ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: **B0715A270013 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Strojírenské materiály a technologie**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Testování koroze pod napětím u heterogenních svarů

Autor: **Tomáš Taranda**

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

Akademický rok 2020/2021

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	**Tomáš TARANDA**
Osobní číslo:	**S20B0431P**
Studijní program:	**B0715A270013 Strojní inženýrství**
Studijní obor:	**Strojírenské materiály a technologie**
Téma práce:	**Testování koroze pod napětím u heterogenních svarů**
Zadávající katedra:	**Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

Zásady pro vypracování

1. Svařování, heterogenní svary
2. Korozní problematika svarových spojů
3. Metody protikorozní ochrany svarových spojů
4. Testování koroze pod napětím
5. Příprava vzorků
6. Korozní testování a vyhodnocení
7. Diskuze výsledků a závěr

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

Seznam doporučené literatury:

Multimediální výukový projekt Korozní inženýrství. [online] [cit 24-9-2014]., http://old.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/korozni_inzenyrstvi_se/koroze/s_iproje.htm

JONES, D.A., *Principles and prevention of corrosion.*, Prentice Hall, New York 1996

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

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

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

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

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Karel Bergl**
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

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

Západočeská univerzita v Plzni Fakulta strojní L.S.

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

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

V Plzni dne 6. října 2020

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne: ……. …….

Podpis autora

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	**Příjmení** Taranda	**Jméno** Tomáš
STUDIJNÍ OBOR	B0715A270013 Strojní inženýrství	
VEDOUCÍ PRÁCE	**Příjmení (včetně titulů)** Ing. Chocholatý, Ph.D.	**Jméno** Ondřej
PRACOVIŠTĚ	ZČU – FST – KMM	

DRUH PRÁCE	~~**DIPLOMOVÁ**~~	**BAKALÁŘSKÁ**	**Nehodící se škrtněte**
NÁZEV PRÁCE	Testování koroze pod napětím u heterogenních svarů		

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

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	56		**TEXTOVÁ ČÁST**	48	**GRAFICKÁ ČÁST**	9

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) **ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY**	Bakalářská práce pojednává o korozním praskáním pod napětím u heterogenních svarových spojů feriticko – perlitické oceli a austenitické korozivzdorné oceli. Tato problematika byla zjištěna na nátrubcích potrubních tras parogenerátorů jaderných elektráren. Experimentální část se věnuje této problematice. Cílem bakalářské práce je navrhnout a uskutečnit testování koroze pod napětím. Přínosem práce je zdokonalení zkoušení korozního praskání pod napětím u heterogenních svarových spojů
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	Heterogenní svarový spoj, korozní praskání pod napětím, tepelně ovlivněná oblast, potenciostat, zkouška koroze pod napětím, korozní cela

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	**Surname** Taranda	**Name** Tomáš	
STUDY PROGRAMME	B0715A270013 Mechanical Engineering		
SUPERVISOR	**Surname (Inclusive of Degrees)** Ing. Chocholatý, Ph.D.	**Name** Ondřej	
INSTITUTION	ZČU – FST – KMM		
TYPE OF WORK	~~**DIPLOMA**~~	**BACHELOR**	**Delete when not applicable**
TITLE OF THE WORK	Stress corrosion testing of heterogeneous welds		

FACULTY	Mechanical Engineering		**DEPARTMENT**	KMM	**SUBMITTED IN**	2021

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	56		**TEXT PART**	48	**GRAPHICAL PART**	9

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The bachelor thesis deals with stress corrosion cracking in heterogeneous welded joints of ferritic-pearlitic steel and austenitic stainless steel. This problem was found on the nozzles of pipeline routes of steam generators of nuclear power plants. The experimental part deals with this issue. The aim of the bachelor thesis is to design and perform stress corrosion testing. The contribution of this work is the improvement of stress corrosion cracking testing in heterogeneous welded joints.
KEY WORDS	Heterogeneous welded joints, stress corrosion cracking, heat affected zone, potentiostat, stress corrosion test, corrosion cell

Poděkování

Zde bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Ondřeji Chocholatému, Ph.D. za veškeré rady a ochotu komunikovat kdykoliv to bylo potřeba. Děkuji konzultantovi Ing. Karlu Berglovi za návrh testovacího zařízení a dodání všech potřebných součástí na jeho stavbu a také za cenné konzultace. Dále panu prof. Dr. Ing. Antonínu Křížovi, IWE za podporu celého projektu a občasné připomínky k testování. Velké dík patří i Haně Pasiarové a Luďku Vojtovi za aktivní výpomoc na stavbě testovacího zařízení, přípravě vzorků pro experiment a vyhodnocování experimentu.

Obsah

1 Úvod ... 3
2 Důležitost svarového spojení ... 4
2.1 Homogenní svarový spoj ... 4
2.2 Heterogenní svarový spoj ... 4
3 Problematika heterogenních svarových spojů ... 5
3.1 Heterogenní svarový spoj v energetice ... 5
3.2 Heterogenní svarové spoje – složení a struktura ... 6
3.3 Charakteristika základních použitých materiálů ... 6
3.3.1 Korozivzdorná chromniklová austenitická ocel ... 6
3.3.2 Jakostní uhlíková konstrukční ocel ... 7
4 Technologie svařování heterogenních spojů ... 8
4.1 Svařování metodou 141 (dle ISO 4063) ... 9
4.2 Orbitální svařování ... 10
5 Korozní problematika heterogenních svarových spojů ... 11
5.1 Korozní problematika HSS na JE Temelín ... 11
5.2 Definice koroze kovů ... 12
5.3 Galvanická koroze ... 12
5.4 Štěrbinová koroze ... 13
5.5 Bodová koroze ... 13
5.6 Mezikrystalová koroze ... 13
5.7 Korozní praskání pod napětím (SCC) ... 14
5.7.1 Výzkumné zařízení používané pro zkoušení SCC ... 14
5.7.2 Korozní zkouška polarizační metodou ... 15
5.8 Korozní únavové praskání (CFC) ... 17
5.9 Vodíková křehkost (HIC) ... 17
5.10 Vodíková koroze ... 17
6 Ochrana proti korozi HSS ... 18
6.1 Snížení rizika při výrobě ... 18
6.2 Snížení rizika při provozu ... 18
6.3 Snížení rizika při odstávce zařízení ... 18
7 Experimentální část ... 19
7.1 Testovací zařízení ... 20
7.1.1 Tuhý rám ... 20

7.1.2 Korozní cela ... 21
7.1.3 3D tisk spodního a horního víka cely ... 22
7.1.4 Různé druhy utěsnění vzorku ve spodním víku ... 23
7.2 Tahová zkouška před korozním testováním pod napětím ... 26
7.3 Příprava vzorku pro testování SCC ... 27
7.3.1 Konkrétní rozměry zkušebního vzorku ... 27
7.3.2 Kontrola rozměrů ... 28
7.3.3 Úprava vzorků pro upnutí do stroje ... 29
7.3.4 Označení svaru a TOO ... 29
7.4 Testování koroze pod napětím ... 30
7.4.1 Využití potenciostatu pro měření SCC ... 31
8 Vyhodnocení testu koroze pod napětím ... 32
8.1 Vizuální vyhodnocení ... 32
8.2 Výsledky z měření pomocí potenciostatu ... 32
8.2.1 Měření 2. vzorku ... 33
8.2.2 Měření 3. vzorku ... 33
8.2.3 Měření 4. vzorku ... 34
8.3 Metalografická analýza ... 34
9 Diskuze ... 37
10 Závěr ... 38
Použitá literatura ... 39
Seznam obrázků ... 42
Seznam tabulek ... 44

Seznam symbolů a zkratek

SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
PG	Parogenerátor
NDT	Nedestruktivní testování
TOO	Tepelně ovlivněná oblast
WIG	Wolfram inert gas
JETE	Jadrná elektrárna Temelín
JE	Jaderná elektrárna
TIG	Tungsten inert gas
BWR	Boiled water reactor
ČSN	Československé národní normy
DIN	Deutsches Institut für Normung
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
ZM	Základní materiál
PM	Přídavný materiál
HSS	Heterogenní svarový spoj
SCC	Stress corrosion cracking
CFC	Corrosion fatigue cracking
HIC	Hydrogen induced cracking

1 Úvod

Denně se setkáváme se složitými konstrukcemi, které musí splňovat podmínky na bezpečnost, kde hraje velkou roli správný výběr materiálu. Samozřejmě je snaha o co nejlepší vlastnosti materiálu, ale také se přihlíží na celkovou hmotnost a na ekonomickou stránku konstrukce, a proto se jednotlivé části celku různě spojují. V tomto případě půjde o pevné a nerozebíratelné spojení. Nejčastější používaná technologie takového spojení je proces svařování, který má své výhody, ale i nevýhody. U složitých konstrukcí, či u napojování potrubí dochází většinou k heterogenním svarovým spojům (HSS), čímž se může dosáhnout odlehčení konstrukce, ale také ušetření materiálu, což souvisí s různou kombinací ocelí. Bohužel tento druh svarového spojení přináší i řadu komplikací, které způsobují degradaci spojení, a nakonec i jeho zhroucení. Jedná se o změny chemických a mechanických vlastností v blízkosti svarového spoje. Jelikož se jedná o spojení ocelí austenit – ferit, tak každá tato ocel má jinou korozní odolnost. Korozi je potřeba zpomalovat, ideálně se jí úplně vyhnout patřičnými úpravami jako např. změna materiálu za odolnější, ideální technologie svařování, parametry svařování, různé ochranné nátěry a podobně. V tomto případě se jedná o provoz HSS na jaderných elektrárnách (JE).

Jaderný průmysl je dnes jeden z nejvíce prověřovaných a kontrolovaných průmyslů na světě. V důsledku vysoké hrozby nebezpečí např. úniku radioaktivního materiálu, ozáření nebo výbuchu. Největší hrozbou je zneužití jaderného materiálu k nezákonným účelům. Proto je důsledně kontrolována dozorčími organy, v České republice se jedná o Státní úřad pro jadernou bezpečnost (SÚJB). Zejména na primární okruh JE se klade vysoký důraz. Proto se kontrolují nejproblémovější místa, což jsou zejména svary. Kontrolované svary po několika letech provozu vykazují defekty, které je nutné opravit.

Z tohoto důvodu se bakalářská práce zabývá zlepšením korozní odolnosti HSS na sekundárním okruhu jaderných elektráren. Tento problém je řešen už od roku 2016, kdy v důsledku porušení HSS nátrubku N5 na parogenerátoru v JE Temelín uniklo pracovní médium.

Teoretická část zahrnuje vysvětlení HSS, tři použité druhy svařování (111, 141 a 521, dle EN ISO 4063), korozní problematikou a ochranou proti korozi u HSS.

Praktická část byla věnována stavbě testovacího zařízení pro zkoušení korozního praskání pod napětím, přípravě vzorků pro samotné zkoušení, zatěžováním a následným vyhodnocováním koroze pod napětím HSS, v tomto případě se jednalo o spojení austenitické korozivzdorné oceli 1.4541 (Wr. N.) a uhlíkové oceli P265GH (ČSN EN 10028-2). Cílem bakalářské práce bylo vytvořit ideální metodu zkoušení HSS na korozi pod napětím a následně zjistit důsledky tohoto druhu koroze.

2 Důležitost svarového spojení

Jedná se o spojení potrubních systémů v jaderné energetice, což vyžaduje velmi přísné požadavky na kvalitu a bezpečnost všech svarových spojů, kvůli možnému úniku radioaktivních látek a částečně také kvůli prodloužení životnosti konkrétních spojů. Musí být vybrán nejvhodnější materiál, který zajistí pevný a houževnatý svar. Následně druh svařování, který doprovází ideální postup svařování, a nakonec se provede několik mechanických a chemických zkoušek pro zjištění vlastností a možných defektů svarového spoje a tepelně ovlivněné oblasti (TOO) svarového spoje. Tyto požadavky na kvalitu a bezpečnost obsahuje atomový zákon č. 263/2016 Sb. Jakákoliv neplánovaná odstávka takového zařízení jako je jaderná elektrárna se nepříznivě projeví v jaderné politice a částečně se dotkne i nás všech, a proto je velmi podstatné řešit u těchto spojů materiály a technologie, aby se dodržel požadavek na odolání působících tlaků, deformace a korozním vlivům.

2.1 Homogenní svarový spoj

Homogenní svařování je jedním ze způsobů provádění tavného svařování s použitím přídavného materiálu, jehož metalurgické složení je téměř stejné jako u základních kovů, abychom splnili mechanické požadavky na svarový spoj. Základní kovy mají také stejné, nebo podobné chemické a fázové složení. Při homogenním svařování se tedy aplikuje výplňový materiál, který má stejné složení jako základní kov. Tyto svary jsou pevné a spolehlivé. [1]

2.2 Heterogenní svarový spoj

Jedná se o místo na součásti, popřípadě konstrukci, kde tavným způsobem svařování spojujeme minimálně dva materiály odlišeného chemického a fázového složení, což je základní rozdíl oproti homogennímu svarovému spoji. Například se může jednat o spojení austenit – ferit nebo austenit – martenzit apod. Je zapotřebí zde také použít přídavný materiál, který musí splňovat dostatečnou rozpustnost s oběma svařovanými základními materiály, aby se dosáhlo požadované mikrostruktury a mechanických vlastností. [2]

3 Problematika heterogenních svarových spojů

Problematika, kterou s sebou přináší spojování materiálů s různým chemickým složením, se týká i této práce. Kvůli nerovnoměrnosti složení mezi přídavným materiálem a základními kovy existuje vysoká tendence k vývoji diskontinuity svaru a tvorbě trhlin, tedy plastických deformací. Více legovaná ocel, zejména austenitická má nižší teplotu tavení než ocel méně legovaná. Navíc austenitické oceli mají také širší interval tuhnutí (likvidus - solidus) než oceli konstrukční. Velký rozdíl v teplotě tavení může způsobit praskání na straně oceli s nižší teplotou tavení, protože smrštění svaru na straně konstrukční oceli vyvolává působení přechodných termálních napětí na straně austenitické oceli, jejíž teploty jsou ještě v teplotním intervalu křehkosti za tepla.

Setkáme se i s redistribucí uhlíku, díky čemuž vznikají nauhličená / oduhličená místa a mění se tím vlastnosti materiálů.

Častou degradací je také snížení korozní odolnosti, následná koroze méně ušlechtilého základního materiálu, a nakonec korozní praskání pod napětím. Objevuje se i náchylnost na mezi krystalovou korozi vlivem tvorby precipitátů po hranicích zrn. Stejně jako výše zmíněné defekty, tak i tento je způsobován svařováním různých materiálů, pokud není proces pečlivě kontrolován.

Největší vliv na spuštění degradačních mechanismů mají okolní podmínky, způsob svařování, parametry svařování a nesprávně zvolené materiály.

Faktory, které ovlivňují výběr svařovacích materiálů, metody svařování a parametry svařování:

- Rozdíly v chemickém složení základních materiálů, návarů a svarového kovu.
- Vznik křehké oblasti na přechodu feritický základní materiál – austenitický svarový kov.
- Přítomnost zbytkového napětí ve spojích ocelí rozdílných strukturních bází, které vzhledem k jejich rozdílnému koeficientu tepelné roztažnosti, nelze odstranit tepelným zpracováním. [3, 4]

3.1 Heterogenní svarový spoj v energetice

Heterogenní svary jsou běžně používány v energetice pro aplikace v potrubních systémech kotlů tak, aby kompenzovaly rozdíly v teplotách, tlaku a korozním prostředí v různých lokalitách. Velká pozornost je věnována heterogenním svarům mezi modifikovanými 9-12 % chromovými ocelemi a ocelemi nízkolegovanými. Slabou stránkou heterogenních svarových spojů je všeobecně redistribuce intersticiálních prvků mající za následek mikrostrukturní změny v oblasti pásma ztavení mezi nízkolegovaným a vysokolegovaným materiálem, vedoucí k lokální degradaci pevnosti a tím i creepové odolnosti. Degradace mikrostruktury a vlastností přechodových svarových spojů je obecně významně závislá na použité kombinaci svařovaných materiálů, včetně volby svarového kovu a na parametrech expozice. Proto jsou z hlediska možnosti využití heterogenních svarů v energetických zařízeních nezbytné detailní poznatky o žárupevných vlastnostech těchto spojů. [5]

3.2 Heterogenní svarové spoje – složení a struktura

Každý materiál typu austenit – ferit má odlišný součinitel tepelné roztažnosti, a proto časem nevyhnutelně dochází k defektu mezi nauhličenou a oduhličenou oblastí (tj. mezi austenitickou a feritickou ocelí). Je snaha oblast austenitu a feritu snížit na minimum s ohledem na provozní podmínky spoje.

Austenitické oceli jsou často používané korozivzdorné oceli, za což vděčí výborné korozní odolnosti, svařitelnosti a dobrým mechanickým vlastnostem, proto jsou hojně používány v energetickém průmyslu.

Feritické oceli se také často objevují v energetickém průmyslu (např. tlakové nádoby parogenerátorů), bohužel hůře odolávají korozi oproti austenitickým ocelím, dále mají horší i únavové a creepové vlastnosti. Kvůli odlišným vlastnostem od austenitických ocelí nastává problém při svařování, kde je potřeba docílit svaru austenit – ferit.

Největší problém ovšem nastává při řešení jejich podmínek svařitelnosti. Austenitické oceli ideálně potřebují co nejméně tepla při svařování, předehřev a dohřev se zde neuplatňuje. Zatímco feritické oceli předehřev, dohřev a teplotu interpassu řeší. [6, 7]

3.3 Charakteristika základních použitých materiálů

Pro experimentální zkoušky byla zvolena korozivzdorná austenitická ocel stabilizovaná titanem s označením 1.4541 (dle Wr.N.) a jako druhý základní materiál byla použita nízkouhlíková nelegovaná jakostní ocel P265GH (dle ČSN EN 10028-2). Tyto materiály jsou odlišně označovány podle různých norem, které jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 1).

Tab. 1: Různé druhy označení ZM dle jednotlivých norem [8, 9]

ČSN	GOST	USA	DIN (W.Nr.)	EN
17 247 17 248	08Ch18N10T	AISI 321	1.4541	X6CrNiTi18-10 (EN 10088)
11 416 11 418	16 K 20 K	A414E A516Gr.60 Gr.A	1.0425 HII St45.8	P265GH (EN 10028-2

3.3.1 Korozivzdorná chromniklová austenitická ocel

Austenitická ocel 1.4541 (dle Wr.N.) je používána pro svoji odolnost proti elektrochemické korozi v oxidačním prostředí, která je zaručena obsahem chrómu nad 12 hm.%. Chromniklové austenitické oceli mají nejlepší svařitelnost z této skupiny. Z důvodu vyšší tepelné roztažnosti a nižší tepelné vodivosti mají tyto oceli tendenci pro vznik deformací a zbytkového pnutí, také vzniká větší napětí uvnitř struktury. Chemické složení a mechanické vlastnosti jsou uvedeny v Tab. 3. a Tab. 4. [10, 11, 12]

Tab. 2: Chemické složení oceli 1.4541 v hm.% [13]

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

Tab. 3: Mechanické vlastnosti oceli 1.4541 [13]

Mechanické vlastnosti při teplotě T [°C]	20
Smluvní mez kluzu $Rp_{0,2}$ [MPa]	334
Pevnost v tahu R_m [MPa]	598
Tažnost A2 [%]	40
Tažnost A5 [%]	43
Tvrdost HRB	77
Velikost zrna G	7

3.3.2 Jakostní uhlíková konstrukční ocel

Ušlechtilá uhlíková ocel P265GH (dle ČSN EN 10028-2), často označována jako kotlová ocel, je druhý základní materiál se zaručenou svařitelností. Jedná se o žáropevnou konstrukční ocel, která není korozivzdorná a není rezistentní oxidačnímu okolí. Uplatňuje se zde normalizační žíhání (890-950 °C). Chemické složení a mechanické vlastnosti jsou uvedeny v Tab. 5. a Tab. 6. [4,10]

Tab. 4: Chemické složení oceli P265GH v hm.% [14]

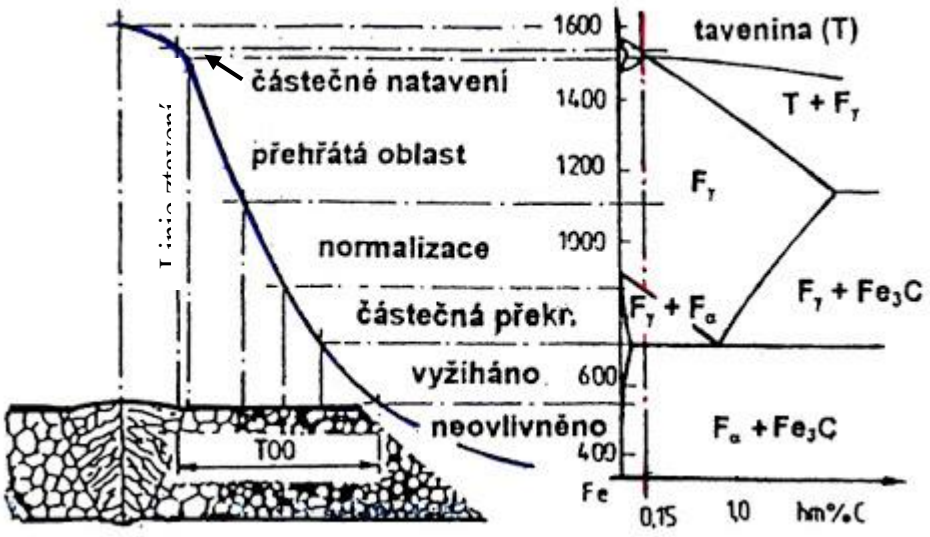
C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Al	Mo
0,17	0,69	0,197	0,008	0,095	0,05	0,02	0,05	0,034	0,003

Tab. 5: Mechanické vlastnosti oceli P265GH [14]

Mechanické vlastnosti při teplotě T [°C]	20
Smluvní mez kluzu $Rp_{0,2}$ [MPa]	360
Pevnost v tahu R_m [MPa]	480
Tažnost A5 [%]	35,2

4 Technologie svařování heterogenních spojů

Konkrétní postup a technologie svařování různorodých materiálů se určuje dle svařitelnosti materiálu. Základem je snaha o minimální množství vneseného tepla. Mezi nejlepší metody, které toto kritérium splňují, patří: laserové svařování, obloukové, elektronovým paprskem, mikroplazmou a svařování třením. Zmíněné způsoby svařování se mohou použít, pokud svarový spoj pracuje do teploty 350 °C. Protože se jedná o tavné svařování, tak i přes tuto snahu jsou velké teplotní rozdíly nevyhnutelné, čímž se mění struktura svarového spoje a následně dochází i k degradaci spoje tvorbou nauhličených a oduhličených míst s horšími mechanickými vlastnostmi. Pro co nejlepší vlastnosti je důležité, aby se základní materiál a přídavný materiál dostatečně promísil, poněvadž s tím souvisí difuzní pochody, které způsobují redistribuci intersticiálních prvků (C, N, H) a to má za následek snížení strukturní stability. Pro částečné odstranění difúze se používá přechodný materiál nebo metoda mezivrstvy (polštáře), která zajistí vhodné spojení se základním materiálem. Pro představu lépe poslouží Obr. 1, kde jsou vidět jednotlivé struktury tepelně ovlivněné oblasti materiálu po svařování. Znázorněná zasažená místa mohou způsobit vznik trhlin, zhoršit pevnost a snížit korozní odolnost. V budoucnu mohou způsobovat další defekty. Všechny tyto vady mění chemické, mechanické nebo fyzikální vlastnosti. Oblast, která nejméně odolává těmto změnám je linie ztavení (v Obr. 1 se jedná o částečné natavení). [10, 15, 16]



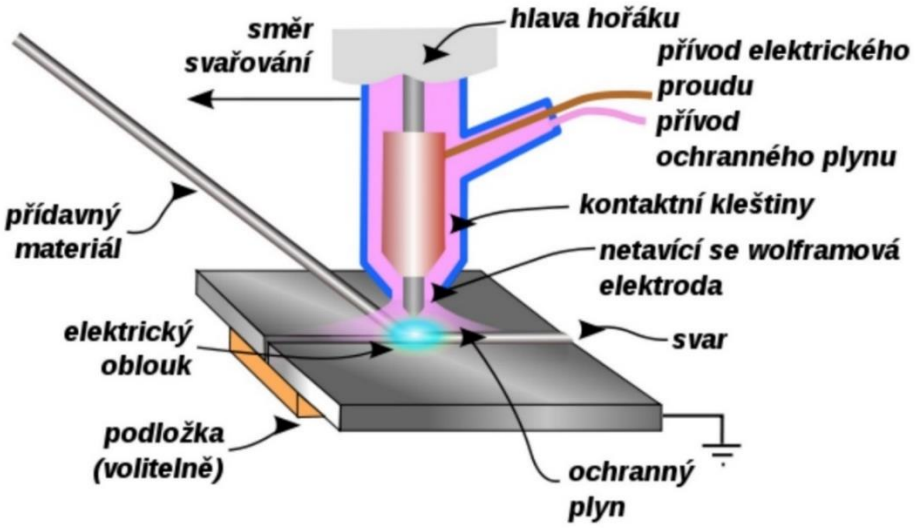
Obr. 1. Tepelně ovlivněná oblast (TOO) svarového spoje + část metastabilního diagramu Fe – Fe_3C [17]

V jaderných elektrárnách se na nátrubcích parogenerátoru (PG) nejvíce využívají tři metody svařování. Jedná se o metodu TIG (141, dle EN ISO 4063), ruční obalenou elektrodou (111, dle EN ISO 4063) a svařování pomocí pevnolátkového laseru (521, dle EN ISO 4063). Bakalářská práce byla zaměřena pouze na metodu svařování 141, svar byl vytvořen pomocí orbitálního svařování.

4.1 Svařování metodou 141 (dle ISO 4063)

Metoda svařování, která je více známá pod názvem TIG (v německém jazyce jako WIG), je zobrazena na Obr. 2. V procesu svařování TIG se elektrický oblouk vytváří mezi netavící se wolframovou elektrodou a svařovaným dílem v inertní atmosféře argonu (obvykle 99,5 %) nebo směs hélia a argonu, která zabraňuje atmosférické oxidaci tavné lázně. Malý intenzivní oblouk vytvářený netavící se elektrodou je ideální pro vysoce kvalitní a precizní svařování. Přídavný materiál se do svarové lázně nanáší ručně z tavící elektrody, která je přidána samostatně. Pro dobré svařování je nutné použít přesný průměr elektrody s vhodným proudem. [18]

Používá se ve všech průmyslových oblastech, ale tato metoda je zvláště vhodná pro vysoce kvalitní svařování. Při ručním svařování je relativně malý oblouk ideální pro tenkovrstvý materiál nebo pro kontrolované pronikání (při kořenovém svařování trubek). Je také široce používána v mechanizovaných systémech s použitím přídavného drátu. Existuje však i několik systémů pro orbitální svařování trubek, které jsou schopny svařovat ve všech polohách. U orbitálního svařování je důležité věnovat větší pozornost přípravě hran, nastavení spojů, čistotě svarových ploch a kontrole parametrů svařování. [18]



Obr. 2: Svařování metodou TIG [19]

Správně zvolený přídavný materiál (PM) vyhovující vlastnostem ZM se používá k dolegování a úpravě tvaru spoje. PM by měl mít lepší, popřípadě stejné, vlastnosti jako ZM, stejně tak by se mělo podobat i jejich chemické složení. Každopádně u heterogenních svarových spojů toto kritérium nejde splnit. Zde se tedy uplatňuje, již zmíněné, tzv. polštářování, které se většinou provádí u spojů pracujících nad teplotou 350 °C a má za úkol fungovat jako protidifúzní bariéra. Pokud se jedná o spojení austenit – ferit, tak se polštář nanáší na feritickou část. [4]

Výhody svařování TIG: výborná přesnost, různé aplikace a pozice svařování, použitelné pro extrémně složité svařování kovů, nespotřebitelné elektrody. [20]

Nevýhody svařování TIG: časově náročný proces, složitě technická zařízení a větší výdaje na inertní plyn. [20]

4.2 Orbitální svařování

Název orbitální svařování pochází z rotačního pohybu svařovacího nástroje (netavící se wolframová elektroda) kolem osy obrobku o 360 stupňů využitím metody TIG (viz Obr. 3). Obecně platí, že orbitální svařovací technika zahrnuje dvě hlavní oblasti použití:

- Spojení „trubky s trubkou“ nebo „potrubí s potrubím“.
- Svařování trubky do pouzdra.

Rotační pohyb okolo svařovaného dílu je zprostředkován svařovací hlavou. Základní charakteristika úspěšného orbitální svařování je nutnost ovládat lázeň roztaveného kovu během celého svařovacího cyklu, s přihlédnutím k průběžně měnící se polohy v procesu. Nejúčinnější opatření k udržení kontroly všech poloh svaru je použití pulzního svařovacího proudu. V celém procesu je využit ještě formovací plyn, který je aplikován do svařenců pro zaručení ochrany svarové lázně v průběhu její solidifikace. [21]

Ve většině případů se jedná o svařování trubek z austenitické nerezové oceli, slitin niklu a titanu. Spojení metodou „trubka s trubkou“ je často používáno v energetickém průmyslu, kde vykazuje vynikající kvalitu spoje. [21]

Obr. 3 – Orbitální svařování trubek [22]

5 Korozní problematika heterogenních svarových spojů

Po vyhovující volbě technologie svařování a při snaze dodržet všechny důležité podmínky pro správnou výrobu heterogenního svarového spoje se začnou objevovat již zmíněné defekty, i když je snaha o to se jim vyhnout. Tato kapitola, a následně celý výzkum, se bude věnovat tématu koroze, která bývá často příčinou špatné životnosti spoje, která souvisí i s celkovou bezpečností. [6]

Autor diplomové práce [6], jež se věnuje korozní odolnosti heterogenním svarům na JE, uvádí vznik dvou různých druhů defektů:

První druh je často nazýván jako typické poškození, protože se méně ušlechtilá feriticko – perlitická nízkolegovaná ocel začne anodicky rozpouštět při současném vzniku korozních důlků. Důlky poškodí pasivační vrstvu stabilního oxidu a podnítí důlkovou a štěrbinovou korozi. Pokud se důlky více prohloubí, tak se stávají koncentrátory napětí, které způsobí vznik trhliny šířící se po linii ztavení mezi feriticko – perlitickou ocelí a austenitickým svarovým kovem. Pokud nedojde k opravě vady, tak se trhlina dále rozšiřuje a následně vzniká průchozí vada. [6]

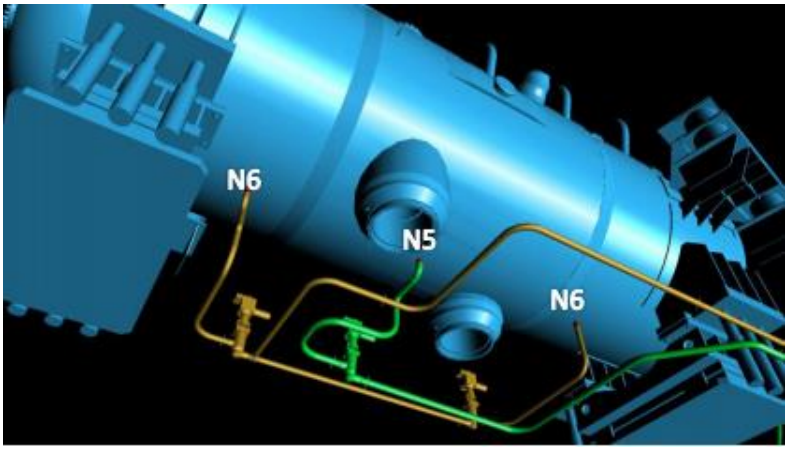
Druhý typ poškození je nazýván jako atypický. Tato porucha byla pozorována u HSS vytvořených přídavným materiálem. U těchto HSS byla sledována strukturní nestabilita, redistribuce legujících prvků a velké zvýšení tvrdosti ve svaru. Následně se defekt šířil korozivzdornějším austenitickým vysokolegovaným svarovým kovem. [6]

5.1 Korozní problematika HSS na JE Temelín

V parogenerátoru JETE na nátrubku N5 zobrazeném na Obr. 4, došlo k porušení HSS a následného úniku neaktivního média ze sekundárního okruhu. Došlo na porušení HSS z feritické oceli 22K (dle GOST) a austenitické oceli 08CH18N10T (dle GOST). Jako přídavný materiál byl aplikován Sv-10CH16N25AM6 (dle GOST). Spojení bylo svařeno postupem TIG. Všechny HSS byly testovány na nedestruktivní zkoušení (NDT), ale i destruktivní (DT). Nyní se používají části, kde se narušený prvek vymění za mezikus s HSS. Časem bylo objeveno, že se tento problém vyskytuje na všech HSS, na které má vliv pracovní médium. Bylo stanoveno několik druhů možných zavinění těchto degradačních mechanismů:

- Špatné podmínky svařování – např. více vneseného tepla.
- Provedení svaru ručním svařováním – horší kvalita svaru.
- Nevyhovující přídavný materiál – změna obsahu různých prvků v HSS.
- Úsekové šíření prasklin – únavové poškození.
- Vznik koroze – zhoršení povrchu, vznik vrubů, což vede ke vzniku prasklin.

Výzkumem těchto problémů se došlo k závěru, že se jedná o korozní praskání pod napětím (SCC), která je více popsána v kapitole 5.7. [4]



Obr. 4: Znázornění potrubních tras PG [4]

5.2 Definice koroze kovů

Jedná se o poškození materiálu chemickým nebo fyzikálněchemickým dějem, které je částečné nebo absolutní. Tento jev je vidět všude okolo nás, poněvadž korozní soustava se snaží dostat do termodynamicky výhodnějšího stavu. Většina kovů jsou termodynamicky nestabilní, výjimku tvoří oxidy a sulfidy, protože v tomto stavu se vyskytují v přírodě, takže logicky mají snahu se do tohoto stavu vrátit, což je nechtěné. Samozřejmě jsou kovy velmi známé, které korozi nepodléhají za běžných podmínek (zlato, tantal, platina apod.). Je tomu tak, protože se neslučují s prvky v okolním prostředí. Oproti tomu například železo má velkou tendenci podléhat korozi, protože je zde koroze samovolná a má potřebu se vrátit zpátky do stavu chemické sloučeniny. Koroze vzniká na povrchu a postupem času se dostává i dovnitř kovu, tento problém má pak bezpečnostní, ale i velké ekonomické dopady. Samozřejmě vzniká mnohem více problémů, jedná se o vzhled, elektrickou vodivost kontaktů a celkové zhoršení vlastností. Korozi bohužel podléhá většina materiálů (plast, silikátové hmoty atd.). Z těchto důvodů je v našem největším zájmu se koroze úplně zbavit, popřípadě ji alespoň zpomalit. [10]

5.3 Galvanická koroze

Jinak řečeno bimetalická či elektrolytická. Vzniká tam, kde vrstva elektrolytu (okolní prostředí) propojuje alespoň dva kovy, které mají různý korozní potenciál a nejsou vzájemně izolované, pak dochází ke vzniku galvanického článku. Spojíme-li dva odlišené kovy (HSS) s různou vodivostí a necháme je v korozním prostředí, tak ušlechtilejší z nich (katoda) koroduje pomaleji, než by korodoval sám. Kov méně ušlechtilý (anoda) naopak koroduje rychleji než v případě, kdy není s druhým vodivě spojen. Tento jev je využíván v praxi při tzv. katodické ochraně obětovanou anodou. Neúmyslná galvanická koroze je ale většinou nežádoucím jevem.

Aplikací přídavného materiálu o jiném složení vznikají další mikročlánky. Je snaha tomu zabránit vhodně zvoleným PM, který pak chrání materiál s vyšším korozním potenciálem. Zabránění, popřípadě zpomalení rychlosti koroze se docílí vhodnou kombinací materiálů, velikostí stykových ploch (ideálně podobně velkých), složení elektrolytu a provozní teplotou. [4, 23, 24]

5.4 Štěrbinová koroze

Objevuje se v místech, kde je malé množství elektrolytu odděleno od vnějšího elektrolytu, to znamená v trhlinách, mezerách a štěrbinách. Kvůli deficitu oxidačního činidla se povrch štěrbiny stává anodou, kde převládá oxidace kovu. Dochází k porušení pasivační vrstvy kovu a tím následně ke korozi. Nepříznivé pracovní teploty, různé poškození povrchu, nečistoty, technologické defekty a chloridové ionty iniciují vznik štěrbinové koroze. [4]

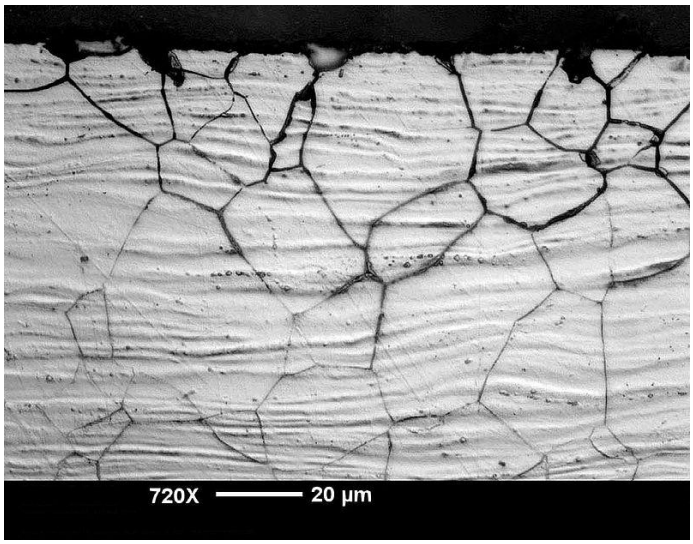
5.5 Bodová koroze

Jedná se o obdobný mechanismus jako u štěrbinové koroze. Liší se od sebe v průměru důlku. U bodové je hrdlo důlku menší než hloubka. K této korozi jsou náchylné méně i více ušlechtilé oceli, pokud je povrch materiálu porušen. Bodovou korozi podporují ve vzniku stejné nepříznivé podmínky jako u štěrbinové. [24]

5.6 Mezikrystalová koroze

Jedná se o termodynamický děj. Tento typ koroze působí za jistých předpokladů mezi zrny matrice, nikoliv na povrchu, a proto je náročnější korozní napadení materiálu detekovat. Mezikrystalovou korozi (viz Obr. 5) můžeme předvídat, pokud materiál bude vystaven chemickému prostředí, popřípadě tepelně ovlivněn svařováním nebo tepelným zpracováním. Nejčastěji k tomuto druhu napadení dochází u austenitických korozivzdorných ocelí, kdy dochází k precipitaci karbidu chrómu v oblasti teplot 425-815°C. Pokud se obsah chrómu sníží pod 12 %, tak může začít aktivně korodovat. K precipitaci těchto karbidů dochází zprvu na hranicích zrn. [25]

V případě použití materiálu v jaderné energetice musíme počítat se zvýšenými tlaky (1500 až 2500 MPa), zvýšenými teplotami (od 250 °C) a kontaktu kovu s různými roztoky. [25]

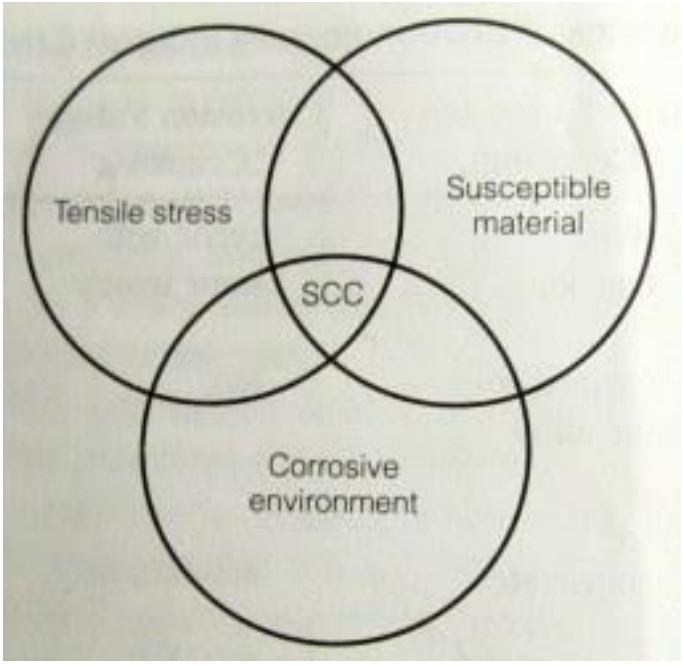


Obr. 5: Mezikrystalová koroze [26]

5.7 Korozní praskání pod napětím (SCC)

Je to porušení materiálu (prasknutí) vlivem kombinace tahových pnutí, vnitřních pnutí, zvýšené teploty a korozního prostředí (viz Obr. 6). Pokud působí i mechanické napětí, tak dochází ke zrychlení koroze. Mnohem náchylnější k SCC jsou slitiny než čisté kovy. Trhliny se mohou šířit po hranicích zrn (mezikrystalově) nebo skrz zrna (transkrystalově), popřípadě i současně a bývají způsobeny narušením pasivní vrstvy materiálu. Průběh praskliny je kolmý k tahovému napětí. Největší tendenci ke vzniku mají praskliny v zónách ovlivněných teplem ze svařování nebo korozními důlky. Pokud dochází k cyklickému namáhání s tahovou složkou vzniká tzv. korozní únava, což má za následek korozní únavové praskání (CFC). [4, 27]

K zabránění SCC je třeba odstranit tahové napětí, korozní prostředí nebo změnit materiál na materiál, který bude méně náchylný k SCC. Povrchové napětí se dá odstranit kuličkováním, válečkováním apod. Používá se i žíhání na odstranění vnitřního pnutí, ale to není vhodné pro některé používané austenitické korozivzdorné oceli. [6, 27]



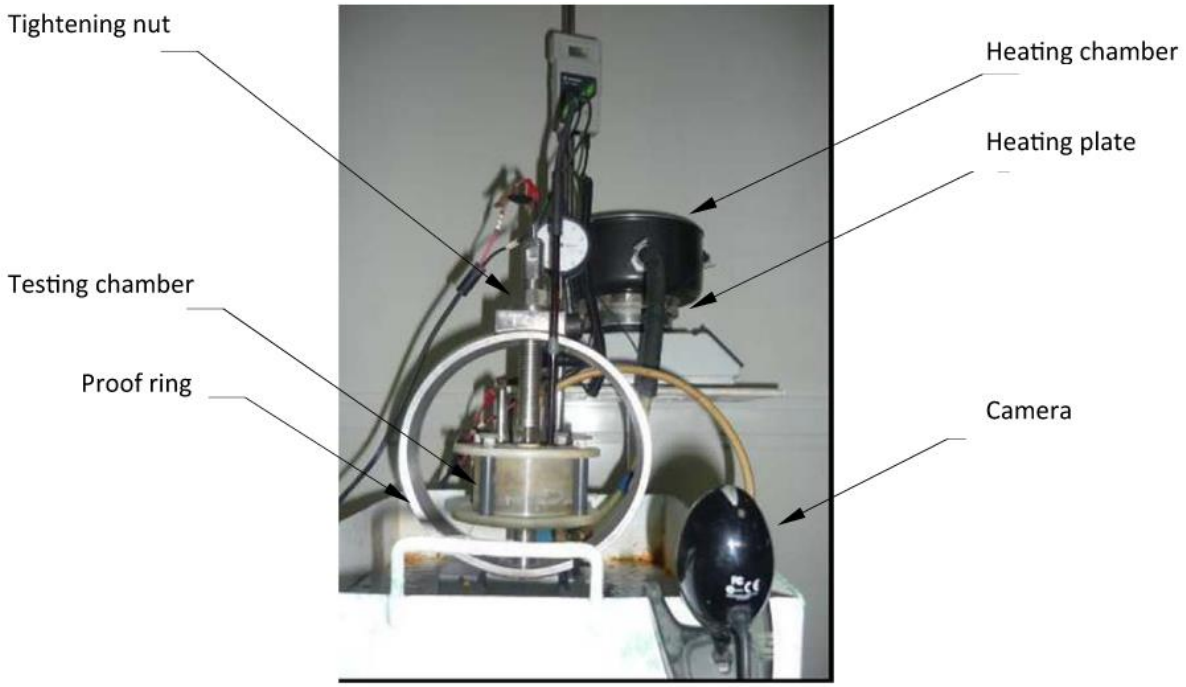
Obr. 6: Podmínky pro vznik SCC [23]

5.7.1 Výzkumné zařízení používané pro zkoušení SCC

Obr. 7 představuje zkonstruované testovací zařízení pro SCC. Zařízení je navrženo tak, aby simulovalo skutečné provozní podmínky. Obsahuje zkušební kroužek (proof ring) s korozní celou (testing chamber), šroubovací systém s konstantním zatěžováním, zásobník pracovního média s topnou deskou (heating plate) a další příslušenství, jako jsou elektrody, zapojení k potenciostatu, počítač a monitorovací kameru. Zkušební kroužek je vyroben z duplexní nerezové oceli a slouží k řízení zatížení zkušebních vzorků SCC. Je přivařen k horní a spodní tyči, do kterých se upíná zkoušený vzorek. Dolní tyč se používá k upevnění kroužku na místě, zatímco horní tyč se k montáži zaváděcího systému utahovacího šroubu (tightening nut). Korozní cela, která je vyrobena z průhledné akrylové trubice, se využívá k umístění testovacího vzorku, ohřátého pracovního média, elektrod a termočlánku. Horní a spodní teflonové kryty (každý utěsněn o-kroužkem) se používají společně s akrylovou trubicí k vytvoření korozní cely.

V horním krytu jsou vyvrtány čtyři otvory pro pracovní elektrodu (vzorek), pomocnou elektrodu, referenční elektrodu a termočlánek. K vytažení testovaného vzorku slouží mechanismus stálého zatížení v tahu, který se skládá ze systému utahovacího šroubu a matice z nerezové oceli 316L. Upevňovací matice je ve výzkumném zařízení k udržení průhybu kroužku na úroveň odpovídající požadovanému zatížení v tahu. Je důležité použít správně navržený napínací přípravek, aby bylo zaručeno, že se na vzorek přenáší pouze jednoosá tahová napětí bez torzních smykových napětí. [28]

Uvnitř korozní cely jsou vzorky vystaveny cirkulujícímu pracovnímu médiu o teplotě 55 °C až 60 ° C. K ohřevu pracovního média na požadovanou zkušební teplotu se používá topná deska, která se nachází pod ohřívací komorou (heating chamber). Médium je poté dodáváno gravitací do korozní cely. Testovací zařízení obsahuje i monitorovací kameru (camera), která zaznamenává jeden snímek každých 30 minut, aby bylo možné detekovat potenciální degradaci vzorku. Pomocné a referenční elektrody jsou ponořeny do korozní cely přes horní teflonový kryt. Potenciostat je využíván pro zaznamenávání naměřených hodnot do konkrétního softwaru. Během testování SCC je vzorek vystaven konstantnímu tahovému napětí. Test SCC se zastaví po destrukci vzorku nebo po dokončení předem stanoveného času testování. [28]



Obr. 7: Výzkumné zařízení pro zkoušení SCC [28]

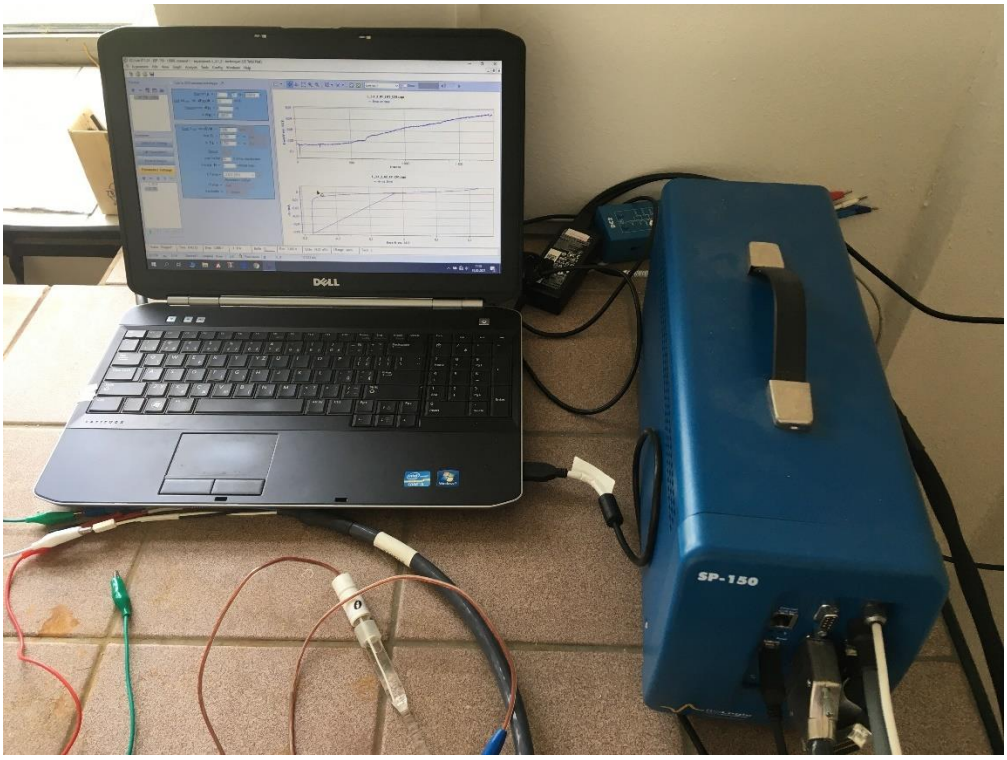
5.7.2 Korozní zkouška polarizační metodou

Pro měření se využívá tzv. potenciostat (viz Obr. 8), ke kterému je navíc potřeba ještě pracovní elektroda (testovaný vzorek), referenční elektroda (většinou kalomelová elektroda) a pomocná elektroda (uhlíková nebo drátek z platiny). Mezi pracovní a pomocnou elektrodou prochází proud, který je usměrňován řídící složkou potenciostatu. Měří se potenciál pracovní elektrody vzhledem k referenční elektrodě. Potenciostat zaznamenává hodnoty do softwaru EC-Lab od společnosti BioLogic. [29]

Potenciodynamická metoda funguje na způsobu měření proudové hustoty procházející vzorkem v závislosti na potenciálu vzorku vůči referenční elektrodě. Hodnota potenciálu se v postupu zkoušky lineárně mění a vzorek se následně chová jako anoda i katoda. Výsledkem je polarizační křivka. Z křivky se dá vyvodit několik užitečných informací jako např. korozní potenciál, korozní proud, potenciál pasivity apod. [29]

Potenciostatická metoda funguje na principu měření proudové hustoty J při různých stálých hodnotách potenciálu E pracovní elektrody. [29]

U galvanostatické metody se proudová hustota drží na konstantní hodnotě a měřenou hodnotou je potenciál testovaného vzorku vzhledem k referenční elektrodě. Výsledkem je závislost potenciálu vzorku na čase. Kritický potenciál koroze je zde určen jako potenciál, který se stabilizuje pro vybranou kritickou proudovou hustotu po stanovené době [29].



Obr. 8: Potenciostat SP-150

EC-Lab je univerzální řídicí a analytická platforma pro všechny BioLogic potenciostaty a galvanostaty. Je schopen ovládat více zařízení z jediného rozhraní a nabízí centralizované ovládání experimentu. Nástroje jsou odolné vůči krátkým odpojením beze ztráty dat a umožňují klíčové proměnné zpracovávat v časovém průběhu bez ohledu na frekvenci experimentu, a proto jsou výsledkem velmi přesná měření. [30]

Software je snadno použitelný a poskytuje uložení nastavení pro budoucí měření, zároveň je možnost si uložit i výsledný experiment pro pozdější použití. V systému je tzv. modifikace „on-the-fly“, která umožňuje sestavovat experiment za běhu. Je možnost nastavit parametry měření včetně teploty, času a potenciálu, které jsou důležité pro řízení procesu experimentu. Experiment lze také nastavit tak, aby se automaticky ukončil nebo přešel na další sekvenci na základě mezní hodnoty pocházející z externího zařízení, jako je teplotní sonda. [30]

5.8 Korozní únavové praskání (CFC)

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole 5.7, jedná se o praskání, ke kterému dochází při cyklickém namáhání za současného vlivu korozního prostředí. Postupuje pomalu a je možnost vidět korozi v trhlině. Postup trhliny je nerovnoměrný. Pouhým okem jsou vidět postupové čáry vznikající změnami v parametrech zatěžování. [6, 27]

Velký vliv na porušení materiálu má frekvence zatěžování. Paradoxně vyšší frekvence potlačují vliv korozního prostředí. Nižší frekvence způsobují větší postup praskliny na cyklus. Další vlivem je korozního prostředí, které zhoršuje drsnost povrchu materiálu. Principem tohoto zhoršení je působení elektrochemické koroze, která vytvoří korozní důlky a ty způsobují únavové trhliny. [6, 27]

CFC se velmi podobá SCC, protože oba mechanismy mají za následek křehké porušení slitin, které jsou houževnaté. CFC také musí mít alespoň jednu tahovou složku a průběh praskliny je také kolmý k tahovému napětí jako u SCC. [6]

K zabránění, nebo alespoň k zpomalení CFC je několik různých způsobů. Je možné na povrch materiálu nanést ochranný povlak. Výměnou materiálu za odolnější, který bude snadněji odolávat korozi. Vyhnout se cyklickému zatěžování úpravou namáhané části konstrukce tak, aby k němu vůbec nedocházelo. [6, 23]

5.9 Vodíková křehkost (HIC)

Tento děj probíhá při teplotách od -50 °C do 100 °C, kdy vzniká vodík na povrchu oceli katodickou reakcí nebo termickou disociací. Vodík v atomární formě difunduje do krystalové mřížky kovu. Při svařování tedy dojde k difuzi vodíku do svaru a zůstane v krystalové mřížce kovu, kde dojde k rekombinaci vodíku na H_2. Touto transformací pak dojde ke zvětšení vodíku, což má za následek vzniku vnitřních napětí a kov začne křehnout. Při zatížení svaru dochází k jeho prasknutí. Záleží zde na tepelném zpracování materiálu, mikrostruktuře, tlaku a teplotě. Samozřejmě významnou roli hraje také prostředí, což znamená množství a koncentraci obsahu vodíku v pracovním prostředí. [23, 31]

5.10 Vodíková koroze

Probíhá za vyšších teplot než vodíková křehkost, protože při vysokých teplotách je vodík schopen rozkládat karbidy kovu. Principem je chemická reakce většinou s uhlíkem při oduhličení a vzniku metanu při vysokých tlacích. Metan se hromadí především na hranicích zrn nebo v dutinách, protože neprobíhá jeho difuze do materiálu. Vzniká vnitřní pnutí, trhliny, ocel křehne a zhoršují se mechanické vlastnosti. Ve feritické struktuře se snadněji rozpouští vodík, a proto degraduje rychleji než austenitická struktura. [31]

6 Ochrana proti korozi HSS

V případě HSS v JETE víme, že jde o poškození vlivem SCC, a proto je potřeba věnovat největší pozornost podnětům, které mají za následek vznik tohoto druhu koroze. Ideálně zvýšit odolnost HSS, zabránit v jejich kontaktu s pracovním médiem nebo zvolit jiné médium. [4]

6.1 Snížení rizika při výrobě

Musí být dodrženy svařovací podmínky a čistota. Toho může být lépe dosáhnuto automatizovaným svařováním a vhodně zvolenou metodou svařování. Další zlepšení může být změnou PM, než dosavadní Sv-10CH16N25AM6, protože tento materiál nepříznivě reaguje s pracovním médiem. Popřípadě lze využít různé povrchové úpravy, které by chránily celý svar, každopádně se musí předejít tepelnému ovlivnění ZM a PM, aby se nezměnily vlastnosti spojení. Mezi tyto úpravy se řadí např. laser cladding (tzv. laserové navařování), inhibitory a žárové nástřiky. [4, 6]

6.2 Snížení rizika při provozu

Při kontrolách parogenerátoru co nejvíce omezit dobu jeho otevření, což souvisí se snahou zabránit přístupu kyslíku do PG, aby byla zachována stanovená poměrná vlhkost. [4]

6.3 Snížení rizika při odstávce zařízení

Samozřejmě se jedná o zvýšení kontrol, protože k těmto degradacím spojů dochází pravidelně po několika letech. Opět ideálně omezit dobu trvání, kdy se může kyslík dostat do zařízení. [4]

7 Experimentální část

Experimentální program bakalářské práce je rozdělen do několik kapitol včetně konstrukce stroje pro testování koroze HSS pod napětím (SCC) a přípravy zkoušených vzorků pro toto testování, každopádně nejdůležitější částí experimentu je vyhodnocení vzešlých výsledných křivek z potenciostatu, které by mohly indikovat případné trhlinky způsobené konstantním jednoosým tahovým zatížením v kombinaci s časem a 3,5 % chloridem sodným. Problematika týkající se SCC je popsána v kapitole 5.7. a je uváděna jako důvod poškození nátrubku parogenerátoru na JETE. Cílem experimentální části je dosáhnutí bezchybného fungování stroje, správné úpravy vzorků před samotným zkoušením, a nakonec vyhodnocení výsledků.

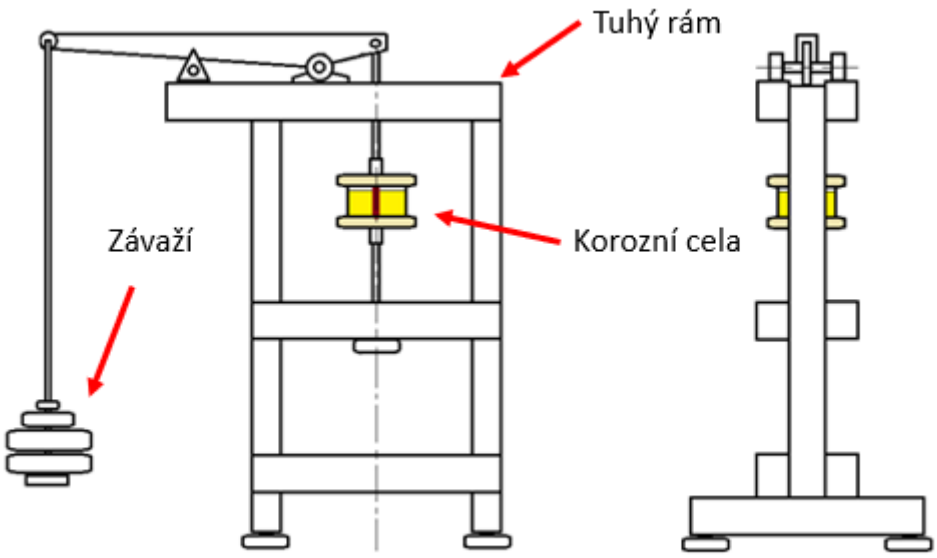
Pro experiment byla dodána svařená trubka ze základních materiálů P265GH (dle ČSN EN 10028-2) a 1.4541 (dle Wr.N.), která byla svařována metodou 141 (označení dle EN ISO 4063). Při svařování metodou 141 byl použit přídavný materiál SV-07CH25N13 (dle GOST 2246-70). Použité materiály pro experimentální část jsou schválenými materiálovými ekvivalenty pro aplikaci na JE dle NTD A.S.I. sekce II.

7.1 Testovací zařízení

Pro testování koroze pod napětím bylo sestrojeno jednoduché železné zařízení, které je schopno vyvolat jednoosé tahové napětí, což znamená, že uchycení vzorku má dostatek stupňů volnosti, aby nevznikalo jiné nežádoucí napětí. Tento stroj musí splňovat dostatečnou tuhost, mít určitou hmotnost kvůli stabilitě, a zároveň být mobilní, protože je do budoucna myšlenka udělat více stojanové uspořádání testovacích zařízení pro SCC.

Testovací zařízení je rozděleno na 3 základní části, které jsou znázorněny i na Obr. 9:

a) tuhý rám
b) korozní cela
c) závaží



Obr. 9: Návrh testovacího zařízení

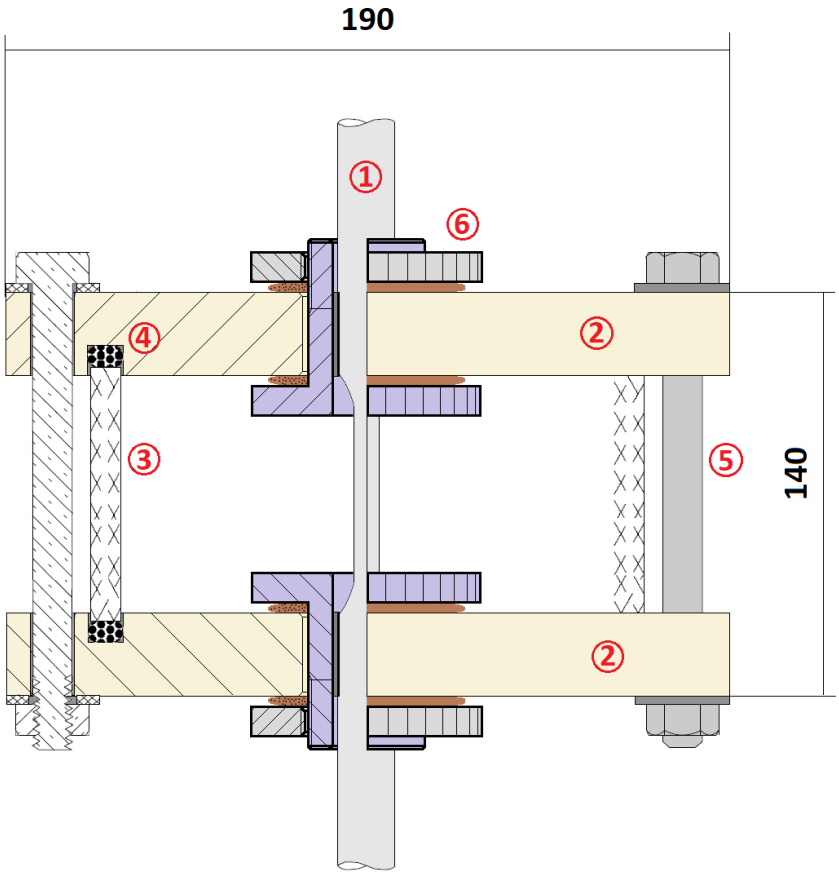
7.1.1 Tuhý rám

Tuhý rám byl sešroubován z několika železných jeklů a poté pro větší tuhost celého rámu ještě svařen. V horní části byla šrouby připojena páka, přes kterou se závažím napíná zkoušený vzorek, který je umístěn v korozní cele. Závaží je s pákou spojeno ocelovým lankem stejně jako oba šrouby pro upnutí vzorku. V těchto šroubech je vyříznutá drážka s šířkou 3 milimetry, do kterých se následně vloží části vzorku a zajistí se čepem proti vypadnutí. Celý hotový rám je uveden na následujícím Obr. 10.

Obr. 10: Tuhý rám včetně závaží a korozní cely

7.1.2 Korozní cela

Uvnitř korozní cely je umístěn zkoušený vzorek, a proto se jedná o nejdůležitější část z celého testovacího zařízení. Cela musí splňovat několik kritérií, abychom v experimentu docílili správných výsledků. Důležitá je inertnost materiálu, z kterého je cela vyrobena, protože pro experiment není žádoucí reaktivita roztoku (3,5 % NaCl) uvnitř korozní cely s materiálem, z kterého je vyrobena. Konkrétně se jedná o plastový výrobek vytisknutý 3D tiskem. Dalším důležitým aspektem je utěsnění vzorku v částech, které procházejí víky korozní cely. V samotné cele jsou kromě vzorku umístěny i měřící (kalomelová) a referenční elektroda. Samotná cela je rozebíratelná a sestavuje se zároveň s upínáním vzorku do tuhého rámu (Pracovní postupu při upínání vzorku do testovacího zařízení je uveden v příloze B). Původní návrh korozní cely je znázorněn na Obr. 11.



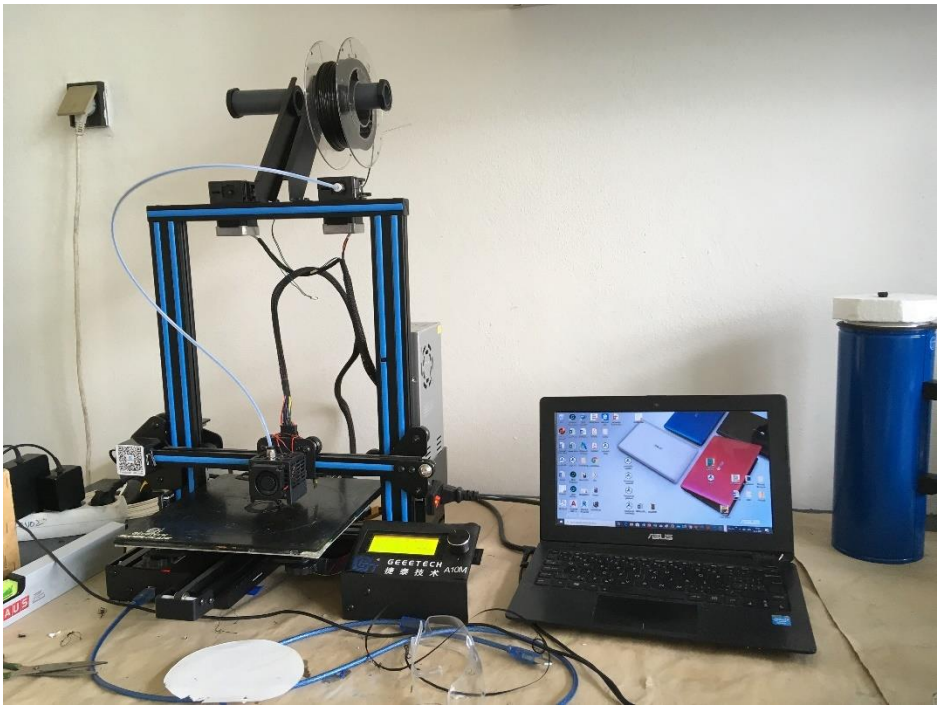
Obr. 11: Původní návrh korozní cely

7.1.3 3D tisk spodního a horního víka cely

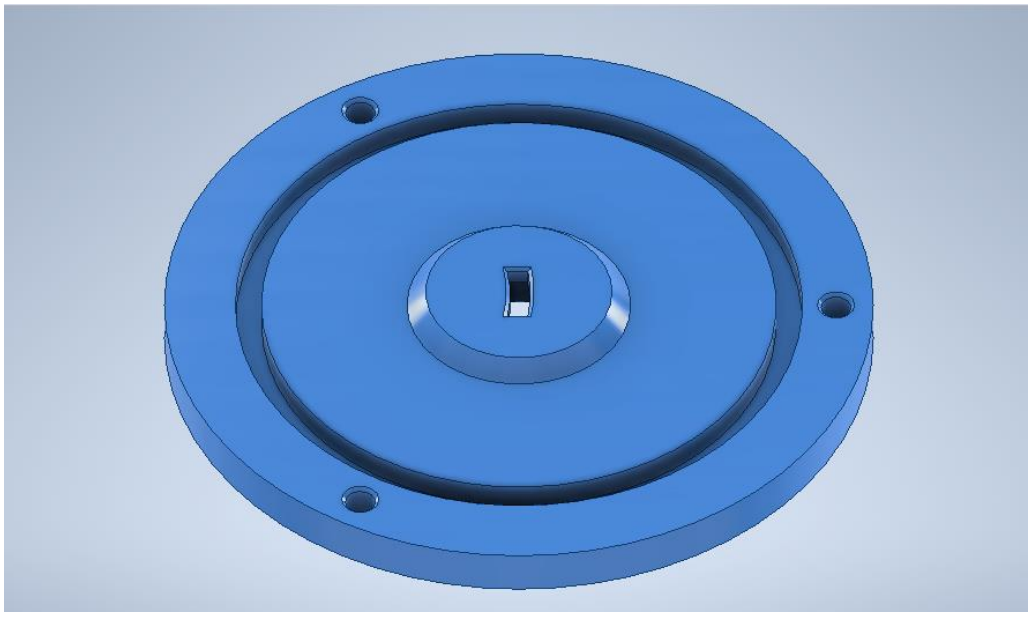
Největším problémem 3D tisku těchto částí byla jejich hustota, protože je snaha zamezit vytečení roztoku. Bohužel i při hustotě materiálu téměř 100 %, měl roztok tendenci nepatrně protékat mezi póry materiálu, a následně se usazovat uvnitř spodního víka, kde začal krystalizovat, což nakonec vyřešilo problém a zastavilo budoucí protékání. Model spodního víka je znázorněn na Obr. 13.

Na horní víko korozní cely nebyly kladeny takové požadavky na utěsnění, ani na pórovitost materiálu, protože kapalina nepřijde do kontaktu s tímto dílem. Díky tomuto usnadnění se díl mohl vytisknout mnohem rychleji.

Využití 3D tiskárny (viz Obr. 12) je výhodné díky několika faktorům: ovlivnitelná rychlost tisku, možnost výběru hustoty materiálu, rychlé vytvoření vlastního modelu, a nakonec i ekonomická stránka tisku.



Obr. 12: 3D tiskárna



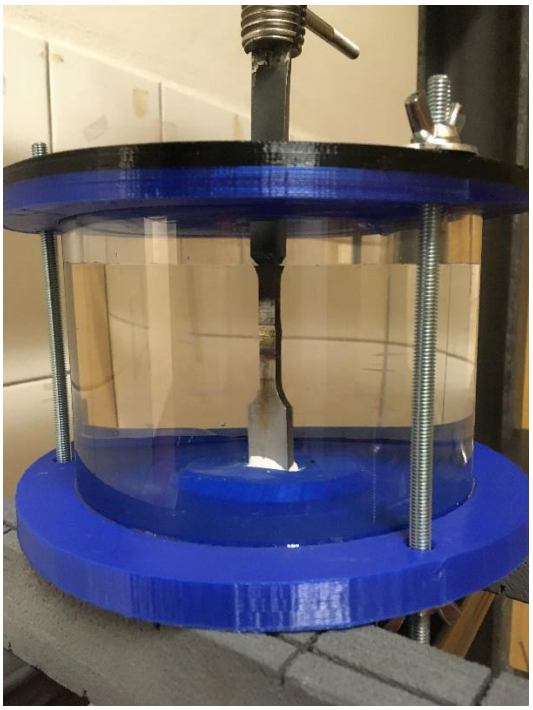
Obr. 13: Hotový model spodního víka pro 3D tisk

7.1.4 Různé druhy utěsnění vzorku ve spodním víku

Velmi podstatnou částí bylo vyřešení těsnění ve spodním víku (viz Obr. 14 až 16) tak, aby se neměnil objem roztoku uvnitř cely. První zjednodušení bylo co největší zúžení otvoru, kterým prochází vzorek do šroubu na uchycení do stroje tak, aby na každé straně tohoto otvoru byla maximální vůle 0,5 milimetru. Vůle je potřeba kvůli zatečení, popřípadě napěchování, těsnícího média. Dalším problémem bylo nedostačující těsnění (o-kroužek) pod plastovým průhledným válcem, šrouby nedokázaly vyvinout takovou sílu pro stáhnutí obou vík k sobě, proto byly šrouby odebrány a těsnění okolo plastového válce nahrazeno silikonem.

Utěsnění tmelem SOUDAL Butyrub

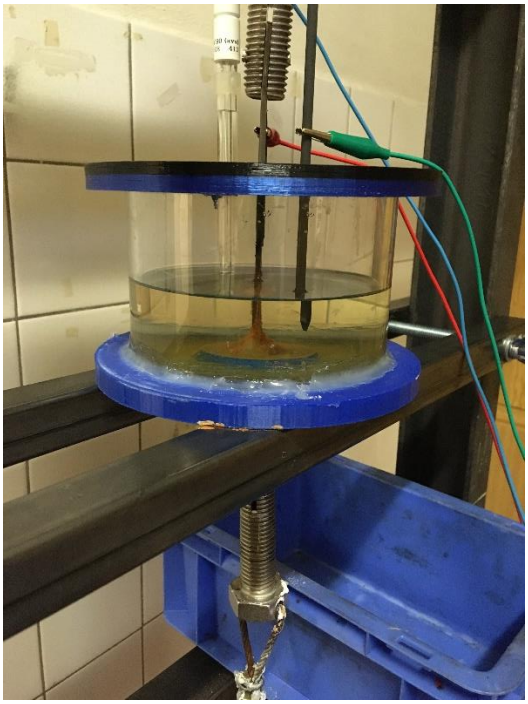
Jedná se o trvale plastický tmel, který má velmi dobrou přilnavost na všechny suché materiály. Výhodou je téměř okamžitá možnost aplikace roztoku a následného zkoušení. Také z hlediska ceny a objemu je tento způsob velmi výhodný. Bohužel tento způsob neobstál, protože větší objem kapaliny (1,5 l) v korozní cele způsobil, že pomalu tlačil na tmel. Postupně byl tmel vytlačen až vznikla malá dírka, která se neustále zvětšovala a během krátké doby vyšlo k vytečení pracovního média.



Obr. 14: Utěsnění tmelem SOUDAL Butyrub

Utěsnění tavící pistolí

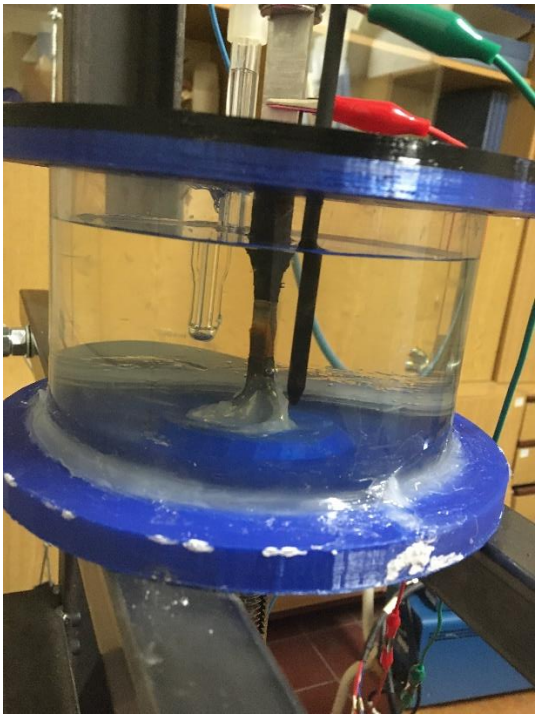
Tavící pistole je jednoduchý a ekonomicky výhodný nástroj, který dokáže spolehlivě slepit různé materiály (sklo, kov, porcelán, plasty a dřevo) pomocí polymerové taveniny (lepidla). Největší výhodou je rychlost tuhnutí lepidla, což je v podstatě hned po aplikaci na daný materiál. Důvodem, proč byl tento způsob také zavrhnut, je jeho tendence se snadno odlepit, stačí menší pohyb vzorku a vznikne malá mezera, kterou následně začne vytékat kapalina.



Obr. 15: Utěsnění lepidlem z tavící pistole – nepovedený test kvůli vytečení pracovního média

Utěsnění průmyslovým silikonem

Univerzální transparentní silikon má široké spektrum použití v průmyslu, ale i v domácnostech. Má velmi dobrou přilnavost k mnoha materiálům a po vytvrzení zůstává trvale elastický. Opět je cenově dostupný a snadno aplikovatelný. Jedinou nevýhodou je delší doba tuhnutí (doporučená doba tuhnutí je 24 hodin). Po vyzkoušení všech druhů utěsnění byl zvolen právě silikon pro budoucí použití k utěsnění vzorku v korozní cele, i přes jeho delší dobu tuhnutí je tento způsob nejspolehlivější, protože testy trvají několik desítek hodin.



Obr. 16: Utěsnění průmyslovým silikonem

7.2 Tahová zkouška před korozním testováním pod napětím

Po rozřezání trubky na jednotlivé vzorky a před samotným testováním koroze pod napětím byly vyčleněné vzorky zkoušeny na destruktivní příčnou zkoušku tahem prostřednictvím systému Zwick Roell Z250. Zkouška byla uskutečněna dle normy ČSN EN ISO 6892-1. Tvar a rozměr vzorku pro tahovou zkoušku byl rozdílný od požadavků dle normy ČSN EN ISO 4136. Od normy se lišilo se i to, že převýšení v místě svaru nebylo odstraněno. Záměrem této zkoušky bylo nalézt mez kluzu a v jakém místě dojde k roztržení. [4]

Parametry, výsledné grafy a výsledky v podobě meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti vzorků svařované metodou 141 jsou uvedeny níže na Obr. 17.

Zkušební protokol

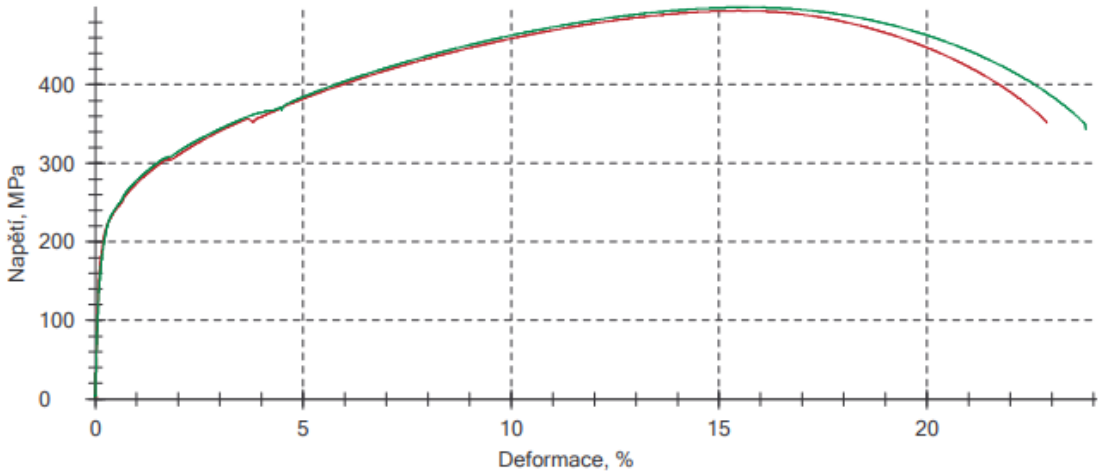
Zkušební systém : Zwick Roell Z250

Předzatížení	:	3	MPa	Rychlost zkoušky	: 0,0067	1/s
Rychlost pro E-Modul	:	0,00025	1/s	Měřená délka (standardní kanál)	: 30	mm
Rychlost do meze kluzu	:	0,00025	1/s			

Výsledky zkoušek:

Legenda	Popis zkoušky	a_0 mm	b_0 mm	$R_{p0.2}$ MPa	R_m MPa	A_{30} %	A_g %
	S TIG	2,93	5,98	224	494	22,7	15,2
	Bez TIG	2,87	5,97	226	499	23,6	15,4

Grafické záznamy série:



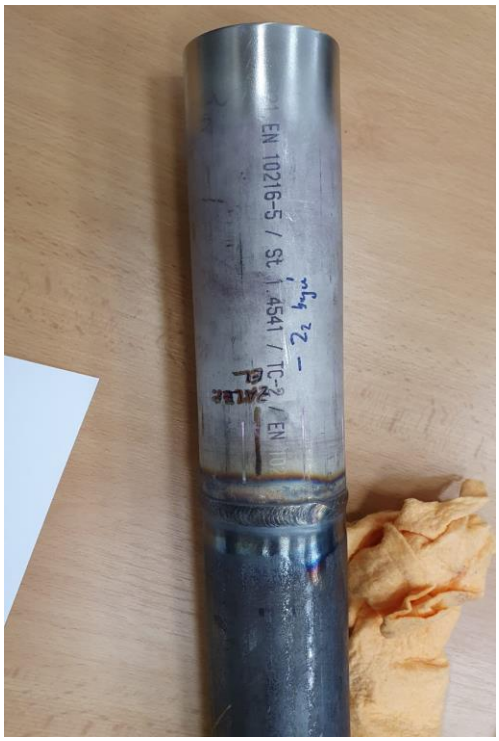
Statistika:

Série n = 2	a_0 mm	b_0 mm	$R_{p0.2}$ MPa	R_m MPa	A_{30} %	A_g %
x	2,9	5,975	225	496	23,2	15,3
s	0,04243	0,007071	0,970	3,17	0,7	0,2
v [%]	1,46	0,12	0,43	0,64	2,86	1,05

Obr. 17: Výsledky příčné zkoušky tahem

7.3 Příprava vzorku pro testování SCC

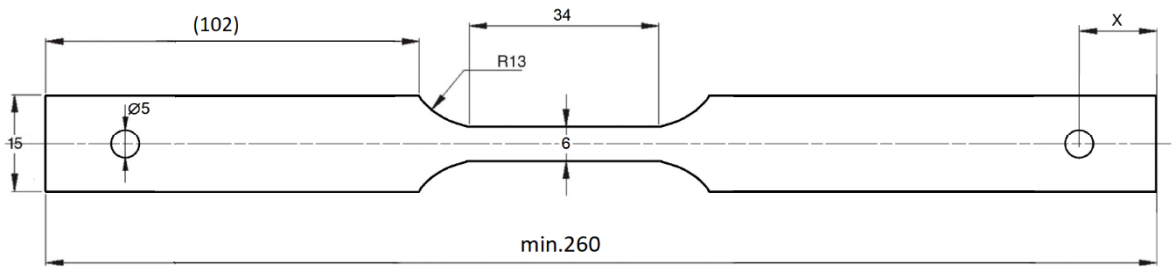
Pro experimentální část bakalářské práce byla předložena trubka s označením svaru Pk4/21 (T4Sv) z dvou ZM 1.4541 a P265GH, která byla svařována metodou 141 (dle EN ISO 4063) pomocí orbitálního svařování. Parametry svařování pro svar Pk4/21 (T4Sv) jsou uvedeny v příloze B. Tloušťka trubky byla 3 mm a průměr 44,5 mm (tato trubka je znázorněna na Obr. 18). Detailní postup přípravy, upínaní a odstranění vzorku z korozní cely a celého testovacího zařízení jsou uvedeny v příloze B.



Obr. 18: Trubka svařovaná metodou 141

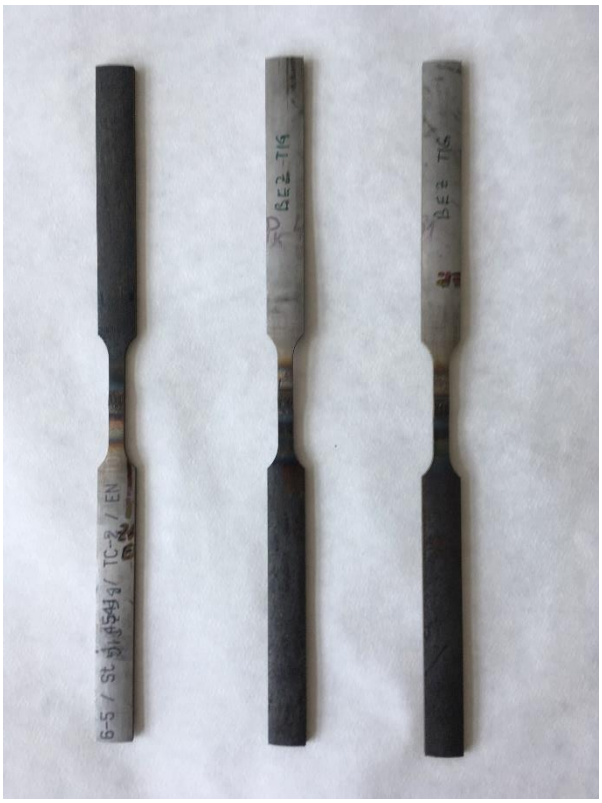
7.3.1 Konkrétní rozměry zkušebního vzorku

Trubka byla následně rozřezána drátořezem na konkrétní rozměry (Obr. 19) určené pro zkoušení SCC a pro zkoušku tahem. Neznámý rozměr x zkušebního vzorku závisí i na utěsnění cely a upnutí do stroje. Při řezání trubek je snaha o co nejmenší tepelné ovlivnění svaru a tepelně ovlivněné oblasti (TOO). Velkou roli hraje také odběr vzorku z původní trubky, záleží u toho na orientaci, velikosti a místě odběru vzorku. Při odběru vzorku u homogenních materiálů zůstává svar uprostřed délky vzorku. Stejně je tomu i u heterogenních svarových spojů. Použité části trubek jsou dost dlouhé na to, aby nenastal problém ohledně velikosti korozní cely. Bohužel vnější průměr a tloušťka stěny nemají ideálně velké rozměry, a proto nezbývá mnoho míst pro odběr vzorku. Není tedy možnost provést zkoušku na ideálním vzorku, tak jak je uvedeno ve studiích ohledně SCC. Tím jsou myšleny geometrické odchylky vzorků od normovaného tvaru. Jedná se například o nesouosost HSS, která vznikla už při svařování. Dále vznikají i nepřesnosti při upínání vzorku před zkouškou. Naštěstí to v našem případě není potřeba, protože je snaha předpovídat iniciaci a průběh trhlin ve skutečných pracovních podmínkách.



Obr. 19: Výkres zkušebního vzorku

Z celé trubky byly dodány 3 zkušební vzorky (viz Obr. 20) pro vývoj zkoušení SCC, abychom dosáhli správné metodiky upínání, těsnění a zatížení vzorku. Snaha byla také o ideální kombinaci zatížení, agresivity roztoku NaCl a času zatěžování.



Obr. 20: Dodané zkušební vzorky

7.3.2 Kontrola rozměrů

Je důležité vždy přeměřovat rozměry svaru a TOO před začátkem zkoušky, protože mohou být nepřesnosti v řezání. Z toho důvodu bude odlišná šířka svaru a TOO, takže i odlišné potřebné tahové napětí.

$$\sigma = \frac{F}{S}\ [MPa] \qquad F = m * g\ [N] \qquad S = a * b\ [mm]$$

σ = Normálové napětí m = Hmotnost závaží a = Šířka vzorku

F = Síla g = Gravitační konstanta b = Tloušťka vzorku

S = Průřez vzorku

7.3.3 Úprava vzorků pro upnutí do stroje

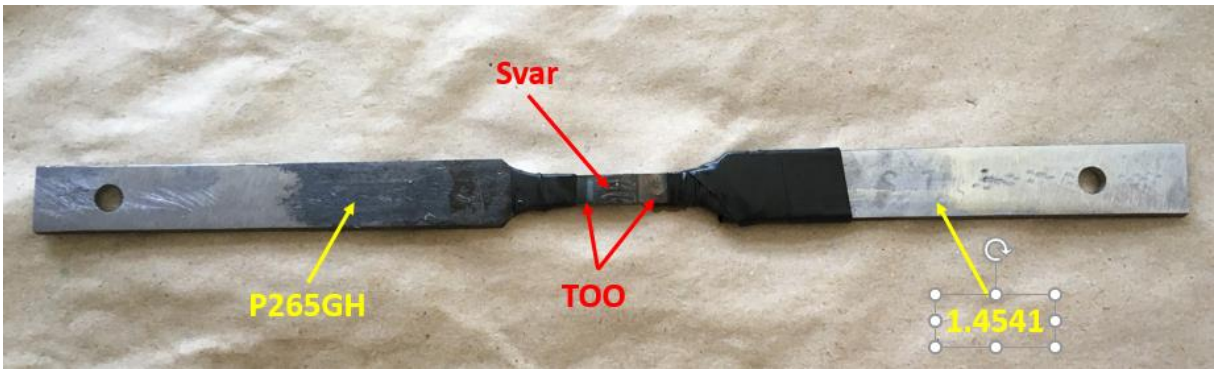
Dalším krokem v přípravě bylo zbavení se malých zaoblení na obou koncích vzorků, aby nebyl problém s vložením vzorku do šroubů a na konci experimentu s jeho vyjmutím, protože je nežádoucí vzorek vytahovat silou, a tím poškodit silikon, což způsobí vytečení pracovního média. Rovnání konců vzorků bylo prováděno na lisu o zatížení 40 tun.

Lisem bohužel nelze dosáhnout menší tloušťky než 3 milimetry, a proto byly konce vzorků následně broušeny na kotoučové brusce, ideálně na tloušťku 2,6 milimetru. Při broušení se dbalo opatrnosti na možné ohnutí vzorku, což by zapříčinilo špatné výsledky v budoucím testování na SCC.

U takto připraveného vzorku bylo nutné ještě vyvrtat díry o průměru 6 milimetrů pro upnutí do stroje na obou koncích a následně zajistit čepem.

7.3.4 Označení svaru a TOO

Posledním krokem v přípravě vzorků bylo označení svaru a TOO, a zároveň zakrytí ostatní plochy vzorků, u které nemá smysl sledovat SCC. Zakrytí bylo docíleno elektrikářskou lepenkou (Obr. 21), která na odmaštěném kovu výborně drží.



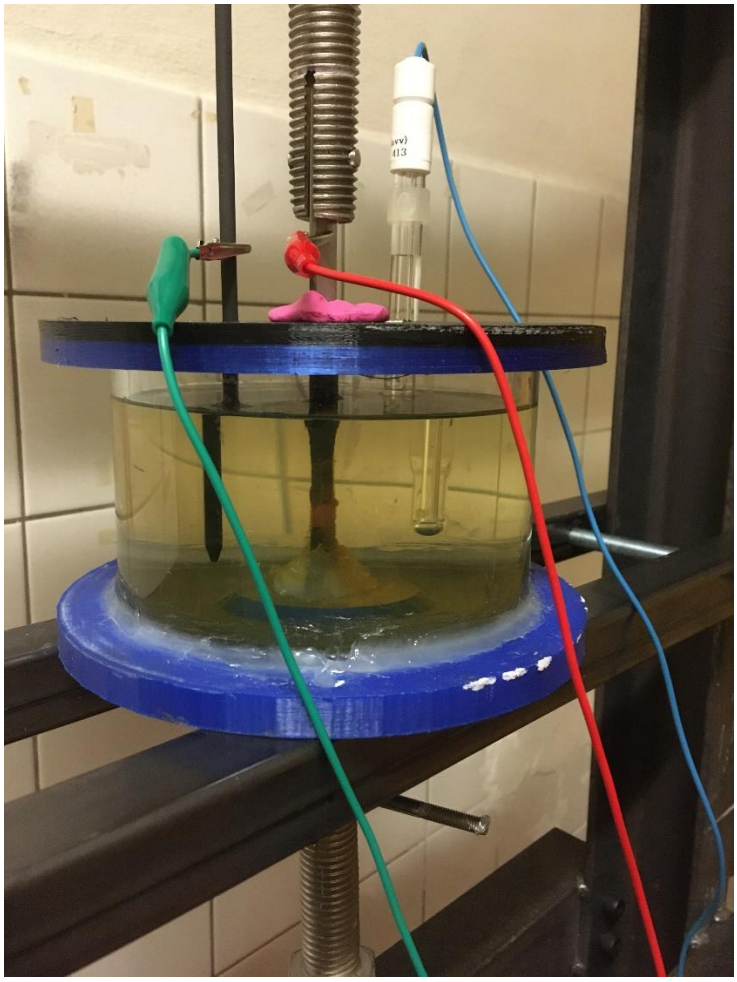
Obr. 21: Hotový vzorek po zkoušce SCC

7.4 Testování koroze pod napětím

Před upnutím vzorku do testovacího zařízení byl vzorek i korozní cela odmaštěny a vysušeny. Následně byl vzorek vložen do korozní cely (Ideálně materiálem P265GH do spodní části korozní cely) a upnut s celkovým zatížením 92 kg. Zatížení způsobilo natažení ocelových lanek až o několik centimetrů, a proto bylo nezbytné alespoň 30 minut počkat. Po této době byl aplikován mezi vzorek a spodní víko korozní cely silikon, který potřebuje dobu tuhnutí okolo 24 hodin.

Po ztuhnutí silikonu byl do prostoru korozní cely nalit chlorid sodný (NaCl) o koncentraci 3,5 %, který způsobí agresivní korozní prostředí. Do korozní cely bylo nutné nalít dostatek roztoku (přibližně 1,5l), aby byl ponořen svar i TOO materiálu.

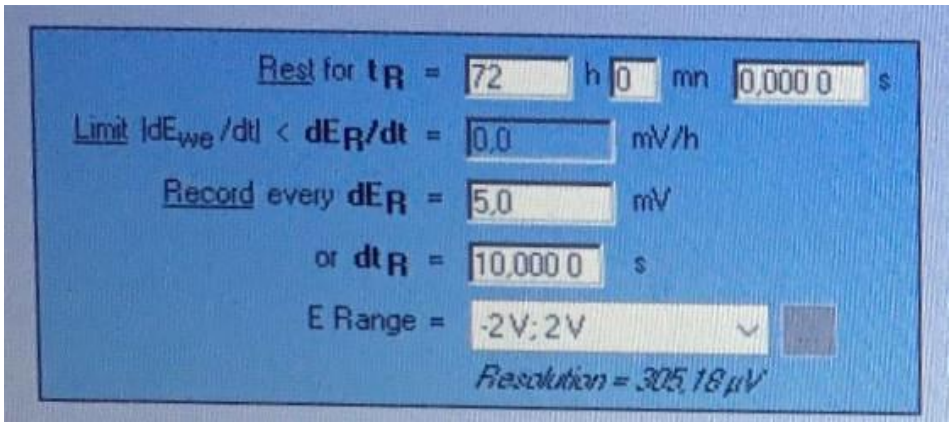
Při takto připraveném vzorku pro měření SCC byla umístěna měřící a referenční elektroda, jež byly upevněny v horním víku korozní cely, což je zobrazené na Obr. 22. Proběhlo také utěsnění mezery mezi horním víkem a vzorkem. Těsnění v horní části nehraje roli při měření, a proto byla použita obyčejná modelína.



Obr. 22: Zapojení elektrod

7.4.1 Využití potenciostatu pro měření SCC

Potenciostat SP-150 byl zapnut a připojen k externímu zařízení (notebooku), kde se nachází software EC-Lab od společnosti BioLogic. V softwaru byly nastaveny konkrétní hodnoty měření pro daný experiment (Obr. 23). Zkouška probíhala 72 hodin při zatížení 92 kg, na jejím konci bylo měření automaticky zastaveno a celá korozní cela, včetně vzorku, vyndána z testovacího zařízení. Výsledné křivky jsou popsány a porovnány v kapitole 8.



Obr. 23: Parametry pro měření potenciostatem

8 Vyhodnocení testu koroze pod napětím

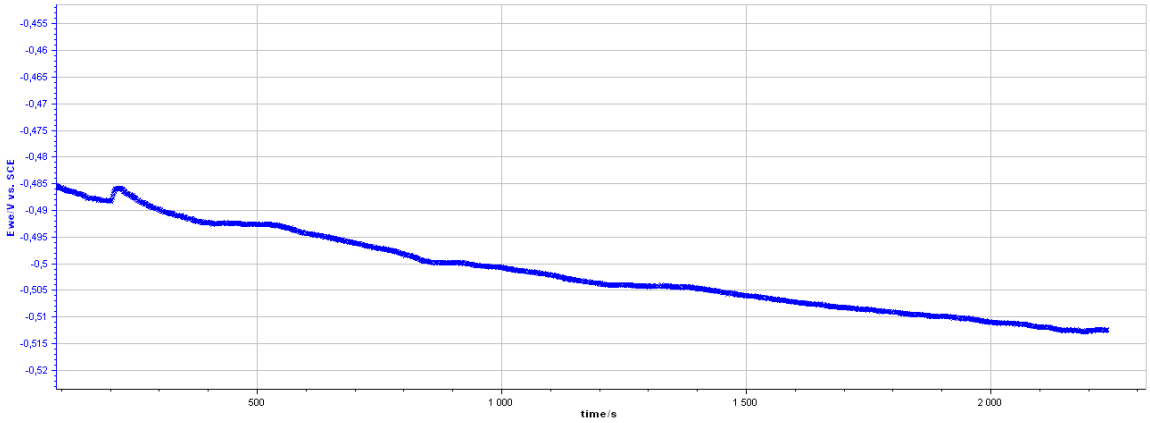
8.1 Vizuální vyhodnocení

Po expozici vzorků v agresivním korozním prostředí byly na vzorcích nepatrné korozní produkty na povrchu. Korozi více odolávala austenitická ocel, což bylo očekáváno. V průběhu experimentu nedošlo k poškození integrity vzorků. Cílem bylo indikovat trhlinky ve hranici ztavení TOO vlivem SCC v kotlové oceli P265GH, která zároveň mnohem méně odolává korozi (viz Obr. 24 až 26), a proto byla použita stereolupa pro rychlé vizuální zkontrolování potenciálních trhlinek.

Obr. 24 – 26: Vzorek po hotové zkoušce SCC

8.2 Výsledky z měření pomocí potenciostatu

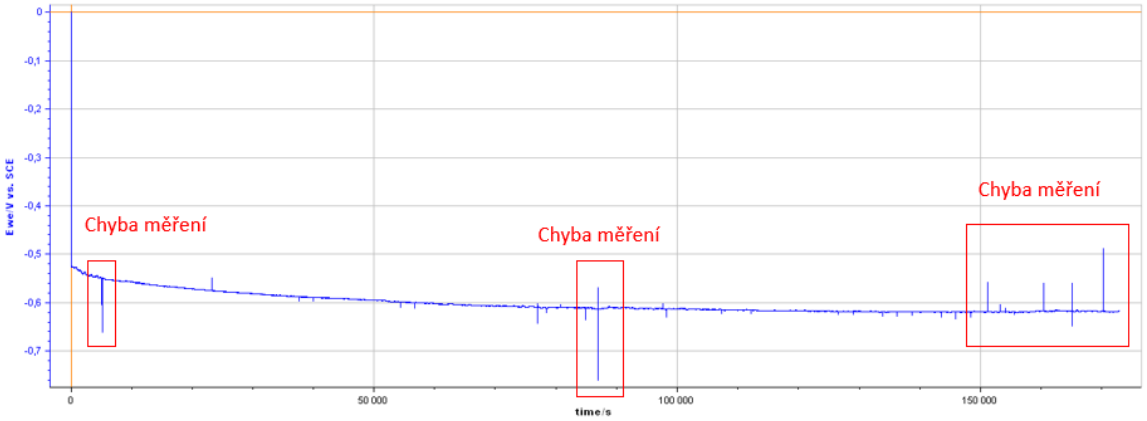
Křivky v grafech ukazují závislost korozního potenciálu na čase a měří se vůči kalomelové elektrodě. Je snaha najít různé výchylky v grafu, což by mohlo značit eventuální trhlinku v tepelně ovlivněné oblasti. Bohužel všechny odchylky v grafu byly zapříčiněny chybou měření stroje, tím jsou myšleny hlavně otřesy, které mohou být zaznamenány. Měřeny byly 4 vzorky, ale zkouška u prvního vzorku dopadla neúspěšně kvůli špatnému těsnění (tmel Soudal Butyrub) ve spodní části korozní cely okolo vzorku, což zapříčinilo vytečení pracovního média po 40 minutách od spuštění zkoušky, když se měření teprve ustalovalo (viz Obr. 27). Vertikální osa grafu značí korozní potenciál vůči kalomelové elektrodě a horizontální osa představuje čas v sekundách.



Obr. 27: Neúspěšná zkouška 1. vzorku

8.2.1 Měření 2. vzorku

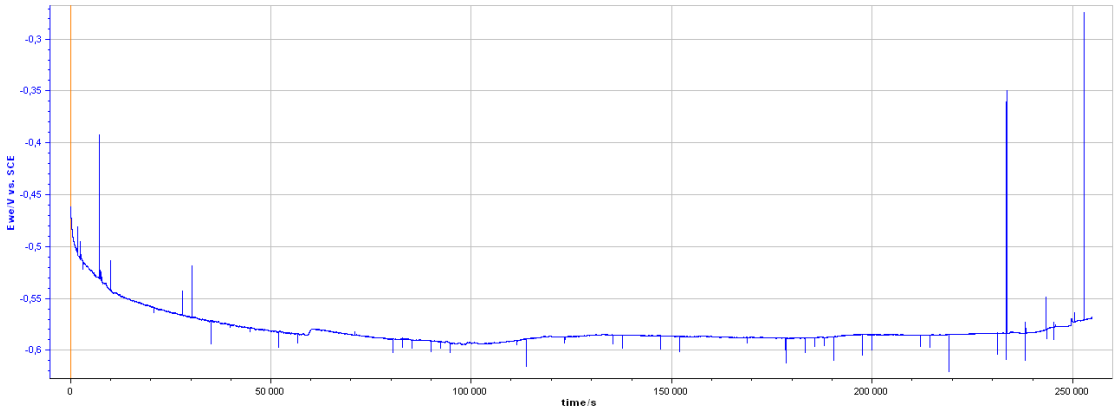
Druhý vzorek byl testován necelých 50 hodin s konstantním zatížením 77 kg. Vzorek byl předčasně vyjmut právě kvůli nedostatečnému zatížení, takže sloužil hlavně pro ověření správného těsnění a pro ověření celkového správného chodu experimentu. Na obrázku níže (obr. 28) jsou vyobrazeny v červených obdélnících největší chyby měření stroje ovlivněné okolím.



Obr. 28: Graf z 2. měření s označenými chybami měření stroje

8.2.2 Měření 3. vzorku

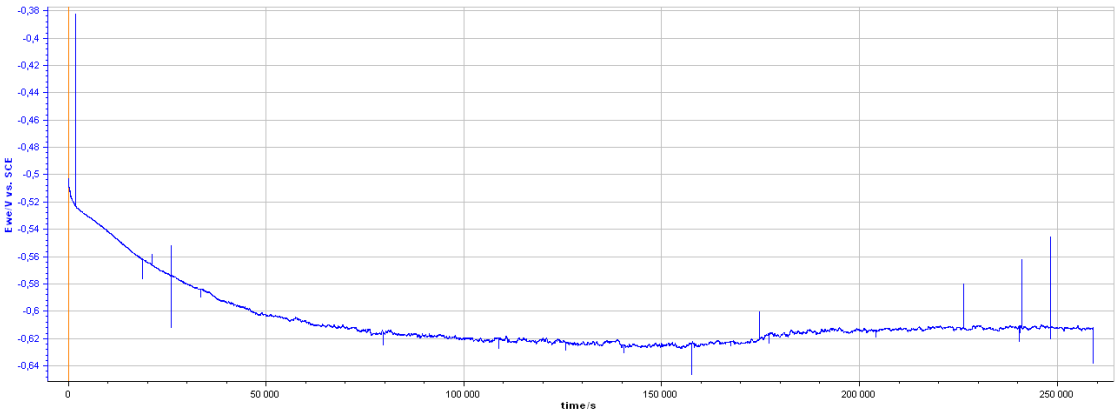
Třetí vzorek zobrazený na Obr. 29 byl ponechán ve stroji plánovaných 72 hodin při konstantním zatížení 92 kg, ale bez vyznačení svaru a TOO elektrikářskou lepenkou. Toto označení je aplikováno zároveň i jako ochrana zbylých částí vzorku, které není nutnost měřit. Ustalování i průběh měření nevykazovali větší odchylky, ale v posledních 6 hodinách měření byly zaznamenány větší chyby měření. Chyby mohou souviset s neoblepenými částmi vzorku a jeho následnou korozí.



Obr. 29: Graf z 3. měření

8.2.3 Měření 4. vzorku

Poslední test (Obr. 30) proběhl dle všech předpokladů. Chyby v předchozích měřeních byly odstraněny a experiment proběhnul správně. Nicméně potenciostat neukázal žádné trhlinky v místě svaru a TOO, a proto bylo nutné udělat ještě metalografickou analýzu.

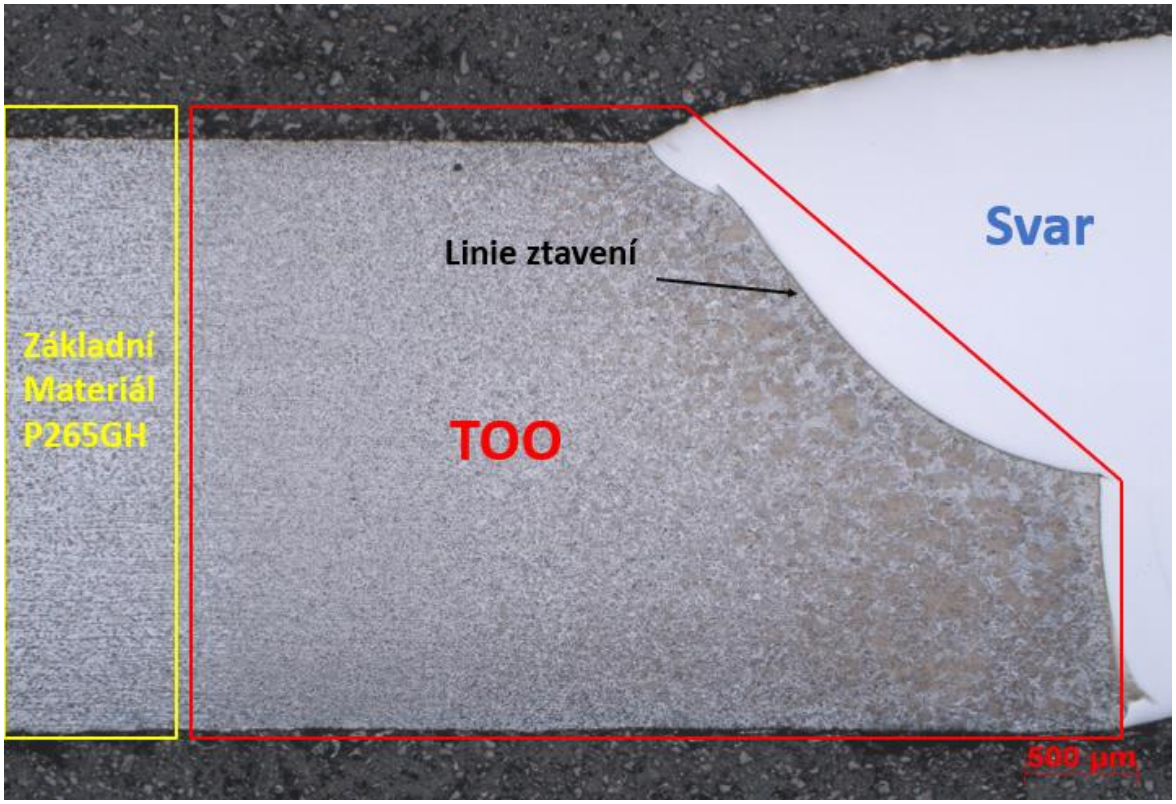


Obr. 30: Graf z 4. měření bez komplikací

8.3 Metalografická analýza

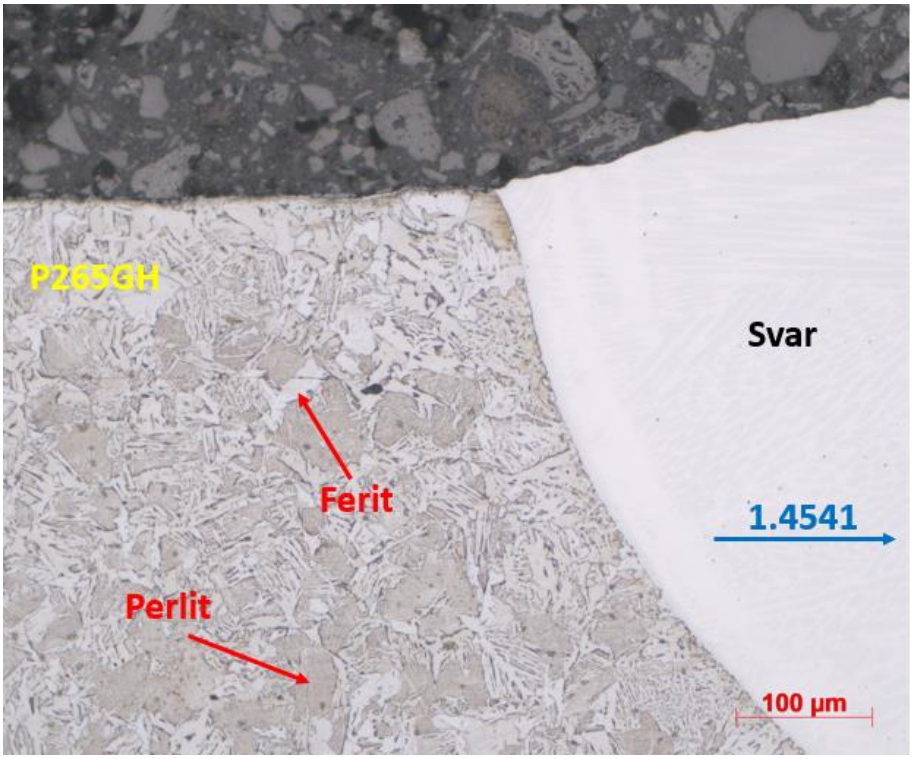
Pro studium metalografických výbrusů HSS, byly vzorky podélně rozřezány na metalografické pile Struers Discotom-6 a následně zasypány materiálem MultiFast prostřednictvím lisu Struers-Citopress10. Při zasypávání do lisu bylo potřeba dbát na stabilitu vzorku, aby nedošlo k jeho přetočení. Materiály 1.4541 a P265GH si vyžádaly složitější brousící a leštící program na automatické brusce Struers LaboForce-100. Ve fázi leptání stačilo naleptat jen uhlíkovou ocel P265GH pomocí 1 % nitalu, protože možné vzniklé trhlinky by s největší pravděpodobností byly právě v TOO tohoto materiálu, konkrétně v linii ztavení (viz. Obr. 1). Po naleptání uhlíkové oceli byla pozorována její mikrostruktura prostřednictvím světelného mikroskopu Zeiss Axio Vert.A1.

V této fázi experimentu byla věnována pozornost pouze tepelně ovlivněné oblasti oceli P265GH a linii ztavení mezi tímto materiálem a svarem. U materiálu P265GH se jednalo o válcovanou feriticko – perlitickou strukturu, která se měnila v závislosti TOO svarového spoje. Už při menším zvětšení bylo vidět postupné hrubnutí zrna směrem ke svaru od ZM (viz Obr. 31).

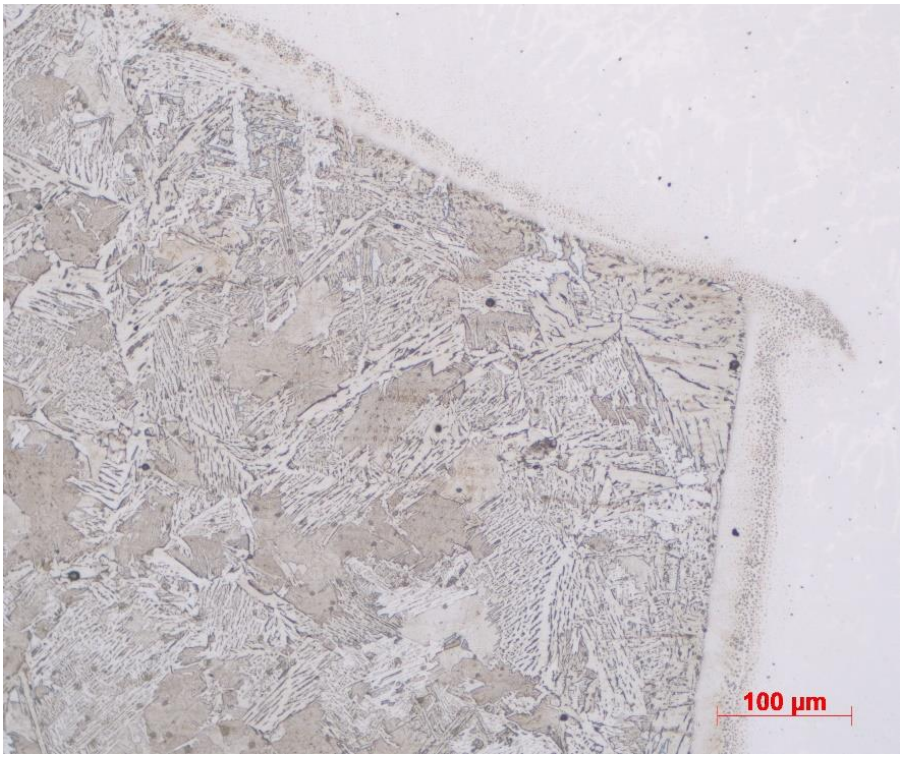


Obr. 31: Mikrostruktura 1. vzorku s vyznačením ZM, TOO a svaru. Zvětšeno 25x

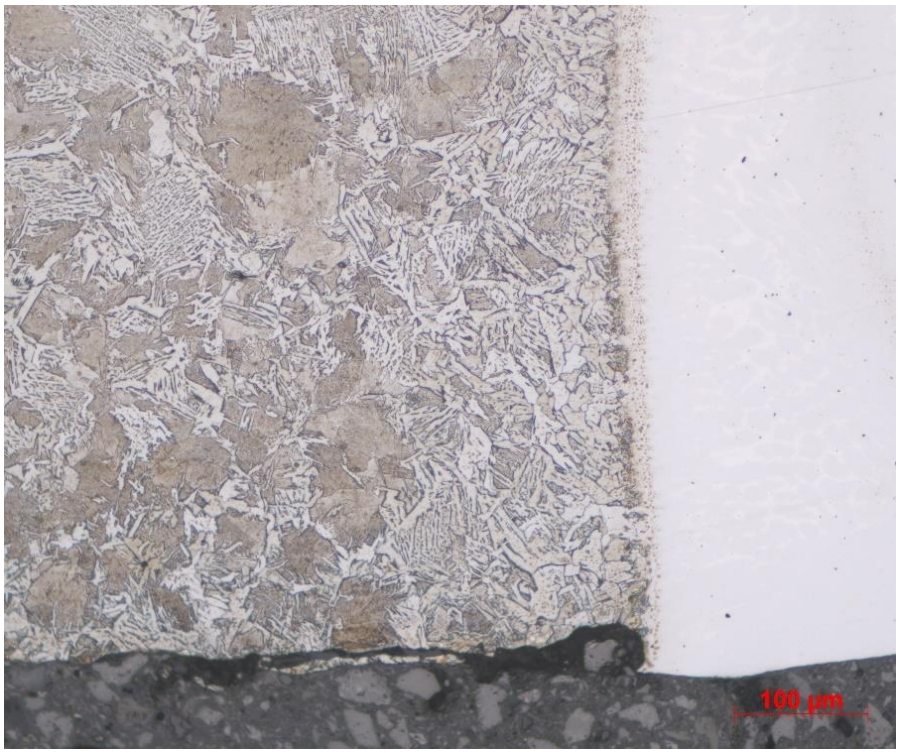
Detailnější snímky mikrostruktur prvních třech vzorků nebudou uvedeny z důvodu nepřesností v experimentu. Mikrostruktury těchto vzorků jsou v podstatě stejné a nemělo by smysl je zde rozebírat. Z principu je nejdůležitější poslední zkoušený vzorek (Obr. 32 – 34), protože všechny potřebné parametry pro zkoušku SCC byly správné.



Obr. 32: Detailní mikrostruktura rozhraní TOO – svar v horní části 4. vzorku. Zvětšeno 100x



Obr. 33: Detailní mikrostruktura rozhraní TOO – svar ve střední části 4. vzorku. Zvětšeno 100x



Obr. 34: Detailní mikrostruktura rozhraní TOO – svar ve spodní části 4. vzorku. Zvětšeno 100x

9 Diskuze

Prioritou experimentální části bakalářské práce bylo sestrojit a upravit testovací zařízení tak, abychom jej mohli využít pro budoucí testování heterogenních svarových spojů na korozi pod napětím. Důvodem k testování HSS jsou problémy v JETE na nátrubcích parogenerátorů vlivem SCC.

Testovací zařízení je prototyp, který byl sestaven z toho důvodu, že laboratoře FST KMM ZČU nemají podobné zařízení. V budoucnu určitě budou probíhat různé inovace zařízení. Zmíním zde několik příkladů pro inovace stroje:

a) Složité uchycení vzorku do šroubů – vhodné by bylo zvětšit mezeru uvnitř šroubů pro upínání, čímž bychom se vyhnuli rovnání vzorků na lisu, i jejich následným broušením. Je také možnost vložit mezi ocelové lanko a páku karabinu, což by rovněž umožnilo více přístupné upínání.
b) Korozní cela – korozní cela by mohla mít mnohem menší rozměry. Tím by se dosáhlo menší spotřeby roztoku NaCl.

Doba jednoho testu 72 hodin není dostačující, ideální čas by se měl pohybovat okolo 500 hodin se stejným konstantním zatížením 92 kg. Kvůli dlouhé době testování je v plánu postavit více podobných testovacích zařízení, kde by bylo možné provádět zkušební testy pro více vzorků ze stejného HSS najednou a získat více dat.

Velmi důležitá je kombinace: zatížení – agresivita roztoku – čas. Musí být zvolena nejvhodnější kombinace tak, aby nedošlo k potlačení korozních projevů a test se nezměnil v mechanickou zkoušku. Naopak roztok by také neměl být příliš agresivní, protože by materiál degradoval hlavně vlivem agresivity roztoku, čímž by nebyly simulovány podmínky pro SCC.

Zároveň doba zkoušky nesmí být příliš krátká, ale ani příliš dlouhá. Proto tato kombinace musí být dokonale vyvážena, abychom docílili chtěné koroze pod napětím.

Výsledky z měření potenciostatem neukázaly žádnou trhlinku. S největší pravděpodobností je to z důvodu krátkého času testování, protože zatížení 92 kg je dostatečné. Každopádně záleží i na agresivitě roztoku (v případě této bakalářské práce se jednalo o 3,5 % NaCl). Stejné výsledky ukázala i metalografická analýza, pravděpodobně ze stejných důvodů.

10 Závěr

V úvodu bakalářské práce byl představen důvod zkoumané problematiky. Následovala teoretická část, kde byla obecně uvedena důležitost svarového spojení, problematika HSS, která souvisí s jejich poškozením na nátrubcích parogenerátoru JETE, a použité metody svařování trubek. V kapitole 5. byla popsána korozní problematika HSS, včetně korozního praskání pod napětím, kterému byla věnována pozornost v experimentální části. Poslední kapitola teoretické části byla věnována možnému opatření proti korozi HSS. Cílem experimentální části bylo testování vzorků s HSS v korozním prostředí za působení jednoosého tahového napětí na korozní praskání pod napětím. Pro zkoušení bylo navrženo testovací zařízení obsahující tuhý rám, korozní celu a závaží, které bylo následně sestaveno. Předložené vzorky byly ze ZM uhlíkové oceli P265GH (ČSN EN 10028-2) a korozivzdorné austenitické chromniklové oceli 1.4541 (Wr.N.). Trubky byly svařovány metodami 111, 141 a 521 (dle EN ISO 4063), v případě této bakalářské práce se ale jednalo pouze o vzorky svařované metodou 141. Metoda svařování 141 využívá přídavný materiál SV-07CH25N13 (dle GOST 2246-70). Do testovacího zařízení bylo nezbytné trubky rozřezat drátořezem na požadované rozměry (šířka u všech vzorků zvolena 6 mm) a na tvar podobný pro tahovou zkoušku. Výsledky testování polarizační metodou pomocí potenciostatu neprokázaly, že by došlo k trhlinám, pravděpodobně kvůli krátké době testování. Metalografická analýza také neprokázala žádné trhliny. V okolí tepelně ovlivněné oblasti materiálu P265GH docházelo ke zhrubnutí zrn. Hrubozrnná struktura a různé zahrnuté vady jsou zdrojem napětí uvnitř materiálu a případným nebezpečím pro vyvolání SCC. K rychlejšímu získání výsledných dat je žádoucí zkonstruovat více korozních zařízení.

Použitá literatura

[1] Homogeneous welding. In: minaprem.com [online]. [cit. 2020-12-2]. Dostupné z: http://www.minaprem.com/joining/welding/introduction/what-is-homogeneous-welding-examples-advantages-and-disadvantages/

[2] KOVAŘÍK, Rudolf a František ČERNÝ. *Technologie svařování*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-697-5.

[3] BEŇO, Marcel. *Zvýšení životnosti a provozní spolehlivosti heterogenních svarových spojů zařízení jaderné energetiky* [online]. Ostrava, 2015 [cit. 2020-12-2]. Dostupné z: http://dspace.vsb.cz/handle/10084/110423. Disertační práce.

[4] PROCHÁZKOVÁ, Adéla. *Testování korozní odolnosti heterogenního svaru* [online]. Plzeň, 2020 [cit. 2020-12-2]. Dostupné z: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/41654/1/DP_Prochazkova.pdf. Diplomová práce.

[5] STŘÍLKOVÁ, Lucie. *Creepové vlastnosti a struktura heterogenních svarových spojů pro energetiku* [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2020-12-2]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/xqjqsb/>. Disertační práce.

[6] SAMEK, Petr. *Korozní odolnost heterogenních svarů na jaderných elektrárnách* [online]. Plzeň, 2018 [cit. 2020-12-2]. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/31617/1/SAMEK_DP.pdf. Diplomová práce.

[7] PILOUS, Václav a Karel STRÁNSKÝ. *Strukturní stálost návarů a svarových spojů v energetickém strojírenství*. Praha: Academia, 1989. Studie ČSAV, 1989, č. 7. ISBN: 8020000070.

[8] Equivalent grades of steel X6CrNiTi18-10 (1.4541): X6CrNiTi18-10 (1.4541). In: European Steel and Alloy Grades / Numbers Searchable Database [online]. [cit. 2021-2-21]. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=10

[9] Worldwide equivalents of grade St45.8 (Germany: DIN, WNr). In: European Steel and Alloy Grades / Numbers Searchable Database [online]. [cit. 2021-2-21]. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/equivalent_steel_iron_eu.php?zname_id=5364

[10] Kolektiv autorů, František Ing. KRISTOFORY, CSc., Václav prof. Ing. PILOUS, DrSC a Vladislav Ing. OCHODEK. *Materiály a jejich svařitelnost: Učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava, 1999. ISBN 80-85771-63-2.

[11] Vlastnosti korozivzdorných ocelí [online]. Lucembursko: Euro Inox, 2002 [cit. 2021-2-21]. ISBN 2-87997-082-2. Dostupné z: http://www.cedinox.es/opencms901/export/sites/cedinox/.galleries/publicaciones-tecnicas/StainlessSteelProperties_CZ.pdf

[12] Charakteristika jednotlivých skupin korozivzdorných ocelí. In: Bohdan Bolzano, s.r.o. [online]. Kladno, 2019 [cit. 2021-2-21]. Dostupné z: https://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/vyrobky-z-korozivzdornych-a-zaruvzdornych-oceli/vyrobky-z-oceli-korozivzdornych/charakteristika-skupin-korozivzdornych-oceli

[13] Protokol o vstupní kontrole 16TKT5554: Inspekční certifikát EN 10204. 3.7. ADW2. TÜV SÜD.

[14] Protokol o vstupní kontrole 16TKT5322: Inspekční certifikát EN 10204. 3.1.

[15] BYSTRIANSKÝ, J.; LEVÝ, M.; ŠEFL, V.: *Alternativní poškozující děj heterogenních svarových spojů ve vodném prostředí. Pracovní protokol – průběžná zpráva pro zpracování dílčího cíle* TA 02011179V010, pracoviště VŠCHT Praha za rok 2016

[16] DUCHÁČEK, P.: *Heterogenní svarové spoje nových žáropevných ocelí pro vysokoparametrické elektrárny*. [Diplomová práce], ČVUT Praha, 2013

[17] KUNCIPÁL J. et al.: *Teorie svařování*, SNTL, Praha, 1986, 272 s.

[18] Tungsten inert gas welding. In: twi-global.com. [online]. [cit. 2020-12-3]. Dostupné z: https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/tungsten-inert-gas-tig-or-gta-welding-006

[19] Svařování TIG. In: svářečky-elektrody.cz [online]. [cit. 2020-12-4]. Dostupné z: https://www.svarecky-elektrody.cz/svarovani-tig-zakladni-seznameni/t-39/t-120.

[20] TIG Welding Advantages & Disadvantages. In: drilly.com. [online]. [cit. 2020-12-3]. Dostupné z: https://drillly.com/tig-welding-advantages-disadvantages/

[21] *The orbital welding handbook* [online]. 1. Nantes: Polysoude, 2009 [cit. 2021-5-20]. ISBN PN-0509078. Dostupné z: https://static1.squarespace.com/static/54becf2ae4b09fae314e6e56/t/57a89018c534a5bcfbe978da/1470664738648/Orbital_Welding_Handbook_EN_LR.PDF

[22] Orbitální svařování. In: cotring.cz [online]. [cit. 2020-12-4]. Dostupné z: https://www.cotring.cz/en/products/orbitalni-svarovani-potrubnich-celku.

[23] JONES, Denny A. *Principles and prevention of corrosion*. New York: Maxwell Macmillan International Pub. Group, c1991. ISBN 0023612150

[24] NOVÁK, Pavel. *Koroze kovů* [online]. Ústav kovových materiálů a korozního inženýrství, Fakulta chemické technologie VŠCHT v Praze [cit. 2020-12-4]. Dostupné z: https://ukmki.vscht.cz/files/uzel/0016736/Koroze%20kov%C5%AF.pdf?redirected.

[25] ČÍHAL, Vladimír. *Mezikrystalová koroze ocelí a slitin*. 3. vyd. Praha: SNTL, 1984, DT 620.193:669.14

[26] Mezikrystalová koroze. In: cs.wikipedia.org [online]. [cit. 2020-12-4]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Koroze#/media/Soubor:Intergranular_corrosion.JPG.

[27] DAVIS, J.R. & Associates. *Corrosion of Weldments*. ASM International, 2006. ISBN: 978-0-87170-841-0

[28] ABUZEID, O.; ABOU ZOUR, M.; ZOUR, A.; ALJOBOURY, A.; ALZAFIN, Y. *Stress Corrosion Cracking of Ductile Ni-Resist Irons and Stainless Steels*. In: IntechOpen [online]. 2012, [cit. 2021-5-20]. DOI: 10.5772/52318. Dostupné z: https://www.intechopen.com/books/environmental-and-industrial-corrosion-practical-and-theoretical-aspects/stress-corrosion-cracking-of-ductile-ni-resist-irons-and-stainless-steels

[29] HAJŠMAN, Jan. *Vliv různého obsahu hliníku a manganu na korozivzdornost vysocepevných ocelí* [online]. Plzeň, 2019 [cit. 2021-2-21]. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/41644/1/DP-Hajsman.pdf. Diplomová práce.

[30] EC-Lab software. In: biologic.net [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: https://www.biologic.net/support-software/ec-lab-software/

[31] MACHALÍNEK, Martin. *Problematika vodíkové křehkosti v materiálu*. [online]. Praha, 2019 [cit. 2020-12-4]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/84803/F2-BP-2019-Machalinek-Martin-Problematika%20vodikove%20krehkosti%20v%20materialu.pdf?sequence=-1&isAllowed=y

Seznam obrázků

Obr. 1: Tepelně ovlivněná oblast (TOO) svarového spoje + část metastabilního diagramu Fe – Fe_3C [17]……..……...……8

Obr. 2: Svařování metodou TIG [19]…….…….….9

Obr. 3: Orbitální svařování trubek [22]……..……..……..10

Obr. 4: Znázornění potrubních tras PG [4]…….……12

Obr. 5: Mezikrystalová koroze [26]……...……13

Obr. 6: Podmínky pro vznik SCC [23]…….……..14

Obr. 7: Výzkumné zařízení pro zkoušení SCC [28]……...15

Obr. 8: Potenciostat SP-150…….…….……16

Obr. 9: Návrh testovacího zařízení……...…….…20

Obr. 10: Tuhý rám včetně závaží a korozní cely……..…….21

Obr. 11: Původní návrh korozní cely…….22

Obr. 12: 3D tiskárna……...23

Obr. 13: Hotový model spodního víka pro 3D tisk…….23

Obr. 14: Utěsnění tmelem SOUDAL Butyrub……...……24

Obr. 15: Utěsnění lepidlem z tavící pistole – nepovedený test kvůli vytečení pracovního média…….25

Obr. 16: Utěsnění průmyslovým silikonem……...25

Obr. 17: Výsledky příčné zkoušky tahem……..26

Obr. 18: Trubka svařovaná metodou 141……...27

Obr. 19: Výkres zkušebního vzorku……...……...28

Obr. 20: Dodané zkušební vzorky…….28

Obr. 21: Hotový vzorek po zkoušce SCC……...29

Obr. 22: Zapojení elektrod…….30

Obr. 23: Parametry pro měření potenciostatem……..31

Obr. 24: Vzorek po hotové zkoušce SCC……...…32

Obr. 25: Vzorek po hotové zkoušce SCC……...…32

Obr. 26: Vzorek po hotové zkoušce SCC……...…32

Obr. 27: Neúspěšná zkouška 1. vzorku……..33

Obr. 28: Graf z 2. měření s označenými chybami měření stroje…….33

Obr. 29: Graf z 3. měření……...……34

Obr. 30: Graf z 4. měření bez komplikací…….34

Obr. 31: Mikrostruktura 1. vzorku s vyznačením ZM, TOO a svaru. Zvětšeno 25x……...…35

Obr. 32: Detailní mikrostruktura rozhraní TOO – svar v horní části 4. vzorku. Zvětšeno 100x……...35

Obr. 33: Detailní mikrostruktura rozhraní TOO – svar ve střední části 4. vzorku. Zvětšeno 100x……...36

Obr. 34: Detailní mikrostruktura rozhraní TOO – svar ve spodní části 4. vzorku. Zvětšeno 100x……..…….36

Seznam tabulek

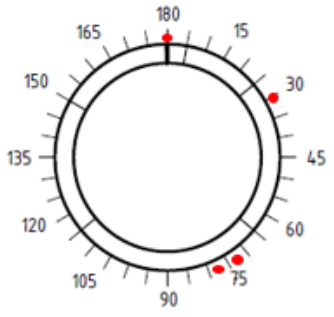
Tab. 1: Různé druhy označení ZM dle jednotlivých norem [8, 9]…….……...6
Tab. 2: Chemické složení oceli 1.4541 v hm.% [13]……..…..…….7
Tab. 3: Mechanické vlastnosti oceli 1.4541 [13]……..……7
Tab. 4: Chemické složení oceli P265GH v hm.% [14]……..…….……..7
Tab. 5: Mechanické vlastnosti oceli P265GH [14]……..……7
Tab. 6: Parametry pro svařování svaru Pk4/21 (T4Sv)…….……..…45
Tab. 7: Vizuální zkouška svaru Pk4/21 (T4Sv)……..……45
Tab. 8: Pracovní postup přípravy vzorku……..……46
Tab. 9: Pracovní postup upínání vzorku……..……...47
Tab. 10: Pracovní postup odebírání vzorku……..……..…48

Příloha A: Parametry pro svařování Pk4/21 (T4Sv) metodou svařování 141

Tab. 6: Parametry pro svařování Pk4/21 (T4Sv)

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

Tab. 7: Vizuální zkouška svaru Pk4/21 (T4Sv)

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

Příloha B: Pracovní postup přípravy vzorku do testovacího zařízení

Tab. 8: Pracovní postup přípravy vzorku

Název		**Příprava vzorku pro upnutí do testovacího zařízení**			
Materiál	1.4541 P265GH	**Polotovar [mm]**	TR Ø 44,5 x 3 – 390	**Vypracoval**	Taranda

Číslo operace	**Popis operace**	**Nástroj**	**Pracoviště**
10	Řezat na konkrétní rozměry vzorku	Vodní paprsek	AWAC, spol. s.r.o. +420 272 019 571
20	Kontrola rozměrů svaru a TOO	Digitální posuvné měřítko	----------
30	Zarovnání obou konců lisem o zatížení 40 tun	DMG	Pracovní hala ZČU FST
40	Brousit oba konce vzorku na 2,6 mm	Stolní bruska	FST KMM UF 020
50	Vrtat 2 díry o Ø 6 mm na obou koncích	Stolní vrtačka	FST KMM UF 020
60	Lepenkou vyznačit svar a TOO	Elektrikářská lepenka	----------

Tab. 9: Pracovní postup upínání vzorku

Název		**Postup při upínání vzorku do testovacího zařízení**			
Materiál	1.4541 P265GH	**Polotovar**	Vzorek	**Vypracoval**	Taranda
Číslo operace	**Popis operace**		**Nástroj**	**Pracoviště**	
10	Materiál P265GH upnout ve spodním šroubu		Testovací zařízení	FST KMM UF 111	
20	Aplikovat korozní celu				
30	Materiál 1.4541 upnout v horním šroubu				
40	Nastavit požadované zatížení				
50	Použít silikon k utěsnění vzorku		Průmyslový silikon		
60	Počkat min. 20 h, než zatuhne silikon		----------		
70	Aplikace 3,5 % NaCl		----------		

Tab. 10: Pracovní postup odebírání vzorku

Název		**Postup při odebírání vzorku z testovacího zařízení**			
Materiál	1.4541 P265GH	**Polotovar**	Vzorek	**Vypracoval**	Taranda
Číslo operace	**Popis operace**		**Nástroj**	**Pracoviště**	
10	Odstranit zatížení		Testovací zařízení	FST KMM 111	
20	Odepnout vzorek				
30	Vylít 3,5 % NaCl otočením korozní cely včetně vzorku		----------	FST KMM 110	
40	Vyjmout vzorek horním víkem korozní cely		----------		
50	Očistit korozní celu a vzorek		Průmyslový silikon		