

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3911T016 Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh a kvalifikace oprav svarových spojů na JE metodou WELD OVERLAY

Autor: **Michal Norek**
Vedoucí práce: **prof. Dr. Ing. Antonín Kříž**

Akademický rok 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal NOREK**
Osobní číslo: **S15N0107P**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie**
Název tématu: **Návrh a kvalifikace oprav svarových spojů na JE metodou WELD OVERLAY**
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 :

Osnova diplomové práce:

1. Úvod - motivace
2. Obecné požadavky na provedení WOL na JE
3. Požadavky na svařovací zařízení
4. Kvalifikace postupu svařování - WPQR, WPS
5. NDT, DT kontroly provedených svarových spojů
6. Diskuze výsledků
7. Závěr

Seznam odborné literatury:

FOLDYNA, V. a kol. Materiály a jejich svařitelnost Ostrava 1999, 296 s.

KOVAŘÍK, R. Technologie svařování 1. vyd. Plzeň, ZČU, 1993

Overlay Handbook: Part 1 - Welding Procedures Part 2 - NDE EPRI, Palo Alto, CA: 2010. 1021075

Welding and Repair Technology Center: Nuclear Weld Overlay Training EPRI, Palo Alto, CA: 2010. 1021173

Application and Repair of Overlay Welds EPRI, Palo Alto, CA: 2005. 1009755

Welding and Repair Technology Center: Repair Welding Handbook EPRI, Palo Alto, CA: 2012. 1025160

Vedoucí diplomové práce:

Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž

Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Konzultant diplomové práce:

Ing. Zdeněk Čančura

ČEZ, a. s.

Ostatní konzultanti:

Ing. Jiří Hajdík

ČEZ, a. s.

Datum zadání diplomové práce: **19. září 2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **2. června 2017**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž
vedoucí katedry

V Plzni dne 19. září 2016

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 Norek	Jméno Michal		
STUDIJNÍ OBOR	3911T016 „Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“			
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) prof. Dr. Ing. Kříž	Jméno Antonín		
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KMM			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Návrh a kvalifikace oprav svarových spojů na JE metodou WELD OVERLAY			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2017
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	62	TEXTOVÁ ČÁST	62	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Tato diplomová práce se zabývá novým způsobem oprav svarových spojů na JE v České republice. Nová metoda oprav svarových spojů je efektivnější a rychlejší než původní metody oprav. Principem je, že se provede návar na původní svarový spoj, kde byla indikována trhlina a tento návar vytvoří bandáž k zastavení šíření trhliny. Metoda se testuje pro materiály 22K a 08Ch18N10T. Jako přídatný materiál je použit Inconel 52M. Zkušební vzorky jsou vyrobeny ve stejném měřítku jako originální vzorky. Na vzorcích se provádí různé testy například: vyhodnocování makrostruktury a mikrostruktury, měření tvrdosti, zkouška rázem v ohybu, zkoušky mezi krystalové koroze a zkoušky koroze. Nakonec jsou naměřené výsledky porovnány a diskutovány.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>Weld Overlay, Opravy svarů na JE, mezi krystalové koroze, Horké trhliny, Inconel 52M, Heterogenní svarové spoje, ocel 22K, zkoušky koroze.</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Norek	Name Michal	
FIELD OF STUDY	3911T016 „Materials Engineering and Engineering Metallurgy“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) prof. Dr. Ing. Kříž	Name Antonín	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKM		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Design and qualification repairs of welds by Weld OverLay (WOL) method		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2017
----------------	---------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	62	TEXT PART	62	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	<p>This thesis solves the new method of repair of welds. This method of repair is named WOL (overlay). The new method is more economical and cheaper than current method. The principle of the WOL method is the overlay weld on original weld, where the defect is indicated. In the Czech nuclear power plant the Russian materials are used. These are carbon steel 22K and austenitic steel 08Ch18N10T. The most common types of welds are the heterogeneous or the homogenous welds. Inconel 52M is used as the weld metal. The samples are made in a scale as the original weld on the steam generator. On the sample are executed the different tests. To give an example, these are the macrostructure, the microstructure, the hardness measurement and notch toughness test. The master problem with welds are the intergranular corrosion. Among the crystalline corrosion are performed several tests. Finally the results are compared and assessed.</p>
KEY WORDS	<p>Weld Overlay, Repairs of welds, Among the crystalline Corrosion, Hot Cracks, Inconel 52M, Heterogeneous Welds, 22K Steel, Corrosion Tests.</p>

Poděkování

Nejprve bych chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce prof. Dr. Ing. Antonínu Křížovi za jeho odborné vedení, pomoc s experimentální částí a za poskytované konzultace.

Dále bych rád poděkoval zaměstnancům firmy ČEZ a.s., konzultantům Ing. Zdeňku Čančurovi, Ing. Jiřímu Hajdíkovi za uvedení do problematiky, možnosti zúčastnit se zhotovení návaru a za poskytnutí vzorků. Ing. Marku Palánovi a Ing. Jaroslavu Bromovi za poskytování materiálů a konzultací ohledně řešené problematiky.

Dále bych chtěl poděkovat pracovníkům Katedry materiálů a strojírenské metalurgie Ing. Ondřeji Chocholatému, Ph.D., Ing. Petru Benešovi, Ph.D., Ing. Milanu Vnoučkovi, Ph.D. a Ing. Michaelle Novákové za pomoc při experimentální části a za cenné rady. A samotné Katedře materiálu a strojírenské metalurgie za možnost vybavení pro uskutečnění experimentální části.

Výsledky diplomové práce byly finančně podpořeny Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy - projekt LQ1603 "Výzkum pro SUSEN". Práce byla realizována na velké infrastruktuře "Udržitelná energetika (SUSEN)" vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0108. Dále diplomová práce vznikla na základě řešení studentského projektu SGS – 2016-036 „Analýza, vývoj a modifikace strojírenské technologie v oblasti objemového zpracování moderních materiálů, využívaných v oblasti energetických strojů, dopravních prostředků a souvisejících strojírenských aplikací.“

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	11
1. Úvod	12
1.1 Současný stav oprav svarových spojů na JE	12
1.2 Porovnání metody WOL se standardními způsoby oprav	13
2. Princip metody WOL	13
2.1 Postup provedení návaru metodou WOL	14
2.2 Vady a jejich rozsah opravitelný metodou WOL	14
2.3 Typy návarů	15
2.3.1 Úplný konstrukční návar FSWOL	15
2.3.2 Optimalizovaný konstrukční návar OWOL	16
3. Použití WOL	16
3.1 Z materiálového hlediska	16
3.1.1 Homogenní svarový spoj	16
3.1.2 Heterogenní svarový spoj	17
3.2 Z konstrukčního hlediska	17
3.2.1 Standardní provedení návaru	18
3.2.2 Nestandardní provedení návaru	18
4. Výhody a nevýhody metody WOL	18
4.1 Výhody metody WOL	18
4.2 Nevýhody metody WOL	19
5. Legislativa v ČR pro WOL	19
5.1 Normativně technická dokumentace v ČR	19
5.2 Stanovisko SÚJB	20
6. Obecný postup provádění oprav metodou WOL	20
6.1 Technologie provádění WOL	20
7. Zařízení pro provádění oprav svarových spojů metodou WOL	21
7.1 Orbitální svařování	21
7.1.1 Princip metody	22
7.1.2 Požadavky na svařovací zařízení	22
7.2. Výpočtová část návrhu opravy WOL	22
8. NDT kontroly	23
10.1 Phased array	24
11. Zkouška mezi krystalové koroze	25

12. Úvod do experimentální části	26
12.1 Návrh experimentální části	27
13. Zkušební vzorky	27
13.1 Rozměry zkušebních vzorků	27
13.2 Rozměry zhotoveného zkušební vzorku 1 (trubka 22K)	28
13.3 Základní rozměry zkušební vzorku	28
13.4 Základní materiály	29
13.4.1 Jakostní uhlíková ocel 22K	29
13.4.2 Chromniklová austenitická ocel 08Ch18N10T	29
13.5 Přídavné materiály	30
13.5.1 Arcaloy ER308L	30
13.5.2 Inconel 52M	30
13.6 Kontrola vstupního materiálu	30
13.6.1 Kontrola chemického složení pomocí GDOES	30
13.6.2 Kontrola mikrostruktury základního materiálu	31
13.6.3 Kontrola tvrdosti ZM	31
14. Hodnocení svařitelnosti	31
14.1 Problematika horkých trhlin	32
15. Dokumenty pWPS a pWPQR	33
15.1. Vyhodnocení potřebných oprávnění svářeče	34
15.2 Dokumentace pWPS	34
15.3 Předběžná specifikace postupu svařování pWPS	35
15.4 Formulář protokolu o kvalifikaci postupu svařování (pWPQR)	36
16. Návrh NDT a DT zkoušek	36
17. Průběh svařování	37
18. NDT kontrola ultrazvukem	38
19. Hodnocení makrostruktury a mikrostruktury	39
19.1 Metalografická příprava vzorků	40
19.2 Hodnocení makrostruktury	41
19.2.1 Makrostruktura HTG svarového spoje	41
19.2.2 Snímek makro sturktury aplikace WOL na 22K	42
19.3 Hodnocení mikrostruktury	43
19.3.1 Mikrostruktura ZM 22K	43
19.3.2 Mikrostruktura přechodového materiálu ER308L	44
19.3.3 Mikrostruktura přídavného materiálu Inconel 52M	44
19.3.4 Mikrostruktura přechodových oblastí	45

19.3.5 Teplem ovlivněná oblast (TOO).....	47
20. Hodnocení MKK a zkoušky koroze	50
20.1. Hodnocení MKK	50
20.2 Zkoušky koroze	52
21. Mechanické zkoušky rázem v ohybu, tahem a měření tvrdosti.....	55
21.1 Zkouška rázem v ohybu.....	55
22.2 Tahová zkouška	57
22.3 Zkoušky tvrdosti	57
23. Diskuze výsledků.....	59
24. Závěr.....	60
Použitá literatura.....	61

Seznam použitých zkratk a symbolů

WOL	Weld overlay
OWOL	Otimalized weld overlay
FSWOL	Ful structure weld overlay
NDT	Nedestruktivní
DT	Destruktivní
HMG	Homogenní
HTG	Heterogenní
WIG	Wolfram inert gas
WPS	Welding procedure specification
WPQR	Welding Procedure Qualification Record
JE	Jaderná elektrárna
NTD	Normativně technická dokumentace
ASI	Asociace strojních inženýrů
SÚJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost
MKK	Mezi krystalová koroze
ZM	Základní materiál
PM	Přídavný materiál
SS	Svarový spoj

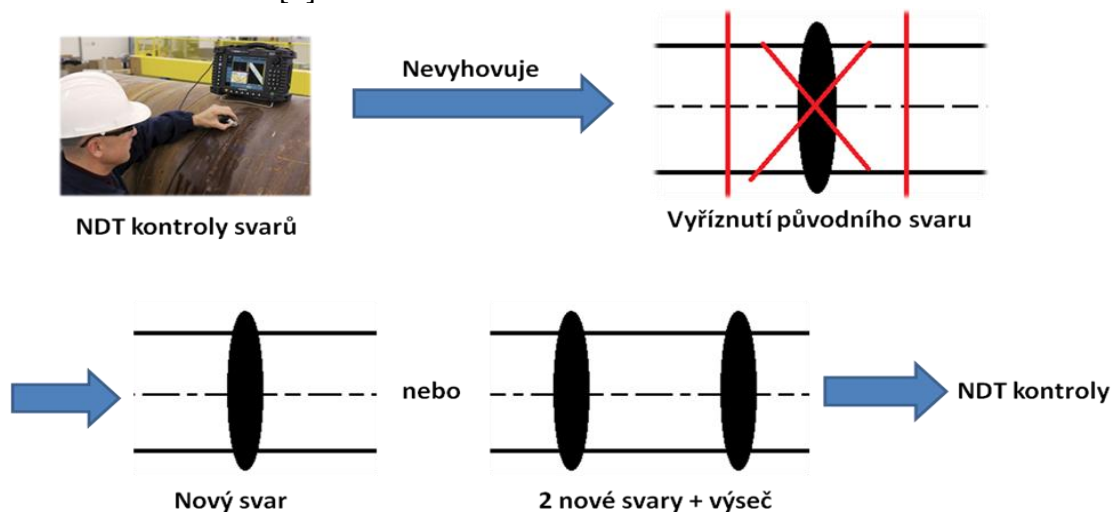
1. Úvod

Jaderný průmysl je dnes jeden z nejvíce prověřovaných a kontrolovaných průmyslů na světě. V důsledku vysoké hrozby nebezpečí, hrozbou uniku radioaktivního materiálu a ozáření nebo výbuchu. Největší hrozbou je zneužití jaderného materiálu k nezákonným účelům. Proto je důsledně kontrolována dozorčími orgány, v České republice to je SÚJB. Zejména na primární okruh JE se klade vysoký důraz. Proto se kontrolují nejproblémovější místa, což jsou zejména svary. Kontrolované svary po několika letech provozu vykazují defekty, které je nutné opravit. Dnešní postupy opravy svarových spojů jsou neefektivní a velmi obtížné, proto je nutné přejít na optimálnější formu opravy, kterou nabízí metoda WOL. Princip této metody je podrobně popsán v další kapitole.

Pro každou novou navrženou metodu použitou v jaderném průmyslu je nutné provést kvalifikaci, aby mohla být schválena SÚJB. Po kladném schválení SÚJB, může být aplikována na JE. Cílem následující práce je provést několik zkoušek zhotoveného návaru, které jsou nutné pro úspěšnou kvalifikaci. Jelikož se jedná o postup, který je nestandardní a není dán normou, je nutné stanovit specifické zkoušky.

1.1 Současný stav oprav svarových spojů na JE

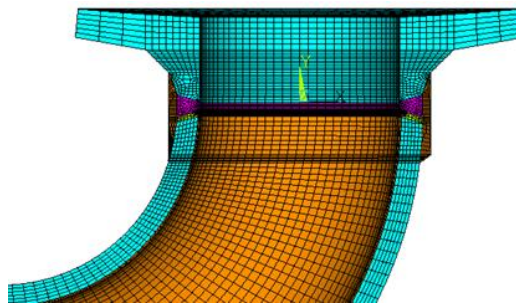
Dnešní legislativa, která se drží původního ruského projektu, má velmi přísné požadavky na svarové spoje v primární okruhu JE. Přesně stanovuje přípustné trhliny, vměstky a dodržení postupů kontrol. Po nevyhovující kontrole je svar mechanicky odstraněn (odřezán) speciálním zařízením. Zařízení objednala z Francie Škoda JS a.s. a také ho vyzkoušela. Umí připravit plochy vhodné pro budoucí svar, vytvoření příslušných úkosů. Chybějící díl se znovu svaří novým přidavným materiálem. Pokud by došlo k odstranění velkého kusu materiálu, kterou by nebylo možné vyplnit svarovým kovem, je nutné tento úsek nahradit výsečí. Nahrazení chybějícího kusu výsečí má za následek vznik dalšího svaru. Pokud se svar nachází ve zdi a není umožněna jeho kontrola, je nutné tuto část vyříznout a nahradit výsečí. V případě HTG svarů může mít výseč výhodu v tom, že je již ve výseči připraven problémový HTG svarový spoj a do potrubního systému ho pak navaříme již HMG svarovými spoji. Po dokončení svaru je nutné vytvořený svar překontrolovat některou z NDT kontrol. Na současnou metodu jsou potřeba vysoce kvalifikovaní svářeči a veškerá příprava je velmi časově náročná. Současný stav opravy svarových spojů je znázorněn na Obr. č. 1. [8]



Obr. č. 1 - Schéma současné metody opravy svarových spojů

1.2 Porovnání metody WOL se standardními způsoby oprav

Metoda WOL je chápána jako metoda opravy, jedná se o návar na původní svar a přilehlé části potrubí. Provádí se buď svar preventivní, nebo svar opravný. Takto zesílený svarový spoj by měl umožnit přenést požadované zatížení a zamezit šíření trhliny, nebo jiného defektu. U této metody se nejedná o opravu původního svaru, ale pouze o zesílení svarového spoje vytvořením návaru. Jedná se o „bandáž“ svarového spoje. Touto metodou se mohou opravovat méně porušené a nevyhovující svary. Oproti současnému stavu opravy odpadá odříznutí starého svaru, zarovnání ploch a vytvoření úkosu, nebo nahrazení částí výsečemi. Tato metoda je oproti původní rychlá, velmi efektivní a ekonomicky méně náročná. Dnešní požadavky na opravu svarů jsou: snížení časové náročnosti, jednoduchá oprava obtížně proveditelných svarů standardními způsoby při dodržení požadovaných mechanických vlastností daného svaru. Touto metodou je možné opravovat jak HTG, tak HMG svarové spoje. [8,3,4]



Obr. č. 2 - Příklad softwarově simulovaného návaru metodou WOL [20]

2. Princip metody WOL

Metoda Weld OverLay (WOL) se začala používat v roce 1980. Nejprve se využívala u varných reaktorů BWR. U svarových spojů, které byly náchylné na korozní praskání. Pro tuto metodu byl vyvinut speciální přídavný materiál s označením Inconel 52, který byl velmi náchylný na tvorbu horkých trhlin a na MKK. Inovací tohoto přídavného materiálu je materiál Inconel 52M, který velmi snížil náchylnost k tvorbě horkých trhlin a MKK. Na tlakovodních reaktorech PWR byla metoda WOL aplikována od roku 2004. Nejčastěji se metoda WOL využívala pro HTG svarové spoje.

Metodou WOL je možné opravovat, jak HMG svarové spoje, tak HTG svarové spoje. Princip metody spočívá ve vytvoření návaru. Návary je možné dělit na několik druhů:

- Úplný konstrukční návar (FSWOL)
- Optimalizovaný konstrukční návar (OWOL).

Dále se rozděluje na:

- standardní - používá se na spoje se stejnou geometrií
- nestandardní - u spojů s rozdílnou geometrií

Jedná se o návar, který překrývá dva spojované materiály a původní svar. Návarem také dojde k zvětšení tloušťky stěny. Čímž se zmírní následky defektu, který byl ve vnitřní části svaru vytvořen.

Svarové housenky se nanášejí na vnější stranu potrubí, konstrukční části, nebo na připojovací svarové spoje. Volí se takový návar, aby svarový spoj byl schopen přenést navrhované zatížení. Při návrhu se neuvažuje původní svarový spoj pod návarem.

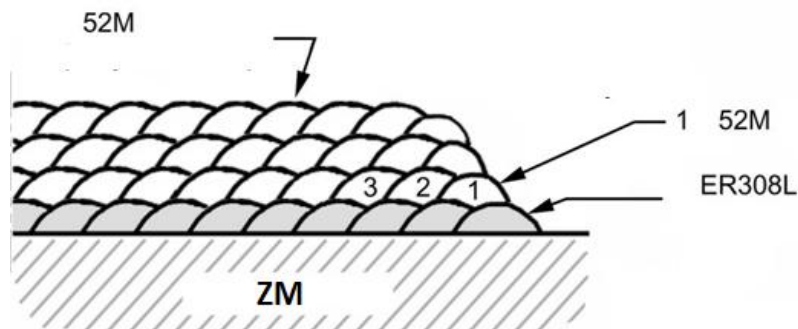
Návary se praktikují z několika důvodů, a to preventivní návar nebo opravný návar. U preventivního návaru se provádí tento postup z preventivních důvodů, a to pokud nebyly objeveny žádné defekty ve svaru, přesto je z preventivních důvodu tento svarový spoj zajištěn v případě, pokud by defekt za provozu v budoucnu vznikl. U opravného návaru se tento postup použije v případě, kdy byl ve svaru zjištěn některý z defektů, také se provádí tam, kde není možná kontrola. [3,4,5]

2.1 Postup provedení návaru metodou WOL

Přídavný materiál pro návar je z austenitické korozivzdorné oceli nebo z niklové slitiny. Pro samotné navařování lze použít, jak standardní svařovací zařízení, tak nejmodernější automatizované svařovací zařízení. Před samostatnou aplikací materiálu 52M je nutné provést vyrovnávací vrstvu. Vyrovnávací vrstva se provádí z důvodu snížení horkých trhlin. Materiál je austenitický a dobře spotřebovává plastické deformace. Vyrovnávací vrstva se provádí navařením materiálu, například ER308L. Materiál se navařuje postupně v housenkách a musí být navařen po celém obvodě 360 °. Housenky by měly být rovnoměrné, proto se tyto svary provádí na automatech a pro potrubí je velmi vhodné použít orbitální svařování. Jako zdroj tepla pro navařování může být použito:

- kyslík - acetylenový plamen
- elektrický oblouk
- plazma
- laser

Dále je nutné zvolit, zda bude návar prováděn automatizovaně robotem, nebo ručně. Dnešní doba se snaží vše automatizovat, jelikož stále více selhává lidský faktor. Pro automatizaci a bezproblémovou regulaci svářecích parametrů je jako zdroj tepla vybrán elektrický oblouk a metoda svařování WIG (TIG). Po vytvoření návaru je nutné provést NDT kontroly samotného návaru. A to z důvodu jestli nedochází k tvorbě horkých trhlin a jiných defektů. Na metodu opravy metodou WOL jsou kladeny vysoké důrazy na čistotu návaru. [4,5]



Obr. č. 3 - Příklad pokládání housenek [4]

2.2 Vady a jejich rozsah opravitelný metodou WOL

Metodu WOL je možné aplikovat, pouze pokud vada nepřesahuje stanovené limity. Touto metodou se opravují například trhliny vzniklé korozním praskáním po hranicích zrn. Korozní praskání vzniká heterogenitou svaru a jinými potenciály mezi spojenými kovy. Další defekty, které se touto metodou opravují, jsou trhliny vzniklé namáháním svarového spoje a trhliny vzniklé nečistotou materiálu. Pokud jsou viditelné ve svarovém spoji vměstky, je možné tento svar opravit metodou WOL. Ruský normativ PK15-14, podle

kterého se hodnotí přípustné defekty ve svarech, je velmi přísnější než evropský nebo americký. Například se zde nepovolují relativně malé vměstky ve svaru, sulfidické vměstky, které v oblasti svarových spojů jsou zcela nežádoucí. [3,4,5]

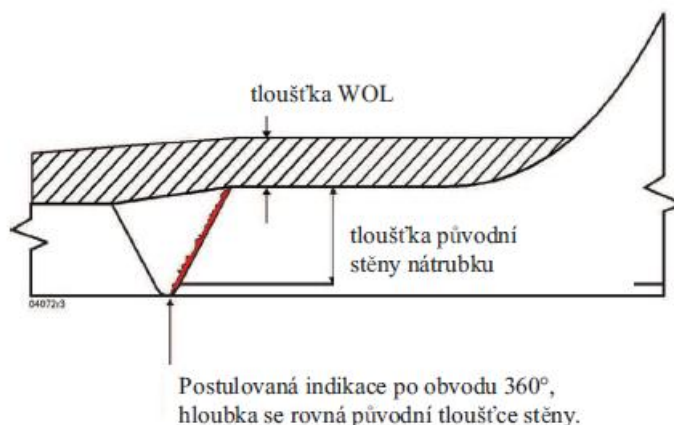
Normativní přípustné lineární defekty pro feritické materiály:

Kontrola	Nominální tloušťka t [mm]					
	menší než 8	8	25	50	75	100 a větší
Povrchová kontrola PT, MT						
Před provozní kontrolou ²						
Délka defektu [mm]	1,5	3,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Provozní kontrola ²						
	5,0	5,0	8,0	16,0	22,0	22,0
Objemová kontrola RT						
Před provozní kontrolou ³						
Délka povrchového defektu [mm]	-	3,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Délka podpovrchového defektu [mm]	-	6,0	9,0	19,0	25,0	25,0
Provozní kontrola ³						
Délka povrchového defektu [mm]	-	5,0	8,0	16,0	22,0	22,0
Délka podpovrchového defektu [mm]	-	6,0	9,0	19,0	30,0	36,0

2.3 Typy návarů

Jednotlivé typy návaru se rozlišují dle indikace defektu. Pokud je defekt indikován v 75% tloušťky stěny a 25% je bez indikace, pak se může udělat návar o 25% nižší. Tento druh návaru se nazývá Optimalizovaný konstrukční návar OWOL. Tloušťka návaru je menší, je optimalizovaná. Pokud se trhлина detekuje u povrchu svaru nebo nelze přesně určit její hloubku a velikost, je nutné provést Úplný konstrukční návar FSWOL. [3,4]

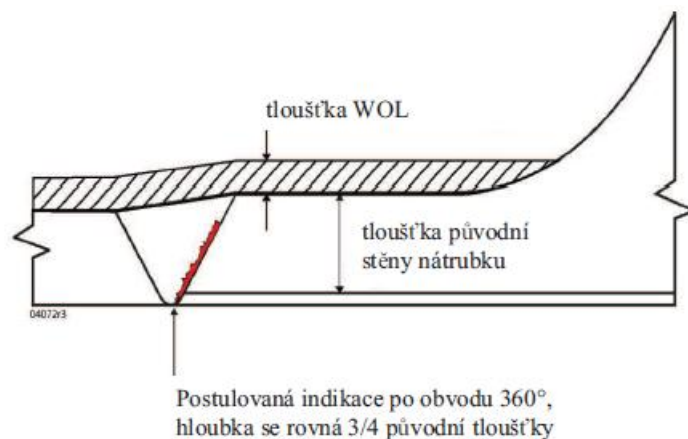
2.3.1 Úplný konstrukční návar FSWOL



Obr. č. 4 - FSWOL úplná konstrukční návar (plná integrita) [6]

Svarové housenky pro zesílení tloušťky stěny jsou nanášeny na vnější povrch potrubí, konstrukční části nebo na přípojovací svarové spoje tak, aby zesílený svarový spoj byl schopen přenést návrhové zatížení, bez uvažování potrubí, konstrukční části nebo přípojovacího svarového spoje pod zpevňujícím návarem. Úplný konstrukční návar může být, buď preventivní, nebo opravný. [3,4,5]

2.3.2 Optimalizovaný konstrukční návar OWOL



Obr. č. 5 - OWOL optimalizovaný konstrukční návar [6]

Svarové housenky pro zesílení tloušťky stěny jsou nanášeny na vnější průměr potrubí, konstrukční části nebo přípojovací svarové spoje tak, aby vyztužující návar byl schopen přenést návrhové zatížení. V 25% tloušťky od povrchu nesmí být indikována trhlinka ani jiný defekt. Pak o 25% může být návar snížen. Optimalizovaný konstrukční návar může být buď preventivní, nebo opravný. [3,4,5]

3. Použití WOL

Metoda WOL se používá u různých typů svarových spojů. Spoje HMG nebo HTG, kde hrají roli materiály, které spojujeme. Další roli hraje konstrukční hledisko svarového spoje. [6]

3.1 Z materiálového hlediska

Z materiálového hlediska se dělí svarové spoje na homogenní (HMG) a heterogenní (HTG). U HMG svarových spojů jsou oba základní materiály stejné. U HTG svarového spoje se dva základní materiály liší. [1,7]

3.1.1 Homogenní svarový spoj

U homogenního svarového spoje se spojují dva stejné materiály a jako svarový kov (přidavný materiál) se použije stejný materiál. Jedná se o spojení dvou austenitických materiálů například používaná ocel u JE 08Ch18N10T, nebo dvou uhlíkových ocelí 22K, 10GN2MFA. Označení těchto ocelí je podle ruské normy GOST. U heterogenních svarů odpadá problém s volbou přechodového materiálu, přechodový materiál se použije stejný, jako materiál základní. U heterogenních svarových spojů nastává problém, a to s volbou přechodového materiálu. Vlivem roztažnosti a elektro potenciálu zvolených materiálů dochází ke koroznímu praskání pod napětím a tvorbě horkých trhlin. [2]

3.1.2 Heterogenní svarový spoj

U heterogenního svarového spoje jsou spojeny dva rozdílné materiály. V některých literaturách se tento svarový spoj nazývá: kompozitní svarový spoj. Většinou se jedná o kombinaci uhlíkové a austenitické oceli. Pro svar je nutné použít přechodový materiál, který se navařuje na uhlíkovou ocel. U těchto svarů je největším problémem korozní praskání pod napětím, tvorba horkých trhlin a náchylnost na mezi krystalovou korozi vlivem tvorby precipitátů po hranicích zrn.

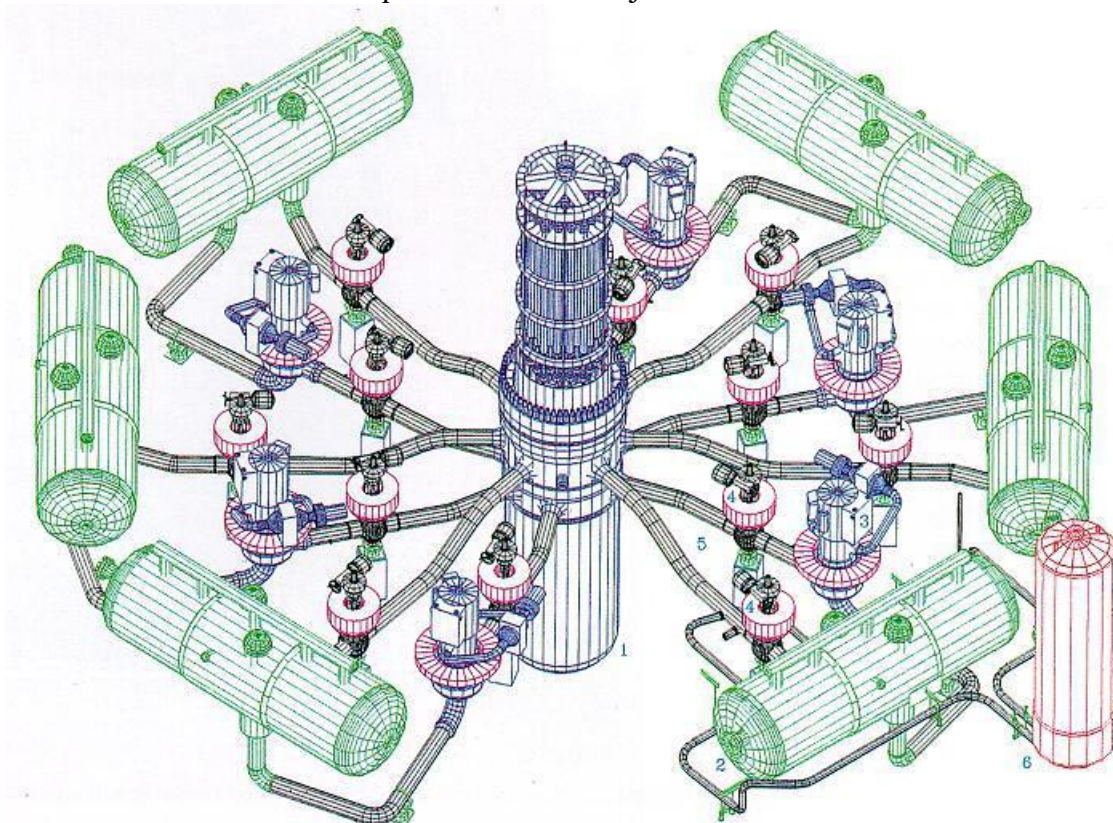
Metoda WOL je používána primárně pro zpevnění HTG svarových spojů. U HMG svarových spojů je opravný svar bezproblémový a později svarový spoj není náchylný na zmíněné problémy. [1]

3.2 Z konstrukčního hlediska

Z konstrukčního hlediska se bude lišit technologie navařování na tupém svarovém spoji, nebo na svarovém spoji v oblasti trubkové odbočky (nátrubku) z hlavního potrubí o větším průřezu.

Tupé svary jsou používány většinou při spojení potrubí stejného průměru (shodná geometrie), nebo v případě nátrubku pro napojení menšího potrubí do většího (rozdílná geometrie). Primární okruh se skládá z reaktorové tlakové nádoby, parogenerátorů, kompenzátoru objemu, hlavního cirkulačního čerpadla, potrubí a mnoha čidel teplot a tlaku. Všechny tyto členy vyžadují aplikaci některého z těchto typů svarů.

Schéma Dukovanského primárního okruhu je možné vidět na Obr. č. 6.



Obr. č. 6 - Schéma primárního okruhu JE DUKOVANY [10]

3.2.1 Standardní provedení návaru

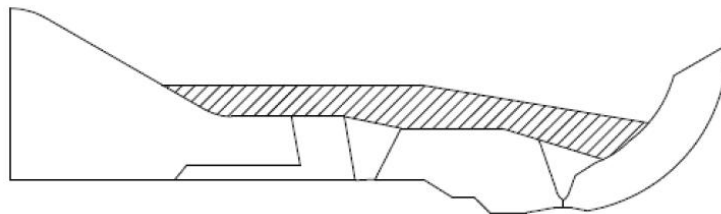
Používá se u svarů stejného, nebo podobného průřezu či geometrií. Obvykle je vytvořen u spojů trubka - trubka, nátrubek k uzavíracímu svaru potrubí, příruby apod. [3,4,5]



Obrázek 7 - Příklad aplikace standardního provedení WOL [8]

3.2.2 Nestandardní provedení návaru

Používá se u svarových spojů s rozdílnou geometrií. Například pro expandéry, některé svarové spoje ústící do parogenerátorů. Redukce průměru, nebo některé zužující se komponenty. Toto provedení bude aplikováno na „superhavarijním“ nátrubku parogenerátoru v Dukovanech.[3,4,5]



Obr. č. 8 - Příklad aplikace nestandardního provedení WOL [8]

4. Výhody a nevýhody metody WOL

Každá navržená metoda se snaží vždy přinést něco nového a je výhodnější, než původní používané postupy. Odstraňuje nevýhody původní metody, avšak zřídka se daří metody optimalizovat tak, aby nevýhody byly zcela odstraněny. [8,12]

4.1 Výhody metody WOL

Nyní se na jaderných elektrárnách opravují svary úplnou náhradou. Původní svar je vyříznut, hrany původního svaru jsou vybroušeny na potřebné úkosy. Svar se vyvařuje novým svarovým kovem. U HMG svarových spojů je svarový kov pouze jeden u HTG svarových spojů je nutné použít přechodový materiál, a tím se svarový spoj komplikuje. Může dojít i k tomu, že bude odstraněna velká část svaru a bude potřeba vložit výseč. Výseč je vložené potrubí o stejném průměru, jako je průměr potrubí. Tímto způsobem vzniknou z jednoho svaru, dva svary.

Není nutné popisovat, že tyto operace jsou velmi časově náročné. Také spotřeba materiálu je vysoká a kvalifikace svářečů musí být na vysoké úrovni. Z ekonomického hlediska je výhodnější oprava svarů metodou WOL, což je její hlavní předností a výhodou.

V jaderných elektrárnách je kladen nárok na zkrácení časů oprav. Den odstávky JE Temelín stojí 24 milionů korun. Aplikace metody WOL na vhodné svarové spoje by byla schopna tyto časy zkrátit téměř o polovinu a ušetřit náklady s tím spojené.

Touto metodou je možné opravovat místa, která jsou těžko přístupná. Mnoho svářečů dnes opravuje svary v nepříznivých podmínkách, např.: v těžko přístupných místech.

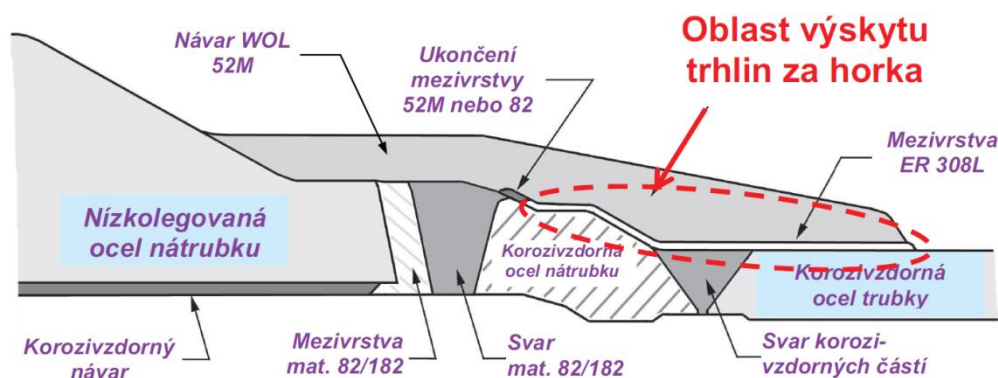
V některých částech primárního okruhu, v prostoru kontejnmentové zástavby je zde během provozu elektrárny, ale i mimo něj, vyšší teplota. Toto prostředí je v takovém případě pro svařeče nevhodné, je v něm náchylnější k chybování. Metoda WOL využívá plně automatizované orbitální svařování. [3,4,8]

4.2 Nevýhody metody WOL

Nevýhodou metody WOL je, že se nejedná o opravu samotného svaru a defekt v původním svaru stále zůstává. Ačkoliv svar vyhovuje po mechanické stránce a šíření těchto defektů je zastaveno, mohou zde vznikat jiná rizika. Při navařování na původní materiál, může dojít k odtržení návaru na jednom ze spojovaných dílů, tzv. trhliny vytvořené za horka.

Některé austenitické materiály obsahují legury například: síru, fosfor a křemík, které zvyšují náchylnost materiálu ke vzniku trhlín za horka. Zejména navařování Inconelu 52M na uhlíkovou ocel 22K, tyto materiály mají velmi rozdílné tepelné roztažnosti. Vlivem toho může docházet ke vzniku horkých trhlín, dále k tvorbě precipitátů, karbidů chrómu a tím se zvyšuje náchylnost oceli k praskání a MKK.

Tento problém lze kompenzovat aplikací a zvyšování tloušťky vyrovnávací vrstvy. Vyrovnávací vrstva má menší procento uhlíku a nižší koncentrace Ni a Cr.[3,4,5,8]



Obr. č. 9 - Oblast výskytu trhlín za horka [5]

5. Legislativa v ČR pro WOL

Vyhláška na provedení kvalifikace je dána požadavky SÚJB, ty jsou jasně dané, aby tato metoda byla kvalifikována, je nutné provést zkušební svar na modelu, který je v měřítku 1:1 vůči originálu vč. původního materiálu. Před samotnou kvalifikací, proběhla klasifikace, která zahrnovala simulace svarů, pomocí simulačního softwaru. Pro kvalifikaci je nutné na zkušebním svaru udělat DT a NDT zkoušky. Získaný výstup ze zkoušení musí vyhovovat předepsaným požadavkům. Při kvalifikaci se zhotoví pWPS a pWPQR, po svaření a zkoušení vzorků příslušným akreditovaným zkušebním orgánem, může být metoda kvalifikována a vydána finální WPS a WPQR.

Po splnění těchto požadavků, může být tato metoda schválena úřadem SÚJB a po schválení se může aplikovat na JE. [8]

5.1 Normativně technická dokumentace v ČR

V České republice byla poprvé po veřejném projednání vydána Normativně technická dokumentace Asociace strojních inženýrů (NTD A.S.I.), Sekce III k používání od 1. května

2001. V roce 2005 vydal Státní úřad pro jadernou bezpečnost dokument „Stanovisko SÚJB k použitelnosti NTD A.S.I.“ z 25.01.2005, kde doporučil k použití NTD A.S.I. jako celek, skládající se ze Sekce I, Sekce II, Sekce III a Sekce IV. Během následujících let byla NTD A.S.I. rozšířena o Sekci V, Sekci VI a Sekci Zvláštní případy. Vzhledem k rozšíření a aktuálním změnám NTD A.S.I. bylo dne 12. 12. 2013 vydáno „Stanovisko SÚJB k NTD A.S.I., Sekce I až VI a Zvláštní případy“, čj.: SÚJB/OPJZ/27534/2013, kde SÚJB doporučuje použití všech Sekcí NTD A.S.I. 2013 pro vybraná zařízení jaderných elektráren typu VVER, zařazená do bezpečnostních tříd dle ustanovení §2i) zákona č. 18/1997 Sb. a §13 vyhlášky 132/2008 Sb. [8]

5.2 Stanovisko SÚJB

SÚJB doporučuje použití NTD ASI-I-Z-5/07 pro vybraná zařízení jaderných elektráren typu VVER dle § 2 písm. i) zákona č.18/1997 Sb., zařazená do bezpečnostních tříd dle § 33 odst. 1 vyhlášky SÚJB č. 214/1997 Sb., pro přípravu, provádění, kontrolu a dokumentování svářečských prací při výrobě a montáži nových zařízení a potrubí, při výrobě a montáži či instalaci náhradních dílů a při opravách a rekonstrukcích zařízení a potrubí provozovaných JE. [8]

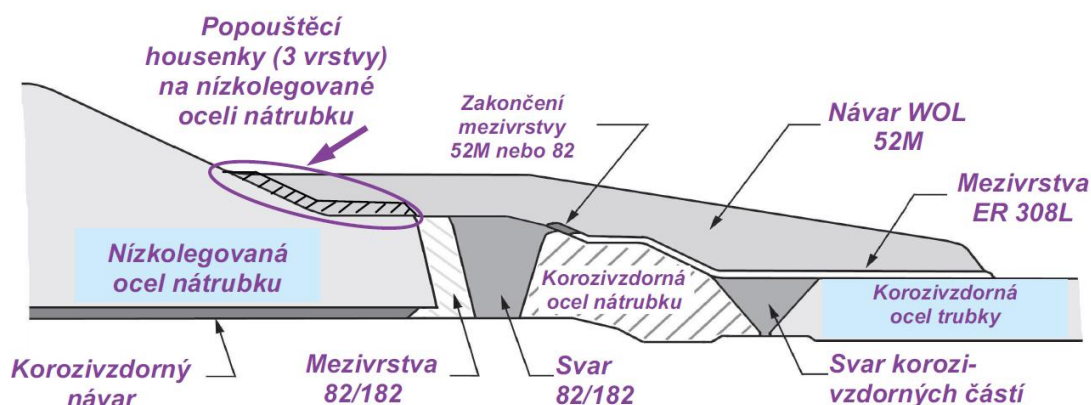
6. Obecný postup provádění oprav metodou WOL

Nejdříve se jednotlivé svary kontrolují pomocí NDT metod. Pokud svar vykazuje defekty, přistupuje se k návrhu technologie opravy metodou WOL. Dále se provádí návrh způsobu opravy. Na základě rozsahu defektů, tloušťek stěn a průměrů potrubí se vyhodnotí nejoptimálnější způsob opravy WOL.

1. variantní řešení - FSWOL OWOL
2. návrh základních rozměrů návaru
3. výpočtové posouzení - růst hypotetických defektů a výpočet zbytkových napětí po svařování
4. příprava svarového spoje a jeho povrchu pro provedení návaru (čistění, broušení, drsnost povrchu)
5. NDT kontroly před zahájením navařování
6. realizace návaru v souladu s platnou WPS
7. obnovení návaru po provedení NDT kontrol
8. NDT kontroly návaru
9. vyhodnocení NDT kontrol a celkové provedení opravy
10. svarový spoj vyhovuje/nevyhovuje [5,8]

6.1 Technologie provádění WOL

Metoda WOL se používá obvykle ke snížení vlivu korozního praskání pod napětím v jaderných elektrárnách a to zejména na potrubí primární části elektrárny.



Obr. č. 10 - Schéma provedení opravy metodou WOL [8]

Na Obr. č. 9 je zobrazeno schéma provedení opravy metodou WOL. Jedná se o nestandardní metodu opravy a o HTG svařový spoj. Je zde použita technologie pokládání popouštěcích housenek. Tato metodika pokládání housenek je alternativou k nutnosti tepelného zpracování po svařování. [5,6,8]

7. Zařízení pro provádění oprav svařových spojů metodou WOL

Pro navařování technologií WOL se používá tavná wolframová metoda WIG (TIG). Materiál tavné elektrody je čistý wolfram (označení PW). Jako svařovací zařízení se používá metoda automatizovaného orbitálního svařování.

7.1 Orbitální svařování

Orbitální svařování je oblast svařování, kde se hořák otočí o 360°. Orbitální hlava může být uzavřená nebo otevřená. Otevřená hlava umožňuje nasazování na potrubí bez přerušení. Je možné svařovat dvě a více housenek najednou a to naproti sobě, pak se úhel pootočení snižuje. Využívá se pro svařové spoje potrubí.

Celý tento proces svařování je naprosto automatický s minimálním zásahem obsluhy. Využívá se primárně pro sériovou výrobu, nebo tam kde je potřeba vysoké přesnosti svařovaných ploch. Nyní tato metoda zažívá velký rozmach z důvodu automatizování výrobních linek v provozech. [13,14,15]

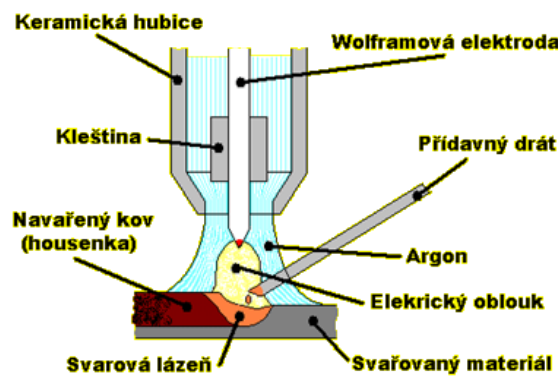


Obr. č. 11 - Ukázka orbitální hlavy

7.1.1 Princip metody

Pro orbitální svařování lze jako zdroj tepla využít mnoho zdrojů. Avšak z hlediska přesnosti, čistoty a širšího využití materiálu je nejčastěji pro tento typ svařování využívána metoda s tavnou elektrodou WIG. Přídavný materiál je drát, který se zcela automaticky odvíjí z podavače drátu, který je součástí hlavy. [15]

Princip používané metody WIG spočívá, že je materiál potrubí nataven tavnou elektrodou (nejčastěji wolframová elektroda). Celý tento proces probíhá v ochranné atmosféře interního plynu (nejčastěji argon). Tento proces probíhá s přídavným, nebo bez přídavného materiálu. Schéma této metody je zobrazeno na Obr. č. 15. [15,16]



Zařízení pro svařování obsahuje: řídicí jednotku, napájecí zdroj a regulátor, svařovací hlavu, mechanismus na podávání drátu. Případně se používá chladicí kapalina, například voda. [2,16]

Před samotným svařováním se nastavuje několik parametrů, mezi ty hlavní patří: svařovací rychlost, podávání přídavného drátu a příčné kývání WIG hořáku, což má vliv na kvalitu a tvar housenky. Toto je předepsáno v pWPS nebo WPS.[2,16]

Dále se na základě svařovaného materiálu volí vhodný přídavný materiál, vhodný inertní plyn, frekvence svařovacího proudu a vhodná rychlost svařování. Precizní nastavení těchto parametrů ovlivňuje kvalitu svaru. Všechny tyto parametry obsluha nastaví na řídicí jednotce. [2,16]

7.1.2 Požadavky na svařovací zařízení

Zařízení musí být automatizované. Parametry, které se monitorují: proud, posuv, teplota v závislosti na tvorbě defektů a trhlin. Kontroluje se správný odvod tepla. Tyto parametry se zjišťují kvalifikací. Vyhodnocení se provádí pomocí NDT a DT kontrol.

7.2. Výpočtová část návrhu opravy WOL

Výpočtová část návrhu probíhá dle příslušných standardů a norem pro daný typ opravy (FSWOL nebo OWOL). Obecně tyto dva typy obsahují následující postup:

1. Návrh rozměrů opravy metodou WOL s ohledem na statickou bezpečnost

Návrh výšky a šířky, provádí se dle standardu ASME Boiler and Pressure vessel Code Section XI, IBW-3640, (Evaluation Procedures and Acceptance Criteria for Austenitic Piping) příloha C, Code Cases N-754 [8], N-740-2 [10] a N-504-3 [8].

Délka návaru se rovná výpočtu okrajového defektu při napětí. Jednotky jsou v palcích.

$$0,75 \cdot (R \cdot t)^{\frac{1}{2}}$$

2. Návrh rozměrů WOL s ohledem na NDT kontroly

Navrhuje se kuželový přechod, délka překrytí, tloušťka návaru. Ta se navrhuje dle standardů ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XI, IWB-3640, (Evaluation Procedures and Acceptance Criteria for Austenite Piping) příloha C, Code Cases N-754 [8], N-740-2 [10] a N-504-3 [11] s ohledem na kontrolovanou oblast.

3. Výpočet zbytkových napětí

Výpočet se provádí nelineární zbytkovou analýzou procesu svařování a verifikace výsledků. Po svařování musí být zbytkové napětí tlakového charakteru, a to z důvodu eliminace korozního praskání pod napětím. Při zahrnutí provozního zatížení, musí být napětí na vnitřním povrchu menší než 69 MPa, a mělo by přes tloušťku stěny potrubí s návarem přecházet na tlakové napětí.

4. Posouzení růstu indikace způsobené korozním praskáním pod napětím

Provádí se ověřovací výpočty, které prokážou, že se vlivem zbytkových napětí nebudou indikace šířit.

5. Posouzení únavového růstu indikace

Provede se posouzení únavového růstu. Jedná se o indikace se zohledněním počtu zátěžových cyklů, teplotní stratifikace, vlivu svařování, tlakových zkoušek a dalších provozních stavů.

6. Posouzení únavové pevnosti

Provádí se výpočet zbytkové životnosti vzhledem k počtu cyklů provozních režimů posuzovaného bloku. Posuzují se vybraná kritická místa na vnitřním a vnějším povrchu opraveného potrubí.

7. Zhodnocení vlivu opravy na potrubní systém

Posouzení vlivu smrštění a to pomocí statického výpočtu (dodatečné zatížení způsobené opravou), nebo dynamického výpočtu (změna tuhosti způsobená při změně dynamické vlastnosti). [8]

8. NDT kontroly

Jako každý svar podléhá i metoda WOL kontrolám. Existuje několik možností NDT kontrol, které lze provádět na svarech opravené metodou WOL. Kontroly se obvykle provádí:

1. Před navařováním

Před samotným navařováním se provádí měření tvrdosti povrchu a rovinnost povrchu, dále kvalita povrchu a kontrola.

Povrch se kontroluje pomocí kapilární zkoušky, jestli neobsahuje trhliny a povrchové defekty. Po těchto kontrolách a jejich kladném výsledku se navařuje vyrovnávací vrstva. [8,9]

2. V průběhu navařování

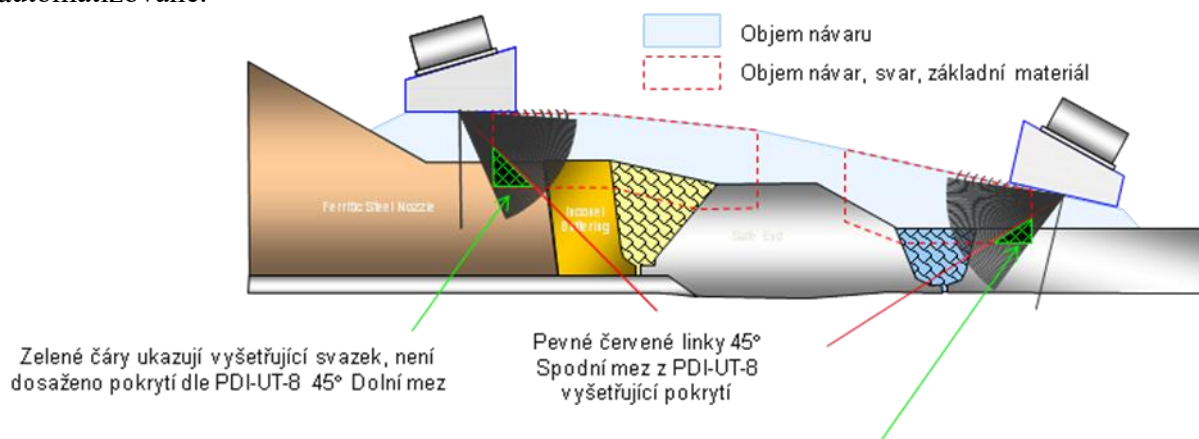
V průběhu navařování se kontroluje tloušťka návaru. Pomocí ultrazvukové kontroly se zjišťuje pokrytí svarovými housenkami a defekty vzniklé v návaru. [8,18]

3. Po dokončení navařování

4. Po obrobení návaru

Obecně se vytvořené navařené vrstvy kontrolují ultrazvukem nyní nejmodernější metodou Phased Array. Zřídka rentgenem. Kontroly probíhají na některých částech za provozu.

Výhodou ultrazvukové kontroly je, že nevydává škodlivé záření a je možné ji využít automatizovaně.



Obr. č. 13 - Ultrazvukové sondy kontrolující návar [18]

10.1 Phased array

Ultrazvuková metoda patří k nejpoužívanějším NDT zkouškám k identifikaci defektu ve svarech. Na JE se z 98 % případů dnes využívá tato metoda pro kontroly svarů. Využívá se vniku ultrazvukových vln do materiálu přes ultrazvukovou sondu. Ultrazvukových sond je celá řada, liší se úhlem vyzáření. Pokud se ve svaru nachází vada, dojde k odrazu vlny zpět do sondy a na přístroji se toto projeví ve formě "echa". To se vyhodnocuje a dá se zjistit, jak povrchové, tak objemové vady. Pomocí ultrazvuku se dá zjistit i hloubka a velikost defektu.

Nejnovější metodou dnes používanou na JE je metoda Phased array. *Phased Array technologie je časové řízení buzení jednotlivých měničů. Tato technika využívá sondy s fázovanou soustavou měničů – více měničové sondy, což nám umožňuje elektronicky vychylovat ultrazvukový svazek a případně ho fokusovat. Pokud je počet měničů sondy dost velký je možno na vytvoření svazku použít jen určitý počet měničů (např. 16 až 128) a postupným buzením svazku elektronicky posouvat podélně apertury sondy. Tak se dá bez nutnosti pohybu sondy realizovat B-scan, tzn. zobrazení průřezu prozvučovaného materiálu v určitém délkovém úseku. [8]*

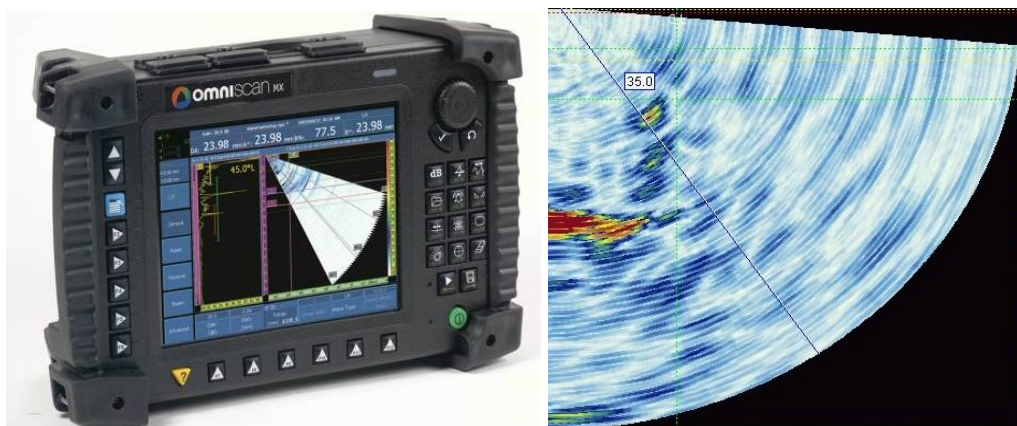
Výhody této metody jsou:

Možnost provádět kontrola všemi úhly současně (úhlový sektor S-Scan). Kontrola tedy probíhá i při nastavení úhlů, které nejsou předepsané, a je schopná detekovat vady s nevhodnou orientací.

Při zkoušení svarů je možnost z jediného místa sondou pokrýt celý objem svaru, tzn. kontrola v konstantní vzdálenosti od osy svaru.

Díky elektronickému naklánění měničů, je možnost kontroly ze špatně přístupných míst. Toho lze využít např.: při kontrole turbínových lopatek, nátrubků tlakových nádob apod.

Výhodou této metody je, že dnešní přístroje jsou velmi malé a přenosné a manipulace s nimi je velmi snadná a jejich použití je velmi efektivní. Na Obr. č. 14 je vidět přístroj umožňující metodu Phased array a výstup.



Obr. č. 14 - Ultrazvuková kontrola návaru metoda Phased array

11. Zkouška mezi krystalové koroze

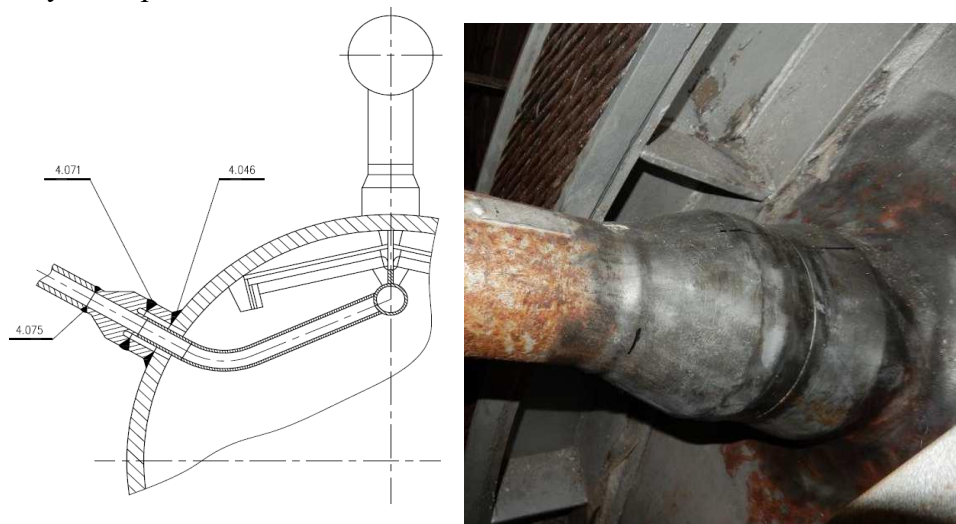
Mezi krystalová koroze je formou nerovnoměrného korozního napadení, která se projevuje u korozivzdorných ocelí v našem případě u Inconelu 52M. Na hranicích zrn jsou oblasti, které jsou ochuzené o legující prvek a dochází zde při teplotách 425-815 °C k precipitaci karbidů Cr. Tím dochází k ochuzení zrna a jeho materiálu o Cr a je náchylnější na mezi krystalovou korozi. Z důvodu rozdílnosti elektro potenciálu jednotlivých fází se systém chová jako makro článok. Mezi krystalová koroze je velmi často řešeným problémem při svařování. [28]

Mezi krystalová koroze zcitlivělých austenitických ocelí je dobře patrná v expozici ve vysoce oxidačních látkách, které se používají pro testování.

Oxalic Etch Test (test v kyselině šťavelové) byl vyvinut jako rychlá testovací metoda na MKK. Vyleštěný vzorek je anodicky leptán proudem 1 A/dm³ po dobu 1 minuta v 10 % roztoku kyseliny šťavelové za pokojové teploty. Následně se vzorek hodnotí mikroskopicky.[28]

12. Úvod do experimentální části

Experimentální část se zabývá hodnocením opravy svarových spojů metodou WOL na jaderných elektrárnách. Nejdřív je nutné vyrobit vzorky, které jsou rozměrově stejné jako originály. První aplikace se předpokládá na parogenerátoru „superhavarijního“ nátrubku na Jaderné elektrárně Dukovany. Proto byly vytvořené vzorky rozměrově shodné tímto nátrubkem. Na tomto nátrubku bude proveden preventivní, standardní, úplný návar WOL. Jedná se o nátrubek, kde v případě havárie proudí chladicí kapalina. Tento svar je heterogenní, tedy svar, který spojuje dva rozdílné kovy. Na tento nátrubek jsou kladeny vysoké nároky, jelikož v případě havárie do nátrubku, který je ohřátý na provozní teplotu, bude proudit kapalina o nízké teplotě, proto tento svar bude velmi tepelně namáhán. Konstrukce nátrubku, havarijního napájení PG (Obr. č. 15), je provedena s ohledem na rychlou změnu teploty v případě spuštění havarijního napájení - obsahuje ochrannou košilku. HSS je umístěn přímo na stěně - dnu parogenerátoru - oblast většího namáhání. Jedná se o výrobní svar (výrobce VŽSKG) s nechráněnou oblastí kořene svaru v místě přechodu materiálů (uhlík/austenit) vůči pracovnímu médiu. Podrobný technologický postup výroby nebyl k dispozici.



Obr. č. 15 - Výkres a reálná fotografie „superhavarijního“ nátrubku

Na metodu opravy WOL je kladen vysoký důraz, je třeba zajistit dobrou svařitelnost. Je zde zahrnuto zhodnocení předehřevu, Zvolení optimálních parametrů svařování a vytvoření pWPS a WPQR. Odstranění horkých trhlin, které vznikají rozdílnou roztažností svařovaných materiálů, důvodem jsou špatně navržené parametry svařování. Proto se v průběhu svařování navařená vrstva kontroluje ultrazvukem, po dokončení svařování a finálním obrobení návaru se znovu zkontroluje.

Další problematikou špatně navržené metody svařování je precipitace karbidů chromu a následné ochuzení hranic zrn o chrom, jejímž důsledkem je MKK. Proto jsou do experimentální části zahrnuty zkoušky na MKK. Dále byly také zahrnuty zkoušky koroze v solné komoře. Z důvodu podezření náchylnosti materiálu 22K na pittingovou (důlkovou) korozi. Další hodnocení bylo provedeno pomocí makrostruktury, mikrostruktury a mechanických zkoušek. [8,17,19]

12.1 Návrh experimentální části

Aby mohla být tato metoda opravy svarových spojů kvalifikována je nutno provést několik zkoušek. Jelikož se jedná o nestandardní způsob svařování, nejsou tyto zkoušky dány normou. Proto se vychází z ČSN EN ISO 15614-1 pro tupé svarové spoje a ČSN EN ISO 15614-7 pro návary, ze kterých se určí specifické zkoušky pro WOL.

Návrh experimentální části v bodech:

Chemická analýza základních materiálů, rozměry zkušebních vzorků

Hodnocení svařitelnosti

Zhotovení dokumentace pWPS a pWPQR

Návrh NDT a DT zkoušek dle ČSN EN ISO 15614-1 a ČSN EN ISO 15614-7

Diskuze výsledků

Jelikož nejproblémovější je návar na uhlíkovou ocel 22K. Byl pro experimentální část zvolen vzorek neobsahující původní svar, pouze návar na trubku s materiálu 22K.




13. Zkušební vzorky

Byly zhotoveny 3 zkušební vzorky. Rozměry vzorků jsou shodné se „superhavarijním“ nátrubkem parogenerátoru, kde se uvažuje aplikace této metody.

1. Návar na trubku z materiálu 22K
2. Návar na trubku z materiálu 08Ch18N10T
3. Návar na již zhotovený HTG svarový spoj, kde byl vytvořen defekt v podobě trhliny pomocí vyjiskření. Obsahující 22K a 08Ch18N10T.

13.1 Rozměry zkušebních vzorků

Zde jsou uvedeny rozměry a hmotnosti polotovarů pro zkušební vzorky.

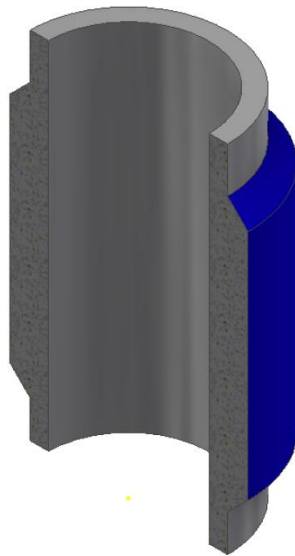
		
Nerezová ocel Průměr 133 mm Tloušťka stěny 13 mm Délka 250 mm Váha 5,4 kg	Uhlíkatá ocel 22K Průměr 144,5 mm Tloušťka stěny 13,5 mm Délka 260 mm Váha 15,7 kg	Nátrubek vstřiku do KO s heterogenním svarovým spojem Váha 48 kg

Obr. č. 16 - Fotografie základních polotovarů

13.2 Rozměry zhotoveného zkušebního vzorku 1 (trubka 22K)

Pro určení adhezivní vlastnosti návaru a zkoušky MKK, byl vytvořen vzorek, který neobsahuje svar. Jako základní materiál byla zvolena ocel 22K, který je velmi náchylná na korozi. Na zvoleném svaru se bude provádět několik DT a NDT metod, které jsou důležité pro pozdější kvalifikaci tohoto postupu.

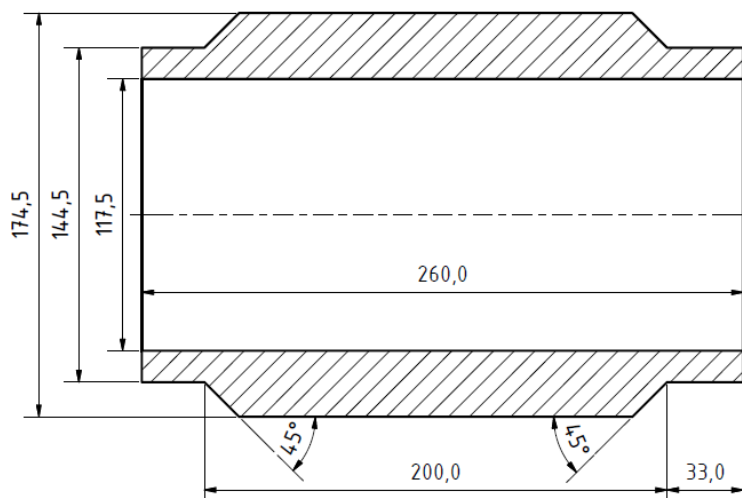
Na Obr. č. 17 je zobrazen model vytvořený pomocí programu Autodesk Inventor 2017. Na modelu je zobrazen zkušební vzorek v řezu, s již vytvořeným návarem. V průběhu navařování je neustále kontrolována správnost postupu. Pomocí ultrazvukové zkoušky, po zhotovení návaru, je návar obrobený broušením.



Obr. č. 17 - Model svařované součásti

13.3 Základní rozměry zkušebního vzorku

Vzorek je zhotovený v měřítku 1:1 s originálem, který se nachází na parogenerátoru na Jaderné elektrárně Dukovany. Na Obr. č. 18 je výkres součásti s již zhotoveným návarem.



Obr. č. 18 - Výkres součásti s návarem

13.4 Základní materiály

Zvolené vzorky obsahují uhlíkovou ocel s označením dle ruské normy GOST 22K. Druhý základní materiál je austenitická nerezová ocel, označená dle ruské normy GOST 08Ch18N10T.

13.4.1 Jakostní uhlíková ocel 22K

Jakostní uhlíková ocel se používá pro výrobu parogenerátoru. Ocel se vyrábí v zásaditých martinských pecích, nebo elektrických obloukových pecích. Tepelné zpracování oceli je metodou normalizace s popuštěním nebo kalení s popuštěním. [22]

Chemické složení oceli musí odpovídat požadavkům v tabulce:

Prvek	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Ti	V	Mo
%	0,19 - 0,26	0,75 - 1,05	0,20 - 0,45	Max 0,030	Max 0,030	Max 0,30	0,30 - 0,50	Max 0,30	Max 0,05	0,02 - 0,05	0,10 - 0,15

Tabulka 1 - Chemické složení oceli 22K [22]

Mechanické vlastnosti oceli musí odpovídat požadavkům v tabulce:

Značka oceli	T = 20 °C					Kritická teplota křehkosti [°C]	T = 350 °C		
	Mez kluzu Rp0,2 [Mpa]	Pevnost v tahu Rm [Mpa]	Tažnost A5 [%]	Zužení Z [%]	Vrubová houževnatost KCV [J/cm ²]		Mez kluzu Re [Mpa]	Pevnost v tahu Rm [Mpa]	Zužení Z [%]
	Min.						Max.	Min.	
výkovky	216	431	21	45	39	15	186	353	44
plechy	216	431	20	40	39	20	186	353	40

Tabulka 2 - Mechanické vlastnosti oceli 22K [22]

13.4.2 Chromniklová austenitická ocel 08Ch18N10T

Používá se při výrobě dílů parogenerátoru. Ocel musí odolávat mezi krystalické korozi. Ocel se vyrábí v zásaditých elektrických obloukových pecích, dle technologie výrobce. Ocel se používá v tepelně zpracovaném stavu (normalizační žíhání). [22]

Chemické složení oceli musí odpovídat požadavkům v tabulce:

Prvek	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Ti	Co	N
%	Max 0,09	Max 2,00	Max 0,8	Max 0,035	Max 0,020	Max 0,30	9,0 - 11,0	17,0 - 19,0	Max 0,07	Max 0,05	Max 0,05

Tabulka 3 - Chemické složení oceli 08Ch18N10T [22]

Mechanické vlastnosti oceli:

Značka oceli	T = 20 °C				T = 350 °C		
	Mez kluzu Rp0,2 [MPa]	Pevnost v tahu Rm [MPa]	Tažnost A5 [%]	Zužení Z [%]	Mez kluzu Re [MPa]	Pevnost v tahu Rm [MPa]	Zužení Z [%]
	Min.						
	196	490	38	50	177	353	40

Tabulka 4- Mechanické vlastnosti oceli 08Ch18N10T [22]

13.5 Přídavné materiály

Přídavné materiály se navařují v několika vrstvách. První vyrovnávací vrstva je z materiálu, který se označuje ER308L. Jedná se o chromniklovou slitinu s velmi nízkým obsahem uhlíku. Dále se na tento vyrovnávací materiál navařují housenky z Inconelu 52M.

13.5.1 Arcaloy ER308L

Tento přídavný materiál se používá jako vyrovnávací mezivrstva. Tato slitina má velmi nízké procento uhlíku a omezuje tvorbu karbidů chromu po hranicích zrn.

Chemické složení:

C	Mn	Si	S	Cr	Ni	Mo	Cu	FN
0,015	1,7	0,45	0,01	20	10	0,1	0,15	9

Tabulka 5 - Chemické složení slitiny Arcaloy ER308L

Tabulka mechanických vlastností:

Mez kluzu Rp0,2 [Mpa]	Mez pevnosti v tahu Rm [Mpa]	Tažnost A [%]
410	605	43

Tabulka 6 - Mechanické vlastnosti Arcaloy ER308L

13.5.2 Inconel 52M

Tato slitina je na bázi niklu, jedná se o přídavný materiál pro svařování primárně HTG svarových spojů. Největší problém svarů na bázi niklu je popraskání při tuhnutí. U tohoto přídavného materiálu hrozí riziko tvorby horkých trhlin.

Chemické složení:

C	Cr	Ni	Fe	Mn	Mo	Ti	Si	P	S	Nb + Ta
0,03	29,87	58,95	8,97	0,78	0,03	0,27	0,05	0,004	0,002	0,83

Tabulka 7 - Chemické složení Inconelu 52M

Mechanické vlastnosti:

Mez pevnosti v tahu Rm [Mpa]	Tažnost [%]
552	30

Tabulka 8 - Mechanické vlastnosti Inconelu 52M

13.6 Kontrola vstupního materiálu

13.6.1 Kontrola chemického složení pomocí GDOES

Pro kontrolu chemického složení byla provedena analýza metodou GDOES. V tabulce 9 a 10 jsou uvedeny výsledky chemického složení. Chemické složení je důležité znát pro pozdější posouzení svařitelnosti.

22K

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	W	Mo	V	Cu	Ti	Nb	Co	Al
0,24	0,56	0,28	0,01	0,011	0,18	0,12	0,1	0,01	0,00	0,10	0,00	0,02	0,01	0,45

Tabulka 9 - GDOES analýza oceli 22K

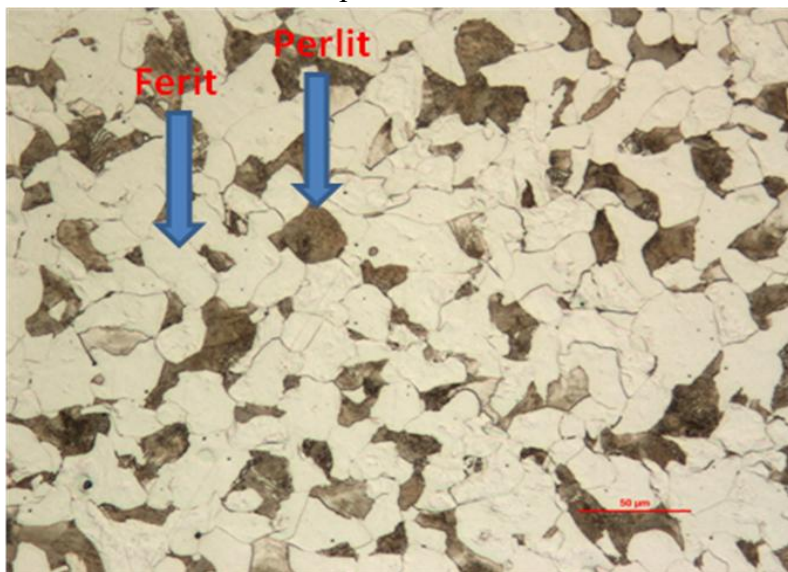
Inconel 52M

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	W	Mo	V	Cu	Ti	Nb	Co	Al
0,014	0,67	0,70	0,00	0,00	21	60	0,12	0,01	0,01	0,02	0,14	0,61	0,00	0,06

Tabulka 10 - GDOES analýza Inconelu 52M

13.6.2 Kontrola mikrostruktury základního materiálu

Mikrostruktura základního materiálu 22K (Ob. č. 5) je tvořena feritem a perlitem. V mikrostruktuře nebyly pozorovány žádné významné vměstky. Leptáno Nital 3 % foceno pomocí světelného mikroskopu Nikon.



Obr. č. 19 - Mikrostruktura 22K

13.6.3 Kontrola tvrdosti ZM

Byla provedena kontrola tvrdosti ZM 22K. Měření probíhalo pomocí Vickerse HV30.

	Úhlopříčka 1	Úhlopříčka 2	HV30
1. hodnota	0,626	0,619	146,3
2. hodnota	0,620	0,628	145,6
3. hodnota	0,631	0,618	145,4
Součet			145,8

Tabulka 11 - Naměřené hodnoty tvrdosti materiálu 22K

Výsledná tvrdost oceli 22K včetně směrodatné odchylky je $145,8 \pm 0,39$ HV.

14. Hodnocení svařitelnosti

Svařitelnost a náchylnost k horkým trhlinám a MKK řeší norma ČSN 10 011-2. Jedna z metod řešení svařitelnosti je pomocí uhlíkového ekvivalentu. Uhlíkový ekvivalent se vypočítá dle následujícího vzorce.

$$C_{ekv} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15}$$

Pokud hodnota bude nižší než 0,45 je zaručena dobrá svařitelnost. Pro zvolený materiál 22K byly zvoleny vzorce pro výpočet uhlíkových ekvivalentů C_{ekv} , dle norem

a GDOES, které udávají chemické složení materiálů. U materiálu Inconel 52M a ER308L není výpočet možný.

22K

$$C_{ekv} = 0,24 + \frac{0,56}{6} + \frac{0,18 + 0,01 + 0,00}{5} + \frac{0,10 + 0,12}{15} = 0,39$$

U materiálu 22K je uhlíkový ekvivalent pod 0,45 proto není nutný předehřev a tento materiál je dobře svařitelný. U materiálů Inconel 52M a ER308L tato metoda výpočtu není možná. Pro tyto materiály je zvoleno navařování metodou popouštěcích housenek, kde není nutný předehřev.

14.1 Problematika horkých trhlin

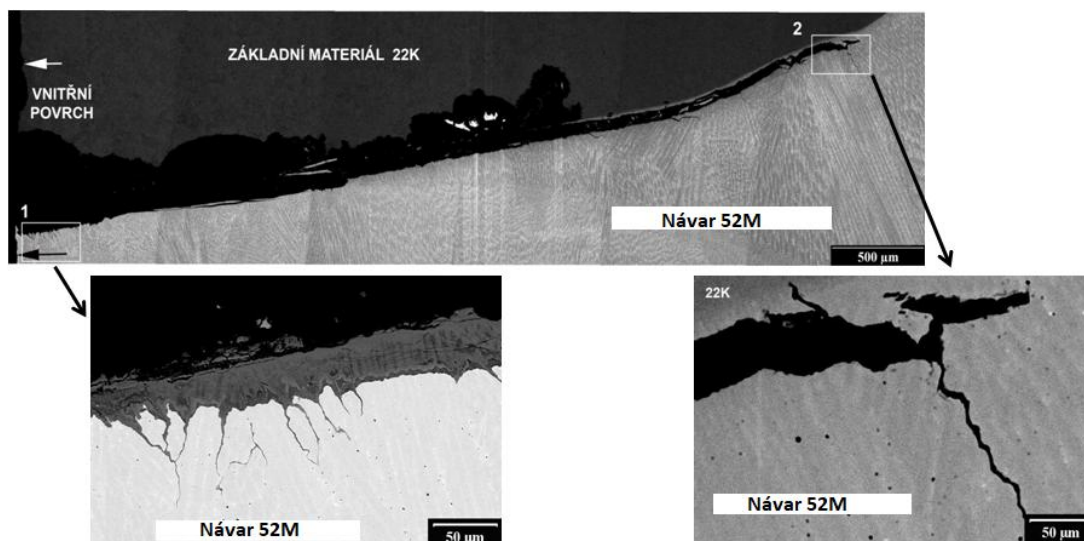
Horké trhliny jsou jiným typem defektů nalézáných na hranicích primárních dendritů u austenitických přídavných materiálů (svarových kovů), což je fenomén způsobený smrštěním svarů, popř. návarů při jejich ochlazování a hranic zrn oslabených metalurgickými nečistotami. V tomto případě se pak jedná o solidifikační typ horkých trhlin. Solidifikační trhliny se obvykle šíří od osy svaru, tedy z místa, které tuhne jako poslední. Jinou formou těchto necelistvostí jsou trhliny likvační, které existují v tepelně ovlivněné oblasti základního austenitického materiálu s vysokým obsahem nečistot obvykle a především ve formě eutektik na bázi S a P lokalizovaných na hranicích zrn, které tímto značně oslabují. Uvedený proces se objevuje jak u austenitických nerezových ocelí tak i u vysoko niklových slitin a to především v případech absence δ feritu jako je tomu u PM Inconel 52, který jsou plně austenitický.

Vznik trhlin za tepla materiálů na bázi Ni též podporují parametry svařování enormně zvyšující % namíchání materiálem podložky a to především tehdy, pokud dojde k nadměrnému namíchání Fe se svarovým kovem. Inconel 52 vykazuje sklon ke vzniku jak k trhlinám DDC, tak i k horkým trhlinám a proto další vývoj PM řady Inconel 52 vede k takovým úpravám chemického složení PM, které vedou ke zvýšení pevnosti hranic zrn tím, že vhodné (mikro) legury reagují na hranicích zrn tak, že na sebe vážou přítomné nečistoty a tím jejich pevnost zvyšují. Minimalizace fenoménu horkých trhlin se tedy děje jak úpravou parametrů svařování tak i chemickým složením PM. Jako příklad horké trhliny solidifikačního typu může sloužit Obr. č. 20. [9,10,11]



Obr. č. 20 - Horká trhlina v Inconelu 52 [11]

V případě minimalizace tendence ke vzniku horkých trhlin ve svarovém kovu Inconelu 52M je pak uváděno limitní % namíchání svarového kovu se základním materiálem. Pro technologii GTAW je konzervativní hodnotou 55% a to i pro případ vyšších obsahů S a Si v základním materiálu, což opět vede k limitovanému množství vneseného tepla procesem svařování. Přenos těchto informací, konkrétně pro mechanizované GTAW svařování využívané v montážních podmínkách, pak vyžaduje ověření chemického složení základního materiálu dané komponenty především z hlediska obsahu S včetně dalších parametrů podmiňujících velikost % namíchání jako je změna rychlosti svařování, poloha svařování, vrcholový úhel W-elektrody apod. [9,10,11]



Obr. č. 21 - Tvorba horkých trhlin v návarech

Na Obr. č. 21 jsou snímky návaru Inconelu 52M na ZM 22K. U metody WOL se pro minimalizaci či úplné odstranění horkých trhlin využívá vyrovnávací vrstvy z materiálu ER308L. Jelikož materiál ER308L je austenitický materiál a má plošně středěnou krystalovou mřížku, která se dobře plasticky deformuje. V případě vzniku trhlin dochází ke spotřebování energie ve formě plastické deformace v této vyrovnávací vrstvě.

15. Dokumenty pWPS a pWPQR

Parametry se dosazují experimentálně, sleduje se svařitelnost na základě složené předběžné pWPS, kde se svařovací parametry otestují. Svařování touto metodou prováděla firma EPRI a z jejich dokumentace se vycházelo pro naše materiály. Demonstrativní svary pro naše materiály byly provedeny americkou firmou Aquilex, která vytvořila pWPS a pWPQR. Jelikož se jedná o pWPS a pWPQR dle amerických norem, bylo nutné tyto dokumentace porovnat a přepsat dle českých norem. Pak byl zhotoven návar pro kvalifikaci v našich podmínkách. Při vyhovujících požadavcích na svar se vytvoří finální WPS, podle kterého se svařuje.

15.1. Vyhodnocení potřebných oprávnění svářeče

V toto případě je třeba, aby byl svářeč zaškolen pro práci se svařovacím automatem. Potřebná oprávnění jsou dána normami ČSN EN ISO 14732 (Svářečský personál - zkoušky svářečských operátorů a seřizovačů pro mechanizované a automatizované svařování kovových materiálů) a ČSN ISO 9606-1 (Označení kvalifikace svářeče).

Dle norem je potřebné označení kvalifikace svářeče následující:

ISO 9606-1 141 T BW FM1 s s15 D144,5 PJ bs ml Ar

- ISO 9606-1 - ZKOUŠKY SVÁŘEČŮ TAVNÉ SVAŘOVÁNÍ. ČÁST 1: OCELI
- 141 - oblouk. svař. wolframovou elektr. v inertním plynu
- T - trubka
- BW - tupý svarový spoj
- FM1 - skupina základního materiálu
- s - specifikace přídavného materiálu, plný drát
- s15 - tloušťka návaru
- D144,5 - průměr základního potrubí
- PJ - poloha svařování obvodový svar
- bs - zhotovení svaru oboustranné svařování
- ml - zhotovení svaru vícevrstvé svařování
- At - druh ochranného plynu Argon

15.2 Dokumentace pWPS

Jelikož se jedná o automatizované svařování WIG (TIG). Je důležité definovat v pWPS několik parametrů. Dokumentace pWPS byla vytvořena dle normy ČSN EN ISO 15609-1. [3]

- | | |
|---|---------------------------------------|
| - údaje týkající se výrobce | - teplota předehřevu |
| - údaje které se týkají ZM | - rozměry materiálů |
| - metoda svařování (dle EN ISO4063) | - návrh spoje |
| - poloha svařování (dle EN ISO 6947) | - příprava spoje |
| - způsob svařování | - drážkování kořene |
| - podložení | - interpass teplota |
| - svařovací materiály | - ochranný plyn |
| - udržovací teplota předehřevu | - tepelné zpracování po svařování |
| - dodatečný ohřev pro uvolnění vodíku | - udržovací teplot předehřevu |
| - tepelné zpracování po svařování | - mechanické a automatické svařování |
| - dodatečný ohřev pro uvolnění vodíku | - dodatečný ohřev pro uvolnění vodíku |
| - tepelný výkon | |
| - elektrické parametry (druh proudu a polarita, proudový rozsah) [23] | |

15.3 Předběžná specifikace postupu svařování pWPS

Postup svařování výrobce číslo: EE5879
WPQR číslo:
Výrobce: ČEZ a.s.
Způsob přenosu kovu: zkratový přenos
Druh spoje a druh svaru: Overlay

Metoda přípravy a čištění: broušení
Označení základního materiálu: 22K
Tloušťka materiálu v (mm): 13,5
Vnější průměr: 144,5
Poloha svařování: PJ

Podrobnosti přípravy svaru (náčrt):

Návrh spoje	Pořadí svařování

Podrobnosti svařování:

Housenka	Metoda svařování	Rozměr přídavného materiálu	Proud A	Napětí V	Druh proudu/ polarita	Rychlost podávání drátu	Délka natavené housenky/ Postupová rychlost	Tepelný příkon
	141		200	9,8	DC (+)			

Označení kovu a obchodní značka:
Speciální sušení při vyšší teplotě nebo sušení:

Teplota předehřevu: bez předehřevu
Interpass teplota:

Označení plynu/tavidla - ochranného: Argon

Udržovací teplota předehřevu: bez předehřevu
Druh/rozměr wolframové elektrody: WP

Průtoková rychlost plynu - ochranného: 16 (l/min)

Podrobnosti k drážkování / ochraně kořene:

Tepelné zpracování po svařování a / nebo stárnutí: žádné

.....
Výrobce: ČEZ a.s

15.4 Formulář protokolu o kvalifikaci postupu svařování (pWPQR)

Kvalifikace postupu svařování - Zkušební certifikát

Protokol výrobce WPQR:

Číslo: EE22KS01

Výrobce: ČEZ a.s.

Adresa: Dukovany 269, 675 50 Dukovany

Předpis/zkušební norma: ČSN EN ISO 15614 - 7

Datum svařování: 27.11.2016

Zkušební orgán nebo organizace:

Číslo jednací: 1548613954

Rozsah kvalifikace:

Metoda svařování: 141

Náčrt návaru:

Základní materiál: 22K

Ploušťka materiálu (mm): 13,5

Vnější průměr trubky (mm): 144,5

Označení přídavného materiálu: ER308L, 52M

Ochranný plyn / tavidlo: Argon

Druh svařovacího proudu / hořlavého proudu: DC (+)

Pracovní polohy: PJ

Přehřev: bez přehřevu

Tepelné zpracování po svařování /stárnutí: bez tepelného zpracování

Další informace: V průběhu svařování UT kontroly, po dokončení návaru obrobení broušením

Potvrzuje se, že zkušební svary byly připraveny, svařovány a zkoušeny podle výše uvedeného předpisu / zkušební normy s vyhovujícím výsledkem.

16. Návrh NDT a DT zkoušek

Zkušební kus je trubka z materiálu 22K. Jelikož se jedná o nestandardní postup svařování, je nutno stanovit specifické zkoušky, tyto zkoušky nejsou nijak stanoveny normou.

Nejvíce se k této metodě přibližují normy ČSN EN ISO 15614-1 a ČSN EN ISO 15614-7. ČSN EN ISO 15614-1 pojednává o Stanovení a kvalifikaci postupů svařování kovových materiálů - Zkouška postupu svařování - Část 1: Obloukové a plamenové svařování ocelí a obloukové svařování niklu a slitin niklu, pro tupé svarové spoje. Norma ČSN EN ISO 15614-7 pojednává o Stanovení a kvalifikaci postupů svařování kovových materiálů - Zkouška postupu svařování - Část 7: Navařování.

V tabulce číslo 12 jsou uvedeny doporučené zkoušky, převzaté z normy ČSN EN ISO 15614-7. [24,25]

Zkušební kus	Druh zkoušky	Rozsah zkoušení
Navařování	Vizuální kontrola	100%
	Ultrazvuková zkouška	100%
	Zkouška na povrchové trhliny	100%
	Boční zkouška lámavosti	2 vzorky
	Kontrola makrostruktury	1 vzorek
	Kontrola mikrostruktury	1 vzorek
	Chemický rozbor	1 vzorek
	Kontrola obsahu delta feritu	1 vzorek
Zkouška tvrdosti	1 proměření	

Tabulka 12 - Kontrola a zkoušení zkušebních kusů

Z těchto dvou norem byly vybrány nejvhodnější destruktivní i nedestruktivní proveditelné zkoušky:

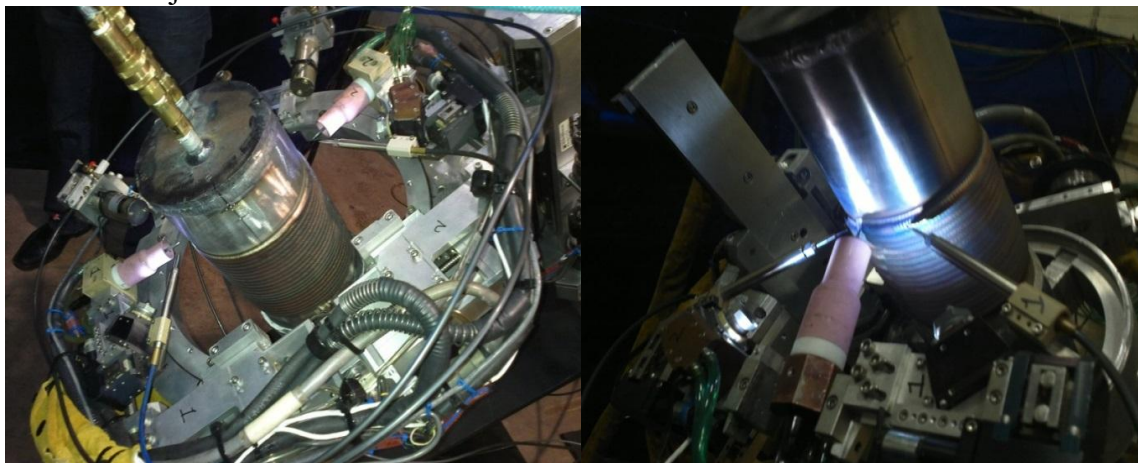
Destruktivní zkoušky: kontrola makrostruktury, mikrostruktury, měření tvrdosti, příčná zkouška tahem a zkouška rázem v ohybu.

Nedestruktivní zkoušky: ultrazvuková kontrola

17. Průběh svařování

Jelikož se jedná o návar Inconelu 52M, je nutné svařovat metodou TIG/WIG. Jedná se o metodu svařování tavnou elektrodou, nejčastěji z wolframového materiálu s přídatným drátem. Jelikož se jedná o velmi obtížný návar, je automatizace nutná. Navařování je časově velmi náročné. Svařovací automat umožňuje svařování dvou housenek najednou. V orbitální hlavě jsou umístěny 2 wolframové elektrody a 2 podavače přídatného drátu.

Principiálně se jedná o orbitální svařování, které je ze 100 % automatizované. Na Obr. č. 22 je možné vidět toto svařovací zařízení.



Obr. č. 22 - Orbitální hlava určená pro svařování vzorku

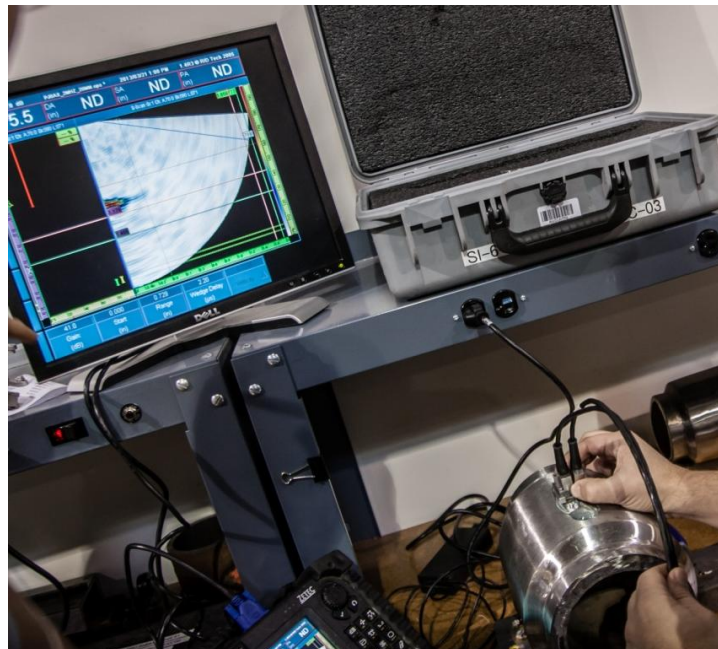
Nejprve je nutné vzorek pevně upnout v určité pracovní výšce, k tomu slouží rozpínací trn. Z důvodu velmi přesného svařování se svařovaná součást nesmí pohybovat.

Veškerý proces svařování je ovládán z ovládacího pultu, který je na Obr. č. 23. Kde se nastavují vstupní parametry pro svařování.



Obr. č. 23 - Ovládací pult

V průběhu svařování byly prováděny ultrazvukové zkoušky Phased array navařené vrstvy. Bez indikace trhlin a jiných porušení. Po navaření a finálním obrobení byla také provedena ultrazvuková zkouška.

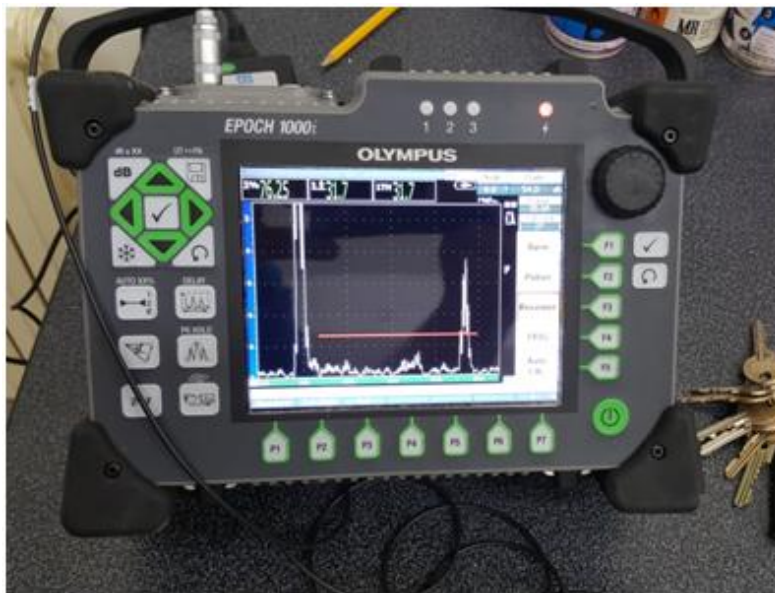


Obr. č. 24 - Provádění ultrazvukové zkoušky

18. NDT kontrola ultrazvukem

Na vzorku 1 (trubka 22K + návar) byla provedena zkouška ultrazvukem. Použité zařízení Olympus Epoch 1000i. Na Obr. č. 25 jsou vidět dva peaky, první je vstupní echo

a druhý je výstupní echo, mezi nimi se projevuje indikace defektů. Ze snímku je vidět, že se v měřeném místě defekt nenachází.



Obr. č. 25 - Ultrazvuk Olympus Epoch 1000i

Ultrazvuk byl nastaven tak, aby byl prozářen celý návar až k základnímu materiálu, v závislosti na frekvenci. Nízká frekvence detekuje do vyšší hloubky, avšak na úkor velikosti defektů. Vysoká frekvence detekuje do nižší hloubky, avšak detekuje i malé defekty.

Celý návar byl zkontrolován bez indikace defektů. Měření lze uzavřít s konstatováním, že návar byl proveden správně, čistě a bez defektů.



Obr. č. 26 - Fotografie zavařených vzorku rozříznutých na polovinu pásovou pilou

19. Hodnocení makrostruktury a mikrostruktury

Aby bylo možné hodnotit makrostrukturu a mikrostrukturu je nutné vzorek rozřezat a metalograficky připravit.

19.1 Metalografická příprava vzorků

Nejdříve byla odříznuta část ze vzorku pro vyhodnocení, pomocí pásové pily. Potom tato část byla rozřezaná na jednotlivé části kotoučovou rozbrušovací pilou Struers Discotom-6 (Obr. č. 27).



Obr. č. 27 - Příčný řez



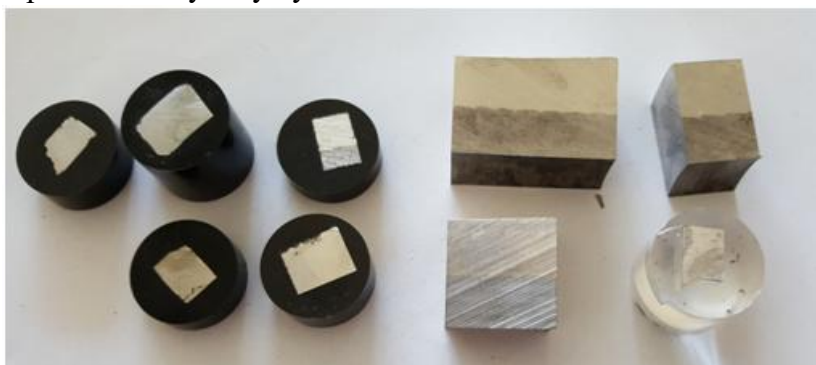
Obr. č. 28 - Kotoučová rozbrušovací pila Struers Discotom-6

Po nařezání vzorků byly vzorky zality do dentakrylové hmoty pomocí lisu Stuers Citopress-10. A vyleštěny v automatické leštičce Struers Tegramin-20. Obě zařízení jsou zobrazeny na Obr. č. 29.



Obr. č. 29 - Vlevo Struers Citopress-10 vpravo Struers Tegramin-20

Na Obr. č 30 jsou již zhotovené vzorky připravené pro pozdější vyhodnocení. Pro hodnocení mikrostruktury je nutné vzorky naleptat. Vzorky byly leptány Nitalem 3 % a Inconel byl leptán elektrolyticky kyselinou šťavelovou.

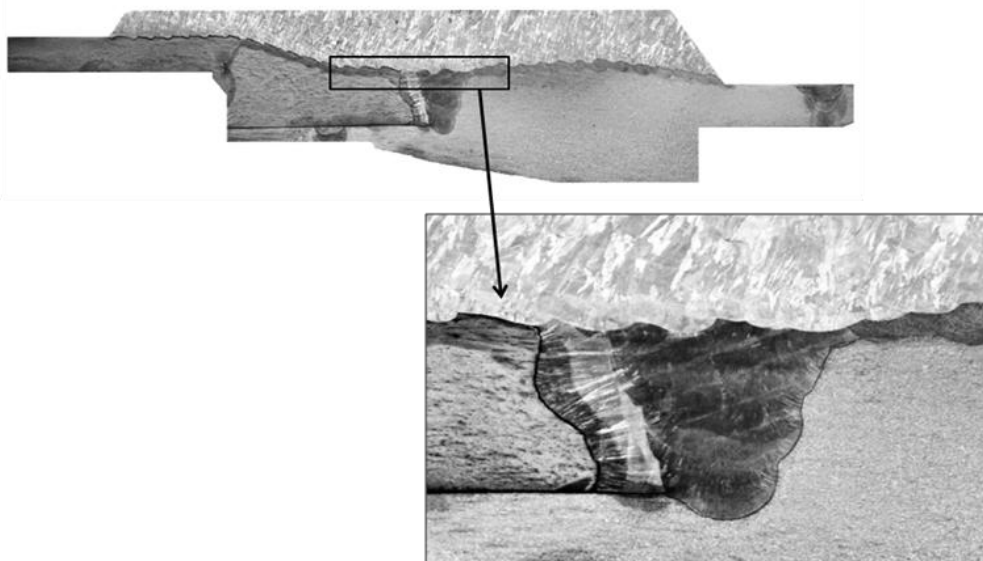


Obr. č. 30 - Zhotovené vzorky

19.2 Hodnocení makrostruktury

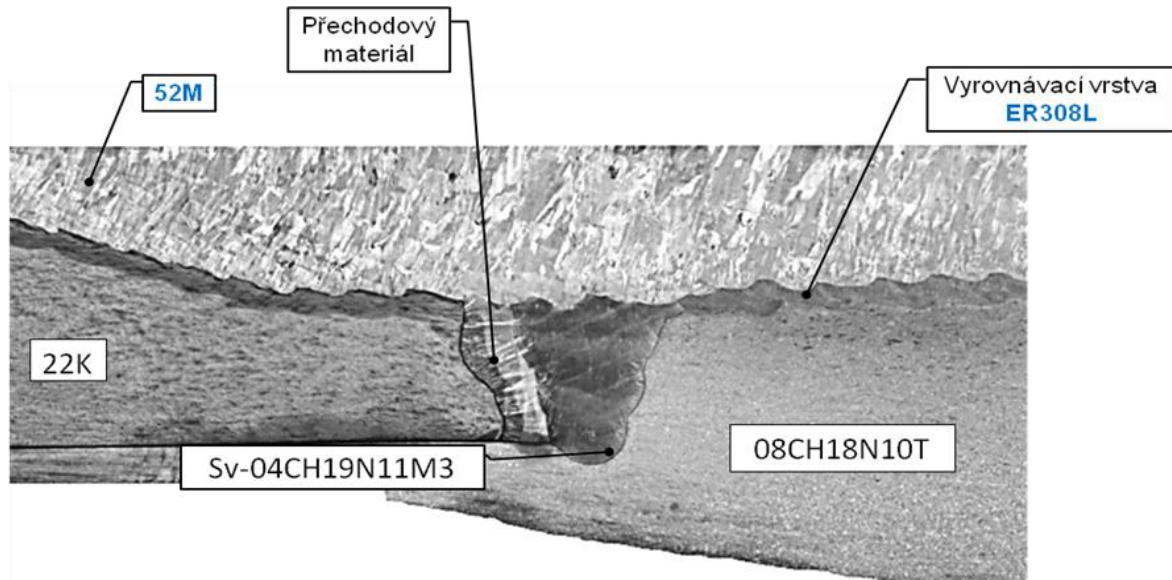
19.2.1 Makrostruktura HTG svarového spoje

Jedná se o plnohodnotný vzorek HTG svarového spoje, kde byla aplikována metoda WOL. Na první pohled nejsou žádné zjevné defekty ani horké trhliny.



Obr. č. 31 - Snímek zkušební vzorku heterogenního svaru nátrubku parogenerátoru

Na straně s materiálem 22K je patrná teplem ovlivněná oblast. Svarové housenky ZM a přechodového materiálu jsou rovnoměrné. Hrubé dendrity návaru, které jsou orientované do směru odvodu tepla, nevykazují žádné defekty. Na Obr. č. 32 jsou zobrazeny jednotlivé kovy. Svarový kov Sv-04Ch19N11M3 se současně využívá, jako přídatný materiál pro spojování heterogenního svarového spoje.



Obr. č. 32 - Snímek makrostruktury heterogenního SS s aplikací WOL

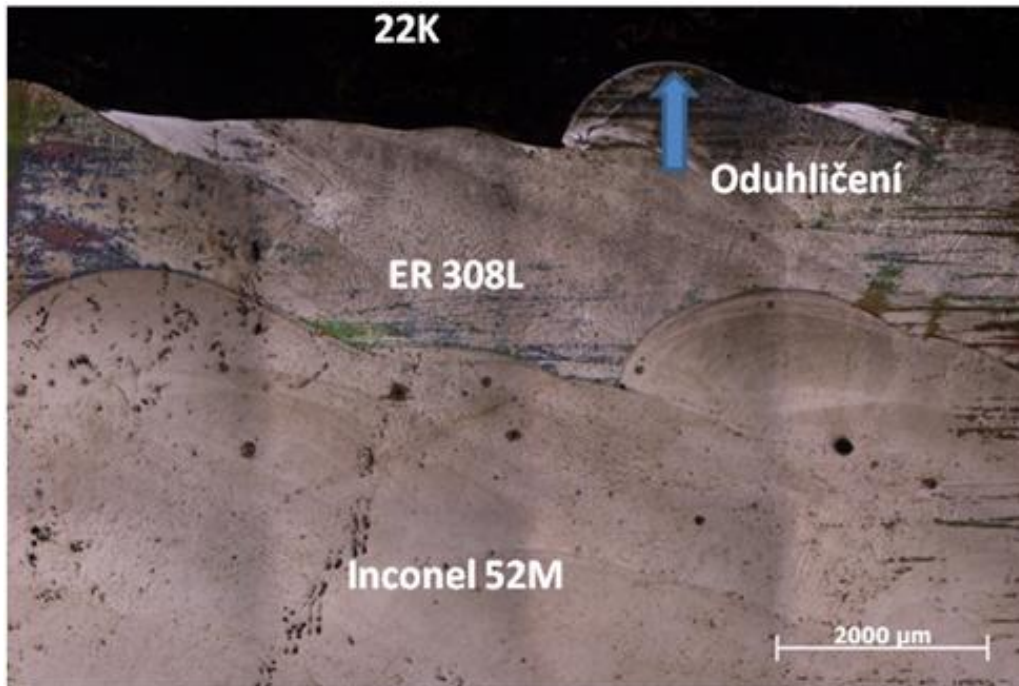
19.2.2 Snímek makrostruktury aplikace WOL na 22K

Návar na potrubí z materiálu 22K nevykazuje žádné defekty v podobě větších trhlin. Pro zviditelnění jednotlivých vrstev byl vzorek naleptán kyselinou šŕavelovou nebo Nitalem 3 %.



Obr. č. 33 - Snímek makrostruktury návaru

Na Obr. č. 34 je zobrazena detailní makrostruktura. Zde jsou vidět jednotlivé housenky, na přechodu mezi 22K a ER308L bylo zpozorováno mírné oduhličení. Svarové housenky ZM a přechodového materiálu jsou rovnoměrné. Nejsou pozorovány žádné horké trhliny, ani defekty v podobě trhlin. Vzorek byl naleptán elektrolyticky kyselinou šŕavelovou, proto je 22K velmi naleptaná.



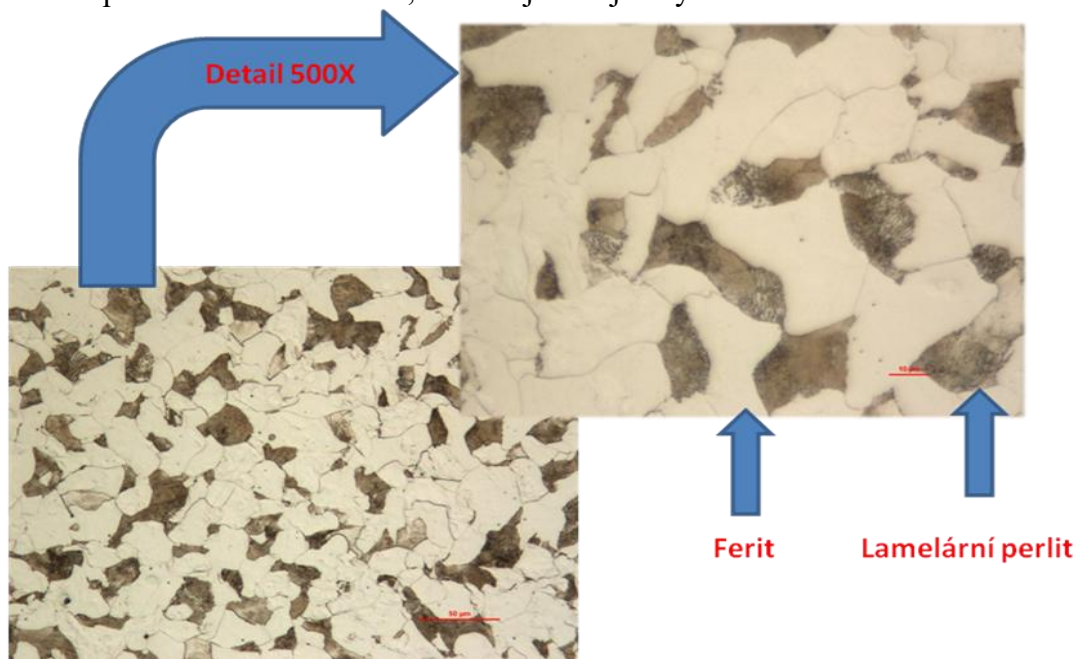
Obr. č. 34 - Snímek makrostruktury přechodových oblastí

19.3 Hodnocení mikrostruktury

Pro vyhodnocení struktury bylo připraveno několik vzorků. Snímky mikrostruktury byly pořízeny na světelném mikroskopu se zvětšením 50x, 100x, 200x a 500x a na elektronovém řádkovacím mikroskopu.

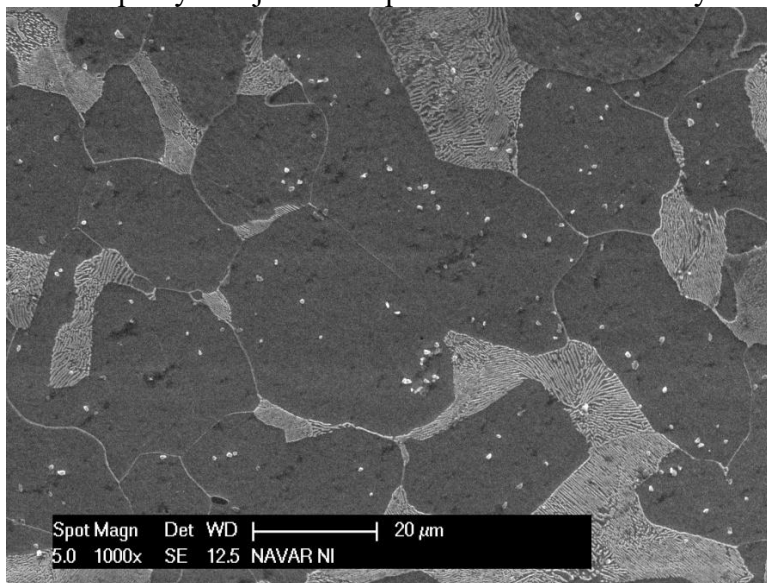
19.3.1 Mikrostruktura ZM 22K

Základní materiál 22K obsahuje feriticko - perlitickou strukturu. Obsahuje lamelární perlit a stopové množství vměstků, které nejsou nijak významné.



Obr. č. 35 - Mikrostruktura materiálu 22K zvětšení 200x v detailu 500x

Mikrostruktura je čistá bez vměstků a jiných defektů. Na snímku z řádkovacího elektronového mikroskopu bylo objeveno stopové množství sulfidických vměstků.

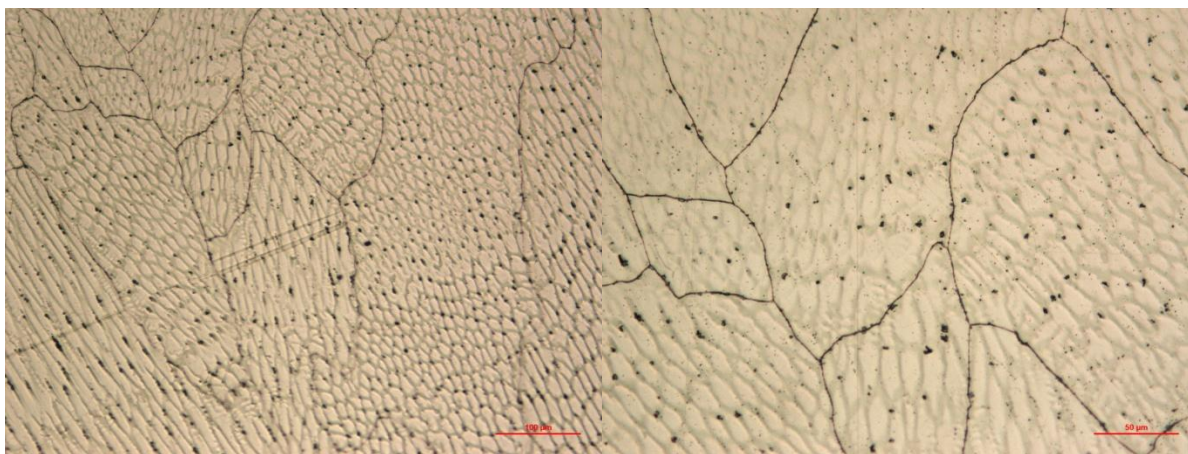


Obr. č. 36 - Základní materiál 22K zvětšeno 1000x

Na Obr. č. 36 je zachycena mikrostruktura základního materiálu řádkovacím elektronovým mikroskopem, kde je velmi dobře vidět lamelární perlit. Vzorky byly leptány Nitalem 3 %.

19.3.2 Mikrostruktura přechodového materiálu ER308L

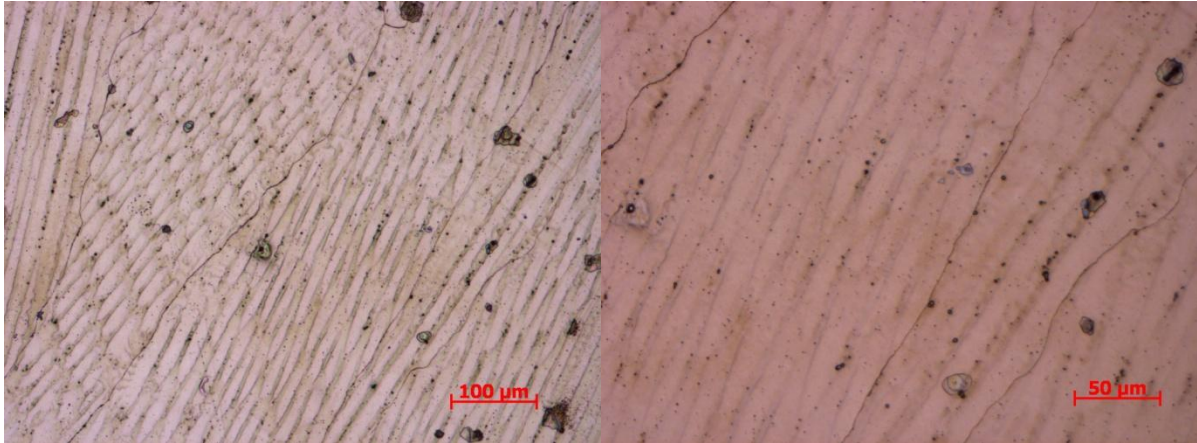
Mikrostruktura vyrovnávací vrstvy je jednofázová austenitická struktura. Zde je patrná buněčná struktura. Oproti Inconelu 52M obsahuje méně uhlíku, který tvoří karbidy chromu. Mikrostruktura byla naleptána elektrolyticky kyselinou šťavelovou.



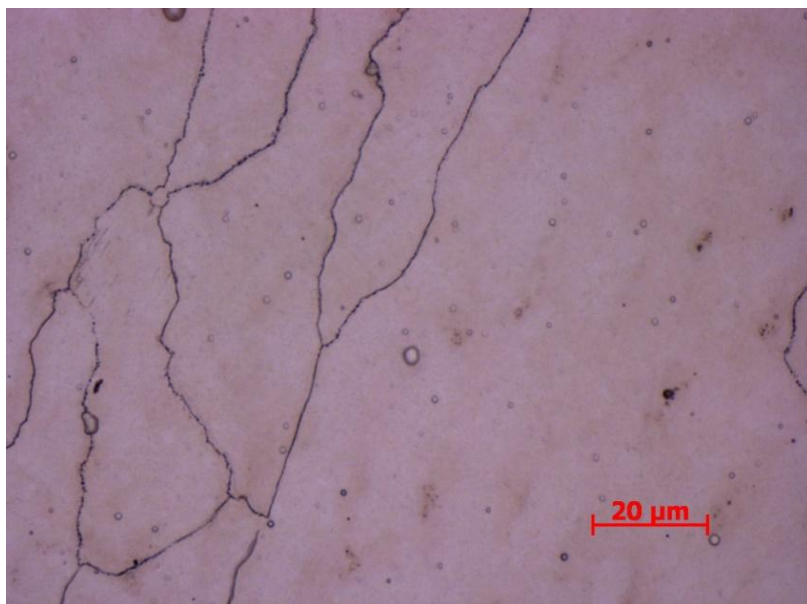
Obr. č. 37 - Mikrostruktura ER308L vlevo 100x vpravo 200x

19.3.3 Mikrostruktura přídavného materiálu Inconel 52M

Jedná se o jednofázovou austenitickou morfologii. Kolumnární zrna mají zvlněné hranice a uvnitř zrn je patrná buněčná struktura. Rovné úseky hranic se vyskytují zřídka a jsou relativně krátké. Uvnitř zrn je spousta dalších drobnějších částic. Leptáno elektrolyticky kyselinou šťavelovou.



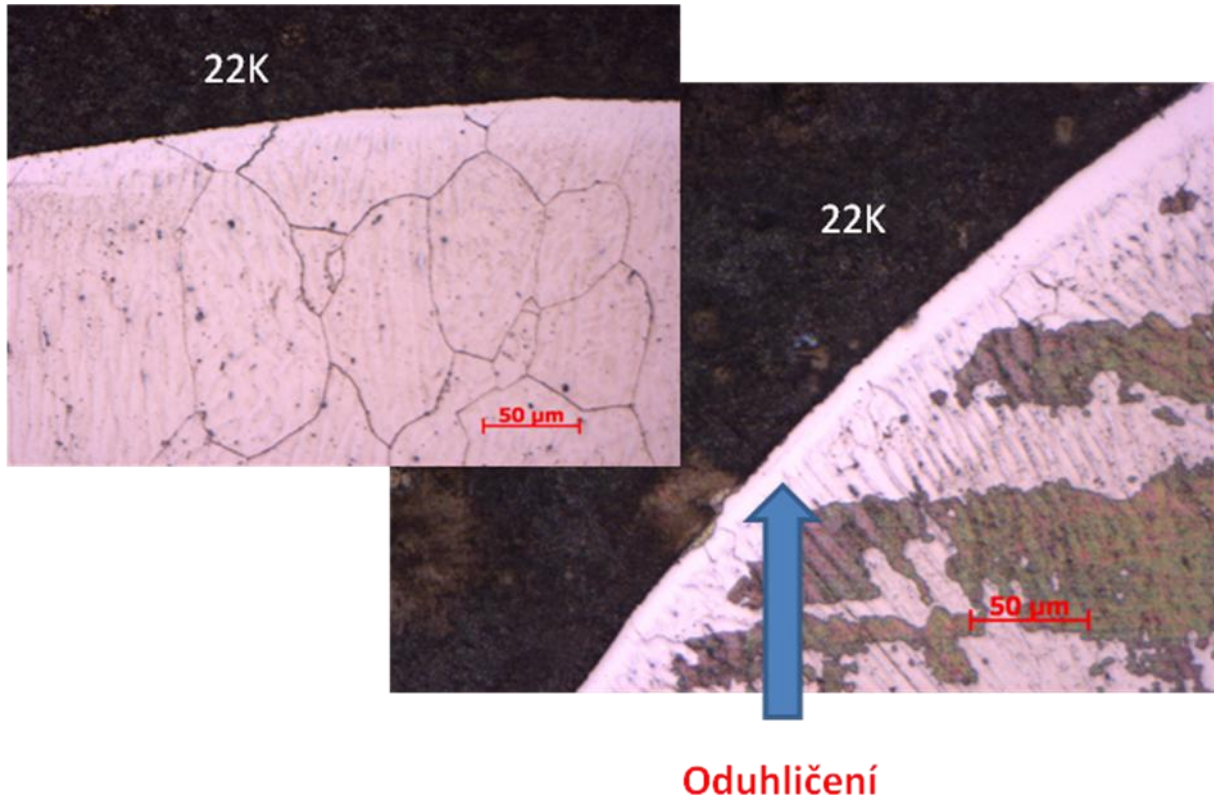
Obr. č. 38 - Mikrostruktura Inconelu 52M vlevo zvětšeno 50x vpravo zvětšeno 200x



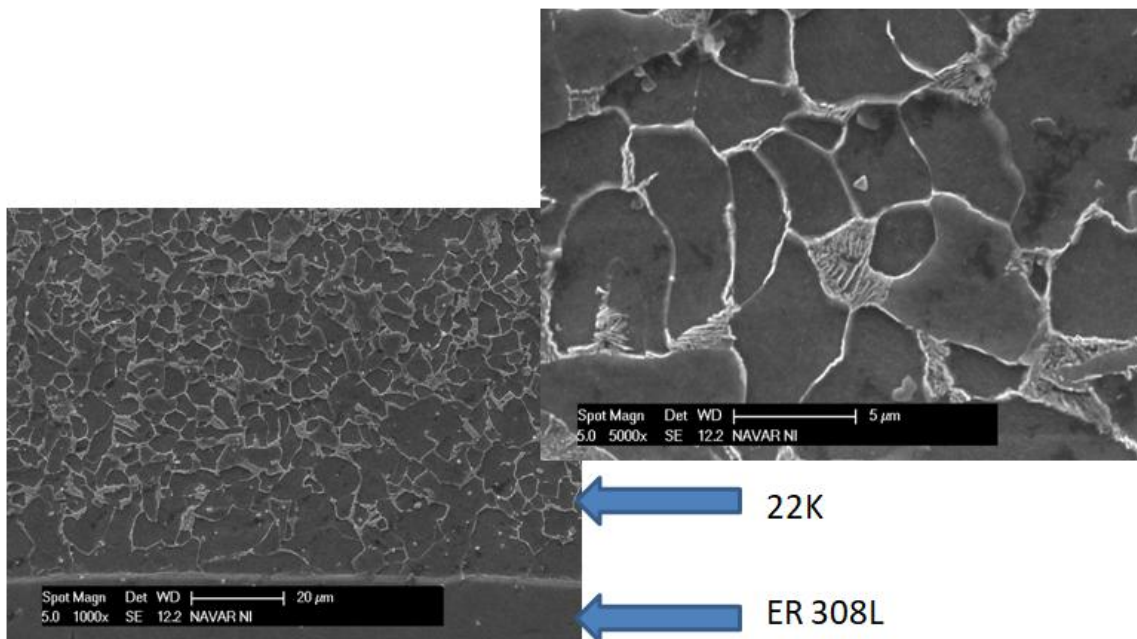
Obr. č. 39 - Mikrostruktura Inconelu 52M 500x

19.3.4 Mikrostruktura přechodových oblastí

Na Obr. č. 40 je přechod mezi uhlíkovou ocelí 22K a vyrovnávacím materiálem ER308L. Zde je patrné oduhličením a protaženější buněčná struktura. Z pozorování bylo zjevné, že navařená vrstva je bez defektů a horkých trhlin.

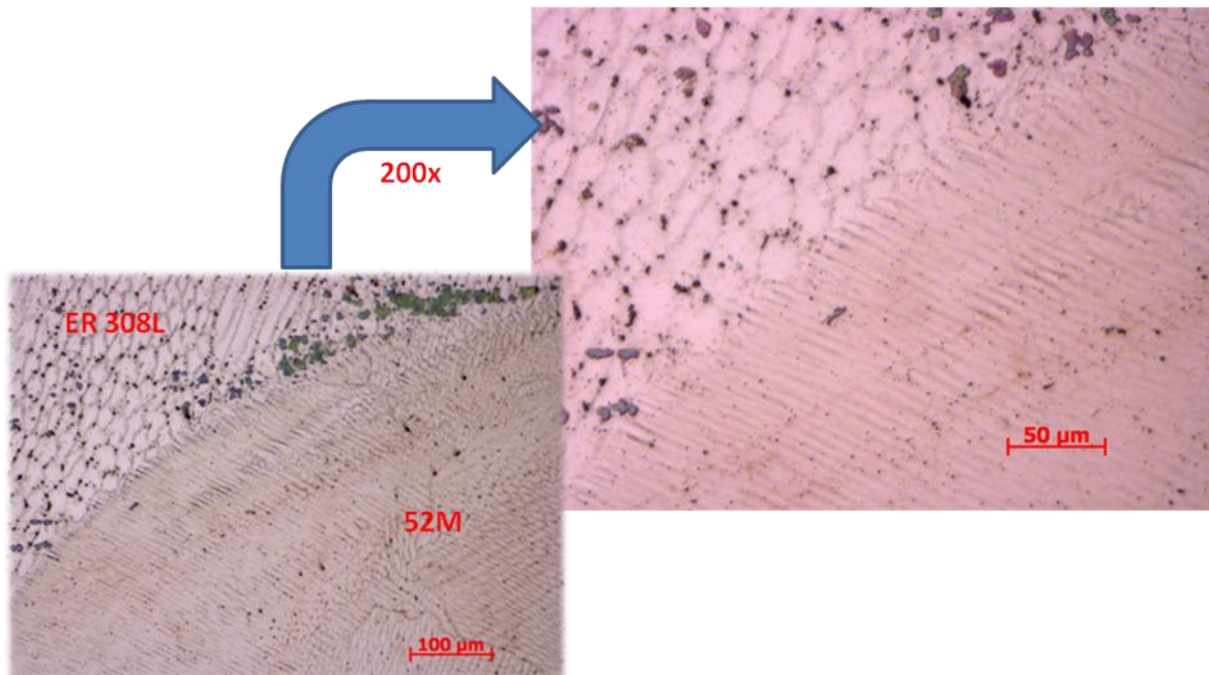


Obr. č. 40 - Přejídná oblast 22K a ER308L vlevo zvětšeno 50x, vpravo zvětšeno 200x



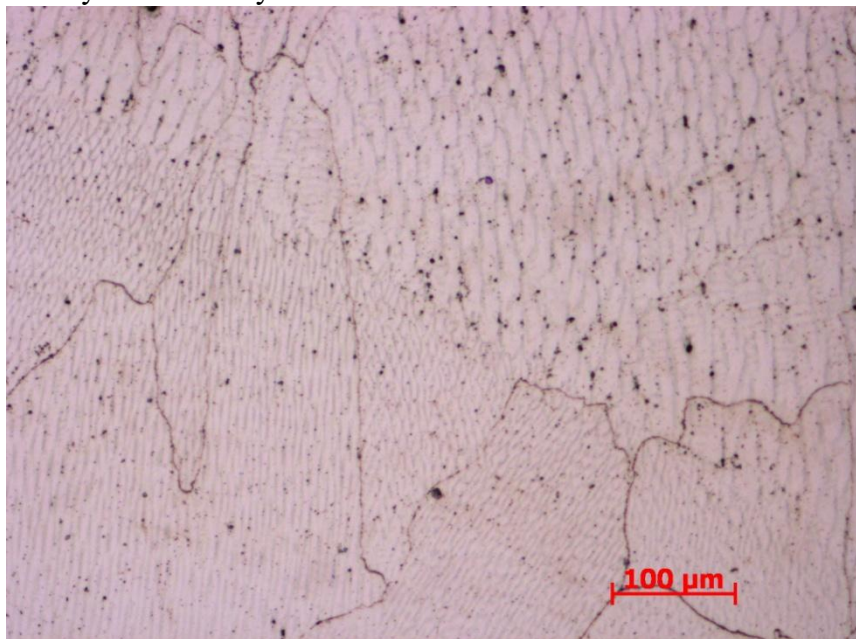
Obr. č. 41 - Rozhraní 22K a ER308L, vpravo detail

Na Obr. č. 42 je přejídná oblast mezi vyrovnávacím materiálem ER308L a Inconelem 52M. Přejídná oblast je čistá bez defektů a horkých trhlin.



Obr. č. 42 - přechodová oblast ER308L a 52M vlevo 100x, vpravo 200x

Na Obr. č. 43 je průnik dvou svarových housenek z Inconelu 52M. Housenky byly kladeny rovnoměrně pravidelně, bez defektů a vměstků. Na vzorcích mezi housenkami nebyly pozorovány horké trhliny.



Obr. č. 43 - Průnik svarových housenek 52M

19.3.5 Teplem ovlivněná oblast (TOO)

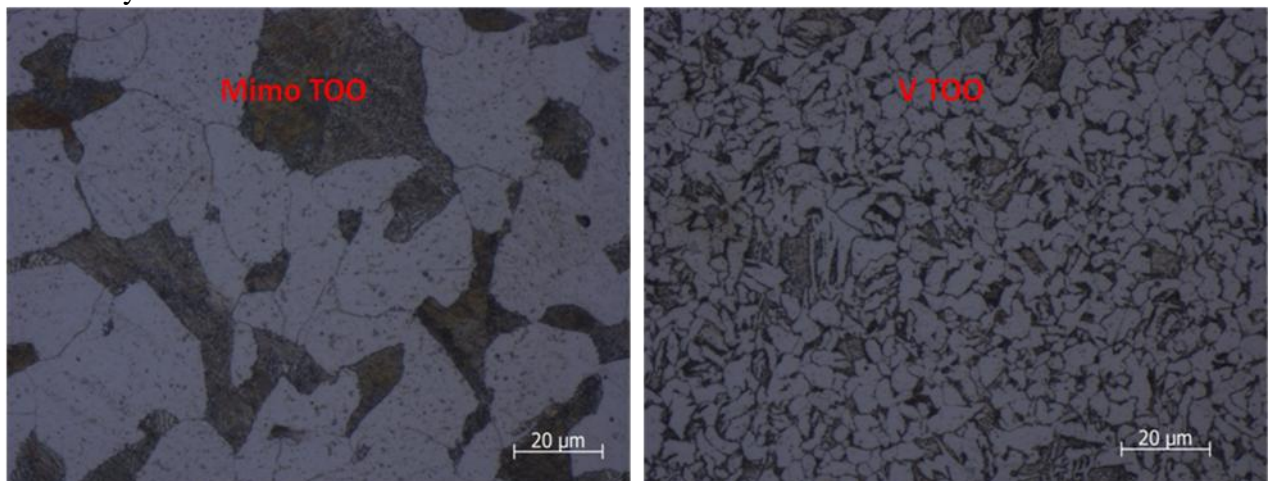
Teplem ovlivněná zóna byla zpozorována pouze u uhlíkové oceli 22K. V oblasti TOO je velmi jemnozrný materiál, který směrem od svarového spoje hrubne na původní strukturu. Na Obr. č. 44 je možné pozorovat TOO. V TOO mohou vznikat bainitické oblasti nebo Widmanstättenova struktura způsobená rychlým odvodem tepla do ZM. Vlivem těchto strukturálních změn může docházet k tvorbě trhlin a k poklesu houževnatosti materiálu.

Kvůli vyloučení těchto nežádoucích struktur bylo nutné provést detailní zvětšení pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu.



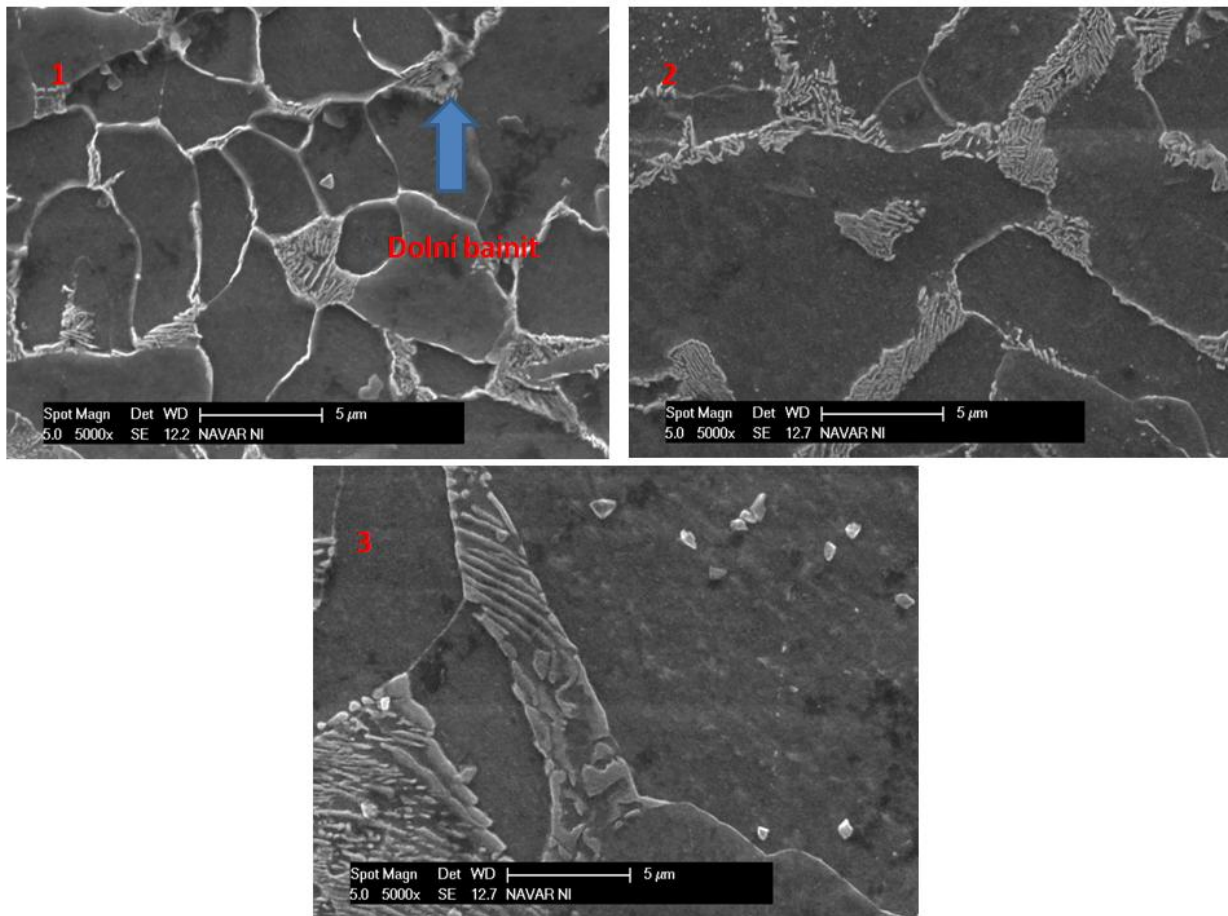
Obr. č. 44 - Teplem ovlivněná oblast 22K

Na Obr. č. 45 jsou uvedeny snímky pořízené světelným mikroskopem při zvětšení 500x. Z tohoto zvětšení vyplývá, že pravděpodobně v TOO došlo pouze ke zjemnění struktury.

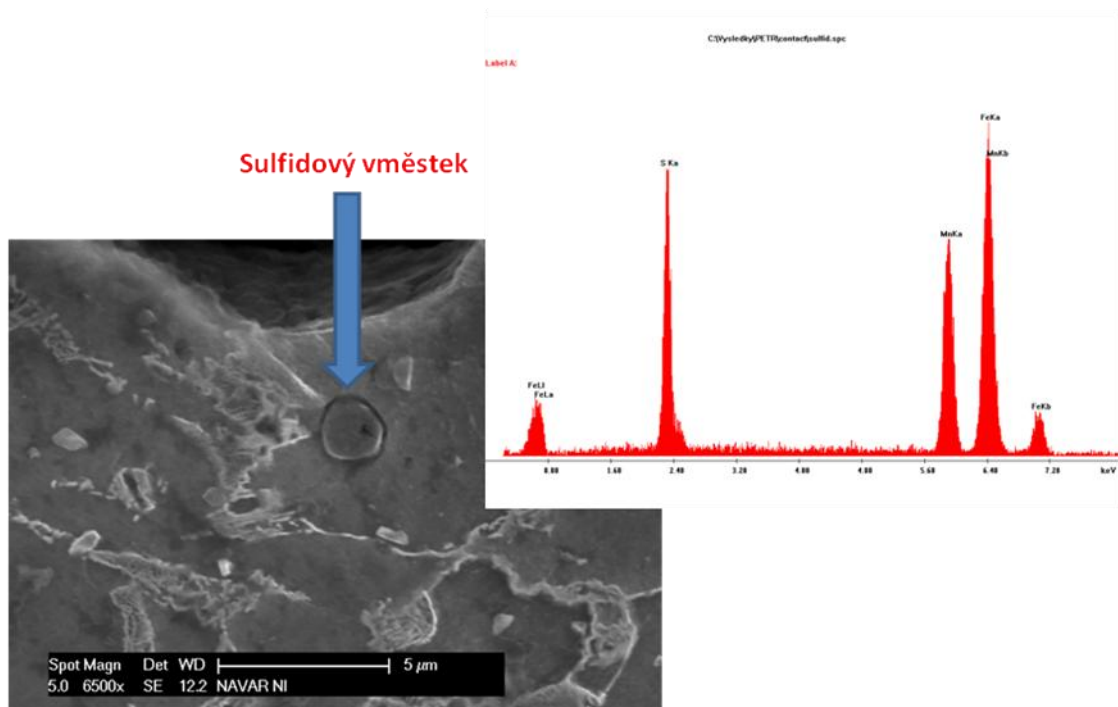


Obr. č. 45 - Snímek 22K 500x

Na Obr. č. 46 jsou uvedeny snímky z elektronového řádkovacího mikroskopu při vyšších zvětšeních. Na několika místech, nejbližší v TOO, byl zpozorován dolní bainit, v polovině TOO již zpozorován nebyl. Dále v několika místech byly nalezeny sulfidické vměstky, které byly potvrzeny EDX analýzou (Obr. č. 47). Toto stopové množství vměstků nijak neovlivňuje vlastnosti materiálu.



Obr. č. 46 - Mikrostruktura TOO 1. začátek TOO 2. prostředek TOO 3. konec TOO



Obr. č. 47 - Sulfidický vměstek a analýza EDX

20. Hodnocení MKK a zkoušky koroze

Z důvodu nesprávného zvolení parametrů svařování může docházet k precipitaci karbidů po hranicích zrn a materiál Inconel 52M může být náchylný na MKK. Proto jsou zde zahrnuty testy na MKK. Další problematikou se kterou se v českých jaderných elektrárnách pracovníci setkávají je pittingová (důlková) koroze na materiálu 22K v oblasti TOO. Proto byly do práce zahrnuty zkoušky koroze v solné komoře.

Citace z analýzy zhotovené pro ČEZ a.s. od ÚJV HODNOCENÍ HETEROGENNÍHO SVAROVÉHO SPOJE ODEBRANÉHO Z NÁTRUBKŮ PG HVB2 12/2016, strana 14.

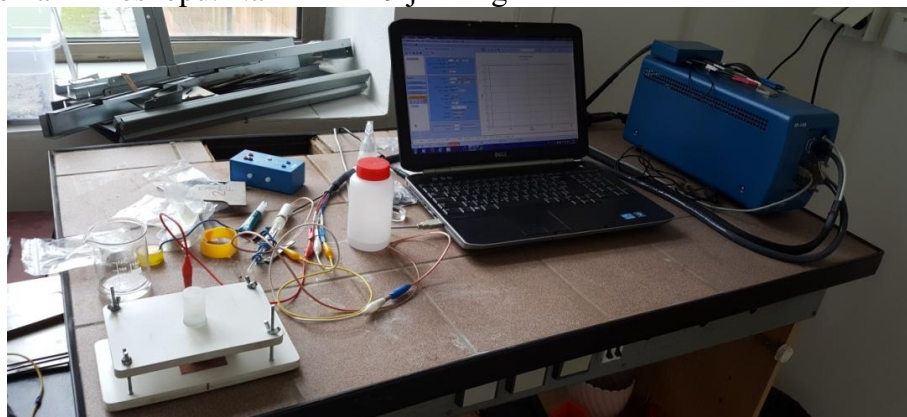
Na materiálu 22K jsou na celém povrchu viditelné korozní důlky o max. hloubce 255 μm , vyplněné korozními produkty. Korozní napadení materiálu 22K bylo místy viditelné i u trhliny. Dále jsou viditelné korozní puchýře průměru $\sim 0,7$ mm. [9]



Obr. č. 48 - Korozní poškození (důlky) na povrchu 22K

20.1. Hodnocení MKK

Byla provedena zkouška mezi krystalové koroze dle ISO 3651-1. Byla provedena zkouška A262-86 practice A, kde se elektrolyticky s elektrolytem, kyselinou šťavelovou 10 % $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$, naruší povrch testovaného materiálu po dobu 1,5 minuty. Vyhodnocení bylo provedeno na mikroskopu. Na Obr. č. 49 je fotografie z testování MKK.

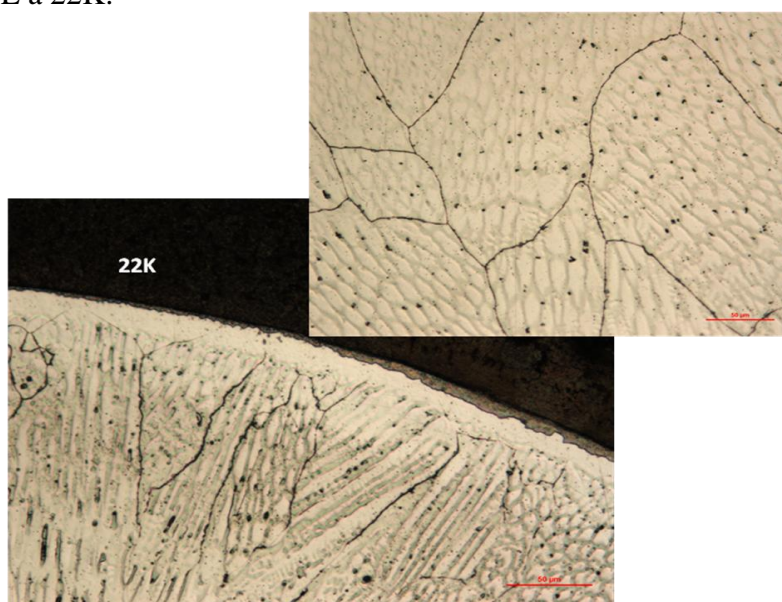


Obr. č. 49 - Průběh testu MKK



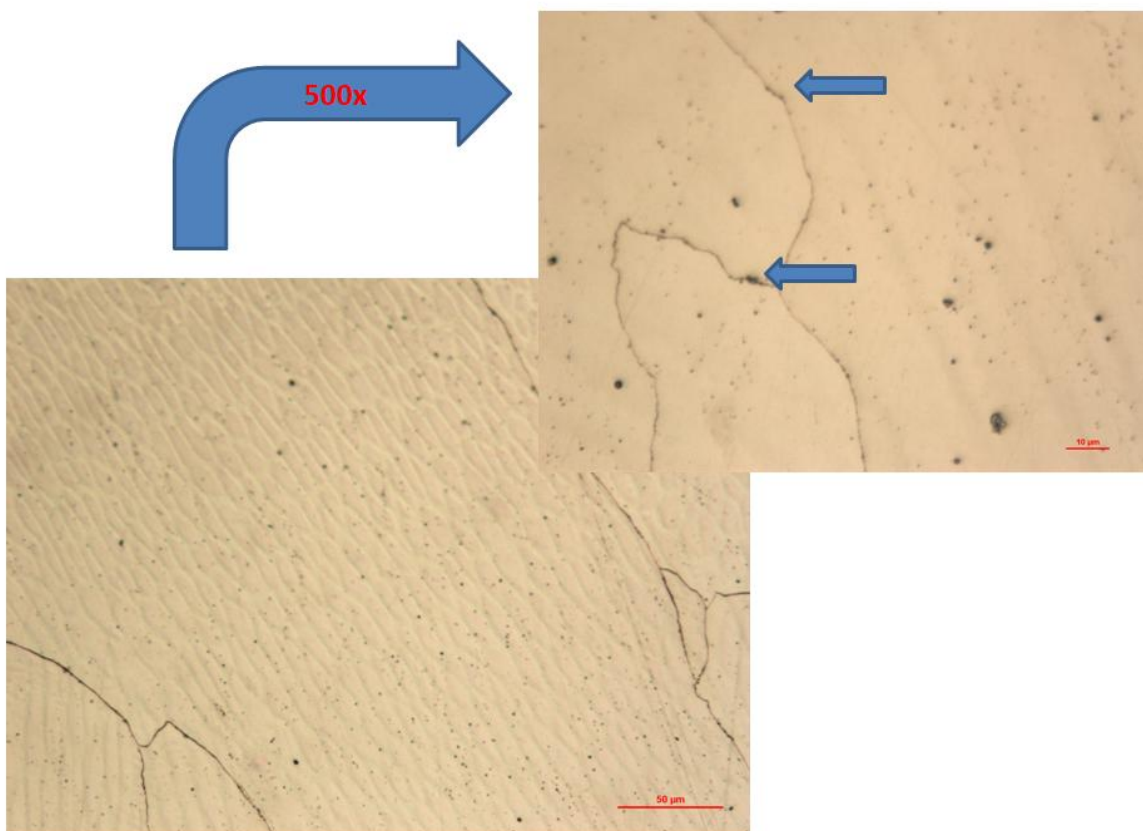
Obr. č. 50 - Vzorek s vytvořenou zkouškou MKK

Na Obr. č. 51 je zkouška MKK na přechodovém materiálu ER308L. Na první pohled je vidět, že koroze po hranicích zrn není tak markantní. Nejvíce je pozorovatelná v blízkosti rozraní ER308L a 22K.



Obr. č. 51 - MKK u ER308L 200x

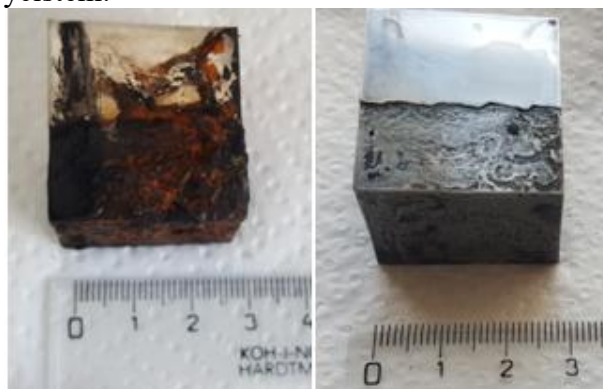
Na Obr. č. 52 je možné pozorovat provedenou zkoušku na MKK u Inconelu 52M. Zde se nachází stopové množství MKK, které jsou označeny šipkami. Vlivem špatně zvolených parametrů svařování a špatného odvodu tepla, dochází k precipitaci karbidů Cr na hranicích zrn, a tím se zvyšuje náchylnost na MKK. Snímky byly posouzeny s výsledkem, že toto nalezené stopové množství MKK je přijatelné a svařovací parametry byly vyhovující.



Obr. č. 52 - MKK u Inconelu 52M vlevo zvětšeno 200x, vpravo zvětšeno 500x

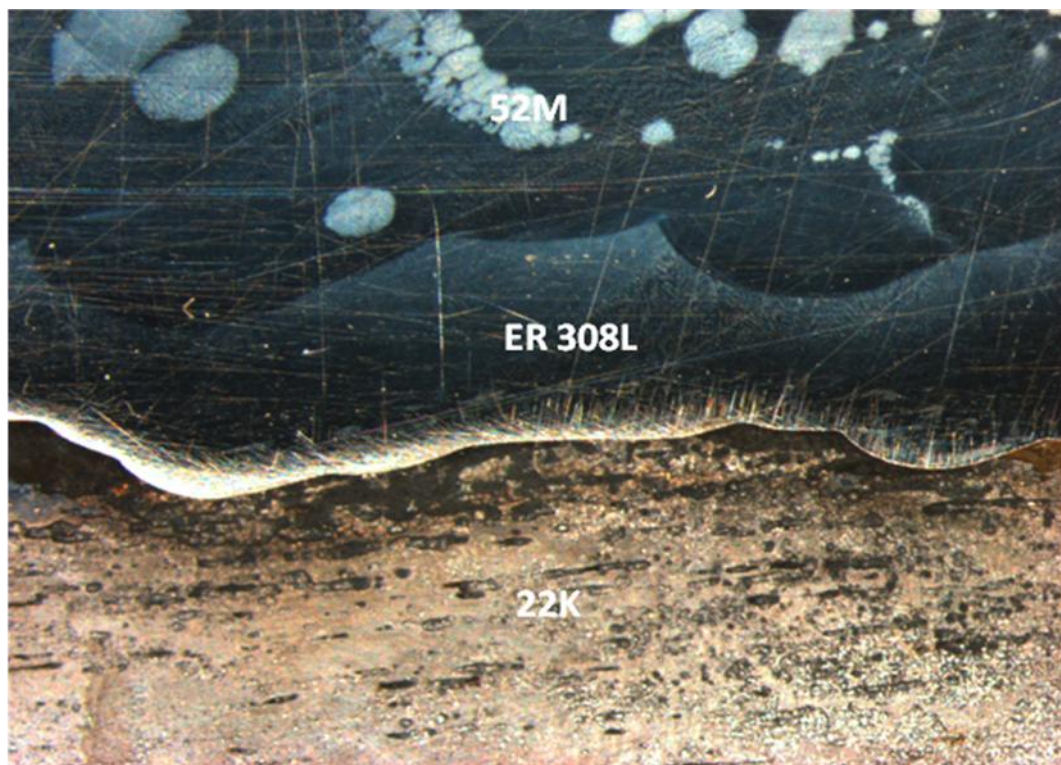
20.2 Zkoušky koroze

Zkouška koroze na zkušebním vzorku byla zařazena a zvolena informativně. Zkouška probíhala v solné komoře po dobu 6 dnů. Na Obr. č. 53 je zachycen stav vzorku po vyndání z komory, před a po vyčištění.



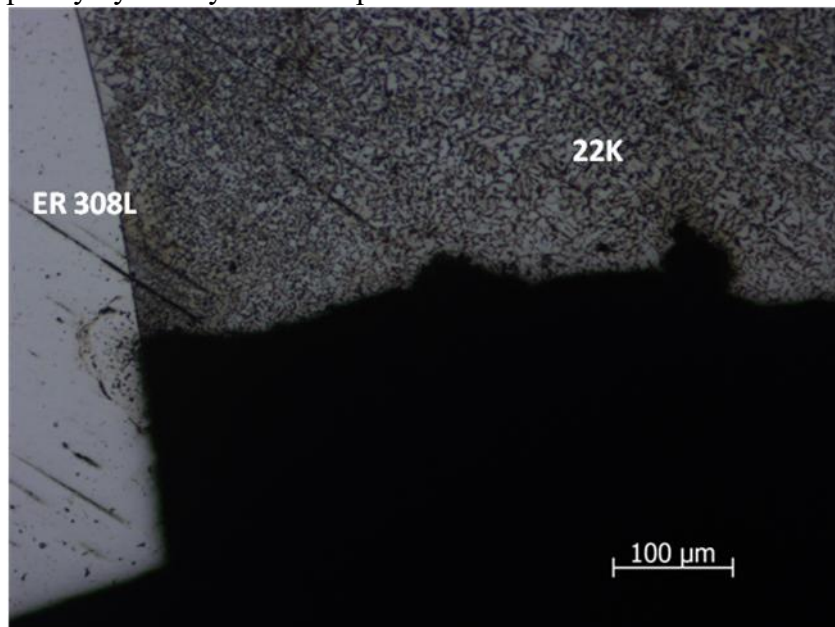
Obr. č. 53 - Vzorky po vyndání ze solné komory a po vyčištění

Již na první pohled, dle mapek je vidět, že se jedná o nerovnoměrnou korozi. Pro vyhodnocení zda se jedná o důlkovou korozi, byl proveden příčný výbrus a mikroskopie. Na Obr. č. 54 je možné pozorovat, že nedošlo ke koroznímu napadení Inconelu 52M ani přechodového materiálu ER308L. Došlo pouze ke koroznímu napadení materiálu 22K.

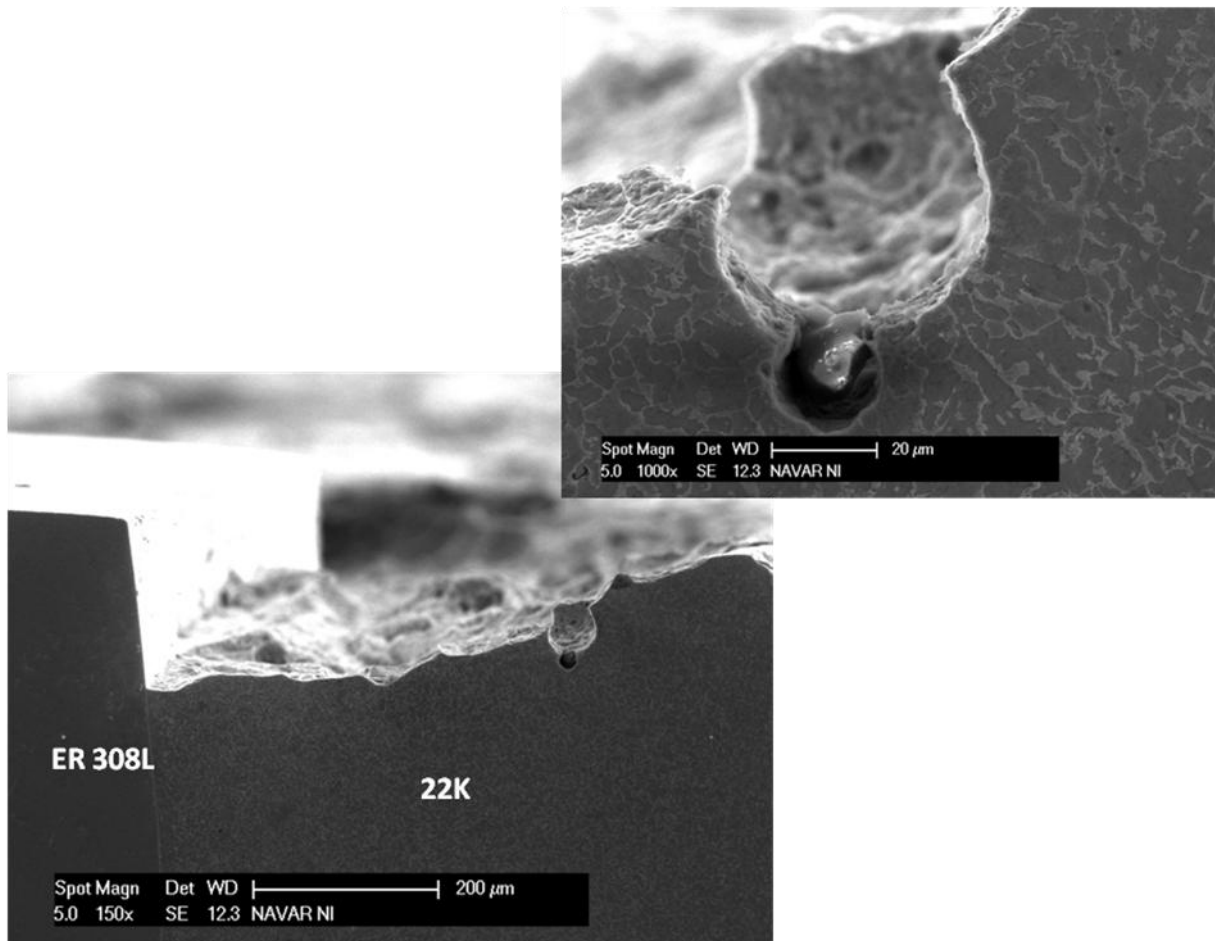


Obr. č. 54 - snímek makrostruktury korozního napadení vzorku

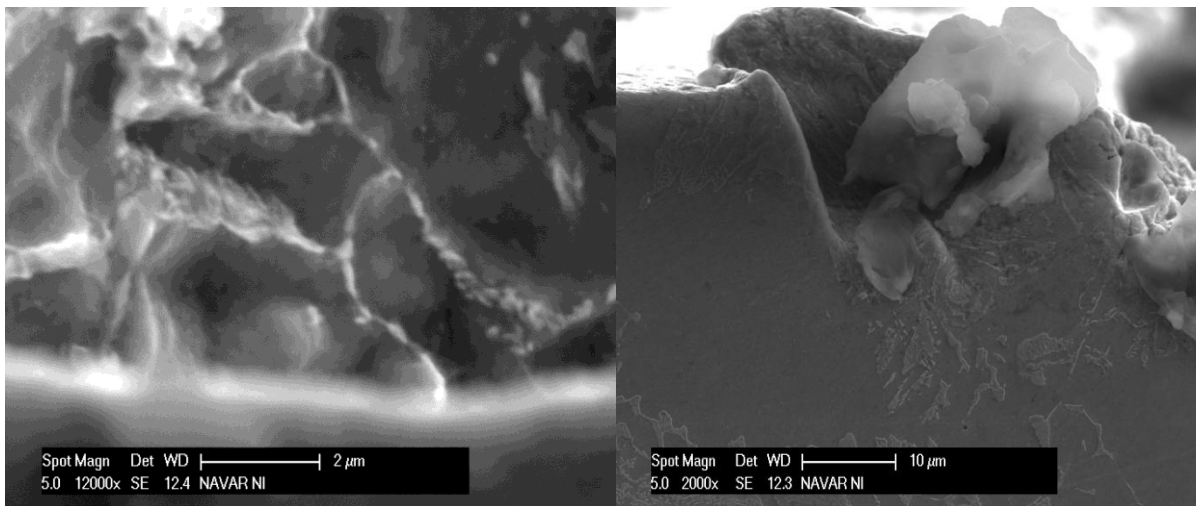
Na Obr. č. 55 je snímek výbrusu, kde je možné pozorovat napadený materiál 22K. Napadení rostlo do hloubky, tehdy bylo možné určit, že se jedná o pittingovou korozi. Na Obr. č. 56 je příčný výbrus vyhodnocen pomocí elektronového řádkovacího mikroskopu.



Obr. č. 55 - Napadení korozi 22K

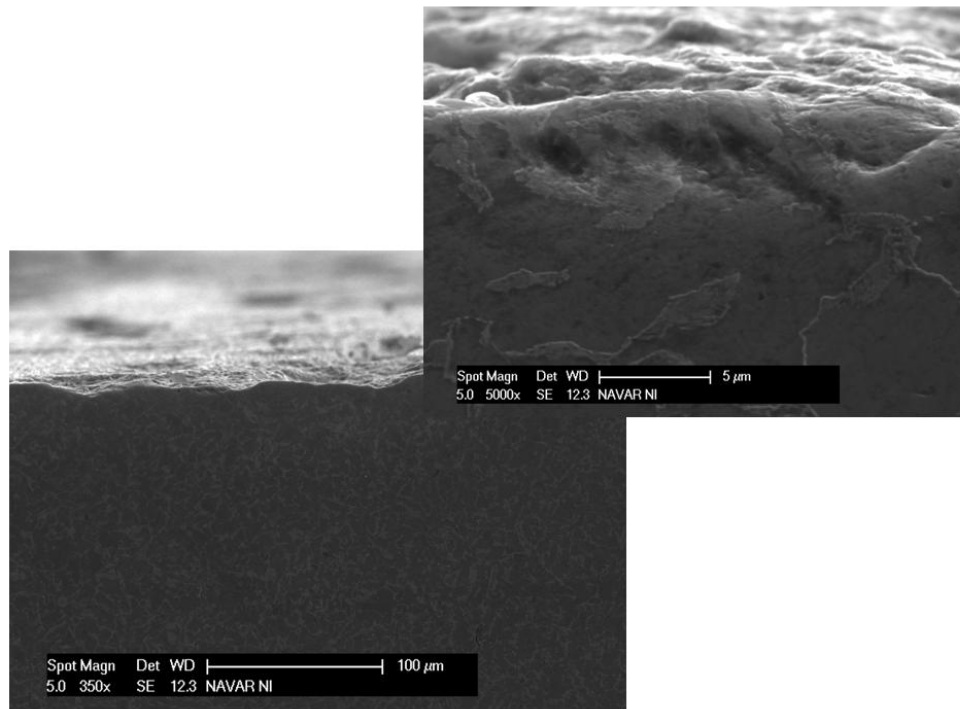


Obr. č. 56 - Korozní napadení 22K



Obr. č. 57 - Vlevo pohled do defektu z Obr. č. 56, vpravo detail korozie

Na Obr. č. 57 je pohled do defektu z předchozího obrázku. Zde je možné vidět karbidy po hranicích zrn a napadení feritu. Na Obr. č. 58 je oblast, kde je větší poškozená plocha.



Obr. č. 58 - pohled na poškozenou oblast

21. Mechanické zkoušky rázem v ohybu, tahem a měření tvrdosti

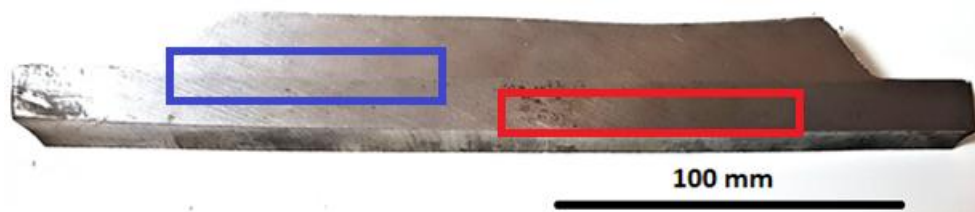
Pro další hodnocení je potřeba provést mechanické zkoušky. Některé zkoušky vzhledem k nestandardnímu provedení metody byly provedeny nestandardně a experimentálně.

21.1 Zkouška rázem v ohybu

Z dodaného svařence bylo podle plánu rozřezávání, odřezáno šest kusů polotovarů pro výrobu zkušebních těles pro zkoušku rázem v ohybu dle ČSN EN 10 045-1 Kovové materiály – Zkouška rázem v ohybu podle Charpyho.

Z šesti kusů polotovarů byla následně vyrobena zkušební tělesa pro zkoušku rázem v ohybu. Poloha tří zkušebních těles byla v polotovaru zvolena tak, aby kořen vrubu zkušebního tělesa byl uprostřed tloušťky TOZ materiálu 22K a směr šíření trhliny byl směrem do návaru ze slitiny 52M. Tato zkušební tělesa byla označena číslicemi 1, 2 a 3. V následujícím obrázku je jejich poloha schematicky zaznačena modrou barvou s popisem TOZ – 22K.

Umístění dalších tří zkušebních těles bylo v polotovaru zvoleno tak, aby kořen vrubu i celé zkušební těleso bylo lokalizováno pouze v materiálu 22K s tím, že směr šíření trhliny je směrem k návaru (slitina 52M). Tato zkušební tělesa byla označena číslicemi 4, 5 a 6. V uvedeném Obr. č. 59 je jejich poloha ohraničená červenou barvou s popisem 22K.



Obr. č. 59 - Zobrazení polohy odebrání zkušebních těles pro zkoušku rázem v ohybu

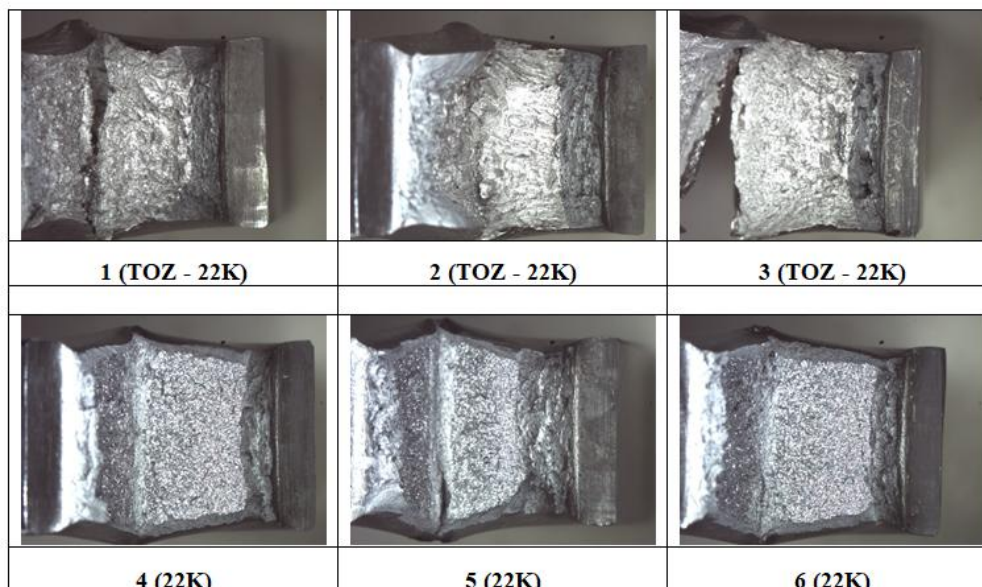
Vlastní zkouška rázem v ohybu (ČSN EN 10 045-1) byla provedena za pokojové teploty (23 °C) na standardním rázovém kladivu PSD-300 s nominální energií 300 J. Hodnoty nárazové práce jsou uvedeny v následující tabulce 13.

Číslo zkušebního tělesa	Oblast	T [°C]	KV [J]	B [mm]	W [mm]
1	TOZ – 22K	23	173,1	9,99	10,00
2	TOZ – 22K	23	182,8	10,00	10,01
3	TOZ – 22K	23	187,9	10,00	9,75
4	22K	23	100,0	9,99	10,00
5	22K	23	126,9	10,01	10,09
6	22K	23	104,7	10,01	9,99

Tabulka 13- Výsledky zkoušky rázem v ohybu

T – teplota, KV – nárazová práce, B/W – šířka/výška zkušebního tělesa

Na následujících snímcích (Obr. č. 60) jsou zobrazeny vzhledy lomových ploch porušených zkušebních těles, pořízené pomocí světelného mikroskopu. Morfologie těchto lomových ploch vykazuje charakteristické znaky lomů pro velké makro plastické deformace. Na základě této skutečnosti lze říci, že bylo nutné vynaložit poměrně vysoké hodnoty nárazové práce. Odtud určíme, že návar vyhovuje po mechanické stránce.



Obr. č. 60 - Vzhledy lomových ploch zkoušky vrubové houževnatosti

22.2 Tahová zkouška

Tahová zkouška má pouze informativní charakter. Z důvodu absence tahového stroje, který dokáže upnout malé vzorky, bylo nutné navrtat vzorek a prodloužit ho šrouby. Na Obr. č. 61 je možné tuto aplikaci vidět.



Obr. č. 61 - Připravený vzorek pro tahovou zkoušku

Vzorek byl upnut do tahového stroje, následně byl zatěžován silou. Vzorek se rovnoměrně prodlužoval, docházelo i k prodlužování šroubů. Avšak toto měření skončilo neúspěchem, závity nevydržely narůstající sílu a docházelo k vytrhávání šroubů ze zkušební vzorku. Toto měření je uvedeno, jelikož přináší zjištění, jakému minimálnímu napětí návar dokáže odolat.

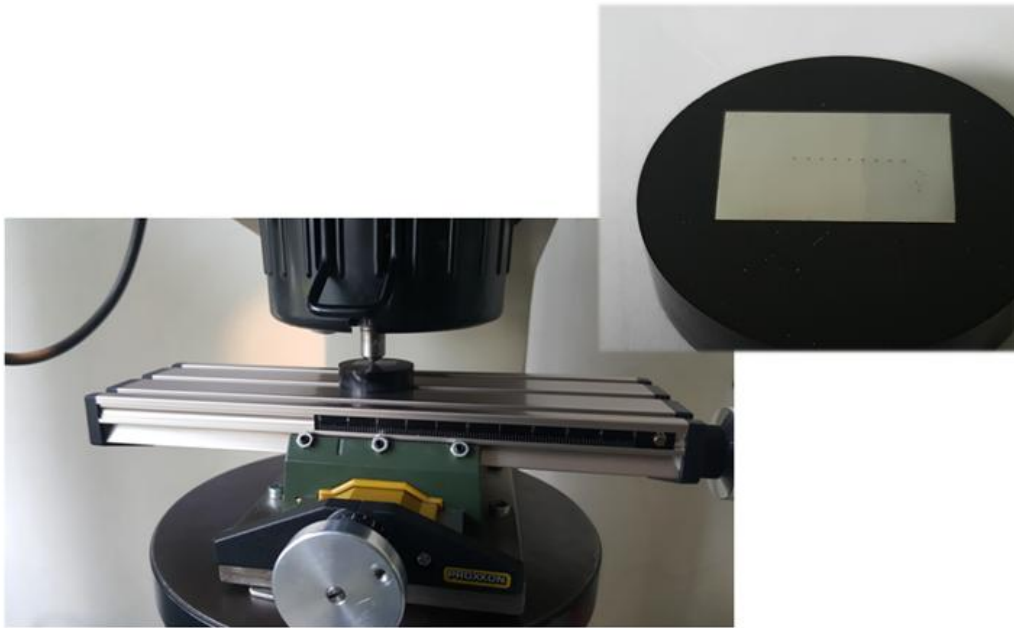


Obr. č. 62 - Upnutí vzorku mezi čelisti trhačického stroje

Měřením bylo zjištěno, že vzorek odolal maximální síle o hodnotě **22,2 kN**, což v přepočtu na plochu odpovídá napětí o hodnotě **123 MPa**.

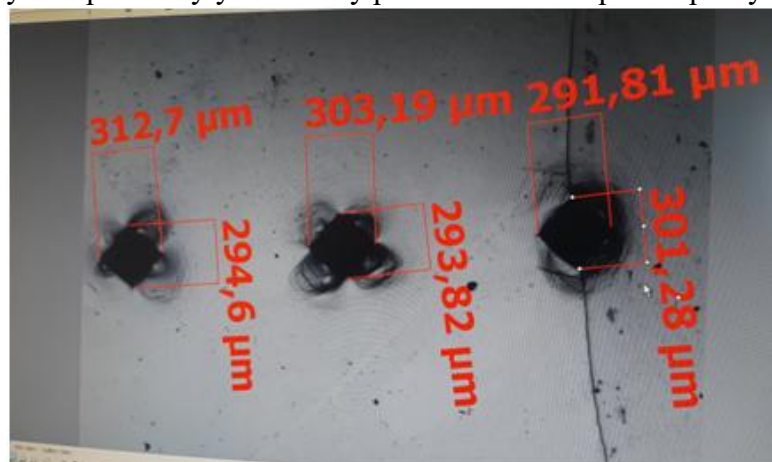
22.3 Zkoušky tvrdosti

Na zkušebním vzorku byla měřena tvrdost dle Vickerse HV10 s odstupem 1 mm. Na mikro tvrdoměru byl použit mikrometrický stolek. Počátek měření tvrdosti byl na přechodu 22K a ER308L. Na Obr. č. 63 je znázorněn vzorek, na kterém bylo provedeno měření tvrdosti.



Obr. č. 63 - Měření tvrdosti

Hodnoty úhlopříček byly naměřeny pomocí mikroskopu a zapsány do tabulky 14.

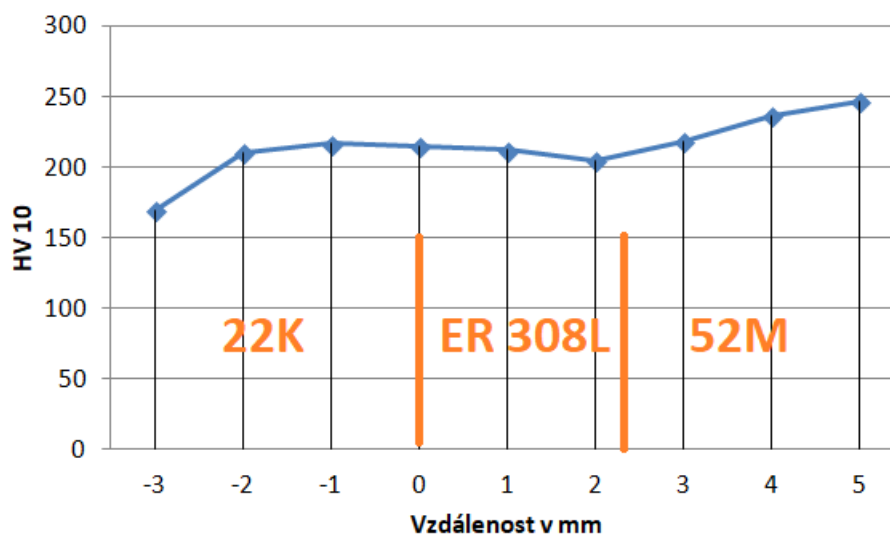


Obr. č. 64 - Měření úhlopříček

Číslo vtisku	Úhlopříčka 1	Úhlopříčka 2	Průměr	HV10
1. 22K	324,75	334,24	329,495	169,5
2. 22K	295,16	295,91	295,535	210,8
3. 22K	295,12	295,49	295,305	216,7
4. Rozhraní 22K a ER308L	291,81	301,28	296,545	214,9
5. ER308L	293,82	303,19	298,505	212,1
6. ER308L	312,7	294,6	303,65	205,0
7. 52M	293,81	294,85	294,33	218,2
8. 52M	284,71	280,73	282,72	236,5
9. 52M	272,89	280,45	276,67	247,0

Tabulka 14 - Naměřené hodnoty tvrdosti

Z naměřených hodnot a grafu vyplývá, že v TOO v materiálu 22K byla zvýšená nebo vyšší tvrdost, než tomu bylo u základního materiálu, to může značit vytvoření bainitické struktury.



Obr. č. 65 - Graf naměřených tvrdostí

23. Diskuze výsledků

Diplomová práce řešila vhodnost metody oprav svarových spojů, na JE metodou WOL. V případě splnění požadovaných zkoušek a parametrů na tento postup může být provedena kvalifikace postupu.

Nejprve byly vytvořeny polotovary pro zhotovení návaru dle originálu „superhavarijního“ nátrubku parogenerátoru na JE Dukovany. Před svařováním byla sestavena pWPS a WPQR dokumentace na základě podkladů od EPRI.

Při samotném svařování byla v průběhu prováděna ultrazvuková kontrola bez nálezu defektů. Po svařování byl návar obroběn broušením a znovu zkontrolován ultrazvukem bez nálezu defektů.

Vzorek byl rozřezán na jednotlivé vzorky, kde byly provedeny mechanické zkoušky rázem v ohybu, tahem a měření tvrdosti. Dále zde bylo provedeno hodnocení makrostruktury a mikrostruktury, hodnocení MKK a korozní zkoušení.

Z makrostruktury vyplývá, že svarové housenky jsou pravidelné a neobsahují žádné defekty ani horké trhliny.

Z mikrostruktury vyplývá, že přechody mezi jednotlivými materiály jsou čisté bez horkých trhlín. Na straně 22K a ER308L došlo k mírnému oduhlíčení. Je zde pozorována TOO v materiálu 22K, kde je jemnozrná feriticko - perlitická struktura s bainitickými oblastmi. Tuto skutečnost potvrdila i pozdější zkouška hodnocení tvrdosti, kde v TOO byla vykázána vyšší tvrdost než v ZM.

Ze zkoušek MKK je patrné, že mírná mezi krystalová koroze vznikala na hranicích zrn Inconelu 52M. Výskyt není významný, proto lze říci, že takto provedený svarový spoj a jeho přídatný materiál není náchylný na MKK.

Z hodnot zkoušky rázem v ohybu a fotografií je patrné, že morfologie těchto lomových ploch vykazuje charakteristické znaky lomů pro velké makro plastické deformace. Na základě této skutečnosti lze říci, že bylo nutné vynaložit poměrně vysoké hodnoty nárazové práce. Z toho dále vyplývá, že návar vyhovuje po mechanické stránce.

Z hodnot měření tvrdosti bylo zjištěno, že u materiálu 22K v TOO se zvýšila tvrdost, a v Inconelu směrem od návaru, tvrdost roste.

Jelikož se pracovníci v jaderných elektrárnách v ČR setkávají s problematikou pittingové koroze, Byl proveden test koroze v solné komoře po dobu 6 dnů. Na snímcích byla pozorována pittingová koroze a to zejména v oblasti TOO. Tento jev byl potvrzen, jak mnou provedenými testy, tak i nezávisle provedenými testy zhotovené pro společnost ČEZ a.s. zkušebním orgánem ÚJV.

24. Závěr

Metoda opravy svarových spojů WOL je velmi vhodná. V této diplomové práci bylo zjištěno několik podmínek nutných pro kvalifikaci této metody. Testované podmínky pro kvalifikaci této metody byly splněny.

Pro kvalifikaci je však nutné provést více testů s ohledem na mechanické vlastnosti. Jelikož se jedná o aplikaci na „superhavarijní“ nátrubek, na který je přiváděna chladicí kapalina v případě havárie, je na tento systém kladen vysoký bezpečnostní důraz. Je nutné zajistit zkoušky přibližující se reálnému provozu a namáhání pro aplikovanou součást.

Dále je nutné vzít v potaz, že automatizaci a orbitální hlavu nelze aplikovat úplně všude, tuto metodu je také nutno kvalifikovat pro ruční svařování.

Nyní na jaderné elektrárně probíhá oprava stovek svarových spojů a je potřeba zvážit, zda není třeba zvolit jinou metodu opravy původních svarových spojů a výrobu nových svarových spojů. S odkazem na ruskou publikaci (Automatické svařování 3/2007, Způsob zvýšené odolnosti vůči lokálnímu poškození svarových spojů potrubních JE) bylo zjištěno, že rusové mají kvalifikovaný postup svařování heterogenních svarových spojů, kde místo přídavného materiálu Sv-04Ch19N11M3, jak je uvedeno na Obr. č. 32, je přidáván čistý feritický materiál (technické železo). Tyto svarové spoje, pak mají mnohem vyšší korozní odolnost.

Použitá literatura

1. KNIŽNÍ PUBLIKACE

- [1] KOLEKTIV AUTORŮ, ANB. *Materiály a jejich svařitelnost*, 1999
- [2] KOVAŘÍK, R. *Technologie svařování 1.* vyd. Plzeň, ZČU, 1993
- [3] ALTO P. *Overlay Handbook: Part 1 - Welding Procedures Part 2 - NDE* EPRI, CA: 2010. 1021075
- [4] ALTO P., *Welding and Repair Technology Center: Repair Welding Handbook* EPRI, 2012. 1025160
- [5] Welding and Repair Technology Center: *Nuclear Weld Overlay Training* EPRI, Palo Alto, CA: 2010. 1021173
- [6] *Application and Repair of Overlay Welds* EPRI, Palo Alto, CA: 2005. 1009755
- [7] KRUNCIPÁL, J. PILOUS, V. a DUNOVSKÝ, J. *Nové technologie ve svařování*. 1. vydání. Praha: SNTL, 1984. ISBN L13-B2-V-31f/22785.

2. ČLÁNKY V MONOTÉMATICKÝCH PUBLIKACÍCH

- [8] Normativně technická dokumentace ASI, ZVLÁŠTNÍ PŘÍPADY ZAŘÍZENÍ A POTRUBÍ JADERNÝCH ELEKTRÁREN TYPU VVER, 2015
- [9] TONAROVÁ D., BRABEC P., BURDA J., ERNESTOVÁ M., *HODNOCENÍ HETEROGENNÍHO SVAROVÉHO SPOJE ODEBRANÉHO Z NÁTRUBKŮ PG HVB2*, 12/2016
- [10] DVOŘÁKOVÁ M., KONOP R., ELLINGER J., *OPRAVNÉ SVAROVÁNÍ – VÝSLEDKY ATESTAČNĚ-KVALIFIKAČNÍHO PROGRAMU*
- [11] HAUŠID P., SIEGL J., *ANALÝZA PORUCHY HETEROGENNÍHO SVAROVÉHO SPOJE č. 305 NA NÁTRUBKU N5 PGI 2. HVB ETE*, Praha, 2016
- [12] VYKLIČKÝ O., VÁLKA L., JAN V., *Makro a mikrostrukturní analýza vzorků svarových spojů s technologií opravy „Weld Overlay“*, Brno, 2013

3. PUBLIKACE NA INTERNETU

- [13] Orbitální svařování. Topwig [online]. Děčín: TopWIG, 2014, 2014 [cit. 2016-11-26]. Dostupné z: <http://www.topwig.cz/orbitalni-svarovani>
- [14] Orbitální svařování - trubka - trubka. Hala welding [online]. Ústí nad Labem: Hala Welding, 2015, 2015 [cit. 2016-11-26]. Dostupné z: <http://www.hala-welding.cz/index.php?nid=5135&lid=cs&oid=2301485>
- [15] Orbitální svařování - svařovací automaty ORBITEC. Svařování-nerez [online]. Praha: Svarovani nerez, 2015, 2015 [cit. 2016-11-26]. Dostupné z: <http://www.svarovani-nerez.cz/orbitalni-svarovani.html>
- [16] Orbital welding. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001, [cit. 2016-11-26]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Orbital_welding
- [17] BROM J., ČANČURA Z., *VÝVOJ NOVÉ TECHNOLOGIE OPRAVY SVAROVÝCH SPOJŮ POMOCÍ „WELD OVERLAY (WOL)“* [online]. [cit. 2017-1-26]. Dostupné z: <http://www.csvts.cz/cns/news15/wol15.pdf>

4. ČLÁNKY V ČASOPISECH, VE SBORNÍCÍCH KONFERENCÍ APOD.

- [18] EPRI DIVISION 1, Case N-754 Optimized Structural Dissimilar Metal Wlr Overlay for Migration of PWR Class 1 Items, Section XI, Division 1, 2011
- [19] WILLIS E., Weld Overlay Training - Module 1-3, Presentation, 2011
- [20] EPRI Charlotte Staff, 07b Phased Array (reference), Presentation, 2011
- [21] CEZ-WRTC Mtg. - Czech Republic, 08 Weld Filler Metal - Alloy 52 (SLMc), presentation, Steve McCracken EPRI – Welding and Repair Technology Center, 2012

5. PATENTOVÉ DOKUMENTY: AUTORSKÁ OSVĚDČENÍ, UŽITNÉ VZORY NEBO OSVĚDČENÍ K NIM, ZVEŘEJNĚNÉ PŘIHLÁŠKY, APOD.

- [22] *Specifikace materiálů parogenerátoru PGV 100M*, Vítkovice, 1982
- [23] ČSN EN ISO 15609-1, *Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Stanovení postupu svařování - Část 1: Obloukové svařování*
- [24] ČSN EN ISO 15614-1, *Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Zkouška postupu svařování - Část 1: Obloukové a plamenové svařování ocelí a obloukové svařování niklu a slitin*
- [25] ČSN EN ISO 15614-7, *Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Zkouška postupu svařování - Část 7: Navařování*
- [26] CHOCHOLATÝ O., *Testy mezikrystalové koroze*, 2017