na tepelné zpracování po svařování, či s jiným koeficientem teplotní roztažnosti. [11]

Svařováním ocelí různého chemického složení a rozdílných strukturních bází (austenit – ferit) dochází k degradaci jedné nebo obou svařovaných ocelí. Smíšením přídavného materiálu a svařovaných kovů vzniká tzv. fúzní zóna s odlišným chemickým složením, a tedy i mechanickými a fyzikálními vlastnostmi. Při tepelném zpracování, nebo v případě, že provozní teplota svarů je vyšší než 350 °C, dochází k urychlení difuzních pochodů uhlíku. Urychlená difuze má za následek vznik nauhličených a oduhličených pásem, což má opět za následek lokální pokles mechanických vlastností, korozních vlastností a snížení spolehlivosti a životnosti svarového spoje. [12]

4.1 Mikrostruktura heterogenního svaru

V mikrostrukturu svarového spoje se vlivem svařování objevují mikrostrukturní nehomogenity. Je popsáno pět mikrostrukturně rozdílných oblastí. Fúzní zóna, nepromíšená oblast (část fúzní zóny), oblast částečného ztavení (část TOO), tepelně ovlivněná oblast a neovlivněná základní kov (obr. 3). [4]



Obrázek 3: Schematická popis oblastí heterogenního svaru [4]

Fúzní zóna je výsledkem tavení a promísení základního kovu a přídavného materiálu. Tato oblast se obvykle liší od základního kovu svým chemickým složením a může tak spolu se základním kovem tvořit galvanický korozní článek. Galvanický

korozní mikročlánek může ve fúzní zóně vznikat také kvůli mikrosegregaci, ke které může dojít během tuhnutí. Na hranici fúzní zóny vzniká nepromíšená oblast, kde došlo k natavení základního kovu a k jeho rychlému ztuhnutí. Chemické složení této oblasti se velmi přibližuje chemickému složení základního kovu. [4]

Tepelně ovlivněná oblast (TOO) začíná hranicí ztavení. Je to část svarového spoje, ve které vlivem vysoké teploty nedošlo k roztavení kovu, ale proběhly zde mikrostrukturní změny. Část TOO označená jako oblast částečného ztavení, je obvykle široká jedno až dvě zrna. Dochází zde k natavení hranic zrn. To může vést ke vzniku trhlin. V této oblasti je také vysoký potenciál k indukci vodíku do svaru, což má za následek vznik vodíkové křehkosti. Tato oblast je dobře zřetelná např. u chromniklových austenitických ocelí. Oblast je chemicky nestejnorodá a obsahuje nečistoty. [4, 5]

Přehřátá oblast se zhrubnutým zrnem je část TOO, kde došlo k ohřevu nad teplotu A_{c3} . Dochází zde k výraznému růstu primárních zrn, což má za následek pokles pevnosti. V případě, že dojde k prudkému ochlazení a je zde přítomno dostatečné množství uhlíku, dochází zde ke vzniku martenzitické struktury. Pokud je v této oblasti malé množství uhlíku, dochází k vylučování feritu ve štěpných rovinách austenitu a vzniká Widmannstättenova mikrostruktura. Oblast krátkodobě ohřátá na teplotu A_{c3} při svařování prochází úplnou polymorfni přeměnou z feritu na austenit a zpět na ferit. Tento proces odpovídá normalizačnímu žíhání. Vzniká zde stejnoměrná jemnozrná struktura. Dále v oblasti mezi A_{c3} a A_{c1} dochází k neúplné polymorfni přeměně. V oblastech pod A_{c1} probíhají pouze rekrystalizační procesy. Může zde docházet k poklesu plasticity, k tzv. stárnutí oceli, ke kterému dochází precipitací nitridů a karbonitridům z volného intersticiálního dusíku obsaženého v oceli. [5, 12]

4.2 Vnitřní pnutí a deformace při svařování

Přivedené teplo do svarového spoje vnáší pnutí a deformace, a to především kvůli teplotní roztažnosti kovů. Vnesené napětí může být dočasné a po vyrovnání teplot vymizet, nebo může přetrvat i po ochlazení jako zbytkové vnitřní napětí. Deformacím a zbytkovému vnitřnímu napětí nelze zabránit, lze je pouze snížit konstrukčními a technologickými opatřeními. [5]

Vnitřní zbytkové napětí je dvojího charakteru. Napětí teplotní, které vzniká, když neohřátý základní kov zamezuje objemovému zvětšování ohřátého svarového kovu a napětí strukturní, vznikající při strukturních přeměnách, při kterých dochází ke změně

objemu strukturních fází. Vnitřní napětí se po svařování může navenek projevit jako smrštění, nebo jako trhliny. V důsledku smrštění vznikají podélné, příčné a úhlové deformace. Vznik trhlín může být zapříčiněn několika jevy viz kapitola 4.3.5 [5]

4.3 Vady svarových spojů

V průběhu svařování se mohou vyskytnout vady různého původu a charakteru. Mohou se vyskytovat v celém průřezu svaru od svarového kovu přes TOO až k základnímu kovu. Příčinou vzniku vad může být špatná volba svařovacích parametrů, špatná volba svařovaných a přídavných materiálů, nebo špatná příprava svarových ploch. Dále se práce zabývá pouze vadami, které mají vliv na pevnost svarového spoje. [5]

Vady, které zapříčiňují zmenšení průřezu svaru, přirozeně snižuje pevnost spoje. Vady také fungují jako koncentrátoři napětí. Tím se snižuje lomová houževnatost svaru. Z hlediska koroze jsou nebezpečné vady, které se vyskytují na povrchu, těsně pod ním, nebo na něj vystupují. Vada vystupující na povrch je ideálním místem ke vzniku štěrbinové koroze. Nerovnost povrchu svarového spoje může také zvýšit míru ulpívání úsad a tím ke vzniku s tím spojených korozních jevů.

4.3.1 Plynové dutiny

Povrchové nečistoty na svarových plochách, vysoký obsah uhlíku, síry a fosforu, špatně vysušené elektrody, vlhkost plynu, nedostatečná ochranná atmosféra nebo příliš velký oblouk mohou způsobit plynové dutiny – bubliny a póry. Bubliny mají kulovitý tvar, póry protáhlý. Přítomnost plynu při tuhnutí zajistí, že jsou stěny těchto vad hladké. Mohou se vyskytovat jednotlivě, vyřádkované, nebo jako shluky. [5, 13]

4.3.2 Inkluze

Nepravidelné útvary uzavřené ve svarovém kovu jsou inkluze. Mohou být různého typu. Oxidické vměstky vznikají při špatném očištění povrchu svarových ploch. Struskové vměstky vznikají především při špatném očištění povrchu předchozí housenky, v případě, kdy struska předběhne oblouk. [5, 13]

4.3.3 Studený spoj

Příliš nízký svařovací proud, nesprávné vedení, nebo nesprávně zvolený druh elektrody mohou zapříčinit, že nedojde k dokonalému tavnému spojení svarového kovu a základního materiálu. Vzniká tzv. studený spoj. [5, 13]

4.3.4 Kořenové vady

V případě že nedojde k úplnému provaření základního materiálu či svarových housenek, vznikají neprůvary. Hlavní příčinou bývá vysoká rychlost svařování, nízký proud, nevhodně upravené svarové plochy předběhnutí svarové lázně nebo malý průměr elektrody. Dalšími vadami kořene jsou prohloubené svary v kořeni, nebo krápníky, které vznikají, když je mezera mezi svařovanými materiály příliš velká nebo pokud je příliš vysoký svařovací proud. [5, 13]

4.3.5 Trhliny

Trhliny vznikají z několika příčin. Popsány jsou trhliny vznikající za horka (krystalizační, likvační, polygonizační) a za studena (vodíkem indukované, žíhací, lamelární). Krystalizační trhliny vznikají v průběhu krystalizace ve svarovém kovu z důvodu snížení tažnosti při teplotě tuhnutí. Likvační trhliny vznikají ve svarovém kovu i TOO základního materiálu. Vznikají za vysokých teplot v podhousenkovém pásmu TOO nebo mezi housenkami svarového kovu. Krystalizační a likvační trhliny vznikají kvůli přítomnosti síry a fosforu, které tvoří nízkotavitelný sulfid FeS a fosfid Fe_3P . Zvýšené odolnosti proti trhlínám se dosahuje omezením obsahu těchto prvků. Doporučen je obsah menší než 0,02 hm.%. Síru lze také navázat na mangan. Žádaný poměr manganu ku síře je větší než 3. Polygonizační trhliny vznikají v austenitických ocelích a mají souvislost s dislokačním mechanismem. V důsledku tahových napětí vyvolaných vlivem ochlazování a tuhnutí dochází ke zvyšování hustoty dislokací, které začnou tvořit polygonizační síť, čímž vytvoří polygonální subzrna. Takto uspořádané dislokace zamezují pohybu dalších dislokací a v případě zvyšování napětí vznikají mezikrystalické trhliny. [12, 14]

Studené vodíkem indukované trhliny jsou výsledkem působení několika faktorů. Vznikají v základních mikrostrukturách v případě vysoké lokální koncentrace vodíku, který vyvolá vznik vysokých lokálních napětí. Vznikají při teplotách okolo 200 °C v oblasti pod housenkou, mohou ale také vyskytovat v oblasti kořene svaru a v oblasti svarového kovu. Mají transkrystalický charakter, jejich povrch na rozdíl od trhlín vznikajících za horka neobsahuje oxidy. [12, 14]

Žíhací trhliny vznikají v průběhu tepelného zpracování svarových spojů v oblasti 200 až 300 °C při vysoké rychlosti ohřevu a za přítomnosti napětí vyvolaného rozdílem teplot jádra a povrchu zpracovávaného kovu. Při vyšších teplotách 600 až 650 °C mohou

vznikat tzv. klasické žíhací trhliny, typicky v zóně pod housenkou v oblasti zhrublého zrna, která je tvořeno základnou mikrostrukturou. Dále mohou tyto trhliny vznikat u konstrukčních ocelích pod návary z nerezových ocelí. [12, 14]

Lamelární trhliny vznikají v TOO nebo v základním materiálu. Je pro ně charakteristický stupňovitý tvar. Trhliny bývají rovnoběžné s povrchem svařovaných plechů. Příčinou jejich vzniku bývá přítomnost shluků řádků nekovových vměstků, nebo přítomnost již vzniklých trhlín jiného původu. Vznikají v případě namáhání svaru ve směru jeho hloubky. [12, 14]

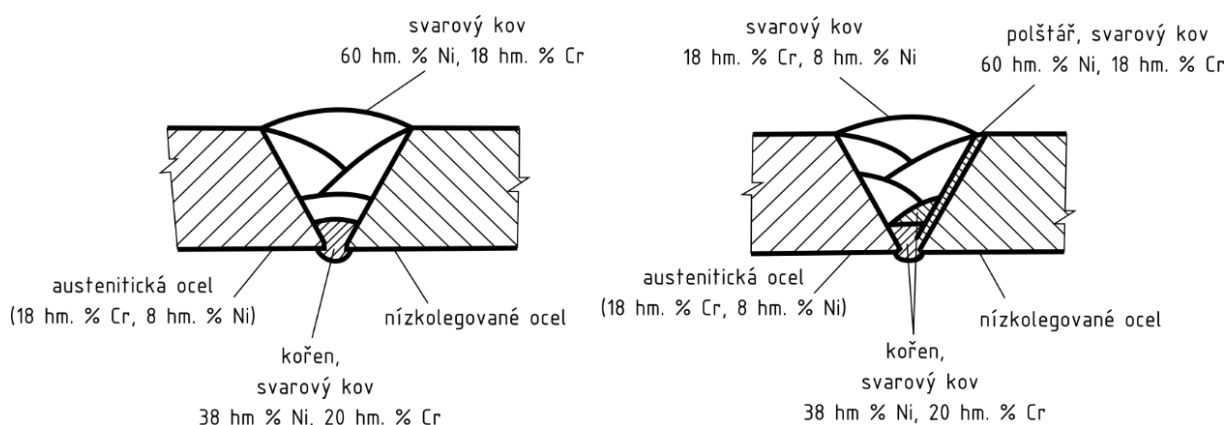
4.3.6 Vady povrchu svarů

Na povrchu svarů se mohou objevit kromě vystupujících již zmíněných vad zápaly, může dojít k nadměrnému převýšení svaru, nebo k prohloubení svaru. Zápal vzniká při přílišné délce oblouku. Dochází k natavení a prohloubení kovu na hranicích svarové housenky. [13, 5]

4.4 Přídavný materiál

Pro heterogenní svarové spoje pracující do teploty 350 °C se používají austenitické přídavné materiály, protože austenit vykazuje vyšší houževnatost a plasticitu. Lze ale také použít nízkolegované přídavné materiály s velmi nízkým obsahem uhlíku. Při procesu svařování je třeba zajistit, aby nalegování svarového kovu bylo co nejnižší. V případě použití elektrod se zásadně používají bazické elektrody. [12]

U heterogenních svarových spojů pracujících nad 350 °C je potřeba zamezit difuzi uhlíku, který by případně mohl tvořit významně nauhličené a významně oduhličené oblasti. K tomu se využívá postupu, kterým se vytváří bariéra proti difuzi uhlíku. Difuzní bariéra vzniká použitím přídavného materiálu s obsahem 38 hm.% Ni a 20 hm.% Cr na kořenovou housenku. Zbytek svaru se dále vyplní přídavný materiál s obsahem 60 hm.% Ni a 18 hm.% Cr, nebo v případě svařování heterogenních svarových spojů velkých tlouštěk lze tento materiál použít pouze na tvorbu tzv. polštáře a zbytek svaru vyplnit přídavným materiálem s obsahem 18 hm.% Cr a 8 hm.% Ni. Polštář se vytváří návarem na svarové ploše na straně nízkolegované oceli. [12]



Obrázek 4: Konstrukce svarových spojů pracujících za teplot vyšších než 350 °C [12]

4.5 Technologie svařování

Při svařování heterogenních svarů je vhodné do svaru vnést co nejmenší množství tepla, aby došlo k co nejmenšímu nalegování spoje. Vhodné je proto svařování laserovým paprskem, elektronovým paprskem nebo svařování třením. Využit těchto způsobů svařování lze pouze v omezeném množství případů. Z rozšířenějších způsobů svařování je vhodné použít obloukové svařování s malými teplotními příkony. Toho se dosáhne použitím elektrod s malým průměrem, nízkými svařovacími proudy a vyšší rychlostí svařování.

4.5.1 Svařování elektrickým obloukem v ochranných plynech

Svařování elektrickým obloukem spočívá ve vytvoření nízkonapětového elektrického vysokotlakého výboje, kterým prochází proud dostatečný k udržení plazmatu v oblouku v ionizovaném stavu. Vlivem hoření elektrického oblouku dochází k velmi rychlému tavení svařovaného materiálu. Ochranu svarové lázně proti účinkům vzdušného kyslíku a dusíku zajišťují ochranné plyny. [15]

4.5.2 TIG

TIG (Tungsten Inert Gas) je metoda svařování netavící se wolframovou elektrodou v inertním plynu. Během svařování hoří oblouk mezi netavnou wolframovou elektrodou a svařovaným kovem. K ochraně svarové lázně se používají netečné plyny o vysoké čistotě. Nejčastěji argon, helium a jejich směsi. Svařování lze provádět s i bez přídavného materiálu. Středně a vysokolegované oceli se svařují stejnosměrným proudem. Střídavý proud je spíše vhodný pro hliníkové a hořčíkové slitiny. Použití této

metody pro svařování uhlíkových ocelí není moc vhodné z důvodu nebezpečí vzniku pórů, a především z ekonomických důvodů. Pro zhotovení svarů z uhlíkové oceli jsou vhodnější méně nákladné metody, jako MIG, MAG, MMA. [15]

Svařování metodou TIG se standartně provádí ručně. Za účelem zajištění zvýšení produktivity a vysoké kvality svarů je možné svařování automatizovat použitím robotického ramene nebo orbitalové hlavy pro svařování potrubí. Při použití automatizace je řízen pohyb hořáku i podávání přídavného materiálu. [15]

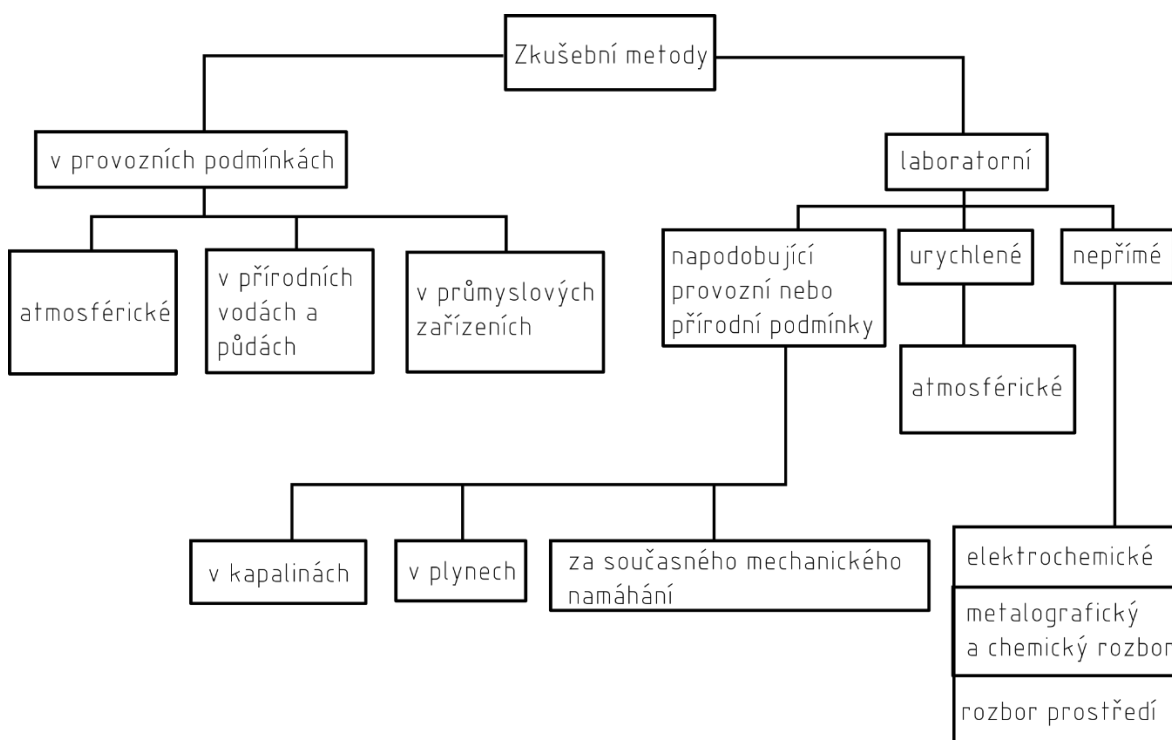
Metoda TIG se běžně používá pro svařování vysokolegovaných ocelí pro klasickou i jadernou energetiku, chemický průmysl apod. Dále pro svařování žárupevných a žáruvzdorných ocelí a slitin neželezných kovů, jako je titan a hliník. [15]

4.6 Vliv ochranné atmosféry na korozi

Složení ochranné atmosféry při svařování metodou TIG má vliv na finální podobu mikrostruktury a vlastnosti svaru. Příkladem je svařování nerezové austenitické oceli s obsahem chromu, niklu, molybdenu a dusíku, kde je při použití směsi argonu a malého množství dusíku (max. do 10 %) zlepšena odolnost proti korozi v prostředí s vysokým obsahem chloridů. Použití dusíku v ochranné atmosféře ovlivňuje také podobu mikrostruktury. Snižuje obsah fáze δ -ferit, čímž se naopak zvyšuje náchylnost ke vzniku trhlin za horka a snižuje se odolnost proti interkrystalické korozi pod napětím. Zvýšený obsah dusíku nezvyšuje náchylnost k interkrystalické korozi v TOO, ale ve svarovém kovu. [16]

5 Korozní zkoušky

Korozní zkoušky mohou poskytnout důležité informace o životnosti svarového spoje. Podle nich lze dimenzovat svarový spoj, optimalizovat výběr materiálů, svařovací metody apod. Korozní testy lze provádět v laboratorních podmínkách, nebo v provozních podmínkách. Další rozdělení těchto dvou způsobů provádění korozních testů viz obr. 5. [16]



Obrázek 5: Rozdělení korozních zkoušek [12]

Zkušební metody v provozních podmínkách jsou většinou dlouhodobé. Používají se k ověřování laboratorních zkoušek a v případech, kde není možné v laboratorních podmínkách namodelovat všechny vlivy ovlivňující vznik a šíření koroze. Hlavní výhodou laboratorních korozních testů je možnost urychlit jejich průběh simulováním kritických podmínek pro vznik a šíření koroze. Nevýhodou může být omezená velikost zkušebních vzorků. V případě laboratorních korozních testů nemusí být vždy možné nasimulovat veškeré podmínky, které mají vliv na korozi v reálném prostředí, to může učinit interpretaci výsledků obtížnou. Stejný problém může nastat v případě urychlených korozních testů, protože je zde korozní prostředí upraveno pro rychlý vznik a šíření koroze, což nemusí odpovídat realitě. [12]

Volba vhodné korozní zkoušky se vždy odvíjí od důvodu jejího provádění. Závisí na druhu materiálu, zkoušeném výrobku a korozním prostředí, na očekávaném druh

korozního napadení. Mnoho korozních zkoušek je normováno. Hodnotí se změna vzhledu, rozměrů a hmotnosti. Dále se změny v materiálu způsobené korozi hodnotí metalograficky, nebo prováděním zkoušek mechanických vlastností. Analyzovány také mohou být korozní produkty a mohou být sledovány změny v chemii korozního prostředí. K popisu korozního děje slouží také měření korozního potenciálu a proudu procházejícího kovovým povrchem. Na sledování závislosti těchto dvou veličin v závislosti na čase, je založená velká část elektrochemických metodik korozních zkoušek. [8]

Korozní děje jsou v kovových materiálech poměrně pomalé a získání hodnotných výsledků vyžaduje dlouhou dobu. Proto je vhodné využití urychlených metod korozního zkoušení. Urychlení koroze je zde dosaženo zvýšením vlivu některého korozního činitele. Podmínkou je zde však zachování korozního mechanismu. K urychlení korozních dějů lze dosáhnout např. zvýšením teploty korozního prostředí, nebo zvýšení rychlosti proudění korozního média. [12]

6 Lomová houževnatost

Lomová houževnatost je odpor materiálu proti iniciaci a růstu trhliny. Tuto vlastnost lze charakterizovat pouze jedním parametrem vyjadřujícím houževnatost, (např.: K_{Ic} – charakterizuje odolnost materiálu proti statické iniciaci křehkého porušení při rovinné deformaci v oblasti kořene trhliny, δ_c – hodnota rozevření trhliny v okamžiku iniciace nestabilního lomu, J_{Ic} – lomová houževnatost určená z J-intergrálu), nebo závislosti odpovídajícího parametru na přírůstek délky trhliny. Lomová houževnatost závisí na chemickém složení materiálu a na jeho struktuře. Pokud je materiál např. válcovaný, hodnota lomové houževnatosti může být velice variabilní v závislosti na orientaci vzorku a na jeho umístění v polotovaru. Další faktory ovlivňující lomovou houževnatost jsou teplota, rychlost zatěžování, přítomnost vrubu, mikrostruktura materiálu apod. Se zvyšující se rychlostí zatěžování obecně klesá lomová houževnatost. [17]

6.1 Zkoušení lomové houževnatosti

Měření lomové houževnatosti popisuje norma ČSN EN ISO 12737 „Kovové materiály – Určení lomové houževnatosti“. Zkoušky lomové houževnatosti se dělí na dva druhy. Zkoušky statické lomové houževnatosti se provádějí za působení rovinné deformace na zkušební vzorek při tříbodovém ohybu, nebo za působení excentrickým tahem na tzv. CT tělesa. Nevýhodou těchto zkoušek je jejich finanční a časová náročnost. Méně náročnější jsou pak dynamické zkoušky lomové houževnatosti. Při těchto měřeních se používá k přeražení vzorků Charpyho kladivo. [18]

6.2 Lomová mechanika

Lomová mechanika se zabývá šířením trhliny v materiálu. Její snahou je matematicky popsat podstatu šíření trhliny pomocí známých parametrů. Ze známých modelů lomové mechaniky byl G. R. Irwin první, kdo popsal matematický model, který popisuje rozložení napětí v okolí nekonečně ostré trhliny (5) a zahrnul do něj geometrický faktor, resp. součinitel intenzity napětí, jenž je definován vztahem (6), který geometrický faktor uvažuje. Díky zahrnutí geometrického faktoru lze tento model aplikovat i na trhliny vystupující na povrch, což je charakteristické pro trhliny vzniklé korozním napadením. [19]

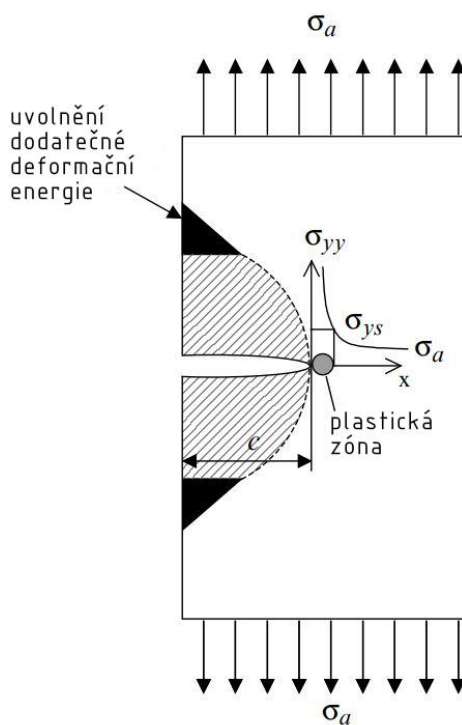
$$\sigma(r, \theta) = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (5)$$

$$K_1 = \sigma_a Y \sqrt{\pi C} \quad (6)$$

Kde pro rovnici (5) $\sigma(r, \theta)$ je napětí v okolí nekonečně ostré trhliny, K_I součinitel intenzity napětí, r polární souřadnice udávající vzdálenost bodu, θ úhel spojnice mezi daným bodem a počátkem polárního souřadnicového systému. [19]

Pro rovnici (6) je σ_a vnější jednoosé napětí působící na těleso s trhlinou, Y geometrický faktor, C poloviční délka trhliny. [19]

Geometrický faktor je funkce, jejíž hodnota je dána geometrií tělesa, trhliny a druhem namáhání tělesa. Pokud je ideální trhlina v nekonečné desce oboustranně ukončena a na desku působí síly, které vyvolají jednoosou napjatost σ_a kolmou k ose trhliny, hodnota geometrického faktoru je $Y = 1$. Pokud je ideální trhlina v polonekonečné desce, na kterou působí síly vyvolávající jednoosou napjatost σ_a (obr. 6), hodnota geometrického faktoru je $Y = 1,12$. Tato 12% korekce vznikne v důsledku uvolnění dodatečné deformační energie (obr. 6), která vznikne v důsledku uvolnění dodatečné deformační energie způsobené přítomností volného povrchu. Velikost této korekce se snižuje, čím trhlina zasahuje hlouběji do povrchu. Pokud by byl tvar trhliny půlkruhový, tedy hodnota c by se rovnala šířce trhliny, hodnota geometrického faktoru by odpovídala $Y = 2 \cdot \pi^{-1}$ [19]



Obrázek 6: Schématické znázornění zvýšení dodatečné deformační energie a rozložení napětí v okolí trhliny v polonekonečné desce [19]

7 NDT

NDT (Non-destructive Testing) se používá pro zjišťování přítomnosti vad v materiálu, při čemž zůstává zachována funkčnost a použitelnost měřeného objektu. Vada je definována jako odchylka provedení výrobku od předepsaného stavu s předepsanými vlastnostmi. Vady se dělí do skupin. [20]

Tabulka 1: Základní třídění vad do skupin a jejich všeobecný popis [20]

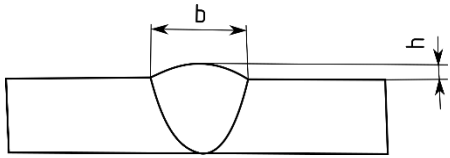
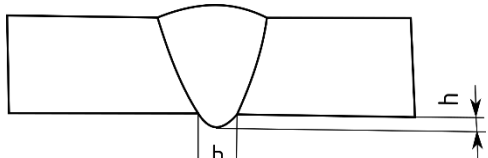
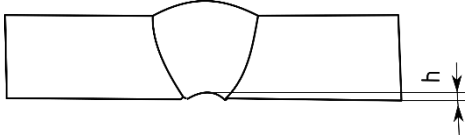
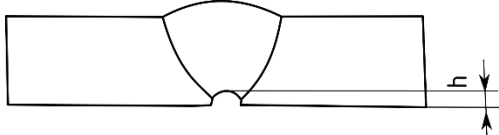
Skupina vad		Všeobecná charakteristika
číslo	název	
1	Vady rozměrů	Nedodržení požadavků na předepsané jmenovité rozměry výrobku a jejich mezní úchytky.
	Vady tvaru a polohy	Nedodržení požadavku na vzdálenost vyjadřující polohu posuzované plochy, osy nebo roviny souměrnosti výrobku, vzhledem k její poloze
2	Vady povrchu	Nedodržení požadavku na předepsané provedení povrchu
3	Necelistvosti	Necelistvosti hmoty výrobku
4	Vady zjišťované zvláštními laboratorními zkouškami	Nedodržení požadavků na předepsané hodnoty mechanických technologických a fyzikálních vlastností výrobku, nedodržení předepsané makrostruktury, mikrostruktury apod.

Při kontrolování svarových spojů jsou nejnáze proveditelné povrchové metody testování, mezi které patří vizuální kontrola, kapilární metoda nebo magnetická polévací zkouška. Pro zjištění kvality svaru je potřeba zkontrolovat jeho celý průřez. K tomu jsou využívány tzv. volumetrické metody, mezi které patří radiografie a ultrazvukové zkoušení. Dále jsou popsány metody, které byly využity v experimentální části. [20]

7.1 Vizuální kontrola svarových spojů

Při vizuální kontrole svarových spojů se posuzují vady na krycí housence, v teplem ovlivněné oblasti, u kořene svaru a v přilehlém základním materiálu. Před svařováním se provádí kontrola tvaru a rozměrů a čistoty svarových ploch. V průběhu svařování se kontroluje čistota každé položené housenky a případně se provádí odstranění vad, jak jsou trhliny, dutiny a póry. Po dokončení svařování se hodnotí geometrické vady svarů pomocí speciálních měrek, nebo standardním posuvným měřidlem. Vizuální kontrolu svarových spojů popisuje norma ČSN EN ISO 6520-1 Svařování a příbuzné procesy – Klasifikace geometrických vad kovových materiálů – Část 1: Tavné svařování. [20]

Tabulka 2: Příklad geometrických vad svaru [20]

	
<p>Nadměrné převýšení tupého svaru</p>	<p>Nadměrně převýšený kořen</p>
	
<p>Hubený kořen</p>	<p>Neprovařený kořen</p>

7.2 Kapilární zkouška

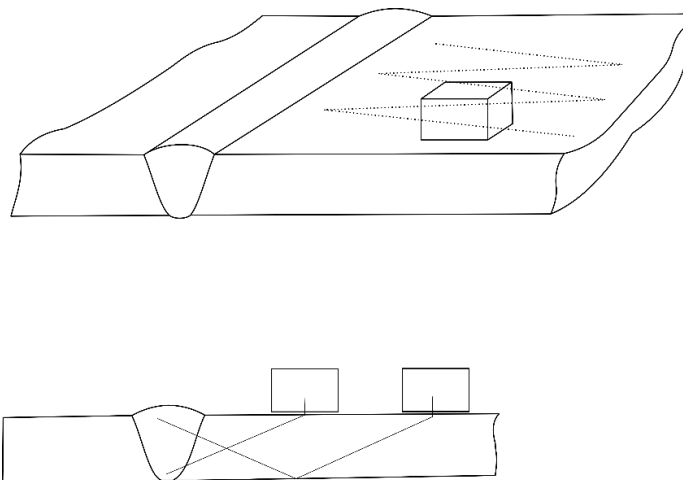
Kapilární metoda zkoušení využívá charakteristické vlastnosti rozhraní fází a kapilárního jevu kapalin. K provedení kapilárních zkoušek se využívají tzv. penetranty. Využívá se jejich vhodné vztlakovosti a smáčivosti. Na zkušební vzorek se nanese penetrant, který vniká do nečistostí vycházejících na povrch. Po napeetrování vad se setře přebytečný penetrant z povrchu zkoušeného vzorku. Na povrch se nanese kontrastní vývojka, na které se vztláním penetrantu z povrchových vad vytvoří barevná nebo fluoreskující indikace. [20]

Kapilární metoda zkoušení se hodí pro všechny kovové materiály. Nejlépe se s ní indikují povrchové vady jako trhliny, studené spoje apod. [20]

7.3 Zkouška ultrazvukem

Zkoušení ultrazvukem patří mezi volumetrické metody zkoušení. Ke kontrole celého průřezu testovaného vzorku se využívají ultrazvukové vlnění. K šíření tohoto vlnění je potřeba alespoň částečně elastické prostředí, jehož částice vlnění šíří kmitáním okolo svých rovnovážných poloh. Ultrazvuk detekuje indikaci díky reakci na změnu prostředí v podobě odrazu nebo tlumení vlnění. [20]

Zkoušení svarových spojů je náročné kvůli jejich tvarové rozmanitosti. K měření tupých svarů se používají úhlové sondy. Díky jejich použití lze detekovat vadu i ve velmi malých hloubkách pod povrchem. Úhel sondy se volí podle tloušťky základního materiálu. Pro hloubky 6 až 25 mm je vhodná sonda s úhlem 70°. Pro hloubky 25 až 40 mm sonda s úhlem 60°. Pro větší hloubky se používá sonda s úhlem 45°. [20]

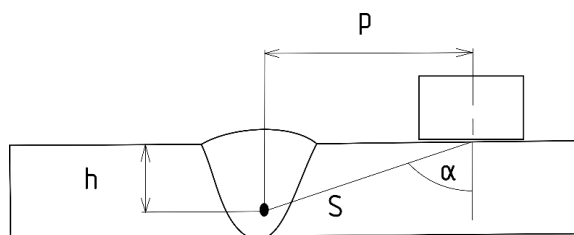


Obrázek 7: Technika měření tupých svarů [20]

Poloha vady při měření úhlovými ultrazvukovými sondami se zjišťuje výpočty. Pro výpočet polohy při měření přímým paprskem platí:

$$h = s \cdot \cos \alpha \quad (5)$$

$$p = s \cdot \cos \alpha \quad (6)$$

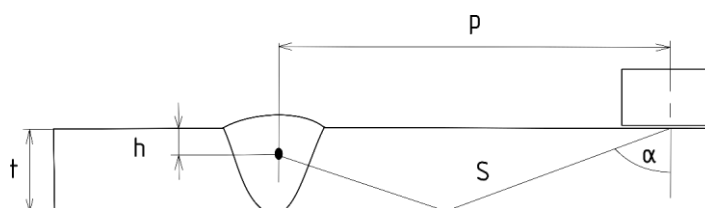


Obrázek 8: Výpočet pro přímý paprsek [20]

Pro výpočet polohy při měření odraženým paprskem platí:

$$h = 2 \cdot t - s \cdot \cos \alpha \quad (7)$$

$$p = s \cdot \sin \alpha \quad (8)$$



Obrázek 9: Výpočet pro nepřímý paprsek [20]

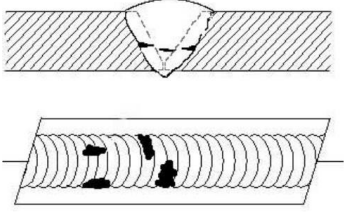
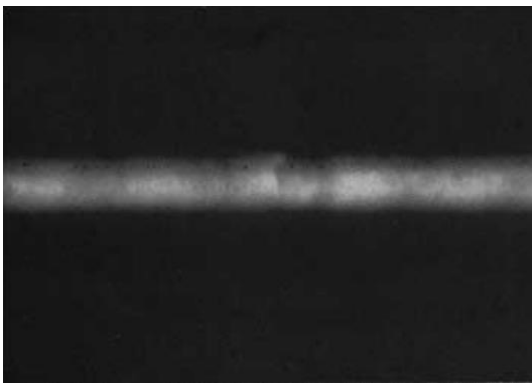
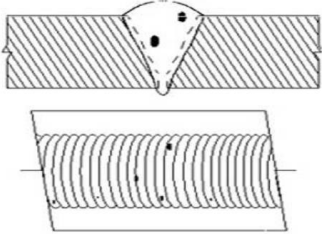
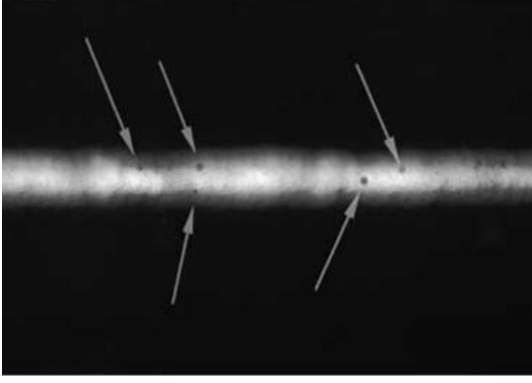
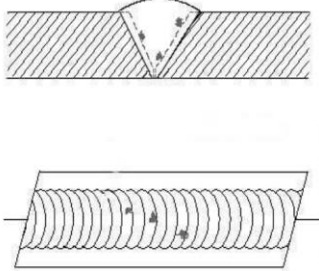
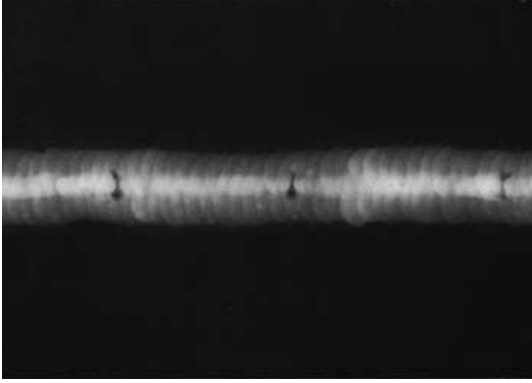
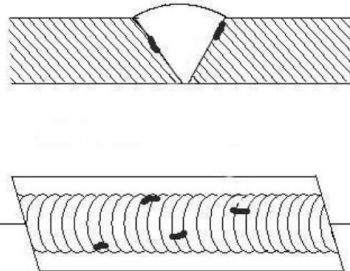
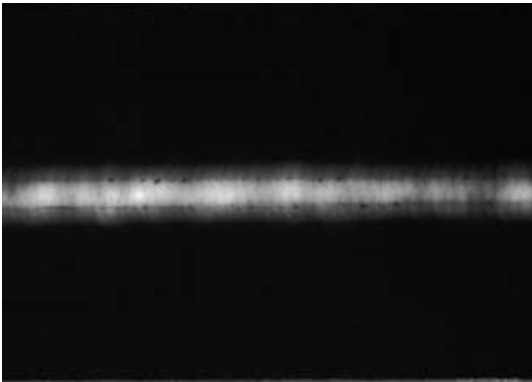
7.3.1 PAUT

Vývoj metody PAUT (Phased Array Ultrasonic Testing) byl zapříčiněn potřebou zjišťovat náhodně orientované vady v různých hloubkách jedním typem sondy z jedné polohy v zařízeních pro jadernou energetiku. Díky této metodě se zlepšila přesnost hodnocení velikosti vad a zlepšil se poměr signálu k šumu u heterogenních svarových spojů. Sonda k měření PAUT se skládá ze soustavy malých měničů (zdrojů ultrazvukových vln), které jsou lineárně uspořádané. Každý z měničů vysílá do materiálu vlnovou vlnu, tyto elementární vlny poté vytvoří čelo výsledné vlny. Nasměrování a fokusace této vlny se provádí pomocí vzájemného časového zpoždění impulzů od jednotlivých měničů. Tato metoda poskytuje obraz průřez materiálu v reálném čase. Díky tomuto obrazu je proti klasickému ultrazvukovému měření snazší rozeznat podstatné indikace ve zkoušeném tělese. [20]

7.4 Radiografická zkouška

Rentgenografie využívá rentgenového záření, které proniká materiálem. Při průchodu hmotou je rentgenové záření pohlcováno a tlumeno, což v případě přítomnosti dutiny nebo nečistosti v materiálu vytvoří kontrast na rentgenogramu. V tab. 3 jsou možné interpretace rentgenogramu svarových spojů. [20]

Tabulka 3: Interpretace rentgenogramu [21]

Studený spoj		
Póry		
Vměstky		
Neprůvary		

Pórovitost se na rentgenogramu jeví jako tmavé kulaté nebo nepravidelné skvrny, které se mohou objevovat jednotlivě, ve shlucích, nebo řádcích. Někdy mohou být póry podlouhlé. Ke vzniku podlouhlého póru vzniká, když se plyn snaží uniknout ještě z roztaveného materiálu. Vměstky se na rentgenogramu jeví jako tmavé asymetrické rozeklané skvrny uvnitř svaru nebo podél svarového spoje. Neprůvary se na rentgenogramu jeví jako tmavé rovné ostré linie podél svarového spoje. [21]

8 Popis experimentu

Cílem experimentu bylo zjistit závažnost korozního napadení heterogenních svarových spojů vzhledem k agresivitě korozního prostředí. Jako ukazatel závažnosti korozního poškození byla měřena lomová houževnatost, resp. absorbovaná energie $K8$. K měření závažnosti korozního napadení v závislosti na agresivitě korozního prostředí byly vybrány heterogenní svary, protože zde dochází k přímému kontaktu kovů s rozdílnými mechanickými a fyzikálními vlastnostmi a chemickým složením, a jsou tak jedním z nejkritičtějších míst ve svařovaných potrubních systémech. Svařované materiály byly vybrány tak, aby se svar co nejvíce blížil svarům běžně používaných v energetických zařízeních. Energetická zařízení jsou charakteristická tím, že pracují za vysokých teplot a pracovním médiem zde bývá proudící voda a pára. Takové prostředí je ideální k rychlé korozi oceli. Pracovní médium – provozní voda je však upravována tak, aby co nejvíce nežádoucí korozi zpomalila. V ideálním případě tak je možné rychlost koroze vypočítat a bezpečně dimenzovat životnost potrubí. V okruhu energetického zařízení však může dojít k lokální nežádoucí změně koncentrace rozpuštěných látek, což má za následek rozšiřování korozního napadení, což může vést až k penetraci stěny potrubí. Typickým příkladem, kdy může dojít v potrubí ke změně koncentrace rozpuštěných látek jsou odstávky zařízení, kde dojde k zastavení proudění pracovního média a k jeho vypuštění. Může nastat situace, že v některém místě v potrubí zůstane množství provozní vody, či zbytkové vlhkosti. Nedochozí zde k proudění prostředí, voda se vypařuje, koncentrace rozpuštěných látek se zvyšuje a dochází k přístupu kyslíku. To může vést ke vzniku většího množství korozních úsad na vnitřní stěně potrubí a vést ke vzniku aeračního článku, jakožto zárodku vzniku koroze.

Experiment byl proveden na dvanácti vzorcích svarů, které byly svařeny dle WPS získané od partnera skupiny ČEZ. 5 párů z těchto vzorků bylo podrobena korozním zkouškám ponorem do elektrolytu, jehož složení bylo blízké složení kotelní vody. Míra agresivity korozního prostředí byla regulována pomocí rozpuštění odstupňovaného množství chloridu sodného. Před zahájením korozního testu bylo na svarech provedeno ultrazvukové měření PAUT a rentgenografické měření. Tyto dva způsoby kontroly byly vybrány z důvodu běžného používání při kontrole potrubí v energetických zařízeních. Po ukončení korozních zkoušek bylo měření zopakováno, a byla tak otestována jejich rozlišovací schopnost korozního napadení. Před zahájením a po ukončení korozního testu byla změřena hmotnost vzorků za účelem sledování korozního úbytku. Vzorky svaru byly

poté podrobeny měření absorbované energie na Charpyho kladivu $K8$, tato hodnota byla brána jako poměrný ukazatel lomové houževnatosti. Lomová houževnatost ukazuje závažnost korozního napadení v závislosti na agresivitě korozního prostředí.

V ideálním případě by měl být při měření sérií vzorků jediný faktor ovlivňující naměřené hodnoty $K8$ koroze, která působí na povrch a blízké okolí svarů. Dle agresivity prostředí by měl být pozorován úbytek materiálu a narušení mikrostruktury na povrchu vzorků. Na vzorcích by mohly být pozorovány jevy, jako mezikrystalická koroze a korozní důlky. Kromě těchto jevů by mohla mít na naměřené hodnoty vliv nepatrně rozdílná geometrie svaru a v neposlední řadě kvalita provedení svaru z hlediska výskytu vnitřních vad.

8.1 Svařované materiály

Svařované materiály byly vybrány tak, aby odpovídaly materiálům použitým v energetických zařízeních. Jedná se o heterogenní svar typu uhlíková ocel – nerezová austenitická ocel. Jako zástupce uhlíkových ocelí byl zvolen materiál EN P265GH a jako zástupce nerezových austenitických ocelí materiál EN X6CrNiTi18-9. Materiál P265GH je žárupevná nelegovaná nízkouhlíková ocel. Používá se na výrobu kotlů a tlakových nádob. Má zaručenou svařitelnost a její technické dodací podmínky stanovuje norma ČSN EN 10028.

Tabulka 4: Chemické složení oceli EN P265GH (hm.%) [22]

C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	Mo	V	N	Nb	Ti	Al	Cu
max 0,2	max 0,4	0,8 až 1,4	max 0,3	max 0,025	max 0,015	max 0,3	max 0,08	max 0,02	max 0,012	max 0,02	max 0,03	max 0,02	max 0,3

Tabulka 5: Mechanické a fyzikální vlastnosti oceli P265GH (+N) při 20 °C [22]

Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$	245 MPa
Pevnost v tahu R_m	410 ÷ 530 MPa
Youngův modul pružnosti E	210 ÷ 212 GPa
Tažnost A_5	23 %
Koeficient teplotní roztažnost α	$1,19 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
Měrná tepelná kapacita c	450 ÷ 461 $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Materiál EN X6CrNiTi18-9 je austenitická nerezová ocel stabilizovaná titanem, čímž je zajištěna odolnost proti mezikrystalické korozi ve svařovaném stavu. Ocel je používána právě na součásti energetických a tepelných zařízení. Vhodná pro tlakové nádoby do vysokých teplot. Technické dodací podmínky stanovuje norma ČSN EN 10088.

Tabulka 6: Chemické složení oceli EN X6CrNiTi18-9 (hm.%) [23]

C	Cr	Ni	Mn	P	S	Ti
max 0,08	17,0 až 19,0	9,0 až 12,0	max 2,0	max 0,045	max 0,015	max 0,4

Tabulka 7: Mechanické a fyzikální vlastnosti oceli EN X6CrNiTi18-9 (+N) při 20 °C [23]

Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$	190 MPa
Pevnost v tahu R_m	500 ÷ 700 MPa
Youngův modul pružnosti E	200 GPa
Tažnost A_5	45 %
Koeficient teplotní roztažnosti α	$1,55 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
Měrná tepelná kapacita c	$500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Jako přídatný materiál pro svařování metodou TIG byl OK Tigrod 16.95 od firmy Esab. Je to austenitický přídatný materiál vhodný pro obtížně svařitelné oceli a pro heterogenní svarové spoje. [24]

Tabulka 8: Chemické složení přídatného materiálu OK Tigrod 16.95 (hm.%) [24]

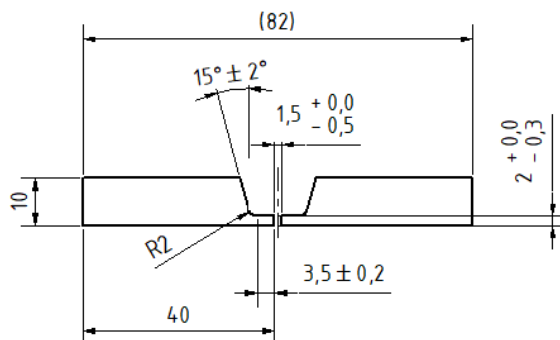
C	Cr	Ni	Mn	Mo	Si	Cu
0,08	18,7	8,1	7,0	0,20	0,9	0,10

Z tabulek tab. 5 a tab. 7 lze vidět, že svařované oceli mají podobné mechanické vlastnosti. Austenitická ocel má oproti uhlíkové oceli vyšší koeficient teplotní roztažnosti. Čím vyšší je koeficient teplotní roztažnosti, tím větší jsou objemové změny během chladnutí svaru a vznikají tak vyšší vnitřní napětí. Tyto napětí jsou v tomto případě

z velké části eliminována vysokou houževnatostí austenitické oceli a přídavného materiálu.

8.2 Příprava vzorků

Vzorky svarů byly připraveny z výpalků plechů o rozměrech P10-300x40. Dle dostupné WPS získané od partnera skupiny ČEZ. Svarové plochy byly tvořeny úkosy typu U, což má zajistit lepší provaření kořene svaru a vyšší pevnost spoje. Svar byl svařen na 3-4 housenky. Vzorky byly označeny čísly 1 až 6.



Obrázek 10: Výkres svaru dle WPS



Obrázek 11: Připravené svarové plochy

Po vyhotovení svarů a provedení NDT kontroly pomocí RTG se ukázalo, že ve svarech je značné množství vnitřních vad. Vliv těchto vad na lomovou houževnatost může převážit vliv koroze. Z toho důvodu byla na části těchto svarů provedena oprava spočívající ve vybroušení kořene svaru a opětovném zavaření z vnitřní strany. Po opravě těchto svarů byla opět provedena kontrola pomocí RTG a bylo provedeno ultrazvukové měření PAUT.

Při vybrušování kořene nekvalitních svarů byla provedena vedle vizuální kontroly také kapilární zkouška, aby bylo zajištěno vybroušení veškerých vad.

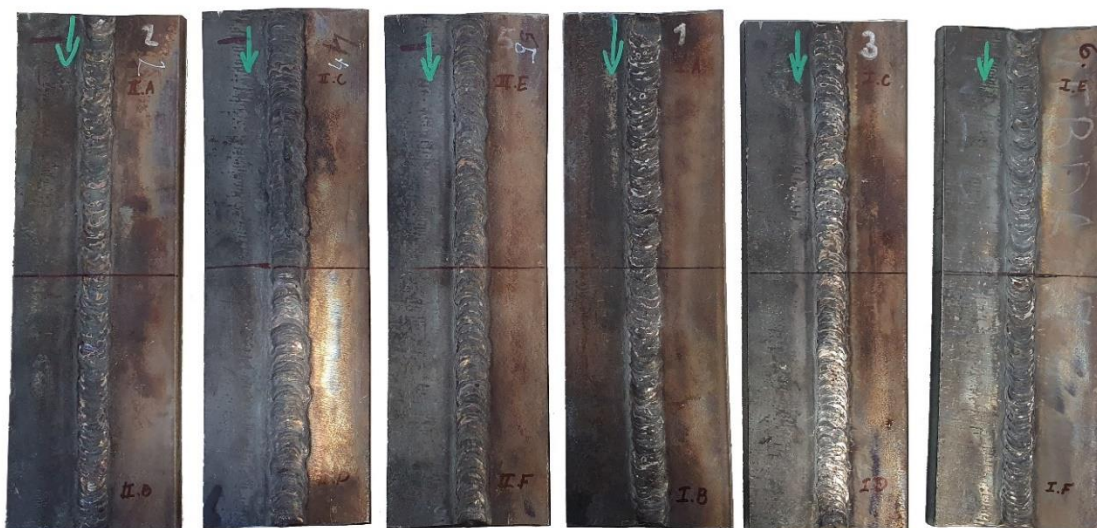


Obrázek 12: Kapilární zkouška při opravě svaru č. 2, svarové plochy jsou bez indikací, indikace na okrajích svarových ploch vznikly v důsledku přítomnosti rýh vzniklých při vybrušování

Takto připravených šest kusů svarů, resp. tři opravované a tři neopravované byly rozděleny tak, že vzniklo dvanáct vzorků – šest opravovaných a šest neopravovaných. Tyto vzorky byly dále označovány číslicí, kde číslice 1 označovala neopravované svary a číslice 2 opravované svary. Dále byly vzorky rozlišeny písmeny dle korozního prostředí, kterému měly být vystaveny viz tab 9.

Tabulka 9: Značení vzorků

Značení vzorku	Korozní prostředí
1.A	Výchozí stav
2.A	
1.B	Kotlová voda
2.B	
1.C	Kotlová voda + 0,005 % NaCl
2.C	
1.D	Kotlová voda + 0,05 % NaCl
2.D	
1.E	Kotlová voda + 0,5 % NaCl
2.E	
1.F	Kotlová voda + 5 % NaCl
2.F	



Obrázek 13: Označené svary před dělením, zelená šipka je na straně oceli EN P265GH a ukazuje směr měření PAUT

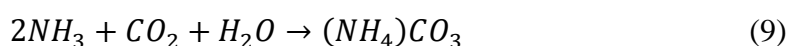
8.3 Korozní test

Korozní test byl proveden v prostředí blízkém prostředí kotelní vody, za přítomnosti prvků, které mají ochránit kov před korozi a zároveň se podílejí na vzniku korozních produktů. Cílem bylo zahrnout do korozního testu také právě tyto korozní produkty a korozi dále podpořit přidáním odstupňovaného množství NaCl. Jako nejvyšší množství NaCl bylo vybráno 5 %, jakožto nejvyšší množství běžně využívané u normovaných korozních testů, poté se toto množství snižovalo na 0,5 %, 0,05 %; 0,005 %.

Tabulka 10: Modelové prostředí kotlové vody ($\mu\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$)

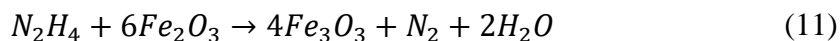
NH_3	$\text{N}_2\text{H}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$	SO_4^{2-}	Cl^-	F^-	Na^+
2720,4	3,168	53,5	11,2	2,986	36,78

Amoniak má v kotlové vodě funkci alkalizačního činidla. Upravuje pH a zároveň funguje jako inhibitor koroze. Má schopnost vázat zbytkový oxid uhličitý dle rovnice (9), čímž zabraňuje nekontrolovatelné alkalizaci vody. [1]



Hydrazin slouží jako dezoxidační prostředek k chemickému odplynění vody (10), a zároveň podporuje vznik magnetitu jakožto pasivační vrstvy (11). V našem

případě byl z modelového prostředí vyrazen z důvodu snahy o předejití odstranění veškerého kyslíku z elektrolytu, a aby tak nebylo zamezeno vzniku korozního poškození. [1]



Siřičitany slouží, stejně jako hydrazin, jako dezoxidační prostředek. Do kotlové vody se přidávají ve formě siřičitanu sodného právě při odstávkách, kdy nedochází k termickému odplynění. Na rozdíl od hydrazinu se použitím této látky zvyšuje obsah solí ve vodě. [1]

Chloridy a sodné ionty jsou v kotelní vodě přítomny po její dekarbonizaci. Sodík dále do vody vstupuje ve formě siřičitanu sodného, hydroxidu sodného a fosfátů. Fosfáty a hydroxid sodný slouží k alkalizaci prostředí. Fosfát dále podporuje vznik pasivační vrstvy. [1]

Korozní test byl proveden při teplotě 20 °C. Byly připraveny 20 l nádoby, které byly naplněny destilovanou vodou, připraveným koncentrátem modelové kotelní vody a přidáním množstvím chloridu sodného. Vzorčky svarů byly položeny na dno nádob kořenem svaru vzhůru. Korozní test trval 53 dnů. Před zahájením korozního testu byly vzorky odmaštěny a zváženy.



Obrázek 14: Ponořené vzorky v elektrolytu při zahájení korozního testu

Po ukončení korozního testu bylo v nádobách množství korozních produktů, kterými byla pokryta část svaru z oceli P265GH a housenka svaru. V případě vzorků B a C, tedy vzorků ponořených v kotlové vodě a kotlové vodě + 0,005 % NaCl se korozní

produkty vyskytovaly také na straně austenitické oceli. U vzorku s větším množstvím přidaného chloridu sodného se korozní produkty na straně austenitické oceli nevyskytovaly.



Obrázek 15: Vzorek B (kotlová voda) při ukončení korozního testu



Obrázek 16: Vzorek D (kotlová voda + 0,05 % NaCl) při ukončení korozního testu

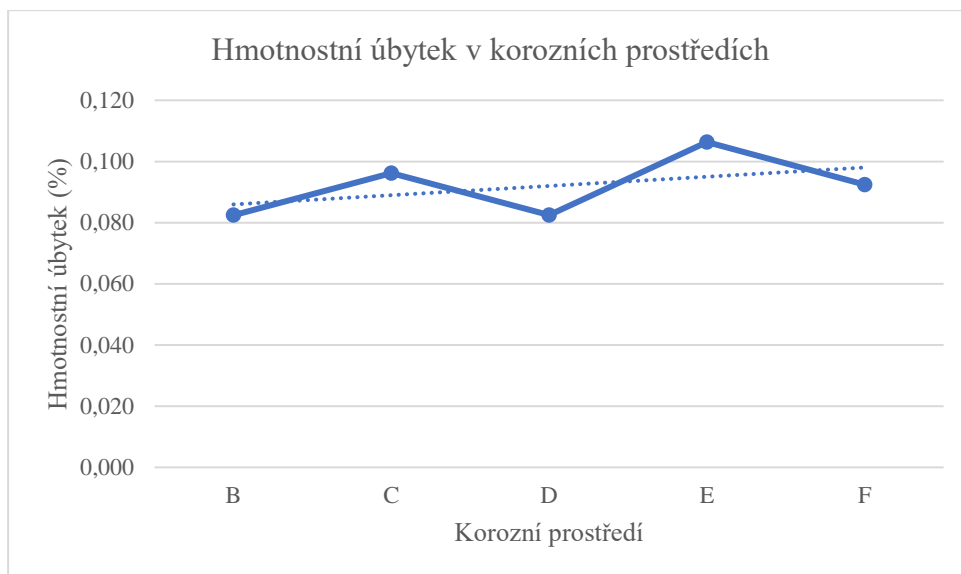
Po vyjmutí vzorků z nádob byly vzorky mechanicky a chemicky očištěny. K chemickému čištění byl použit vodný roztok 20 % citronanu amonného dle ISO 8407. Čištění probíhalo po dobu 10 min při teplotě 23 °C.

Měření úbytku hmotnosti bylo provedeno na laboratorní váze Denver Instrument S-6002 s odchylkou $\pm 0,01$ g

Tabulka 11: Měření hmotnostního úbytku

Vzorek	Hmotnost m (g)		Δm (g)	úbytek (%)	Δm (g) v prostředí	úbytek v prostředí (%)
	před korozi	po korozi				
1. B	762,23	761,67	0,56	0,073	1,24	0,082
2. B	742,07	741,39	0,68	0,092		
1. C	756,34	755,67	0,67	0,089	1,46	0,096
2. C	760,95	760,16	0,79	0,104		
1. D	748,1	747,64	0,46	0,061	1,23	0,083
2. D	742,72	741,95	0,77	0,104		
1. E	738,15	737,38	0,77	0,104	1,58	0,106
2. E	747,6	746,79	0,81	0,108		
1. F	737,03	736,39	0,64	0,087	1,37	0,092
2. F	744,56	743,83	0,73	0,098		

Hmotnostní úbytek v jednotlivých prostředích má s rostoucí koncentrací přidaných chloridů mírnou rostoucí tendenci viz obr. 17.



Obrázek 17: Graf hmotnostního úbytku v jednotlivých prostředích s lineární spojnicí trendu tečkovaně

Vizuální hodnocení ukázalo, že korozní napadení je plošné a rovnoměrné a zejména na straně oceli P265GH. Po očištění vzorků lze vidět, že ve všech případech došlo v určité míře k rozpuštění oxidové vrstvy z výroby válcového plechu na straně P265GH a po očištění byl odhalen čistý kov. Žádné makroskopické korozní napadení nebylo indikováno. Na straně austenitu nedošlo na povrchu kovu k žádné změně.



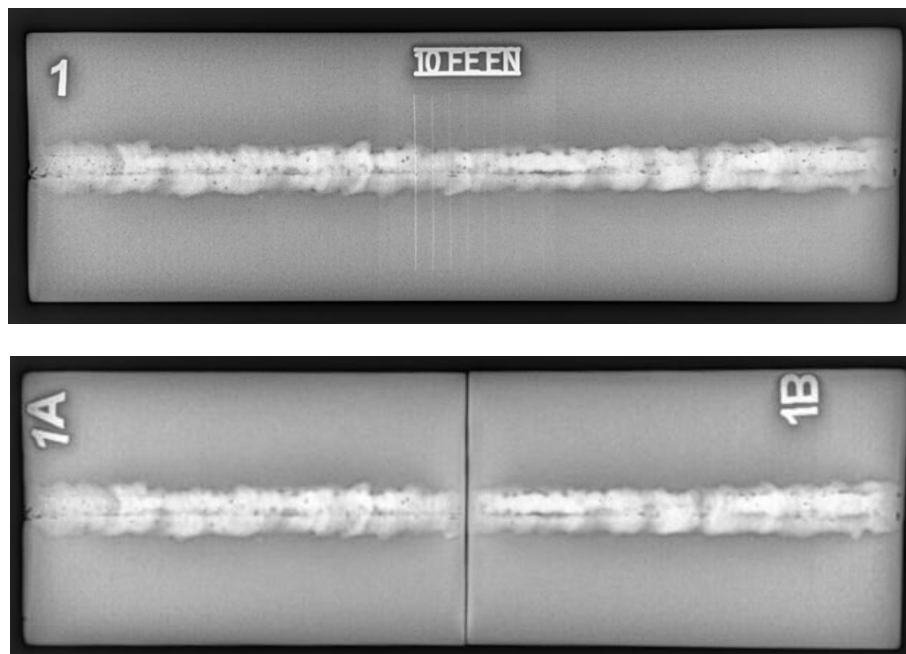
Obrázek 18: Vizuální hodnocení koroze, horní řada vzorky 1, dolní řada vzorky 2, seřazeny B až F zleva, strana austenitické oceli vždy na levé straně

8.4 Vyhodnocení rentgenogramu

Prozařovací zkouška rentgenovým zářením byla provedena na vzorcích před korozním testem, které nebyly rozřezány. Poté byly vzorky rozděleny a označeny dle tab. 9. U snímků byla zachována orientace vzorků pro snadné porovnání. Základní materiál

na horní straně svaru je EN X6CrNiTi18-9, na dolní straně svaru EN P265GH. Záření bylo snímáno digitálním detektorem GE DXR 250c-w. U vzorku č. 1 (obr. 16) byla použita drátová měrka pro ověření kvality rentgenogramu a tím i k ověření detekovatelnosti případných indikací. Při obou měřeních byly nastaveny stejné parametry rentgenky a kontrastu snímků ve vyhodnocovacím softwaru. Vady ve svarech byly klasifikovány dle ČSN EN ISO 6520.

8.4.1 Výsledky měření vzorku 1.A a 1.B

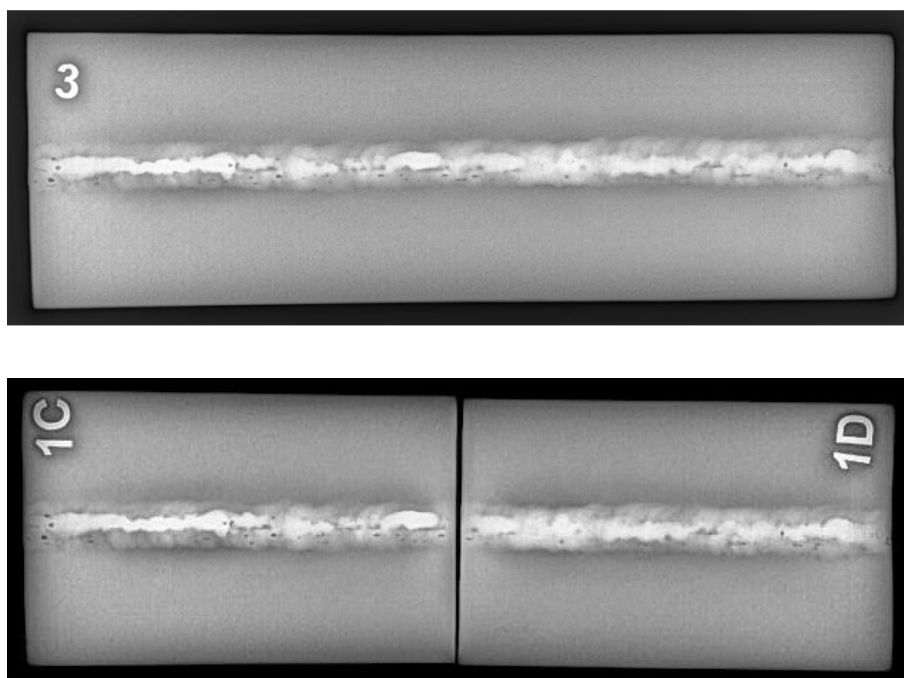


Obrázek 19: RTG snímek neopraveného svaru před (horní) a po korozních testech (dolní), 1.A výchozí stav, 1.B – kotlová voda

Vzorek č. 1 (obr. 19) obsahuje značné množství shluku pórů (2013) a protáhlých pórů (2015). Jejich vznik pravděpodobně zapříčinilo nedostatečné krytí svarové lázně ochrannou atmosférou. Je zde také zřetelná ostrá linie podél svaru, která značí, že nedošlo k řádnému provaření kořene svaru. V levé části svaru lze pozorovat koncovou staženinu (202).

Vzorek 1.A reprezentuje výchozí stav a nemohlo zde dojít k žádné změně vlivem koroze. Vzorek 1.B byl vystaven modelovému prostředí kotlové vody. Na snímku není patrná žádná změna oproti stavu před korozními testy.

8.4.2 Výsledky měření vzorku 1.C a 1.D

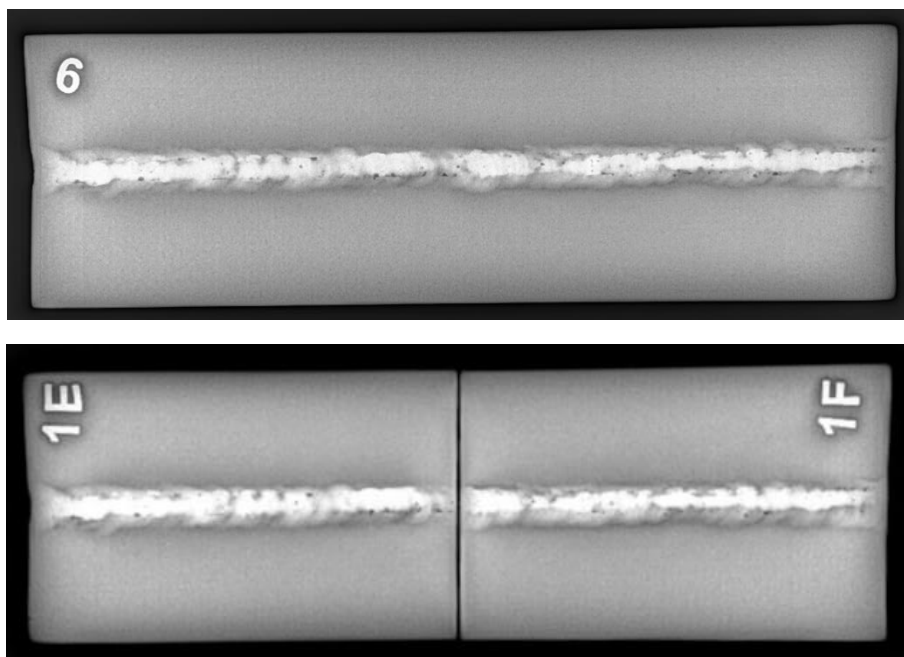


Obrázek 20: RTG snímek neopraveného svaru před (horní) a po korozních testech (dolní), 1.C – kotlová voda + 0,005 % NaCl, 1.D – kotlová voda + 0,05 % NaCl

Vzorek č. 3 (obr. 20) obsahuje shluky pórů (2013). Jejich vznik pravděpodobně zapříčinilo nedostatečné krytí svarové lázně ochrannou atmosférou. Je zde také zřetelné lokální nadměrné převýšení svaru (502) viditelné jako výrazně světlá místa ve svaru.

Vzorek 1.C byl vystaven modelovému prostředí kotlové vody s přidanými 0,005 % NaCl. Vzorek 1.D byl vystaven modelovému prostředí kotlové vody s přidanými 0,05 % NaCl. Na snímku není patrná žádná změna oproti stavu před korozními testy.

8.4.3 Výsledky měření vzorku 1.E a 1.F

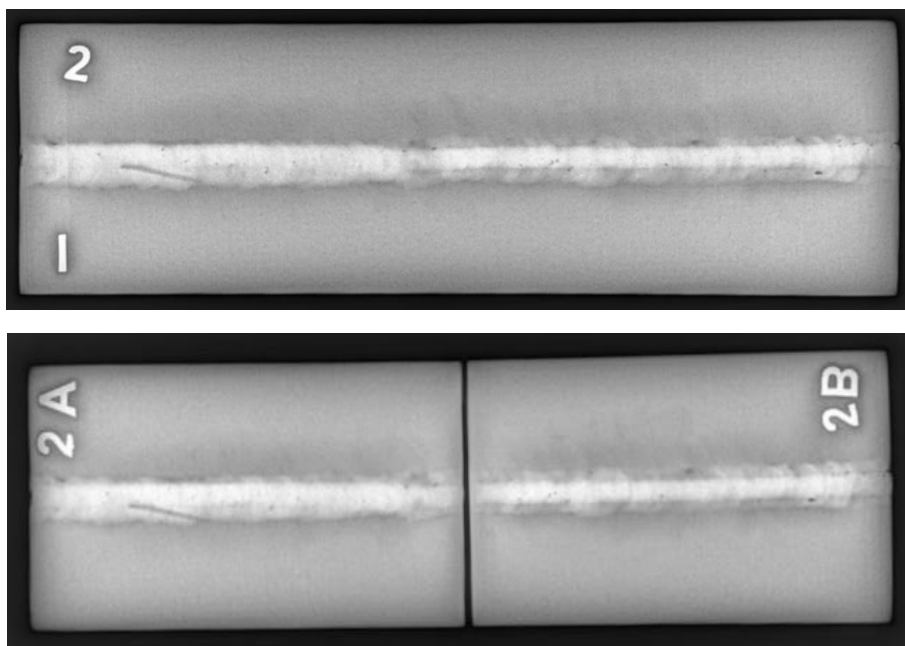


Obrázek 21: RTG snímek neopraveného svaru před (horní) a po korozních testech (dolní), 1.E – kotlová voda + 0,5 % NaCl, 1.F – kotlová voda + 5 % NaCl

Vzorek č. 6 (obr. 21) obsahuje póry. V části vzorku 1.E lze vidět vyřádkování pórů (2013) podél kořene svaru. Jejich vznik pravděpodobně zapříčinilo nedostatečné krytí svarové lázně ochrannou atmosférou. Je zde také zřetelné lokální převýšení svaru (502) viditelné jako výrazně světlá místa ve svaru.

Vzorek 1.E byl vystaven modelovému prostředí kotlové vody s přidáním 0,5 % NaCl. Vzorek 1.F byl vystaven modelovému prostředí kotlové vody s přidáním 5 % NaCl. Na snímku není patrná žádná změna oproti stavu před korozními testy.

8.4.4 Výsledky měření vzorku 2.A a 2.B

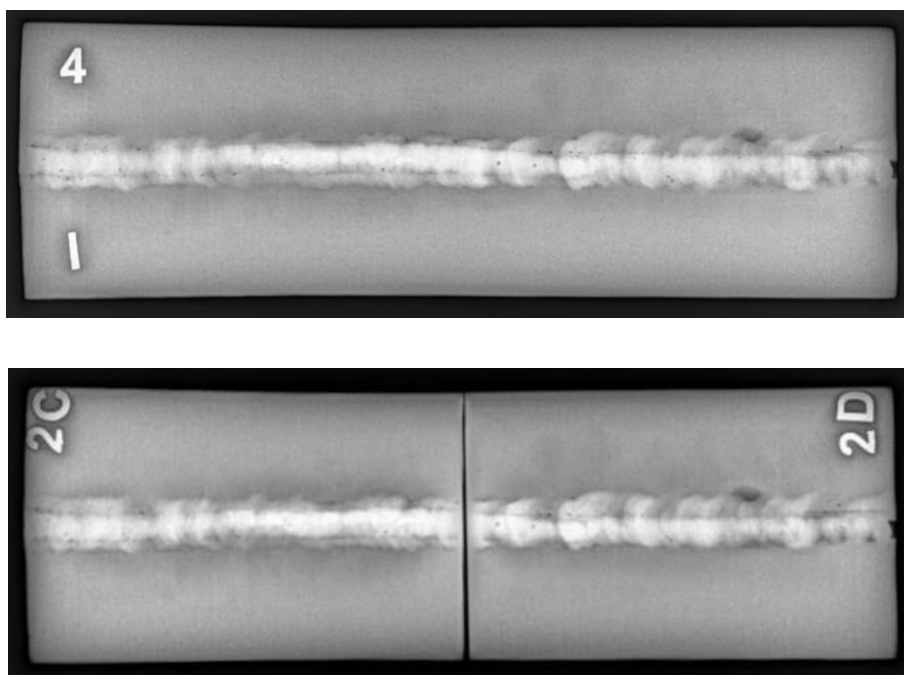


Obrázek 22: RTG snímek opravovaného svaru před (horní) a po korozních testech (dolní), 2.A výchozí stav, 2.B – kotlová voda

Vzorek č. 2 (obr. 22) je opravovaný svar. V části vzorku 2.A lze vidět stopu po zářezu brusky, ke kterému došlo při vybrušování původního svaru. Dále se ve vzorku nachází malé množství rovnoměrně rozmístěných pórů (2012).

Vzorek 2.A reprezentuje výchozí stav a nemohlo zde dojít k žádné změně vlivem koroze. Vzorek 2.B byl vystaven modelovému prostředí kotlové vody. Na snímku není patrná žádná změna oproti stavu před korozními testy.

8.4.5 Výsledky měření vzorku 2.C a 2.D

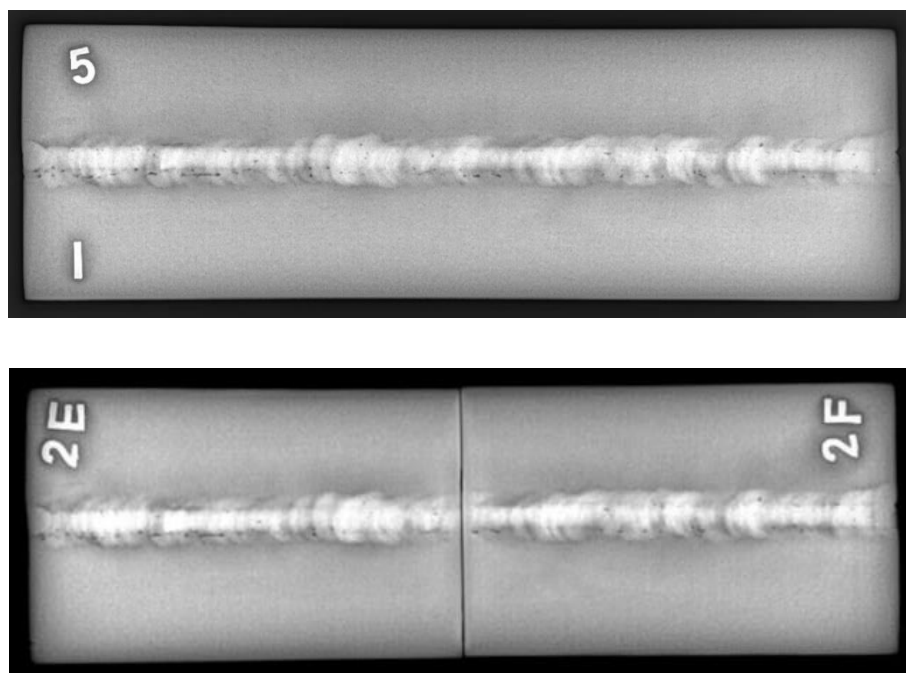


Obrázek 23: RTG snímek opravovaného svaru před (horní) a po korozních testech (dolní), 2.C – kotlová voda + 0,005 % NaCl, 2.D – kotlová voda + 0,05 % NaCl

Vzorek č. 4 (obr. 23) je opravovaný svar. Ve svaru lze pozorovat malé množství pórů vzniklých uvnitř svarové lázně a podél kořene svaru. V části 2.D došlo k zápalu, který reprezentuje tmavá skvrna v pravé horní části vzorku. Déle lze v pravé části vzorku pozorovat koncovou kráterovou staženinu (2025).

Vzorek 2.C byl vystaven modelovému prostředí kotlové vody s přidanými 0,005 % NaCl. Vzorek 2.D byl vystaven modelovému prostředí kotlové vody s přidanými 0,05 % NaCl. Na snímku není patrná žádná změna oproti stavu před korozními testy.

8.4.6 Výsledky měření vzorku 2.E a 2.F



Obrázek 24: RTG snímek opravovaného svaru před (horní) a po korozních testech (dolní), 1.E – kotlová voda + 0,5 % NaCl, 1.F – kotlová voda + 5 % NaCl

Vzorek č. 4 (obr. 24) je opravovaný svar. Ve svaru lze pozorovat značné množství pórů (2011) podél kořene svaru.

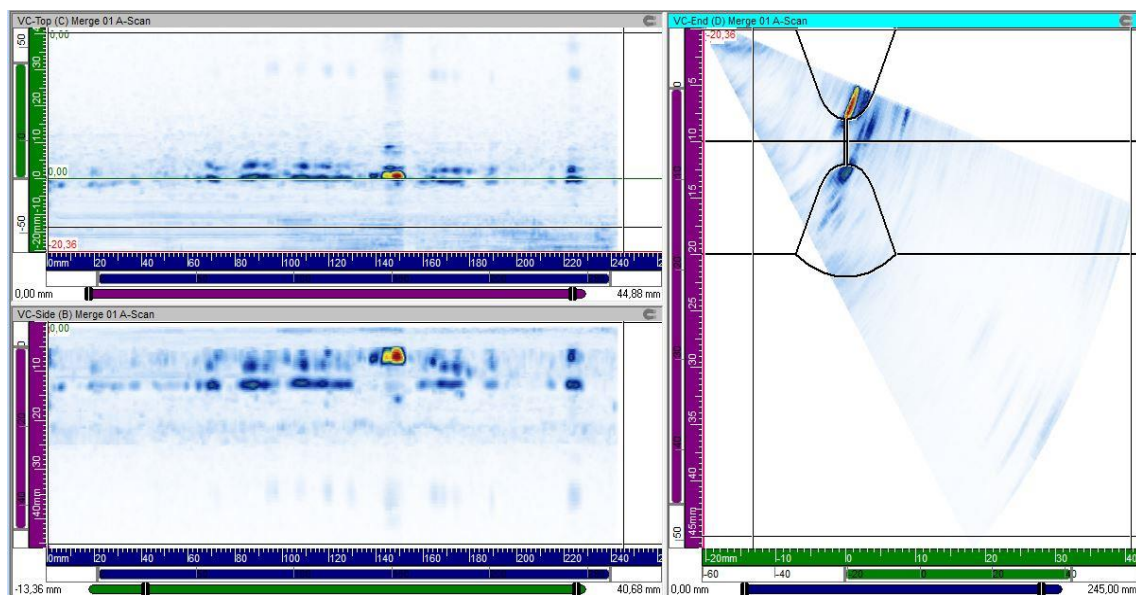
Vzorek 2.E byl vystaven modelovému prostředí kotlové vody s přidanými 0,5 % NaCl. Vzorek 2.F byl vystaven modelovému prostředí kotlové vody s přidanými 5 % NaCl. Na snímku není patrná žádná změna oproti stavu před korozními testy.

8.5 Vyhodnocení ultrazvukového zkoušení

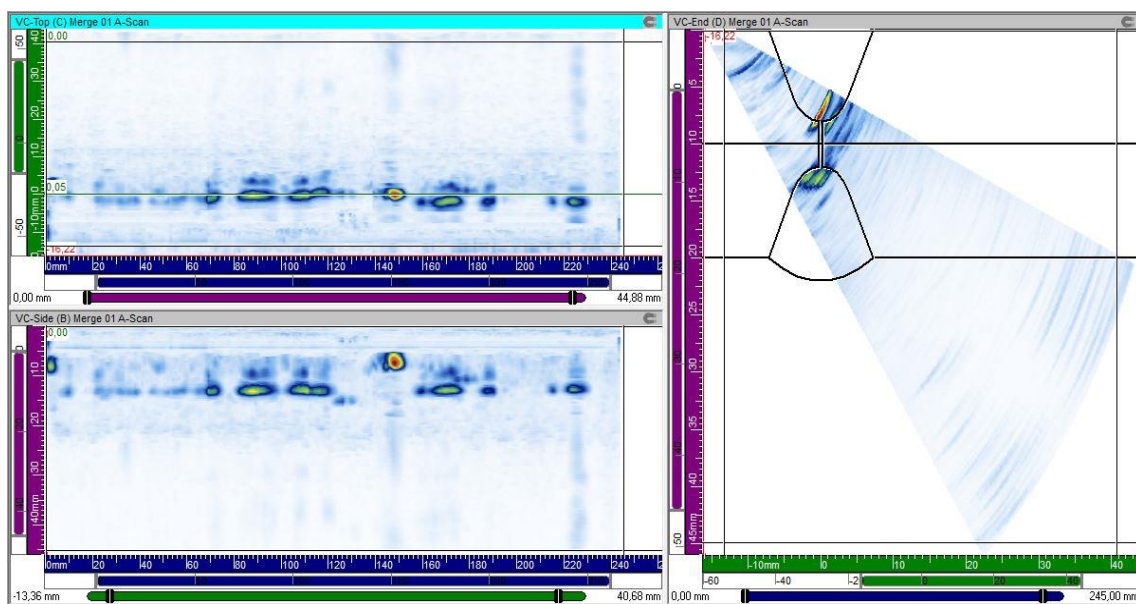
Ultrazvukové měření metodou phased array bylo provedeno přístrojem Dynaray 128/128 PR. Pro měření svarů před korozními testy byla použita PA sonda AM_9x7 (2D – maticová). Pro měření svarů po korozních testech byla použita sonda PA AS5 (1D – lineární) z důvodu nedostupnosti původní sondy. Měření bylo provedeno ručně s enkodérem z obou stran svarového spoje po celé jeho délce. [25]

Výsledky PAUT jsou orientovány a řazeny stejně jako RTG snímky vzorků.

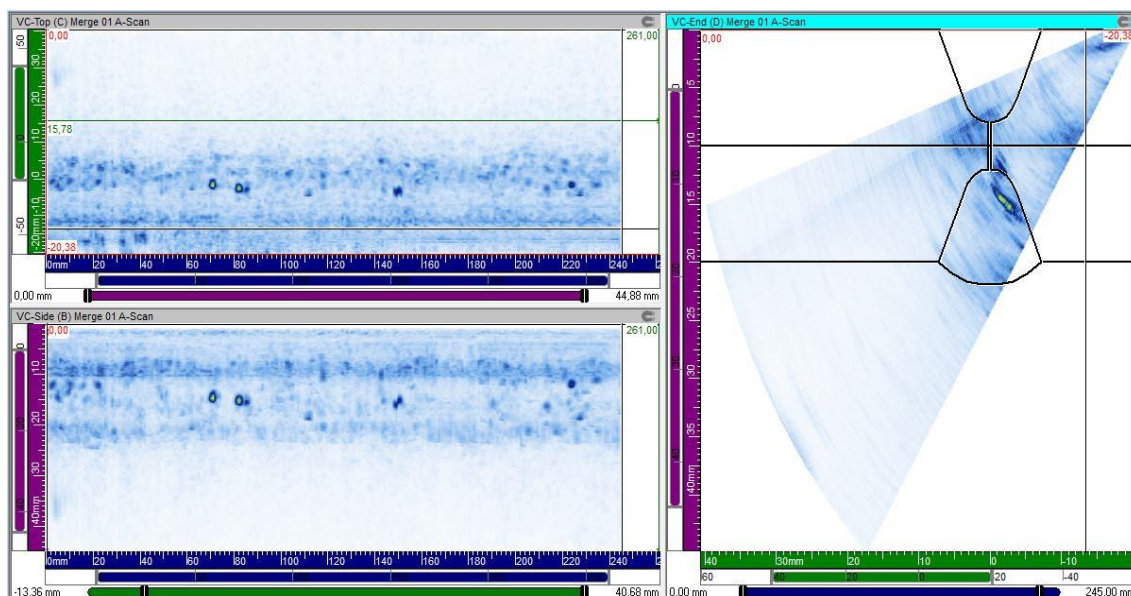
8.5.1 Výsledky měření vzorku 1.A a 1.B



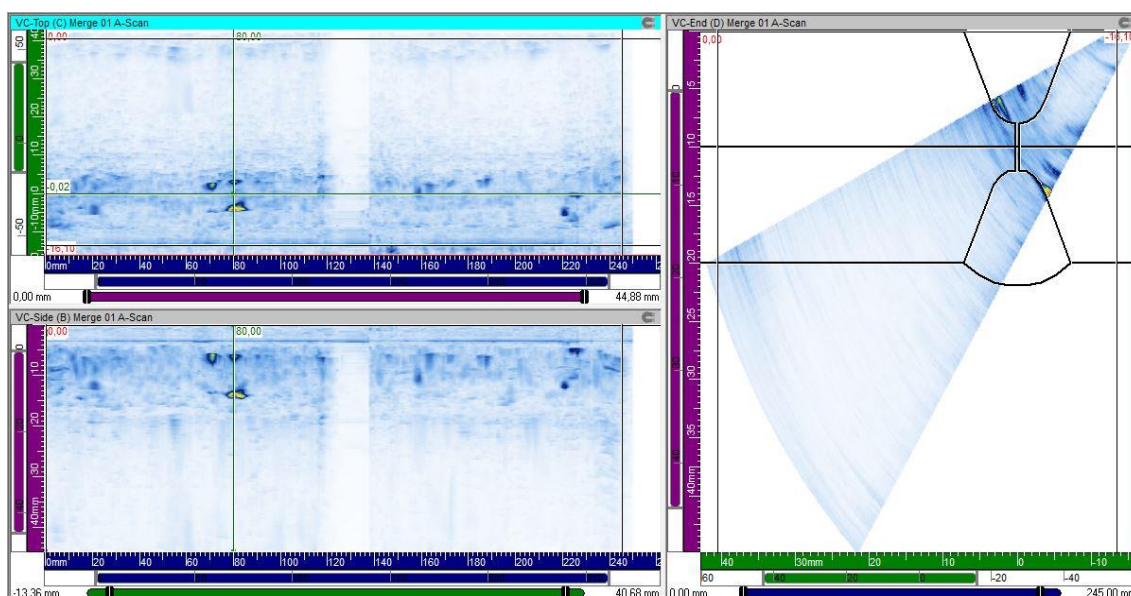
Obrázek 25: Vzorek č. 1 (zleva 1.A a 1.B) měřeno ze strany EN P265GH před korozním testem



Obrázek 26: Vzorek č. 1 (zleva 1.A a 1.B) měřeno ze strany EN P265GH po korozním testu



Obrázek 27: Vzorek č. 1 (zleva 1.A a 1.B) měřeno ze strany EN X6CrNiTi18-9 před korozním testem

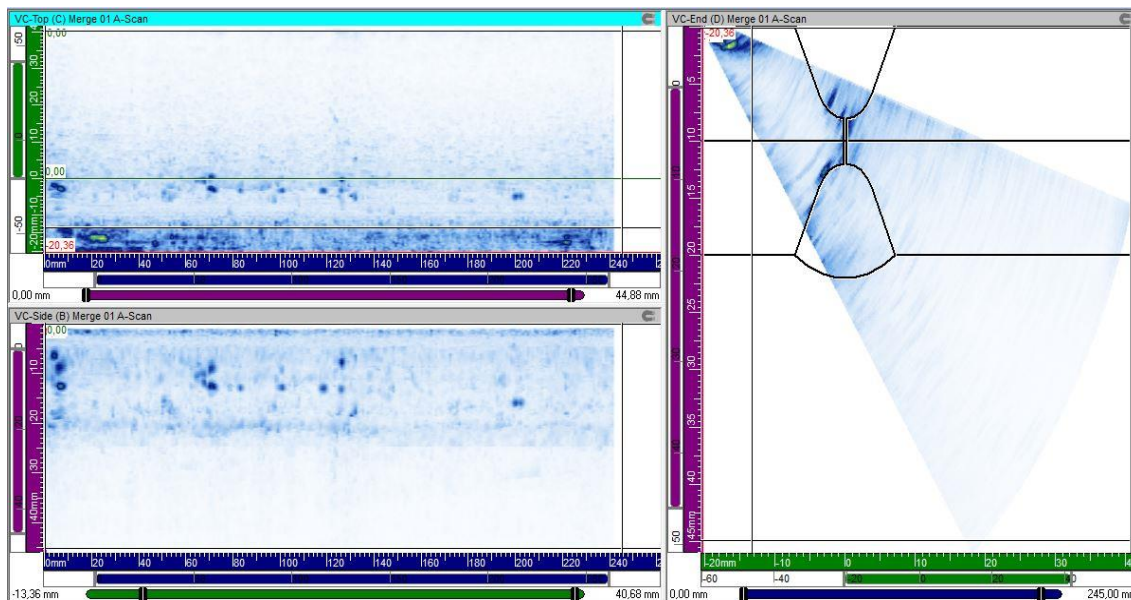


Obrázek 28: Vzorek č. 1 (zleva 1.A a 1.B) měřeno ze strany EN X6CrNiTi18-9 po korozním testu

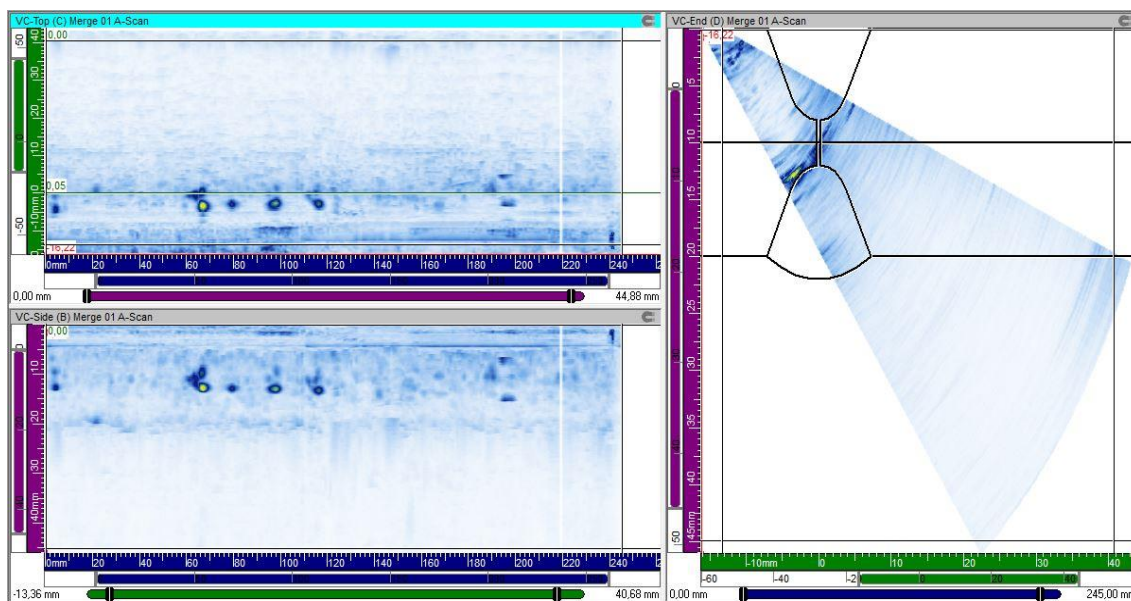
Na vzorku č. 1 bylo detekováno velké množství indikací v oblasti kořene svarového spoje nad vnitřním povrchem zejména ze strany oceli EN 265GH. Na této straně v pozici 150 mm byla detekována jedna velmi výrazná indikace ve srovnání s ostatními, viz obr. 25. Ze strany oceli EN X6CrNiTi18-9 byly detekovány pouze 2 výraznější indikace také v oblasti kořene svaru, viz obr. 27. Na vzorku není ze záznamu měření PAUT patrný výrazný rozdíl mezi výsledky před korozním testem a po korozním testu. Indikace detekovaná na straně EN X6CrNiTi18-9 na obr. 28. je v části vzorku 1.A, který nebyl vystaven korozi a nachází se na svarovém úkosu bez kontaktu s okolním

prostředím. Detekce této indikace může být zapříčiněna špatnou vazbou, nebo změnou sondy při měření po korozi. [25]

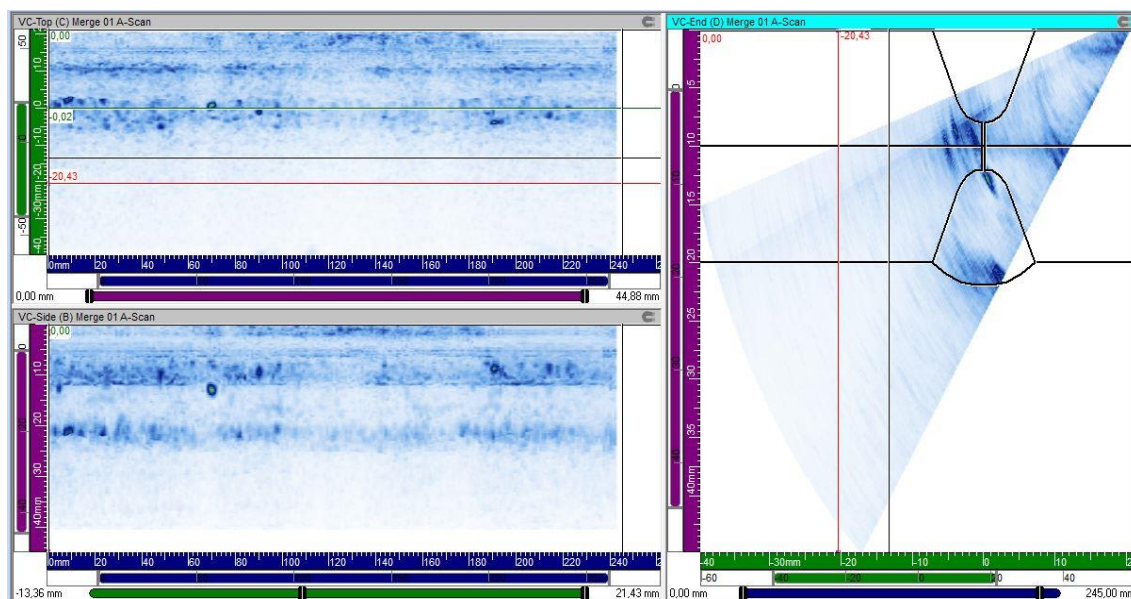
8.5.2 Výsledky měření vzorku 1.C a 1.D



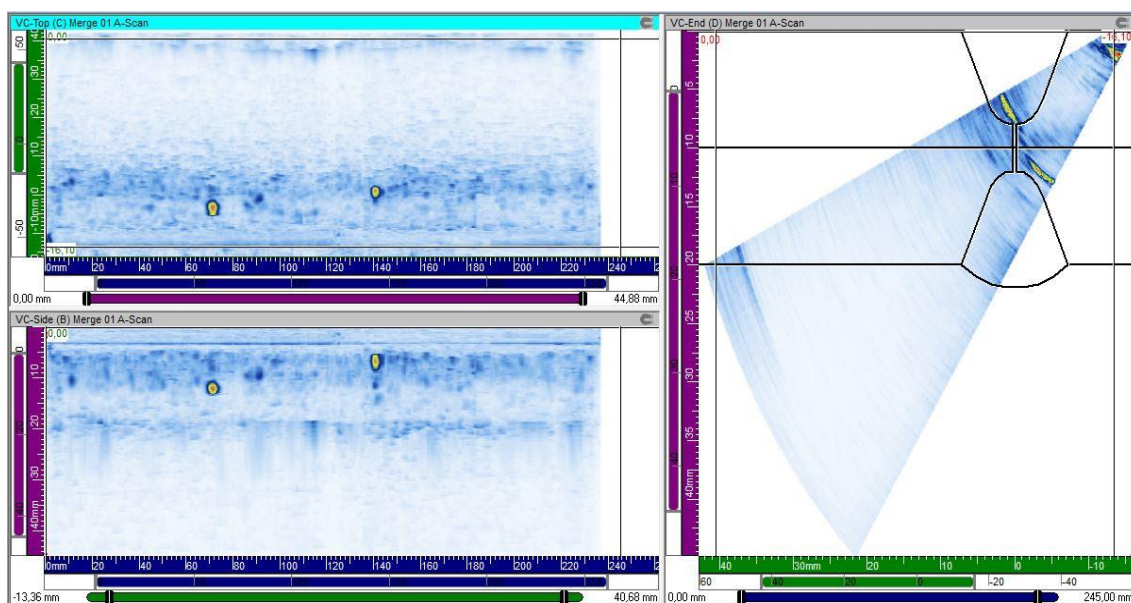
Obrázek 29: Vzorek č. 3 (zleva 1.C a 1.D) měřeno ze strany EN P265GH před korozním testem



Obrázek 30: Vzorek č. 3 (zleva 1.C a 1.D) měřeno ze strany EN P265GH po korozním testu



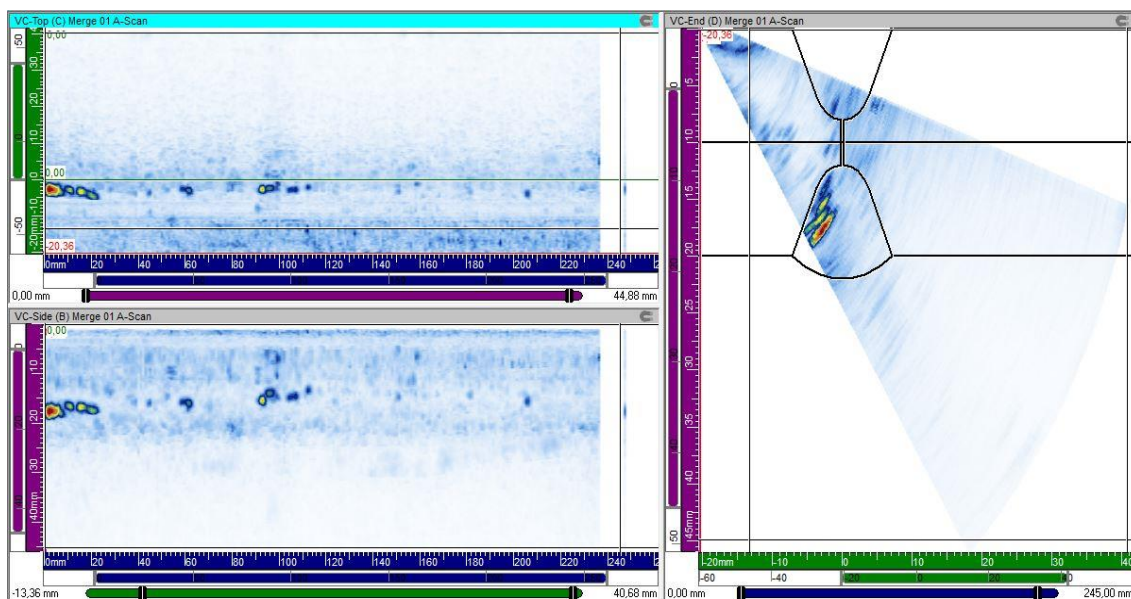
Obrázek 31: Vzorek č. 3 (zleva 1.C a 1.D) měřeno ze strany EN X6CrNiTi18-9 před korozním testem



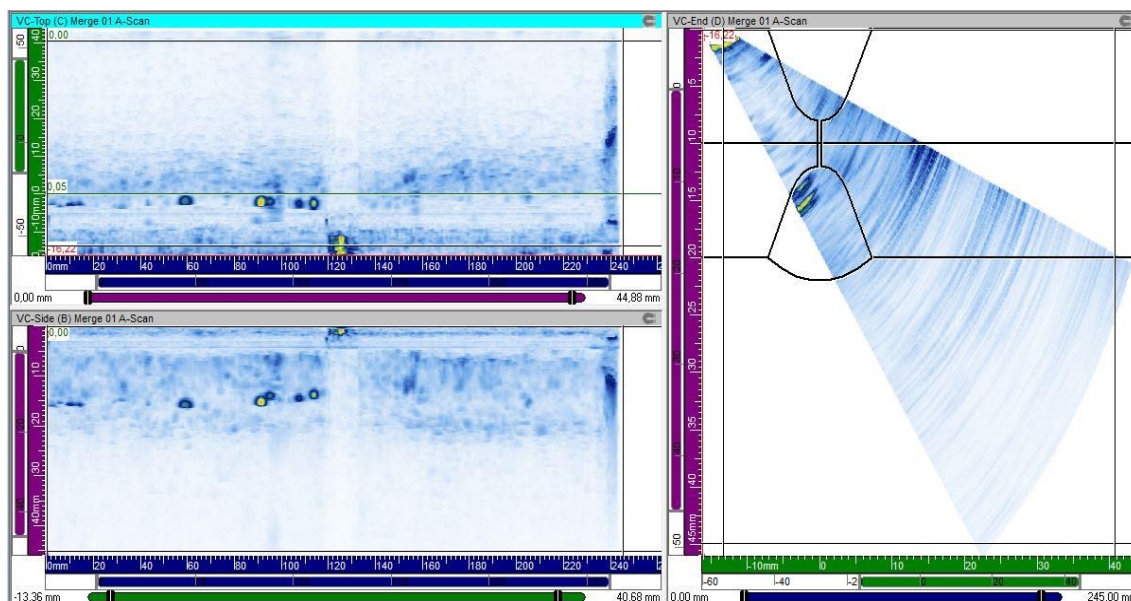
Obrázek 32: Vzorek č. 3 (zleva 1.C a 1.D) měřeno ze strany EN X6CrNiTi18-9 po korozním testu

Na vzorku č. 3 bylo při měření před korozním testem detekováno z obou stran menší množství indikací v oblasti kořene svarového spoje nad vnitřním povrchem, viz obr. 29 a obr. 31. Ve výsledcích po korozním testu jsou patrné výraznější indikace než ve výsledcích před testem. Zde nelze konstatovat, zda je tato změna způsobena korozním testem, nebo změnou ultrazvukové sondy. [25]

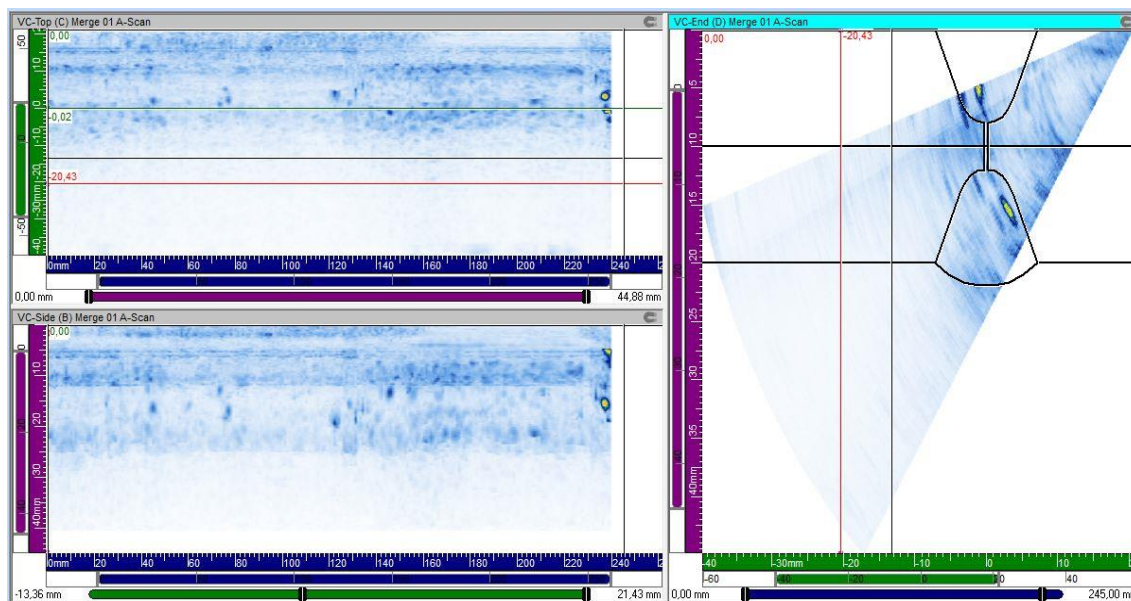
8.5.3 Výsledky měření vzorku 1.E a 1.F



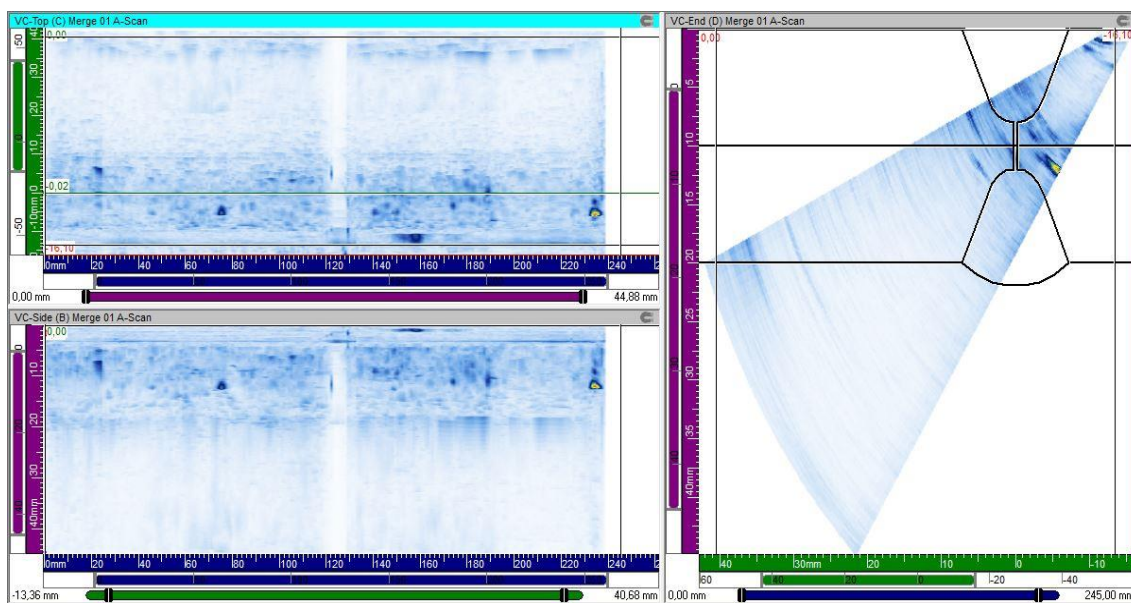
Obrázek 33: Vzorek č. 6 (zleva 1.E a 1.F) měřeno ze strany EN P265GH před korozním testem



Obrázek 34: Vzorek č. 6 (zleva 1.E a 1.F) měřeno ze strany EN P265GH po korozním testu



Obrázek 35: Vzorek č. 6 (zleva 1.E a 1.F) měřeno ze strany EN X6CrNiTi18-9 před korozním testem

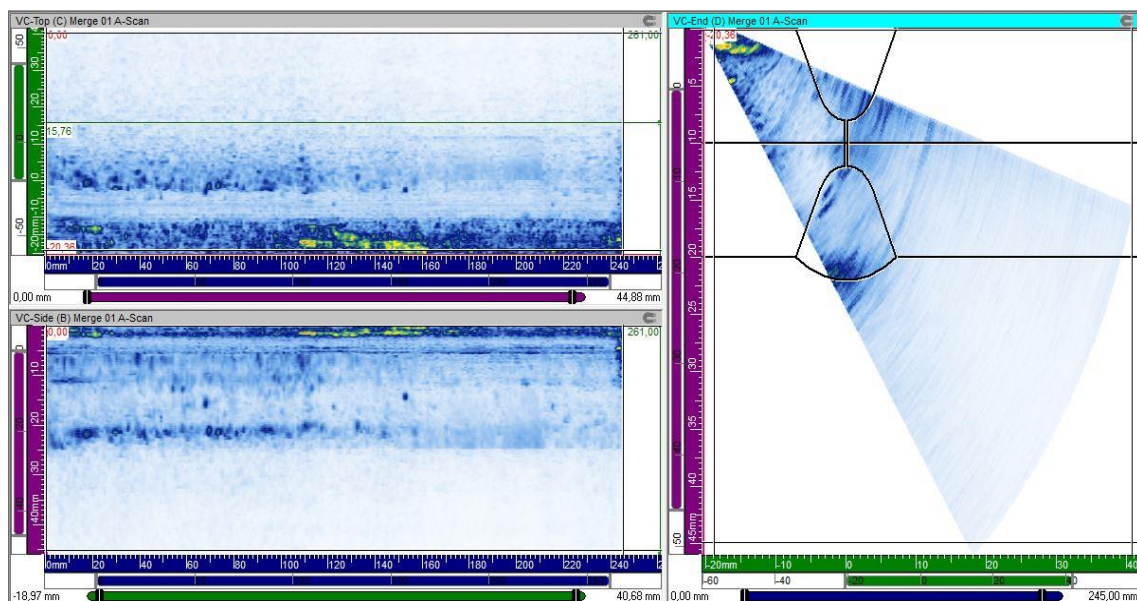


Obrázek 36: Vzorek č. 6 (zleva 1.E a 1.F) měřeno ze strany EN X6CrNiTi18-9 po korozním testu

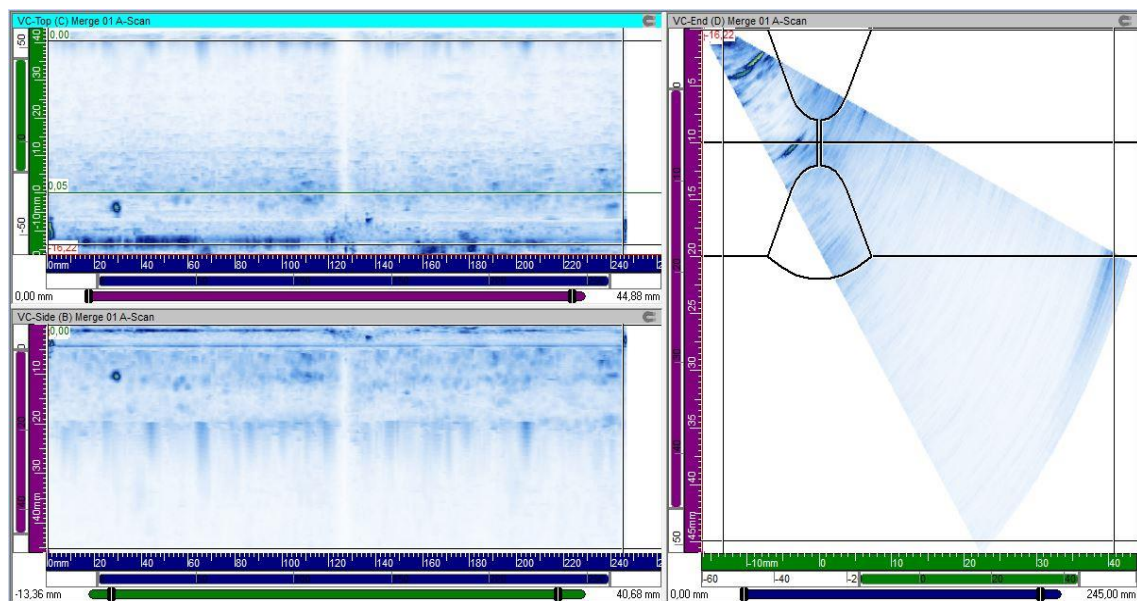
Na vzorku č. 6 bylo detekováno velké množství indikací v oblasti kořene svarového spoje nad vnitřním povrchem. Indikace jsou především na začátku a v první polovině (zleva) skenované oblasti, a to hlavně ze strany oceli EN P265GH, viz obr. 33. Na straně této oceli jsou na záznamu měření po korozním testu výraznější indikace než před korozním testem, viz obr. 34. Zde by se mohlo jednat o projev korozního poškození.

[26]

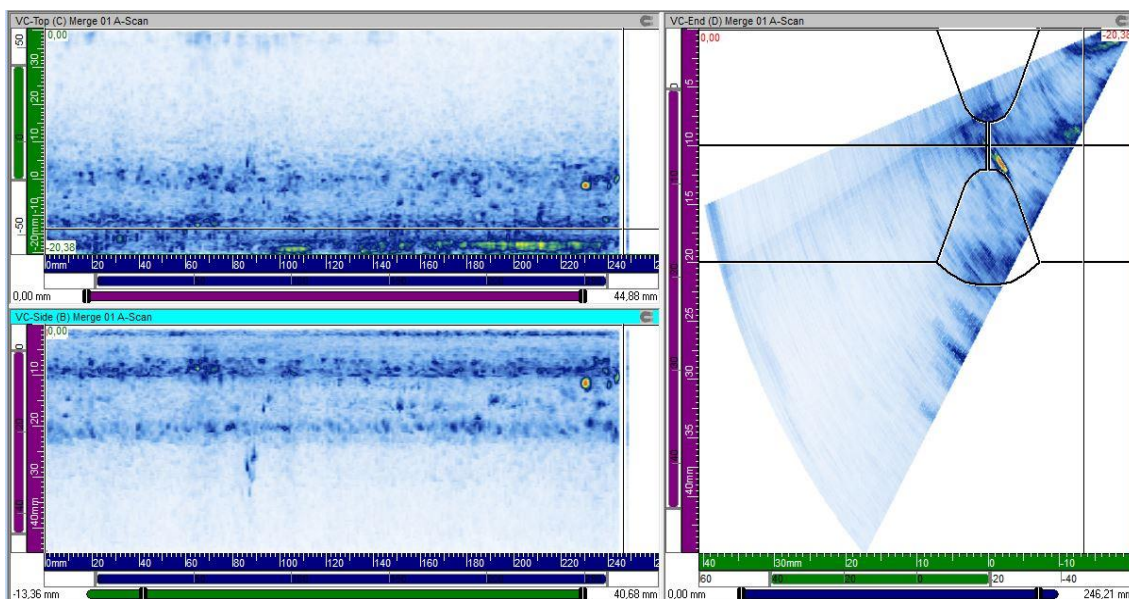
8.5.4 Výsledky měření vzorku 2.A a 2.B



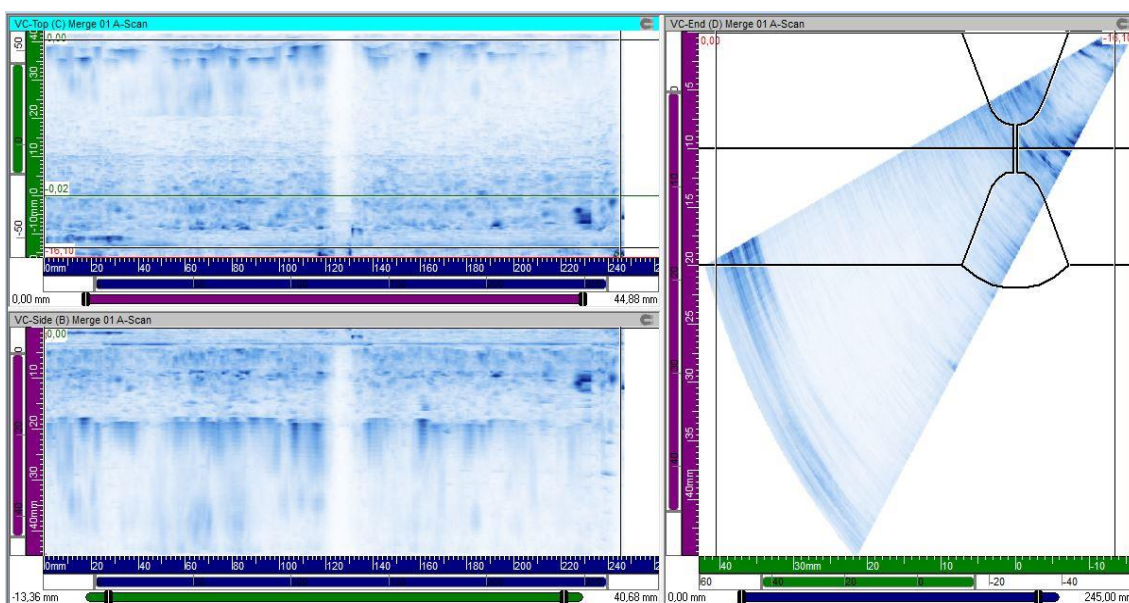
Obrázek 37: Vzorek č. 2 (zleva 2.A a 2.B) měřeno ze strany EN P265GH před korozním testem



Obrázek 38: Vzorek č. 2 (zleva 2.A a 2.B) měřeno ze strany EN P265GH, strana po korozním testu



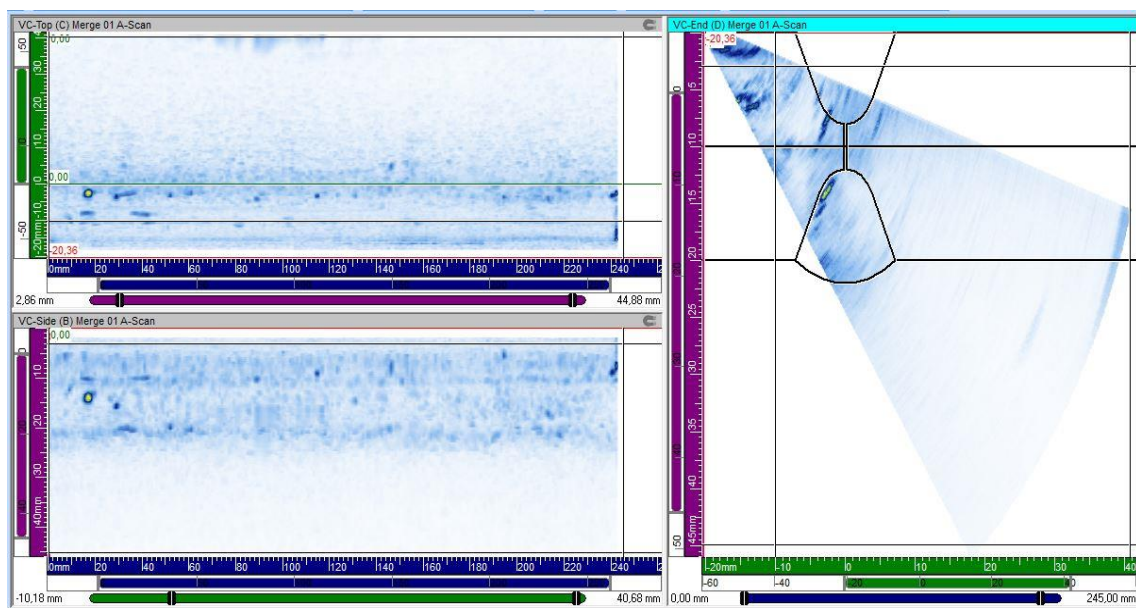
Obrázek 39: Vzorek č. 2 (zleva 2.A a 2.B) měřeno ze strany EN X6CrNiTi18-9 před korozním testem



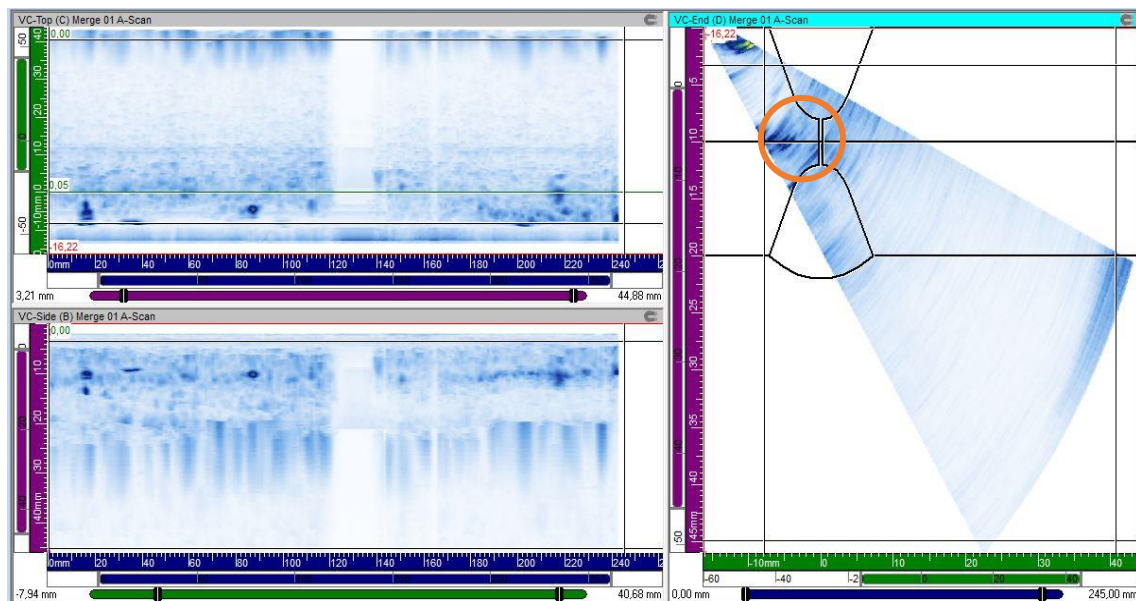
Obrázek 40: Vzorek č. 2 (zleva 2.A a 2.B) měřeno ze strany EN X6CrNiTi18-9 po korozním testu

Na vzorku č. 2 bylo z obou stran svaru detekováno menší množství malých indikací v oblasti kořene svarového spoje nad vnitřním povrchem, viz obr. 37 a obr. 39. Ze strany oceli EN X6CrNiTi18-9 byla navíc detekována indikace na konci zkoušené oblasti u kraje zkušební vzorku. Na výsledcích měření vzorků po korozním testu byla ze strany oceli EN P265HG detekována indikace na vnitřním povrchu v pozici 30 mm. [25]

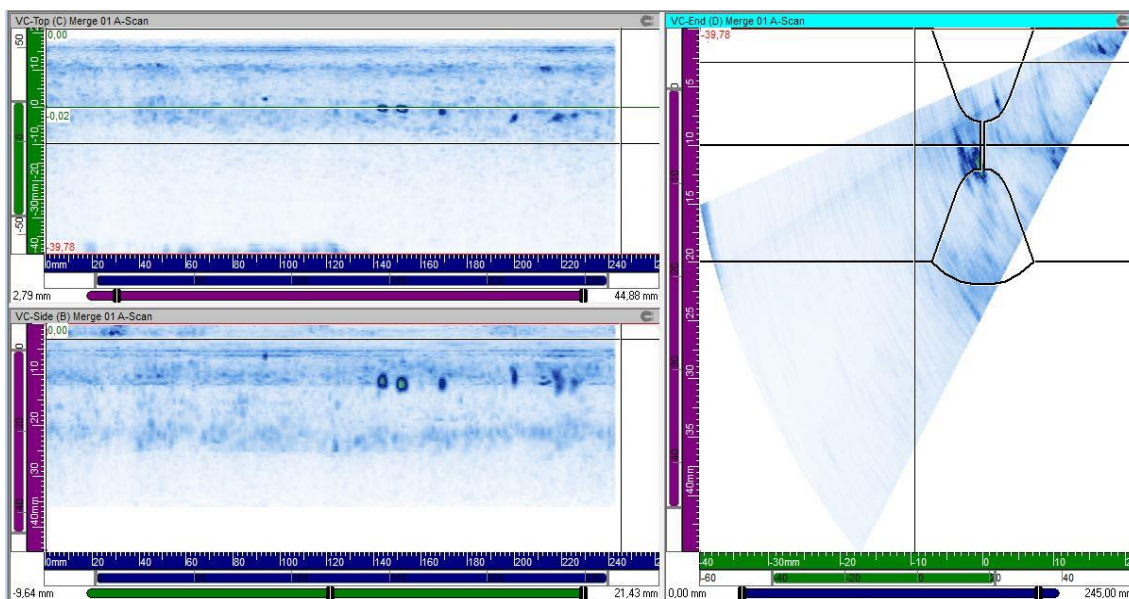
8.5.5 Výsledky měření vzorku 2.C a 2.D



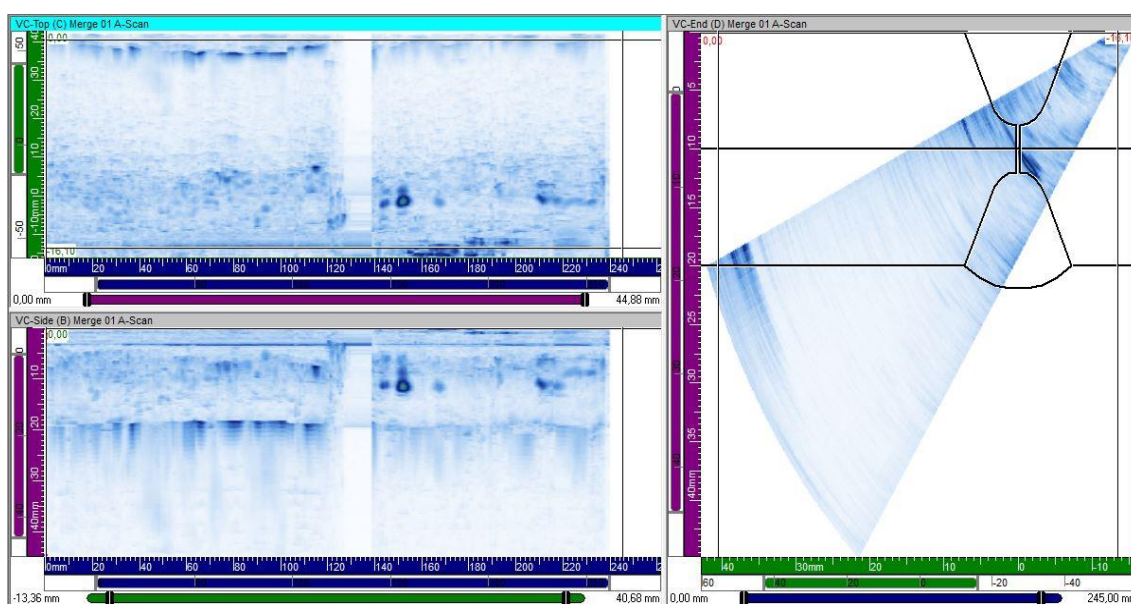
Obrázek 41: Vzorek č. 4 (zleva 2.C a 2.D) měřeno ze strany EN P265GH před korozním testem



Obrázek 42: Vzorek č. 4 (zleva 2.C a 2.D) měřeno ze strany EN P265GH po korozním testu



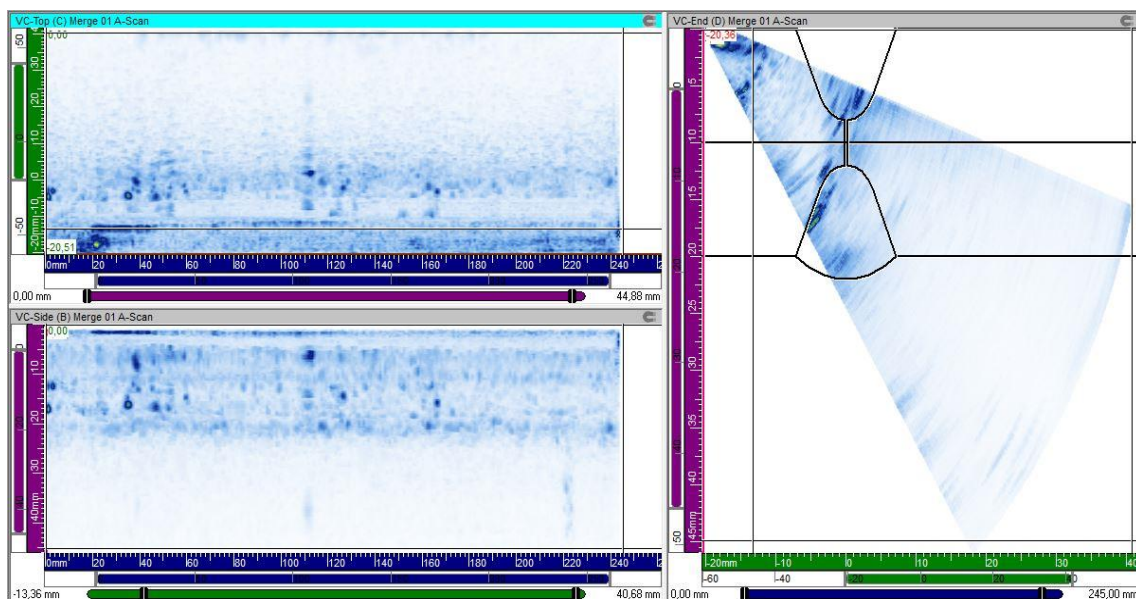
Obrázek 43: Vzorek č. 4 (zleva 2.C a 2.D) měřeno ze strany EN X6CrNiTi18-9 před korozním testem



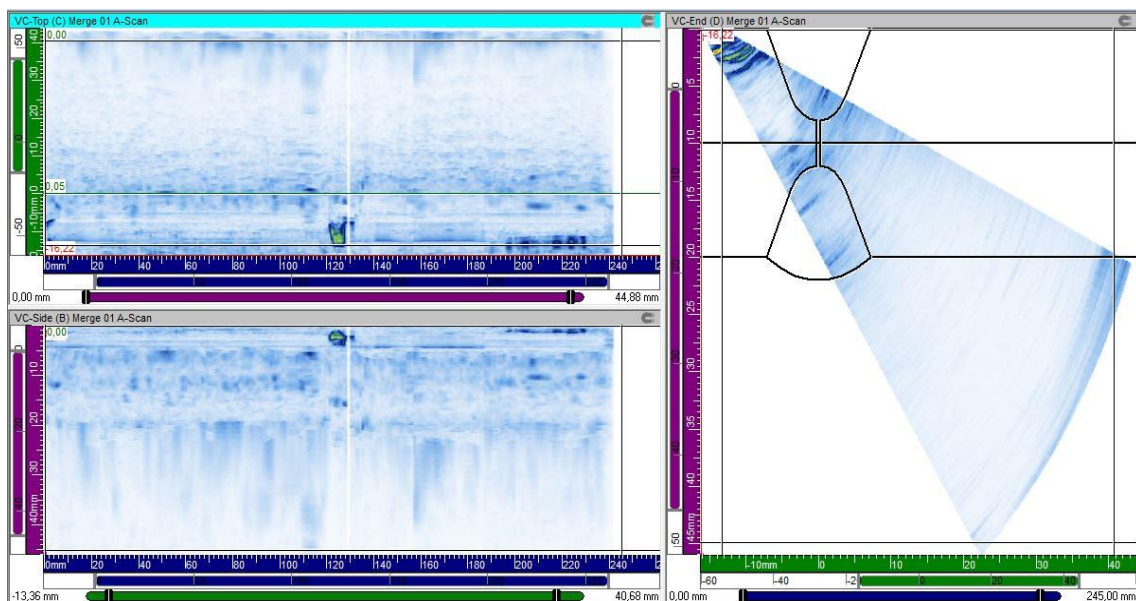
Obrázek 44: Vzorek č. 4 (zleva 2.C a 2.D) měřeno ze strany EN X6CrNiTi18-9 po korozním testu

Na vzorku č. 4 bylo z obou stran svarového spoje detekováno pouze několik slabších indikací v oblasti kořene svarového spoje, viz obr. 41 a obr. 43. Na výsledcích měření vzorků po korozním testu byla ze strany oceli EN P265GH detekována indikace na vnitřním povrchu. Tato indikace se zřejmě vzhledem k její poloze nachází na okraji kořene a může se jednat o iniciaci vrubu vzniklého působením korozního prostředí, viz obr. 42 oranžový kruh. [25]

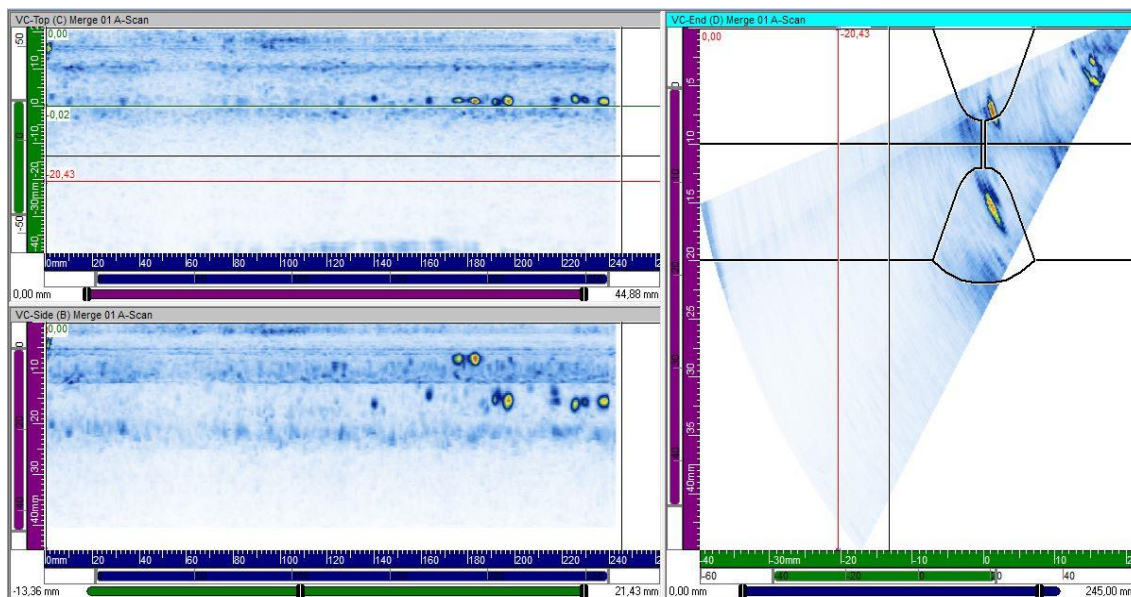
8.5.6 Výsledky měření vzorku 2.E a 2.F



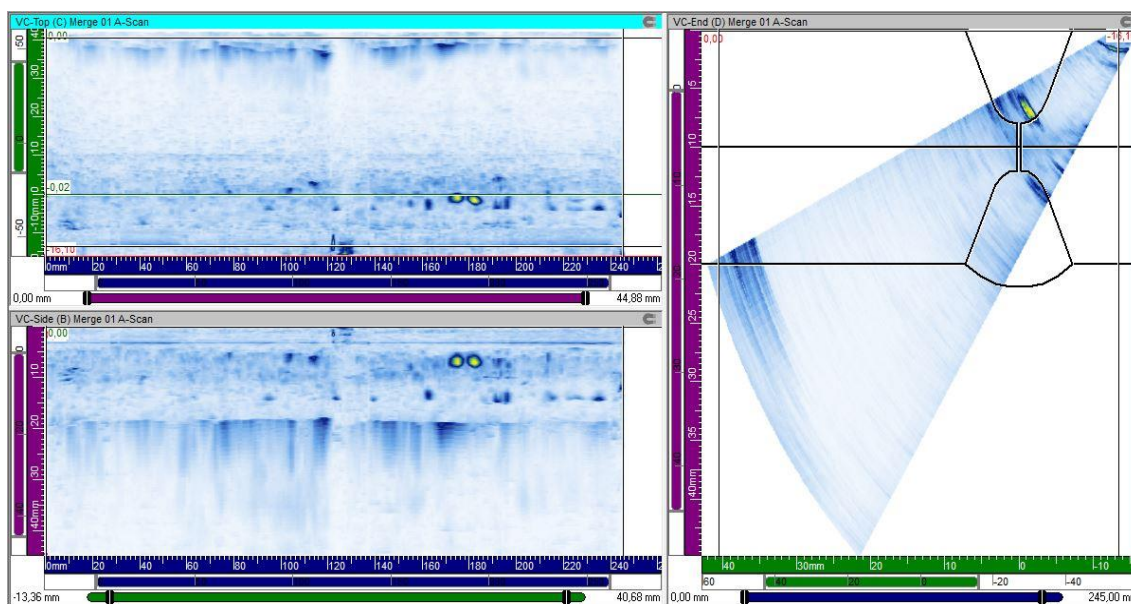
Obrázek 45: Vzorek č. 5 (zleva 2.E a 2.F) měřeno ze strany EN P265GH před korozním testem



Obrázek 46: Vzorek č. 5 (zleva 2.E a 2.F) měřeno ze strany EN P265GH po korozním testu



Obrázek 47: Vzorek č. 5 (zleva 2.E a 2.F) měřeno ze strany EN X6CrNiTi18-9 před korozním testem



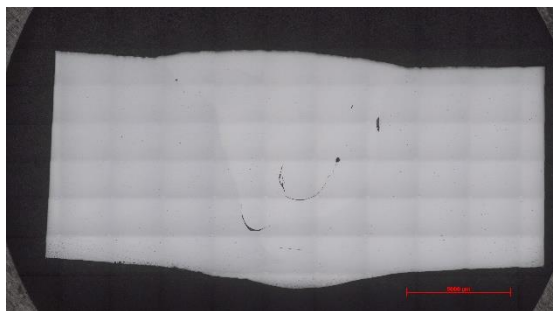
Obrázek 48: Vzorek č. 5 (zleva 2.E a 2.F) měřeno ze strany EN X6CrNiTi18-9 po korozním testu

Na vzorku č. 5 bylo detekováno větší množství indikací v oblasti kořene svarového spoje nad vnitřním povrchem. Především v druhé polovině skenované oblasti (vzorek 2.F) na straně oceli EN X6CrNiTi18-9 jsou indikace výraznější. Na vzorku není ze záznamu měření PAUT patrný výrazný rozdíl mezi výsledky před korozním testem a po korozním testu. [25]

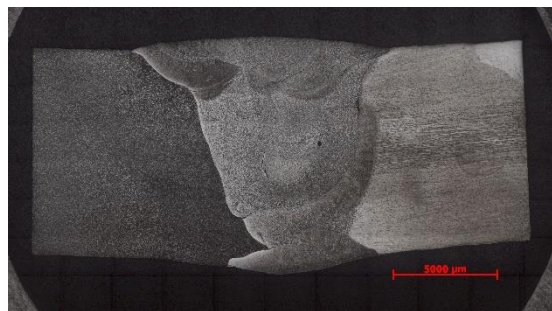
8.6 Metalografie

Metalografické výbrusy byly připraveny ze vzorků 1.A a 2.A, tedy vzorků, na kterých nebyly provedeny korozní testy a ze vzorků 1.F a 2.F, tedy vzorků, které byly vystaveny koroznímu prostředí kotlové vody + 5 % NaCl. Snímky byly pořízeny na světelném mikroskopu.

8.6.1 Vzorek 1.A



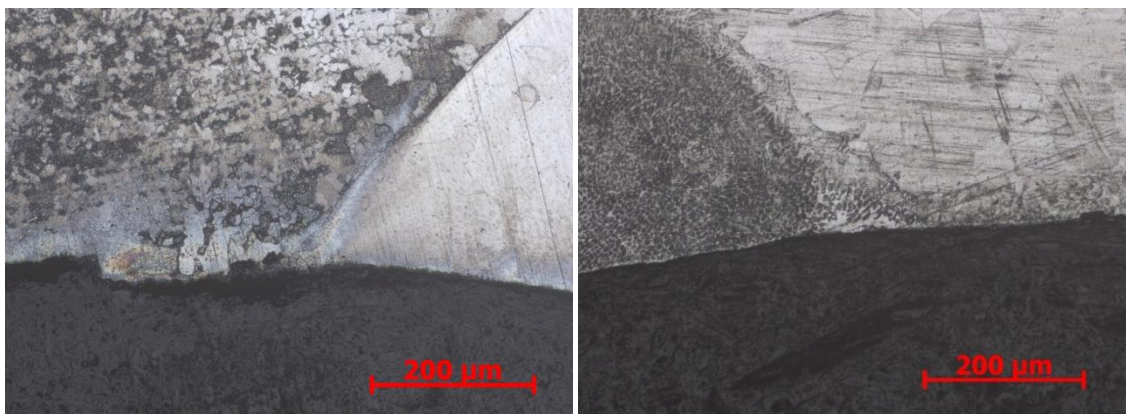
Obrázek 49: Makrosnímek svarového spoje 1.A, neleptáno



Obrázek 50: Makrosnímek svarového spoje 1.A, leptadlo Marble

Obr. 49 je makrosnímek vzorku 1.A v nenaleptaném stavu. Je zde patrný pór ve fúzní zóně na hranici svarového kovu a nerezové oceli. Ve středu svarového kovu a v levé dolní části jsou přítomny vady. Pravděpodobně se jedná o oxidické pleny, tedy tenké blány oxidů, které vznikají na povrchu svarové lázně kvůli nedostatečné ochraně lázně inertním plynem. Kvůli turbulentního proudění svarové lázně se takto vzniklé oxidy dostávají hlouběji do svaru.

Obr. 50 je makrosnímek vzorku 1.A v naleptaném stavu. Jsou zde pozorovatelné hladiny toku svarové lázně. Ze snímku je patrné, že svářeč provedl svar také z dolní části spoje. Tento krok nebyl v souladu s WPS. Svar měl být proveden pouze z polohy shora.

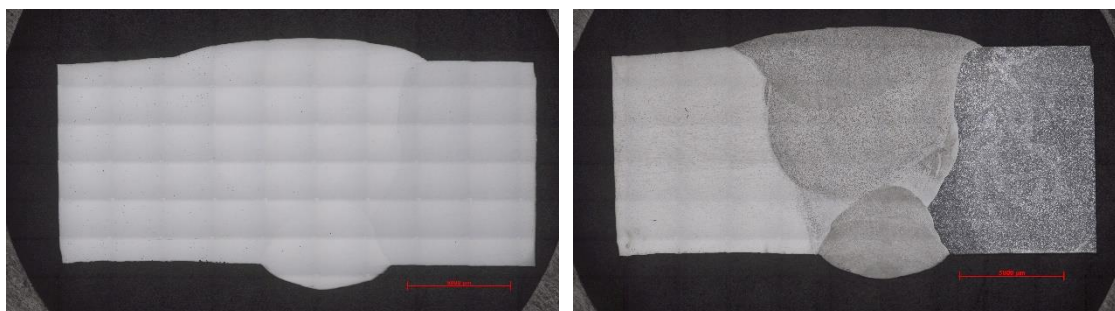


Obrázek 51: Snímek kořene svarového spoje 1.A na straně EN P265GH, zvětšeno 100x, leptadlo Marble

Obrázek 52: Snímek kořene svarového spoje 1.A na straně EN X6CrNiTi18-9, zvětšeno 100x, leptadlo Marble

Na obr. 51 je vidět tepelná degradace materiálu EN P265GH v TOO, ke které došlo patrně neoptimálním svařovacím procesem. Došlo zde také ke zhrubnutí zrna.

8.6.2 Vzorek 2.A

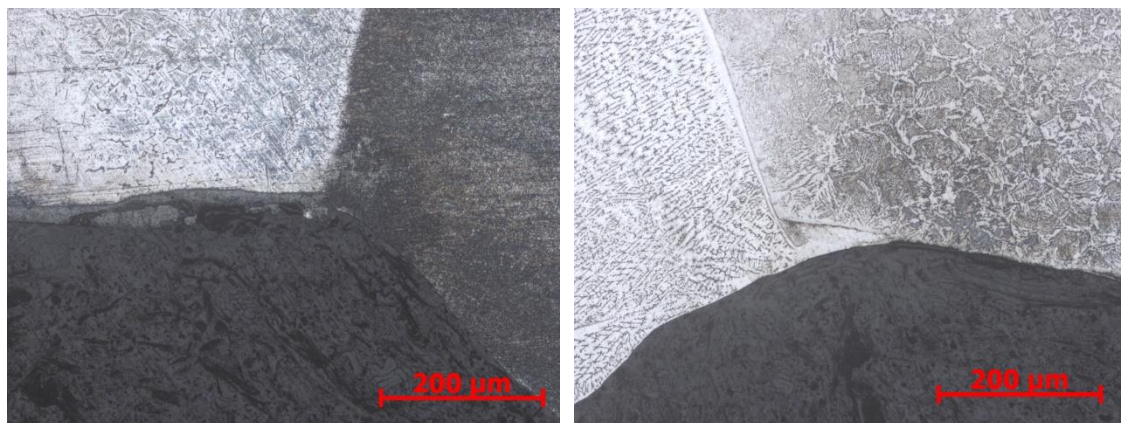


Obrázek 53: Makrosnímek svarového spoje 2.A, neleptáno

Obrázek 54: Makrosnímek svarového spoje 2.A, leptadlo Marble

Obr. 53 je makrosnímek vzorku 2.A v nenaleptaném stavu. Na snímku není zřetelná přítomnost žádné vady.

Obr. 54 je makrosnímek vzorku 2.A v naleptaném stavu. Jsou zde pozorovatelné hladiny toku svarové lázně. Jedná se o svar opravovaný. Opravný svar v tomto případě zasahuje 3 mm do původního svaru.

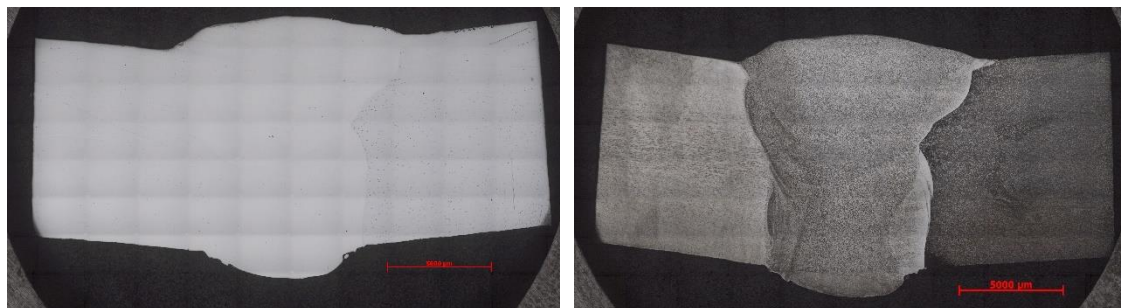


Obrázek 55: Snímek kořene svarového spoje 2.A na straně EN X6CrNiTi18-9, zvětšeno 100x, leptadlo Marble

Obrázek 56: Snímek kořene svarového spoje 2.A na straně EN P265GH, zvětšeno 100x, leptadlo Marble

Obr. 56 je snímek kořene opravovaného svarového spoje na straně EN P265GH. Můžeme zde vidět, že v TOO došlo ke vzniku zákalné struktury vlivem rychlého odvodu tepla při provádění opravného svaru.

8.6.3 Vzorek 1.F

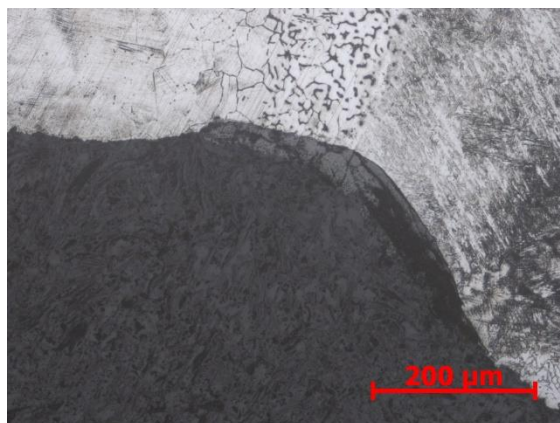


Obrázek 57: Makrosnímek svarového spoje 1.F, neleptáno

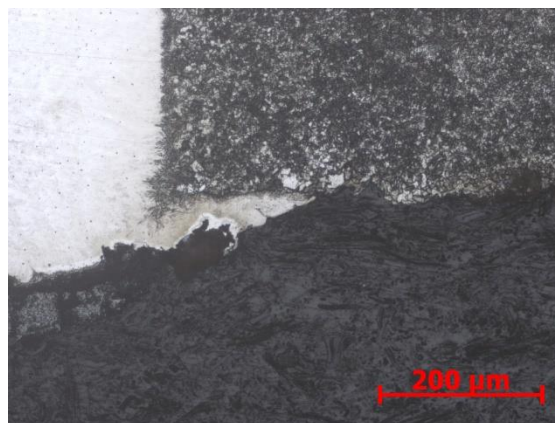
Obrázek 58: Makrosnímek svarového spoje 1.F, leptadlo Marble

Obr. 57 je makrosnímek vzorku 1.F v nenaleptaném stavu. Jedná se o svar, na kterém byl proveden korozní test. Na tomto snímku nejsou patrné žádné známky hloubkové koroze.

Obr. 58 je makrosnímek vzorku 2.A v naleptaném stavu. Jsou zde pozorovatelné hladiny toku svarové lázně.



Obrázek 59: Snímek kořene svarového spoje 1.F na straně EN X6CrNiTi18-9, zvětšeno 100x, leptadlo Marble

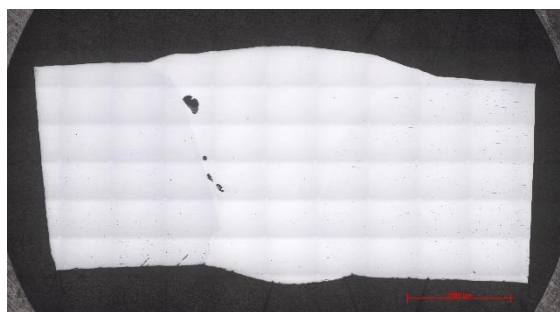


Obrázek 60: Snímek kořene svarového spoje 1.F na straně EN P265GH, zvětšeno 100x, leptadlo Marble

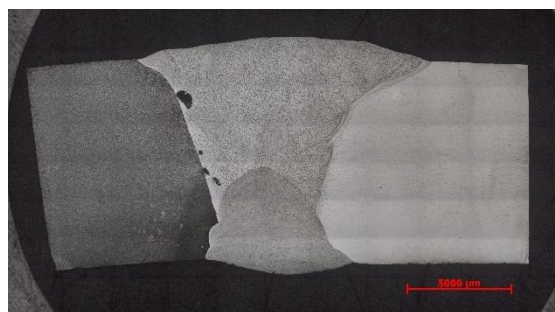
Obr. 59 je snímek kořene korodovaného svarového spoje 1.F na straně oceli EN X6CrNiTi18-9. Není zde patrné žádné korozní poškození.

Obr. 60 je snímek kořene korodovaného svarového spoje 1.F na straně oceli EN P265GH. Je zde patrné lokální korozní poškození základního materiálu i svarového kovu. Maximální hloubka koroze je 25 μm.

8.6.4 Vzorek 2.F



Obrázek 61: Makrosnímek svarového spoje 2.F, neleptáno



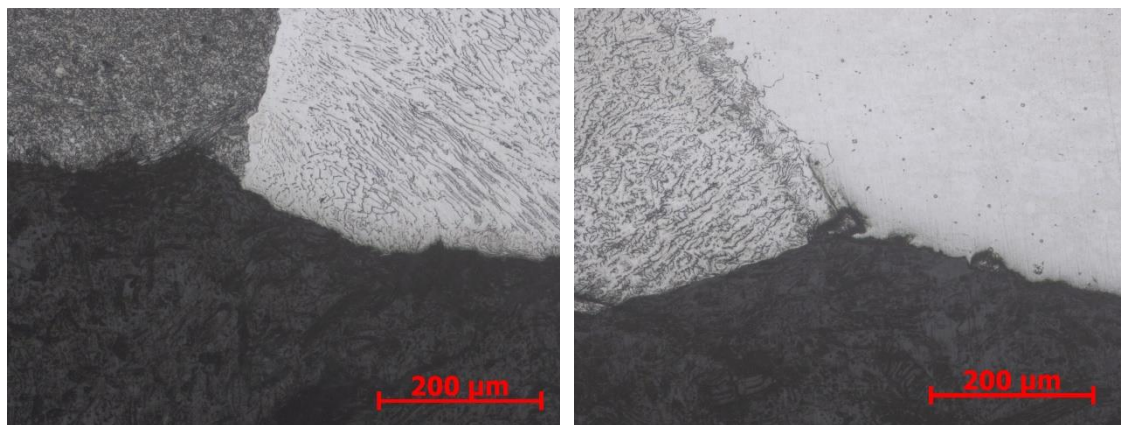
Obrázek 62: Makrosnímek svarového spoje 2.F, leptadlo Marble

Obr. 61 je makrosnímek vzorku 2.F v nenaleptaném stavu. Na snímku můžeme pozorovat póry na rozmezí svarového kovu a fúzní zóny se základním materiálem P265GH. Na tomto snímku nejsou patrné žádné známky hloubkové koroze.

Obr. 62 je makrosnímek vzorku 2.F v naleptaném stavu. Jedná o svar opravovaný. Opravný svar v tomto případě zasahuje 4,5 mm do původního svaru. Dle makrosnímku lze vidět, že oprava nebyla dostačující, resp. by se dalo říct, že svar byl neopravitelný,

protože pro odstranění této nepřijatelné vady by se musela odebrat většina svarového kovu.

Ze snímků vyplývá, že svářeč nezajistil dostatečnou ochranu svarové lázně ochrannou atmosférou a v průběhu svařování docházelo k její oxidaci. Kladení svarových housenek bylo nerovnoměrné.



Obrázek 63: Snímek kořene svarového spoje 2.F na straně EN P265GH, zvětšeno 100x, leptadlo Marble

Obrázek 64: Snímek kořene svarového spoje 2.F na straně EN X6CrNiTi18-9, zvětšeno 100x, leptadlo Marble

Obr. 63 je snímek kořene korodovaného svarového spoje 2.F na straně oceli EN P265GH. Je zde patrné korozní poškození základního materiálu i svarového kovu. Maximální hloubka koroze je zde 50 μm .

Obr. 64 je snímek kořene korodovaného svarového spoje 2.F na straně oceli EN X6CrNiTi18-9. Je zde patrná bodová koroze v oblasti fúzní zóny a základního materiálu.

8.7 Měření lomové houževnatosti

Měření lomové houževnatosti, resp. měření absorbované energie K_8 bylo měřeno na Charpyho kladivu. Před provedením měření byly odzkoušeny různé tloušťky zkušebních vzorků, jejichž výška byla 10 mm. Z experimentálních zkušebních dat byla vybrána optimální tloušťka zkušebního tělesa 3,5 mm. Při této tloušťce zkušebního vzorku svaru se hodnota absorbované energie na Charpyho kladivu pohybovala okolo středu stupnice, a bylo tak možné citlivě změřit případné odchylky K_8 . Kvůli menší tloušťce vzorků dochází k větší prostorové deformaci, což je nežádoucí, protože dojde ke zkreslení hodnot absorbované energie. Energie, která byla změřena, nebyla využita pouze na přeražení svaru, ale také k prostorové deformaci vzorku. Pokud však je výška všech vzorků stejná, předpokládáme, že dojde u všech vzorků k podobné prostorové deformaci a vzniklá chyba se při vzájemném porovnání vzorků vyruší. Zkušební vzorky pro měření K_8 ze zkušebních svarů byly děleny vodním paprskem.

Měřeny byly série pěti zkušebních vzorků z každého vzorku svaru. Hodnoceny dále byly pouze vzorky opravovaných svarů 2.A až 2.F. Neopravované svary obsahovali velké množství vnitřních vad, čímž byly výsledky měření u těchto vzorků výrazně zkresleny. Níže jsou vybrané snímky zkušebních vzorků po provedení měření absorbované energie K_8 . Jsou zde zastoupeny veškeré jevy pozorovatelné na vzorcích.



**Obrázek 65: vzorky 2.A
po měření K_8**



**Obrázek 66: vzorky 2.D
po měření K_8**



**Obrázek 67: vzorky 2.F
po měření K_8**

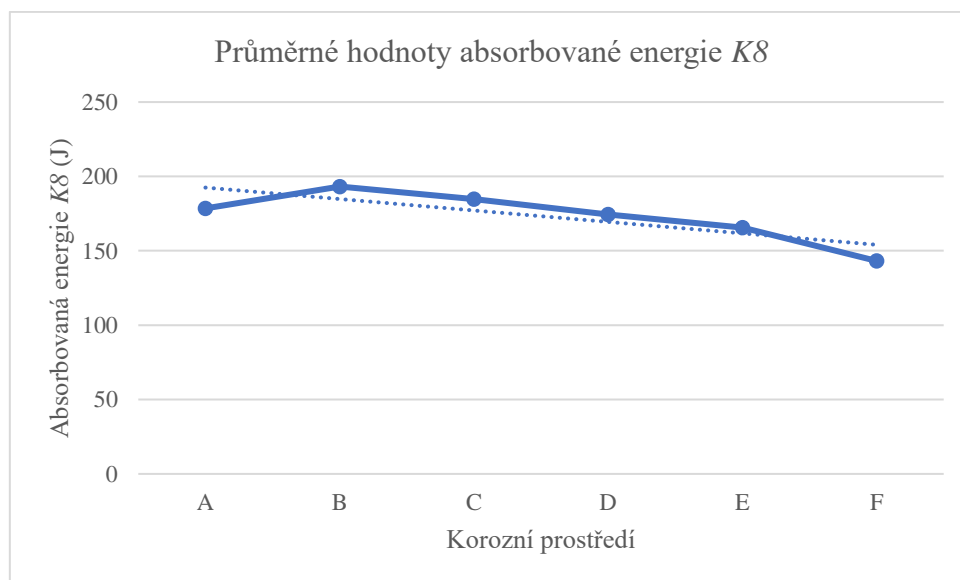
Na obr. 65 jsou zkušební vzorky svaru, který nebyl podroben korozním testům. Došlo zde k plastické deformaci zejména na straně oceli EN X6CrNiTi18-9. Nedošlo zde k iniciaci lomu.

Na obr. 66 jsou zkušební vzorky svaru, který byl podroben korozním testům v prostředí kotelní vody + 0,05 % NaCl. U zkušebních vzorků 1 a 5 došlo k iniciaci malého částečného lomu na straně oceli EN X6CrNiTi18-9. Stejně tak u zkušebních vzorků 3 a 4 kde došlo k iniciaci rozsáhlého částečného lomu, kde u zkušební vzorku 4 došlo k přelomení. U zkušební vzorku 2 došlo k iniciaci malého částečného lomu na straně oceli EN P265GH.

Na obr. 67 jsou zkušební vzorky svaru, který byl podroben korozním testům v prostředí kotelní vody + 5 % NaCl. U všech zkušebních vzorků došlo k iniciaci lomu na straně oceli EN P265GH v různé míře.

Tabulka 12: Hodnoty K8 získané měřením na vzorcích opravovaných svarů

číslo vzorku	1 (J)	2 (J)	3 (J)	4 (J)	5 (J)	směrodatná odchylka	průměrná hodnota (J)
2.A	170	166	184	178	194	11,2	178,4
2.B	196	190	198	188	194	4,2	193,2
2.C	202	190	142	212	178	27,1	184,8
2.D	184	204	168	102	214	44,2	174,4
2.E	92	170	188	198	180	42,4	165,6
2.F	146	164	184	112	110	32,3	143,2



Obrázek 68: Graf průměrných hodnot absorbované energie K8 s lineární spojnicí trendu tečkovaně

Průměrné hodnoty naměřené absorbované energie vykazují pokles s rostoucím množstvím rozpuštěných přidaných chloridů v korozním prostředí. Na grafu (obr. 68) se předpokládanému trendu vymyká pouze hodnota průměrné absorbované energie u vzorku 2.A, který nebyl podroben korozním testům. Tato odchylka mohla být zapříčiněna přítomností vnitřních vad ve svarovém spoji.

8.8 Diskuse

U všech vzorků podrobených korozním testům došlo k velmi malému rozdílu hmotnostního úbytku. I přesto zde lze pozorovat trend růstu hmotnostního úbytku s rostoucím obsahem přidaných chloridů v korozním prostředí. Minimální úbytek hmotností na všech vzorcích byl pravděpodobně způsoben dobrým inhibičním působením chemikálií obsažených v kotlové vodě. Na základě velmi malého rozdílu v korozním poškození vzorků v jednotlivých prostředí lze říct, že chemie kotlové vody účinně zpomalila korozní procesy, a i ve velmi agresivních prostředích jako je prostředí s obsahem 5 % NaCl, vzorky vykazují minimální hmotností úbytky.

Malé rozdíly v korozním napadení vzorků byly též zapříčiněny parametry testu, které byly 53 dní při pokojové teplotě. Výraznější rozdíly by se mohly projevit po delší době, nebo v případě provádění korozních testů za vyšších teplot.

NDT metody a také metalografické výbrusy ukázaly, že svarové spoje obsahují velké množství vnitřních vad, které by byly klasifikovány jako nepřijatelné. To bylo způsobeno především špatnou ochranou svarové lázně inertním plynem. Jelikož korozní napadení vzniklé v průběhu korozních testů nebylo závažné, dalo se předpokládat, že výrazný vliv na měření absorbované energie K_8 budou mít právě přítomné vady ve svarových spojích. Tato skutečnost se následně potvrdila při měření houževnatosti vzorků. Z tohoto důvodu byly dále vyhodnocovány pouze vzorky opravovaných svarů, kde bylo množství vnitřních vad výrazně menší. Měření na těchto vzorcích ukázalo, že průměrné hodnoty absorbované energie klesají s rostoucím přidaným množstvím chloridů v korozním prostředí. Množství chloridů má tedy i v prostředí chemicky regulované kotlové vody vliv na pevnost a pravděpodobně i celkovou životnost svarového spoje.

Hodnotíme-li účinnost a použitelnost NDT metod, pomocí rentgenu lze snáze určit přesnou polohu vady v rovině rovnoběžné s rovinou tvořenou snímací plochou

detektoru rentgenového záření. Rentgenové záření v tomto případě také detekovalo vnitřní vady s větší citlivostí než ultrazvukové měření. U měření PAUT, bylo určení polohy některých vad obtížnější. Použití ultrazvuku nám poskytne navíc oproti rentgenu informaci o hloubce vady a byly zde na rozdíl od RTG zachyceny změny na svarových spojích před a po korozních testech.

Na metalografických výbrusech byly zaznamenány oxidické pleny. Tyto vady mohou kriticky snižovat průřez svarového spoje. Jsou také nebezpečným koncentrátorem napětí a jejich přítomnost může vést k tvorbě trhlin a studených spojů. Mikrosnímky svarů zaznamenávají korozní poškození zejména v kořeni svarových spojů. Výraznější korozní poškození bylo zaznamenáno na straně oceli EN P265GH.

9 Závěr

V práci jsou popsány známé druhy korozního napadení svarových spojů a korozních prostředí v energetických zařízeních. Dále je popsána technologie svařování heterogenních svarů a NDT metody používané pro kontrolu svarových spojů v potrubních systémech.

V experimentální části byly vzorky heterogenních svarů podrobeny korozním testům ponorem v modelovém prostředí kotelní vody a v modelovém prostředí kotelní vody se zvyšující se koncentrací chloridů. Toto prostředí mělo simulovat prostředí, se kterým se můžeme setkat v potrubních systémech energetických zařízení při jejich odstávkách. Po korozním testu došlo ke vzniku pouze velmi málo výrazného korozního poškození. Přesto lze na vzorcích pozorovat rostoucí hmotnostní úbytek a klesající lomovou houževnatost s rostoucím množstvím přidaných chloridů v korozním prostředí. Experiment potvrdil, že vlivem působení chloridů při opakovaných odstávkách může docházet ke kumulaci a rozvoji korozního poškození v prostředí kotlové vody, to má vliv na celkovou životnost svarového spoje.

Tento experiment by šlo dále modifikovat např. variací hodnot siřičitanů v modelovém prostředí kotelní vody při testu ponorem. Také by bylo možné využít korozních testů v solné mlze, jejíž složení by bylo opět podobné složení kotelní vody. Nejvíce by se reálné situaci dalo přiblížit vytvořením modelu části potrubí, které by bylo naplněno kotelní vodou a byla by zde možnost odparu této vody, čímž by se zvyšovala koncentrace rozpuštěných solí na stěnách potrubí. Poté by se dala sledovat koroze v různých částech modelového potrubí.

Pro možné budoucí experimenty by bylo vhodné, aby tloušťka zkušebních vzorků na měření K_8 byla větší a byl tak více zachycen vliv stavu povrchu. To by bylo možné zajistit přípravou zkušebních vzorků z tenčího plechu např. o tloušťce 5 mm. Díky menší výšce vzorku připraveného z plechu by bylo možné připravit vzorky s větší tloušťkou, a tedy i větším podílem korodovaného povrchu při zachování dostatečné citlivosti stupnice Charpyho kladiva.

Také by bylo vhodné provést podrobnější metalografickou analýzu korodovaných svarových spojů ze všech korozních prostředí. V tomto případě nebylo v časových možnostech experiment zopakovat a ani provést rozsáhlejší metalografickou analýzu z důvodů karanténních omezení v laboratořích ZČU.

Reference

- [1] HÜBNER, Pavel. *Úprava vody v energetice: Pavel Hübner. 2., přeprac. a rozš. vyd.* Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2015. ISBN 978-80-7080-873-3.
- [2] KRAUS, Václav. *Povrchy a jejich úpravy.* Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-668-1.
- [3] VOSMIK, Zdeněk. *Výskyt koroze a úsad při ohřevu vody ve výměnících tepla a jejich vliv na nerezovou ocel a provoz výměníku - 1.část* [online]. , 1-8 [cit. 2020-10-11]. Dostupné z: <https://www.vosmik-vymeniky.cz/data/140110-vliv-chemickeho-slozeni-vody-1.korozni-vlivy.pdf>
- [4] DAVIS, Joseph R., ed. *Corrosion of Weldments.* Materials Park, OH 44073-0002: ASM International, 2006. ISBN 978-0-87170-841-0
- [5] KOVAŘÍK, Rudolf a František ČERNÝ. *Corrosion of Weldments.* Plzeň: Západočeská univerzita, Strojní fakulta, 2000. ISBN 80-7082-697-5.
- [6] BYSTRIANSKY, Jaroslav, Karel MALANIK a Pavel NOVÁK. Stability of Minority Phases in Some Corrosion Media. *Corrosion Science.* 1993, **35**(1-4), 355-361. ISSN 0010-938X.
- [7] NOVÁK, Pavel. Druhy koroze kovů. *Koroze a ochrana materiálu*, Praha: Státní výzkumný ústav ochrany materiálu, 2005, **49**(4) 75-82. ISSN 0452-599X
- [8] PAVEL, Novák. Koroze kovů. BENEŠOVÁ, Jaroslava. *Konzervování a restaurování kovů: ochrana předmětů kulturního dědictví z kovů a jejich slitin.* Brno: Technické muzeum v Brně - Metodické centrum konzervace, c2011, s. 136-198. ISBN 978-80-86611-38-9.
- [9] JUNÁK, Jaroslav. Mikrobiální koroze kovů. *Vesmír.* 2001, **80**(4), 206-209. ISSN 0042-4544.
- [10] BARTONÍČEK, Robert. *Volba materiálu a protikoroze ochrany v chemickém průmyslu.* Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1980.
- [11] KOUKAL, Jaroslav, Drahomír SCHWARZ a Martin SONDEL. *Heterogenní svarové spoje v energetice* [online]. Ostrava: Český svářečský ústav s.r.o., 2016 [cit. 2021-10-11]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/17097810-Heterogenni-svarove-spoje-v-energetice.html>

- [12] PILOUS, Václav a Jaroslav KOUKAL. *Materiály a jejich svařitelnost*. Ostrava: ZEROSS Ostrava, CWS ANB, 1999.
- [13] BARTÁK, Jiří. *Česká svářečská společnost ANB: Typy vad , příčiny jejich vzniku a hodnocení* [online]. Praha: CWS ANB, 2012 [cit. 2021-11-14]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384>
- [14] HRIVŇÁK, Ivan. *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*. V Bratislave: Slovenská technická univerzita, 2009. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-3167-6.
- [15] AMBROŽ, Oldřich. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-85771-81-0.
- [16] CRAMER, Stephen D. a Bernard S. COVINO, ed. *SM Handbook Volume 13A: Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection*. 13. ASM International, 2003. ISBN 978-0-87170-705-5.
- [17] FLORIAN, Zdeněk a Miloš VLK. *Mezní stavy a spolehlivost* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Vysoké učení technické v Brně, 2007 [cit. 2021-11-12]. Dostupné z: <http://www.zam.fme.vutbr.cz/~vlk/meznistavy.pdf>
- [18] KUNZ, Jiří. *Aplikovaná lomová mechanika*. Vyd. 4., přeprac. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005, c1991. ISBN 80-01-03306-6..
- [19] FISCHER-CRIPPS, Anthony C. *Introduction to Contact Mechanics*. 2. New York, NY 10013: Springer Science+Business Media, 2000. ISBN 0-387-68187-6.
- [20] KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 9788072045914.
- [21] *Center of Nondestructive Evaluation: Radiograph Interpretation - Welds* [online]. Ames, Iowa: Iowa State University [cit. 2021-4-5]. Dostupné z: <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/Radiography/TechCalibrations/RadiographInterp.xhtml>
- [22] *MatMatch: EN 10028-2 Grade P265GH normalized or normalized formed (+N)* [online]. Munich: Matmatch GmbH [cit. 2021-4-8]. Dostupné z: <https://matmatch.com/materials/minfm33409-en-10028-2-grade-p265gh-normalized-or-normalized-formed-n->

- [23] *Metalcor: Datasheet 1.4541* [online]. Essen: Metalcor GmbH [cit. 2021-4-17]. Dostupné z: <http://www.metalcor.de/en/datenblatt/33/>
- [24] *ESAB: OK TIGROD 16.95* [online]. Vamberk: ESAB VAMBERK s.r.o [cit. 2021-4-17]. Dostupné z: <https://www.esab.cz/cz/cz/products/filler-metals/tig-rods-gtaw/stainless-steel-rods/ok-tigrod-16-95.cfm>
- [25] MAREŠ, Pavel. VESELÝ, Vilém. *Vyhodnocení ultrazvukového zkoušení heterogenních svarů před a po korozní zkoušce provedené v rámci diplomové práce, PL4006,* Plzeň: Centrum výzkumu Řež s.r.o. , 2021.
- [26] *Mega Mex* [online]. Humble, TX 77338: Mega Mex [cit. 2021-3-4]. Dostupné z: <https://megamex.com/en/alloys/stainless-steel/al-6xn>
- [27] Standard Specification for Iron-Nickel-Chromium-Molybdenum Alloys (UNS N08366 and UNS N08367) Rod, Bar, and Wire. *Civil Engineers Standards* [online]. ASTM International [cit. 2021-3-4]. Dostupné z: <https://civilengineersstandard.com/wp-content/uploads/2018/11/B-691.pdf>