

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Korozní odolnost heterogenních svarů na jaderných elektrárnách

Autor: **Bc. Petr Samek**
Vedoucí práce: **Ing. Ondřej Chocholatý Ph.D.**

Akademický rok 2017/2018

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Petr SAMEK
Osobní číslo: S16N0096P
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie
Název tématu: Korozní odolnost heterogenních svarů na jaderných elektrárnách
Zadávací katedra: Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Svařování, heterogenní svary.
2. Korozní problematika svarových spojů.
3. Metody protikorozní ochrany svarových spojů.
4. Metodika testování korozní odolnosti svarových spojů.
5. Návrh vhodných povrchových úprav pro ochranu svarového spoje.
6. Příprava vzorků.
7. Korozní testování a vyhodnocení.
8. Diskuze výsledků a závěr.

Rozsah grafických prací: fotodokumentace, obrázky

Rozsah kvalifikační práce: 50-60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné 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

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

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

Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Konzultant diplomové práce: Ing. Zdeněk Čančura

ČEZ, a. s.

Datum zadání diplomové práce: 20. září 2017

Termín odevzdání diplomové práce: 25. května 2018



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

L.S.



Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž
vedoucí katedry

V Plzni dne 20. září 2017

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:

.....

podpis autora

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Samek	Jméno Petr	
STUDIJNÍ OBOR	3911T016 „Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Chocholatý Ph.D.	Jméno Ondřej	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KMM		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Korozní odolnost heterogenních svarů na jaderných elektrárnách		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2018
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	70	TEXTOVÁ ČÁST	54	GRAFICKÁ ČÁST	5
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Tato práce řeší problematiku životnosti heterogenních svarových spojů austenitické a feriticko – perlitické oceli v podmínkách sekundárního okruhu výrobních bloků VVER. Teoretická část práce popisuje problémy spojené s jejich korozní odolností a degradačními procesy, které zásadně ovlivňují jejich životnost.</p> <p>Pro aplikační část byl navržen experimentální program pro ověření vlivu zvolených povrchových úprav na korozní odolnost heterogenních svarových spojů.</p>
<p>KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>Heterogenní svarový spoj, korozní praskání pod napětím, strukturální nestabilita svarového spoje, korozní odolnost, žárový nástřík, laserové přetavení povrchu, zkoušky koroze</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Samek	Name Petr
FIELD OF STUDY	3911T016 „Materials Engineering and Engineering Metallurgy“	
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Chocholatý Ph.D.	Name Ondřej
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM	
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Corrosion resistance of dissimilar welded joint in nuclear power plant	

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2018
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	70	TEXT PART	54	GRAPHICAL PART	5
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	<p>This diploma thesis deals with the lifetime of dissimilar welded joints in the conditions of the secondary circuit of VVER. The theoretical part describes the problems associated with corrosion resistance of dissimilar welded joints and degradation processes, which significantly affect their lifetime.</p> <p>An experimental program was designed to verify the influence of selected surface treatments on the corrosion resistance of dissimilar welded joints.</p>
KEY WORDS	Dissimilar welded joint, stress corrosion cracking, structural instability of weld, corrosion resistance, thermal spraying, laser surface remelting, corrosion testing

Poděkování

Zde bych chtěl poděkovat vedoucímu práce, panu Ing. Ondřeji Chocholatému, Ph.D. za poskytnuté odborné rady a vstřícný přístup při vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat konzultantovi, panu Ing. Zdeňku Čančurovi, Ph.D. za připomínkování práce a poskytnuté materiály. Velkým přínosem byla také možnost účastnit se interních konferencí zadavatele, týkajících se problematiky zvláštních procesů.

Diplomová práce vznikla na základě řešení studentského projektu SGS – 2018-051 „*Aplikace nových postupů úpravy a testování povrchu i objemových materiálů za účelem zvýšení uplatnitelnosti konstrukčního celku nebo pracovního nástroje v průmyslové praxi*“

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	6
Úvod	7
1. Svařování, heterogenní svarové spoje	9
1.1 Homogenní svarový spoj	9
1.2 Heterogenní svarový spoj (HSS)	9
1.3 Heterogenní svarový spoj typu austenit / ferit	11
1.4 Metodika oprav HSS	11
2. Korozní problematika heterogenních svarových spojů	12
2.1 Degradace strukturními změnami	14
2.2 Galvanická koroze	15
2.3 Důlková a štěrbinová koroze	16
2.4 Prostředím indukované praskání (EIC)	16
2.4.1 Korozní praskání pod napětím (SSC)	16
2.4.2 Korozní únavové praskání (CFC)	17
2.4.3 Vodíková křehkost (HIC)	18
3. Metody protikorozní ochrany HSS	18
3.1 Katodická ochrana	19
3.2 Pasivanty a inhibitory	19
3.3 Žárové nástřiky	19
3.3.2 Materiály pro žárové nástřiky	20
3.3.2 Předúpravy	21
3.3.3 Metody nanášení žárového nástřiku	21
3.3.4 Žárové nástřiky jako korozní ochrana ve vodném prostředí	23
3.3 Laserové přetavení povrchu (LSR)	24
4 Metodika zkoušení korozní odolnosti	26
4.1 Expoziční metody	26
4.2 Elektrochemické metody	27
4.2.1 Měření lineárního polarizačního odporu	28
4.2.2 Elektrochemická impedanční spektroskopie	28
4.2.3 Elektrochemický šum	28
4.2.4 Korozní potenciál	28

Experimentální část	29
5 Návrh experimentu	29
5.1 Výroba vzorků.....	29
5.2 Postup svařování	30
5.3 Použité materiály.....	32
6 Nedestruktivní zkoušení vzorků (NDT)	34
6.1 Vizuální kontrola (VT)	35
6.2 Kapilární zkouška (PT).....	35
6.3 Radiografická kontrola (RT)	35
7 Povrchové úpravy vzorků	36
7.1 Žárové nástřiky	37
7.2 Laserové povrchové přetavení (Laser Surface Remelting-LSR)	38
7.3 Inhibiční filmotvorný přípravek	38
8 Metalografický rozbor	39
8.1 Měření průběhu tvrdosti svarovým spojem	42
8.2 Hodnocení vrstev a povlaků	43
9 Příčná zkouška tahem	44
10 Expozice v neutrální solné mlze	45
10.1 Vzhled po zkoušce	46
10.2 Změny zjištěné mikroskopicky.....	48
10.3 Změny mechanických vlastností.....	50
11. Diskuze výsledků	52
12. Závěr	54
13. Použitá literatura	56
Seznam obrázků	59
Seznam tabulek	61
Seznam příloh	61

Seznam použitých zkratk a symbolů

	Původní význam	Přeložený význam
VVER	Vodo-vodňoj energetičeskij reaktor	Vodo-vodný energetický reaktor
PWR	Pressurized Water Reactor	Tlakovorní reaktor
JE	Jaderná elektrárna	
PG	Parogenerátor	
HVB	Hlavní výrobní blok	
NDT	Non-destructive testing	Nedestruktivní zkoušení
ETE	Jaderná elektrárna Temelín	
HSS	Heterogenní svarový spoj	
BWR	Boiling Water Reactor	Varný reaktor
ZM	Základní materiál	
PM	Přídavný materiál	
TOO	Tepelně ovlivněná oblast	
EIC	Environmentally induced cracking	Prostředím indukované praskání
SSC	Stress corrosion cracking	Korozní praskání pod napětím
CFC	Corrosion fatigue cracking	Korozní únavové praskání
HIC	Hydrogen Induced Cracking	Vodíková koroze
FS	Flame sprayed	Žárový nástřik plamenem
AS	Arc sprayed	Žárový nástřik obloukem
HVOF	High Velocity Oxygen-Fuel	Vysokorychlostní nástřik plamenem
LSR	Laser surface remelting	Laserové přetavení povrchu
ŘEM	Řádkovací elektronový mikroskop	
PÚ	Povrchová úprava	
I.O.	Primární okruh	
II.O.	Sekundární okruh	
VT	Visual testing	Vizuální kontrola
PT	Penetrant testing	Kapilární zkouška
RT	Radiographic testing	Radiografická zkouška

Úvod

V prosinci roku 1942 byl týmem vědců vedeným Enricem Fermim v rámci projektu Manhattan spuštěn první reaktor Chicago Pile – 1, jehož cílem bylo ověření teorie o samoudržitelné štěpné reakci. O množství energie, kterou je možno získat štěpením těžkých jader byla přesvědčena veřejnost na konci druhé světové války. Navzdory prvotním myšlenkám o využití jaderné energie někteří vědci viděli potenciál jejího využití i pro mírové účely. Jejich cílem bylo získat levný a ekologický zdroj elektrické energie. Na počátku těchto snah stál experimentální ruský reaktor AM-1, který byl jako první připojen k rozvodné síti a dodával elektrickou energii do domácností. Rozhodnutí o jeho výstavbě bylo učiněno v polovině roku 1950 a již v roce 1954 dodával elektrickou energii do rozvodné sítě. Zároveň se stal základem pro konstrukce později navrhovaných energetických reaktorů.

Na tomto příkladu je vidět, jak rychlým vývojem prošel jaderný průmysl ve svých začátcích. Pro konstrukci těchto zařízení bylo nutno vyvinout zcela nové materiály a využít v té době nové technologie jejich zpracování. Jednou z těchto technologií je např. tavné obloukové svařování. Tato metoda byla sice známa už dříve, ale vysoké nároky jaderného průmyslu si vyžádaly zcela nové technologie a postupy, jimiž bylo možno snížit výskyt vad a zaručit požadované vlastnosti svarového spoje.

Dalším významným milníkem ve vývoji energetických štěpných reaktorů byl rok 1964, kdy byl do rozvodné sítě připojen první výrobní blok Novovoronežské jaderné elektrárny, který měl za cíl ověřit zcela novou generaci energetických štěpných reaktorů, ve kterých byla použita voda jako chladivo i moderátor. Postupnou evolucí této konstrukce se dostáváme k v současnosti nejrozšířenějším energetickým reaktorům VVER. Současně s tímto typem probíhal v západních zemích vývoj podobné konstrukce energetického reaktoru, označovaného jako PWR, který je principiálně i konstrukčně velmi podobný. Díky geopolitické situaci tehdejšího Československa byl pro výstavbu našich jaderných elektráren s určitými změnami použit ruský projekt VVER.

Postupem času se požadavky na tato zařízení oproti původnímu projektu do určité míry změnily, stejně tak se změnily i materiály a výrobní technologie pro jejich zpracování. Logicky se snažíme těchto nových poznatků využít a vylepšovat provozní parametry jaderných zařízení, jako je elektrický výkon, provozní spolehlivost, životnost a další. Konstrukční změny ale nemůžeme provádět bez důkladného vyzkoušení, abychom zajistili nejdůležitější parametr, kterým je bezpečnost provozu jaderných elektráren. Proto musejí být veškeré inovace a postupy oprav kvalifikovány a musí k nim být vydáno stanovisko Státního úřadu pro jadernou bezpečnost, který dozoruje provoz jaderných zařízení na našem území. Problematika životnosti a provozní spolehlivosti jaderných elektráren je bezesporu celospolečenským tématem. Nejen v České republice jsou výrobní bloky JE „páteřním“ zdrojem elektrické energie a také proto je kladen velký důraz na jejich spolehlivost, dosažení co možná nejvyššího koeficientu využití instalovaného výkonu a především bezpečnost.

Případná neplánovaná odstávka takového zařízení nebo jeho havárie se byt' nepřímo dotkne každého z nás. Z tohoto důvodu jsou taková zařízení pod velmi přísným státním i mezinárodním dozorem a musejí splňovat velmi přísné bezpečnostní požadavky. S ohledem na fakt, že výstavba nových jaderných bloků je z mnoha důvodů otázkou na několik desetiletí, přichází problém, jak prodloužit životnost současných zařízení alespoň do doby, než je budeme schopni plnohodnotně nahradit. Druhým aspektem je aplikace nových materiálů a technologií do vývoje nových zařízení, čímž bychom mohli splnit rostoucí požadavky ohledně bezpečnosti, účinnosti a samozřejmě i životnosti jaderných elektráren.

Problematika heterogenních svarových spojů na JE

Hlavní motivací pro řešení této práce jsou události z roku 2016, kdy na PG4, HVB1 Temelínské jaderné elektrárny došlo k poruše v místě heterogenního svarového spoje nátrubku parogenerátoru s potrubní trasou systému RY za úniku média sekundárního okruhu. V návaznosti na tuto poruchu byly provedeny NDT kontroly všech heterogenních svarových spojů nátrubků, na jejichž základě byly provedeny opravy nevyhovujících svarových spojů. Na vzorcích odebraných z porušené potrubní trasy proběhla rozsáhlá expertizní činnost na několika vědeckých pracovištích v České republice s cílem odhalit kořenovou příčinu porušení a stanovit taková opatření, která povedou k eliminaci poškozování heterogenních svarových spojů. Zkušenosti z provozu obou jaderných elektráren v ČR i jinde ve světě ukazují, že nejsou problematické jen dotčené svary nátrubků N5 a N6 parogenerátorů ETE, ale problémy se objevují také na všech heterogenních svarových spojích sekundárního okruhu, kde je kořenová oblast svarového spoje v kontaktu s pracovním médiem sekundárního okruhu. [23]

Zkušenosti z provozu bloků VVER v Ruské federaci hovoří o tom, že poškození heterogenního svarového spoje se objevují v intervalu 6 až 8 let. Na základě výše zmíněných faktů a závěrů expertizní činnosti byl vypracován "Akční plán PG VVER 1000MW," který přijal opatření pro zabezpečení eliminace poruch heterogenních svarových spojů PG. [18]

1. Svařování, heterogenní svarové spoje

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

Jedním z kritických bodů systémů, konstrukcí a komponent zařízení JE jsou svarové spoje. Především heterogenní svarové spoje na potrubních systémech a komponentech jaderných elektráren představují geometrickou a strukturální diskontinuitu. Geometrická diskontinuita je způsobována výrobními nepřesnostmi a defekty, strukturální je způsobována často spojováním ocelí o různém fázovém složení. Díky tomu se svarové spoje v některých případech stávají prvkem přímo určujícím bezpečnost a životnost zařízení jaderné elektrárny. [6]

1.1 Homogenní svarový spoj

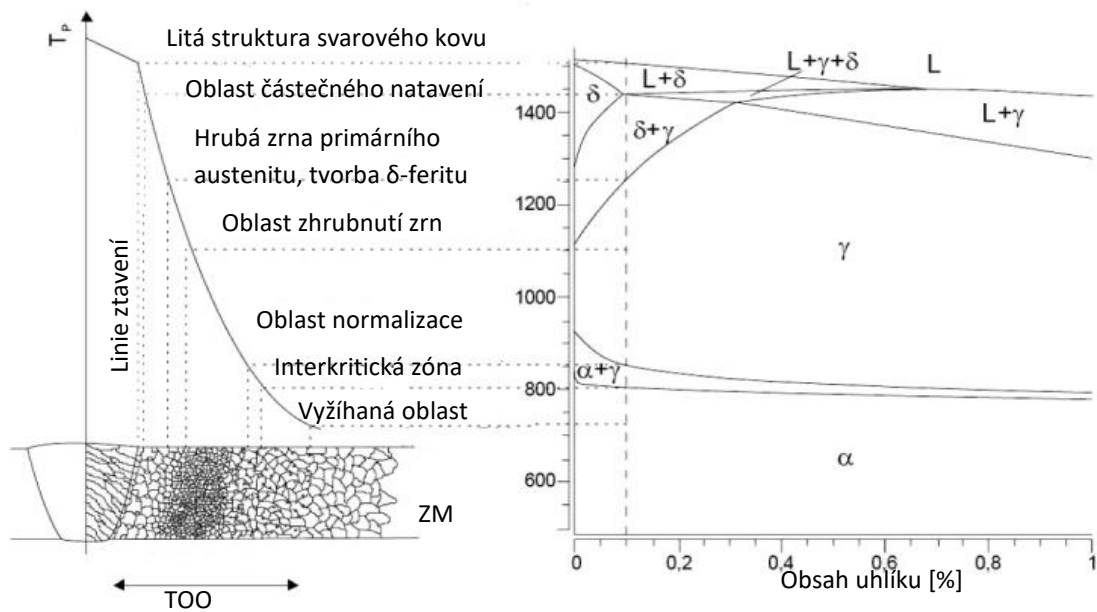
Jako homogenní svarový spoj označujeme místo, kde tavným způsobem spojujeme konstrukční prvky vyrobené z materiálů stejného, nebo velmi podobného chemického a fázového složení. Abychom zaručili požadované mechanické vlastnosti svarového spoje, volíme přídatný materiál chemickým složením blízký základnímu materiálu. Pokud je dodržen technologický postup výroby takového svaru, v provozu se jeví jako spolehlivé a nepřinášejí výraznější problémy. [11]

1.2 Heterogenní svarový spoj (HSS)

Pojmem heterogenní svarový spoj obecně označujeme místo součásti nebo konstrukce, ve kterém tavným způsobem spojujeme dva či více materiálů různého chemického a fázového složení. Kupříkladu jako heterogenní svarový spoj neoznačujeme spojení dvou polotovarů vyrobených ze stejného materiálu rozdílnou technologií, ale například tavný svarový spoj austenitické oceli s martenzitickou ano. Tento typ svarového spoje přináší mnoho specifik nejen při výrobě, ale i během následného provozu. Při spojování dvou materiálů odlišného chemického složení je nutné použití přídatného materiálu, který má dostatečnou vzájemnou rozpustnost s oběma svařovanými základními materiály a výsledný svarový kov tak bude mít požadovanou mikrostrukturu, mechanické vlastnosti a další parametry.

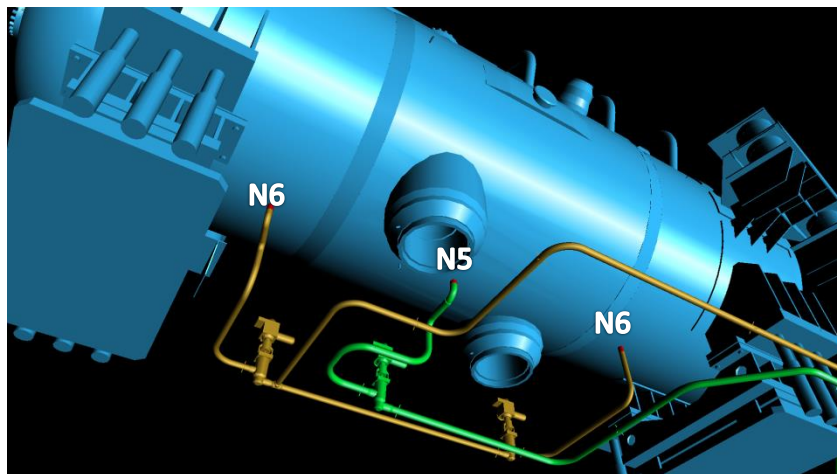
S ohledem na fakt, že jednotlivé části konstrukce primárního i sekundárního okruhu hlavního výrobního bloku jsou vystaveny rozdílnému namáhání, tepelným cyklům a působení pracovních médií rozdílných parametrů, vyžaduje konstrukce využití rozdílných materiálů na jednotlivé komponenty, díky čemuž jsme nuceni řešit problematiku HSS. Během svařování různých materiálů dochází k řadě poměrně složitých metalurgických pochodů, které mají zásadní vliv na kvalitu výsledného svarového spoje, proto je musíme pečlivě kontrolovat a vyhodnocovat. [17]

Procesem svařování vnášíme do svarového spoje citlivá místa, která mohou zapříčinit vznik trhlin během svařování nebo výrazně ovlivnit výsledné funkční parametry spoje, jako je pevnost a korozní odolnost, případně mohou sloužit jako cesty šíření defektu. Těmito zónami jsou oblast částečného natavení, oblast zhrubnutí zrn, oblast normalizace, interkritická oblast a vyžíhaná oblast, na kterou navazuje neovlivněný základní materiál. Tyto zóny jsou znázorněny v obrázku 1. [12]



Obr. 1: Zóny svarového spoje [24]

Konkrétními problematickými svařovými spoji v podmínkách sekundárního okruhu VVER jsou heterogenní svařové spoje potrubních systémů (Obr. 2) z austenitické korozivzdorné oceli 08Ch18N10T s nátrubky pláště parogenerátoru, který je vyroben z feriticko - perlitické oceli 22K v případě VVER 400MW a ocel 10GN2MFA v případě VVER 1000MW. Tyto svařové spoje podléhají degradačním pochodům a koroznímu napadení, díky čemuž vykazují nižší životnost než homogenní svařové spoje. [16]



Obr. 2: Napojení potrubních tras parogenerátoru VVER 1000MW [17]

1.3 Heterogenní svarový spoj typu austenit / ferit

Právě tento typ heterogenního svarového spoje je typický pro sekundární okruh VVER. Austenitické chrom-niklové oceli jsou nejpoužívanější třídou korozivzdorných ocelí. Je to dáno jejich skvělou korozní odolností, dobrým mechanickým vlastnostem při velkém rozsahu teplot a obecně dobrou svařitelností. V prostředí sekundárního okruhu VVER 400MW i 1000MW je nejčastějším zástupcem austenitických korozivzdorných ocelí výše zmíněná ocel 08Ch18N10T. Tato titanem stabilizovaná korozivzdorná ocel je používána pro výrobu komponent potrubních systémů, částí vnitřních vestaveb, teplosměnných trubek parogenerátorů a dalších.

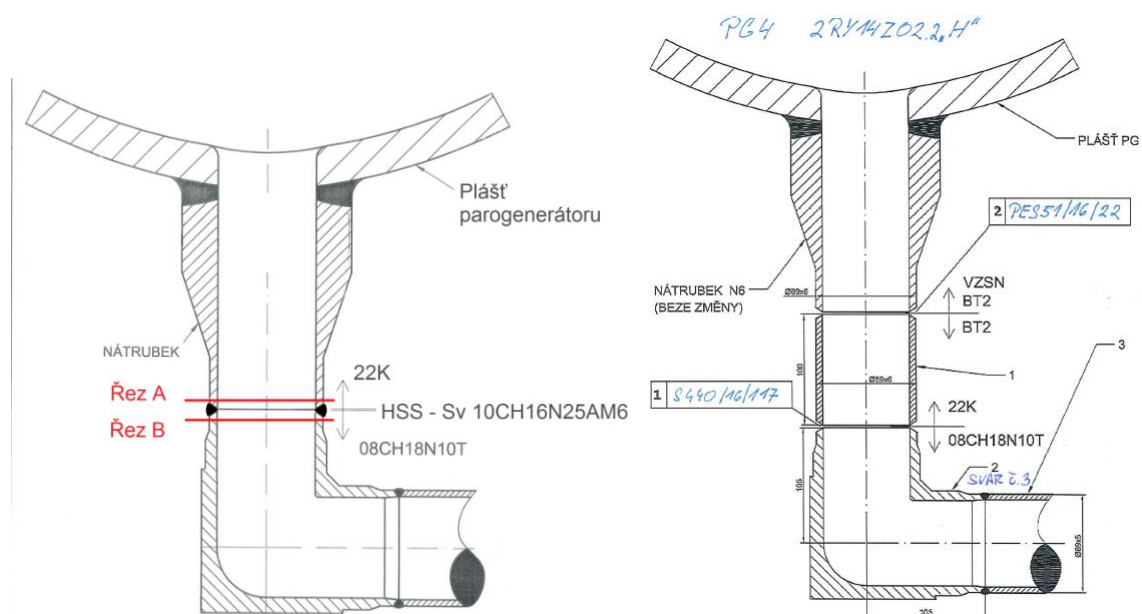
Oproti tomu nízkolegované feritické oceli mají horší korozní odolnost, creepové a únavové vlastnosti. Příkladem těchto ocelí jsou např. 22K, 12022 a 10GN2MFA. Tyto nízkolegované feriticko - perlitické oceli se nejčastěji používají jako nosné oceli tlakových nádob parogenerátorů a kompenzátorů objemu.

Hlavním problémem při vytváření tavného spoje těchto dvou materiálů jsou rozdílné podmínky svařitelnosti vycházející z jejich rozdílné struktury. Nízkolegované feritické oceli mají často svařitelnost podmíněnou kontrolovaným předehřevem, teplotou interpassu během svařování, pomalým řízeným ochlazováním (dohřevem) a někdy i následným tepelným zpracováním svarového kovu. Austenitické oceli během svařování naopak vyžadují co nejmenší množství vneseného tepla, předehřev a dohřev se při jejich svařování nepoužívá, tyto oceli jsou náchylné k tvorbě horkých trhlin. [7]

Dalším problémem je výskyt zón s rozdílnými koncentračními gradienty legujících prvků. Nežádoucím jevem je difuze uhlíku z nízkolegované feritické oceli do austenitické oceli. Legující prvky v austenitické oceli mají k uhlíku vysokou afinitu, což vede ke vzniku karbidů. To má za následek vznik oduhličeného pásma ve feritické oceli a v austenitické oceli dojde k ochuzení o legující prvky. V tomto pásmu je značně snížena korozní odolnost. Pro eliminaci těchto jevů musíme zvolit správný přídavný materiál, dodržet svařovací parametry jako jsou průtok ochranného plynu, proudové charakteristiky apod. [6]

1.4 Metodika oprav HSS

V současné době jsou tyto korozně porušené heterogenní svarové spoje opravovány tak, že je část svaru obsahující vadu vyříznuta a následně je na toto místo vsazen nový mezikus s HSS (Obr. 3). Výhodou tohoto postupu je fakt, že provedení heterogenního svaru v dílenských podmínkách umožňuje dosáhnout lepší kvality spoje a zároveň usnadňuje i jeho defektoskopickou kontrolu. Oproti tomu značnou nevýhodou je zvýšení celkového počtu svarů zařízení, což sebou nese vyšší nároky na jejich periodické kontroly. [16]



Obr. 3: Postup opravy nátrubky N6 [16]

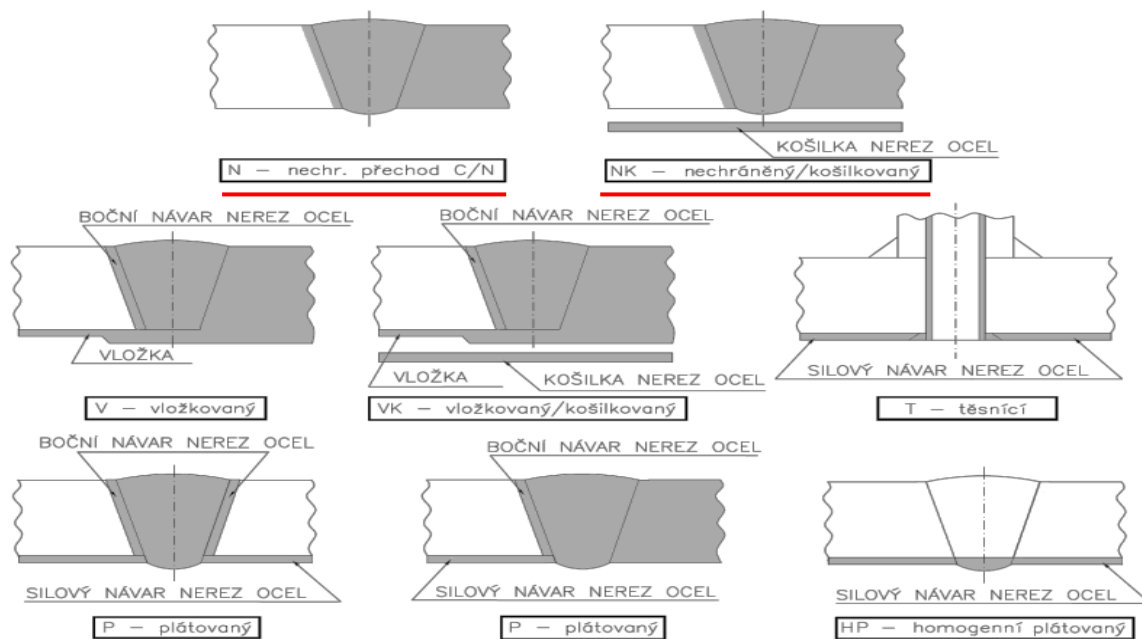
Hlavní nevýhodou tohoto postupu opravy je technologická náročnost. Proto je v současnosti vyvíjena snaha kvalifikovat pro opravy nové postupy, které by snížily technologickou náročnost opravy. Jde například o aplikaci technologie weld overlay nebo orbitálního svařování. Zároveň jsou zkoumány možnosti zvýšení životnosti těchto svarů, například povrchovou ochranou kořenové oblasti HSS s cílem omezit vznik vad ve svarových spojích vznikajících za provozu zařízení JE. [18]

2. Korozní problematika heterogenních svarových spojů

Pokud se podaří zvládnout technologii výroby heterogenního svarového spoje, neznamená to automaticky, že může být použit v provozu JE. Svarový spoj musí splňovat také požadavky na bezpečnost a životnost. V této kapitole je konfrontována problematika heterogenních svarových spojů s dalším velmi obsáhlým tématem, kterým je koroze. Výsledkem je široká škála degračních mechanismů, které ovlivňují životnost spoje.

Zde se uplatní jeden z největších paradoxů původní ruské konstrukce VVER. Celý primární okruh je navrhnout z korozně velmi odolných, převážně austenitických ocelí. Pokud byla z pevnostních důvodů jako nosná ocel použita jiná s nižší korozní odolností, opatřila se silovým austenitickým návarem jako ochrana proti korozi, radiačnímu zkrěhnutí a dalším degračním pochodům. Díky tomuto materiálovému řešení je primární zóna HVB VVER provozně velmi spolehlivá a problematika heterogenních svarových spojů, tak jak je v této práci popisována, se u ní nevyskytuje.

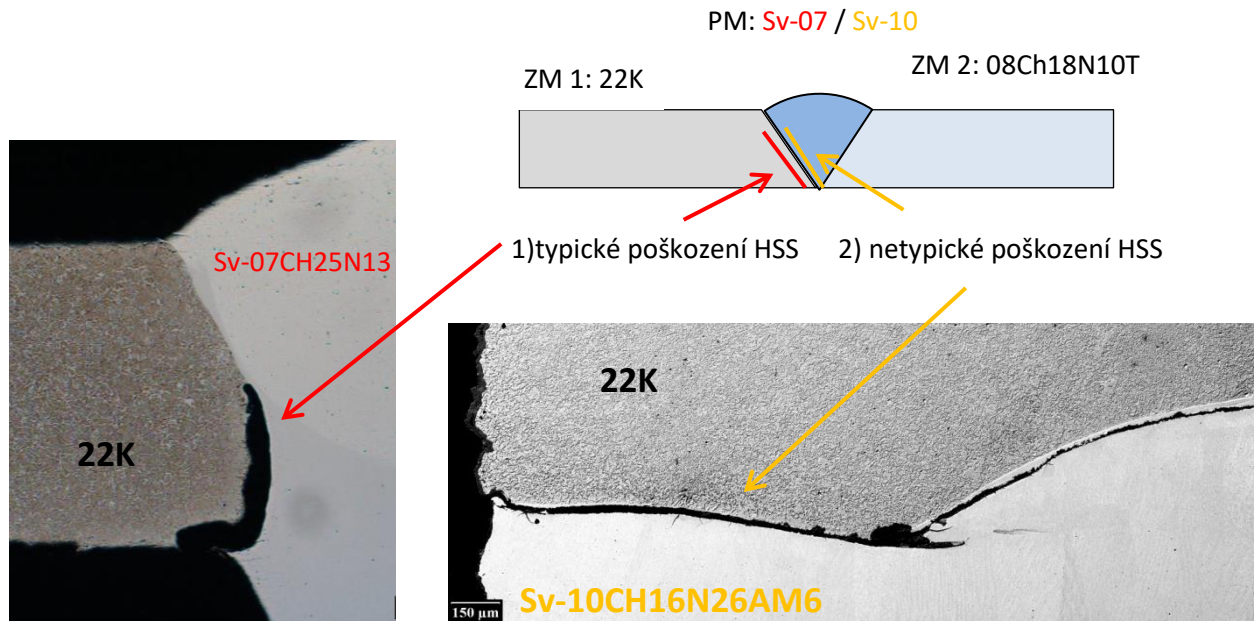
Komponenty sekundárního okruhu jsou z materiálového hlediska řešeny jinak. Paradoxně právě parogenerátor, jehož plášť je vyroben z feriticko – perlitické nízkolegované oceli ochranným návarem opatřený není, ačkoliv se jedná o zařízení, ve kterém se díky zahušťování kotlové vody vyskytuje nejagresivnější korozní prostředí. Právě díky konstrukčnímu řešení parogenerátoru se zde nachází velké množství heterogenních svarových spojů, z nichž některé nejsou jinak chráněny a svarový kov je tak přímo exponován vlivům pracovního média. Ze zkušenosti právě tyto heterogenní svarové spoje (typ N a NK) (Obr. 4) jsou náchylné vůči koroznímu napadení.



Obr. 4: Používaná konstrukční provedení svarových spojů [16]

Z expertíz vzorků porušených HSS bylo zjištěno, že dochází ke dvěma druhům poškození. První druh je označován jako typické poškození, při kterém se méně ušlechtilá feriticko – perlitická nízkolegovaná ocel začne anodicky rozpouštět za vzniku korozních důlků. Tyto důlky poruší pasivační vrstvu stabilního oxidu a iniciují důlkovou a štěrbinovou korozi. Prohloubením se tyto důlky stávají koncentrátory napětí, z nichž je iniciována trhlinka šířící se po linii ztavení mezi feriticko - perlitickou ocelí a austenitickým svarovým kovem, jak je vidět na obrázku níže (Obr. 5). Pokud nedojde k detekci a opravě vady, šíří se trhlinka až do vzniku průchozí vady. [23]

Druhý typ poškození je označován jako netypický. Toto poškození bylo pozorováno u heterogenních svarových spojů vytvořených konkrétním přídavným materiálem, a sice materiálem Sv-10Ch16N25AM6. U takto poškozených HSS byla pozorována strukturní nestabilita, redistribuce legujících prvků a velký nárůst tvrdosti ve svarovém kovu. Potom se defekt nešířil méně ušlechtilou feriticko – perlitickou ocelí, ale netypicky korozně odolnějším austenitickým vysoce legovaným svarovým kovem. U výrobních bloků osazenými reaktory BWR se objevil i další netypický druh poškození, kdy se defekt šířil v austenitickém ZM.



Obr. 5: Poškození heterogenního svarového spoje [23]

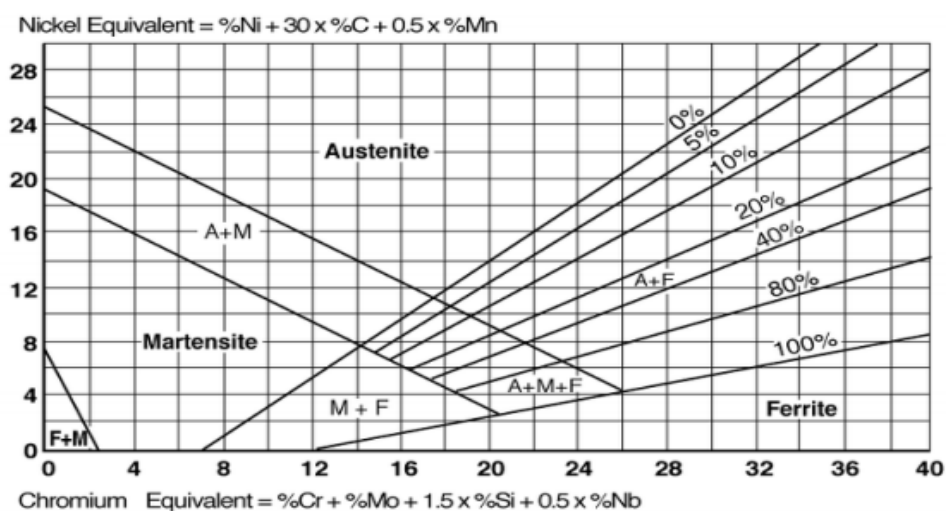
2.1 Degradace strukturálními změnami

Strukturální stálost oceli lze definovat jako neměnnost jejích fyzikálních, mechanických, antikoročních a jiných vlastností po dobu plánované životnosti zařízení. Lze tedy říci, že strukturální stálost vyjadřuje schopnost materiálu odolávat vlivu působících vnějších podmínek, například vlivu teploty, tlaku, korozního prostředí, ozáření a dalších účinků působících během provozu zařízení. Jestliže se původní struktura materiálu změní natolik, že součást není schopna přenášet namáhání, pro která byla navržena, dojde k vyčerpání životnosti materiálu a nastane lom. V tomto případě je strukturální stálost materiálu za daných podmínek nevyhovující. Při současném snížení strukturální stálosti a cyklické plastické deformaci se může stát, že procesy lokálního poškození materiálu se přednostně soustředí do oblastí, kde materiál prodělal z hlediska namáhání nejméně příznivé strukturální změny. [6]

Strukturální stálost ocelí je závislá především na difúzních procesech, které probíhají mezi ocelmi tvořícími svarový spoj nejen při jejich svařování, ale i při jejich provozu. Difúzním procesem, který nejvýrazněji ovlivňuje strukturální stálost svarových spojů, je redistribuce intersticiálních prvků, především uhlíku, v menší míře také dusíku a vodíku.

Jako hlavní příčiny degradace struktury řešeného HSS lze označit redistribuci intersticiálních prvků, především uhlíku, díky čemuž ve svarovém spoji dochází ke vzniku nahličených a oduhličených oblastí a vytvoření makronehomogenit. Vlivem technologie výroby oceli 08Ch18N10T, která je uklidněna titanem, dochází i k tvorbě karbidu TiC. Následně se plastické deformace lokalizují do oduhličených odpevněných zón při cyklických změnách teploty a zatížení, vyčerpání jejich plasticity a potenciální náchylnost ke vzniku trhlin. [6]

K základnímu posouzení struktur v heterogenních svarových spojích typu austenit / ferit různého složení je vhodný Schaefflerův diagram. Při pohledu na Schaefflerův diagram (obr. 6) vidíme, že mezi oblastí feritu a austenitu zasahuje částečně oblast martenzitu. Vznik základních struktur ve svarovém kovu je dalším nebezpečím při výrobě heterogenního svarového spoje typu austenit / ferit. K této chybě může dojít při použití nevhodného přídavného materiálu nebo tepelného režimu. Takový svarový spoj je náchylnější k porušení lomem.



Obr. 6: Schaefflerův diagram [21]

2.2 Galvanická koroze

Je zřejmé, že díky vodivému styku vysoce legovaného svarového kovu s více základními materiály s rozdílným elektrodovým potenciálem bude docházet ke vzniku galvanických článků, které mohou zapříčinit elektrochemickou korozi nejméně ušlechtilého materiálu. Díky tomu, že svar obsahuje více strukturálních složek s různým potenciálem, může docházet k elektrochemické korozi jednotlivých mikrostrukturálních složek. Tomuto napadení se dá předcházet úpravou chemického složení svarového kovu, aby katodicky chránil základní materiál s nejvyšším korozním potenciálem. Toto řešení však může být pro mnoho konstrukcí nevhodné. Kombinací vzniku galvanických článků a zbytkového napětí v TOO svaru může docházet k vodíkovému zkřehnutí materiálu. Výsledkem kombinace vodíkového zkřehnutí a zbytkového napětí může docházet ke koroznímu praskání pod napětím. [1]

Jsou-li vystaveny dva povrchy o různém korozním potenciálu vodivému elektrolytu, začne působit elektrochemický děj, při kterém se méně korozně odolný povrch začne rozpouštět i za předpokladu, že je pokryt pasivační vrstvou stabilního oxidu. Tímto mechanismem dojde k aktivaci povrchu a vzniku nerovnoměrného korozního napadení.

2.3 Důlková a štěrbinová koroze

Lokalizované napadení svarového kovu, nebo tepelně ovlivněné oblasti, může být způsobeno důlkovou nebo štěrbinovou korozí, především ve vodných prostředích. Toto korozní napadení je nejčastěji způsobeno lokálním porušením pasivační vrstvy. Povrchové vady svaru, jako jsou zbytky tavidla, mikrotrhliny vznikající během tuhnutí svarového kovu a horké trhliny mohou být místy iniciace štěrbinové koroze, která dramaticky snižuje korozní odolnost svaru. Tyto korozní důlky se často stávají místem iniciace dalších degradačních procesů. [2]

2.4 Prostředím indukované praskání (EIC)

Tímto termínem obecně popisujeme křehké poškození materiálu způsobené současným působením tahového napětí a korozního prostředí. Ke křehkému porušení může dojít i za předpokladu, že korozní úbytky jsou malé a tahové napětí je pod mezí kluzu, pokud tyto jevy působí současně. Mezi prostředím indukované praskání řadíme:

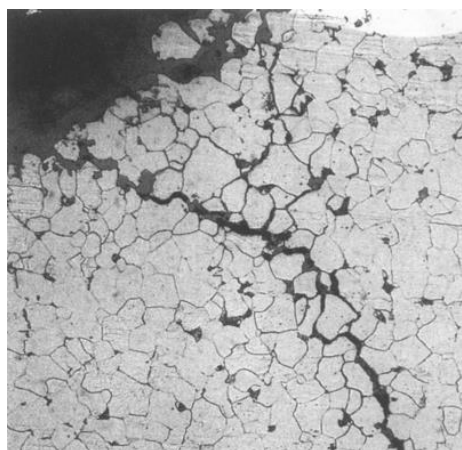
- Korozní praskání pod napětím (SSC)
- Korozní únavové praskání (CFC)
- Vodíková křehkost / vodíkem indukované praskání (HIC)

V některých případech porušení materiálu může být způsobeno více než jedním z těchto mechanismů. [2]

2.4.1 Korozní praskání pod napětím (SSC)

Je definováno jako křehké porušení slitiny při relativně malém tahovém napětí, vystavené působení koroznímu prostředí. Vůči mechanismu SSC jsou mnohem náchylnější slitiny, než čisté kovy. Tento mechanismus porušení často spojuje konkrétní slitiny s konkrétním korozním prostředím, např. horké vodné roztoky chloridů mohou způsobit praskání korozivzdorné austenitické oceli, ale nemusí mít stejný efekt na feritickou ocel, nebo slitiny neželezných kovů. [4]

Průběh praskliny je z pravidla kolmý na tahovou složku napětí. Korozní praskání pod napětím může probíhat jak interkrystalicky tak transkrystalicky (Obr. 7, 8). Transkrystalické porušení se nejčastěji šíří určitými krystalovými rovinami např. {100}, {110}. Častěji vyskytující se interkrystalické porušení kopíruje hranice zrn. S ohledem na podmínky se mohou vyskytovat oba průběhy v jednom materiálu, a to dokonce i v rámci jedné součásti. Interkrystalický průběh poškození většinou vyžaduje určitou nehomogenitu na hranicích zrn, například segregace síry a fosforu po hranici zrn u nízkolegovaných ocelí může výrazně zvýšit náchylnost oceli ke koroznímu praskání. Ačkoliv jsou trhliny zapříčiněné korozním praskáním pod napětím zpravidla iniciovány v korozních důlcích, nejsou tyto důlky nezbytně nutné. [2]



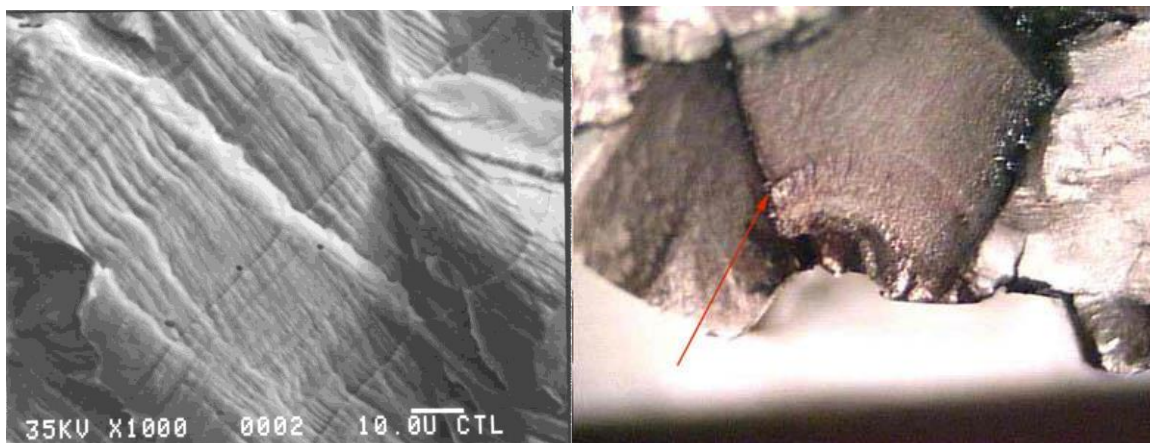
Obr.7: Makrosnímek SSC porušení materiálu 316Ti [21] Obr. 8: Mikrosnímek SSC interkrystalické trhliny [21]

Ochrana proti SSC vyžaduje odstranění tahového napětí, korozního prostředí, nebo použití nenáchylné slitiny. Možností jak odstranit povrchové tahové napětí je například deformací povrchu (kuličkování). Další možností je žihání pro odstranění vnitřního pnutí, což nemusí být vhodné pro austenitické korozivzdorné oceli, náchylné k mezikrystalové korozi. [2]

2.4.2 Korozní únavové praskání (CFC)

Tímto termínem popisujeme křehké porušení tuhého roztoku způsobené cyklickým namáháním za současného působení korozního prostředí. Toto porušení se v provozu šíří poměrně pomalu, typickým jevem je přítomnost korozních produktů v trhlině. Z makroskopického hlediska můžeme pozorovat postupové čáry, které jsou způsobeny změnami v parametrech zatěžování. Při mikroskopickém pozorování lomové plochy můžeme stejně jako při běžném únavovém porušení pozorovat striace (Obr. 9, 10), které ukazují na nerovnoměrný postup trhliny během cyklu. [2]

Dalším důležitým parametrem, který ovlivňuje porušení materiálu je frekvence cyklického zatěžování. Nižší frekvence vedou k delšímu postupu trhliny na cyklus. Klidně měnící se cyklus v delším časovém horizontu (např. jednou týdně), zapříčiní počátek korozního praskání pod napětím. Oproti tomu vysoké frekvence potlačují vliv korozního prostředí. Koncentrátory napětí jako jsou vruby nebo velká drsnost povrchu, zvyšují citlivost ke koroznímu únavovému praskání. Hluboké vruby mají na únavovou životnost větší vliv než samotná koroze. U materiálu s malou drsností povrchu však dochází k zdrsnění působením korozního prostředí. Působením elektrochemické koroze dochází k vytvoření korozních důlků, které jsou opět koncentrátory napětí a stávají se iniciačním místem únavové trhliny. [2]



Obr. 9: Mikrosnímek SEM lomové plochy [22] Obr. 10: Makrosnímek lomové plochy [22]

Korozní únavové praskání je velmi podobné koroznímu praskání pod napětím v tom smyslu, že oba mechanismy způsobují křehké porušení slitin, které jsou mimo působení korozního prostředí houževnaté. I když je zatížení cyklické, musí mít alespoň jednu tahovou složku, stejně jako při korozním praskání pod napětím. Oba mechanismy porušení způsobují vznik trhliny v rovině kolmé na směr působení tahové složky. [4]

Pro ochranu před korozním únavovým praskáním musíme omezit alespoň jeden ze zapříčiňujících faktorů. Omezení korozního úbytku můžeme provést buďto volbou odolnějšího materiálu, nebo jej povlakovat. Dalším řešením je katodická ochrana, pokud nehrozí nebezpečí vodíkové křehkosti. Samozřejmě k omezení CFC přispěje i odstranění cyklického namáhání úpravou konstrukce, nebo kuličkování povrchu pro snížení tahového napětí. [1]

2.4.3 Vodíková křehkost (HIC)

Tento jev je způsoben průnikem a difuzí atomárního vodíku do krystalové mřížky kovu. Po určitém čase může především na povrchu vměstků nebo uvnitř vnitřních vad opět rekombinovat zpět na molekulu H_2 , čímž zvětší svůj objem a vytvoří vnitřní napětí. Tím vznikne vnitřní porušení materiálu známé jako „fish eye“ defekt. Vodík se do materiálu dostane například nedostatečnou ochranou během svařování, nebo disociací na povrchu a následnou difuzí. [1]

3. Metody protikorozní ochrany HSS

Základ protikorozní ochrany svarového spoje spočívá v omezení vlivu jednotlivých faktorů, zapříčiňujících korozní porušení. Abychom mohli tyto faktory účinně kontrolovat, je velmi důležité přesně určit mechanismus porušení a navrhnout vhodnou metodu, která omezí vlivy zapříčiňující daný korozní mechanismus. [10]

3.1 Katodická ochrana

Jde o často používanou metodu protikorozi ochrany. V zásadě dokáže omezit nebo předejít korozi jakéhokoliv kovu nebo slitiny vystavené vodnému elektrolytu. Principem katodické ochrany je snižování rychlosti koroze katodickou polarizací korodujícího povrchu. Může být provedena dvěma základními metodami. Buďto pomocí externího zdroje stejnosměrné elektrické energie, jehož katodu připojíme na chráněnou součást a anodu na jiný vodivý materiál s nízkou rozpustností. [1]

Druhou možností je vodivé spojení chráněné součásti s takzvanou obětovanou anodou s nižším elektrodovým potenciálem. Pokud vodivě spojíme dva kovy o různém elektrodovém potenciálu a ponoříme je do vodivého elektrolytu, začne mezi nimi procházet proud. Méně ušlechtilý kov se stane anodou, začne se v elektrolytu rozpouštět, čímž katodicky chrání kov ušlechtilejší. Katodická ochrana vytváří skvělé podmínky pro povlakové systémy. Za normálních podmínek se nedokonalosti povlaku stávají akcelerátory koroze, ale pokud povlak chrání základní materiál zároveň katodicky, dochází k výraznému zvýšení korozní odolnosti systému i s nedokonalostmi povlaku. To značně snižuje požadavky na vytvoření povlaku. [1]

3.2 Pasivanty a inhibitory

Inhibitor je chemická látka, která když se přidá v malé koncentraci do korozního prostředí, značně sníží rychlost korozního napadení. Inhibitory můžeme podle reakce rozdělit na anodické inhibitory, katodické inhibitory a adsorpční inhibitory. Anodické inhibitory (pasivanty) zpomalují anodickou reakci, čímž do značné míry snižují korozní potenciál kovu. Nejčastěji se jedná o anorganické látky, jako jsou chromany, fosforečnany a další. Katodické inhibitory oproti tomu vytvářejí na povrchu vrstvy, které brání katodické reakci (depolarizaci). Tímto způsobem fungují například zinečnaté ionty, které spolu s produkty koroze vytváří vrstvu bránící vodíkové depolarizaci.

Adsorpční inhibitory jsou nejčastěji organické látky, které korozní potenciál kovu neovlivňují, nebo jen velmi málo. Mechanismem jejich funkce je adsorpce molekul inhibitoru na povrchu kovu, čímž jsou zpomalovány jak katodická, tak i anodická reakce. Tato adsorbovaná vrstva je navíc často hydrofobní, což výsledný inhibiční efekt v některých prostředích dále zvyšuje.

Do této kapitoly mohou být zařazeny i látky ovlivňující chemické složení pracovního média. Konkrétně v sekundárním okruhu VVER se dávkuje NH_3 ovlivňující pH pracovního média, které má vliv na korozní agresivitu prostředí. Další používaná látka je hydrazin, který se dávkuje ve zvýšené koncentraci před plánovanou odstávkou zařízení pro snížení rozpuštěného kyslíku v pracovním médiu, který poškozují pasivační vrstvu stabilního oxidu. [23]

3.3 Žárové nástřiky

Principem protikorozi ochrany povrchu nanesením povlaku je nejčastěji vytvoření nepropustné bariéry, která zabrání přístupu korozního prostředí k chráněnému materiálu. Zdaleka nejrozšířenějším zástupcem této metody jsou organické nátěry, které se používají jako ochrana ocelových konstrukcí proti atmosférické korozi.

Kovové povlaky oproti organickým a nekovovým anorganickým povlakům plní dvě funkce. První, stejně jako ostatní, vytvářejí bariéru vůči koroznímu prostředí. Druhou funkcí kovového povlaku je elektrochemická ochrana. Nejčastěji se povlakový kov volí méně ušlechtilý než základní kov, čímž vytváří katodickou ochranu. [1]

Žárové nástřiky mají velký význam prakticky ve všech odvětvích průmyslu. Aplikací nástřiku můžeme šetřit jakostní legované materiály jejich náhradou za levnější, opatřené nástřikem. Touto technologií se daří nahrazovat často neproduktivní konvenční povrchové úpravy, jako například cementaci a nitridaci, nebo povrchové úpravy s technologickými či ekologickými problémy (tvrdé chromování). Žárové nástřiky mohou plnit celou řadu požadavků, jako např. zvýšení odolnosti proti opotřebení, zlepšení ořezavzdornosti, zvýšení korozivzdornosti a mnoho dalších. [3]

3.3.2 Materiály pro žárové nástřiky

Materiály pro žárové nástřiky jsou v závislosti na metodě jejich nanášení ve formě prášků, tyčí nebo drátů. Dráty jsou vyráběny z kovů nebo slitin a jsou z pravidla používány pro nástřik plamenem (FS) nebo nástřik obloukem (AS). Rozdělení materiálů pro dráty:

- Čisté kovy jako např. hliník, zinek
- Slitiny např. Ni + Al, Ni + Cr + Al
- Kompozity, nejčastěji karbidické jádro s kovovým pláštěm

Dráty jsou nejčastěji používány o průměrech od 2,4mm do 5mm. Jejich výhodou je v porovnání s prášky levná a nenáročná výroba, lamely v nástřiku vykazují větší homogenitu, avšak metody používající drát např. nástřik obloukem, vnášejí do vrstvy větší množství vad, což tuto výhodu stírá. V současnosti pro vytváření nástřiků značně převládají prášky. [3]

Žárový nástřik může být charakterizován celou řadou parametrů závisících na jejich aplikaci, jako je např. odolnost proti opotřebení, žáruvzdornost a elektrická rezistivita. Tyto parametry silně závisí na použitém materiálu a technologii jeho nanášení. Proces nanášení může ovlivňovat vlastnosti nanášeného materiálu jeho oxidací, redukcí, kinetikou ochlazování a dalšími jevy. Vlastnosti prášku do značné míry ovlivňují kvalitu výsledného povlaku. Tyto vlastnosti se dají rozdělit na fyzikální a chemické. [3]

Fyzikální vlastnosti prášku:

- granulometrie
- vnitřní a vnější morfologie
- hustota a sypkost
- tepelné vlastnosti

Chemické vlastnosti prášku:

- chemické složení
- fázové složení
- rozložení prvků
- chemická vazba

Pro žárové nástřiky se používají tyto druhy prášků: kovy, slitiny, oxidická keramika, karbidy a kompozitní materiály. Metody průmyslové výroby prášků závisí hlavně na typu použitého materiálu.

3.3.2 Předúpravy

Volba předúpravy povrchu má také vliv na výslednou kvalitu nástřiku. Náročnost se liší, pokud bude nástřik vytvářen na nové součásti, nebo na součásti již vystavené podmínkám provozu. Pokud jde o vytvoření nástřiku na použitých součástech, často se musíme potýkat s odstraněním starého žárového nástřiku. S ohledem na materiál starého nástřiku se používají metody např. otryskání, broušení či vodní paprsek s abrazivem. Dalším krokem je úprava tvaru. Problémem při nanášení nástřiku jsou ostré přechody či hrany, které se musejí upravit na přípustnou mez. Při použití určitých kombinací materiálu prášku, metody nanášení a substrátu je před nanesením nástřiku nutná aktivace povrchu pro dosažení požadované jakosti vrstvy. Pro aktivaci povrchu se používají následující metody: [3]

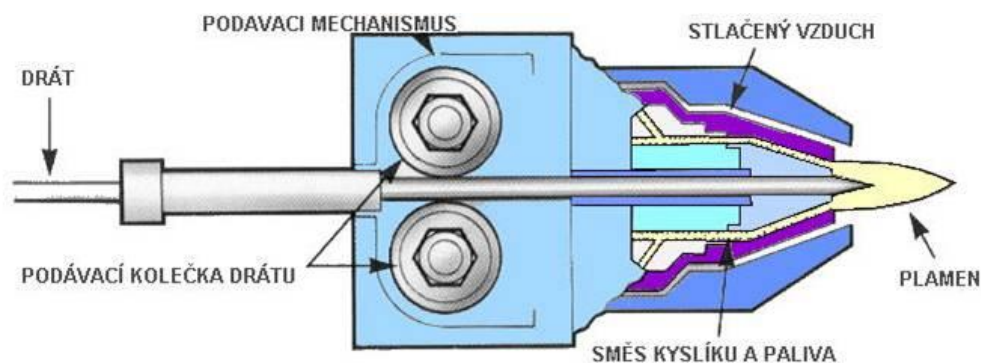
- abrazivní tryskání
- ošetření vodním paprskem
- laserová ablace
- chemické leptání

3.3.3 Metody nanášení žárového nástřiku

Pro žárový nástřik používáme následující definici: Žárový nástřik je proces, při kterém jsou roztavené, částečně natavené nebo pevné částice ukládány na povrch substrátu. V závislosti na zdroji energie pro natavení a způsobu dopravy částic na povrch substrátu rozlišujeme různé metody. Jednotlivé metody se liší v parametrech, jako je teplota natavení částic, kinetická energie částic dopadajících na substrát a složení atmosféry, což ovlivňuje oxidaci částic. [3]

Nástřik plamenem (FS)

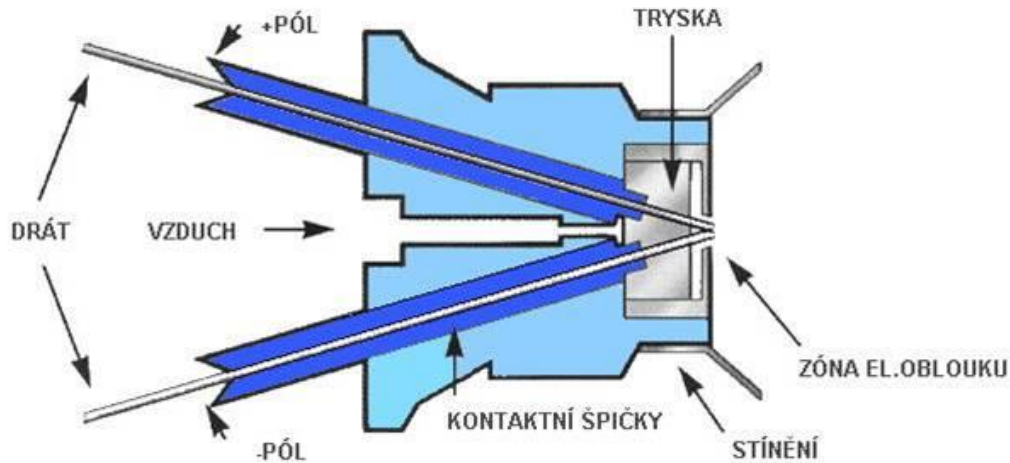
Historicky jde o nejstarší metodu vytvoření žárového nástřiku. Původně byla tato metoda vyvinuta pro nízko tavitelné kovy jako cín a olovo, později se začaly používat i kovy s vyšší teplotou tavení a keramika. Při nástřiku plamenem je chemická energie plynu spalováním přeměněna na horké plyny, které jsou použity k natavení materiálu a dopravě jeho částic na substrát (Obr. 11). Materiálem pro tuto metodu může být kompaktní drát nebo prášek. Jde o poměrně nenáročnou metodu, ale díky nízké kinetické energii částic vytvoříme méně kvalitní nástřik pro méně náročné aplikace. [3,9]



Obr. 11: Schéma zařízení pro nástřik plamenem [20]

Nástřik elektrickým obloukem (AS)

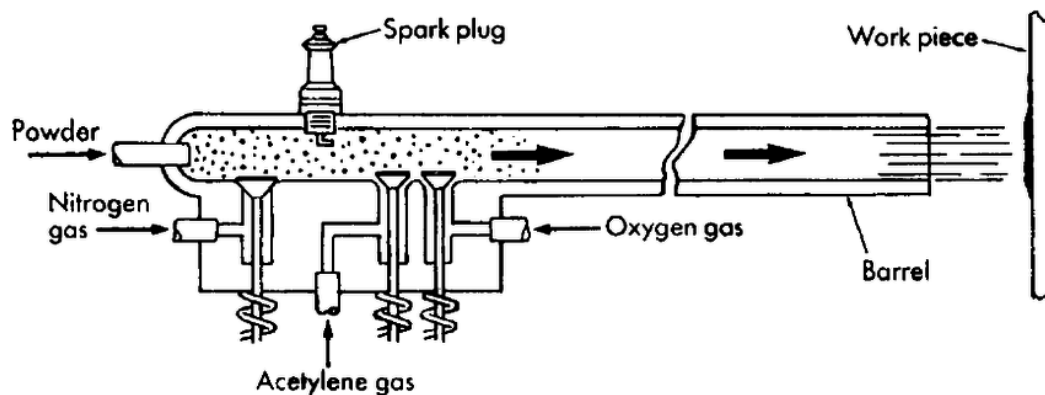
Jako zdroj tepelné energie pro tavení materiálu je použit elektrický oblouk. Pro dopravu částic na povrch substrátu je použit tlak plynu (Obr. 12). Díky faktu, že pro vytvoření nástřiku se používají dva dráty, které jsou zároveň elektrodami, můžeme vytvářet tzv. „pseudoslitinu“ a tím významně ovlivnit výsledné vlastnosti nástřiku. Pro tuto metodu můžeme použít pouze elektricky vodivé materiály, nejčastěji ve formě drátu. [3]



Obr. 12: Schéma zařízení pro nástřik obloukem [20]

Detonační nástřik (D-GUN)

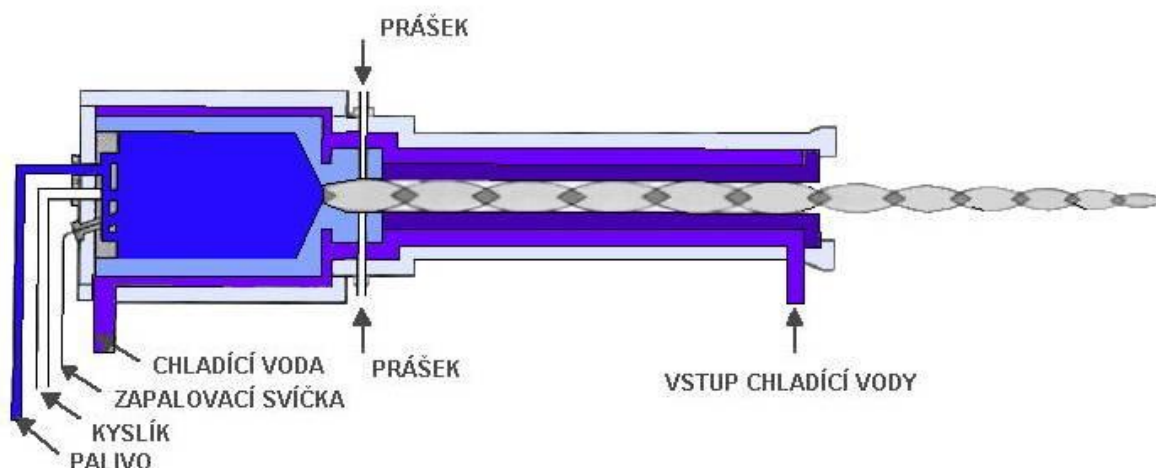
Tato metoda byla vyvinuta v 50. letech společností Union Carbide za účelem nanášení těžko tavitelných žáruvzdorných materiálů s cílem zvýšit kinetickou energii částic a využít plastické deformace v kombinaci s částečným natavením. Elektrickým impulzem je iniciována výbušná směs plynu, kyslíku a nanášeného prášku, což vede k jeho natavení a vržení proti povrchu substrátu (Obr. 13). [3]



Obr. 13: Schéma zařízení pro detonační nástřik [3]

Vysokorychlostní nástřik plamenem (HVOF)

V podstatě jde o zdokonalení předchozí metody detonačního nástřiku s rozdílným spalováním paliva. U předchozí metody proces probíhal diskontinuálně, díky čemuž metoda není moc produktivní. Oproti tomu HVOF spaluje palivo kontinuálně, čímž si zachovává kvalitu výsledného nástřiku a vysokou produktivitu technologie. Díky tomu se tato metoda stala standardem pro nástřik těžko tavitelných karbidů v různých oblastech průmyslu a nahradila například tvrdé chromování. [3.9]



Obr. 14: Schéma metody HVOF [20]

Směs paliva a kyslíku je spalována ve spalovací komoře. Horké spalné plyny jsou urychlovány průchodem konvergentně – divergentní tryskou, kam je také přiveden prášek nástřikového kovu. Spalovací komora a tryska musejí být chlazeny vodou z důvodu velkého vývinu tepla (Obr. 14). Parametry ovlivňující proud plynů jsou: tlak ve spalovací komoře, profil trysky a stechiometrie směsi paliva a kyslíku. [3]

Další metody

Mimo výše vyjmenované je v technické praxi využívána široká škála dalších metod, ale s ohledem na návrh experimentu nebyly blíže popsány. Za vyzdvižení stojí například atmosférický plazmový nástřik (APS), vakuový nástřik plazmou (VPS) a metoda nástřiku studeným plynem (CGSM).

3.3.4 Žárové nástřiky jako korozní ochrana ve vodném prostředí

Jako ochrana materiálu vůči korozi ve vodném prostředí se používají dva duhy kompozitních povlaků. Prvním z nich je částicový kompozit, který je složen z tvrdých částic karbidů nebo oxidů, které chrání vrstvu proti otěru a z kovové matrice, která zajišťuje korozní ochranu. Druhým druhem kompozitního nástřiku je vícevrstvý nástřik složený ze dvou a více vrstev, které plní definované funkce. Keramické nástřiky se testují nejčastěji pro biomedicínské aplikace, díky jejich biokompatibilitě. [1]

Kovy

Mezi kovy, které jsou testovány jako korozní ochrana, nejčastěji vidíme titan, hliník, tantal a niob. Pokud srovnáme korozní odolnost kompaktní vrstvy s vrstvou vytvořenou nástřikem, bude korozní odolnost stříkané vrstvy nižší, občas ani nedojde k vytvoření pasivační vrstvy. Toto chování je způsobeno tzv. „otevřenou porositou,“ která umožňuje proniknutí elektrolytu k substrátu. Pro zhutnění, nebo omezení vlivu otevřené porosity můžeme použít vyplnění pórů epoxidovou pryskyřicí nebo úpravu povrchu vrstvy laserem či elektronovým paprskem. [3]

Slitiny

Největší uplatnění jako korozní ochrana mají legované oceli a slitiny niklu. Nejčastěji využívanou metodou pro vytvoření takového nástřiku je metoda HVOF. Stejná slitina nanášená touto metodou má výhodnější korozní potenciál než nástřik vytvořený plasmou. Nízká porosita těchto povlaků je jejich největší výhodou a značně zlepšuje jejich korozní vlastnosti. I tyto povlaky mohou být po nanesení dokončeny laserem pro snížení porosity. [3]

3.3 Laserové přetavení povrchu (LSR)

Laserové technologie nacházejí v současnosti uplatnění v mnoha oblastech průmyslu, stejně tak i v technologiích zpracování materiálů. Jednotlivé technologie se rozdělují nejčastěji podle hustoty výkonu. Pro technologie vyžadující odpaření materiálu je nutný vznik plazmy za vysoké teploty, čehož využíváme například při gravírování, oproti tomu při povrchovém kalení stačí ohřev na kalící teplotu, ve většině případů pod 1000°C. To klade různé nároky na výkon a fokusaci svazku.

Laser je zdrojem fokusovaného vysoce energetického záření, které využíváme k natavení či ohřevu povrchu. Díky vysoké hustotě energie docílíme natavení i při malém množství vneseného tepla. Rychlost ohřevu u laserů používaných v současnosti se pohybuje okolo 1000°C/s. Díky tomu, že je natavena pouze povrchová vrstva, je teplo odvedeno velkou rychlostí do základního materiálu a laserem natavená vrstva rychle tuhne. Tímto jevem je tepelně ovlivněná oblast materiálu velmi malá, při správném nastavení parametrů procesu úplně chybí. Mimo tepelného zpracování jako je povrchové kalení a přetavování povrchu můžeme také použít přídavného materiálu nejčastěji ve formě prášku. Tím rozsah možných technologií rozšíříme podle materiálu o povrchové legování, cementaci nebo povrchové navařování vrstev, jak je znázorněno pomocí schématu 1. Pomocí laseru můžeme také upravovat povlaky vytvořené pomocí jiné technologie, jako například žárový nástřik. [14]

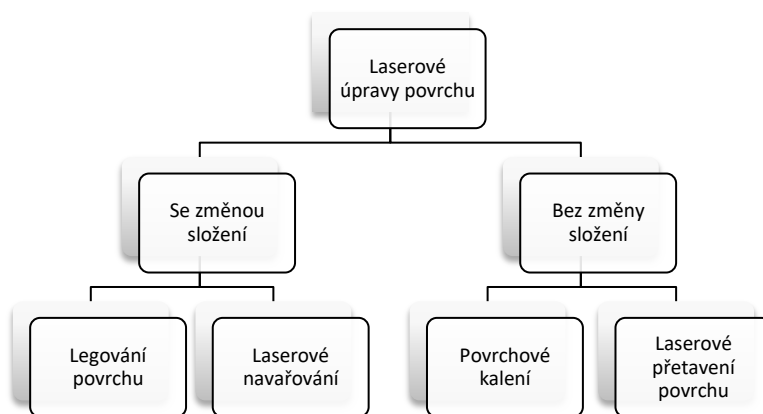
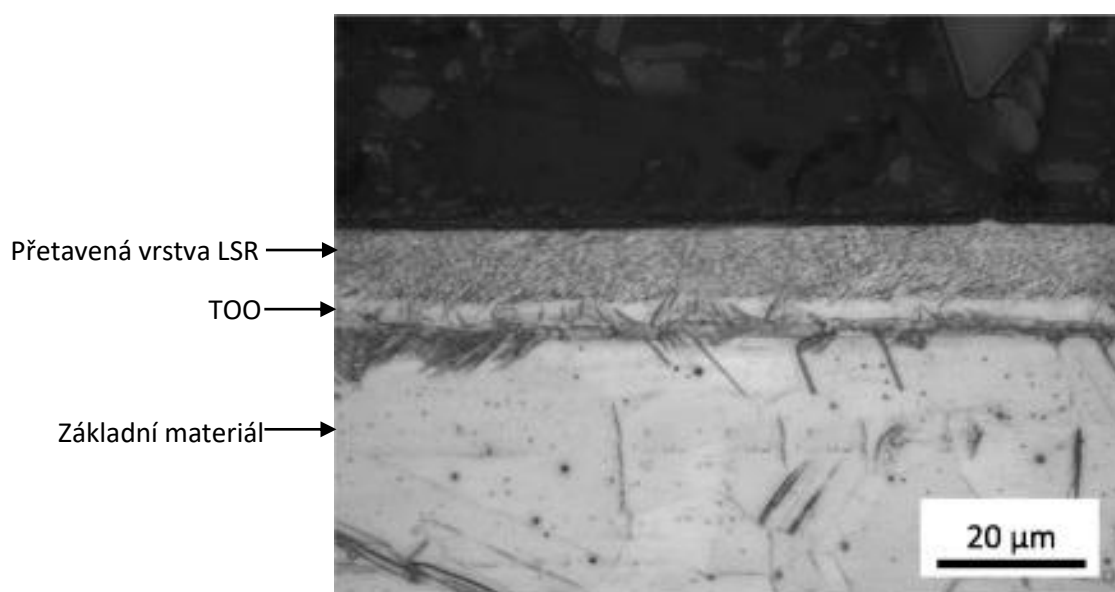


Schéma 1: Dělení laserových technologií [v.z.]

Většina studií, zabývajících se laserovými technologiemi úpravy povrchu je zaměřena na změnu mikrostruktury vrstvy a výsledný vliv na mechanické vlastnosti povrchu. Studií, které by přímo určovaly tuto technologii jako metodu pro zvýšení korozní odolnosti materiálu není mnoho, přestože metoda laserového přetavení v tomto směru potenciál má. Bylo prokázáno, že u korozivzdorných austenitických, feritických i martenzitických ocelí vede aplikace laserového přetavení povrchu ke zvýšení odolnosti vůči důlkové korozi, záleží však na správném nastavení parametrů, aby bylo dosaženo přesné výsledné struktury. Nedodržení těchto parametrů může vést především u feritických a martenzitických ocelí naopak ke zhoršení korozních vlastností. Důvodem zlepšení odolnosti vůči důlkové korozi u austenitických ocelí je vznik velmi jemné dendritické struktury bez větších precipitátů a redistribuce sulfidů (Obr. 15). [13,14]



Obr. 15: Morfologie laserem přetavené vrstvy (ŘEM) [14]

4 Metodika zkoušení korozní odolnosti

Monitorování je klíčovým prvkem každého systému protikorozní ochrany. Žádný systém protikorozní ochrany není zcela spolehlivý a v některých případech může mít jeho selhání velmi závažné dopady jak na zdraví, tak na životní prostředí. Správně provedené zkoušky mohou ušetřit značné náklady. Existuje široká škála kontrolních metod. Metody pro testování korozní odolnosti můžeme rozdělit následovně:

- Expoziční zkoušky
- Elektrochemické zkoušky
- Nedestruktivní testování

Další možné rozdělení korozních testů je z pohledu, v jakém prostředí je test prováděn. Materiál či součást můžeme exponovat v prostředí, ve kterém bude aplikován, při čemž sledujeme jeho interakci s prostředím. Nevýhodou tohoto provozního testování je zpravidla dlouhá doba expozice. Oproti tomu při laboratorním testování můžeme korozní prostředí upravit, díky tomu můžeme dobu expozice zkrátit, případně můžeme nasimulovat různé typy prostředí. [1]

4.1 Expoziční metody

Přímé testování vzorků (expoziční zkoušky) jsou poměrně levným a jednoduchým způsobem, jak zhodnotit korozní odolnost materiálu založené na expozici vzorku v korozním prostředí a jejich následném vyhodnocení měření hmotnostního úbytku apod. Tato metoda není náhradou za laboratorní zkoušky, ale může sloužit pro odhad agresivity korozního prostředí, nebo kupříkladu pro návrh a zkoušení alternativního materiálu. [2]

Přímé expoziční zkoušky mají několik výhod. První z nich je, že můžeme vystavit působení korozního prostředí velký počet různých vzorků najednou, čímž můžeme hodnotit rozptyl měření. Jednotlivé vzorky mohou být navrženy pro testování konkrétního mechanismu porušení, jako například šterbinová koroze, nebo SCC. Použitím vzorků můžeme také sledovat účinnost inhibičních procesů, využívaných např. v úpravnách vod. Vzorky můžeme vyjmout a vyhodnotit bez odstávky zařízení. Další výhodou je, že můžeme sledovat i degradační mechanismy, k jejichž iniciaci je třeba dlouhý expoziční čas, např. důlková a šterbinová koroze, SSC apod.

Oproti tomu využití přímých expozičních zkoušek má i některé nevýhody. Jednou z nich je nemožnost vyhodnocovat rychlé změny v korozním prostředí. Dále není zaručeno, že se projeví lokalizovaná koroze před vyjmutím vzorků, i když jsou všechny podmínky pro její vznik splněny. Zároveň také použití malých vzorků nemusí odpovídat koroznímu napadení skutečné součásti. Další nevýhodou může být kontaminace prostředí korozními produkty vzorků, zvláště v potravinářském průmyslu, nebo medicínských aplikacích.

Zvláště důležitý je pak správný návrh vzorků pro expoziční zkoušky. Korozní napadení ovlivňují především faktory, jako je drsnost povrchu, tvar vzorku a vnitřní metalurgické procesy. Vzhledem k faktu, že svarové spoje jsou potenciálně kritickým místem konstrukce, je testování jejich korozní odolnosti velmi žádoucí. Vyjma zbytkového napětí je největší pozornost věnována teplotně ovlivněné oblasti. U některých slitin se teplotně ovlivněná oblast stává náchylnou k mezikrystalové korozi, u jiných se tato oblast může stát anodou vůči základnímu materiálu. Pokud je to možné, upřednostňujeme odběr vzorků ze svarů skutečné velikosti před svařením malých vzorků. Svarový kov a teplotně ovlivněná oblast jsou silně závislá na počtu housenek, tloušťce materiálu, svařovací poloze, použité metodě a dalších parametrech. [2]

Druhou možností jsou laboratorní expoziční zkoušky. Výhodou tohoto zkoušení je, že korozní prostředí můžeme libovolně upravovat na základě požadavků zkoušení. Díky tomu jsme schopni expoziční dobu výrazně zkrátit nebo simulovat působení různých korozních prostředí střídajících se v cyklech. Nevýhodou může být obtížná interpretace výsledků při použití zrychlené zkoušky. Nejrozšířenější zrychlenou laboratorní metodou zkoušení je zkouška korozní odolnosti v solné mlze, při které jsou vzorky vystaveny působení mlhy, vytvořené z 5% roztoku chloridu sodného. Postupů této zkoušky existuje více, nejčastěji v závislosti na zemi původu. Tyto zkoušky jsou normovány podle: ASTM B 117, JIS Z 2371, MIL-STD-810, nejčastější je však postup podle požadavků normy EN ISO 9227, použitý i pro tuto práci. [25]

K vyhodnocení výsledků zkoušky dle ČSN EN ISO 9227 lze využít následujících kritérií [25]:

- Vzhled po zkoušce
- Vzhled po odstranění povrchových korozních zplodin
- Počet a rozložení korozních defektů
- Dobu, která uplynula do objevení prvních známek koroze
- Změnu hmotnosti
- Změny zjištěné mikroskopicky
- Změnu mechanických vlastností

4.2 Elektrochemické metody

V praxi se pro určení náchylnosti materiálu k určitému mechanismu porušení používá široká škála elektrochemických metod. Výhodou těchto metod je absence nutnosti dlouhé expozice v korozním prostředí. Zde se zaměříme pouze na ty, které jsou vhodné pro testování svarů.

4.2.1 Měření lineárního polarizačního odporu

Tato metoda slouží k odhadu rychlosti koroze na základě Stern-Geary rovnice. Myšlenkou této metody je, že korozní rychlost kovu je nepřímo úměrná polarizačnímu odporu. Grafickým vyjádřením závislosti mezi potenciálem elektrody a rychlostí reakce je tzv. polarizační křivka. Z anodické, resp. katodické větve křivky určujeme Tafelovy směrnice, které závisí na teplotě a koncentraci elektrolytu. Externím zdrojem elektrické energie postupně polarizujeme zkoumaný vzorek o 10mV na obou stranách korozního potenciálu. Sklon mezi indukovaným potenciálem a celkovým proudem je interpretován jako polarizační odpor. Nevýhodou této metody je nutnost dostatečně vodivého elektrolytu. Tato metoda není vhodná pro zjišťování lokalizované koroze nebo SSC. [1]

4.2.2 Elektrochemická impedanční spektroskopie

Tato metoda je založená na sledování proudové odezvy pracovní elektrody, na kterou je přiveden sinusový signál o malé amplitudě. Pro měření se používá velký rozsah frekvencí, čímž obsáhneme nejen rychlé, ale i pomalé děje. Tato metoda je vhodná i pro elektrolyty s nízkou vodivostí. Tato metoda se používá pro měření rovnoměrného korozního napadení. [1]

4.2.3 Elektrochemický šum

Při této metodě měříme fluktuaci signálu elektrochemického potenciálu a korozního proudu, indukovaného korodujícím kovem. Korozní proud reflektuje kinetiku probíhajících korozních reakcí. Každý z korozních principů je doprovázen specifickým elektrochemickým šumem. Pro měření se používá sonda složená ze tří elektrod. Tato metoda je vhodná pro sledování koroze za provozu zařízení a zvláštních korozních principů. [1]

4.2.4 Korozní potenciál

Měření korozního potenciálu je jednoduchou metodou, která je základní metodou používanou pro monitorování koroze ocelových výztuží v betonu nebo podzemních produktovodů pod katodickou ochranou. Tato metoda má význam i pro kovy, které vykazují aktivní i pasivní korozní chování. Například korozivzdorné austenitické oceli mají dobrou korozní odolnost, pokud jsou pasivované. Pokud přijdou do styku s některými chloridy, přejdou do aktivního stavu a urychlí se u nich korozní napadení. Měření korozního potenciálu může indikovat přechod materiálu z pasivovaného do aktivního stavu. [1]

Experimentální část

5 Návrh experimentu

Pro práci byl navržen experimentální program s cílem ověřit vliv zvolených povrchových úprav na korozní odolnost kořenové oblasti heterogenních svarových spojů, které jsou ve styku s pracovním médiem sekundárního okruhu. Dalším sledovaným hlediskem byl vliv přídavného materiálu a počet svarových vrstev na výslednou odolnost. Pro tento účel bylo vyrobeno dvanáct vzorků heterogenních svarových spojů. Při výrobě šesti z nich byl použit přídavný materiál Sv-07Ch25N13, na zbylé vzorky byl použit přídavný materiál, dle ruské normy GOST Sv-10CH16N25AM6. Vzorky byly označeny SV-07/1 až SV-07/6 (6 vzorků) a SV-10/1 až SV-10/6 (6 vzorků). K jednotlivým vzorkům byla přiřazena povrchová úprava (Tabulka 1) a byl navržen plán testování.

Vzorek	PM	Rozměry	Povrchová úprava
SV-07/1	Sv-07CH25N13	89x5,5x300	bez PÚ
SV-07/2	Sv-07CH25N13	89x5,5x300	AS 316L
SV-07/3	Sv-07CH25N13	89x5,5x300	Laser
SV-07/4	Sv-07CH25N13	89x5,5x300	Amin
SV-07/5	Sv-07CH25N13	89x5,5x300	HVOF 316L
SV-07/6	Sv-07CH25N13	89x5,5x300	Laser
SV-010/1	Sv-10CH16N25AM6	89x5,5x300	bez PÚ
SV-010/2	Sv-10CH16N25AM6	89x5,5x300	AS 316L
SV-010/3	Sv-10CH16N25AM6	89x5,5x300	Laser
SV-010/4	Sv-10CH16N25AM6	89x5,5x300	Amin
SV-010/5	Sv-10CH16N25AM6	89x5,5x300	HVOF 316L
SV-010/6	Sv-10CH16N25AM6	89x5,5x300	Laser

Tabulka 1: Značení vzorků experimentálního programu

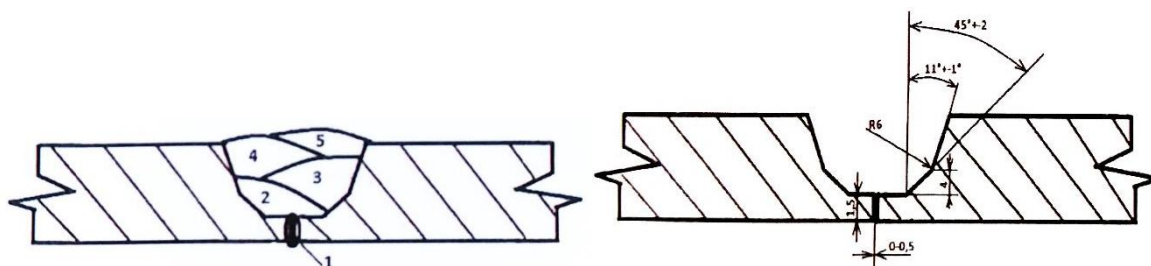
5.1 Výroba vzorků

Pro experimentální část této práce bylo dodáno dvanáct vzorků heterogenních svarových spojů (Obr. 20), které se lišily použitým přídavným materiálem a postupem svařování. Svařence byly vyrobeny ze dvou polotovarů bezešvých trubek o rozměrech $\varnothing=89\text{mm}$, $t=5,5\text{mm}$, každý o délce 150mm. Spojeny byly pomocí tupého obvodového svaru (BW). Svařovací parametry jednotlivých vzorků jsou uvedeny v následujících tabulkách: Tab. 2, 3, 4, 5 dále je na obrázcích 11, 12, 13, 14 znázorněna geometrie svarových ploch a postup svařování dle ČSN EN ISO 4063.

5.2 Postup svařování

Pro vzorky SV-07/1 až SV-07/3 byl použit následující postup svařování:

Metoda svařování:	141	Ø přídavného materiálu:	2mm, 2,5mm
Typ spoje:	BW	Ochranný plyn:	ČSN EN ISO 14175
Tloušťka materiálu:	5,5mm		Ar 99,996
Vnější průměr:	89mm	Průtočné množství plynu:	12÷14 [l/min]
Poloha svařování:	PH	Ochrana kořene:	8÷10 [l/min]
Přídavný materiál:	Sv07Ch25N13	Teplota Interpass:	100°C



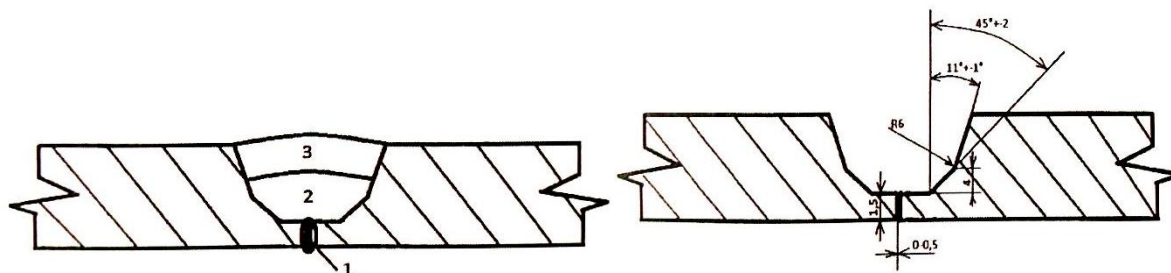
Obr. 16: Geometrie svarových ploch a postup svařování

Svarová vrstva	Metoda svařování	Ø přídavného materiálu	Proud (A)	Napětí (V)	Druh proudu	Rychlost svařování (sec)	Tepelný příkon [kJ/mm]
1	141	2	80÷95	10÷11	DC	0,4÷0,5	0,96÷1,75
2	141	2,5	95÷105	11÷12	DC	0,7÷0,8	0,68÷1,23
3	141	2,5	95÷105	11÷12	DC	0,8÷1,1	0,51÷0,92
4	141	2,5	95÷105	11÷12	DC	0,8÷1,1	0,51÷0,92
5	141	2,5	95÷105	11÷12	DC	0,8÷1,1	0,51÷0,92

Tab.2: Svařovací parametry (SV-07/1 až SV-07/3)

Pro vzorky SV-07/4 až SV-07/6 byl použit následující postup svařování:

Metoda svařování:	141	Ø přídavného materiálu:	2mm, 2,5mm
Typ spoje:	Tupý svar	Ochranný plyn:	ČSN EN ISO 14175
Tloušťka materiálu:	5,5mm		Ar 99,996
Vnější průměr:	89mm	Průtočné množství plynu:	12÷14 [l/min]
Poloha svařování:	PH	Ochrana kořene:	8÷10 [l/min]
Přídavný materiál:	Sv07Ch25N13	Teplota Interpass:	100°C



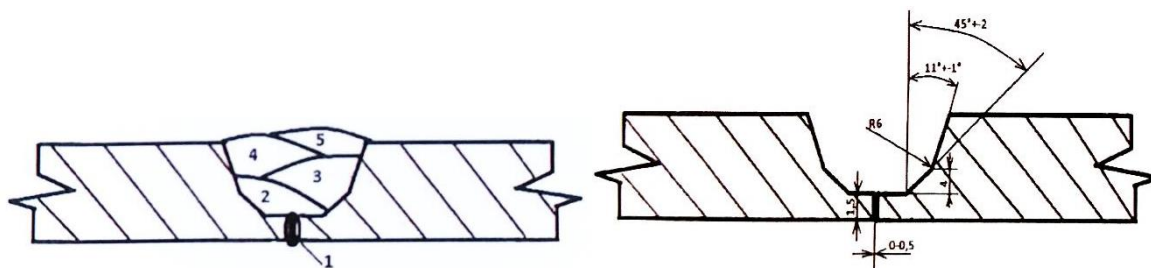
Obr. 17: Geometrie svarových ploch a postup svařování

Svarová vrstva	Metoda svařování	Ø přídavného materiálu	Proud (A)	Napětí (V)	Druh proudu	Rychlost svařování (sec)	Tepelný příkon [kJ/mm]
1	141	2	90÷100	10÷11	DC	0,4÷0,5	0,96÷1,75
2	141	2,5	110÷120	11÷12	DC	0,7÷0,8	0,68÷1,23
3	141	2,5	110÷120	11÷12	DC	0,8÷1,1	0,51÷0,92

Tab.3: Svařovací parametry (SV-07/4 až SV-07/6)

Pro vzorky SV10/1 až SV-10/3 byl použit následující postup svařování:

Metoda svařování:	141	Ø přídavného materiálu:	2,5mm
Typ spoje:	Tupý svar	Ochranný plyn:	ČSN EN ISO 14175
Tloušťka materiálu:	5,5mm		Ar 99,996
Vnější průměr:	89mm	Průtočné množství plynu:	13÷18 [l/min]
Poloha svařování:	PH	Ochrana kořene:	7÷10 [l/min]
Přídavný mat.:	Sv10Ch16N25AM6	Teplota Interpass:	100°C



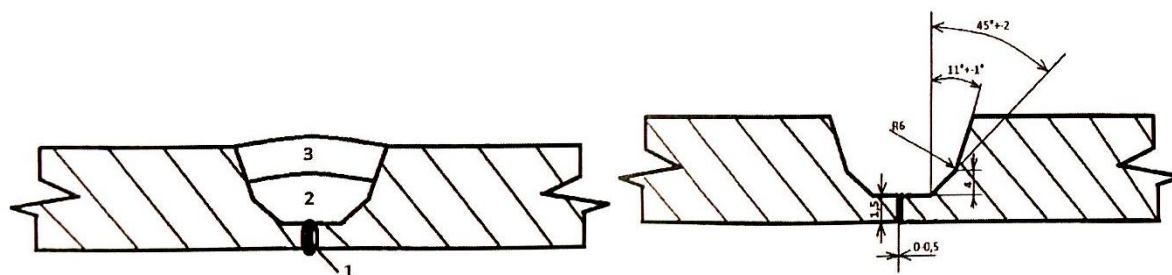
Obr. 18: Geometrie svarových ploch a postup svařování

Svarová vrstva	Metoda svařování	Ø přídavného materiálu	Proud (A)	Napětí (V)	Druh proudu	Rychlost svařování (sec)	Tepelný příkon [kJ/mm]
1	141	2,5	75÷80	10÷12	DC	0,6÷0,7	0,69÷1,08
2	141	2,5	85÷95	10÷13	DC	0,7÷0,8	0,95÷1,22
3	141	2,5	85÷95	10÷13	DC	0,6÷0,7	0,95÷1,22
4	141	2,5	85÷95	10÷13	DC	0,6÷0,7	0,95÷1,22
5	141	2,5	85÷95	10÷13	DC	0,6÷0,7	0,95÷1,22

Tab.4: Svařovací parametry (SV-10/1 až SV-10/3)

Pro vzorky SV10/4 až SV-10/6 byl použit následující postup svařování:

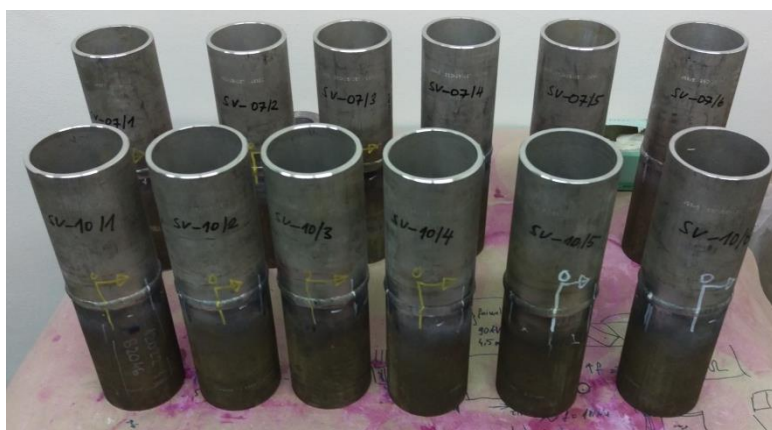
Metoda svařování:	141	Ø přídavného materiálu:	2,5mm
Typ spoje:	Tupý svar	Ochranný plyn:	ČSN EN ISO 14175
Tloušťka materiálu:	5,5mm		Ar 99,996
Vnější průměr:	89mm	Průtočné množství plynu:	13÷18 [l/min]
Poloha svařování:	PH	Ochrana kořene:	7÷10 [l/min]
Přídavný mat.:	Sv10Ch16N25AM6	Teplota Interpass:	100°C



Obr. 19: Geometrie svarových ploch a postup svařování

Svarová vrstva	Metoda svařování	Ø přídavného materiálu	Proud (A)	Napětí (V)	Druh proudu	Rychlost svařování (sec)	Tepelný příkon [kJ/mm]
1	141	2,5	90÷105	10÷12	DC	0,6÷0,7	0,69÷1,08
2	141	2,5	100÷115	10÷13	DC	0,7÷0,8	0,95÷1,22
3	141	2,5	100÷115	10÷13	DC	0,6÷0,7	0,95÷1,22

Tab.5: Svařovací parametry (SV-10/4 až SV-10/6)



Obr. 20: Vzorky heterogenních svarových spojů [v.z.]

5.3 Použité materiály

Chromiklová austenitická ocel 08Ch18N10T (dle GOST 5632-72)

Tato titanem stabilizovaná austenitická korozivzdorná ocel je používána k výrobě součástí parogenerátoru, potrubních systémů a dalších konstrukčních prvků jak I.O tak II.O. Musí splňovat požadavky na odolnost vůči mezikrystalové korozi dle GOST 6032. Další požadavek je na maximální obsah feritu v litém tavebním vzorku 0,5÷4% pro výrobu trubek. Požadavky normy na tavbové složení jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 6).

Značka oceli	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Ti	Co	N
	max. [%]						[%]÷[%]		max. [%]		
08Ch18N10T	0,08	1,5	0,8	0,035	0,02	0,3	10÷11,5	17÷19	0,6	0,05	0,05

Tab. 6: Chemické složení oceli 08Ch18N10T[]

Požadavky na minimální mechanické vlastnosti jsou definovány normou při 20°C a 350°C (Tab. 7).

	t=20°C	t=350°C
Mez kluzu $R_p 0,2$ nebo $R_e H$	216 Mpa	185÷355 Mpa
Pevnost v tahu R_m	550 Mpa	---
Tažnost A5	37%	---

Tab. 7: Požadované minimální mechanické vlastnosti oceli 08Ch18N10T

Konstrukční ušlechtilá ocel 12022.1 (dle ČSN 42 0002:1976)

Je běžným typem ušlechtilé uhlíkové oceli, žárovevná se zaručenou minimální hodnotou meze kluzu za vyšších teplot. Vhodná na součásti tepelných energetických zařízení, nejčastěji je používána jako nosná ocel pro takové nádoby parogenerátorů a kompenzátorů objemu. Chemické složení je uvedeno v následující tabulce (Tab. 8). Mechanické vlastnosti jsou uvedeny také (Tab. 9).

Značka oceli	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Ti	V	Mo
	[%]÷[%]			max. [%]			max. [%]	max. [%]	[%]÷[%]		
12022	0,15÷ 0,22	0,5÷ 0,8	0,17÷ 0,37	0,04	0,04	0,25	0,25	0,25	0,05	0,02÷ 0,05	0,1÷ 0,15

Tab. 8: Chemické složení oceli 12022.1

	t=20°C	t=350°C
Mez kluzu $R_p 0,2$ nebo $R_e H$	255 Mpa	186 Mpa
Pevnost v tahu R_m	440 Mpa	353 Mpa
Tažnost A5	20%	---
Zúžení Z	40%	40%
Vrubová hořevnatost K_{CV}	39 [J · cm ⁻²]	---
Kritická teplota křehkosti t_{K0}	Max. 20°C	

Tab. 9: Minimální požadované mech. vlastnosti oceli 12022.1

Přídavný materiál SV-07Ch25N13 (dle GOST 2246-70)

Tento materiál se používá pro výrobu svařovacích drátů. Jde o nestabilizovanou austenitickou ocel, jejíž chemické složení je uvedeno v tabulce (Tab. 10). Tento přídavný materiál je charakteristický vysokým obsahem chromu a dobrou korozní odolností. Mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tabulce (Tab. 11).

PM	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P
	Max.			[%]÷[%]		Max.	
SV-07Ch25N13	0,1	1	0,8÷ 2	22÷26,5	11,5÷14	0,02	0,03

Tab. 10: Chem. složení SV-07Ch25N13

	Svarový kov	
	t=20°C	t=350°C
Mez kluzu $R_p0,2$ nebo R_eH	441 Mpa	353 Mpa
Pevnost v tahu R_m	284 Mpa	176 Mpa
Tažnost A5	25%	---
Zúžení Z	35%	---
Vrubová hořevnatost K_{CU2}	49 [$J \cdot cm^{-2}$]	---

Tab. 11: Minimální požadované mech. vlastnosti SV-07Ch25N13

Přídavný materiál SV-10Ch16N25AM6

Nejzásadnější rozdíl oproti předchozímu přídavnému materiálu je v poměru obsahu chromu a niklu, patrné z tabulky (Tab. 12). Díky tomuto poměru je materiál SV-10Ch16N25AM6 ve styku s proudícím médiem II.O výrazně citlivější vůči koroznímu napadení a může se tak stát cestou pro šíření defektu. Mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tabulce dále (Tab. 13).

PM	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	P
	[%]÷[%]	Max.	[%]÷[%]				Max. [%]	
SV-10Ch16N25AM6	0,5÷0,12	0,70	0,8÷2	14,5÷17	23÷27	5÷7,5	0,02	0,03

Tab. 12: Chem. složení SV-10Ch16N25AM6

	Svarový kov	
	t=20°C	t=350°C
Mez kluzu $R_p0,2$ nebo R_eH	294 Mpa	196 Mpa
Pevnost v tahu R_m	539 Mpa	392 Mpa
Tažnost A5	23%	---
Zúžení Z	30%	---
Vrubová hořevnatost K_{CU2}	98 [$J \cdot cm^{-2}$]	---

Tab. 13: Minimální požadované mech. vlastnosti SV-10Ch16N25AM6

6 Nedestruktivní zkoušení vzorků (NDT)

Nedestruktivní zkoušení bylo do experimentálního programu zařazeno především z důvodu odhalení vad, které by mohly ovlivnit výsledky následného zkoušení, případně zapříčinit vyřazení vzorku. K odhalení povrchových vad byla provedena přímá vizuální kontrola, doplněná o radioskopickou zkoušku k odhalení vad vnitřních. Zde je důležité podotknout, že kvalifikace vad neprobíhala dle platné legislativy pro použití na jaderných zařízeních TPE 10-40/1771/2014-JE a přípustnosti PK 1514/72/IIIA, ale pouze podle potřeb experimentu. To znamená, že indikace či vada, která by dle hodnocení přípustnosti pro JE byla nepřijatelná, může být pro provedení experimentu přípustná.

6.1 Vizuální kontrola (VT)

Přímá vizuální kontrola po svařování v rozsahu 100% byla provedena dle ČSN EN ISO 17637 na všech dodaných vzorcích. Stav povrchu vzorků byl strojně kartáčovaný. Zjevné povrchové vady byly pozorovány na vzorcích SV-07/4, SV-07/5, SV-07/6, SV-10/1, SV-10/2, SV-10/3, SV-10/6. Jednalo se o vady tvaru v kořenové části svaru. Kvalifikace vad dle ČSN EN 5817: vada 504 – nadměrné převýšení kořene, 5041 – krápník (nadměrné propadnutí kořene). Všechny pozorované vady byly z hlediska provedení experimentu přípustné.

6.2 Kapilární zkouška (PT)

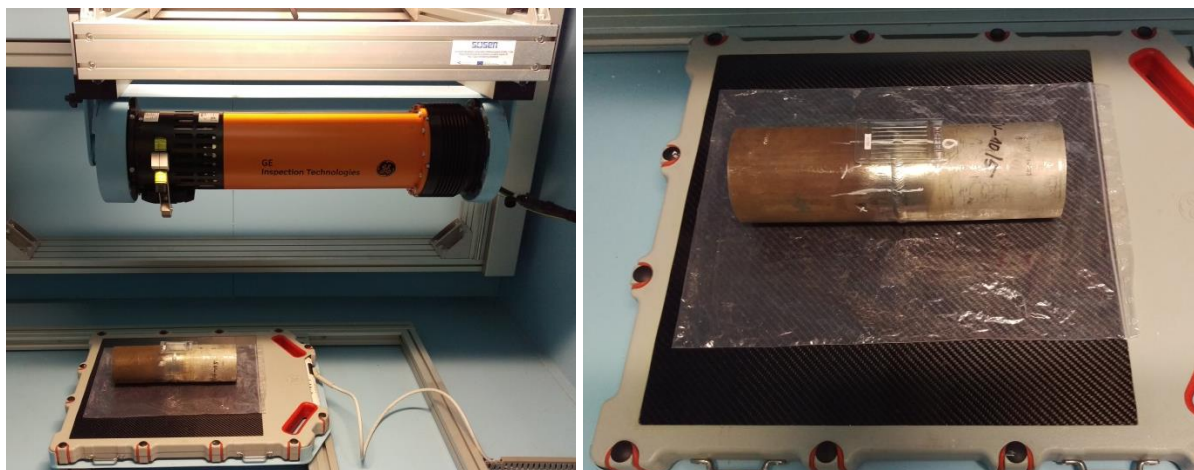
Touto zkouškou byla dle ČSN EN ISO 3452-1 ověřena přítomnost diskontinuit na zkoušeném povrchu, jako jsou trhliny, přeložky, rýhy, póry a studené spoje, které jsou otevřené na povrch zkoušeného materiálu. Pomocí této zkoušky nebyla objevena žádná indikace, z pohledu normy specifikující stupně přípustnosti pro indikace od vad otevřených na povrchu zjištěných kapilární metodou ve svarech kovových materiálů ČSN EN ISO 23277 byly všechny zkoušené vzorky vyhodnoceny jako vyhovující.

Penetrační systém:	ČSN EN ISO 3452-2	Zkušební prostředky:	Helling
Předčištění:	Reiniger U87	Penetrant:	Kontrastrot U88
Penetrační čas	20min	Čistič:	Reiniger U87
Odstranění penetrantu:	Reiniger U87	Vývojka:	Entwickler U89
Vyvíjecí čas:	20min	Intenzita osvětlení:	730 lx
Teplota povrchu:	25 °C	Rozsah kontroly:	100% + TOO

6.3 Radiografická kontrola (RT)

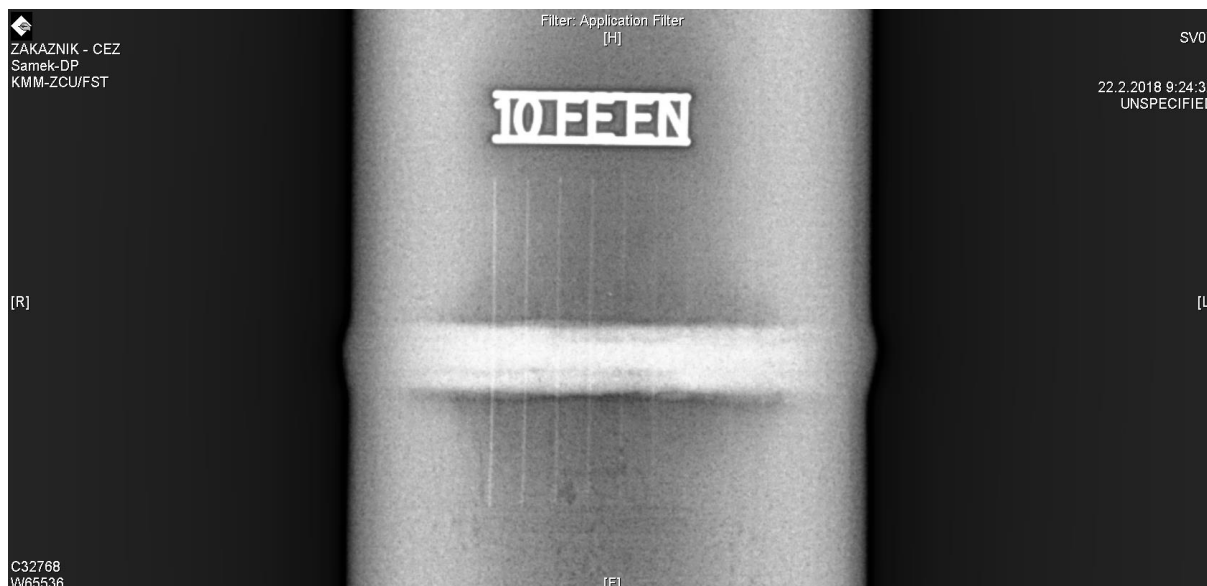
Testování touto metodou je popsáno v normách ČSN EN ISO 17636 – 1 a ČSN EN ISO 17636 – 2, tato norma specifikuje doporučené techniky snímkování, uspořádání zkoušky, volbu napětí na rentgence a zdroj záření, detektorové systémy a kovové folie, směr svazku záření, metody snížení rozptýleného záření, volbu vzdálenosti zdroj-objekt, techniku geometrického zvětšení, maximální oblast jediné expozice, způsoby zpracování zobrazení, zobrazovací podmínky monitoru a uchovávání digitálních radiogramů.

Vzorky byly prozařovány rentgenkou přes dvě stěny, každý vzorek třikrát tak, aby kontrola obsáhla celý obvod vzorku. Na vzorek vždy byly umístěny drátkové měrky W10 FE EN dle EN462-1 pro určení minimální velikosti detekovatelné vady (Obr. 21, 22). S ohledem na prozařovaný materiál a jeho tloušťku, byly zvoleny následující parametry rentgenky: napětí 150kV, proud 3,7mA.



Obr. 21, 22: Radiografická kontrola vzorků [v.z.]

Radiografickou zkouškou byly potvrzeny vady tvaru zjištěné vizuální zkouškou. Další povrchové ani vnitřní vady svarových spojů objeveny nebyly. Příklad rentgenogramu je na obrázku níže (Obr. 23).



Obr. 23: Ukázka rentgenogramu svarového spoje vzorku SV-07/1 [v.z.]

7 Povrchové úpravy vzorků

Dalším krokem v experimentální části práce bylo ošetření kořene a okolního pásma svarového spoje vzorků vybranými metodami povrchových úprav. Výběr metod proběhl na základě požadavků zadavatele v souladu se současnými trendy v protikorozní ochraně materiálů. Pro účely experimentu nebyla řešena aplikovatelnost na reálné konstrukci, vzorky byly přizpůsobeny potřebám konkrétní technologie a vybavení pracovišť, která úpravy prováděla.

7.1 Žárové nástřiky

Pro provedení žárového nástřiku byly vybrány dvě metody a to žárový nástřik obloukem (AS) a vysokorychlostní nástřik plamenem (HVOF). Tyto metody byly vybrány se záměrem pozorovat vliv otevřené porozity a tloušťky nástřiku na korozní chování v agresivním prostředí. Žárový nástřik provedený obloukem je charakteristický svou otevřenou porozitou, která může mít pro korozní odolnost zásadní význam. Oproti tomu depozice metodou HVOF vytváří velmi kompaktní povlak s otevřenou porozitou pod 3%. Nástřiky na vzorcích byly vytvořeny ve spolupráci s Útvarem termických nástřiků, Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o. Postup nanášení a předúprav byl volen s ohledem na normu ČSN EN ISO 14921, popisující postup nanášení povlaků na součásti. Vzhledem k zařízení, kterým toto pracoviště disponuje, nebylo možné provedení nástřiku uvnitř vzorku, bylo tedy nutné před nanášením nástřiků vzorky podélně rozdělit.

Parametry nástřiku byly zvoleny s ohledem na normu ČSN EN ISO 17834, která stanoví doporučené tloušťky nástřiku v závislosti na určení a použité metodě. Jako korozní ochrana ve vodném prostředí o teplotě nižší než 350°C byla určena jmenovitá tloušťka povlaku aplikované metodou AS 0,4mm a 0,2mm pro metodu HVOF. Dle normy nesmí být nejmenší místní tloušťka povlaku tenčí než 75% tloušťky jmenovité. Šířka deponovaného pásma byla stanovena $\approx 80 \div 100$ mm na obě strany od osy svaru. Jako materiál nástřiku byl vybrán pro obě metody stejný, chemickým složením blízký korozivzdorné austenitické oceli AISI 316L (Tab. 14). Výběru tohoto materiálu předcházela úvaha, že nejvhodnější bude z pohledu elektrodového potenciálu volit materiál nástřiku složením blízký materiálu austenitického substrátu 08Ch18N10T. Chemické složení materiálu nástřiku je uvedeno v tabulce níže.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
	Max. [%]					[%] ÷ [%]		
AISI 316L	0,03	1	2	0,045	0,03	16,5 ÷ 18,5	2 ÷ 2,5	10 ÷ 12

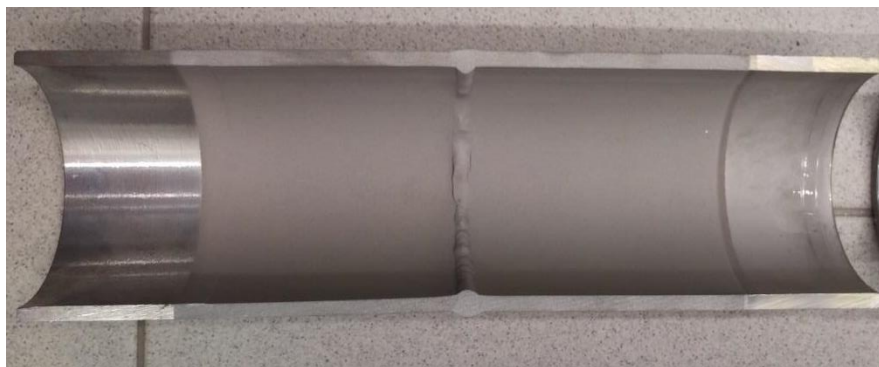
Tab.14: Chemické složení nástřikového kovu

- Metoda žárového nástřiku obloukem byla použita pro vzorky SV-07/2 a SV-10/2
- Metoda vysokorychlostního nástřiku plamenem byla užita pro vzorky SV-07/5 a SV-10/5

Už na první pohled je zřejmé, že žárový nástřik metodou AS je porézní a méně kompaktní oproti nástřiku metodou HVOF. Z obrázků 24 a 25 se dá vyvodit, že při nástřiku metodou AS dochází k výraznějšímu ovlivnění materiálu nástřiku.



Obr.24: Povlak aplikovaný metodou AS [v.z.]

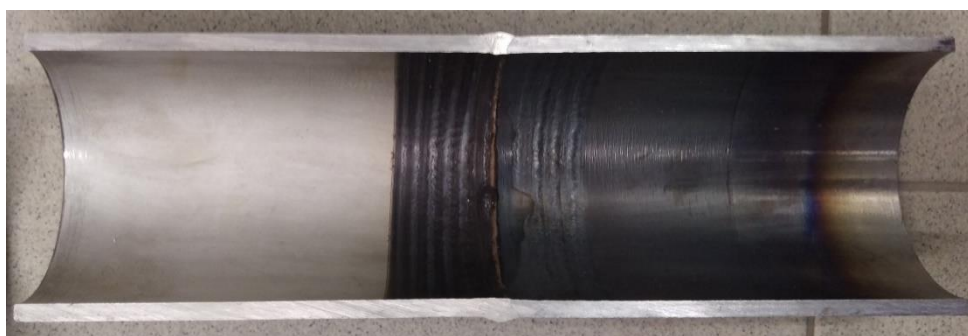


Obr.25: Povlak aplikovaný metodou HVOF [v.z.]

7.2 Laserové povrchové přetavení (Laser Surface Remelting-LSR)

Tato metoda byla použita pro vzorky SV-07/3 (zkušební), SV-10/3 (zkušební), a dále pro vzorky SV-07/6 a SV-10/6. Tato povrchová úprava byla provedena Laboratoří laserového zpracování povrchů, Nové technologie - výzkumné centrum. Byl použit pevnolátkový laser Trumpf TruDisk 8002 s vlnovou délkou 1030 nm, v kombinaci se skenovací hlavou Scanlab inteliWELD 30 FC V. Použit byl kontinuální režim záření laseru. Nastavený výkon byl 3800 W. Dávka ozáření H, tj. energie na jednotku plochy, byla 47 J/mm².

Vzhledem k průměru svazku 0,8mm v ohnisku, bylo použito rozkmitání svazku po elipse pro rozšíření stopy. Výsledná šířka jedné stopy byla 8mm. Pro dostatečné překrytí stop byl zvolen posuv 6mm. Rychlost otáčení vzorku byla zvolena 10mm/s. Pro nastavení a ověření parametrů byl proces aplikovaný na dvou zkušebních vzorcích (Obr. 26).



Obr.26: Vzorek s aplikovaným laserovým přetavením povrchu [v.z.]

7.3 Inhibiční filmotvorný přípravek

Jako třetí metoda pro zvýšení korozní odolnosti heterogenního svarového spoje bylo zvoleno nanesení filmotvorného inhibičního přípravku, kterým byla kombinace ethanolaminu a metoxopropylaminu. Tento přípravek byl namíchan jako vodný roztok v poměru 1:4 s destilovanou vodou. Vzorky SV-07/4 a SV-10/4 po odmaštění byly v tomto roztoku 40 minut ponořeny (Obr. 27, 28). Tím byl na povrchu vzorku vytvořen hydrofobní ochranný film.



Obr. 27, 28: Příprava vzorků a aplikace inhibičního přípravku [v.z.]

8 Metalografický rozbor

Metalografické pozorování bylo zařazeno do experimentálního programu kvůli pozorování mikrostruktury všech částí svaru, základních materiálů a kontroly parametrů použitých povrchových úprav. Prvním krokem byl rozřez jednotlivých vzorků na pásové pile, poté příprava jednotlivých výbrusů a jejich preparace (Obr. 29, 30).

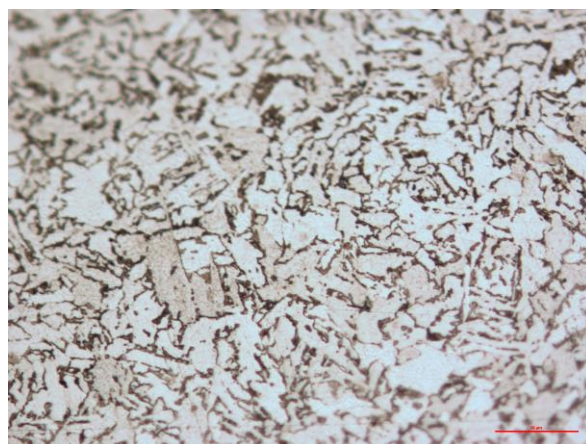


Obr. 29, 30: Příprava metalografických vzorků [v.z.]

Po preparaci byly metalografické vzorky vybroušeny a vyleštěny pomocí automatické leštičky Struers. Problém přišel při přípravě procesu leptání. Díky faktu, že se svar skládá z několika oblastí, které se výrazně liší ve své odolnosti vůči leptadlům, musel být navržen zvláštní postup leptání. Feriticko - perlitická ocel 12022.1 a její tepelně ovlivněná oblast byla citlivá vůči leptadlu Nital 3%, ale svarový kov a ZM 08Ch18N10T tomuto leptadlu odolávaly i při výrazném prodloužení expozice v leptadlu. Nakonec se na odolný svarový kov a austenitický ZM osvědčilo leptadlo ve složení 10ml HNO_3 , 20ml HCL a 20ml glycerinu. Toto leptadlo bylo vůči oceli 12022.1 příliš agresivní, proto byl zvolen postup nejprve leptat výbrus v 3% Nitalu, pozorovat mikrostrukturu oceli 12022.1 a poté leptat pro vyvolání struktury korozivzdorných austenitických oblastí svaru s jejich následným pozorováním. Na obrázku níže je zobrazena feriticko – perlitická mikrostruktura oceli 12022.1 (Obr. 31,32).



Obr. 31: Mikrostruktura oceli 12022.1(100x)



Obr. 32: Mikrostruktura oceli 12022.1 (200x)

Na následujících dvou snímcích (Obr. 33, 34) je vyfocena naleptaná mikrostruktura svarového kovu vzorku svařeného pomocí přídavného materiálu SV-07Ch25N13. Patrná je při tomto složení svarového kovu výrazná kolumnární struktura subzrn. Dále můžeme při 200násobném zvětšení pozorovat tvorbu karbidů.



Obr.33: Mikrostruktura svarového kovu (100x)

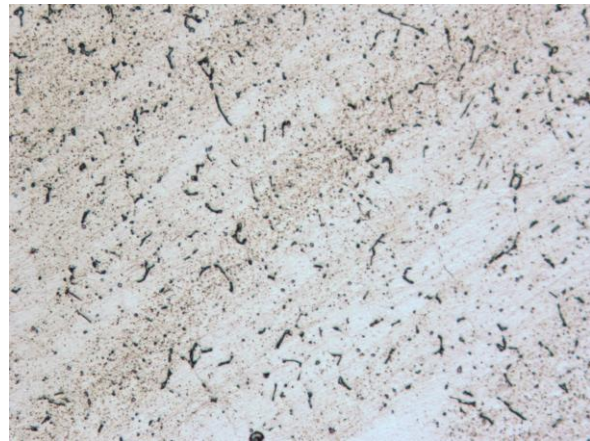


Obr.34: Mikrostruktura svarového kovu (200x)

Dále můžeme na snímcích níže je vidět mikrostrukturu svarového kovu na vzorku svařeného pomocí přídavného materiálu SV-10Ch16N25AM6 (Obr. 35, 36). Svarový kov vzorku svařeného s použitím tohoto přídavného materiálu nevykazoval tak výraznou kolumnární strukturu jako svarový kov vytvořený za použití přídavného materiálu SV-07Ch25N13.

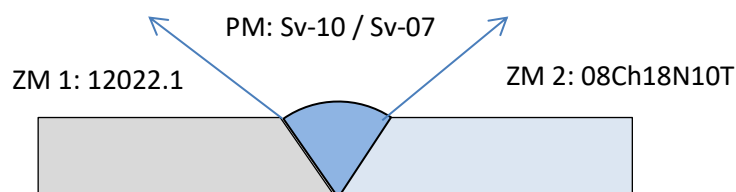
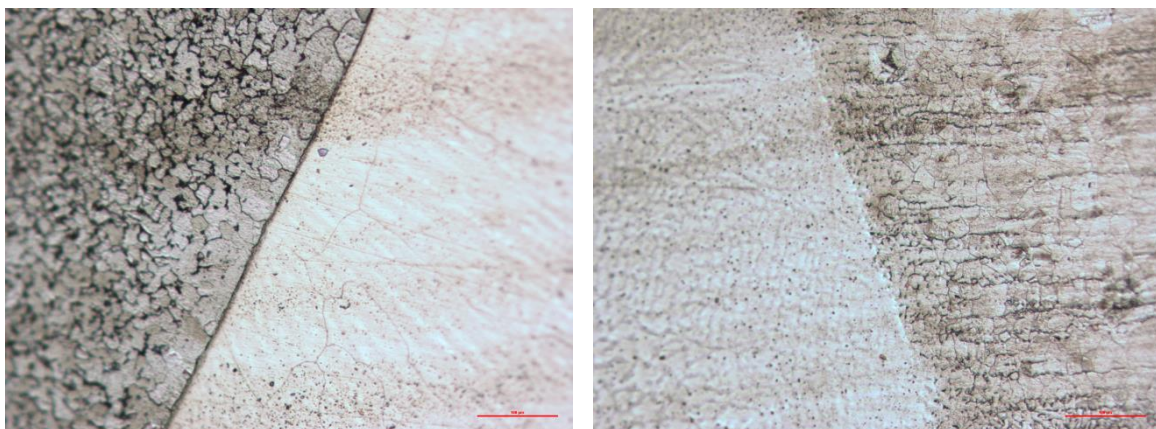


Obr.35: Mikrostruktura svarového kovu (100x)

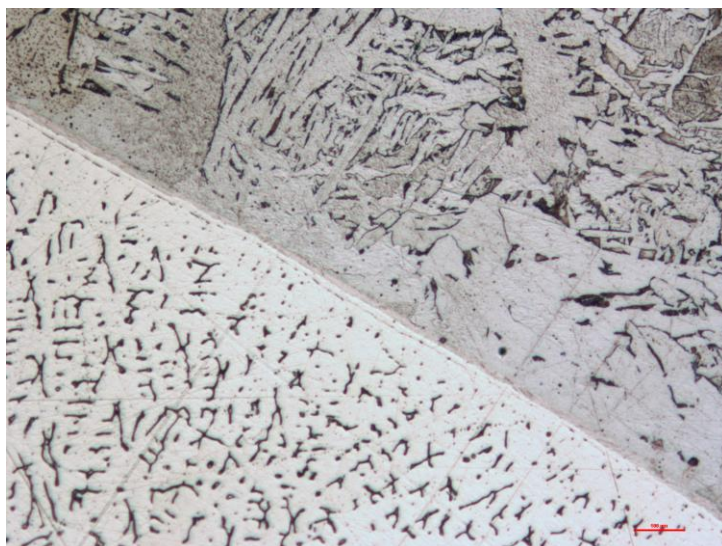


Obr.36: Mikrostruktura svar. kovu (200x)

Na obrázku jsou naleptaná přechodová pásma, pozorovaná světelným mikroskopem při stonásobném zvětšení (Obr. 37). Vlevo je patrná feriticko – perlitická struktura tepelně ovlivněné oblasti materiálu 12022.1. V bezprostřední blízkosti linie ztavení je patrné zhrubnutí zrn a mírné oduhličení, což dokazuje nižší četnost perlitických útvarů oproti feritickým zrnům. Mezi feriticko – perlitickým ZM a austenitickým svarovým kovem je patrná linie ztavení. Na základě úvahy, že leptání na vyvolání mikrostruktury je ve své podstatě selektivní koroze, při které leptadlo přednostně rozpouští méně korozně odolné oblasti a fáze, se dá usuzovat, že právě tato linie je z pohledu korozní odolnosti svarového spoje velmi citlivá. Dále je zřetelně viditelný čistě austenitický svarový kov. Dalším pozorovaným jevem byla zvýšená tvorba karbidů v austenitickém svarovém kovu v blízkosti linie ztavení ferit / austenit. Toto je způsobeno právě difuzí uhlíku. V pravé části obrázku je vidět přechod mezi austenitickým svarovým kovem a korozivzdornou ocelí 08Ch18N10T. Tato přechodová oblast nevykazuje tak výraznou linii, jako tomu bylo v předchozím případě, oba materiály jsou austenitické.



Obr. 37: Linie ztavení [v.z.]



Obr. 38: Rozhraní svarového spoje austenit / ferit (200x zvětšeno) [v.z.]

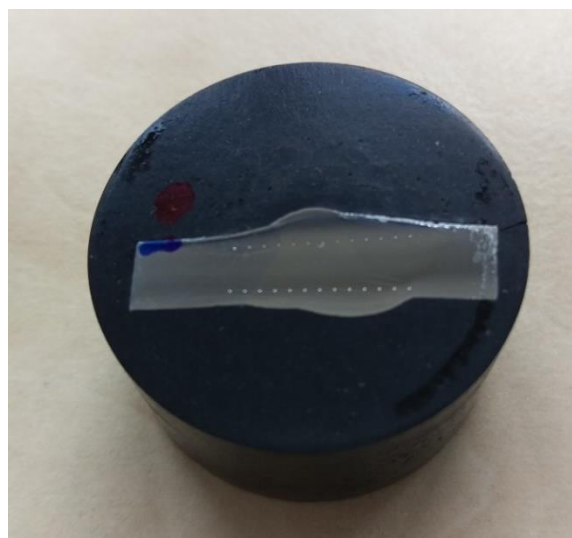
Na obrázku výše je snímek naleptané mikrostruktury z přechodového pásma austenitický svarový kov / feriticko – perlitická ocel 12022.1 (Obr. 38). Na tomto snímku je zřetelné oduhličené feriticko – perlitické oblasti.

8.1 Měření průběhu tvrdosti svarovým spojem

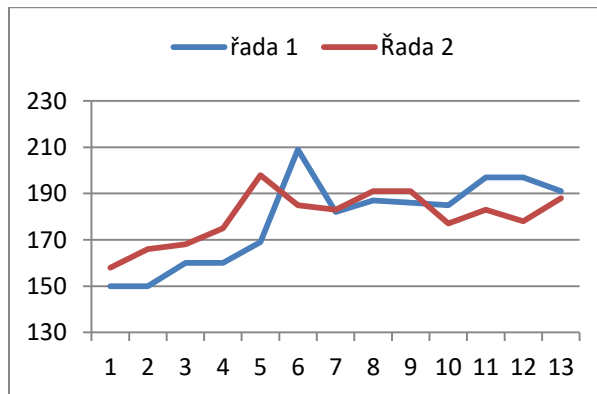
Význam této zkoušky spočívá především v doplnění a zpřesnění metalografického pozorování. Požadavky na provedení stanovuje mezinárodní norma ČSN EN ISO 9015-2. Vzhledem k austenitickému materiálu byl zvolen postup zkoušky tvrdosti dle Vickerse HV1, rozteč vtisků 1mm ve dvou řadách. První řada vtisků ve vzdálenosti 2mm od kořene svaru a druhá řada 3mm od krycí vrstvy. Na obrázcích jsou vidět měřicí vtisky ve vzorku materiálu svařeného s přídavným materiálem SV-07, vedle s PM SV-10 (Obr. 39, 40). Z naměřených hodnot je patrné, že v TOO ani ve svarovém kovu se nenacházejí základní struktury a tvrdosti odpovídají požadovaným tabulkovým hodnotám. Maximální povolená hodnota naměřené tvrdosti je 350HV pro daný typ svaru (Graf 1, 2).



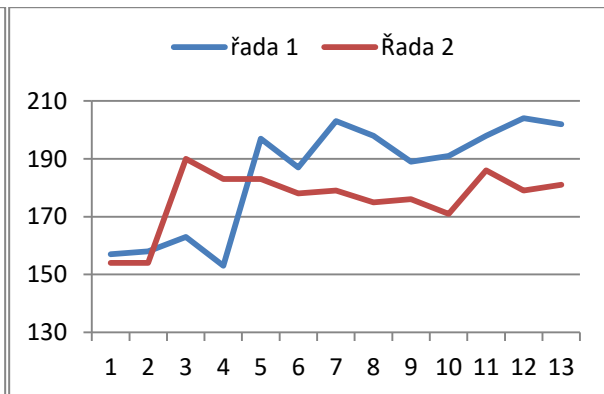
Obr. 39: Vtisky měření průběhu tvrdosti SV-07



Obr. 40: Vtisky měření průběhu tvrdosti SV-10



Graf 1: Průběh tvrdosti svarovým spojem SV-07

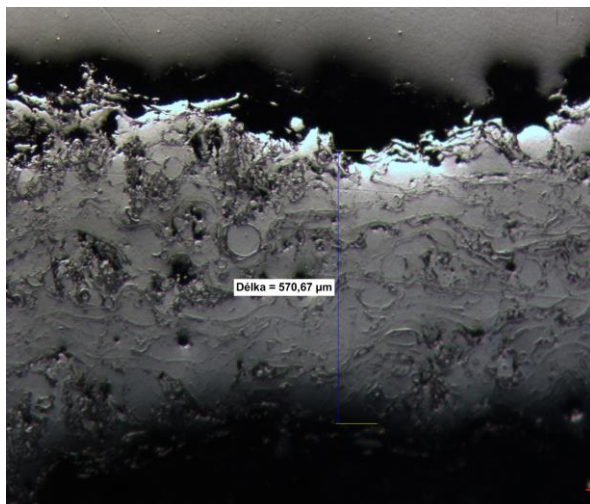


Graf 2: Průběh tvrdosti svarovým spojem SV-10

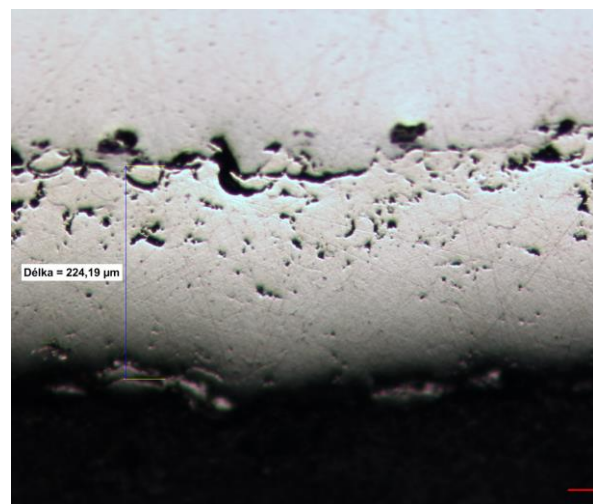
8.2 Hodnocení vrstev a povlaků

Na vzorcích opatřených žárovými nástřiky bylo provedeno mikroskopické pozorování v nenaleptaném stavu. Nejprve bylo provedeno ověření tloušťky naneseného povlaku. V případě žárového nástřiku obloukem se tloušťka vrstvy pohybovala okolo hodnoty 0,6mm, nejmenší naměřená tloušťka povlaku byla naměřena 0,52mm, což požadavek minimální tloušťky povlaku převyšuje. U povlaku vytvořeného metodou HVOF se tloušťka povlaku pohybovala v rozmezí 0,2mm až 0,3mm, nejmenší naměřená tloušťka vrstvy byla 0,21mm, požadavek na minimální tloušťku tak byl splněn. U povrchové vrstvy přetavené laserem (LSR) byla naměřena tloušťka 0,025mm.

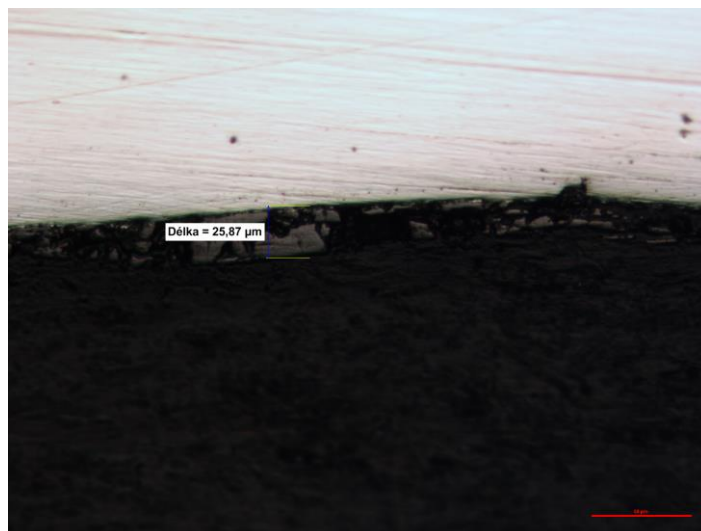
Pokud se týká morfologie povlaků, tak ze snímků níže je patrný rozdíl v povlácích nanesených metodami AS a HVOF (Obr. 41, 42). Povlak nanesený metodou HVOF je sice tenčí, ale obsahuje výrazně méně vad, jako jsou zoxidované částice, póry a nenatavené částice.



Obr. 41: Morfologie povlaku AS (50x)



Obr. 42: Morfologie povlaku HVOF(100x) [v.z.]



Obr. 43: Vrstva LSR (200x) [v.z.]

U žárově stříkaných povlaků bylo provedeno měření tvrdosti podle Vickerse HV0,1. Z naměřených hodnot je patrná výrazně vyšší tvrdost povlaku vytvořeného metodou AS. Ovlivnění materiálu použitou metodou je tady zřejmé. Tvrdost povlaku zvyšují nejvýrazněji právě zoxidované částice. Naměřené hodnoty jsou v následující tabulce (Tab. 15). Tvrdost vrstvy přetavené laserem měřena nebyla z důvodu její malé tloušťky (Obr. 43).

Vtisk:	1	2	3	4	5	\bar{x}
AS	481	490	441	525	475	482,4
HVOF	324	332	224	262	261	280,6

Tab. 15: Měření tvrdosti vrstev

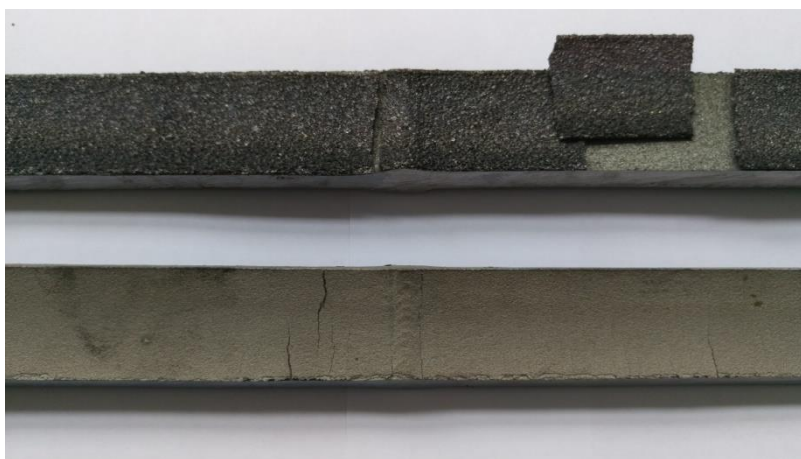
9 Příčná zkouška tahem

Tahová zkouška byla provedena dle požadavků normy ČSN EN ISO 4136, postup zatěžování dle ČSN EN ISO 6892, stejně tak její vyhodnocení. Odlišností od normy byl požadavek na mechanické opracování povrchu vzorku tak, aby bylo odstraněno převýšení svaru a dále byl oproti normě upraven tvar zkušebních vzorků z důvodu zjednodušení výroby. Norma ČSN EN ISO 4136 doporučuje vzorek v oblasti svaru zúžený, toto zúžení nebylo provedeno. Pro tahovou zkoušku byly připraveny vzorky, které byly vyrobeny ze vzorků SV -07/1 a SV-10/1. Hlavním záměrem provedení zkoušky bylo zjistit, v jakém místě dojde k přetržení vzorku, spíše než měření pevnosti v tahu, která je pro použité materiály známá. K přetržení vzorku došlo v obou případech při zatížení cca 50kN (500MPa) v tepelně ovlivněné oblasti feriticko – perlitické oceli 12022.1, jak je vidět na obrázku (Obr. 44).



Obr. 44: Příčná zkouška tahem [v.z.]

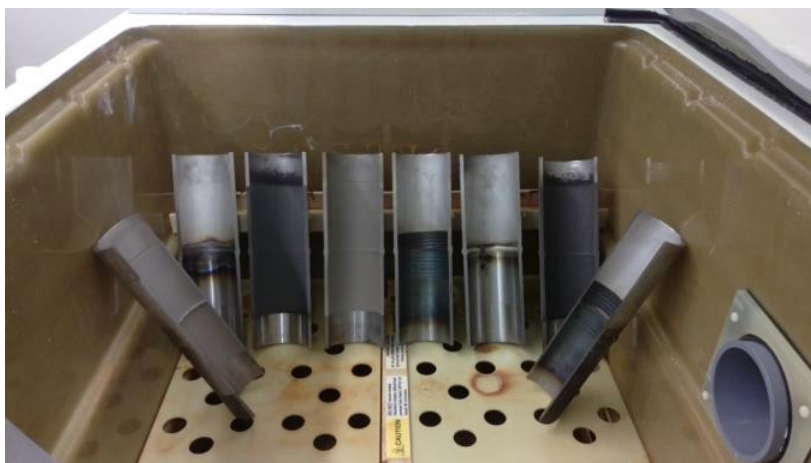
Pro tahovou zkoušku byly připraveny i vzorky opatřené žárovými nástřiky s cílem ověřit chování žárového nástřiku při tahovém zatěžování vzorku. Zde opět došlo k výraznému rozdílu mezi povlaky vytvořenými metodami AS a HVOF. V případě povlaku vytvořeného metodou AS došlo při překročení meze kluzu při zatížení 40kN k úplné ztrátě adheze mezi materiálem nástřiku a substrátem, přičemž povlak odpadl z povrchu vzorku jak je vidět na obrázku (Obr. 45). Na povlaku vytvořeném metodou HVOF se při stejném tahovém zatížení vytvořily trhliny, ale ke ztrátě adheze nedošlo.



Obr. 45: Ztráta adheze povlaků [v.z.]

10 Expozice v neutrální solné mlze

Zásadním testem korozní odolnosti připravených vzorků je expozice v korozně agresivním prostředí solné mlhy. Požadavky na tuto zkoušku jsou definovány normou ČSN EN ISO 9227: Korozní zkoušky v umělých atmosférách – zkoušky solnou mlhou. Této zkoušce byly vystaveny výřezy připravené ze vzorků dle tabulky v kapitole 5. Vzorky byly před expozicí v komoře očištěny a odmaštěny acetonem, vyjma vzorků SV-07/4 a SV-10/4, které byly ošetřeny inhibičním přípravkem. Tyto vzorky byly vloženy do komory neprodleně po vyjmutí z roztoku (Obr. 46).



Obr. 46: Rozmístění vzorků v komoře [v.z.]

Vzorky byly exponovány po dobu 200 hodin v neutrální solné mlze vytvořené z $5\pm 1\%$ solného roztoku. Hodnota pH solného roztoku byla 6,5 – 7,2, teplota v komoře byla udržována po dobu testu $35\pm 2^\circ\text{C}$. Spad roztoku na ploše 80cm^2 byl $1,5 \frac{\text{ml}}{\text{h}}$. Po skončení expozice byla zkouška vyhodnocena na základě normy ČSN EN ISO 9227 na základě následujících kritérií: Vzhled po zkoušce, změny zjištěné mikroskopicky a změny mechanických vlastností.

10.1 Vzhled po zkoušce

Pomocí hodnocení vzhledu vzorků po expozici v neutrální solné mlze můžeme hodnotit množství korozních produktů na povrchu vzorku, změny tvaru, jako jsou například puchýře, důlky a přítomnost povrchových defektů jako jsou trhliny.

Na první pohled lze potvrdit velmi vysokou korozní odolnost austenitické oceli 08Ch18N10T, která po expozici v solné mlze nevykazovala takřka žádné korozní napadení. Oproti tomu se potvrdila výrazně nižší korozní odolnost feriticko – perlitické oceli 12022.1. Zajímavé je především korozní napadení materiálu žárových nástřiků (Obr. 47).



Obr. 47: Vzorky po ukončení expozice [v.z.]

Materiál pro obě metody nástřiku byl zvolen stejný, chemickým složením blízký austenitickému základnímu materiálu AISI 316L. U tohoto materiálu se dá předpokládat velmi podobná korozní odolnost jako u oceli 08Ch18N10T, ale zjevně tomu tak není. Žárový nástřik metodou AS vykazuje rovnoměrnou korozi po celém svém povrchu (Obr. 49), nehledě na substrát. Nástřik provedený metodou HVOF vykazuje korozní napadení výrazně nižší, přesto je stále vyšší než u základního materiálu 08CH18N10T (Obr. 50).



Obr. 48: Referenční vzorek



Obr. 49: Nástřik AS



Obr. 50: Nástřik HVOF

Vzorky opatřené inhibičním přípravkem (Obr. 51), ve srovnání se vzorky bez povrchových úprav (Obr. 48), vykazovaly nižší korozní napadení v oblasti feriticko – perlitické oceli 12022.1. Aplikovaný inhibiční filmotvorný přípravek zlepšil stékání kondenzátu z povrchu vzorku, čímž snížil jeho korozní napadení.



Obr. 51: Referenční vzorek / inhibitor



Obr. 52: Vzorek LSR

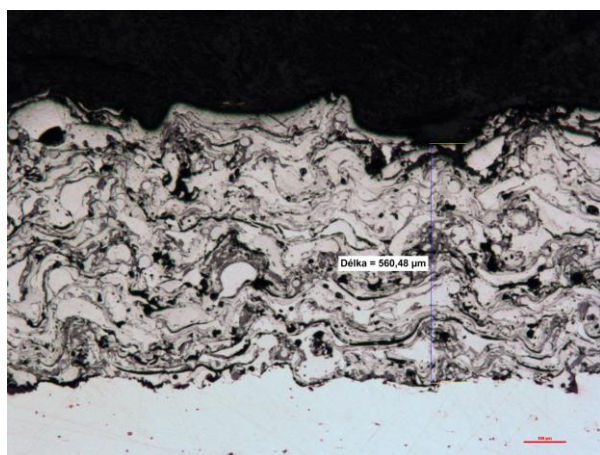
10.2 Změny zjištěné mikroskopicky

Nejprve byly připraveny metalografické výbrusy (Obr. 53). Ty byly vytvořeny ze vzorků po expozici SV-07/1, SV-07/2, SV-07-5 SV-07/6, SV-10/1, SV-10/2, SV-10/5 a SV-10/6, které byly po preparaci broušeny a leštěny pomocí automatické leštičky Struers Tegramin – 20 (Obr. 54), stejně jako výbrusy z neexponovaných vzorků. Dále byly tyto výbrusy pozorovány v nenaleptaném a naleptaném stavu pod světelným mikroskopem.

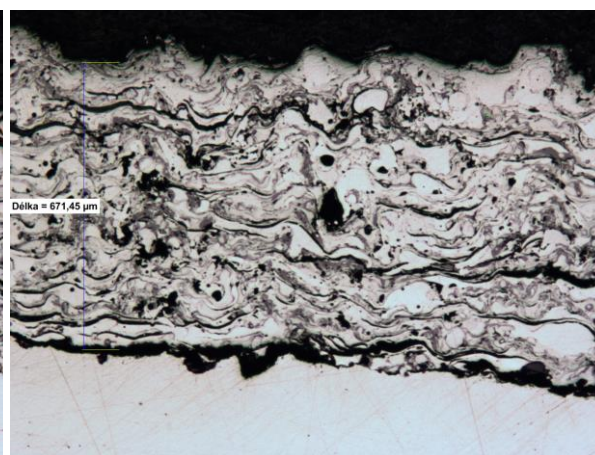


Obr. 53, 54: Příprava metalografických výbrusů po expozici [v.z.]

U žárově stříkaných povlaků bylo pozorováno korozní napadení na rozhraní substrát – povlak. To znamená, že došlo k poměrně výraznému podkorodování těchto povlaků, zvláště v části, kde byla substrátem feriticko – perlitická ocel 12022.1, jak můžeme vidět na obrázcích (Obr. 55, 56). V místech, kde byla substrátem austenitická korozivzdorná ocel 08Ch18N10T podkorodování nebylo tak významné. Toto podkorodování má pro uvažovanou aplikaci značný význam. Pokud by se ke korozním vlivům přidalo i mechanické namáhání či vibrace, mohlo by dojít k úplné ztrátě adheze mezi povlakem a substrátem.



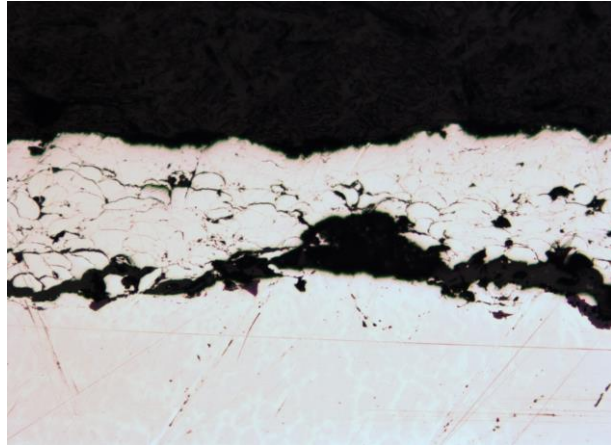
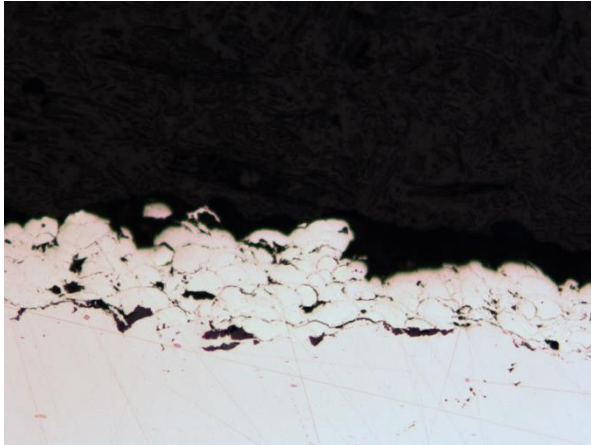
Obr. 55: Povlak AS, substrát 12022.1 (100x)



Obr. 56: Povlak AS, substrát 08Ch18N10T(100x)

Tato lokalizovaná koroze na rozhraní nástřík – substrát byla pozorována u obou metod žárového nástříku jak AS tak HVOF (Obr. 57, 58). I zde platila zákonitost, že ztráta adheze byla významnější v té části, kde substrátem byla feriticko – perlitická ocel 12022.1.

Další pozorovanou odchylkou po expozici v korozně agresivním prostředí solné mlhy u vzorků ošetřených žárovým nástřikem metodou HVOF, byl pokles tloušťky povlaku pod minimální požadovanou tloušťku 0,2mm. U povlaků vytvořených metodou AS, vzhledem k jejich velké tloušťce, tento jev pozorován nebyl.



Obr. 57: Povlak HVOF, substrát 12022.1 (100x) Obr. 58: Povlak HVOF, substrát 08Ch18N10T(100x)

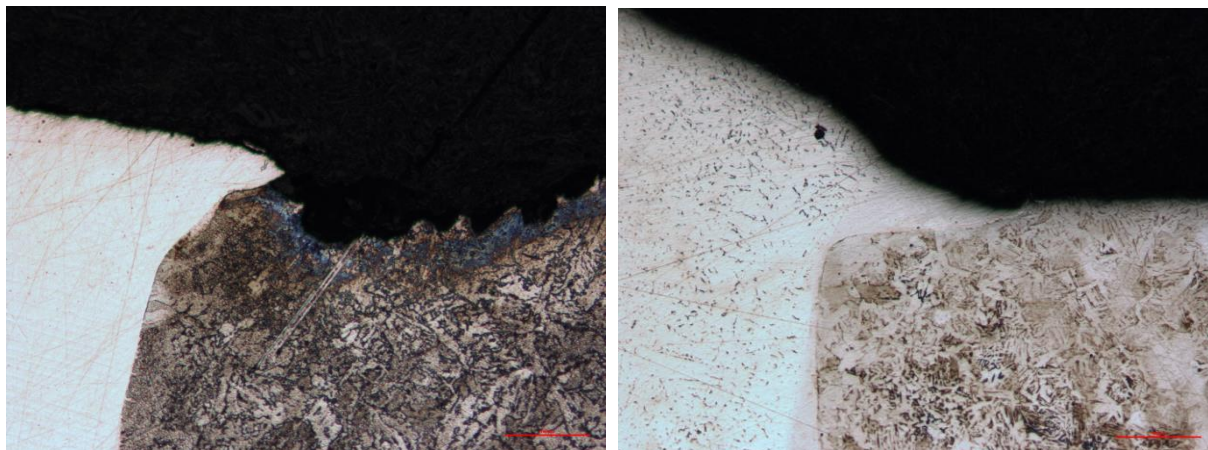
Po pozorování vzorků v neleptaném stavu bylo provedeno jejich leptání. Pro leptání austenitických ocelí bylo použito leptadlo ve složení 10ml HNO_3 , 20ml HCL a 20ml bezvodného glycerinu.

Při pozorování naleptaných vzorků pod světelným mikroskopem bylo zřetelně vidět korozní napadení feriticko – perlitické oceli (Obr. 59), přičemž na austenitické oceli 08Ch18N10T nebyly pozorovány žádné změny. Stejně tak na austenitickém svarovém kovu nebylo pozorováno korozní napadení. Při pozorování leptaných vzorků opatřených žárovými nástřiky bylo patrné korozní napadení materiálu feriticko – perlitického substrátu pod tímto nástřikem. Toto napadení bylo nejintenzivnější v tepelně ovlivněné oblasti oceli 12022.1, jak je vidět na obrázku (Obr. 60). Tento jev byl opět pozorován u obou metod.



Obr. 59: Korozní napadení referenčního vzorku Obr. 60: Korozní napadení vzorku s povlakem HVOF

Na následujících dvou snímcích je patrný rozdíl v korozním napadení vzorku bez povrchové úpravy (Obr. 61) a vzorku, na kterém bylo provedeno laserové přetavení povrchu (Obr. 62). Ačkoliv je vrstva laserového přetavení velmi tenká, na tomto vzorku je zjevné menší korozní napadení ve srovnání s vzorkem bez povrchové úpravy.



Obr. 61: Korozní napadení referenčního vzorku (100x) Obr. 62: Koroze vzorku LSR (100x)

10.3 Změny mechanických vlastností

Pro ověření mikroskopicky pozorovaných změn bylo provedeno měření mechanických vlastností měřením tvrdosti povlaků a tahovou zkouškou na vzorcích po expozici v korozním prostředí. Měření tvrdosti povlaků bylo provedeno metodou HV01 pomocí pěti vtisků. Přepočtené hodnoty tvrdosti jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 16).

Vtisk:	1	2	3	4	5	\bar{x}
AS	453	436	432	499	484	460,8
HVOF	221	220	264	244	249	239,6

Tab. 16: Hodnoty naměřené tvrdosti vrstev

Dále byla na vzorcích svarových spojů, exponovaných v neutrální solné mlze provedena tahová zkouška dle ČSN EN ISO 4136, stejně jako na vzorcích před expozicí s cílem pozorovat změny naměřených hodnot. U vzorků bez povrchových úprav, nebyly zaznamenány žádné výraznější odlišnosti oproti vzorkům před expozicí v korozně agresivním prostředí. Hodnoty meze kluzu a meze pevnosti odpovídaly zkouškám provedených na vzorcích před expozicí. Ke ztrátě koheze materiálu vždy došlo ve feriticko – perlitické oceli 12022.1. Drobné odchylky byly způsobeny spíše nepřesnostmi při výrobě vzorků a nepřesností měření nežli vlivem koroze.

Výrazná změna ovšem nastala při tahovém zatížení vzorků opatřených žárovými nástřiky. Při jejich zatěžování se projevilo mikroskopicky pozorované podkorodování povlaků a ke ztrátě adheze docházelo při nižším tahovém napětí a ve větším rozsahu, než tomu tak bylo před expozicí v korozně agresivním prostředí. Ke ztrátě adheze materiálu povlaku navíc došlo ještě před dosažením meze kluzu zkoušeného vzorku (Obr. 63, 64).



Obr. 63: Ztráta adheze povlaku HVOF po expozici Obr. 64: Ztráta adheze povlaku AS po expozici

Po tahovém zatěžování vzorků silou přibližně 35kN, došlo k viditelným trhlinám. Po následném odloupení povlakem byly na materiálu substrátu i povlaku zřetelně viditelné korozní produkty, jak je zachyceno na obrázcích (Obr. 65, 66).



Obr. 65: Korozní produkty pod nástřikem HVOF Obr. 66: Korozní produkty pod nástřikem AS

11. Diskuze výsledků

Nejdříve bylo na dodaných vzorcích provedeno NDT zkoušení pomocí vizuální kontroly dle ČSN EN ISO 17637, kapilární zkoušky dle ČSN EN ISO 3452-1 a radiografické zkoušky dle ČSN EN ISO 17636-1. Pomocí vizuální kontroly byly identifikovány vady tvaru 504 a 5014 dle normy ČSN EN ISO 6520-1 u vzorků SV-07/4, SV-07/5, SV-07/6, SV-10/1, SV-10/2, SV-10/3, SV-10/6. Všechny pozorované vady byly hodnoceny jako přípustné. Jiné povrchové ani vnitřní vady pozorovány nebyly. Předchozím bylo zjištěno, že všechny vzorky odpovídají dodané dokumentaci a plně vyhovují požadavkům experimentálního programu.

Na vzorcích byly provedeny povrchové úpravy dle tabulky v kapitole 5. Jednalo se o žárové nástřiky technologií AS a HVOF stejným materiálem pro obě metody, složením blízkým korozivzdorné oceli AISI 316L. Pro tyto metody bylo nutné vzorky řezem podélně rozdělit z důvodu, že dodavatel žárových nástřiků nedisponuje technologií pro nanesení nástřiku uvnitř vzorku daných rozměrů. Kořenová část svaru vzorků SV-07/3, SV-07/6, SV-10/3 a SV-10/6 byla upravena laserovým přetavením povrchu. Po této povrchové úpravě byly vzorky řezem podélně rozděleny. Podélně rozříznuté vzorky SV-07/4 a SV-10/4 byly ošetřeny ponorem v inhibičním filmotvorném přípravku. První část vzorků byla exponována v neutrální solné mlze dle ČSN EN ISO 9227.

Pro získání referenčních dat byla druhá část vzorků podrobena metalografickému rozboru. Dále byla ověřena mikrostruktura ve směru kolmém na osu svaru dle ČSN EN ISO 17639, doplněná o měření tvrdosti dle ČSN EN ISO 9015-1. Maximální naměřená hodnota byla 209 HV1, což nepřevyšuje maximální povolenou hodnotu pro tavný svarový spoj daných materiálů. Pozorovaná mikrostruktura odpovídala použitým materiálům a postupu svařování. Odchytky od požadovaného stavu, jako jsou např. zákalné struktury, či nadměrné tepelné ovlivnění, nebyly pozorovány. Následně proběhlo hodnocení nanesených povlaků a vrstev metalograficky i pomocí mechanických zkoušek. Všechny povrchové úpravy odpovídaly zadaným parametrům. Morfologie žárového nástřiku technologií AS vykazovala velké množství vad, jako jsou zoxidované částice, póry a nenatavené částice. Oproti tomu technologie HVOF vykazovala výrazně menší počet vad. Toto bylo potvrzeno i měřením tvrdosti povlaků metodou HV0,1, kdy tvrdost povlaku naneseného technologií AS byla přibližně o 40% vyšší. Z těchto vzorků byly připraveny výřezy pro příčnou tahovou zkoušku dle ČSN EN ISO 4136. Při této zkoušce byly zatěžovány tahem i vzorky opatřené žárovými nástřiky. Zde se objevila první negativní vlastnost těchto povlaků. Při dosažení meze kluzu vzorku došlo ke ztrátě adheze povlaku vytvořeného technologií AS. Při stejném tahovém zatížení vzorku opatřeného povlakem technologií HVOF došlo k porušení celistvosti, ale ztráta adheze nenastala.

Po ukončení expozice vzorků v korozně agresivním prostředí neutrální solné mlhy bylo provedeno vyhodnocení pomocí hodnocení vzhledu po zkoušce, mikroskopické hodnocení a hodnocení změn mechanických vlastností. Vzorky bez povrchových úprav vykazovaly rovnoměrné korozní napadení feriticko – perlitické oceli 12022.1, korozivzdorná ocel 08Ch18N10T byla bez pozorovaných změn, stejně tak austenitický svarový kov. Vizuálně nebyl pozorován vliv odlišného přídavného materiálu, ani počet svarových vrstev.

Vzorky SV-07/2 a SV-10/2 opatřené žárovým nástřikem technologií AS vykazovaly rovnoměrné korozní napadení v celé ploše nástřiku. Navíc toto korozní napadení bylo zintenzivněno ve středové části vzorku, kde docházelo ke stékání kondenzátu solné mlhy. U vzorků SV-07/5 a SV-10/5 opatřených žárovými nástřiky technologií HVOF nebylo pozorováno rovnoměrné korozní napadení, korozní produkty se objevovaly lokálně. U vzorků s laserově přetaveným povrchem nebyla zřetelná změna oproti vzorkům bez povrchové úpravy. Austenitický základní materiál i laserem přetavená oblast austenitické oceli nevykazovaly korozní napadení. Feriticko – perlitická ocel i její laserem přetavená část vykazovaly stejně intenzivní rovnoměrnou korozi, jako byla pozorována u vzorků bez PÚ. Vzorky SV-07/4 a SV-10/4, které byly ošetřeny inhibičním roztokem aminů vykazovaly výrazně nižší korozní napadení feriticko – perlitické části vzorků oproti vzorkům bez povrchových úprav. Korozní produkty se vyskytovaly spíše lokálně než rovnoměrně. Austenitická část vzorků byla opět beze změn.

Po očištění byly z exponovaných vzorků odebrány a vypreparovány metalografické výbrusy. Při pozorování těchto výbrusů pod světelným mikroskopem v nenaleptaném stavu byla zaznamenána koroze na rozhraní povlak – substrát a korozní úbytek substrátu. Při pozorování v naleptaném stavu bylo potvrzeno, že k tomuto podkorodování došlo především v oblasti, kde je substrátem feriticko – perlitická ocel 12022.1. V některých místech byla pozorována úplná ztráta adheze. V naleptaném stavu bylo dále pozorováno silné korozní napadení tepelně ovlivněné oblasti svarového spoje ve feriticko – perlitické oceli. Toto korozní napadení v tepelně ovlivněné oblasti feriticko – perlitické oceli bylo u vzorků ošetřených laserovým přetavením povrchu výrazně menší.

Při příčné zkoušce tahem dle ČSN EN ISO 4136 nebyly zaznamenány žádné změny oproti referenčním vzorkům. Mez kluzu, mez pevnosti v tahu i místo lomu byly na vzorcích bez povrchových úprav po expozici stejné. Při tahovém zatěžování vzorků s žárovými nástřiky po expozici v neutrální solné mlze se projevila mikroskopicky pozorovaná koroze na rozhraní nástřik – substrát. Ke ztrátě adheze materiálu nástřiku došlo přibližně při zatížení o 20% nižším, než v případě vzorků bez expozice v korozně agresivním prostředí.

Po odpadnutí povlaku byly pozorovány korozní produkty jak na materiálu substrátu, tak i na obou stranách materiálu povlaku. Tím bylo jednoznačně dokázáno, že korozní prostředí se dostalo skrz materiál nástřiku a interagovalo se substrátem. Vzhledem k faktu, že k lokalizaci deformace při tahovém zatěžování vzorků došlo vždy mimo svar, vliv laserem přetavené vrstvy při tomto měření nebyl prokázán. Dále bylo provedeno měření tvrdosti žárově stříkaných povlaků. Oproti povlakům bez expozice v neutrální solné mlze tvrdost mírně poklesla, tento jev nebyl hodnocen jako významný. Tvrdost vrstvy vytvořené laserovým přetavením povrchu nebyla měřena kvůli velmi malé tloušťce vrstvy cca 25 μm .

12. Závěr

Po úvodu do dané problematiky byla popsána motivace k jejímu řešení. Dále navazovala teoretická část práce, popisující význam tavného svařování pro energetiku a jaderné strojírenství. Následně byl definován heterogenní svarový spoj typu austenit / ferit a současný postup při opravování heterogenních svarových spojů tohoto typu na jaderných elektrárnách v České republice. Ve druhé kapitole byla popsána korozní problematika tohoto typu heterogenního svarového spoje a degradační principy, kterými je ovlivňován při provozu. V následujících dvou kapitolách byly popsány možnosti protikorozní ochrany heterogenního svarového spoje a popsána metodika zkoušení korozní odolnosti.

Následně byl pro aplikační část této práce navržen experimentální program s cílem ověřit možnost ochrany heterogenního svarového spoje typu austenit / ferit pomocí vybraných povlaků a vrstev. Na základě výsledků tohoto experimentálního programu bylo potvrzeno, že technologie žárových nástřiků při dané kombinaci zvoleného materiálu nástřiku a metody nanášení je pro danou aplikaci nevhodná ze dvou důvodů. Prvním důvodem je tepelné ovlivnění materiálu během nástřiku, což degraduje jeho vlastnosti. Druhým důvodem je otevřená porozita, která zásadně zvyšuje smáčivost povrchu, způsobuje zadržování korozně agresivního média a především ruší účinek povlaku jako bariérové korozní ochrany. Experimentem bylo toto dokázáno třemi metodami. Mikroskopicky bylo pozorováno podkorodování materiálu povlaku u obou metod jak AS, tak HVOF. Při tahovém zatěžování vzorků došlo ke ztrátě adheze při nižším tahovém napětí než u vzorků bez expozice v korozně agresivním prostředí. Po odpadnutí materiálu povlaku byly pozorovány korozní produkty na povlakem chráněném materiálu substrátu. Na základě těchto zjištění lze usuzovat, že použití těchto nástřiků v prostředí sekundárního okruhu VVER by nepřineslo zvýšení životnosti, naopak by s sebou přineslo další problémy, například zvýšená tvorba kalů v parogenerátoru uvolněnými zoxidovanými částicemi žárových nástřiků. Návrhem na opatření je zaměřit se při dalším výzkumu především na technologie, které ovlivňují nanášený materiál co nejméně, a výsledný povlak vykazuje pokud možno nejmenší podíl otevřené porozity. Touto technologií je například cold spray, případně technologie laserových návarů. Předpokladem je, že povlak vytvořený touto technologií bude mít pro danou aplikaci příznivější vlastnosti.

Další testovanou povrchovou úpravou bylo laserové přetavení povrchu. Ačkoliv se jedná o velmi tenkou vrstvu a vizuálním hodnocením korozního napadení po expozici v neutrální solné mlze této vrstvě nebyl přikládán velký význam, při mikroskopickém pozorování korozního napadení bylo ve srovnání s referenčním vzorkem bez povrchové úpravy pozorováno výrazně nižší korozní napadení feriticko – perlitické oblasti svarového spoje. Metalografické hodnocení této vrstvy vzhledem k její malé tloušťce nebylo pomocí světelné mikroskopie průkazné. Návrhem na opatření je další zkoumání této vrstvy pomocí ŘEM a TEM jak ve stavu před expozicí v korozně agresivním prostředí, tak po ní s cílem určit vnitřní mechanismus zvýšení korozní odolnosti.

Vliv inhibičního přípravku na korozní odolnost vzorku byl hodnocen kladně. Díky hydrofobnímu filmu došlo ke snížení smáčivosti povrchu zkoušených vzorků. Vzorek ošetřený tímto přípravkem vykazoval oproti referenčnímu vzorku nižší korozní napadení, především v oblasti feriticko – perlitické oceli 12022.1. Potenciální využití tohoto přípravku bylo shledáno především v pasivaci povrchu feriticko – perlitické oceli při suché nebo polosuché odstávce zařízení parogenerátoru. Filmotvorný inhibiční přípravek při tomto stavu zařízení může omezit vliv vzdušné vlhkosti a zvýšit stabilitu pasivační vrstvy stabilního oxidu.

13. Použitá literatura

Monografie

- [1] JONES, Denny A. *Principles and prevention of corrosion*. New York: Maxwell Macmillan International Pub. Group, c1991. ISBN 0023612150.
- [2] DAVIS, J. R. *Corrosion of weldments*. Materials Park, OH: ASM International, c2006
- [3] PAWŁOWSKI, Lech. *The science and engineering of thermal spray coatings*. 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley, c2008. ISBN 9780471490494.
- [4] ZHANG, Hongyan a Jacek. SENKARA. *Resistance welding: fundamentals and applications*. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, c2012. ISBN 9781439853719.
- [5] RAJ, Baldev, C.V. SUBRAMANIAN a T. JAYAKUMAR. *Non-destructive testing of welds*. ISBN 184265005X.
- [6] PILOUS, Václav. a Karel. STRÁNSKÝ. *Strukturní stálost návarů a svarových spojů v energetickém strojírenství*. Praha: Academia, 1989. Studie ČSAV, 1989, č. 7. ISBN: 8020000070.
- [7] KOVAŘÍK, Rudolf a František ČERNÝ. *Technologie svařování*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-697-5.
- [8] HEZOUČKÝ, ŠTECH. *Základy teorie normálních a abnormálních provozních režimů energetických bloků s tlakovodními reaktory*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2015. ISBN 9788026105480.
- [9] JONES, R.H.: Stress-Corrosion Cracking, Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection, ASM Handbook, ASM International, 2003, Vol 13A, p 346–366
- [10] BYSTRIANSKÝ, J.; SALVETR, P.; BYSTRIANSKÝ, V.; NAVOJ, A.; DĚD, J., MAIXNER, J.; CIBULKOVÁ, J. KOHOUTKOVÁ, M.; RANDÁKOVÁ, S.: *Vliv heterogenit chemického složení vysoce legovaných ocelí na jejich chování ve vodě vysokých parametrů. Vnitřní projekt ÚKMKI VŠCHT Praha. I. Detekce inherentní cesty šíření poškození po hranicích zrn v tranzitní oblasti a svarovém kovu*. Zpráva VŠCHT Praha, červen 2017
- [11] KUČERA, J.: *Teorie svařování I / II. Skriptum VŠB TU Ostrava, Ostrava 1994*
- [12] 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*

- [13] M.G.S. Ferreira, R. Li *A review on laser surface modification for enhanced corrosion resistance EUROCORR '96: Organic and inorganic coatings for corrosion prevention*, The Institute of Materials, London (1997)
- [14] KWOK, Chi Tat. *Laser surface modification of alloys for corrosion and erosion resistance*. Philadelphia, PA: Woodhead Publishing, 2012. Woodhead Publishing in materials. ISBN 978-0-85709-015-7.
- [15] KRUNCIPÁL, J. PILOUS, V. a DUNOVSKÝ, J. *Nové technologie ve svařování*. 1.vydání. Praha: SNTL, 1984. ISBN L13-B2-V-31f/22785.

Přednášky, články, normy a internetové zdroje

- [16] HAJDÍK, Jiří. *ROZSAH POŠKOZENÍ HETEROGENNÍCH SVAROVÝCH SPOJŮ NA PG 4.RB*. In: Pracovní seminář PG ETE a EDU, ETE – AB 257. 2018.
- [17] JUNEK, Lubomír. *Souhrn poznatků z poškození HSS na zařízení elektráren typu VVER*. In: Příčiny poškození heterogenních svarových spojů na PG VVER 1000MW a VVER 440MW. 2018.
- [18] VOZÁBAL, Jaroslav. *Akční plán na snížení degradačních mechanismů PG*. In: Příčiny poškození heterogenních svarových spojů na PG VVER 1000MW a VVER 440MW. 2018.
- [19] HOUFEK, Ondřej. *Rozsah stávajících NDT heterogenních svarových spojů na PG ETE/EDU*. In: Příčiny poškození heterogenních svarových spojů na PG VVER 1000MW a VVER 440MW. 2018.
- [20] Technologie žárových nástřiků. In: *Vzuplzen.cz* [online]. [cit. 2017-12-06]. Dostupné z: <https://www.vzuplzen.cz/zarove-nastriky/technologie.php>
- [21] STRESS CORROSION CRACKING AND INTERGRANULAR CORROSION OF A 316Ti STAINLESS STEEL PREHEATER TUBE. Metallurgical technologies [online]. [cit. 2017-12-06]. Dostupné z: <https://met-tech.com/316ti-stainless-steel-preheater-tube/>
- [22] Stress-Corrosion Cracking of a Teflon-Lined Steel Pipe in Sulfuric Acid Service. *ASM International* [online]. [cit. 2017-12-06]. Dostupné z: <http://products.asminternational.org/fach/data/fullDisplay.do?database=faco&record=986&trim=false>
- [23] BYSTRIANSKÝ, Jaroslav. *Posouzení podmínek, ovlivňujících životnost ocelí v heterogenních svarových spojích v různých pozicích sekundárního okruhu*. In: Příčiny poškození heterogenních svarových spojů na PG VVER 1000MW a VVER 440MW. 2018.

- [24] McGraw-Hill Concise Encyclopedia of Engineering: *Welded Joint*. (n.d.) McGraw-Hill Concise Encyclopedia of Engineering. (2002). [online]. [cit. 2017- 12-06]. Dostupné z: <https://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Welded+Joint>
- [25] ČSN EN ISO 9227, *Korozní zkoušky v umělých atmosférách – zkoušky solnou mlhou*
- [26] ČSN EN ISO 9015-1, *Destruktivní zkoušení svarů kovových materiálů – Zkouška tvrdosti svarových spojů svařených obloukovým svařováním*
- [27] ČSN EN ISO 17636, *Nedestruktivní zkoušení svarů – Radiografické zkoušení*
- [28] ČSN EN ISO 4136, *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Příčná zkouška tahem*
- [29] ČSN EN ISO 10675-1, *NDT zkoušení svarů – Kritéria přípustnosti pro radiografické zkoušení*
- [30] ČSN EN ISO 17637, *NDT zkoušení svarů – Vizuální kontrola tavných svarů*
- [31] ČSN EN ISO 14921, *Žárové stříkání – Postup nanášení povlaků na strojírenské součásti*
- [32] ČSN EN ISO 15520, *Žárové stříkání – Doporučení pro konstrukční řešení součástí s žárovými nástřiky*
- [33] ČSN EN ISO 12679, *Žárové stříkání – Doporučení pro žárové nástřiky*

Seznam obrázků

Obr. 1: Zóny svarového spoje	10
Obr. 2: Napojení potrubních tras parogenerátoru VVER 1000MW	10
Obr. 3: Postup opravy nátrubku N6.....	12
Obr. 4: Používaná konstrukční provedení svarových spojů	13
Obr. 5: Poškození heterogenního svarového spoje.....	14
Obr. 6: Schaefflerův diagram	15
Obr.7: Makrosnímek SSC porušení materiálu 316Ti.....	17
Obr. 8: Mikrosnímek SSC interkrystalické trhliny	17
Obr. 9: Mikrosnímek SEM lomové plochy	18
Obr. 10: Makrosnímek lomové plochy.....	18
Obr. 11: Schéma zařízení pro nástřik plamenem.....	21
Obr. 12: Schéma zařízení pro nástřik obloukem	22
Obr. 13: Schéma zařízení pro detonační nástřik.....	22
Obr. 14: Schéma metody HVOF	23
Obr. 15: Morfologie laserem přetavené vrstvy (ŘEM)	25
Obr. 16: Geometrie svarových ploch a postup svařování.....	30
Obr. 17: Geometrie svarových ploch a postup svařování.....	30
Obr. 18: Geometrie svarových ploch a postup svařování.....	31
Obr. 19: Geometrie svarových ploch a postup svařování.....	32
Obr. 20: Vzorky heterogenních svarových spojů	32
Obr. 21, 22: Radiografická kontrola vzorků.....	36
Obr. 23: Ukázka rentgenogramu svarového spoje vzorku SV-07/1	36
Obr.24: Povlak aplikovaný metodou AS.....	37
Obr.25: Povlak aplikovaný metodou HVOF	38
Obr.26: Vzorek s aplikovaným laserovým přetavením povrchu	38
Obr. 27, 28: Příprava vzorků a aplikace inhibičního přípravku	39
Obr. 29, 30: Příprava metalografických vzorků	39
Obr. 31: Mikrostruktura oceli 12022.1(100x)	40
Obr. 32: Mikrostruktura oceli 12022.1 (200x)	40
Obr.33: Mikrostruktura svarového kovu (100x)	40

Obr.34: Mikrostruktura svarového kovu (200x)	40
Obr.35: Mikrostruktura svarového kovu (100x)	41
Obr.36: Mikrostruktura svar. kovu (200x)	41
Obr. 37: Linie ztavení.....	41
Obr. 38: Rozhraní svarového spoje austenit / ferit (200x zvětšeno).....	42
Obr. 39: Vtisky měření průběhu tvrdosti SV-07	42
Obr. 40: Vtisky měření průběhu tvrdosti SV-10	42
Obr. 41: Morfologie povlaku AS (50x).....	43
Obr. 42: Morfologie povlaku HVOF(100x).....	43
Obr. 43: Vrstva LSR (200x).....	44
Obr. 44: Příčná zkouška tahem.....	45
Obr. 45: Ztráta adheze povlaků	45
Obr. 46: Rozmístění vzorků v komoře	46
Obr. 47: Vzorky po ukončení expozice.....	46
Obr. 48: Referenční vzorek	47
Obr. 49: Nástřik AS.....	47
Obr. 50: Nástřik HVOF	47
Obr. 51: Referenční vzorek / inhibitor	47
Obr. 52: Vzorek LSR.....	47
Obr. 53, 54: Příprava metalografických výbrusů po expozici.....	48
Obr. 55: Povlak AS, substrát 12022.1 (100x)	48
Obr. 56:Povlak AS, substrát 08Ch18N10T(100x)	48
Obr. 57: Povlak HVOF, substrát 12022.1 (100x).....	49
Obr. 58:Povlak HVOF, substrát 08Ch18N10T(100x).....	49
Obr. 59: Korozní napadení referenčního vzorku	49
Obr. 60: Korozní napadení vzorku s povlakem HVOF	49
Obr. 61: Korozní napadení referenčního vzorku (100x)	50
Obr. 62: Koroze vzorku LSR (100x).....	50
Obr. 63: Ztráta adheze povlaku HVOF po expozici.....	51
Obr. 64: Ztráta adheze povlaku AS po expozici.....	51
Obr. 65: Korozní produkty pod nástřikem HVOF.....	51
Obr. 66: Korozní produkty pod nástřikem AS	51

Seznam tabulek

Tab. 1: Značení vzorků experimentálního programu	29
Tab. 2: Svařovací parametry (SV-07/1 až SV-07/3)	30
Tab. 3: Svařovací parametry (SV-07/4 až SV-07/6)	31
Tab. 4: Svařovací parametry (SV-10/1 až SV-10/3)	31
Tab. 5: Svařovací parametry (SV-10/4 až SV-10/6)	32
Tab. 7: Požadované minimální mechanické vlastnosti oceli 08Ch18N10T	33
Tab. 8: Chemické složení oceli 12022.1	33
Tab. 9: Minimální požadované mech. vlastnosti oceli 12022.1	33
Tab. 10: Chem. složení SV-07Ch25N13	33
Tab. 11: Minimální požadované mech. vlastnosti SV-07Ch25N13	34
Tab. 12: Chem. složení SV-10Ch16N25AM6	34
Tab. 13: Minimální požadované mech. vlastnosti SV-10Ch16N25AM6.....	34
Tab. 14: Chemické složení nástřikového kovu.....	37
Tab. 15: Měření tvrdosti vrstev	44
Tab. 16: Hodnoty naměřené tvrdosti vrstev	50

Seznam příloh

Příloha 1: Vzorek SV-07/1 po expozici.....	62
Příloha 2: Vzorek SV-07/2 po expozici.....	63
Příloha 3: Vzorek SV-07/4 Po expozici.....	64
Příloha 4: Vzorek SV-07/5 Po expozici.....	65
Příloha 5: Vzorek SV-07/6 po expozici.....	66



Příloha1: Vzorek SV-07/1 po expozici



Příloha 2: Vzorek SV-07/2 po expozici



Příloha 3: Vzorek SV-07/4 Po expozici



Příloha 4: Vzorek SV-07/5 Po expozici



Příloha 5: Vzorek SV-07/6 po expozici