

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

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

## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Návrh opravy svarových spojů na JE metodou WELD OVERLAY  
(WOL)

Autor: **Petr HOVORKA**

Vedoucí práce: **Doc. Ing. Jan Kalous, CSc.**

Akademický rok 2013/2014

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2013/2014

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr HOVORKA**  
Osobní číslo: **S12N0068K**  
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie**  
Název tématu: **Návrh opravy svarových spojů na JE metodou WELD OVER-LAY (WOL)**  
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. Rozbor technologie WOL
2. Postup návrhu WOL
3. Zhodnocení svařených vzorků (MOCKAP)
4. Provedení NDT kontrol WOL
5. Závěr

Rozsah grafických prací: fotodokumentace, obrázky

Rozsah pracovní zprávy: 50-70 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

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:

**Doc. Ing. Jan Kalous, CSc.**

Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Konzultant diplomové práce:

**Ing. Zdeněk Čančura**

JE Temelín

Datum zadání diplomové práce:


**23. září 2013**

Termín odevzdání diplomové práce:

**23. května 2014**

  
Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.  
děkan



  
Prof. Ing. Václav Mentl, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 23. září 2013

## **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: 20.4.2014



.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Na tomto místě bych chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce panu Doc. Ing. Janu Kalousovi, CSc. za metodické vedení a jeho přístup při zpracování diplomové práce. Dále děkuji svému konzultantovi panu Ing. Zdeňku Čančurovi za podněty k tématu a pomoc při získání potřebných informací a podkladů k mé diplomové práci.

Velké poděkování patří také celé mojí rodině, zejména manželce, za podporu a trpělivost nejen při zpracování této práce, ale i během celého studia.

## ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Hovorka	Jméno Petr		
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	N 2301 „Materiálové inženýrství“			
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. Kalous, CSc.	Jméno Jan		
<b>PRACOVIŠTĚ</b>	ZČU - FST - KMM			
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<del><b>BAKALÁŘSKÁ</b></del>	Nehodící se <b>škrtněte</b>	
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Návrh opravy svarových spojů na JE metodou WELD OVERLAY(WOL)			

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KMM	<b>ROK ODEVZD.</b>	2014
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	66	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	49	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	17
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<p style="text-align: center;"><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>Diplomová práce s názvem „Návrh opravy svarových spojů na JE metodou WELD OVERLAY (WOL)“ si klade za cíl popsat metodu návrhu opravy svarových spojů na jaderných elektrárnách, problematiku spojenou se samotným svařováním WOL a také s následnými kontrolami a zkouškami. Popisuje nejen tradičně používané metody navařování, ale i samotnou metodu WOL, ve zkratce historii této metody a důvody jejího vzniku. Součástí práce jsou i požadavky kladené na metodu WOL, uplatňované ve všech fázích aplikace od posouzení vhodnosti opravy touto metodou, přes výpočtovou část, samotnou realizaci WOL až k výsledným kontrolám. V experimentální části popisované NDT kontroly jako je VT a PT jsou chronologicky zařazeny a prováděny stejně, jako by bylo použito při skutečném použití WOL na provozovaném energetickém zařízení. Součástí vyhodnocení je i metalografická analýza a rázové zkoušky vrubové houževnatosti, které jsou finálním završením práce.</p>
<p style="text-align: center;"><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p> <p style="text-align: center;"><b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b></p>	<p>Navařování kovů, defekty v kořeni svaru, heterogenní svarové spoje, WOL, metoda weld overlay, překrytí svaru, citlivost ke koroznímu praskání, zbytkové napětí, tloušťka návaru, specifikace postupu svařování, popouštěcí housenky, nedestruktivní zkoušení, zkoušení ultrazvukem, Phased Array, metalografická analýza, vrubová houževnatost.</p>

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Hovorka	Name Petr	
<b>FIELD OF STUDY</b>	N 2301 „Materials Engineering“		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Kalous, CSc.	Name Jan	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KMM		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Repair design of weld joints at nuclear power plants by WELD OVERLAY method (WOL)		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Material Science and Technology	<b>SUBMITTED IN</b>	2014
----------------	------------------------	-------------------	---------------------------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	66	<b>TEXT PART</b>	49	<b>GRAPHICAL PART</b>	17
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	<p>Master's thesis titled " Repair weld joints at nuclear power plants by WELD OVERLAY method (WOL)" aims to describe the method of repair design of welded joints in nuclear power plants, issues related to the actual welding WOL and also with subsequent examinations and tests. It doesn't describe only the traditionally used methods of welding, but also the method WOL, in short the history of the methods and reasons for its occurrence. The thesis includes requirements for WOL method, applied in all phases of the application by evaluating the appropriateness of this repair method through numerical part, the actual implementation of WOL to the resulting controls. In the experimental section described NDT inspection like VT and PT are listed in chronological order and perform the same as would be used in actual use WOL on the operation of the energy device. This evaluation includes also metallographical analysis and impact test, which is the final culmination of this thesis.</p>
<b>KEY WORDS</b>	<p>Overlay welding of metals, defects in the weld root, dissimilar metal welds, WOL, weld overlay method, sensitivity to stress corrosion cracking, residual stress, weldoverlay thickness, welding procedure specification, temper bead welding, non-destructive testing, ultrasonic testing, Phased Array, metallographical analysis, impact test.</p>

# OBSAH

1 ROZBOR TECHNOLOGIE WOL .....	3
1.1 Opravy zařízení.....	3
1.2 Navařování.....	5
1.3 Metoda weld overaly (WOL).....	8
1.4 Důvody vývoje WOL .....	8
2 POSTUP NÁVRHU WOL.....	10
2.1 Postup návrhu aplikace metody WOL.....	10
2.2 Postup návrhu technologie WOL.....	12
2.3 Postup samotného provedení WOL.....	12
2.4 Technika provádění WOL .....	13
2.5 Problematika horkých trhlin při aplikaci WOL.....	13
2.6 Variantní řešení problematiky .....	14
2.7 Návrh a provedení opravy .....	15
2.8 Experimentální program .....	17
2.9 Základní požadavky na WOL z pohledu NDT kontrol .....	17
2.10 Proces návrhu WOL .....	18
2.11 Experimentální materiály.....	19
2.12 Polotovary vzorků.....	22
2.13 Zařízení pro svařování .....	23
2.14 Konstrukční návrhy .....	25
2.15 Technologické požadavky .....	27
2.16 Stanovení postupu svařování .....	28
2.17 Příprava povrchu před svařováním.....	31
2.18 Měření tloušťky .....	31
2.19 Požadavky na svařování .....	31
2.20 Průběh svařování WOL na nátrubek s HSS.....	33
2.21 Průběh svařování WOL na ocel 22K.....	36
2.22 Průběh svařování WOL na ocel 08Ch18N10T.....	38
2.23 Opracování WOL.....	39
3 ZHODNOCENÍ SVAŘENÝCH VZORKŮ (MOCK-UP).....	41
3.1 Návrh experimentálních analýz .....	41
3.2 Metalografická analýza.....	41
3.3 Měření mikrotvrdomosti .....	52
3.4 Zkouška rázem v ohybu.....	54
4 PROVEDENÍ NDT KONTROL WOL.....	56
4.1 Vizuální kontroly .....	56
4.2 Kapilární kontrola.....	58
4.3 Kontroly ultrazvukem .....	60
5 ZÁVĚR.....	63
6 POUŽITÁ LITERATURA, ZDROJE.....	64



## Použité zkratky

AISI	American Iron and Steel Institute
ASME	American Society of Mechanical Engineers
BWR	Varný reaktor (Boiling Water Reactor)
DM	Degradační mechanismy
EPRI	Electric Power Research Institute, Inc.
FN	Feritové číslo (Ferrita Number)
FSWOL	Full Structural Weld Overlay
GTAW	Svařování elektrickým obloukem netavící se elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu (Gas Tungsten Arc Welding)
HCP	Hlavní cirkulační potrubí
HSS	Heterogenní svarový spoj
JE	jaderná elektrárna
MSIP	Mechanical Stress Improvement Process
NDT	Nedestruktivní kontroly (Non-Destructive Testing)
OWOL	Optimized Weld Overlay
PG	Parní generátor
PT	Kapilární zkoušení (Penetration Testing)
PWHT	Teplotné zpracování po svaření (Post Weld Heat Treatment)
PWR	Tlakovodní reaktor (Pressure Water Reactor)
PWSCC	Korozní praskání pod napětím vlivem primárního média (Primary Water Stress Corrosion Cracking)
RBMK	Vodou chlazený, grafitem moderovaný reaktor velkých výkonů (Реактор Большой Мощности Канальный)
SCC	Korozní praskání pod napětím (Stress Corrosion Cracking)
TOO	Teplotně ovlivněné oblast
UT	Kontrola ultrazvukem (Ultrasonic Testing)
VT	Vizuální kontrola (Visual Testing)
VVER	vodo-vodní energetický reaktor (rusky водо-водяной энергетический реактор, anglicky Water-Water Power Reactor)
WOL	Weld Overlay
WPS	Specifikace postupu svařování (Welding Procedure Specification)

# 1 Rozbor technologie WOL

## 1.1 Opravy zařízení

Opravy zařízení, která obsahují zejména ve svarových spojích nepřípustné indikace, jsou dosud většinou prováděny běžnými postupy. Po zjištění, specifikaci a vyhodnocení nepřípustnosti takových indikací je stanoven postup opravy s následnými kontrolami. Navržený postup opravy v současné době většinou stanovuje odstranění zjištěné nepřípustné indikace (často celého svarového spoje) a opravu některou z osvědčených technologických metod. Při použití technologie svařování je to především vytvoření nového svaru v místě, kde byla nepřípustná indikace zjištěna a odstraněna. Následují předem stanovené nedestruktivní kontroly a případně další zkoušky před uvedením zařízení do provozu.

Zejména z ekonomických důvodů jsou hledána alternativní řešení, která při dodržení všech příslušných bezpečnostních, legislativních a technických požadavků kladených na opravovaná zařízení, přinášejí požadovaný efekt, tj. např. zkrácení doby opravy, prodloužení životnosti zařízení apod. Dalšími důvody pro hledání dalších metod oprav, především na jaderných elektrárnách, jsou jaderná bezpečnost vzhledem k možnosti úniku radioaktivních látek, technická bezpečnost a bezpečnost pracovníků provádějících opravu.

Při hledání nových možností je často využíváno zkušeností z jiných oborů nebo zavedené dobré praxe v podobných zahraničních provozech. Některé z používaných metod a technologií, které jsou v zahraničí dnes již běžně používány, nemají v našich podmínkách tradici ověřenou technickými zkušenostmi, znalostmi a výsledky.

Jako příklad takových metod jsou zde uvedeny:

- a) metoda MSIP<sup>®</sup> (Mechanical Stress Improvement Process) - proces zlepšování mechanického namáhání,
- b) metoda WOL (Weld Overlay) - navařování, překrytí svařováním.

### 1.1.1 Metoda MSIP<sup>®</sup>

MSIP<sup>®</sup> je patentovaný proces, který byl vynalezen, vyvinut a poprvé použit v roce 1986 společností NuVision Engineering, Inc. ke snižování korozního praskání pod napětím (SCC) u svařenců potrubí v jaderných elektrárnách. Metoda je v USA přijata úřadem regulátora (U. S. Nuclear Regulatory Commission) jako postup zlepšující napětí (Stress Improvement - SI) pro zmírnění korozního praskání SCC na elektrárnách typu BWR i PWR. Tato metoda je a bude uplatňována mimo jiné i na RBMK v Rusku a Litvě.

- Za více než 25 let úspěšných provozních zkušeností bylo provedeno přes 6000 aplikací této metody po celém světě.
- Metoda je ověřena a kvalifikována několika uznávanými organizacemi.
- Stlačením trubky o 1 ÷ 2 % v blízkosti svaru dochází k trvalému zmírnění rizika korozního praskání pod napětím (SCC).

- Dochází k přerozdělení zbytkového napětí po svařování a vytváří se příznivé tlakové napětí na vnitřním povrchu trubky v oblasti svarového spoje, včetně svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti.
- Metoda je fyzikálně ověřitelná měřením obvodu.

MSIP<sup>®</sup> pracuje s použitím jednoduché hydraulicky ovládané svorky, která svírá potrubí na jedné straně svaru. Svorky jsou navrženy a vyrobeny pro použití potrubí průměru 2 ÷ 34" (tj. 50,8 ÷ 863,6 mm). Na Obr. 1.1. je typický nástroj se speciálně navrženým hydraulickým zařízením, které tlačí obě poloviny svorky k sobě. Přenosné hydraulické čerpadlo je použito k vytvoření tlaku v zařízení.

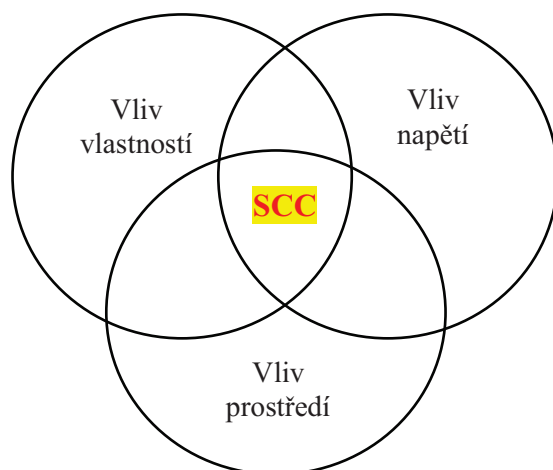


Obr. 1.1. - Zařízení MSIP<sup>®</sup>

[1]

### 1.1.2 Metoda WOL (Weld Overlay)

Metoda WOL (podrobně popsána v [2] a [3]) je primárně chápána jako technologie opravy HSS (vytvoření návaru na vnějším průměru HSS a přilehlém potrubí) vyrobených z materiálů (např. austenitické oceli) náchylných na korozní praskání pod napětím (SCC). Základní příčiny vzniku SCC jsou schematicky znázorněny na Obr. 1.2.



Obr. 1.2 Faktory ovlivňující SCC

Tyto tři faktory se navzájem ovlivňují. Pokud dojde ke spolupůsobení všech tří uvedených faktorů, stává se HSS náchylným ke vzniku SCC. Pokud se ovšem podaří odstranit nebo snížit vliv jednoho ze tří faktorů, lze dosáhnout úplného zastavení nebo výrazného snížení růstu již objevených indikací v HSS. [4]

Na Obr. 1.3 jsou zobrazeny:

- aplikace WOL na připojení potrubí ke kompenzátoru objemu (KO),
- mock-up - maketa, zkušební kus



Obr. 1.3 WOL na připojení potrubí ke KO a mock-up

## 1.2 Navařování

Technologie navařování je tradičně určená pro vytváření homogenních vrstev spojených se základním materiálem. Používá se k mnoha účelům od běžného doplnění rozměru opotřeбенého výrobku nebo součásti, až po vytvoření vrstvy se zcela odlišnými vlastnostmi od základního materiálu, na kterém je navaření provedeno. V současné době je využívána v širokém rozsahu jako součást výrobní technologie (například k vytváření těsnicích ploch uzavíracích a regulačních armatur, výstelek komponentů u důležitých dílů v jaderné energetice, funkčních povrchů v automobilovém a leteckém průmyslu a řadě dalších aplikací)

a také jako prostředek ke zvyšování životnosti strojů, zařízení, součástí i nástrojů ve výrobě, údržbě i opravárenství. Navařování dosáhlo v posledních desetiletích značného rozšíření, díky rozvoji navařovacích technologií a návarových materiálů. [5]

### 1.2.1 Navařování - pojmy, charakteristika

Navařování je metalurgický proces, při kterém je základní materiál nataven působením použitého zdroje tepla, který rovněž natavuje zvolený návarový (přídavný) materiál a na základním materiálu se vytváří homogenní kovová nebo slitinová vrstva.

Zdrojem tepla přitom může být:

- plamen hořlavého plynu ve směsi s kyslíkem,
- elektrický oblouk,
- plazma,
- laser,
- exotermická reakce.

Cílem běžného navařování je co nejvíce snížit (omezit) hloubku závaru a tím i podíl základního materiálu v návarovém kovu, což také příznivě ovlivňuje (omezuje) množství tepla vneseného do navařovaného dílce a tím i menší deformace a pnutí. Je proto zapotřebí pro jednotlivé technologie volit takový postup, který hloubku závaru optimálně sníží.

Pro praktickou aplikaci má navařování následující využití:

a) prostou obnovu opotřebené části provozovaného předmětu, kde je žádoucí, aby návarový kov byl přibližně stejného chemického složení. (pro obnovu původního rozměru volit návarovou vrstvu ve vyšší kvalitě nežli základního materiálu),

b) návarem vytvořit vrstvu se zvláštními vlastnostmi odolávající například:

- korozi,
- tepelnému namáhání,
- abrazivnímu opotřebení,
- adhezivnímu opotřebení,
- erozi,
- kavitaci,
- kombinaci několika působení současně.

[5]

### 1.2.2 Způsoby navařování

Pro navařování (všechny způsoby) jsou důležitá následující hlediska:

- a) tavicí teploty základního i přídavného (navarovacího) materiálu,
- b) specifická hmotnost základního i navařovacího materiálu.

Většinou při teplotě tavení základního materiálu vyšší a teplotě tavení navařovacího materiálu stejné nebo nižší než základního materiálu, nečiní navařování potíže. Velmi nízká teplota navařovacího materiálu však vyžaduje zvláštní pozornost, nebo není možná vůbec

(například nelze navařovat hliník a jeho slitiny na ocel a další základní materiály o značně vyšší teplotě tavení).

Hledisko rozdílu specifické hmotnosti má při navařování důležitý význam. Navařuje-li se na základní materiál o nižší specifické hmotnosti, pak částice základního materiálu při jeho natavení mohou „vyplavat“ do návaru. Příkladem je navaření bronzu elektrickým obloukem na ocel (v návaru bronzu se vyskytnou ostrůvky oceli).

[5]

### 1.2.3 Návary z hlediska základního materiálu

Základní materiál, na který má být aplikován zvolený návar, má z hlediska procesu navařování svá specifika. Především musí být jeho tavicí teplota rovná nebo vyšší než-li teplota tavení navařovacího materiálu. Musí být respektovány další fyzikálně chemické vlastnosti. Při navařování jde prakticky o spojování různorodých materiálů. Důležitá je rovněž hmotnost, rozměry i tvar součásti nebo výrobku, a také respektování strukturních charakteristik a morfologie.

V praxi se navařování provádí na následující základní materiály:

- ocel (uhlíková, nízkolegovaná a její slitiny),
- měď a její slitiny,
- hliník a slitiny hliníku,
- nikl a jeho slitiny.

[5]

### 1.2.4 Metody navařování

Metody navařování jsou rozděleny především dle použitého zdroje tepla potřebného k provedení procesu navařování:

- navařování plamenem,
- navařování elektrickým obloukem,
- navařování plazmatem,
- povlakování žárovými nástřiky,
- navařování laserem,
- navařování elektronovým svazkem ve vakuu,
- nánosové pájení,
- navařování s využitím aluminotermické reakce (navarování termitem),
- atomické navařování neodtavující se elektrodou v atmosféře vodíku.

[5]

### 1.3 Metoda weld overaly (WOL)

Metoda weld overaly (WOL) se ve světě začala používat od roku 1980. Nejprve byla metoda aplikována na varných reaktorech (BWR) pro opravu svarových spojů náchylných na korozní praskání (SCC). Ve světě bylo na BWR touto metodou opraveno více jak 800 svarových spojů. Pro opravu heterogenních svarových spojů byl vyvinut speciální přídavný drát. Má označení 52 a je na opravu heterogenních svarových spojů používán od roku 1997. Mírnou změnou v chemickém složení slitiny přídavného materiálu 52, zvýšením obsahu Mn, Nb (Cb) a snížením obsahu Al a Ti, vznikl přídavný materiál 52M. Kromě toho je tento materiál speciálně zpracován ke snížení obsahu nečistot.

Na tlakovodních reaktorech (PWR) je metoda aplikována od roku 2004. Celkem bylo na PWR opraveno 250 svarových spojů. Nejvíce aplikací technologie WOL je na heterogenních svarových spojích kompenzátoru objemu. Velkou výhodou metody je zlepšení podmínek pro provádění NDT kontrol a snížení namáhání komponent v oblasti styku povrchu s médiem. V Asii byla technologie WOL aplikována v Koreji, Japonsku a Tchaj-wanu. V Evropě byla technologie opravy aplikována ve Švédsku, Belgii, Švýcarsku a ve Slovinsku. Metoda WOL byla aplikována i na vertikálních parních generátorech.

Na Obr. 1.4 jsou zobrazeny aplikace metody WOL na nátrubcích kompenzátoru objemu.

[6], [7]



Obr. 1.4. Aplikace metody WOL na nátrubcích kompenzátoru objemu

### 1.4 Důvody vývoje WOL

U některých typů oceli, zejména austenitických se během provozu reaktoru BWR objevila citlivost na korozní praskání pod napětím v primárním médiu (PWSCC). PWSCC se zejména objevila u teplotně ovlivněné oblasti (TOO) austenitické oceli typu AISI 304 s obsahem uhlíku nižším než 0,08 %. PWSCC se také projevila u TOO oceli AISI 316LN. Jsou tři základní příčiny PWSCC, které se navzájem ovlivňují. Pokud dojde k jejich propojení, objeví se náchylnost na PWSCC:

- materiálové vlastnosti,
- vysoká úroveň napětí,
- chemické prostředí.

U tlakovodních reaktorů (PWR) je na primárním okruhu velmi často používána slitina Alloy 600 a přídavné materiály Alloy 82, Alloy 182 a Alloy 132. Nominální chemické složení slitin jsou uvedeny v Tab. 1.1 a Tab. 1.2. Všechny tyto materiály vykazují velkou náchylnost ke vzniku SCC od působení kyseliny borité.

Tab. 1.1 Nominální chemické složení (%) slitiny Alloy 600

<b>C</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>Mg</b>	<b>Ni</b>	<b>S</b>	<b>Si</b>
max. 0.15	14.0÷17.0	max. 0.50	6.00÷10.00	max. 1.00	min. 72.0	max. 0.015	max. 0.50

Tab. 1.2 Nominální chemické složení (%) svarového kovu slitin 82, 182, a 132

<b>Alloy</b>	<b>Ni</b>	<b>Cr</b>	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>	<b>Nb</b>	<b>Ti</b>
<b>82</b>	71	20	2	3	2.5	0.5
<b>182</b>	67	15	8	7	1.8	0.5
<b>132</b>	70	15	9	1	2.5	---

Odstraněním nebo snížením vlivu jednoho ze tří faktorů lze dosáhnout úplného zastavení nebo výrazného snížení růstu již objevených defektů v materiálu.

Pokud je austenitický materiál držen nad teplotou 420 °C delší dobu a není stabilizován, karbidy chromu jsou vlivem difúze distribuovány na hranicích zrn, takže dojde k ochuzení základní matrice o Cr. To vede k zvýšení citlivosti materiálu na korozní praskání (SCC). Vysoká úroveň napětí může být dána provozem nebo úrovní zbytkových napětí po svařování. Vliv prostředí je dán elektrochemickým procesem, který je vyvolán zejména v důsledku přítomnosti kyslíku v chladícím médiu u varných reaktorů.

Je snaha všechny tři faktory eliminovat, citlivé materiály na korozní praskání nahradit jinými, nebo upravit technologický postup výroby materiálů. Pro provoz byly vytvořeny přísnější limity na přítomnost kyslíku obsaženého v primárním médiu. Zároveň byla snaha o snížení nebo změnu úrovně napětí. Od počátku byla tendence pomocí teploty změnit negativní tahová napětí na vnitřním povrchu materiálu na tlaková, kde růst defektů je značně omezený.

Možné přístupy změny napětí na vnitřním povrchu:

- Indukčním ohřevem z vnějšího povrchu potrubí.
- Optimálně položenými posledními krycími vrstvami svarů.
- Optimalizací parametrů svařování prvních tří vrstev a následným zvýšeným odvodem tepla. Zvýšený odvod tepla je vyvolán přítomností vody v potrubí při svařování dalších vrstev.
- Mechanickým předepnutím svarového spoje (metodika MSIP).
- Technologii překrytí svarového spoje návarem (WOL).

A právě metoda WOL je schopná následujícím způsobem eliminovat faktor tahové zbytkové napjatosti. Navařením návarek WOL (o požadovaných rozměrech) se jednak vytvoří nová tlaková bariéra potrubí, ale především dojde v HSS k přerozdělení zbytkové napjatosti. Cílem je vytvoření tlakové zbytkové napjatosti v kořeni HSS, resp. v oblasti náchylné na SCC



(zamezení vzniku iniciace indikací mechanismem SCC) a dále po tloušťce HSS (zamezení nebo zpomalení růstu indikací mechanismem SCC). [4]

Metoda WOL má dvě hlavní funkce. V prvním případě jde o zmírnění vlivu SCC u HSS, kde ještě nebyla objevena indikace (preventivní funkce). V druhém případě slouží k opravě HSS s již zjištěnou indikací. V obou výše zmíněných případech lze aplikovat buď návaru typu "plný návar" tzv. FSWOL nebo "optimalizovaný návar" tzv. OWOL. [4]

Aby bylo možné prakticky metodu WOL aplikovat, musí být vždy prokázána její účinnost vzhledem ke konkrétnímu HSS. Je tedy vždy nutné navrhnout takové rozměry návaru WOL (výška, šířka) tak, aby byly splněné podmínky uvedené v předchozím odstavci. Rozměry návaru WOL se stanoví na základě výpočtových analýz zahrnující např. statické posouzení, výpočet zbytkové napjatosti, lomově-mechanické posouzení (růst skutečné nebo postulované (předpokládané) indikace vlivem únavy a SCC) atd. Poté, co navržené rozměry návaru WOL vyhovují všem kritériím plynoucích z výpočtových analýz, je lze považovat za finální. [4]

## **2 Postup návrhu WOL**

### **2.1 Postup návrhu aplikace metody WOL**

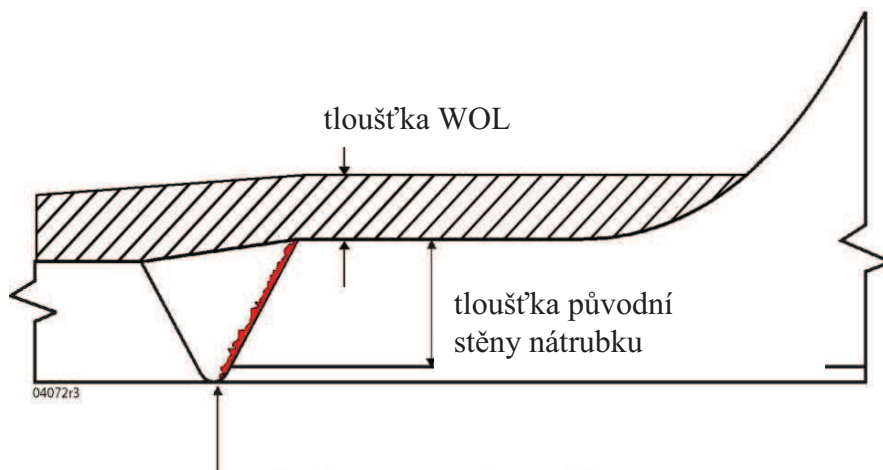
WOL technologie je v USA a ve světě hlavně používána na heterogenních svarových spojích primárního okruhu jaderných elektráren. V současné době se používají dva přístupy opravy pomocí WOL dle jeho funkce:

1. Snížení (omezení) vlivu napětí.
2. Oprava svaru.

Pro oba přístupy opravy jsou použity dva typy WOL:

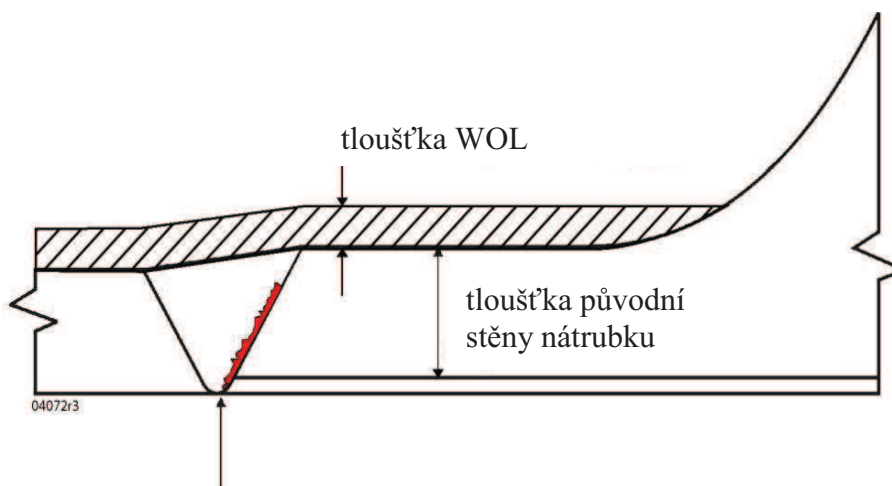
- a) vytvoření nové tlakové bariéry (plná integrita) - předpokládá se celoobvodový defekt přes plný průřez, navařením se vytvoří nová stěna tlakové bariéry,
- b) optimalizované překrytí - provádí se, pokud defekt je do hloubky max. 0,75 % původní tloušťky.

Rozdíl a důvody pro realizaci nové tlakové bariéry na optimalizované tloušťky překrytí je znázorněno na Obr. 2.1 a Obr. 2.2:



Postulovaná indikace po obvodu 360°,  
hloubka se rovná původní tloušťce stěny.

Obr. 2.1 FSWOL - vytvoření nové tlakové bariéry (plná integrita)

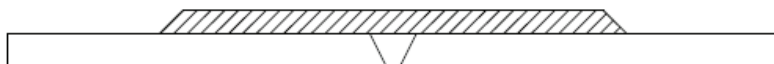


Postulovaná indikace po obvodu 360°,  
hloubka se rovná 3/4 původní tloušťky

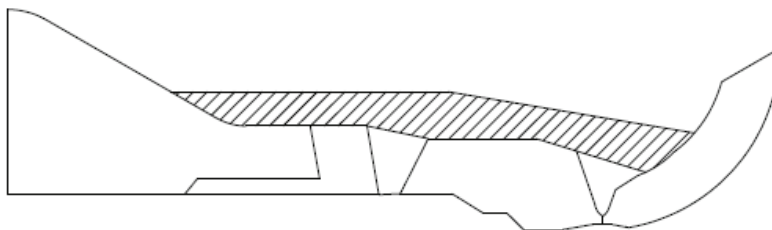
Obr. 2.2 OWOL - optimalizované překrytí

Dále je třeba metodu WOL rozlišovat na:

- **standardní** - používá se u spojů se stejnou nebo podobnou geometrií - viz Obr. 2.3. Obvykle je to spoj trubka/trubka, trubka/ohyb, nátrubek k uzavíracímu svaru potrubí,
- **nestandardní** - používá se u spojů s rozdílnou geometrií, jako je redukce průměru, expandéry, zúžené komponenty - viz Obr. 2.4.



Obr. 2.3 Příklad aplikace standardního použití WOL



Obr. 2.4 Příklad aplikace nestandardního použití WOL

[8], [9]

## 2.2 Postup návrhu technologie WOL

Postup návrhu technologie WOL se obvykle děje v následujícím rozsahu:

1. Stanovení rozměru opravy (tloušťka a délka překrytí) s následnou napěťovou analýzou oblasti opravy na provozní projektová zatížení, posouzení statické pevnosti, životnosti a seismické odolnosti.
2. Výpočet napětí po svařování a zahrnutí zbytkových napětí do analýz životnosti a stability defektu.
3. Posouzení stability (podmínek růstu) defektu.
4. Vypracování plánu opravy ve shodě s požadavky ASME Code, Sekce XI (Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components - Pravidla pro kontrolu komponent jaderných elektráren za provozu).
5. Kvalifikace opravy ve shodě s požadavky Standardu, zejména ve vztahu k provozním prohlídkám.
6. Napěťová analýza nátrubků a svarů od účinků připojených potrubí.
7. Posouzení vlivu smrštění nově navařené oblasti na okolní zařízení.

[8], [9]

## 2.3 Postup samotného provedení WOL

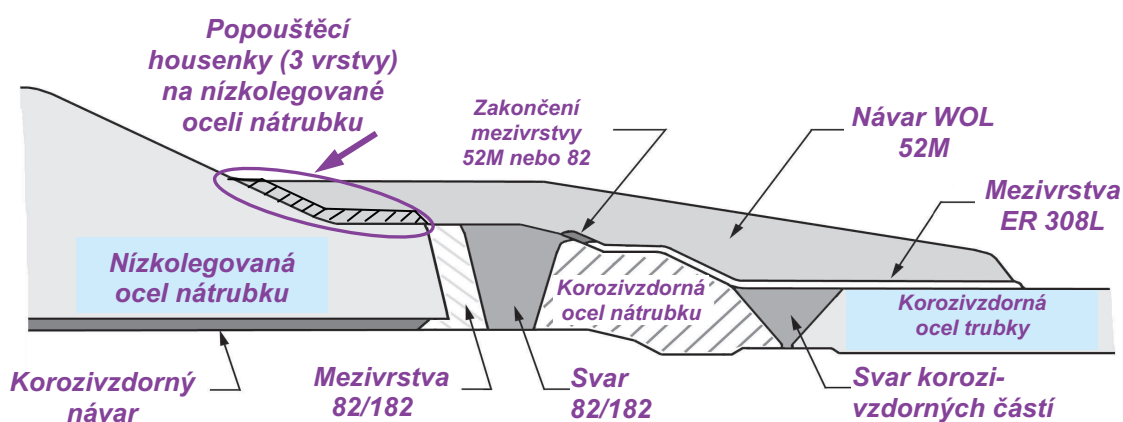
Samotná oprava se obvykle provádí v následujícím pořadí:

1. Stanovení přístupové cesty k místu opravy pro dopravu svařovacího zařízení.
2. Kontrola manipulačních prostor, kontrola provedení navaření.
3. Očištění základního materiálu a povrchu před navařením.
4. Kontrola před navařováním (obvykle PT - kapilární zkouška).
5. Ustanovení svařovacího zařízení a zapojení na dálkové ovládání.
6. Provedení navaření, kontrola navařeného materiálu.

7. Manuální příprava povrchu pro NDT kontroly.
8. Provedení finálního proměření navařeného materiálu.
9. Provedení NDT kontrol - kapilární a ultrazvukem.
10. Kontrola sousosti a připojení přírub.

## 2.4 Technika provádění WOL

Metoda WOL je obvykle používána pro opravu nebo snížení vlivu SCC na heterogenní svarové spoje primárního potrubí jaderných elektráren. Na Obr. 2.5 je náčrtek typického provedení opravy metodou WOL. Je používána technika popouštěcích housenek, což je alternativa k tepelnému zpracování po svařování. Technika popouštěcích housenek se použije pouze v případě, pokud se tento teplotní efekt příznivě projeví.



Obr. 2.5 Náčrtek typického provedení opravy metodou WOL

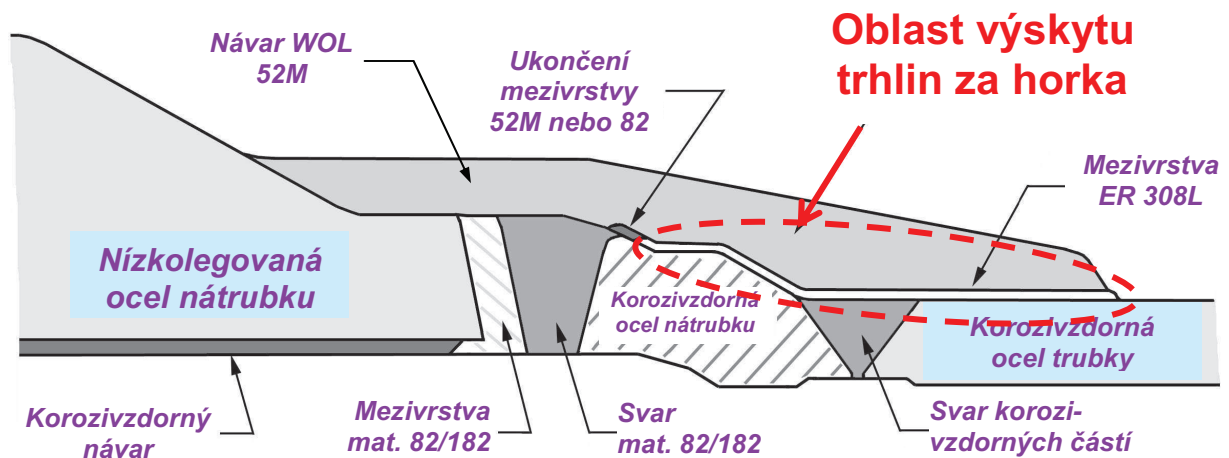
U feritického základního materiálu je voleno optimální tepelné zpracování pro dosažení požadovaných mechanických vlastností a lomové houževnatosti. Oprava svařováním nesmí degradovat původní mechanické vlastnosti feritického základního materiálu. Obvykle se tedy volí tepelné zpracování po svařování (PWHT) pro popuštění základního feritického materiálu. Použití popouštěcí housenky je alternativa k PWHT. Použití PWHT v tomto případě je nepraktické. Je upřednostňováno použití procedury popouštěcích housenek pomocí kontroly vneseného tepla do TOO během svařování.

[8], [9]

## 2.5 Problematika horkých trhlin při aplikaci WOL

V USA se při opravě austenitických svarových spojů neočekávaně objevili trhliny za tepla při použití přídatného materiálu 52M. Oblast výskytu trhlin za horka je zobrazena na Obr. 2.6. Chemické složení základního austenitického materiálu obsahují některé legury, které zvyšují náchylnost materiálů na vznik trhlin za tepla. Je to zejména síra, fosfor a křemík. Povrchové segregace se mohou objevit na povrchu základního materiálu, což vede k vzniku náchylnosti na trhliny za horka. Svařovací proces a technika svařování musí být navržena tak, aby byla náchylnost na vznik trhlin za horka minimalizována. Toho lze docílit kontrolou vneseného tepla do materiálu při svařování. Kontrola vneseného tepla je klíčový proměnný

parametr pro aplikaci WOL. Efektivní kontrolu umožňuje strojní mechanizované svařování metodou GTAW při použití studeného drátu. Pro minimalizaci vzniku trhlin za horka se přidává jedna nebo více vrstev tzv. buffer layers pod materiál 52M.



Obr. 2.6 Oblast výskytu trhlin za horka

[8], [9]

## 2.6 Variantní řešení problematiky

Jsou dvě varianty přístupu k provedení WOL:

### 1) Optimalizovaný přístup (OWOL) - požadavky:

#### a) Tloušťka návaru (zvětšení tloušťky stěny).

Svarové vyztužení (zesílení) musí být schopné přenášet návrhové a provozní zatížení s uvažováním 25 % tloušťky stěny potrubí, konstrukční části, nebo připojeného svaru pod svarovým vyztužením.

#### b) Šířka překrytí na obě strany od roviny osy svaru.

Axiální délka a konec úkosu návaru musí zahrnovat svarový spoj se zahrnutím návarů, tepelně ovlivněnou zónu na každé straně svarového spoje a tepelně ovlivněnou oblast feritického nátrubku nebo připojené odbočky s návaru a přilehlý základní materiál citlivý na korozi pod napětím v blízkosti svaru. Návar musí zajistit přerozdělení zatížení z konstrukční části do OWOL návaru a zpět, bez překročení platných limit napětí.

#### c) Tvar krycí vrstvy.

Konečný úkos návaru (překrytí) nesmí být vyšší než 30°, není-li provedena konkrétní analýza axiální délky.

Optimalizovaný konstrukční návar může být buď preventivní, nebo opravný.

[8]

### 2) Konstrukční přístup (FSWOL) - požadavky:

#### a) Tloušťka návaru (dle projektových parametrů svaru).

Návrh tloušťky návaru musí být ověřen použitím pouze té tloušťky návaru, která vyhovuje odpovídajícím požadavkům na návaru z austenitické korozivzdorné oceli

(počet vrstev, obsah delta feritu) nebo z austenitické niklové slitiny (počet vrstev, obsah Cr).

b) Šířka překrytí na obě strany od roviny osy svaru.

Axiální délka a konec úkosu návaru musí zahrnovat svarový spoj a tepelně ovlivněnou zónu na každé straně svarového spoje, včetně přilehlého základního materiálu citlivého na korozi pod napětím a zajistit přerozdělení zatížení z konstrukční části do návaru a zpět.

c) Tvar krycí vrstvy.

Konečný úkos návaru (překrytí) nesmí být vyšší než 30°, není-li provedena konkrétní analýza axiální délky.

[9]

## 2.7 Návrh a provedení opravy

Návrh a provedení opravy pomocí WOL se provádí podle následujícího postupu:

### 2.7.1 Posouzení vhodnosti opravy metodou WOL

Posouzení vhodnosti opravy metodou WOL se provádí na základě podrobné inspekce stávajícího stavu opravovaného potrubí. Inspekce stávajícího stavu zahrnuje následující:

a) **Zbývající tloušťka** - jestliže je příliš tenká hrozí výskyt nežádoucích deformací potrubí, narušení průtoku média v potrubí, propálení potrubí a další provozní problémy. Na základě zkušeností byla stanovena minimální opravovaná tloušťka 2,54 mm. Stanovení tloušťky by mělo být provedeno ultrazvukem nebo fyzickým měřením na odebraném vzorku materiálu.

b) **DM opravovaného potrubí** - vzhledem k tomu, že se vyskytly případy poškození potrubí po opravě metodou WOL je nutné identifikovat všechny mechanismy poškození potrubí, které se na opravovaném potrubí vyskytují. Doporučuje se provést odebrání vzorku v místě největšího tepelného toku způsobené opravou WOL a provést vyšetření na vyskytující se mechanismy poškození, zejména na vodíkové praskání.

c) **NDT kontroly** - identifikace polohy, množství a velikostí všech indikací.

d) **Volba metody WOL** - plná oprava (FSWOL) nebo optimalizovaná (OWOL).

[7]

### 2.7.2 Materiály

a) **Základní materiály** - identifikace materiálů komponent, kterých se oprava bude týkat, jejich chemické složení, základní materiálové vlastnosti dané materiálovou specifikací a další vlastnosti potřebné pro výpočtovou část.

b) **Přídavné materiály** - výběr vhodných přídavných materiálů a provedení jejich kvalifikace s cílem ověřit a zaručit požadované vlastnosti.

### 2.7.3 Výpočtová část návrhu opravy WOL

Výpočtová část návrhu probíhá dle příslušných norem a standardů pro přesně daný typ opravy (plná oprava - FSWOL nebo optimalizovaná - OWOL). Obecně oba typy oprav obsahují následující kroky:

- a) **Návrh rozměrů WOL s ohledem na statickou pevnost** - návrh výšky a šířky navaření. Návrh je proveden podle standardu ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XI, IWB-3640, (Evaluation Procedures and Acceptance Criteria for Austenitic Piping) příloha C, Code Cases N-754 [8], N-740-2 [9], N-504-2 [10] a N-504-3 [11]. Délka návaru se rovná výpočtu okrajového efektu poruchy na napětí  $(0,75*(R*t)^{1/2})$ . Jednotky jsou pak v palcích.
- b) **Návrh rozměrů WOL s ohledem na NDT kontroly** - kuželový přechod, délka překrytí a tloušťka navaření se navrhuje dle standardů ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XI, IWB-3640, (Evaluation Procedures and Acceptance Criteria for Austenitic Piping) příloha C, Code Cases N-754 [8], N-740-2 [9], N-504-2 [10] a N-504-3 [11] s ohledem na kontrolovanou oblast.
- c) **Výpočet zbytkových napětí** - provádí se nelineární numerické analýzy procesu svařování a verifikace výsledků. Po svařování musí být vypočtené zbytkové napětí na vnitřním povrchu tlakového charakteru pro eliminování vlivu korozního praskání pod napětím. Při zahrnutí provozního zatížení, musí být napětí na vnitřním povrchu menší než 69 MPa (tahové napětí) a přes tloušťku přecházet do tlakového napětí.
- d) **Posouzení růstu indikace způsobené SCC** - provádí se ověřovací výpočet s cílem prokázat, že vlivem dosaženého příznivého zbytkového napětí se indikace nebudou šířit.
- e) **Posouzení únavového růstu indikace** - provádí se posouzení únavového růstu indikace se zohledněním počtu provozních zatěžovacích cyklů, teplotní stratifikace, vlivu svařování, tlakových zkoušek a dalších provozních stavů.
- f) **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.
- g) **Zhodnocení vlivu opravy na potrubní systém** - provádí se posouzení vlivu smrštění způsobeného opravou na navazující potrubní celky statickým výpočtem (uvažuje se dodatečné zatížení způsobené opravou) a dynamickým výpočtem (změna tuhosti způsobená opravou se může projevit na změně dynamických vlastností potrubí).

[2], [7]

## 2.8 Experimentální program

Experimentální program zahrnuje činnosti probíhající souběžně s výpočtovou částí návrhu opravy. V této části je navržen svařovací postup opravy a svařovací parametry. Experimentální část lze rozdělit následovně:

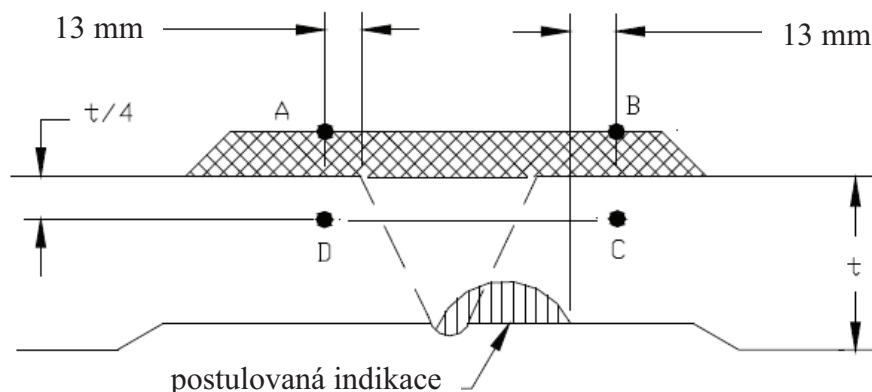
- a) **Výroba zkušebních modelů (mock-up)** - na výrobě zkušebních modelů se odzkouší navržená technologie svařování.
- b) **Experimentální měření** - na vyrobených zkušebních modelech bude provedeno měření potřebných parametrů (teplotní cykly, smrštění, makrostruktura, tvrdost atd.) pro verifikaci výpočtové části.
- c) **Ověřovací zkoušky** - budou prováděny zkoušky pro ověření, že oprava WOL je schopna účinně zastavit růst indikace v opravované oblasti potrubí.
- d) **Demonstrace NDT kontrol** - na zkušebních vzorcích budou provedeny NDT kontroly v předepsané oblasti (objemu).

[2]

## 2.9 Základní požadavky na WOL z pohledu NDT kontrol

Základním požadavkem na WOL, z pohledu provádění NDT kontrol, je plná kontrolovatelnost svarového spoje a plné pokrytí. Jedním z motivujících požadavků na provedení NDT kontrol, mimo defekty ve svarovém spoji, je nemožnost úplného provádění NDT kontrol u montážních a výrobních svarů (neopravených).

NDT kontrola na překrytém svaru pomocí WOL se musí provádět jak během provádění WOL, tak i během provozu. Při předprovozních kontrolách se kontroluje celý objem všech částí svarového spoje, včetně oblasti s indikací. Jak ukazuje Obr. 2.7, kontrolují se během provozu pouze navažené vrstvy a objem do hloubky 0,25 % tloušťky základního materiálu. Kontrola se provádí minimálně 13 mm od hranice natavení u vnějšího povrchu.



Obr. 2.7 Oblast NDT kontrol během provozu

Cílem kontroly během provozu je potvrdit, že původní defekt se nedostává do hloubky 0,25 % tloušťky stěny. Velikost defektu se neposuzuje.



### **2.9.1 Požadavky na povrch před navařením**

Efektivní NDT kontrola během opravy a provozu vyžaduje odpovídající povrchovou úpravu. Na základě zkušeností je doporučeno provedení povrchu drsnosti povrchu 6,3  $\mu\text{m}$  a rovinnost 0,8 mm na délku 25,4 mm.

### **2.9.2 Délka a přechod návaru**

Jedním ze základních cílů návrhu WOL je umožnit 100 % objemovou kontrolu navařeného materiálu. Délka překrytí musí zajistit přiměřený přístup pro umožnění požadované kontroly během provozu po provedení opravy.

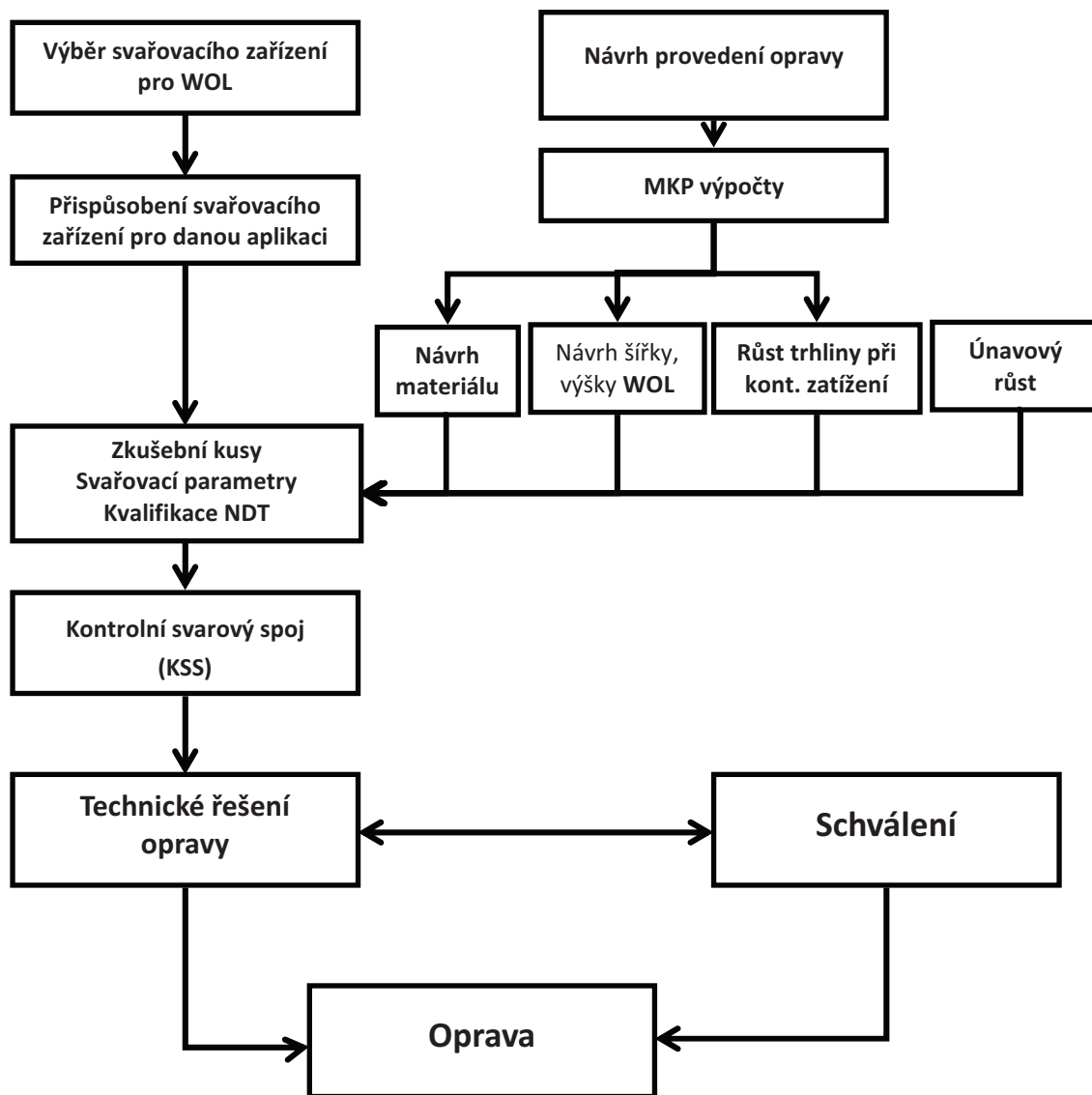
### **2.9.3 UT kontrola WOL**

Ultrazvuková kontrola opravených svarových spojů pomocí WOL musí řešit některé obtíže, které se u neopravených svarů z austenitického materiálu nebo u heterogenních svarů běžně až tak nevyskytují. Při návrhu UT kontroly se musí řešit problematiky drsnosti a rovinnost povrchu, útlum a anizotropie nově navařeného svarového kovu a efekty uzavření defektu, vyplývající z velkého namáhání v tlaku na vnitřním povrchu potrubí. Tyto problémy je doporučeno účinně řešit prostřednictvím použití podélných vln.

Uzavřený defekt na vnitřním povrchu potrubí ukazuje, že opravou se podařilo „vytvořit“ tlakové namáhání v oblasti. Na základě známých napěťových gradientů na čele trhliny, lze omezit ovlivnění stavu napjatosti uvnitř materiálu do 50 % tloušťky stěny z vnitřní strany potrubí. Rozsah ovlivnění uzavřené trhliny na ultrazvukovou odrazivost není přesně znám, nicméně se nepředpokládá, že by ovlivnění zahrnovalo více než vnitřní 50 % původní tloušťky stěny potrubí. Z tohoto důvodu je požadováno provádění kontroly překrytí spolu s 25 % původní tloušťky stěny potrubí. Na základě tohoto požadavku byly vyvinuty spolehlivé techniky UT kontroly tohoto objemu. Schopnost rozpoznat nepřijatelné nedostatky v překrytí materiálem, jako jsou praskliny a nežádoucí neprůvody, byla také prokázána.

## **2.10 Proces návrhu WOL**

Proces návrhu WOL pro skutečnou realizaci je patrný z Obr. 2.8.



Obr. 2.8 Proces návrhu WOL

## 2.11 Experimentální materiály

### 2.11.1 Základní materiály

Byly vybrány materiály potrubí, používané na potrubí jaderných elektráren v České republice. Jedná se o materiály:

- nízkouhlíková žárovečná ocel 22K dle GOST 5520-79 [12],
- žáruvzdorná vysoce legovaná austenitická ocel 08CH18N10T dle GOST 5632-72 [13].

Nominální chemické složení ocelí je uvedeno v Tab. 2.1 a Tab. 2.2.

Tab. 2.1 Nominální chemické složení (%) oceli 22K

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
0.19 ÷ 0.26	0.17 ÷ 0.4	0.7 ÷ 1,00	max. 0.3	max. 0.035	max. 0.04	max. 0.3	max. 0.3

Tab. 2.2 Nominální chemické složení (%) oceli 08CH18N10T

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	Ti
max. 0.08	max. 0.8	max. 2	9 ÷ 11	max. 0.02	max. 0.035	17 ÷ 19	max. 0.3	5×C ÷ 0.7

Na vzorcích potrubí bude aplikována technologie WOL, tj. aplikace návaru na:

- heterogenní svarový spoj ocelí 22K a 08CH18N10T, nátrubek ø270x20 mm, délka 330 mm,
- ocel 22K, trubka ø150x15 mm, délka 250 mm,
- ocel 08CH18N10T, trubka ø133x13 mm, délka 250 mm.

### 2.11.2 Přídavné materiály

Při aplikaci technologie WOL byly použity následující přídavné materiály:

- Alloy 82                      AWS A5.14 [14]: ER NiCr-3
- Alloy 52M                    AWS A5.14 [14]: ER NiCrFe-7A,
- Arcaloy ER 308L          AWS A5.9 [15]: ER 308L

Katalogové vlastnosti přídavných materiálů jsou uvedeny v Tab. 2.3 ÷ Tab. 2.5.

Tab. 2.3 Vlastnosti drátu Alloy 82

Mezní chemické složení [ % ]					
Ni+Co	C	Mn	Fe	S	Cu
67.0 min.	0.10 max.	2.5÷3.5	3.0 max.	0.015 max.	0.50 max.
Si	Cr	Ti	Nb+Ta	P	další
0.50 max.	18.0÷22.0	0.75 max.	2.0÷3.0	0.030 max.	0.50 max.
<p><i>Poznámka: Skutečný obsah [%] prvků z použité tavby:</i>  <i>Ni 71,67; Co 0,02; C 0,03; Mn 2,92; Fe 0,91; S 0,003; Cu 0,02;</i>  <i>Si 0,15; Cr 21,4; Ti 0,31; Nb+Ta 2,42; P 0,003; Ta &lt;0,01; další &lt;0,50</i></p>					
Minimální mechanické vlastnosti					
Mez pevnosti v tahu R <sub>m</sub>			1100 MPa		
Tažnost A			25 %		

Tab. 2.4 Vlastnosti drátu Alloy 52M

Mezní chemické složení [ % ]								
Ni	C	Mn	Fe	S	Si	Cu	Cr	Al
zbytek	0.04 max.	1.0 max.	7.0÷11.0	0.015 max.	0.50 max.	0.30 max.	28.0÷31.5	1.10 max.
Ti	Co	Nb	P	Zr	B	Mo	ostatní	
1.0 max.	0,12 max.	0,50÷1,0	0.02 max.	0.02 max.	0,005 max.	0.50 max.	0.50 max.	
<p><i>Poznámka: Skutečný obsah [%] prvků z použité tavby:</i>  <i>Ni 58,49; C 0,019; Mn 0,79; Fe 8,66; S &lt;0,0001; Si 0,11; Cu 0,02;</i>  <i>Cr 29,86; Al 0,12; Ti 0,20; Co 0,009; Nb+Ta 0,82; P 0,003; Zr 0,004;</i>  <i>B 0,0005; Mo 0,06; ostatní &lt;0,50</i></p>								
Minimální mechanické vlastnosti								
Mez pevnosti v tahu $R_m$						552 MPa		
Tažnost A						30 %		

Tab. 2.5 Vlastnosti drátu Arcaloy ER 308L

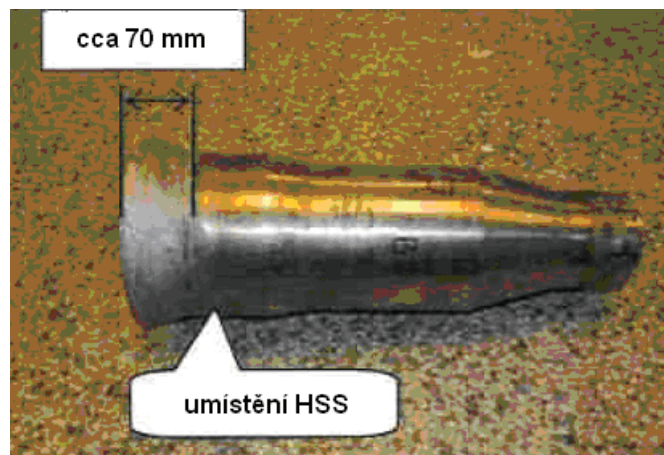
Typické chemické složení [ % ]								
C	Mn	Si	S	Cr	Ni	Mo	Cu	FN
0.015	1.7	0.45	0.01	20	10	0.1	0.15	9
<p><i>Poznámka: Skutečný obsah [%] prvků z použité tavby:</i>  <i>C 0,015; Mn 1,74; Si 0,46; S 0,006; Cr 19,79; Ni 9,85; Mo 0,09; Cu 0,09</i>  <i>Nb 0,01; Ta 0,01; Ti &lt;0,01; P 0,016; V 0,09; Co 0,052; (FN WRC 12)</i></p>								
Minimální mechanické vlastnosti								
Mez kluzu $R_{p0,2}$						410 MPa		
Mez pevnosti v tahu $R_m$						605 MPa		
Tažnost A						43 %		
Nárazová práce KV (-196 °C)						110 J		
Boční rozšíření						1,35 mm		

Poznámka: FN = Feritové číslo (diagram WRC-92)

## 2.12 Polotovary vzorků

Byly vybrány tři polotovary (viz Obr. 2.9 ÷ Obr. 2.11), určené pro aplikaci technologie WOL:

- nátrubek  $\varnothing 270 \times 20$  mm, délka 330 mm, heterogenní svarový spoj nízkouhlíkové žárovevné oceli 22K a austenitické nerezavějící žáruvzdorné oceli 08CH18N10T,
- trubka  $\varnothing 150 \times 15$  mm, délka 250 mm, ocel 22K,
- trubka  $\varnothing 133 \times 13$  mm, délka 250 mm, ocel 08CH18N10T.



Obr. 2.9 HSS 22K + 08CH18N10T, nátrubek  $\varnothing 270 \times 20$  mm, délka 330 mm



Obr. 2.10 Ocel 22K, trubka  $\varnothing 150 \times 15$  mm, délka 250 mm



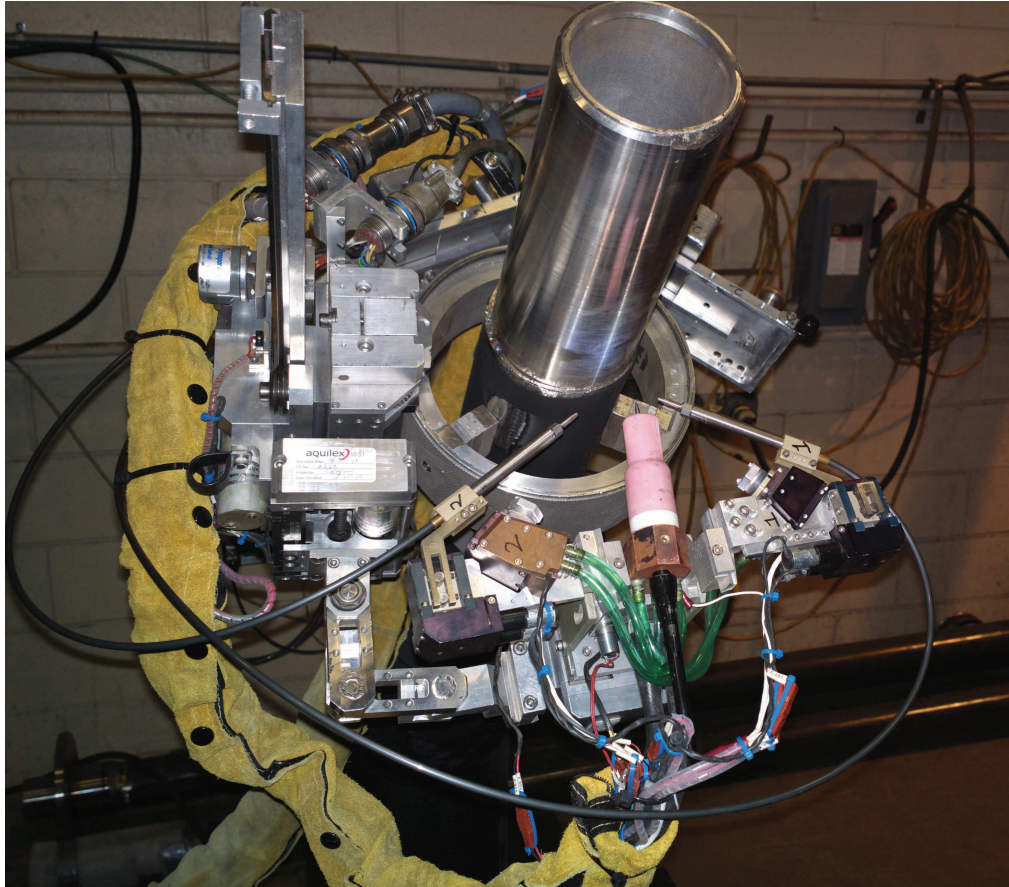
Obr. 2.11 Ocel 08CH18N10T, trubka  $\varnothing 133 \times 13$  mm, délka 250 mm

### 2.13 Zařízení pro svařování

Pro svařování bylo použito zařízení vyvíjené pro specifické použití při aplikaci technologie WOL. Jedná se o poloautomatický svařovací stroj. Detail sestavy je zobrazen na Obr. 2.12.

Hlavní součásti zařízení:

- samostatný svařovací zdroj (výrobce Liburdi Dimetrics Corporation),
- nosný rám a podpěry pro pohyblivé části,
- pohyblivé části umožňující otáčivý pohyb kolem centrální osy (podélná osa potrubí),
- svařovací hlava přizpůsobená pro pohyb po dráze,
- kamery pro snímání tavné lázně,
- otočné rameno,
- pohyblivé saně,
- svařovací hořáky,
- podávací zařízení přídavného materiálu,
- hadice pro přívod ochranného plynu,
- elektrické kabely,
- řídicí systém a prvky zpětné vazby,
- prostředky pro nouzové vypnutí.



*Obr. 2.12 Detail sestavy svařovacího zařízení*

Vlastní pohyb svařovacího hořáku je zajištěn po půlkruhové dráze, vždy ve směru zdola nahoru. Jedna obvodová svarová housenka je tedy rozdělena na dvě samostatné, každá z nich začíná v dolní části. Při pohybu svařovacího hořáku je přídavný materiál přiváděn vždy z jedné strany hořáku a do svarové lázně přidáván před hořákem ve směru svařování (tzv. svařování vpřed).

Dvě kamery, připevněné ke svařovací hlavě, snímají průběh svařování, jedna sleduje vlastní tavnou lázeň a druhá (ve směru pohybu hořáku vždy vzadu) snímá provedenou housenku. Obraz z obou kamer je přenášen na monitor (Obr. 2.13) a lze jej zaznamenat a uchovat. Snímaný obraz, při pohybu svařovací hlavy zpět do výchozí pozice, umožňuje operátorovi (nebo dalšímu pracovníkovi provádějícímu kontrolu) provést operativní kontrolu kvality právě provedené svarové housenky.



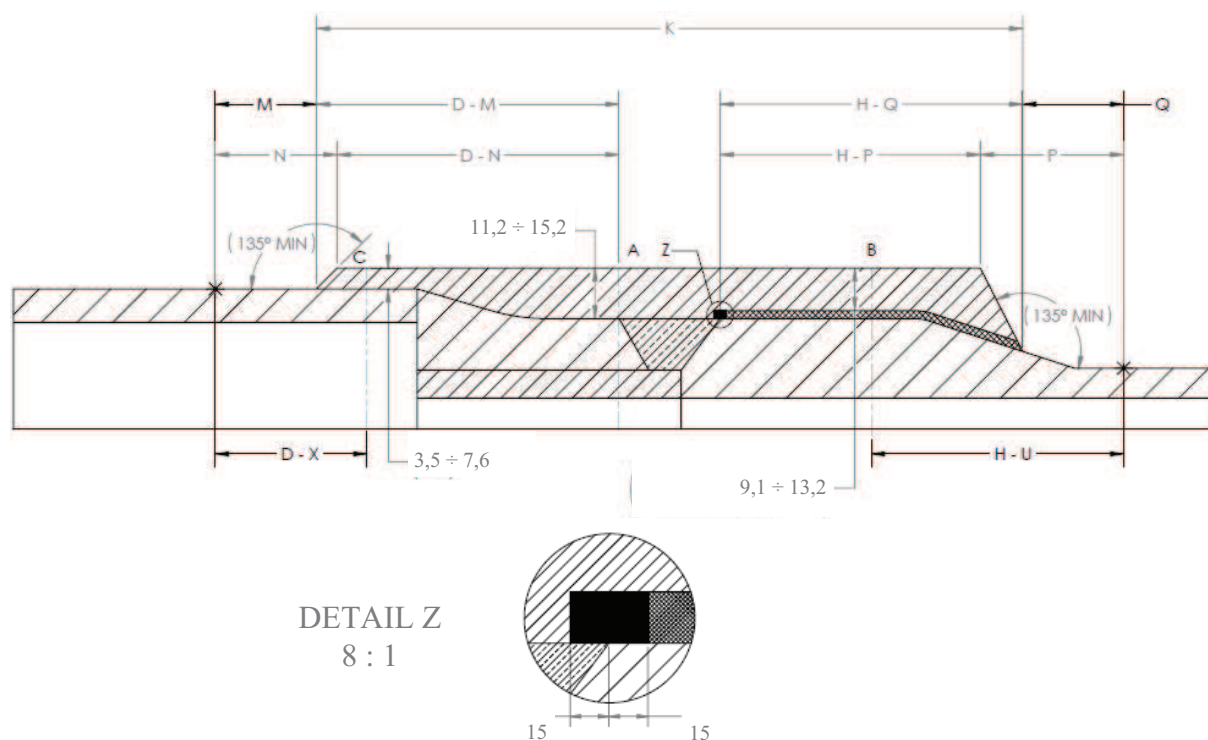
Obr. 2.13 Obraz snímáný při svařování

Kamery slouží i k přesnému nastavení špičky wolframové elektrody na správnou pozici před zapálením oblouku a svařováním. Při svařování je pak také možné sledovat a řídit pozici ukončení svarové housenky. K tomu účelu jsou povrchy součástí při přípravě opatřeny značením orýsováním nebo důlčkováním.

## 2.14 Konstrukční návrhy

Byly zpracovány tři konstrukční návrhy pro WOL, zobrazené na Obr. 2.14, 2.15 a 2.16, hodnoty rozměrů označených písmeny jsou uvedeny v Tab. 2.6:

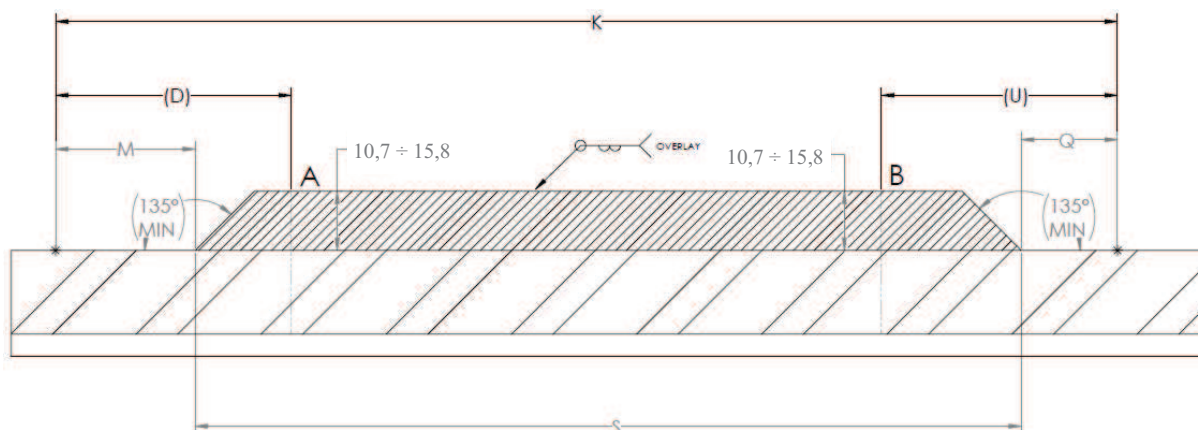
- a) návrh aplikace krycího návaru Alloy 52M (+ mezivrstva Arcaloy ER 308L a ukončení mezivrstvy Alloy 82) nad heterogenní svarový spoj nízkouhlikové žárovečné oceli 22K a austenitické nerezavějící žáruvzdorné oceli 08CH18N10T, nátrubek  $\varnothing 270 \times 20$  mm, délka 330 mm,



Obr. 2.14 Konstrukční návrh WOL nátrubku s HSS [16]

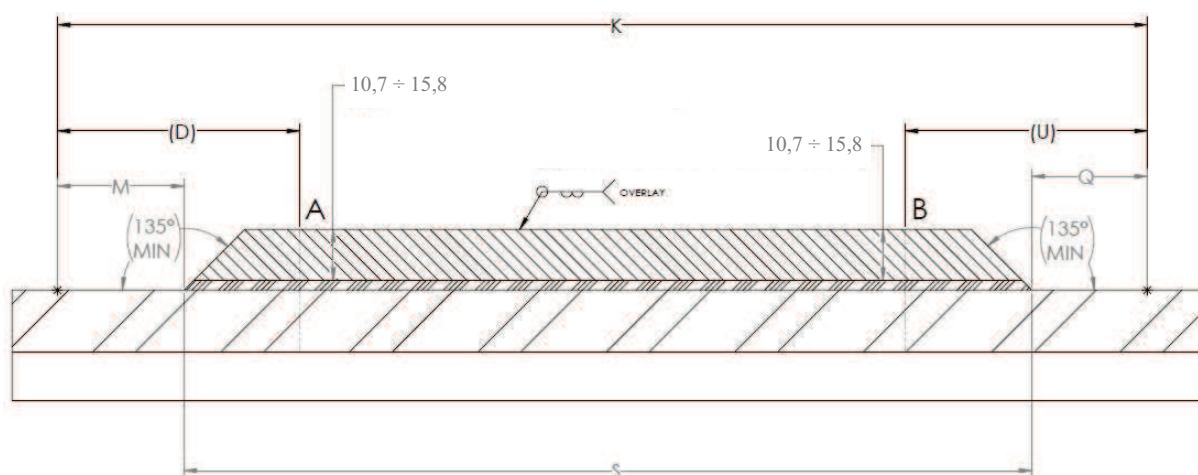


- b) návrh aplikace krycího návaru Alloy 52M na ocel 22K, trubka  $\varnothing 150 \times 15$  mm, délka 250 mm,



Obr. 2.15 Konstrukční návrh WOL na ocel 22K [17]

- c) návrh aplikace krycího návaru Alloy 52M (+ vyrovnávací mezivrstva Arcaloy ER 308L) na ocel 08CH18N10T, trubka  $\varnothing 133 \times 13$  mm, délka 250 mm.



Obr. 2.16 Konstrukční návrh WOL na ocel 08CH18N10T [18]

Tab. 2.6 Hodnoty rozměrů označených písmeny [mm]

	K	M	Q	S	D	U	N	P	D-M	D-N	D-X	H-Q	H-P	H-U
Obr. 2.14 nátrubek s HSS	240	20	22	---	110	40	25	40	90	85	50	85	65	65
Obr. 2.15 ocel 22K	230	16	20	190	50	50	---	---	---	---	---	---	---	---
Obr. 2.16 ocel 08CH18N10T	215	16	20	180	50	50	---	---	---	---	---	---	---	---

Pro snadnější manipulaci a vůbec možnost provést WOL, byly ke vzorkům, použitým pro aplikaci WOL, přivařeny pomocné segmenty potrubí podobných rozměrů.

Trubka z oceli 08CH18N10T s byla zaslepena, celá sestava byla napojena na okruh chladicí vody cirkulující uvnitř během svařování.

## **2.15 Technologické požadavky**

### **2.15.1 Nátrubek s HSS z ocelí 22K a 08CH18N10T:**

1. Povrchová úprava před aplikací WOL musí zajistit drsnost 6,3  $\mu\text{m}$  nebo lepší.
2. Rozsah podélného zvlnění max. 0,8 mm přes jakékoliv oblasti dlouhé 25,4 mm.
3. Přídavný materiál pro WOL bude Alloy 52M.
4. Svařování WOL provést metodou 141.
5. Přejít WOL do základního materiálu musí být provedeno pod úhlem 135° nebo vyšším na délce 6,35 mm zakončení WOL.
6. Tloušťka návaru WOL bude stanovena měřením a ověřena dalšími kontrolními metodami.
7. Musí být provedena vyrovnávací mezivrstva, sestávající z jedné vrstvy návaru:
  - a. na části nátrubku z oceli 08CH18N10T, bez kontaktu s HSS, přídavným materiálem Arcaloy ER 308L,
  - b. jedna až pět housenek, přídavným materiálem Alloy 82, tvořící ukončení mezivrstvy mezi HSS vyrovnávací vrstvou provedenou materiálem Arcaloy ER 308L.
8. Jedna nebo více housenek ukončení mezivrstvy, mohou být použity k uzavření („zapečetění“) nepřijatelných indikací v oblasti ukončení mezivrstvy, s vyhloubením nebo bez vyhloubení. Tyto housenky se nezapočítávají do minimální tloušťky WOL. Zobrazeno na detailu "Z" Obr. 2.14.

[16]

### **2.15.2 Trubka z oceli 22K:**

1. Povrchová úprava před aplikací WOL musí zajistit drsnost 6,3  $\mu\text{m}$  nebo lepší.
2. Rozsah podélného zvlnění max. 0,8 mm jakékoliv oblasti dlouhé 25,4 mm.
3. Přídavný materiál pro WOL bude Alloy 52M.
4. Svařování WOL provést metodou 141.
5. Přejít WOL do základního materiálu musí být provedeno pod úhlem 135° nebo vyšším na délce 6,35 mm zakončení WOL.
6. Tloušťka návaru WOL bude stanovena měřením a ověřena dalšími kontrolními metodami.

[17]

### **2.15.3 Trubka z oceli 08CH18N10T:**

1. Povrchová úprava před aplikací WOL musí zajistit drsnost 6,3  $\mu\text{m}$  nebo lepší.
2. Rozsah podélného zvlnění max. 0,8 mm přes jakékoliv oblasti dlouhé 25,4 mm.
3. Musí být provedena vyrovnávací mezivrstva, sestávající z jedné vrstvy návaru, přídavným materiálem Arcaloy ER 308L.

4. Přídavný materiál pro WOL bude Alloy 52M.
5. Svařování WOL provést metodou 141.
6. Přejít WOL do základního materiálu musí být provedeno pod úhlem 135° nebo vyšším na délce 6,35 mm zakončení WOL.
7. Tloušťka návaru WOL bude stanovena měřením a ověřena dalšími kontrolními metodami.

[18]

## 2.16 Stanovení postupu svařování

Byly vypracovány tři WPS - specifikace postupu svařování. Dále je uveden jejich stručný obsah - parametry svařování dle vybraných požadavků ČSN EN ISO 15609-1 [29]:

### 2.16.1 WPS 08-08-T-100-Buffer SS

Použití	pro navaření vyrovnávací mezivrstvy
Základní materiál	ocel 08Ch18N10T dle GOST 5632-72 [13], skupina 8 dle TNI CEN ISO/TR15608 [30]
Rozměry materiálu	rozsah tloušťky 0,9 ÷ 203,2 mm, průměry bez omezení
Metoda svařování	141 dle ČSN EN ISO 4063 [31]
Poloha svařování	H-L045 dle ČSN EN ISO 6947 [32]
Příprava spoje	mechanicky kartáčováním, odmastit lihovým prostředkem, upnout do přípravku
Způsob svařování	rozkyv 2,5 ÷ 3,0 mm)
Úhel sklonu hořáku (elektrody)	8° ÷ 10°
Svařovací materiály	ER 308L (dle AWS A5.9 [15]), výrobce ESAB: Arcaloy ER 308L, ø 0,9 mm
Elektrické parametry	stejnoseměrný svařovací proud, přímá polarita, bez pulsu, při zapálení oblouku 50 ÷ 100 A, náběh proudu 3 sec, svařovací max. 200 A (9,8 V), zakončovací 30 ÷ 50A, pokles proudu 10 sec
Pojezdová rychlost	84 mm/min
Rozteč housenek	3,8 ÷ 6,4 mm
Rychlost podávání drátu	2 286 mm/min
Rozkyv	2,5 ÷ 3,0 mm
Prodleva	0,4 sec
Teplota předehřevu	min. 10 °C (minimální teplota použitá na zahájení svařování a během svařování)
Interpass teplota	max. 175 °C
TZ po svařování	ne

Ochranný plyn	I1 dle ČSN EN ISO 14175 [33] (Argon 99,997 %, průtok 7 ÷ 23,5 litru/hod, předfuk 3 sec, dofuk 10 sec), vnitřní ochrana plynem je povolena, ale není vyžadována (WPS je kvalifikována i pro svařování zařízení naplněného vodou)
Tepelný příkon	1,3 ÷ 1,5 kJ/mm
Wolframová elektroda [19]	WTh 20 dle ČSN EN ISO 6848 [24], ø 2,4 mm

### 2.16.2 WPS 08-43-T-001-Bridge

Použití	pro navaření ukončení mezivrstvy.
Základní materiál	ocel 08Ch18N10T dle GOST 5632-72 [13], skupina 8 dle TNI CEN ISO/TR 15608 [30]
Rozměry materiálu	tloušťka 4,8 ÷ 203 mm, průměry bez omezení
Metoda svařování	141 dle ČSN EN ISO 4063 [31]
Poloha svařování	H-L045 dle ČSN EN ISO 6947 [32]
Příprava spoje	mechanicky kartáčováním, odmastit lihovým prostředkem, upnout do přípravku
Způsob svařování	rozkyv 2,5 ÷ 3,0 mm
Úhel sklonu hořáku (elektrody)	8° ÷ 10°
Svařovací materiály	Alloy 82, ER NiCr-3 (dle AWS A5.14 [14]), výrobce Special Metals: INCONEL <sup>®</sup> Filler Metal 82, ø 0,9 mm
Elektrické parametry	stejnoseměrný svařovací proud, přímá polarita, bez pulsu, při zapálení oblouku 50 ÷ 100 A, náběh proudu 3 sec, svařovací proud max. 200 A (9,8 V), zakončovací proud 30 ÷ 50A, pokles proudu 10 sec
Pojezdová rychlost	84 mm/min
Rozteč housenek	3,8 ÷ 6,4 mm
Rychlost podávání drátu	2 286 mm/min
Rozkyv	2,5 ÷ 3,0 mm
Prodleva	0,4 sec
Teplota předehřevu	min. 10 °C (minimální teplota použitá na zahájení svařování a během svařování)
Interpass teplota	max. 175 °C
TZ po svařování	ne
Ochranný plyn	I1 dle ČSN EN ISO 14175 [33] (Argon 99,997 %, průtok 7 ÷ 23,5 litru/hod, předfuk 3 sec, dofuk 10 sec),

vnitřní ochrana plynem je povolena, ale není vyžadována.

Tepelný příkon	1,3 ÷ 1,5 kJ/mm
Wolframová elektroda [20]	WTh 20 dle ČSN EN ISO 6848 [34], ø 2,4 mm

### 2.16.3 WPS 01-08-T-804-Top

Použití	navaření WOL (nebo pro zbývající vrstvy)
Základní materiál	ocel 08Ch18N10T dle GOST 5632-72 [13], skupina 8 dle CR ISO 15608 [30], a ocel 22K dle GOST 5520-79 [12], skupina 1 dle TNI CEN ISO/TR 15608 [30]
Rozměry materiálu	tloušťka 15,9 ÷ 203 mm, průměry bez omezení
Metoda svařování	141 dle ČSN EN ISO 4063 [31]
Poloha svařování	H-L045 dle ČSN EN ISO 6947 [32]
Příprava spoje	mechanicky kartáčováním, odmastit lihovým prostředkem, upnout do přípravku
Způsob svařování	rozkyv 2,5 ÷ 3,0 mm)
Úhel sklonu hořáku (elektrody)	8° ÷ 10°
Svařovací materiály	Alloy 52M, ER NiCrFe-7A (dle AWS A5.14 [14]), výrobce Special Metals: INCONEL <sup>®</sup> Filler Metal 52M, ø 0,9 mm
Elektrické parametry	stejnoseměrný svařovací proud, přímá polarita, bez pulsu, při zapálení oblouku 50 ÷ 100 A, náběh proudu 3 sec, svařovací proud max. 200 A (9,8 V), zakončovací proud 30 ÷ 50A, pokles proudu 10 sec
Pojezdová rychlost	84 mm/min
Rozteč housenek	3,8 ÷ 6,4 mm
Rychlost podávání drátu	2 286 mm/min
Rozkyv	2,5 ÷ 3,0 mm)
Prodleva	0,4 sec
Teplota předehřevu	min. 10 °C (minimální teplota použitá na zahájení svařování a během svařování)
Interpass teplota	max. 175 °C
TZ po svařování	ne, tato WPS může být použita pro svařování metodou popouštěcích housenek pro všechny kombinace materiálů skupiny 1 a skupiny 8 při použití přídavného

	materiálu stejné klasifikace, popouštěcí housenky nejsou povinné
Ochranný plyn	I1 dle ČSN EN ISO 14175 [33] (Argon 99,997 %, průtok $7 \div 23,5$ litru/hod, předfuk 3 sec, dofuk 10 sec), vnitřní ochrana plynem je povolena, ale není vyžadována.
Tepelný příkon	$1,3 \div 1,5$ kJ/mm, kontrola je povinná
Wolframová elektroda	WTh 20 dle ČSN EN ISO 6848 [34], $\varnothing 2,4$ mm
[21]	

## 2.17 Příprava povrchu před svařováním

Povrch základních materiálů byl obroušen a očištěn.

Byly provedeny vizuální kontroly drsnosti a podélného zvlnění povrchu.

Byly provedeny kontroly VT povrchu celých oblastí pod budoucími návary rozšířené o 26 mm základního materiálu na každou stranu. Kritéria přijatelnosti [22], [23], [24]: obroušený povrch, na jasném čistém povrchu nejsou žádné zjevné vady. Kontroly byly vyhodnoceny jako vyhovující.

Byly provedeny kontroly PT povrchu celých oblastí pod budoucími návary rozšířené o 13 mm) základního materiálu na každou stranu. Kritéria přijatelnosti [22], [23], [24]: indikace s rozměry větší než 1,6 mm musí být odstraněny, zmenšeny nebo opraveny. Kontroly byly vyhodnoceny jako vyhovující bez následných opatření.

Na povrchu připraveném pro WOL bylo provedeno značení orýsováním a důlčikováním.

## 2.18 Měření tloušťky

Bylo provedeno měření tloušťky stěny vzorků, v případě nátrubku na austenitické i na feritické straně HSS. Toto měření bylo provedeno na několika místech po celém obvodu (min. po 90°). U HSS byla zjištěna přesná poloha okraje krycí vrstvy svaru (místo přechodu na povrch potrubí).

## 2.19 Požadavky na svařování

Před zahájením svařování byly sestaveny základní požadavky, které musí být dodrženy v průběhu svařování:

- Overlay musí být svařován ve vrstvách vytvořených jednotlivými svarovými housenkami.
- Každá vrstva musí být dokončena před zahájením svařování další vrstvy.
- Kontrola vneseného tepla je nezbytná k dodržení postupu popouštěcích housenek.

- Údaje o jednotlivých svarových housenkách musí být stále udržovány v záznamovém zařízení (konzole) svařovacího stroje (značka svářeče/operátora, teplota předehřevu, svařovací parametry potřebné pro výpočet tepelného příkonu).
- Dozor svařování musí potvrdit záznamy parametrů svařování, aby potvrdil, že byl tepelný příkon vypočítán, jím průběžně kontrolován, a je v rámci přijatelných parametrů.
- Teploty předehřevu a interpass teploty musí být ověřeny a zaznamenány svářečem/operátorem. Pro měření musí používat kalibrované přístroje. Operátoři ověřují, že teploty nepřekročí teploty předepsané ve WPS.
- Rychlost pojezdu musí být zaznamenána pro všechny vrstvy. Svařování nesmí být provedeno, nejsou-li zaznamenávány parametry v konzole svařovacího stroje.
- Interpass teplota musí být ověřena a zaznamenána:
  - každé 3 ÷ 5 housenek na prvních třech vrstvách a
  - každých 6 ÷ 10 housenek při svařování dalších vrstev.
- Minimální teplota předehřevu (součástí) min. 10 °C před zahájením svařování a během svařování do vzdálenosti 130 mm od svařované housenky.
- Teploty předehřevu musí být zaznamenány na začátku svařování, pokud je svařování zastaveno a podle potřeby během svařování.
- Svařování musí být prováděno podle WPS a případné další platné schválené dokumentace.
- Umístění jednotlivých housenek musí odpovídat příslušným WPS.
- Kontrolovat nastavení svařovací hlavy podle příslušným WPS: sklon hořáku, úhel stoupání, prodlevy, atd.
- Zaměření pozornosti na detaily je nutné pro úspěšné dokončení procesu bez vytváření vad ve svaru.
- Změny v pořadí svarů (housenek) jsou povoleny pouze po schválení dozorem svařování.
- Nesmí být měněny parametry, aniž byl předtím vypočítán tepelný příkon a porovnán s požadavky WPS.
- Všechny změny musí být schváleny dozorem svařování a jím zkontrolovány a zkontrolovány nezávislou kontrolou před jejich použitím.

[22], [23], [24]

## 2.20 Průběh svařování WOL na nátrubek s HSS

### 2.20.1 Aplikace mezivrstvy Arcaloy ER 308L

Před zahájením svařování bylo provedeno ověření, zda je svařovací zařízení nastaveno na "výrobní režim" a že všechny parametry jsou nastaveny v souladu s požadavky na první vrstvu dle WPS 08-08-T-100-Buffer SS [19].

Zkušebním pohybem svařovacích hlav byl ověřen správný směr a zarovnání pro svařování. Ovladačem byla nastavena rychlost pojezdu tak, aby rychlost wolframové elektrody odpovídala požadavku WPS. Bylo provedeno nastavení, aby špička wolframové elektrody neprošla do prostoru mezi rysky a okraj HSS v jakémkoli bodě.

Bylo provedeno ověření nastavení parametrů svařování (včetně teploty povrchu součásti).

Bylo provedeno ověření instalace cívky drátu Arcaloy ER 308L na svařovacích hlavách.

Byla provedena kontrola, zda má svářeč/operátor k dispozici všechny požadované údaje pro zhotovení první vrstvy svaru.

Aby se zabránilo možnému horkému praskání korozivzdorného základního materiálu při svařování dalších vrstev přídavným materiálem Alloy 52M (před použitím popouštěcích housenek), bylo při aplikaci vyrovnávací mezivrstvy postupováno následovně:

- První housenka byla umístěna na rysky u HSS.
- Další svařované housenky byly pokládány na část nátrubku z korozivzdorné oceli směrem od HSS ke konci (patě) WOL, až bylo dosaženo narýsovaných značek.

V průběhu svařování byla prováděna kontrola interpass teploty a její záznam.

Po provedení vyrovnávací mezivrstvy byla provedena VT kontrola. Byl kontrolován i základní materiál do vzdálenosti 26 mm od okrajových housenek. Bylo ověřeno, zda vyrovnávací mezivrstva nezasáhla do HSS. Byla provedena kontrola měřením, zda povrchové nerovnosti nejsou hlubší jak 1,6 mm.

Následovalo provedení PT kontrola vyrovnávací mezivrstvy a základního materiálu do vzdálenosti 13 mm na obou koncích.

Byla provedena demontáž cívek drátu Arcaloy ER 308L ze svařovacích hlav.

### 2.20.2 Aplikace ukončení mezivrstvy Alloy 82

Před zahájením svařování bylo provedeno ověření, zda je svařovací zařízení nastaveno na "výrobní režim" a že všechny parametry jsou nastaveny v souladu s požadavky dle WPS 08-43-T-001-Bridge [20].

Bylo provedeno ověření instalace cívky drátu Alloy 82 na svařovacích hlavách.

První housenka ukončení mezivrstvy byla navařena na HSS a další směrem k vyrovnávací mezivrstvě.



Bylo provedeno svařování ukončení mezivrstvy tak, aby byl svázán HSS první vyrovnávací mezivrstvou.

Po dokončení ukončení mezivrstvy bylo ověřeno, že toto zcela navazuje na vyrovnávací mezivrstvu, a že se nevyskytují žádné viditelné nepravidelnosti.

Byla provedena VT kontrola. Byl kontrolován i základní materiál a vyrovnávací vrstva do vzdálenosti 26 mm. Bylo ověřeno, zda je ukončení mezivrstvy správně umístěno vzhledem k HSS a plynule navazuje na vyrovnávací mezivrstvu. Byla provedena kontrola měřením, zda povrchové nerovnosti nejsou hlubší jak 1,6 mm.

Následovalo provedení PT kontrola ukončení mezivrstvy a základního materiálu a vyrovnávací mezivrstvy do vzdálenosti 13 mm na obou koncích.

Byla provedena demontáž cívky drátu Alloy 82 ze svařovacích hlav.

### **2.20.3 Aplikace overlay Alloy 52M**

Před zahájením svařování bylo provedeno ověření, zda je svařovací zařízení nastaveno na "výrobní režim" a že všechny parametry jsou nastaveny v souladu s požadavky na první vrstvu dle WPS 01-08-T-804-Top [21].

Zkušebním pohybem svařovacích hlav byl ověřen správný směr a zarovnání pro svařování. Ovladačem byla nastavena rychlost pojezdu tak, aby rychlost wolframové elektrody odpovídala požadavku WPS.

Bylo provedeno ověření nastavení parametrů svařování (včetně teploty povrchu součásti).

Bylo provedeno ověření instalace cívky drátu Alloy 52M na svařovacích hlavách.

#### **První vrstva Alloy 52M**

Byla provedena kontrola, zda má svářeč/operátor k dispozici všechny požadované údaje pro zhotovení první vrstvy svaru.

Byla navařena první svarová housenka první vrstvy v souladu s WPS a ověřeno její umístění.

Byla navařena první vrstva, v průběhu svařování byla prováděna kontrola interpass teploty a její záznam. Po dokončení byla ověřena správná velikost první vrstvy.

Bylo provedeno měření (fluorescenční rentgenová spektroskopie, přístroj Niton XLT 498) obsahu chromu první vrstvy k ověření požadavku [17] na min. 24 % obsahu chromu. Byl naměřen obsah Cr min. 26,17 %.

Poznámka. Požadavek [9]: První vrstva může být započtena do požadované tloušťky, pokud část vrstvy nad austenitickým základním materiálem, austenitický svarový kov a související přechodová oblast od přilehlého feritického základního materiálu obsahuje alespoň 24 % Cr.

### **Druhá vrstva Alloy 52M**

Byla navařena první svarová housenka druhé vrstvy v souladu s WPS a ověřeno její umístění.

Byla navařena druhá vrstva, v průběhu svařování byla prováděna kontrola interpass teploty a její záznam. Po dokončení byla ověřena správná velikost druhé vrstvy.

### **Třetí vrstva Alloy 52M**

Byla navařena první svarová housenka třetí vrstvy v souladu s WPS a ověřeno její umístění.

Byla navařena třetí vrstva, v průběhu svařování byla prováděna kontrola interpass teploty a její záznam. Po dokončení byla ověřena správná velikost třetí vrstvy.

Byly zaznamenány datum a čas dokončení třetí vrstvy (pro dodržení lhůty 48 hodin).

Poznámka. Požadavek [9]: Pokud byla použita při svařování metoda popouštěcích housenek, je nutné provedení ultrazvukové kontroly ne dříve než 48 hodin po dokončení tří popouštěcích návarů nad feritickým materiálem.

Po dokončení třetí vrstvy bylo provedeno měření tloušťky WOL.

### **Dokončení overlay Alloy 52M**

Byla navařena první svarová housenka čtvrté vrstvy v souladu s WPS a ověřeno její umístění.

Dále byly svařovány housenky až do splnění konstrukčního požadavku na tloušťku WOL:

- a) 11,2 ÷ 15,2 mm na části nátrubku z oceli 22K,
- b) 9,1 ÷ 13,2 mm na části nátrubku z oceli 08Ch18N10T bez tloušťky mezivrstvy.

V průběhu svařování byla prováděna kontrola interpass teploty a její záznam.

Pomocí šablony byly průběžně ověřovány rozměry WOL, aby bylo zajištěno, že budou splněny požadavky na konečné rozměry.

#### **2.20.4 Opracování WOL**

Dokončený povrch WOL musí být připraven tak, aby byla získána dostatečně velká plocha pro UT kontroly. Příprava povrchu musí být prováděna způsobem zajišťujícím odstranění minimálního množství materiálu WOL i základního materiálu. Musí být předem stanovena metoda přípravy a čištění povrchu. Musí být monitorována účinnost procesu a každá změna čistoty plochy. [22]

Povrch WOL byl broušen ručně elektrickou kotoučovou bruskou, broušením ve směru radiálním ke směru svařování jednotlivých housenek byl minimalizován úběr materiálu.

Pro kontrolu a stanovení správných rozměrů a tvaru WOL byla použita šablona, vytvarovaná podle požadavků konstrukčního návrhu a výkresové dokumentace, včetně minimální a maximální tloušťky WOL.

Poznámka: Doporučuje se (ale není nutné), aby se jako první upravovaly kontury válcové plochy a pak kontury kuželového konce překrytí, aby splňovaly požadavky na délku a profil.

Byly změřeny a zaznamenány příslušné údaje přípravy povrchu WOL a bylo ověřeno, zda jsou splněny uvedené podmínky a rozměry a hodnoty jsou v rámci povolených tolerancí.

Konečné obrysy hotového WOL byly zakresleny.

## **2.21 Průběh svařování WOL na ocel 22K**

### **2.21.1 Aplikace overlay Alloy 52M**

Před zahájením svařování bylo provedeno ověření, zda je svařovací zařízení nastaveno na "výrobní režim" a že všechny parametry jsou nastaveny v souladu s požadavky na první vrstvu dle WPS-01-08-T-804-Top [21].

Zkušebním pohybem svařovacích hlav byl ověřen správný směr a zarovnání pro svařování. Ovladačem byla nastavena rychlost pojezdu tak, aby rychlost wolframové elektrody odpovídala požadavku WPS.

Bylo provedeno ověření nastavení parametrů svařování (včetně teploty povrchu součásti).

Bylo provedeno ověření instalace cívký drátu Alloy 52M na svařovacích hlavách.

#### **První vrstva Alloy 52M**

Byla provedena kontrola, zda má svářeč/operátor k dispozici všechny požadované údaje pro zhotovení první vrstvy svaru.

Byla navařena první svarová housenka první vrstvy v souladu s WPS a ověřeno její umístění.

Byla navařena první vrstva, v průběhu svařování byla prováděna kontrola interpass teploty a její záznam. Po dokončení byla ověřena správná velikost první vrstvy.

Bylo provedeno měření (fluorescenční rentgenová spektroskopie, přístroj Niton XLT 498) obsahu Cr první vrstvy k ověření požadavku [9] na min. 24 % obsahu Cr. Byl naměřen obsah Cr min. 25,09 %.

#### **Druhá vrstva Alloy 52M**

Byla navařena první svarová housenka druhé vrstvy v souladu s WPS a ověřeno její umístění.

Byla navařena druhá vrstva, v průběhu svařování byla prováděna kontrola interpass teploty a její záznam. Po dokončení byla ověřena správná velikost druhé vrstvy.

### **Třetí vrstva Alloy 52M**

Byla navařena první svarová housenka třetí vrstvy v souladu s WPS a ověřeno její umístění.

Byla navařena třetí vrstva, v průběhu svařování byla prováděna kontrola interpass teploty a její záznam. Po dokončení byla ověřena správná velikost třetí vrstvy.

Byly zaznamenány datum a čas dokončení třetí vrstvy (pro dodržení lhůty 48 hodin).

Po dokončení třetí vrstvy bylo provedeno měření tloušťky WOL.

### **Dokončení overlay Alloy 52M**

Byla navařena první svarová housenka čtvrté vrstvy v souladu s WPS a ověřeno její umístění.

Dále byly svařovány housenky až do splnění konstrukčního požadavku na tloušťku WOL  $10,7 \div 15,8$  mm.

V průběhu svařování byla prováděna kontrola interpass teploty a její záznam.

Pomocí šablony byly průběžně ověřovány rozměry WOL, aby bylo zajištěno, že budou splněny požadavky na konečné rozměry.

#### **2.21.2 Opracování WOL**

Dokončený povrch WOL musí být připraven tak, aby byla získána dostatečně velká plocha pro UT kontroly. Příprava povrchu musí být prováděna způsobem zajišťujícím odstranění minimálního množství materiálu WOL i základního materiálu. Musí být předem stanovena metoda přípravy a čištění povrchu. Musí být monitorována účinnost procesu a každá změna čistoty plochy. [23]

Povrch WOL byl broušen ručně elektrickou kotoučovou brusku, broušením ve směru radiálním ke směru svařování jednotlivých housenek byl minimalizován úběr materiálu.

Pro kontrolu a stanovení správných rozměrů a tvaru WOL byla použita šablona, vytvarovaná podle požadavků konstrukčního návrhu a výkresové dokumentace, včetně minimální a maximální tloušťky WOL.

Poznámka: Doporučuje se (ale není nutné), aby se jako první upravovaly kontury válcové plochy a pak kontury kuželového konce překrytí, aby splňovaly požadavky na délku a profil.

Byly změřeny a zaznamenány příslušné údaje přípravy povrchu WOL a bylo ověřeno, zda jsou splněny uvedené podmínky a rozměry a hodnoty jsou v rámci povolených tolerancí.

Konečné obrysy hotového WOL byly zakresleny.

## **2.22 Průběh svařování WOL na ocel 08Ch18N10T**

### **2.22.1 Aplikace mezivrstvy Arcaloy ER 308L**

Před zahájením svařování bylo provedeno ověření, zda je svařovací zařízení nastaveno na "výrobní režim" a že všechny parametry jsou nastaveny v souladu s požadavky na první vrstvu dle WPS-08-08-T-100-Buffer SS [19].

Zkušebním pohybem svařovacích hlav byl ověřen správný směr a zarovnání pro svařování. Ovladačem byla nastavena rychlost pojezdu tak, aby rychlost wolframové elektrody odpovídala požadavku WPS. Bylo provedeno nastavení, aby špička wolframové elektrody neprošla do prostoru mezi rysky a okraj HSS v jakémkoli bodě.

Bylo provedeno ověření nastavení parametrů svařování (včetně teploty povrchu součásti).

Bylo provedeno ověření instalace cívký drátu Arcaloy ER 308L na svařovacích hlavách.

Byla provedena kontrola, zda má svářeč/operátor k dispozici všechny požadované údaje pro zhotovení první vrstvy svaru.

Byla navařena první svarová housenka první vrstvy v souladu s WPS a ověřeno její umístění.

Byla navařena první vrstva, v průběhu svařování byla prováděna kontrola interpass teploty a její záznam. Po dokončení byla ověřena správná velikost první vrstvy.

Po provedení vyrovnávací mezivrstvy byla provedena VT kontrola. Byl kontrolován i základní materiál do vzdálenosti 26 mm od okrajových housenek. Byla provedena kontrola měřením, zda povrchové nerovnosti nejsou hlubší jak 1,6 mm.

Následovalo provedení PT kontrola vyrovnávací mezivrstvy a základního materiálu do vzdálenosti 13 mm na obou koncích.

Byla provedena demontáž cívek drátu Arcaloy ER 308L ze svařovacích hlav.

### **2.22.2 Aplikace overlay Alloy 52M**

Před zahájením svařování bylo provedeno ověření, zda je svařovací zařízení nastaveno na "výrobní režim" a že všechny parametry jsou nastaveny v souladu s požadavky na první vrstvu dle WPS-01-08-T-804-Top [21].

Zkušebním pohybem svařovacích hlav byl ověřen správný směr a zarovnání pro svařování. Ovladačem byla nastavena rychlost pojezdu tak, aby rychlost wolframové elektrody odpovídala požadavku WPS.

Bylo provedeno ověření nastavení parametrů svařování (včetně teploty povrchu součásti).

Bylo provedeno ověření instalace cívký drátu Alloy 52M na svařovacích hlavách.

#### **První vrstva Alloy 52M**

Byla provedena kontrola, zda má svářeč/operátor k dispozici všechny požadované údaje pro zhotovení první vrstvy svaru.

Byla navařena první svarová housenka první vrstvy v souladu s WPS a ověřeno její umístění.

Byla navařena první vrstva, v průběhu svařování byla prováděna kontrola interpass teploty a její záznam. Po dokončení byla ověřena správná velikost první vrstvy.

Bylo provedeno měření (fluorescenční rentgenová spektroskopie, přístroj Niton XLT 498) obsahu Cr první vrstvy k ověření požadavku [9] na min. 24 % obsahu Cr. Byl naměřen obsah Cr min. 25,6 %.

#### **Druhá vrstva Alloy 52M**

Byla navařena první svarová housenka druhé vrstvy v souladu s WPS a ověřeno její umístění.

Byla navařena druhá vrstva, v průběhu svařování byla prováděna kontrola interpass teploty a její záznam. Po dokončení byla ověřena správná velikost druhé vrstvy.

#### **Třetí vrstva Alloy 52M**

Byla navařena první svarová housenka třetí vrstvy v souladu s WPS a ověřeno její umístění.

Byla navařena třetí vrstva, v průběhu svařování byla prováděna kontrola interpass teploty a její záznam. Po dokončení byla ověřena správná velikost třetí vrstvy.

#### **Dokončení overlay Alloy 52M**

Byla navařena první svarová housenka čtvrté vrstvy v souladu s WPS a ověřeno její umístění.

Dále byly svařovány housenky až do splnění konstrukčního požadavku na tloušťku WOL  $10,7 \div 15,8$  mm bez tloušťky vyrovnávací mezivrstvy.

V průběhu svařování byla prováděna kontrola interpass teploty a její záznam.

Pomocí šablony byly průběžně ověřovány rozměry WOL, aby bylo zajištěno, že budou splněny požadavky na konečné rozměry.

### **2.23 Opracování WOL**

Dokončený povrch WOL musí být připraven tak, aby byla získána dostatečně velká plocha pro UT kontroly. Příprava povrchu musí být prováděna způsobem zajišťujícím odstranění minimálního množství materiálu WOL i základního materiálu. Musí být předem stanovena metoda přípravy a čištění povrchu. Musí být monitorována účinnost procesu a každá změna čistoty plochy. [24]

Povrch WOL byl broušen ručně elektrickou kotoučovou bruskou, broušením ve směru radiálním ke směru svařování jednotlivých housenek byl minimalizován úběr materiálu.

Pro kontrolu a stanovení správných rozměrů a tvaru WOL byla použita šablona, vytvarovaná podle požadavků konstrukčního návrhu a výkresové dokumentace, včetně minimální a maximální tloušťky WOL.

Doporučuje se (ale není nutné), aby se jako první upravovaly kontury válcové plochy a pak kontury kuželového konce překrytí, aby splňovaly požadavky na délku a profil.

Byly změřeny a zaznamenány příslušné údaje přípravy povrchu WOL a bylo ověřeno, zda jsou splněny uvedené podmínky a rozměry a hodnoty jsou v rámci povolených tolerancí.

Konečné obrysy hotového WOL byly zakresleny.

### 3 Zhodnocení svařených vzorků (MOCK-UP)

#### 3.1 Návrh experimentálních analýz

Z experimentálních vzorků budou mechanicky připraveny segmenty pro jednotlivé analýzy. V rámci experimentálního programu budou provedeny následující analýzy:

- Metalografická analýza a měření mikrotvrdomosti vzorku návaru na heterogenním svarovém spoji 22K a 08CH18N10T.
- Metalografická analýza vzorku návaru a měření mikrotvrdomosti na oceli 22K.
- Metalografická analýza vzorku návaru a měření mikrotvrdomosti na oceli 08CH18N10T.
- Mechanické zkoušky - zkouška rázem v ohybu vzorku návaru na heterogenním svarovém spoji 22K a 08CH18N10T.

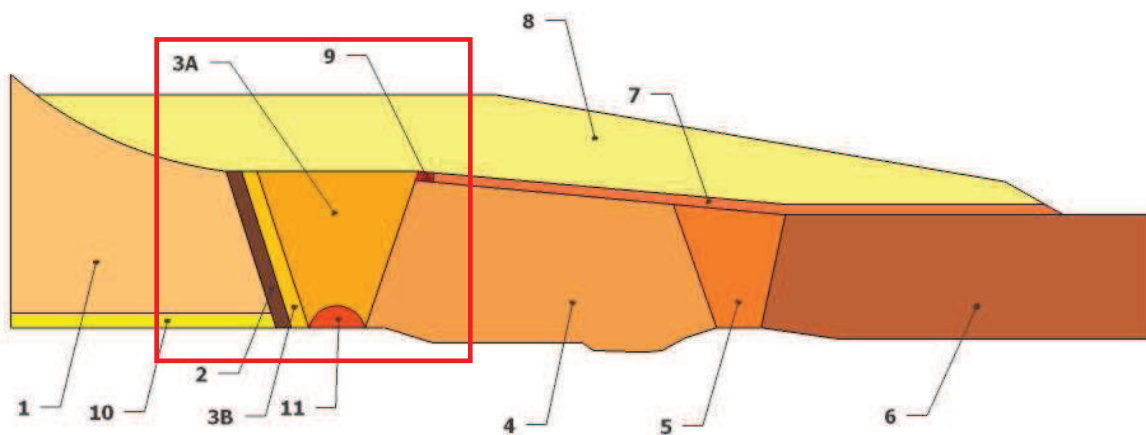
Vedle chemického složení budou stanoveny i hodnoty Cr a Ni ekvivalentů pro odhad výsledné mikrostruktury a stanovení předpokládaného obsahu  $\delta$  feritu ve strukturách, kde se dá očekávat jeho výskyt.

#### 3.2 Metalografická analýza

##### 3.2.1 Příprava vzorků

Vzorky byly mechanicky naděleny a připraveny klasickým postupem pro metalografické analýzy. Metalografická analýza byla provedena na světelném mikroskopu Zeiss AXIO.

Pro přesnou přípravu vzorků heterogenního spoje bylo nutná identifikace a rozsah jednotlivých konstrukčních částí. Na Obr. 3.1 je přehledný popis částí a jejich značení (část pro expertizu je označena). V tabulce Tab. 3.1 jsou jednotlivé části materiálově definovány.



Obr. 3.1 Popis částí WOL nátrubku s HSS



Tab. 3.1 Materiálové složení WOL nátrubku s HSS

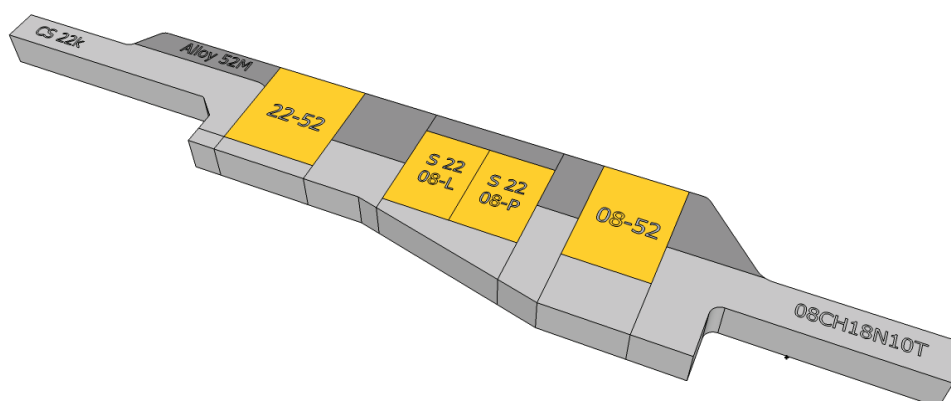
Pozice	Materiál	Chemické složení												
		C	Mn	S	Si	Cu	Ni	Cr	P	Nb	Ti	Mo	V	N
1	22K	0,190 0,260	0,75 1,00		0,20 0,40			0,30 0,30	0,30 0,030					
2	EA 395/9	0,080 0,140	1,00 2,30	0,030 0,020	0,70		22,00 27,00	13,50 17,50	0,030			4,50 7,50		
3A/3B	EA 400/10T		1,50 3,00	0,020	0,60		9,50 12,00	17,00 20,00	0,030			2,00 3,50	0,35 0,75	
4	08CH18N10T		1,00 2,00	0,020	0,80	0,250	9,00 11,00	17,00 19,00			0,4 0,7			
5	SS													
6	SA 240/316	0,080	2,00	0,030	1,00		10,00 14,00	16,00 18,00	0,045			2,00 3,00		0,1
7	ER 308L	0,021	1,75	0,006			12,70	23,40	0,014					
8	Alloy 52M	0,050		0,025	0,30		50,50	0,03						
9	Alloy 82	0,043	2,85	0,007	0,20	0,010	71,60	15,10	0,002	2,19	0,03			
10	SS													
11	Sv04CH19N11M3		0,80 2,00	0,020	1,20		11,00 13,50	16,00 20,00	0,030			1,50 3,00		

Tab. 3.1 Materiálové složení WOL nátrubku s HSS - pokračování

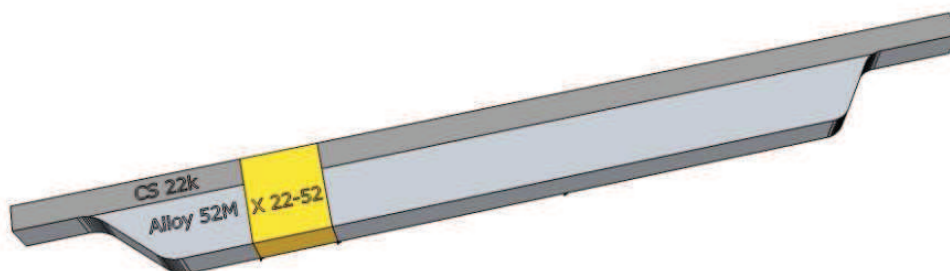
Pozice	Materiál	Použitý diagram	Ekvivalent		Odhad struktury
			Cr	Ni	
1	22K	Schaeffler	0,30 0,90	6,08 8,60	M
2	EA 395/9	WRC-92	18,00 25,00	24,80 31,90	A
3A/3B	EA 400/10T	WRC-92	19,00 23,50	9,50 15,15	A, 20%F
4	08CH18N10T	Schaeffler	17,80 21,60	9,50 14,40	A, 19%F min M
5	SS				
6	SA 240/316	Schaeffler	18,00 22,50	10,00 17,40	A, 19%F min M
7	ER 308L	WRC-92	23,40	13,43	A, 19%F
8	Alloy 52M	WRC-92	0,03	52,25	A
9	Alloy 82	WRC-92	16,63	73,10	A
10	SS				
11	Sv04CH19N11M3	WRC-92	19,00 23,50	9,50 15,15	A, 10%F

Kromě chemického složení byly stanoveny i hodnoty Cr a Ni ekvivalentů pro odhad výsledné mikrostruktury a stanovení předpokládaného obsahu  $\delta$  feritu ve strukturách, kde se dal očekávat. Pro použité materiály je doporučený obsah 5 ÷ 20 FN (pro materiály s vyšším obsahem molybdenu, je pak doporučený obsah 5 ÷ 16 FN).

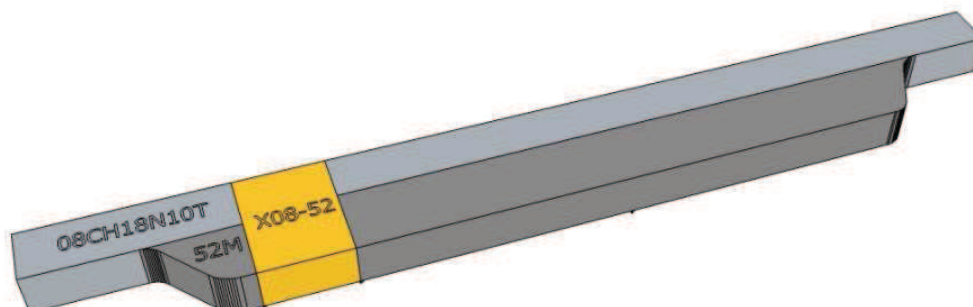
Z dodaných vzorků byly mechanicky připraveny segmenty pro jednotlivé analýzy. Rozřezový plán a označení vzorků je patrné z následujících obrázků Obr. 3.2 ÷ Obr. 3.4.



Obr. 3.2 WOL nátrubku s HSS, metalografické vzorky č. 22-52, 08-52, S 2208L, S 2208P



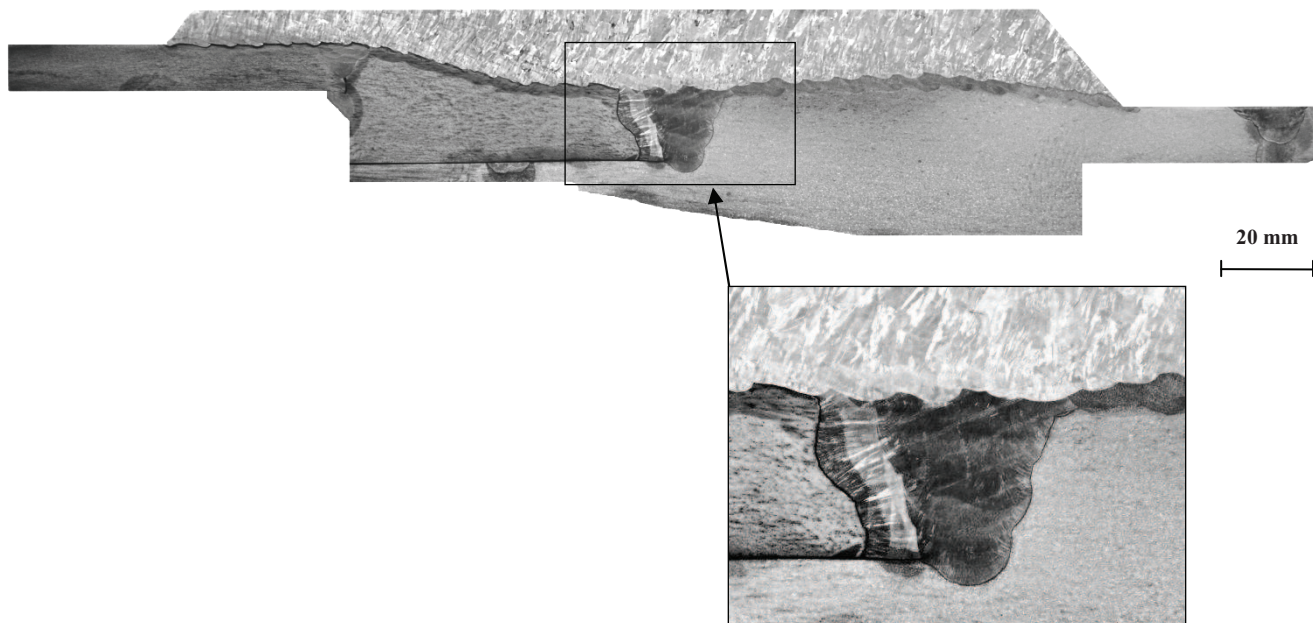
Obr. 3.3 WOL na trubce 22K, metalografický vzorek č. X 22-52



Obr. 3.4 WOL na trubce 08CH18N10T, metalografický vzorek č. X 08-52

### 3.2.2 Hodnocení makrostruktury

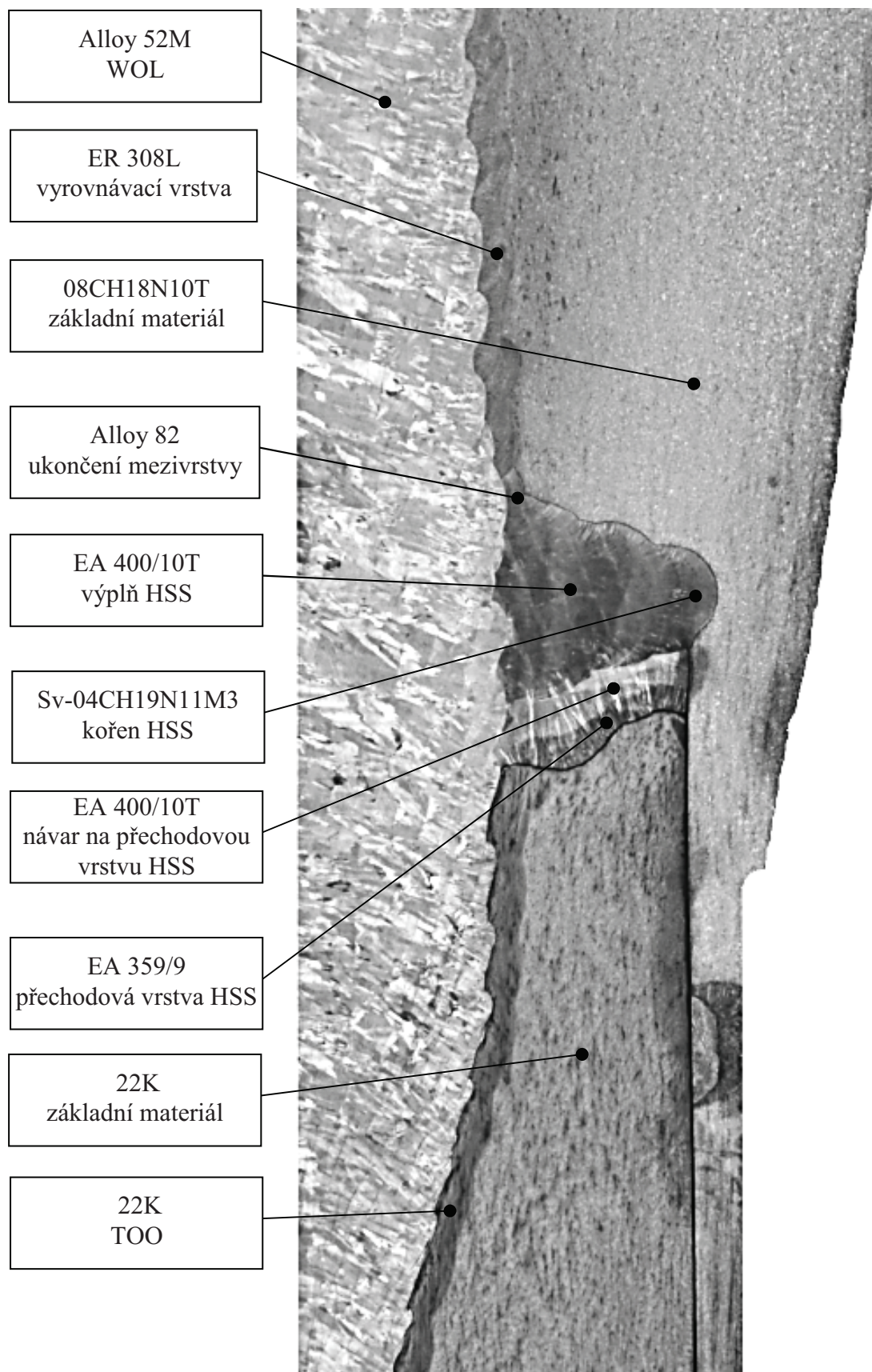
Makrosnímek WOL nátrubku s HSS s detailem HSS je na Obr. 3.5.



Obr. 3.5 WOL nátrubku s HSS a detail HSS

Makrostruktura svaru je poplatná použitým materiálům a aplikované technologii. Hranice svarových spojů jsou bez zjevných defektů. Na straně oceli 22K je patrná pod návarem tepelně ovlivněná zóna. Svarové housenky základního i přechodového svaru jsou rovnoměrné a bez defektů. Hrubé dendrity návary, orientované do směru odvodu tepla, také nevykazují žádné defekty.

Na Obr. 3.6 je přehledně uvedena lokalizace jednotlivých svarových kovů a základních materiálů na nátrubku s HSS.



Obr. 3.6 Lokalizace materiálů WOL nátrubku s HSS

### 3.2.3 Metalografická analýza

Vzorky pro metalografii struktury byly po vyleštění postupně leptány činidly:

- makrostruktura HSS - speciální leptadlo (destilovaná voda 30 hm. %, kyselina chlorovodíková 25 hm. %, kyselina dusičná 25 hm. %, po smíchání všech komponent přidat 20 hm. % peroxidu vodíku,
- mikrostruktura austenitické oceli - Villela-Bain (kyselina pikrová 0,6 hm. %, kyselina chlorovodíková 5 hm. %, etanol 94,4 hm. %),
- mikrostruktura svarových kovů a krycích housenek - Marble (kyselina chlorovodíková 48,6 hm. %, etanol 47,3 hm. %, síran měďnatý pentahydrát 4,1 hm. %).

Jednotlivé snímky jsou uvedeny na závěr kapitoly. Číslování pozic je provedeno dle Tab. 3.1. K analýze byly použity vzorky S 22 08-L a S 22 08-P, kde byly zastoupeny všechny technologické části svařence.

#### Vzorek S 22 08-P

Na Obr. 3.7 je dokumentované rozhraní základní svaru (poz. 3A) a ukončení mezivrstvy (poz. 9). Jde o čisté spojení austenitických dendritických struktur. V detailech jsou pak uvedeny na Obr. 3.8 a Obr. 3.9. V základní austenitické matici je patrná přítomnost netvárných vměstků na bázi Ti. Také přechodový svar (poz. 7) je charakteristický austenitickou hmotou s mírným podílem feritu na hranicích dendritických zrn, viz Obr. 3.10.

Ocel 08CH18N10T (poz. 4) je tvořena austenitem s podílem feritu  $\delta$ , který je lokalizován do podélných zrn ve směru tváření oceli. Přítomnost netvárných vměstků na bázi Ti je patrná z Obr. 3.12. Na rozhraní oceli a přechodového svaru (poz. 7) lze pozorovat v délce cca 0,75 mm tepelně ovlivněnou zónu se zvětšenými zrny austenitu, podél kterých jsou umístěny řetízky pravděpodobně karbidů chrómu, viz Obr. 3.11 a Obr. 15. Lze předpokládat, že tento jev se projeví i na měření mikrotvrdomosti.

Struktura krycího svaru (poz. 8) na Obr. 3.13 je tvořena hrubými dendrity austenitu s orientovanou precipitací karbidické fáze.

#### Vzorek S 22 08-L

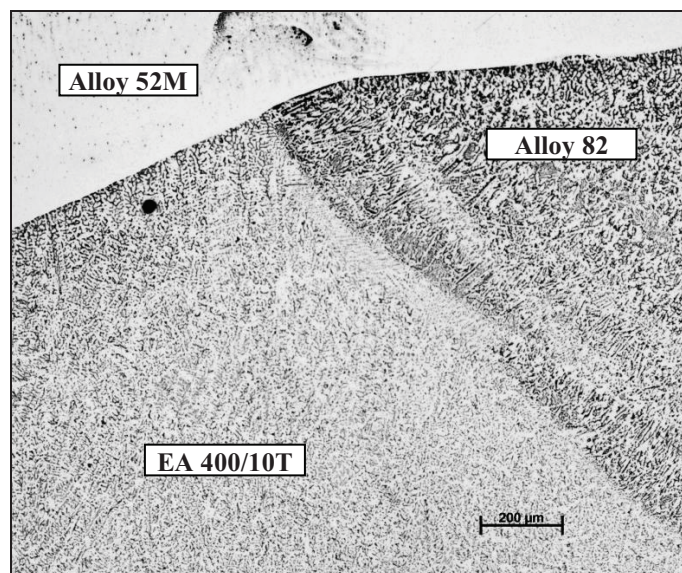
Struktura nízkouhlíkové oceli 22K v neovlivněné oblasti je tvořena feriticko-perlitickou směsí, kde jak ukazuje detail, zrna perlitu jsou výrazně rozpadlá a je přítomna i bainitická fáze - Obr. 3.16. V tepelně ovlivněné zóně - Obr. 3.17, došlo ke vzniku jemné struktury, tvořené bainitem a místy zachovalými jehlicemi cementitu.

Obr. 3.18 dokumentuje výraznou dendritickou austenitickou strukturu svarového kovu (poz. 3B). Na Obr. 3.19 resp. Obr. 3.20 je opět dokumentována struktura svarového kovu (poz. 3A) a návaru (poz. 8).

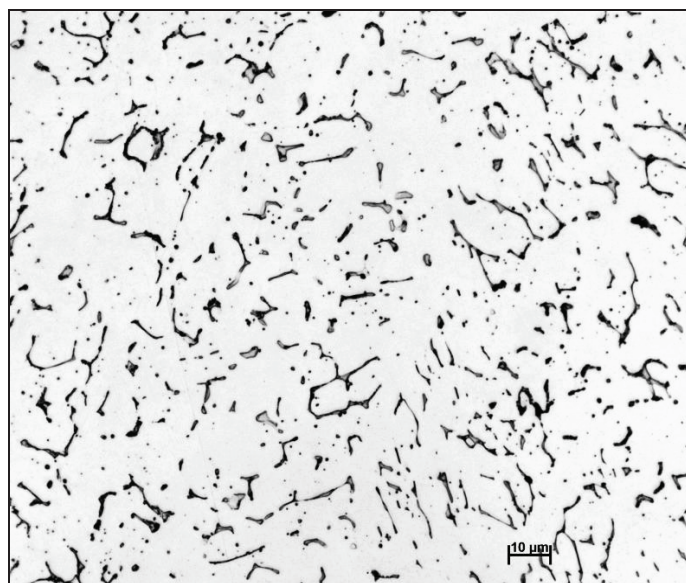
### 3.2.4 Vyhodnocení

Analýza makrostruktury a metalografická analýza nezjistily žádné defekty na svarových spojích, ani neprokázaly degradační procesy v materiálech, které by ovlivňovaly negativně únavové nebo křehkolomové vlastnosti.

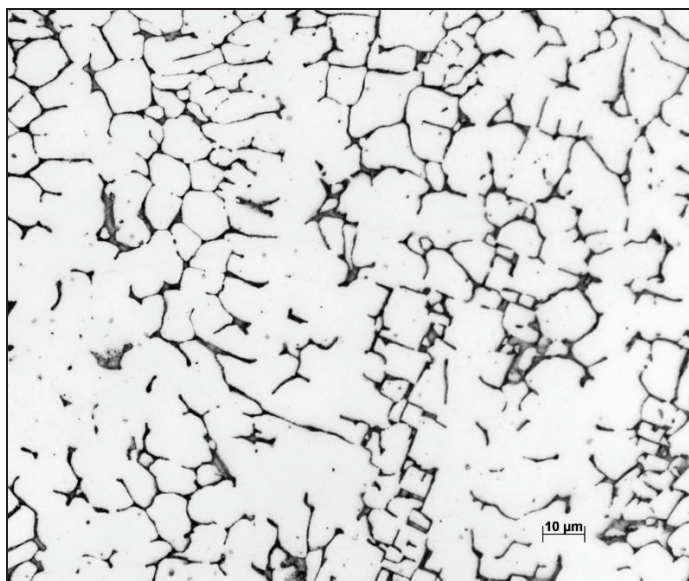
[28]



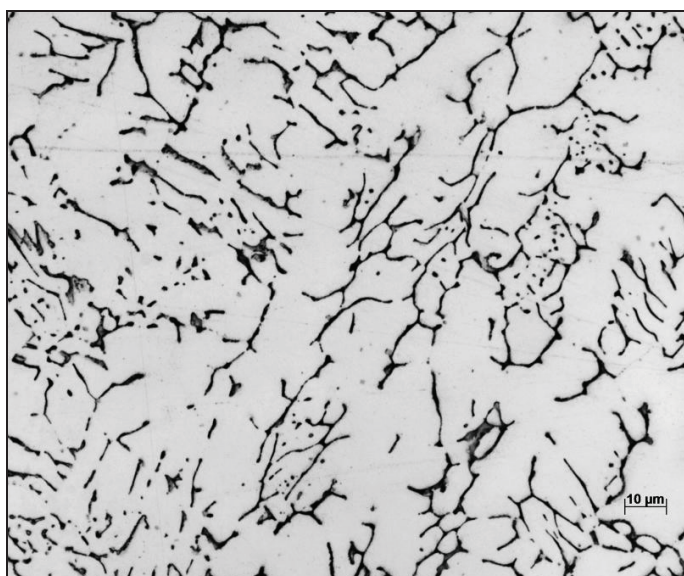
Obr. 3.7 Rozhraní svarového kovu EA 400/10T (3) a ukončení mezivrstvy Alloy 82 (9). Nahoře krycí svar Alloy 52M (8).



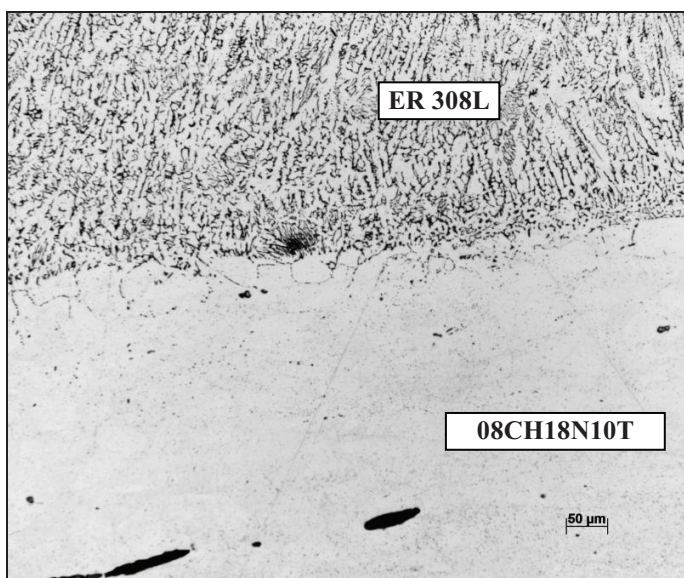
Obr. 3.8 Struktura svarového kovu EA 400/10T (3A).



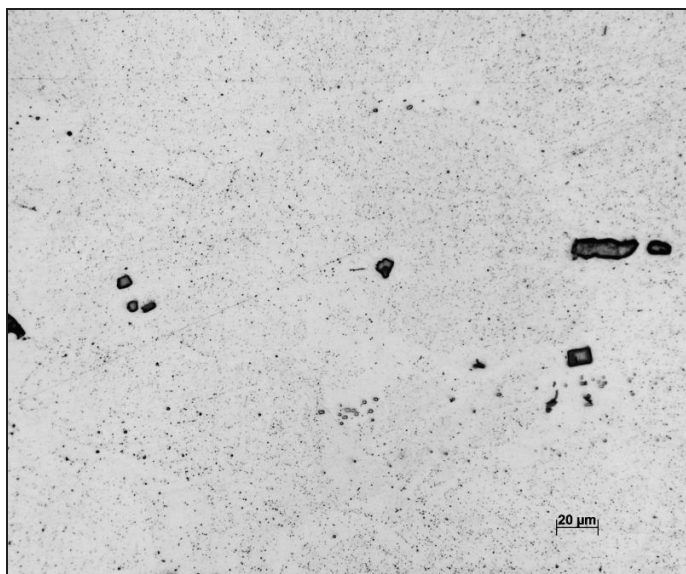
Obr. 3.9 Struktura ukončení mezivrstvy Alloy 82 (9).



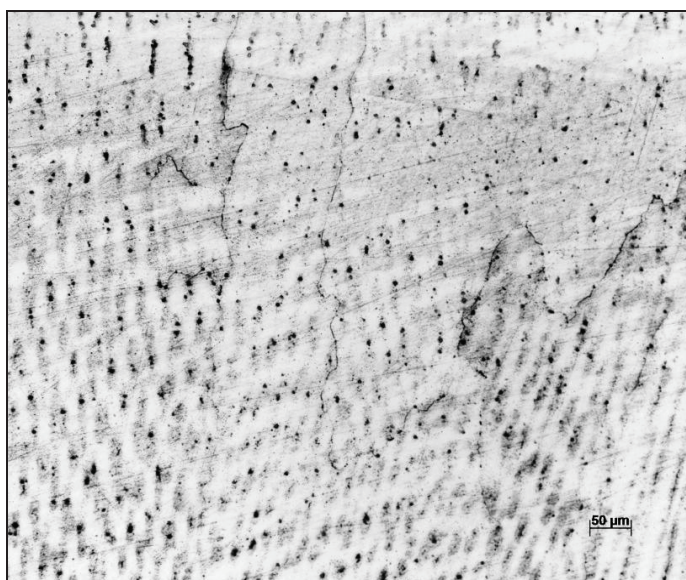
Obr. 3.10 Struktura vyrovnávací mezivrstvy ER 308L (7).



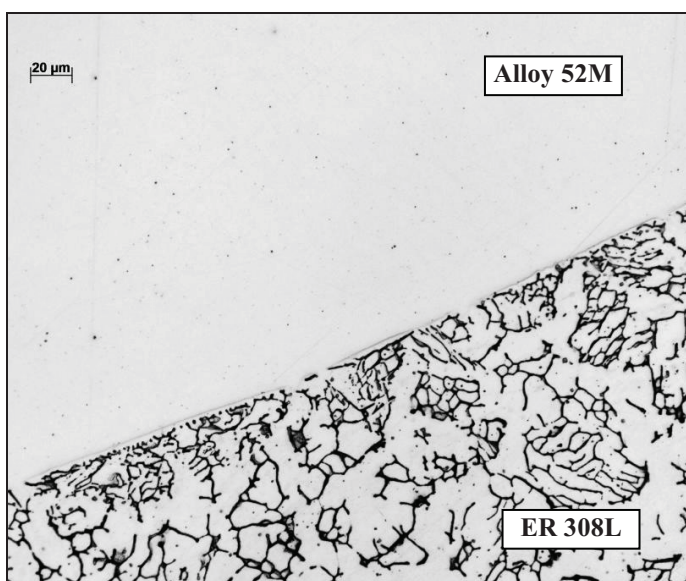
Obr. 3.11 Detail strukturního rozhraní 08CH18N10T (4) a vyrovnávací mezivrstvy ER 308L (7).



Obr. 3.12 Komplexní netvárné  
vměštky na bázi Ti ve struktuře  
08CH18N10T (4).

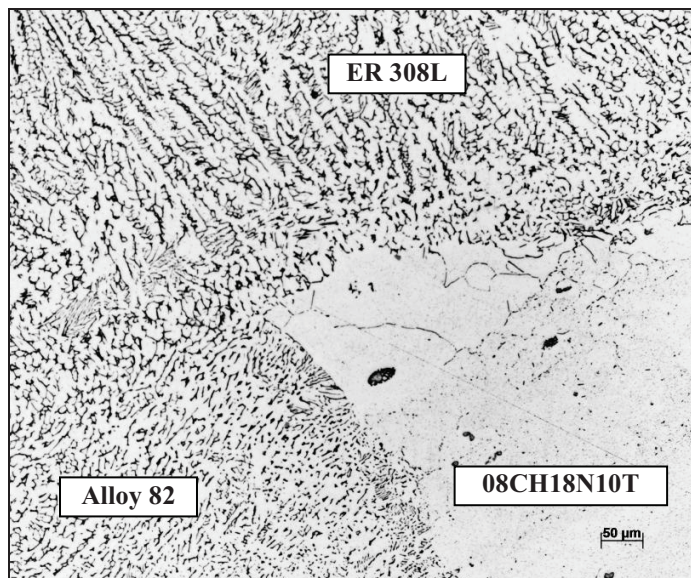


Obr. 3.13 Struktura krycího svaru  
Alloy 52M (8).

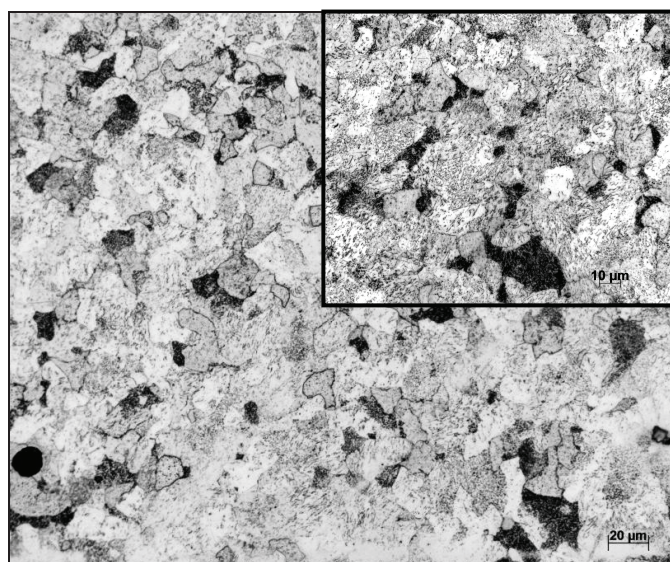


Obr. 3.14 Strukturální rozhraní  
vyrovnávací mezivrstvy ER 308L (7) a  
krycího svaru Alloy 52M (8).

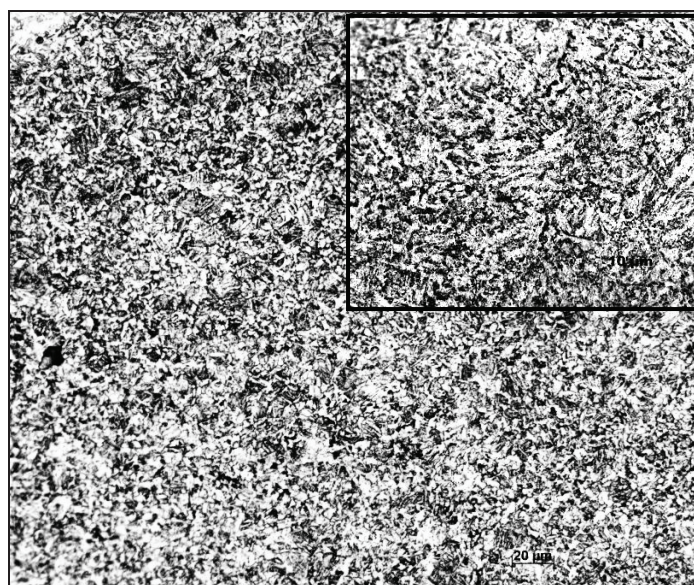




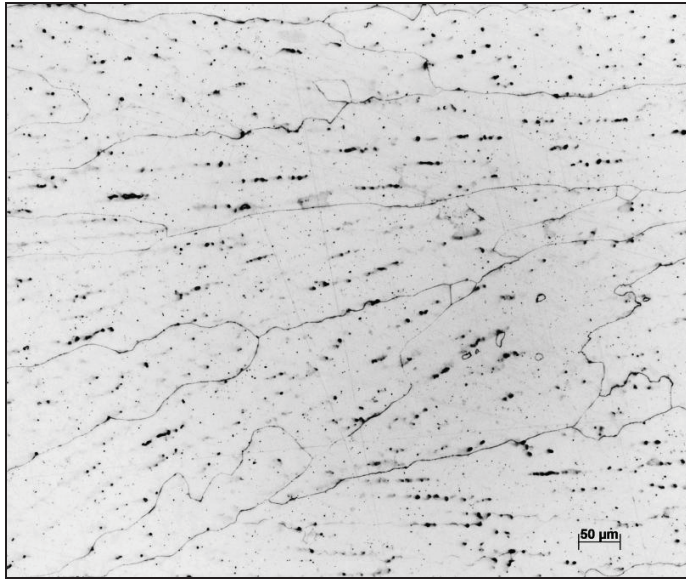
Obr. 3.15 Strukturní rozhraní 08CH18N10T (4), ukončení mezivrstvy Alloy 82 (9) a vyrovnávací mezivrstvy ER 308L (7).



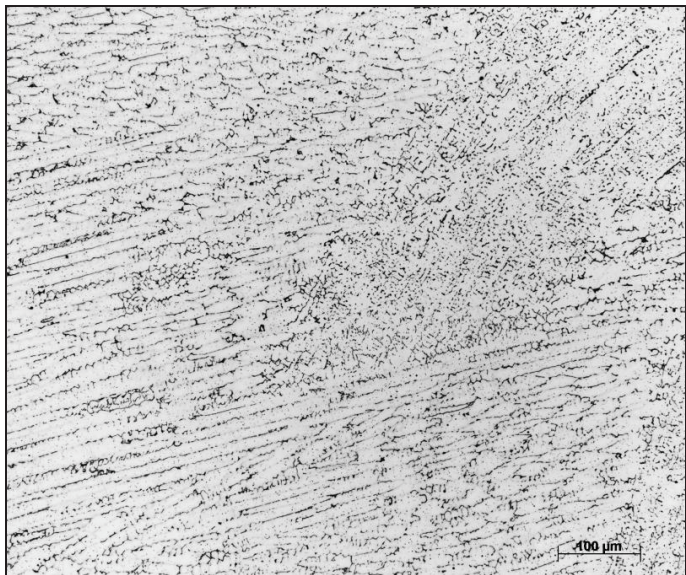
Obr. 3.16 Tepelně neovlivněná struktura oceli 22K (1).



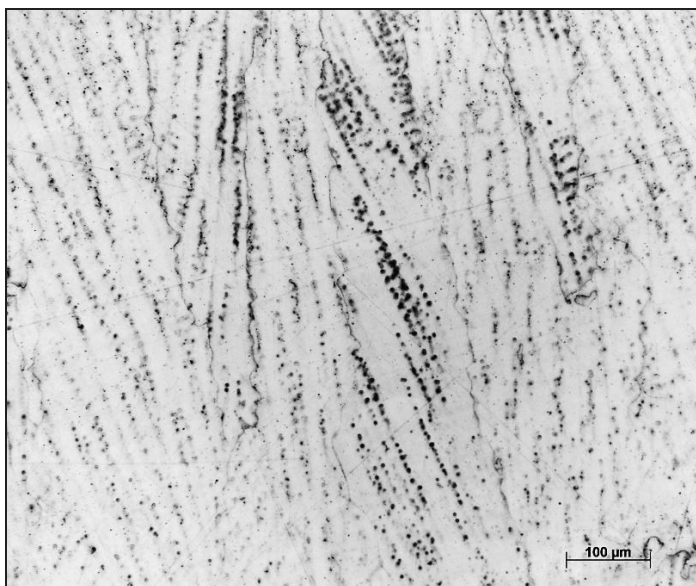
Obr. 3.17 Struktura oceli 22K (1) v tepelně ovlivněné zóně.



Obr. 3.18 *Struktura svaroého kovu EA 400/10T (3B).*



Obr. 3.19 *Struktura svaroého kovu EA 400/10T (3A).*



Obr. 3.20 *Struktura krycího svaru Alloy 52M (8).*

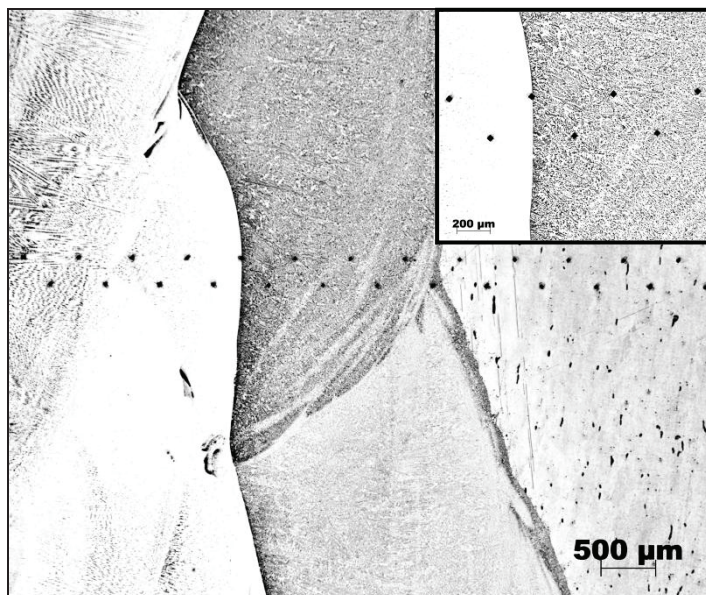
### 3.3 Měření mikrotvrdosti

#### 3.3.1 Příprava vzorků

Vzorky byly mechanicky naděleny a připraveny klasickým postupem pro metalografické analýzy a měření mikrotvrdosti.

#### 3.3.2 Měření mikrotvrdosti

Měření průběhu mikrotvrdosti bylo provedeno na automatickém mikrotvrdoměru LECO LM 247 AT. Mikrotvrdost byla měřena jako HV se zatížením 200g (HV0,2) a to v řadách s roztečí vpichů 0,25 mm a vzdáleností řad 0,25 mm, v dostatečné délce přes hranici svaru od základního materiálu do návaru - viz Obr. 3.21.

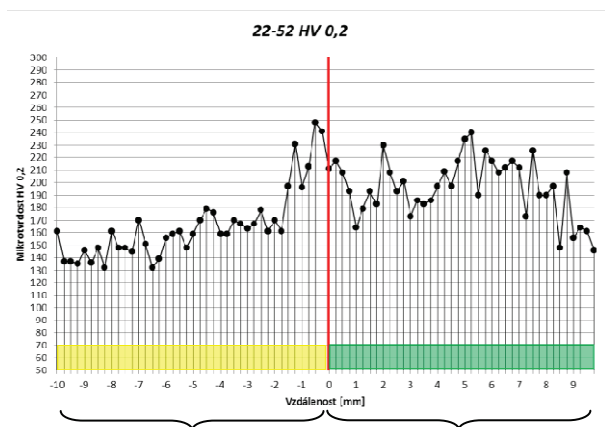


Obr. 3.21 Měření mikrotvrdosti HV0,2

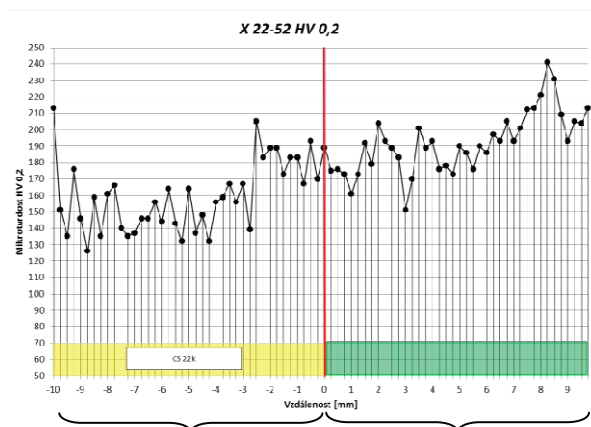
Analýza byla provedena jednak na heterogenním svaru - vzorky 22-52 a 08-52, a dále i na návarových vzorcích X 22-52 a X 08-52.

### 3.3.3 Výsledky měření

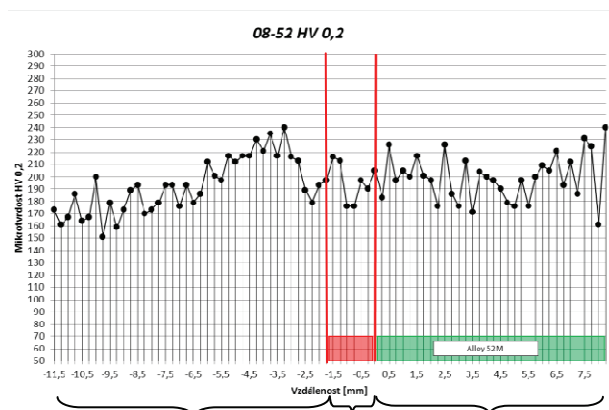
Výsledky měření jsou uvedeny na následujících obrázcích a dále.



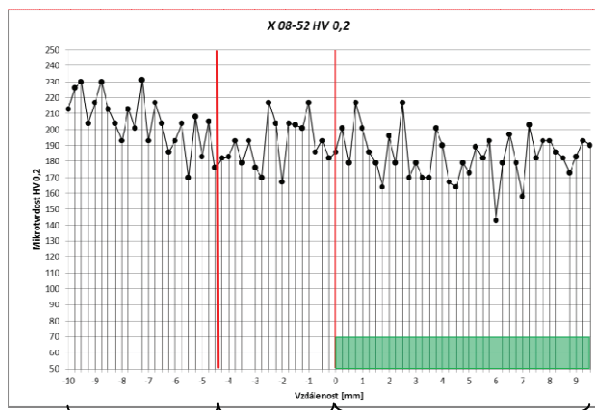
**22K Alloy 52M**  
Obr. 3.22 Průběh tvrdosti vzorek č. 22-52



**22K Alloy 52M**  
Obr. 3.23 Průběh tvrdosti vzorek č. X 22-52



**08CH18N10T ER 308L Alloy 52M**  
Obr. 3.24 Průběh tvrdosti vzorek č. 08-52



**08CH18N10T ER 308L Alloy 52M**  
Obr. 3.25 Průběh tvrdosti vzorek č. X 08-52

Z výsledků měření je patrný rozdíl mezi měřením na heterogenním svaru a návaru, a to v obou případech (ze strany 22K i 08CH18N10T).

#### Vzorek 22-52 a X 22-52

Úroveň mikrotvrdosti základního materiálu oceli 22K se u obou vzorků pohybovala okolo  $140 \div 160$  HV<sub>0,2</sub>. V tepelně ovlivněné oblasti (TOO) u vzorku 22-52 (jak dobře předpověděla metalografická analýza) došlo ke skokovému zvýšení mikrotvrdosti na  $210 \div 230$  HV<sub>0,2</sub>, přičemž šířku TOO lze stanovit na 1,5 mm. U návarového vzorku X 22-52 je širší TOO dvojnásobná (3 mm) a mikrotvrdost dosáhla úrovně okolo  $180 \div 190$  HV<sub>0,2</sub>. Tvrdost návaru je značně nerovnoměrná a je poplatná výraznému dendritickému charakteru struktury.

## Vzorek 08-52 a X 08-52

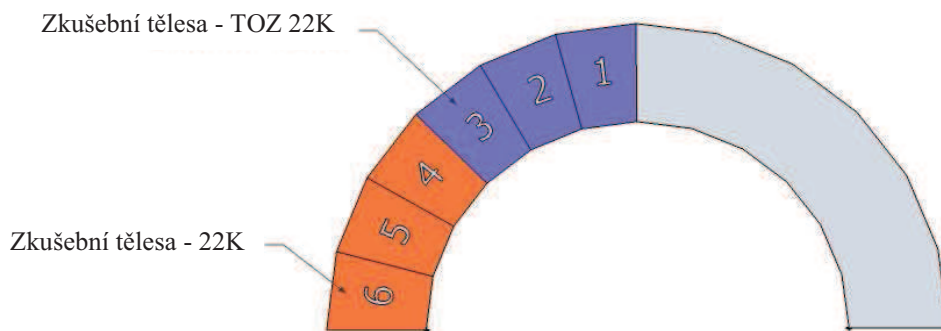
Mikrotvrdotost neovlivněného materiálu oceli 08CH18N10T se pohybovala mezi  $160 \div 190 \text{ HV}_{0,2}$ . Na vzorku heterogenního svaru je patrná TOO, kde v šíři cca 1,5 mm byla naměřena mikrotvrdotost  $180 \text{ HV}_{0,2}$ . To odpovídá metalografickému zjištění zhrubnutí zrna v této podnávarové oblasti. U návarového vzorku X 08-52 tento jev nebyl pozorován. Důvodem může být vyšší tepelná energie vnesená do materiálu při přípravě svarů, což dokazuje i 3 x širší oblast vyrovnávací mezivrstvy ER 308L u tohoto vzorku. Mikrotvrdotosti přechodového svaru i návaru nevykazuje žádné anomálie a jsou poplatné výsledné metalografické struktuře.

[28]

## 3.4 Zkouška rázem v ohybu

### 3.4.1 Příprava vzorků

Ze vzorků, určených pro zkoušku rázem v ohybu dle ČSN EN 10 045-1 [35], bylo podle rozřezového plánu, schematicky znázorněného na Obr. 3.26, odřezáno šest kusů polotovaru pro výrobu zkušebních těles.



Obr. 3.26 Rozřezový plán

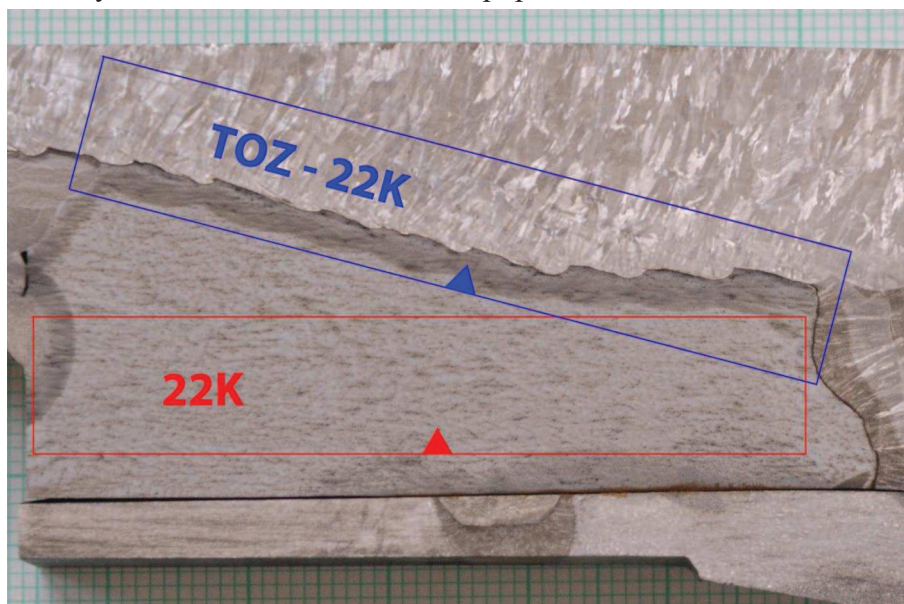
Z důvodu požadavků na specifické umístění kořene vrubu v rámci polotovaru byly, jak je uvedeno na Obr. 3.27, jednotlivé polotovary naleptány kvůli zvýraznění struktury, zejména polohy tepelně ovlivněné zóny (TOO) v materiálu 22K.



Obr. 3.27 Naleptaný polotovar

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 TOO materiálu 22K a směr šíření trhliny byl směrem do návaru ze slitiny 52M. Tato zkušební tělesa byla označena číslicemi 1, 2 a 3. Na Obr. 3.28 je jejich poloha schematicky zaznačena modrou barvou s popisem TOO - 22K.



Obr. 3.28 Poloha zkušebních těles

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. Na Obr. 3.28 je jejich poloha schematicky naznačena červenou barvou s popisem 22K.

### 3.4.2 Provedení zkoušky

Vlastní zkouška rázem v ohybu byla provedena za pokojové teploty (23 °C) na standardním rázovém kladivu PSd-300 s nominální energií 300 J.

Hodnoty nárazové práce jsou spolu s rozměry zkušebních těles uvedeny v Tab. 3.2.

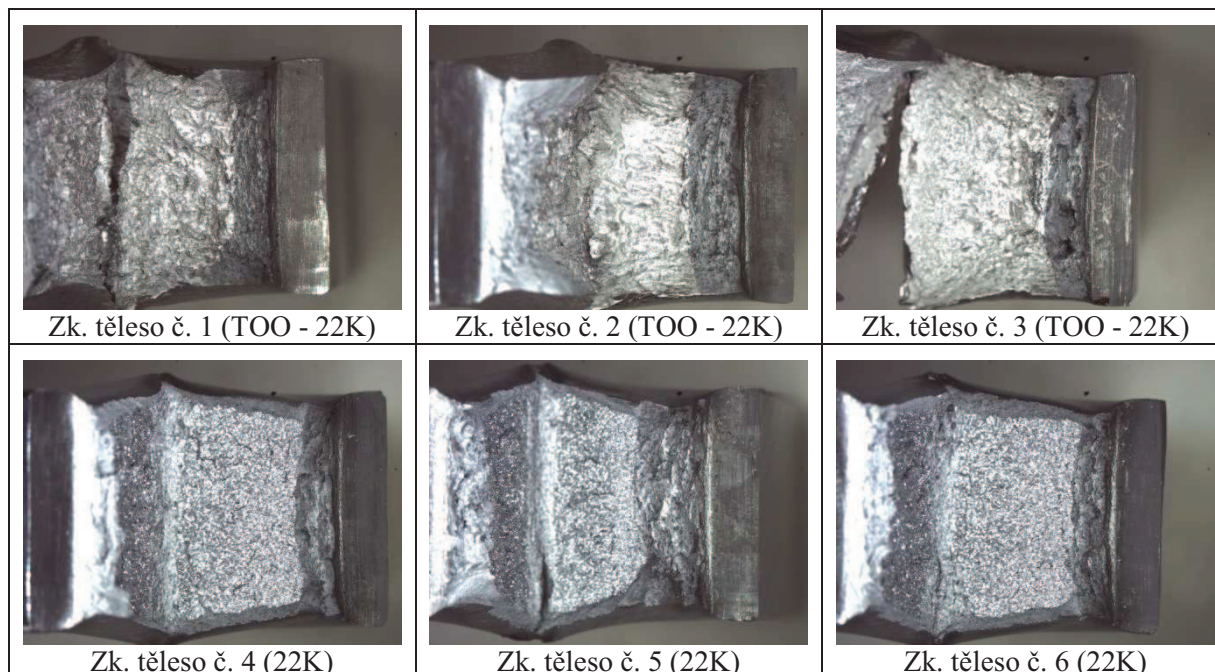
Tab. 3.2 Hodnoty nárazové práce a rozměry zkušebních těles

Č. zkuš. tělesa	Oblast	T [°C]	KV [J]	B [mm]	W [mm]
1	TOO - 22K	23	173,1	9,99	10,00
2	TOO - 22K	23	182,8	10,00	10,01
3	TOO - 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

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

### 3.4.3 Vyhodnocení

Na snímcích Obr. 3.29 jsou uvedeny vzhledy lomových ploch porušených zkušebních těles, pořízené pomocí světelného mikroskopu. Morfologie lomových ploch vykazuje charakteristické znaky lomů po velké makroplastické deformaci. Tato skutečnost plně koresponduje s poměrně vysokými hodnotami nárazové práce.



Obr. 3.29 Vzhled lomových ploch zkušebních těles

[28]

## 4 Provedení NDT kontrol WOL

### 4.1 Vizuální kontroly

Prováděné vizuální kontroly jsou pro názornost jejich zařazení mezi operacemi uvedeny výše, v textu pro průběh svařování.

#### 4.1.1 Obecné požadavky

Vizuální kontroly se provádí za účelem ověření dodržování přípravy, kvality svaru a základního materiálu.

Zkouška může zahrnovat, nikoliv se však omezovat na následující:

- |          |                          |
|----------|--------------------------|
| Příprava | - příprava ploch (hran)  |
|          | - čistota                |
|          | - rozměr otevření kořene |
|          | - sestavení              |
|          | - rozměry                |

	- zkosení nebo úhly drážky
Kvalita svaru	- profil - rovnoměrnost - velikost svaru - délka svaru - umístění - vruby - úhel překrytí nebo napojení - nedostatečné natavení - neúplný průvar - pórovitost - struska - trhliny - vměstky
Řemeslná zručnost	- estetika výrobku - konzistentní vlastnosti povrchu - otřepy, nerovnosti nebo nesprávná příprava hran, atd. - stopy po zapálení oblouku, rozstřík - důsledné dodržování procesních požadavků

#### 4.1.2 Hodnocení

- Vizuální zkoušky svaru byly hodnoceny v souladu s platnými kritérii přijatelnosti a identifikovány v předpisu (proceduře) [25], kterým je určen i průběh zkoušky.
- Předem bylo stanoveno, že svary budou vyhodnoceny jako nevyhovující, budou-li zjištěny některé z následujících indikací:
  - trhliny, bez ohledu na jejich délku,
  - nedostatečné natavení, bez ohledu na jejich délku,
  - neúplný průvar, bez ohledu na jejich délku,
  - významné lineární indikace dlouhé více než 1,6 mm,
  - přesah svaru, který zakrývá linie natavení,
  - neúplné vyplnění nebo podbroušení,
  - struska na povrchu dokončeného svaru.
  - stopy po zapálení oblouku - část s minimální tloušťkou nesmí být porušena, nesmí se vyskytovat trhliny v základním materiálu,
  - rozstřík na nebo vedle svaru, pokud je jeho množství příliš vysoké, např. zhoršuje inspekci (prohlídky) nebo NDT svaru (rozstřík, který lze odstranit drátěným kartáčem, musí být odstraněn před inspekci),
  - nadměrná konkávnost (vydutost).
- Kontroly byly vyhodnoceny jako vyhovující.



### 4.1.3 Značení a identifikace

- Svary musí být identifikovány pro zajištění sledovatelnosti.
- Metody značení nesmí mít nepříznivý vliv na kvalitu produktu nebo materiálu při zkoušení.
- Popisovače a / nebo barvy, které mají být použity na korozivzdorné austenitické oceli a slitiny na bázi niklu musí být bez nečistot, jako jsou slitiny s nízkým bodem tání, chlor, fluor, atd.
- Značkovací kapaliny používané na korozivzdorné austenitické oceli a slitiny na bázi niklu, nesmí obsahovat více než 0,02 % anorganických halogenů.
- Doporučená praxe je získání popisovače z přípravků, které byly schváleny pro použití.
- Svary mohou být identifikovány, ale bez omezení na uvedené, následujícími metodami:
  - mapy svarů,
  - izometrické výkresy,
  - fyzicky připojené štítky nebo páska,
  - popisovače (vhodné pro použití, viz výše),
  - fotografie
  - výkresy, skici a náčrtky.
- Označovací systémy, bez ohledu na použitou metodu, musí poskytovat identifikaci komponenty nebo svaru a jasně identifikovat jejich stav.

[25]

## 4.2 Kapilární kontrola

Tato kontrola se používá k detekci povrchových nespojitostí v relativně neporézních pevných materiálech.

Prováděné kapilární kontroly jsou pro názornost jejich zařazení mezi operacemi uvedeny výše, v textu pro průběh svařování.

### 4.2.1 Obecné požadavky

Před zahájením kontroly jsou vyžadovány následující údaje:

- identita materiálu a předmětů, které mají být zkoušeny,
- oblast, která má být zkoušena,
- stupeň zpracování, během něhož bude zkouška prováděna, pokud se liší od specifikace technického kódu,
- použitý systém značení, je-li použito,
- identifikace položek, které nebudou po zkoušce čištěny.

Všechna měření teploty a osvětlení musí být prováděna kalibrovanými a kontrolovanými přístroji a zaznamenána.

Při zkoušení svarů musí být součástí zkoušky vnější a přístupné vnitřní povrchy svaru a přilehlý základní materiál nejméně 13 mm na každé straně svaru.

Následující proměnné jsou považovány za nezbytné (při změně některé ze základních proměnných se vyžaduje rekvalifikace procedury, písemného postupu):

- identifikace a jakákoliv změna v typu nebo systémové skupiny penetrační materiálů, pokud nejsou uvedeny v proceduře (postupu),
- příprava povrchu (dokončovací práce a čištění, včetně typu čistícího rozpouštědla),
- způsob nanášení penetrantu,
- způsob odstranění přebytečného penetrantu,
- způsob nanášení vývojky,
- minimální a maximální časové úseky mezi kroky,
- sušící pomůcky,
- snížení penetrační doby (časové prodlevy),
- zvýšení doby působení vývojky (doba interpretace),
- minimální intenzita světla,
- teplota povrchu mimo  $10 \div 52$  °C,
- provedení demonstrace v případě potřeby.

Následující proměnné jsou považovány za nepodstatné. Jakékoli změny týkající se těchto proměnných používaných během počáteční kvalifikace, nebo jakékoli změny od hodnot nebo rozmezí hodnot řešeny v rámci kvalifikované procedury, nevyžadují rekvalifikaci procedury:

- požadavky na kvalifikaci personálu,
- materiály, tvary nebo rozměry, které mají být zkoušeny a rozsah zkoušení
- metoda čištění po zkoušce.

#### **4.2.2 Hodnocení**

Zkoušky byly hodnoceny v souladu s platnými kritérii přijatelnosti, jak jsou definovány v dokumentaci [26] pro provádění zkoušky.

Nespojitosti na povrchu jsou označeny prosakováním penetrantu. Lokalizované povrchové nepravidelnosti způsobené stopami po strojním obrábění, zvlněním svarů nebo jiných okolností, mohou způsobit nerelevantní indikace.

Jakákoliv indikace, která nemůže být stanovena jako relevantní nebo nerelevantní musí být přehodnocena k ověření, o jaký typ indikace se jedná. Před přehodnocením může být provedena povrchová úprava.

Široké oblasti pigmentace, které by mohly zakrýt známky diskontinuity, jsou nepřijatelné, takové oblasti musí být očištěny a přehodnoceny.

Indikace menší nebo rovno 1,6 mm jsou považovány za nerelevantní, pokud není uvedeno jinak.

- Lineární indikace jsou ty, u kterých je délka je větší než trojnásobek šířky.

- Okrouhlé indikace jsou indikace, které jsou kruhové nebo eliptické s délkou rovnající se nebo menší než trojnásobek šířky.
- Jakákoliv indikace diskontinuity může být větší než diskontinuita, která ji způsobuje, pro vyhodnocení je rozhodující velikost indikace a nikoli velikost diskontinuity.
- Kontroly byly vyhodnoceny jako vyhovující.

[26]

### 4.3 Kontroly ultrazvukem

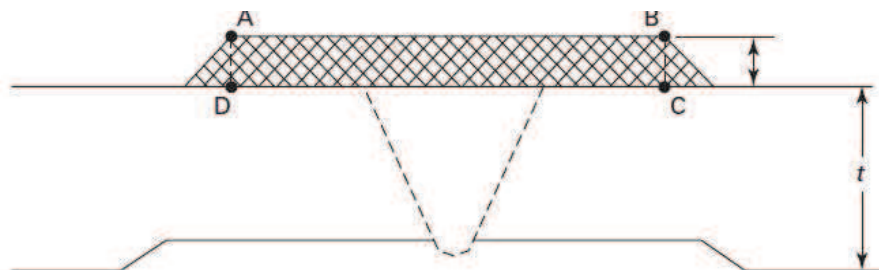
Ultrazvukové zkoušení WOL vyžaduje jiný přístup než je tomu u rutinního zkoušení austenitických nebo heterogenních svarových spojů. Tyto rozdíly spočívají zejména v hrubosti a rovinnosti povrchu, útlumu a anizotropii svarového kovu a efektu způsobujícímu uzavření trhliny vlivem velkých tlakových napětí na vnitřním povrchu potrubí. Útlum a anizotropie svarového kovu je způsobená mnohem vyšší hodnotou šumu než je tomu u svaru bez opravy overlay. Tento problém je při ultrazvukovém zkoušení řešen využitím podélných vln.

#### 4.3.1 Vstupní požadavky

Základní požadavky na WOL, z pohledu provádění NDT kontrol, jsou zpracovány v kapitole 2.9.

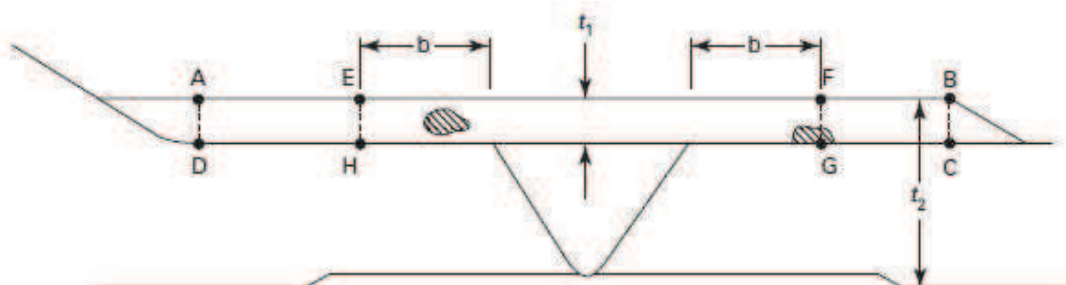
#### 4.3.2 Limity UT kontrol

- 1) Povrch WOL musí mít drsnost 6,3  $\mu\text{m}$  nebo lepší a tvar, který umožňuje ultrazvukovou kontrolu a musí být překontrolován pro ověření přijatelné konfigurace.
- 2) WOL a přilehlý základní materiál do vzdálenosti nejméně 13 mm z každé strany návaru musí být kontrolován pomocí penetrační zkoušky. Je-li použita metoda popouštěcích housenek, penetrační zkouška dokončeného návaru nesmí být provedena ne dříve než 48 hodin po dokončení tří popouštěcích návarů na feritické oceli.
- 3) Zkoušený objem A-B-C-D podle Obr. 4.1 musí být kontrolován ultrazvukem, aby bylo prověřeno dostatečné protavení návaru (tj. odpovídající spojení) se základním materiálem a aby bylo možno detekovat defekty způsobené při svařování, jako je nepřilnutí housenek, vměstky nebo trhliny. Rozhraní C-D mezi návarem a svarovým spojem zahrnuje hranici ztavení a tepelně ovlivněnou oblast návaru.



Obr. 4.1 Zkoušený objem A-B-C-D

Při použití kritérií požadavků na plošné indikace, tloušťka stěny  $t_1$  nebo  $t_2$  definovaná na Obr. 4.2, musí být použita jako nominální tloušťka stěny za předpokladu, že základní materiál pod WOL není náchylný ke korozi pod napětím. U materiálů citlivých ke korozi pod napětím, musí být použita tloušťka  $t_1$ . Pokud defekt v návaru prochází hranicí mezi oběma oblastmi, musí být použit konzervativnější z obou rozměrů ( $t_1$  nebo  $t_2$ ).



Obr. 4.2 Definice tloušťky  $t_1$  a  $t_2$

#### POZNÁMKY:

- Rozměr  $b$  je ekvivalentní s nominální tloušťkou nátrubku nebo potrubí, kde je proveden WOL.
- Jmenovitá tloušťka stěny  $t_1$  je pro defekty v E-F-G-H a  $t_2$  pro defekty v A-E-H-D nebo F-B-C-G.
- Tloušťka  $t_1$  musí být použita pro defekty v případě kontroly dvou objemů (jak je znázorněno na F-G).

Lamelární defekty v návaru WOL musí splňovat následující požadavky:

- Musí být splněny požadavky daných akceptačních kritérií s doplňkovým omezením, že celková plocha lamelárního defektu nesmí být větší než 10 % plochy povrchu svarového spoje a že žádný lineární rozměr plochy lamelárního defektu nesmí být větší než 76 mm nebo 10 % obvodu potrubí.
- Pro kontrolovaný objem A-B-C-D na Obr. 4.1, zmenšení kontrolovaného pokrytí v důsledku lamelárních defektů musí být menší než 10 %. Nekontrolovatelný objem je objem návaru pod lamelárními defekty, pro nějž nemůže být dosaženo pokrytí nedestruktivní zkušební metodou.
- V jakémkoliv nekontrolovatelném objemu návaru se musí předpokládat, že obsahuje největší radiální plošný defekt, který by mohl existovat v tomto objemu. Tento předpokládaný defekt musí splňovat požadavky daných akceptačních kritérií s nominální tloušťkou stěny, jak je definováno výše pro rovinné defekty. Musí být předpokládány oba typy defektů, osové i obvodové plošné defekty.

[9]

### 4.3.3 Použité zařízení

Použitý přístroj: OMNISCAN MX s modulem Phased Array 32/128.

Sonda: dvojitá s frekvencí 2 MHz, výrobce General Electric, speciální na zakázku.

Klín: plast s rychlostí šíření ultrazvuku 2280 m/s, úhel klínu 16°.

### 4.3.4 Provedení kontroly

Bylo prověřeno dodržení lhůty 48 hodin od ukončení svařování dokončení třetí vrstvy nad feritickým materiálem.

Před kontrolou byly získány následující údaje:

- umístění okrajů svaru (přechod do základního materiálu),
- okraje vyrovnávací mezivrstvy,
- obrys a umístění změn v obrysu WOL („lomových“ bodů),
- tloušťky stěny,
- obvod, měřený v každém významném bodě,
- obrys WOL.

Zkouška byla provedena dle [27] dvojitou Phased Array sondou o frekvenci 2 MHz za použití podélných vln a s klínem přizpůsobeným na vnější průměr komponenty.

Rychlost skenování byla do 25 mm za sekundu, nižší rychlost skenování umožňuje dosáhnout kvalitnějšího obrazu.

Cílem této zkoušky byla detekce a velikost hloubky případných vad v materiálu WOL, zejména orientovaných kolmo na vnějším povrchu. Mezi typické vady patří trhliny a mezihousenkové studené spoje (nenatavení). Dalším podstatným výsledkem bylo ověření dokonalého přilnutí provedeného návaru na použité základní materiály včetně HSS na nátrubku.

Podrobný popis provádění UT kontroly vyžaduje široký prostor a není cílem této práce. Úplný výklad techniky provádění zkoušky je popsán v [27] a [36].

### 4.3.5 Hodnocení

Zkoušky byly hodnoceny v souladu s platnými kritérii přijatelnosti, jak jsou definovány v dokumentaci [27] pro provádění zkoušky.

- Kontroly byly vyhodnoceny jako vyhovující.

## 5 Závěr

Tato diplomová práce popisuje ve své první části metodu Weld Overlay pro opravy svarových spojů. Je zde zmíněna a charakterizována technologie navařování, tak jak je v tradičním pojetí používána. Jsou popsány historie metody WOL, důvody jejího vzniku a hlavní funkce s vlivem na korozní praskání pod napětím.

V druhé části práce, zabývající se návrhem aplikace metody WOL a postupu při jejím samotném provedení, jsou uvedeny i problematika horkých trhlin při aplikaci WOL a specifika používaných přídavných materiálů. Na varianty přístupu k provedení WOL navazuje postup při návrhu a provedení opravy pomocí WOL včetně postupů při výpočtech. Návrh experimentálního programu společně s požadavky na metodu WOL z pohledu provádění NDT kontrol, popisu základních a přídavných materiálů a návrhu experimentálních analýz je následován samotnou praktickou částí. Pro tři uvedené konstrukční návrhy byly stanoveny technologické požadavky a postupy svařování, dle kterých byly zhotoveny vlastní vzorky potřebné pro výrobu zkušebních těles. Popis provedení vlastního svařování společně s úvodními návrhy a požadavky ukazuje na důležitost dodržování stanovených postupů, bez něhož nelze očekávat uspokojivé výsledky.

Třetí část shrnuje výsledky metalografické analýzy a rázové zkoušky vrubové houževnatosti, které nevykazují žádné známky nevhodnosti použitých materiálů a postupů. Pro potvrzení výsledků provedených krátkodobých zkoušek by ovšem bylo vhodné doplnit některé z dalších zkoušek, zejména pak zkoušky korozního praskání pod napětím, případně i zkoušky únavy.

Prováděné NDT kontroly, uvedené v části čtvrté, byly zařazeny chronologicky a prováděny stejným způsobem, jako při skutečném použití WOL na provozovaném energetickém zařízení.

Nejdůležitější poznatek a závěr této diplomové práce, vyplývá z výsledků provedených zkoušek a analýz. Byla ověřena a potvrzena vhodnost použití navržených přídavných materiálů pro aplikaci Weld Overlay na komponenty primárního okruhu jaderných elektráren z ocelí 22K a 08CH18N10T.

Lze konstatovat, že metoda WOL, v zahraničí již určitou dobu úspěšně aplikovaná, může doplnit škálu způsobů a metod používaných při opravách svarových spojů tuzemských jaderných elektráren a je pro tyto účely použitelná. Je ovšem nutné, zejména pro splnění náročných bezpečnostních požadavků na jaderně energetická zařízení, pečlivě vyhodnotit metodiku provádění WOL v kontextu s požadavky úvodních projektů pro tato zařízení. Potom mohou být provedeny úpravy a doplnění stávajících technických kódů jako je Normativně technická dokumentace Asociace strojních inženýrů ČR pro navrhování a provozování zařízení jaderných elektráren typu VVER.

## 6 Použitá literatura, zdroje

- [1] NuVision Engineering, Inc. *Mechanical Stress Improvement Process (MSIP®)*. [online]. c2013 [citováno 16. 11. 2013]. Dostupný z WWW: <<http://nuvisioneng.com/CommercialServices/MSIP.aspx>>
- [2] EPRI technical report, Materials Reliability Program: Technical Basis for Preemptive Weld Overlays for Alloy 82/182 Butt Welds in Pressurized Water Reactors (PWRs) (MRP-169), Revision 1-AMRP 1021014
- [3] EPRI technical report, Overlay Handbook Part 1: Welding Procedures, Part 2: NDE, 1021075, Final Report, December 2010
- [4] JARÝ, M. *Výpočtové modelování procesu svařování a tepelného zpracování oceli s využitím elasto-viskoplastického modelu materiálu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 130 s. Vedoucí disertační práce Ing. Lubomír Junek, Ph.D.
- [5] Bajda, M. *Navarování kovů*. [online]. c2013 [citováno 15. 11. 2013]. Dostupný z WWW: <[http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/Navarování\\_complete.pdf](http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/Navarování_complete.pdf)>
- [6] Flesner, B. *NDT of weld Overlays*, EPRI prezentace v Charlotte, 2/2012
- [7] Coleman, K. *Application and Repair of Overlay Welds*, 1009755, Technical Update, April 2005
- [8] Case N-754 Optimized Structural Dissimilar Metal Weld Overlay for Mitigation of PWR Class 1 Items, Section XI, Division 1, Approval Date: June 25, 2011
- [9] Case N-740-2 Full Structural Dissimilar Metal Weld Overlay for Repair or Mitigation of Class 1, 2, and 3 Items, Section XI, Division 1, Approval Date: November 10, 2008
- [10] ASME Code Case N-504-2, "Alternative Rules for Repair of Classes 1, 2, and 3 Austenitic Stainless Steel Piping," dated March 12, 1997.
- [11] ASME Code Case N-504-3 Alternative Rules for Repair of Class 1, 2, and 3 Austenitic Stainless Steel Piping, Section XI, Division 1, Approval Date: August 4, 2004.
- [12] ГОСТ 5520-79. *Прокат листовой из углеродистой, низколегированной и легированной стали для котлов и сосудов, работающих под давлением. Технические условия*. ИПК Издательство стандартов. Москва, 1979.  
GOST 5520-79. *Plechý válcované z uhlíkové, nízkolegované a legované oceli pro kotle a nádoby pracující pod tlakem. Specifikace*. IPS Vydavatelství norem. Moskva, 1979.
- [13] ГОСТ 5632-72. *Стали высоколегированные и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки*. ИПК Издательство стандартов. Москва, 1972.  
GOST 5632-72. *Vysokolegované oceli a slitiny korozivzdorné, žáruvzdorné a žáropevné. Značky*. IPS Vydavatelství norem. Moskva, 1972.

- [14] AWS A5.14/A5.14M:2009, *Specification for Nickel and Nickel-Alloy Bare Welding Electrodes and Rods-Includes*, American Welding Society.
- [15] AWS A5.9/A5.9M:2006, *Specification for Bare Stainless Steel Welding Electrodes and Rods*, American Welding Society.
- [16] Aquilex WSI LLC, *Drawing No. 421900, Spray Line Nozzle Coupon*. Norcross. 2013.
- [17] Aquilex WSI LLC, *Drawing No. 42188, Carbon Steel Pipe Coupon*. Norcross. 2013.
- [18] Aquilex WSI LLC, *Drawing No. 421888, Stainless Steel Pipe Coupon*. Norcross. 2013.
- [19] Aquilex WSI LLC, *WPS 08-08-T-100-Buffer SS Rev. 10*. Norcross. 2012.
- [20] Aquilex WSI LLC, *WPS 08-43-T-001-Bridge Rev 7*. Norcross. 2012.
- [21] Aquilex WSI LLC, *WPS 01-08-T-804-Top Rev 7*. Norcross. 2012.
- [22] Aquilex WSI LLC, *Traveler No. 209964-TR-052 Rev. 0*. Norcross. 2013.
- [23] Aquilex WSI LLC, *Traveler No. 209964-TR-050 Rev. 0*. Norcross. 2013.
- [24] Aquilex WSI LLC, *Traveler No. 209964-TR-051 Rev. 0*. Norcross. 2013.
- [25] Aquilex WSI LLC, *QAP 9.3. Rev. 20. Procedure for workmanship and visual examination*. Norcross. 2011.
- [26] Aquilex WSI LLC, *QAP 9.6. Rev. 14. Procedure for liquid penetrant examination*. Norcross. 2011.
- [27] Structural Integrity Associates, Inc., *SI-UT-126 Rev. 3. Procedure for the Phased Array of Ultrasonic Examination of Weld Overlaid Similar and Dissimilar Metal Welds*. Charlotte. 2007.
- [28] VIKLICKÝ, O., VÁLKA, L. *Makro a mikrostrukturní analýza vzorků svařových spojů s technologií opravy „Weld Overlay“*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství, 2013. 16s. Vedoucí pracoviště: doc. Ing. Vít JAN, Ph.D.
- [29] ČSN EN ISO 15609-1 Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Stanovení postupu svařování - Část 1: Obloukové svařování. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [30] TNI CEN ISO/TR 15608. Svařování - Směrnice pro zařazování kovových materiálů do skupin. Český normalizační institut, 2008.
- [31] ČSN EN ISO 4063. Svařování a příbuzné procesy - Přehled metod a jejich číslování. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.



- [32] ČSN EN ISO 6947. Svařování - Pracovní polohy - Definice úhlů sklonu a otočení. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [33] ČSN EN ISO 14175. Svařovací materiály - Plyny a jejich směsi pro tavné svařování a příbuzné procesy. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009
- [34] ČSN EN ISO 6848. Obloukové svařování a řezání - Netavící se wolframové elektrody - Klasifikace. Český normalizační institut, 2005
- [35] ČSN EN 10045-1. Kovové materiály - Zkouška rázem v ohybu podle Charpyho - Část 1: Zkušební metoda (V a U vruby). Praha: Český normalizační institut, 1998.
- [36] *Nondestructive Evaluation: Procedure for Manual Phased Array UT of Weld Overlays*. EPRI, Palo Alto, CA: 2007. 1015134.