

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

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

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Optimalizace robotického svařování

Autor: **Bc. Ondřej STACH**

Vedoucí práce: **Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž, IWE.**

Akademický rok 2019/2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Ondřej STACH
Osobní číslo:	S18N0077P
Studijní program:	N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor:	Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie
Téma práce:	Optimalizace robotického svařování
Zadávací katedra:	Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Zásady pro vypracování

1. Úvod do obloukového svařování.
2. Rozbor metody orbitálního svařování
3. Svařování heterogenních materiálů trubek orbitálním svařováním.
4. Návrh svařovacích parametrů s ohledem na požadovanou kvalitu v JET
5. Porovnání orbitálního a laserového svařování.
6. Vyhodnocení kvality svaru z hlediska metalurgického a NDT
7. Závěr

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

Seznam doporučené literatury:

The orbital Welding handbook Original edition: Polysoude Nantes France SAS, 2009

ASKELAND Donald R., Pradeep P. FULAY, Wendelin J. WRIGHT. *The Science and Engineering of Materials*. Sixth edition. ISBN-13: 978-0-495-29602-7

KOU Sindo *Welding Metallurgy* . second edition ISBN 0-471-43491-4

OLSON D.L., SIEWERT T.A., LIU S., EDWARDS G.R. *ASM handbook: Welding, brazing and soldering*. Vol. 6. 10 edition. USA: ASM International, 1993 ISBN 0-87170-382-3.

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž, IWE**
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Konzultant diplomové práce: **Ing. Igor Vilcsek, Ph.D., IWE**
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Datum zadání diplomové práce: **5. října 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2020**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



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

V Plzni dne 30. října 2019

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:

Andrzej Słoch

.....
podpis autora

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Stach	Jméno Ondřej	
STUDIJNÍ OBOR	3911T016 „Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Prof. Dr. Ing. Kříž, IWE	Jméno Antonín	
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KMM		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Optimalizace robotického svařování		

FAKULTA	Strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2020
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

CELKEM	142	TEXTOVÁ ČÁST	86	GRAFICKÁ ČÁST	56
---------------	-----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL, POZNATKY A PŘÍNOSY	Práce se zabývá svařováním heterogenních svarových spojů trubek mezi austenitickou a feriticko-perlitickou ocelí. V teoretické části je popsán vliv svařování na vlastnosti spoje a dále je popsána technologie automatového orbitálního svařování. V experimentální části byl odladěn orbitální svařovací proces pro odlišné typy úkosů trubek. Na zhotovených spojích byly provedeny nedestruktivní zkoušky, metalografické hodnocení a zkouška mikrotvrdomosti.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	Orbitální svařování, WIG, heterogenní svar, koruze pod napětím, optimalizace orbitálního svařování, svařování trubek

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Stach	Name Ondřej	
FIELD OF STUDY	3911T016 „Materials engineering and Engineering Metallurgy“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Prof. Dr. Ing. Kříž, IWE	Name Antonín	
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Optimization of robotic welding		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2020
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

TOTALLY	142	TEXT PART	86	GRAPHICAL PART	56
----------------	-----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	<p>This work deals with the issue of dissimilar metals welds between austenitic and ferritic-pearlitic steel pipes. In the theoretical part there is described how the welding process influences the properties of the weld. The orbital welding process is also described in the theoretical part. The experimental part is focused on optimization of automatic orbital welding for different types of bevels of the pipes. Welded samples were evaluated by non destructive and destructive testing. The metallographic evaluation was done including micro hardness measurement.</p>
KEY WORDS	Orbital WIG welding, dissimilar metal joint, stress corrosion cracking, optimization of orbital welding, pipe welding

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu této diplomové práce Prof. Dr. Ing. Antonínu Křížovi, IWE. za pomoc, poskytnuté rady a za vstřícný přístup i v době koronavirové krize. Děkuji taktéž Davidu Sobotkovi za rady a ukázkou orbitálního svařování. Poděkování patří i konzultantovi Ing. Igoru Vilcsekovi, Ph.D.

Poděkování SGS projektu

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

Poděkování projektu VVRC a SGS

Diplomová práce vznikla na základě řešení studentského projektu SGS – 2018-051 „Aplikace nových postupů úpravy a testování povrchu i objemových materiálů za účelem zvýšení uplatnitelnosti konstrukčního celku nebo pracovního nástroje v průmyslové praxi“. K realizaci diplomové práce bylo využito přístrojové vybavení finančně podpořeno Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy - projekt LQ1603 Výzkum pro SUSEN. Práce byla realizována v infrastruktuře Udržitelná energetika (SUSEN) vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0108 a CZ.02.1.01/0.0/0.0/15_008/000029

Obsah

Použité symboly a zkratky	9
Úvod	11
1 Svařování heterogenních spojů	12
1.2 Svařování korozivzdorné oceli s uhlíkovou/nízkolegovanou ocelí	15
2 Austenitické Cr-Ni oceli	15
2.1 Svařitelnost austenitických Cr-Ni ocelí	16
3 Degradace svarového spoje	17
3.1 Koroze pod napětím	17
4 Vliv geometrie svarových ploch na svar	18
5 Obloukové svařování	20
5.2 Tepelný příkon a tepelně ovlivněná oblast (TOO)	21
6 Metoda TIG/WIG	23
6.1 Svařovací proudy	24
6.2 Wolframová elektroda	25
6.3 Plyny vstupující do procesu svařování	28
7 Orbitální svařování	30
7.1 Polohy při orbitálním svařování	32
7.2 Určení parametrů orbitálního svařování	35
8 Obloukové metody orbitálního svařování v porovnání s laserovým	39
Experimentální část	43
9 Úvod do experimentální části	43
9.1 Použité materiály	43
9.1.1 Základní materiál P265GH	44
9.1.2 Základní materiál Wr.N. 1.4541	45
9.1.3 Přídavný materiál Sv07Ch25N13	46
9.2 Použití Schäfflerova diagramu	46
10 Použitá zařízení	48
11 Příprava úkosů	50
12 Odladění procesu svařování	51
12.1 Úkos U	54

12.2 Úkos V50.....	54
12.3 V25.....	55
12.4 Úkos V0.....	55
13 Nedeštruktivní zkoušení	57
13.1 Vizualní zkouška (VT)	57
13.2 Ultrazvuková zkouška (UT)	57
13.3 Radiografická kontrola (RT)	59
14 Porovnání vneseného tepla	61
15 Metalografické hodnocení	62
15.1 Metalografické hodnocení trubky V0_5 svařené metodou WIG	63
15.2 Metalografické hodnocení vzorku z laserového svařování	66
16 Zkouška mikrotvrdošti	67
Diskuze	69
Závěr	73
Použitá zdroje:.....	74
Seznam obrázků	80
Seznam tabulek	82
Seznam příloh.....	83
Příloha	87

Použité symboly a zkratky

Označení	Jednotka	Legenda
A5	[%]	Tažnost
Ac ₁	[°C]	Teplota eutektoidní přeměny
Ac ₃	[°C]	Teplota transformace austenitu na ferit
Cr _E	[-]	Ekvivalent chromu
I	[A]	Elektrický proud
I _A	[A]	Průměrný elektrický proud
I _P	[A]	Pulzní proud
I _Z	[A]	Základní proud
IPM	[in/min]	Inch per minute - palce za minutu
KCU 2	[J/cm ²]	Vrubová houževnatost
Ni _e	[-]	Ekvivalent niklu
Q _v	[kJ/mm]	Vnesené teplo
t _c	[s]	Doba cyklu pulzního svařování
t _p	[s]	Doba působení pulzního proudu
t _z	[s]	Doba působení základního proudu
R _m	[Mpa]	Mez pevnosti
R _{p0,2}	[Mpa]	Smluvní mez kluzu při plastické deformaci 0,2 %
U	[V]	Napětí
V _d	[mm/min]	Rychlost přísunu přidavného drátu
V _{oh}	[mm/min]	Rychlost otáčení svařovací hlavy
Z	[%]	Kontrakce
η	[-]	Koeficient účinnosti svařování
AISI		American Iron and Steel Institute -americká norma
AVC		Arc voltage control
BWR		Boiling water reactor - varný reaktor
ČSN		Česká státní norma
DCEN		Direct Current Electrode Negative
DCEP		Direct Current Electrode Positive
EN		Evropská norma
ES		Energoservis
GOST		Ruský standart
ISO		Mezinárodní organizace pro standardizaci
JET		Jaderná elektrárna Temelín

KPN	Koroze pod napětím
MKK	Mezikrystalová koroze
NCK	Národní centrum kompetence
NDT	Nedestruktivní testování
PA	Poloha svařování vodorovná shora
PB	Poloha svařování vodorovná šikmo shora
PC	Poloha svařování vodorovná
PD	Poloha svařování vodorovná šikmo nad hlavou
PE	Poloha svařování vodorovná nad hlavou
PF	Poloha svislá nahoru
PG	Poloha svislá dolů
PK	Poloha orbitálního svařování
PM	Přídavný materiál
PWR	Pressurized water reactor - tlakovodní reaktor
RT	Radiography testing (prozařovací zkouška)
SK	Svarový kov
SSRT	Slow strain rate test - zkouška korozního praskání
TIG/WIG/GTA	Svařování netavící se wolframovou elektrodou v inertním plynu
W	
TOO	Tepelně ovlivněná oblast
UT	Ultrasonic testing - ultrazvuková zkouška
UV	Ultrafialové záření
VT	Visual testing -vizuální zkouška
ZM	Základní materiál
α	Alfa ferit
γ	Austenit
δ	Delta ferit
\emptyset	Označení rozměru - průměr

Úvod

Svařování patří mezi technologie používané mimo jiné i ke spojování částí potrubních systémů v různých odvětvích. Během provozu může docházet ke změnám provozních podmínek, např. změně teploty rozváděného média. Pro různé provozní podmínky je výhodnější použití odlišných materiálů, které je potřeba spojit. Svarové spoje vytvořené z odlišných základních materiálů i přídavných materiálů nazýváme heterogenní spoje. Takovýto typ spoje se používá i v sekundárním okruhu jaderné elektrárny Temelín (JET). Konkrétně se jedná o spoj nátrubku k parogenerátoru mezi uhlíkovou ocelí 22K a tvarovkou z austenitické korozivzdorné oceli stabilizované titanem 08CH18N10T.

Svařováním se obecně znehodnocuje materiál v blízkém okolí spoje a svary jsou tak kritickými místy konstrukcí. Z toho důvodu musejí být svary v prostředí jaderné elektrárny zhotoveny podle předem schválených a vyzkoušených postupů a jsou následně v určitých intervalech kontrolovány nedestruktivními metodami. I přes tato opatření však došlo na JET k selhání svarového spoje dříve, než byla předpokládána jeho životnost [1]. V důsledku vytvoření trhlinky ve zmíněném svarovém spoji došlo k úniku provozního média. Na základě této události byly provedeny analýzy zmíněného heterogenního spoje na více výzkumných pracovištích v České republice. Výsledkem analýz byl závěr, že k tvorbě trhliny došlo mechanismem korozního praskání pod napětím. Jednou z příčin nižší životnosti bylo shledáno nedodržení nízkého limitu vneseného tepla a vnesení svarových vad během ručního svařování [2]. V rámci projektu Národní centrum kompetence (NCK) se skupina výzkumných pracovišť a firem zabývá zlepšením vlastností zmíněného heterogenního spoje a navýšením odolnosti vůči korozi pod napětím.

Alternativou k ručnímu svařování je svařování automatické. Tímto způsobem lze díky předem nastaveným parametrům svařovacího programu dodržet limity vneseného tepla. Automatizovaným svařováním lze zároveň při odladěném svařovacím procesu zamezit vzniku chyb způsobených lidským faktorem. Mezi automatizované způsoby svařování patří laserové a orbitální svařování. Orbitální svařování bylo vyvinuto pro spojování trubek nebo trubek k trubkovicím. Metody orbitálního svařování jsou blíže popsány v teoretické části této práce, rovněž je zde provedeno i srovnání orbitálního a laserového svařování. V praktické části je realizování odladění procesu orbitálního svařování.

Během svařování heterogenních spojů dochází k promísení základních materiálů (ZM) se svarovým kovem (SK). Na promísení má vliv použitá technologie svařování, tvar úkosu, ale i množství vneseného tepla. Vnesené teplo zároveň ovlivňuje šířku oduhličeného pásma a šířku navazujícího přechodového pásma, které vznikají na straně uhlíkové oceli v blízkosti linie ztavení. V přechodovém pásmu vznikají křehké karbidy, které snižují houževnatost spoje. U původního svarového spoje používaného na JET, se používá úkos tvaru U, který oproti úkosu tvaru V zajišťuje menší promísení ZM. Použitím úkosu tvaru V se dá předpokládat větší promísení a v důsledku toho odlišné nalegování kořenové oblasti svaru [8].

K ověření této myšlenky bylo zapotřebí odladit proces svařování tak, aby výsledné svary s úkosem typu V vyhovely nedestruktivním zkouškám.

Praktická část této práce se zabývá nastavením svařovacího programu pro orbitální svařování heterogenního spoje trubek s průměrem 57 mm, tloušťkou stěny 2,9 mm s úkosem tvaru U a V. Vytvořené svarové spoje byly podrobeny nedestruktivnímu testování (NDT), konkrétně proběhla zkouška vizuální, ultrazvuková a radiografická. K odhalení povrchových vad posloužila zkouška vizuální. Pro odhalení objemových vad proběhla zkouška radiografická a ultrazvuková. U vzorků, které prošly NDT, bylo vypočteno vnesené teplo na základě parametrů programu, podle kterého byly svařeny. Dále proběhlo metalografické hodnocení vybraného vzorku, během kterého byla navržena metodika měření průběhu mikrotvrdosti v TOO uhlíkové oceli a přechodové oblasti do SK na straně uhlíkové oceli. Ke srovnání orbitálního svařování a svařování laserem byl z metalografického hlediska a z hlediska průběhu tvrdosti hodnocen i vzorek svařený laserem.

1 Svařování heterogenních spojů

V odlišných výrobních procesech pracují součásti za různých pracovních podmínek. To vyžaduje použití slitin s různým chemickým složením, jejichž spojením vznikají takzvané heterogenní spoje. Svařováním ocelí odlišného chemického složení a strukturních fází (austenit-ferit) dochází vždy k znehodnocení jednoho, či obou materiálů. V přechodech materiálů vznikají natavené „fúzní“ zóny a dochází k promíšení materiálů. V těchto zónách se liší chemické složení a snižují se mechanické, termodynamické a chemické vlastnosti. Během tepelného zpracování a během pracovního zatížení při teplotách vyšších než 350 °C probíhají mezi základním materiálem a svarovým kovem významné difúzní pochody. Difunduje hlavně uhlík, díky čemuž dochází k vytváření oduhličených a nauhličených pásem s degradovanými vlastnostmi. To vede k nižší životnosti, spolehlivosti, a tudíž i bezpečnosti svaru [8,17].

Během svařování je důležité kontrolovat složení svarového kovu. Svarový kov se skládá z odlišných základních materiálů a přídatného materiálu. Složení svarového kovu je možno odhadnout, například Shäfflerovým diagramem. Předpověď výsledného složení svarového kovu může snížit riziko vzniku defektů ve svaru jako je vznik trhlin za horka nebo vznik křehkých σ -fází. Jako přídatný materiál se běžně používá vysoce legovaná austenitická ocel s relativně velkým množstvím feritu. V případě, že by výsledné svary měly být vystaveny vysokým teplotám nebo teplotním cyklům, se jako přídatný materiál obvykle používají niklové slitiny [16].

Při svařování heterogenních spojů se objevují typické problémy způsobené strukturními změnami. Dochází ke změně poměru promíšení základních materiálů ovlivněných podmínkami svařování. Jestliže narůstá promíšení mezi základními materiály a přídatným materiálem, snižuje se obsah feritu. To platí v případě svařování nízkolegované nebo uhlíkové oceli s ocelí korozivzdornou při použití vysocelegovaného austenitického přídatného materiálu. S narůstajícím podílem korozivzdorné oceli rozpuštěné ve svarovém kovu může dojít k tomu, že výsledná struktura bude plně austenitická a hrozí nebezpečí vzniku trhlin za horka. Zároveň může docházet k promíšení mezi uhlíkovou nebo nízkolegovanou ocelí s přídatným materiálem. V tomto případě se s větším promíšením tvoří martenzitická

struktura, která je tvrdá a křehká. Příliš velký obsah feritu ve struktuře vede ke vzniku sigma fází. Sigma fáze je velmi křehká, a proto by součásti, které pracují za vysokých teplot, měly mít co nejnižší obsah feritu [16].

Složení svarového kovu není ve svaru stejnoměrné, zvláště u vícevrstvého svařování. Gradient ve složení svarového kovu narůstá v blízkosti základních materiálů. Proces tuhnutí svaru je ovlivněn právě gradientem ve složení a promíšením. Oba vlivy jsou důležité z hlediska nebezpečí vzniku trhlin za horka. Při návrhu heterogenního svaru je potřeba vzít v úvahu výsledný svarový kov a jeho mechanické vlastnosti [16].

Faktory, které vedou k selhání heterogenních svarových spojů při obloukovém svařování, jsou [8]:

- vznik křehkých fází a omezená vzájemná rozpustnost materiálů,
- vysoký rozdíl teploty tavení spojovaných materiálů,
- rozdíly v koeficientu teplotní roztažnosti,
- rozdíl v tepelné vodivosti.

U tavných metod svařování je velice důležité znát fázové diagramy spojovaných materiálů. Spoj se bez problémů vytvoří za předpokladu vzájemné neomezené rozpustnosti. V případě, že tomu tak není, se vytváří intermetalické fáze. Tato intermetalika pak musí být zkoumána z hlediska tvárnosti, vlivu na tvorbu trhlin či odolnosti vůči korozi. Mikrostruktura těchto intermetalik je velmi důležitá. K vytvoření požadovaného svarového spoje je v některých případech nutné použít třetí kov, a to takový, který je rozpustný s oběma původními kovy. Při svařování heterogenních spojů musí přídatný materiál legovat svarový kov tak, aby se vytvořila kontinuální tvárná fáze. Konkrétně přídatný materiál by měl být schopen se promístit se základním materiálem bez tvorby mikrostruktury náchylné na tvorbu trhlin[8].

Dalším faktorem, který může ovlivnit kvalitu svaru, je rozdílná teplota tavení spojovaných materiálů. Zvláště při použití tavných metod se do svaru vnáší značné množství tepla a může docházet k roztavení jednoho z materiálů mnohem dříve než k roztavení toho dalšího. Velký rozdíl v teplotě tavení základních materiálů nebo svarového kovu a základního materiálu může vést k prasknutí materiálu s nižší teplotou tavení. Tuhnutí a smrštění kovu s vyšší teplotou tavení mohou vnést napětí do nepevného, částečně ztuhlého materiálu s nižší teplotou tání. Tento problém se dá řešit tzv. „polštářovým návarem“. Polštář z materiálu o teplotě někde mezi teplotou tavení předchozích kovů se navaří na povrch materiálu s vyšší teplotou tavení. Požadovaný spoj se pak vytváří mezi polštářovým návarem a zbylým základním materiálem. Polštář se také používá jako přechod ve spoji mezi dvěma materiály s rozdílnými koeficienty tepelné roztažnosti. Spoj tak může vydržet cyklické teplotní namáhání. Polštářový návar může sloužit i jako difúzní bariéra zpomalující přesun nežádoucích prvků ze základního materiálu do svarového kovu za zvýšených teplot během provozu nebo případného tepelného zpracování.

Většina kovů má dobrou tepelnou vodivost, ovšem některé vedou teplo o něco lépe. Rychlý odvod tepla ze svarové lázně způsobený přiléhajícími základními materiály může ovlivnit energii potřebnou k lokálnímu natavení základního materiálu. Často je zdroj tepla nasměrován více ke kovu s vyšší tepelnou vodivostí, aby došlo k optimálnímu rozložení tepla. Při svařování heterogenních spojů se může přehřívat materiál s větší tepelnou vodivostí k zamezení tepelných ztrát do základního materiálu. Díky přehřevu je i více vyvážené promísení materiálů.

Přehřevem materiálu s vyšší tepelnou vodivostí se zároveň sníží ochlazovací rychlost svarového kovu a teplotně ovlivněné oblasti (TOO) [8].

Dalším důležitým faktorem je rozdílnost v tepelném koeficientu základních materiálů. Příliš velké rozdíly mohou vyvolat tahová napětí v jednom kovu a tlaková napětí v tom druhém. V materiálu s tahovými napětími se pak mohou tvořit trhliny za horka během svařování nebo během provozu, pokud není napětí teplotně nebo mechanicky uvolněno. Tento jev je důležitý obzvláště u spojů pracujících za zvýšených teplot s cyklickým teplotním zatížením. Typickým příkladem je spoj trubek austenit/ferit používaný v elektrárnách. Hodnota koeficientu tepelné roztažnosti svarového kovu by se měla ideálně pohybovat v rozmezí hodnot, které mají základní materiály [8].

Ve svarovém kovu narůstá gradient chemického složení zvláště u základních materiálů. V případě nasazení svaru do pracovního prostředí s vyššími teplotami dochází k vzájemné difúzi základních materiálů a svarového kovu. To vede ke změnám mikrostruktury. Stane se to například při použití austenitického přídavného materiálu. Díky vyšší afinitě chromu k uhlíku difunduje uhlík ze základního materiálu do svarového kovu při teplotách vyšších než 425 °C. K difúzi uhlíku dochází při provozu za vyšších teplot nebo při tepelném zpracování po svařování.

Austenit v sobě rozpouští více uhlíku než ferit. Z toho důvodu dochází k většímu vyčerpání uhlíku (tzv. oduhličení) z nízkolegované oceli při použití austenitického přídavného materiálu. V případě použití Ni-Cr přídavného materiálu tento problém není tak závažný. Při difúzi uhlíku se dají pozorovat na metalografických snímcích světlé naleptané oduhličené pruhy s tmavými nauhličenými pruhy v TOO nízkolegované oceli. Rozsah difúze uhlíku by měl být určen během kvalifikace svařovacího postupu. Ovlivňuje totiž únavovou odolnost za vyšších teplot. Během pracovního zatížení při cyklicky měnících se teplotách odolává TOO proměnlivým smykovým napětím v důsledku rozdílných teplotních koeficientů základních materiálů a svarového kovu. Tato napětí mohou způsobit únavové porušení v oduhličených oblastech [8].

Často se stává, že heterogenní spoj selže dříve, než se odhadovalo. Většina těchto selhání u spojení austenitické a nízkolegované nebo uhlíkové oceli souvisí s TOO na straně přechodu s nízkolegovanou ocelí. Selhání jsou způsobena následujícími příčinami [8]:

- vysokým napětím na rozhraní způsobující creep jako výsledek rozdílných koeficientů teplotní roztažnosti,
- difúzí uhlíku z feritické oceli do nerezové oceli, čímž se oslabuje TOO feritické oceli,
- přednostní oxidace na rozhraní urychlenou přítomným napětím.

Základní materiál a svarový kov mají odlišnou odolnost vůči korozi. Může dojít k vytvoření galvanického článku, čímž se spustí koroze většiny anodického kovu nebo anodické fáze ve svaru. Koroze na úrovni mikrostruktury se objevuje tam, kde je více fází. Aby se předešlo galvanické korozi, může se změnit složení svarového kovu k vytvoření katodické ochrany kovu méně odolného korozi. Katodická ochrana se dá použít v případě, že nedojde k ohrožení mechanických vlastností heterogenního svaru.

1.2 Svařování korozivzdorné oceli s uhlíkovou/nízkolegovanou ocelí

Spoje vytvořené z austenitu a nízkolegované nebo uhlíkové oceli se používají v provozech, kde teploty nepřesahují 370 °C. Jako přídavný materiál se běžně používá korozivzdorná ocel s tak vysokým obsahem legujících prvků, který brání tvorbě martenzitické struktury po promíšení se základním materiálem. Důležité je, aby legující prvky zajistily i nepatrné množství feritu (2 až 6 %) kvůli odolnosti vůči tvorbě trhlin za horka.

U těchto heterogenních spojů se hořák lehce natačí více směrem ke korozivzdorné oceli.

Jak už bylo zmíněno, je důležité kontrolovat promíšení svarového kovu. To se měří procentuálním obsahem základního materiálu nebo předešlého návaru ve svarovém kovu.

Důležité je také správně nastavit teplotu interpass, tzn. teplotu již vytvořené svarové housenky před zakrytím následující vrstvou. Běžně se teplota interpass u heterogenních spojů pohybuje okolo 150 °C [8,16].

Při výběru vhodného přídavného materiálu se musí dbát na to, aby byl vybraný materiál kompatibilní se základními materiály při minimálním promíšení. K odhadu výsledné struktury a výběru správného přídavného materiálu se využívá Schäßlerův diagram.

2 Austenitické Cr-Ni oceli

Austenitické oceli se vyznačují zhruba až o 50 % větší tepelnou roztažností a o 30 % nižší tepelnou vodivostí oproti feritickým ocelím. Pro porovnání jsou v tabulce 1 uvedeny hodnoty uhlíkové oceli S355 a austenitické Cr-Ni oceli Wr.N. 1.4541. Rozdíl v uvedených hodnotách má za následek větší deformace a napětí. Austenitická struktura má lepší tažnost a houževnatost ve srovnání se strukturami uhlíkových a nízkolegovaných ocelí. U hodnocení svařitelnosti je nutné zohlednit následující vlivy [17]:

- Náchylnost k tvorbě trhlin za horka,
- precipitaci karbidů a nitridů chrómu,
- křehnutí vznikem σ -fáze.

Typ oceli	Tepelná roztažnost 20 až 100 [°C]	Tepelná vodivost [W/m°C]
Austenitická Wr.N. 1.4541	16	15
Uhlíková S355	12	53

Tabulka 1: Porovnání tepelné roztažnosti a tepelné vodivosti mezi uhlíkovou a austenitickou Cr-Ni ocelí [52].

Trhliny za horka mohou vznikat ve svarovém kovu i v TOO podle toho, o jaký druh se jedná. Rozlišují se teplé krystalizační, likvační a polygonizační trhliny. Krystalizační trhliny vznikají ve svarovém kovu, likvační a polygonizační mohou vznikat v TOO i svarovém kovu. Během tuhnutí vytvářejí prvky S, P, Si, Ti, Nb nízkotavitelná eutektika. Tato eutektika během tuhnutí mohou zatuhnout v ose svaru a jsou důvodem snížení pevnosti hranice zrn, kde může

dojít k mikroporušením. Tyto defekty se pak mohou šířit dalšími degradačními procesy během provozu.

Nejčastějším případem vzniku krystalizační trhliny je přítomnost síry ve svarovém kovu. Síra vytváří nízkotavitelné sulfidy a eutektika. V důsledku segregace mohou zůstat ve svarovém kovu zbytky taveniny i pod teplotou solidu matrice.

Obsahem δ -feritu lze snížit náchylnost k tvorbě trhlin za horka. Ve svarových kovech se za žádoucí obsah při teplotě okolí považuje 2 až 6 % δ -feritu a okolo 3 % v základním materiálu. Vyšší obsah snižuje korozní odolnost oceli a podporuje vznik σ -fáze. Ferit δ má z hlediska snížení tvorby trhlin za horka pozitivní vliv, protože[21]:

- δ -ferit má vyšší tvárnost za vysoké teploty a přispívá k snazšímu přizpůsobení svarového kovu pnutí, která by jinak vedla ke vzniku trhlin,
- rozpustnost některých prvků jako např. Si, P ve feritu je větší než v austenitu a dá se tak vyhnout vzniku nízkotavitelných, křehkých fází.

2.1 Svařitelnost austenitických Cr-Ni ocelí

Tyto austenitické jsou oceli svařovány PM se stejným či podobným chemickým složením tak, aby výsledný svarový kov měl mechanické a fyzikální vlastnosti co nejvíce podobné základnímu materiálu. Mikrostruktura svarového kovu austenitických ocelí se liší od základního materiálu. Ve svarovém kovu plně austenitického materiálu se objevuje menší množství feritu. Ve struktuře svarového kovu se mohou objevit i malé oblasti martenzitu a karbidů, především v případě použití přídavných materiálů stabilizovaných Nb a Ti. Malé množství δ -feritu (2 až 6 %) je žádoucí, protože potlačuje vznik trhlin za horka. Tyto ocele nejsou náchylné k tvorbě trhlin za studena díky vysoké rozpustnosti vodíku v austenitu. Navíc se nedají zakalit, a proto se svařují bez předehřevu. Předehřevem by se mohla snížit korozní odolnost spoje. Kvůli náchylnosti k tvorbě trhlin za horka by měl být tepelný příkon maximálně 15 kJ/cm a teplota interpass maximálně 150 °C. Snížení příkonu zároveň snižuje riziko růstu zrn v přehřátém pásmu TOO [17,21].

Svarové spoje austenitických korozivzdorných ocelí se většinou tepelně nezpracovávají. Korozní odolnost je ovlivňována obsahem stabilizačních prvků, jako jsou Ti a Nb (jejich obsah je závislý na obsahu uhlíku). Pravidlem je, aby svarový kov obsahoval stejné množství prvků podporující korozní odolnost, jako základní materiál. Přídavné materiály mají proto určitý přebytek těchto legur ke kompenzaci segregace a možnému vyhoření. Například Ti díky své vysoké afinitě ke kyslíku více vyhořívá. Mikrostruktura svarového spoje nebo TOO je citlivá na mezikrystalovou korozi při delším setrvání v oblasti teplot mezi 425 až 815 °C. Na hranicích zrn mohou precipitovat karbidy chromu Cr_{23}C_6 . Precipitací dochází k ochuzení hranic zrn o Cr. Navíc s působením elektropozitivního účinku karbidů může nastat mezikrystalová koroze.

3 Degradace svarového spoje

Degradace oceli nastává v důsledku změny fyzikálních, mechanických, antikoročních nebo jiných vlastností materiálu. Odolnost degradaci, jinak strukturní stálost, je vlastnost materiálu nepodléhat účinku okolních vlivů jako teplotě, tlaku, koroznímu prostředí či radiaci. V provozu může dojít k takové změně struktury, že součást není dále schopna odolávat vnějším vlivům a zatížení. V takovém případě dojde k vyčerpání životnosti a lomu.

Strukturní stálost ocelí závisí především na difúzních procesech, které probíhají ve svarovém spoji při svařování a dále i při provozu součásti. Nejvýraznější je difúze intersticiálních prvků, obzvláště uhlíku, v menší míře potom dusíku a vodíku.

U heterogenních spojů patří mezi hlavní příčiny degradace právě difúze intersticiálních prvků, především uhlíku. V důsledku difúze uhlíku vznikají oduhličené a nauhličené oblasti a makroheterogenity. Do odpevněných oduhličených zón se potom soustředí plastické deformace při cyklických změnách zatížení a teploty. V těchto oblastech může dojít k vyčerpání plasticity a vzniku trhlin. U oceli 08Ch18N10T dochází k tvorbě karbidu titanu TiC z důvodu stabilizace oceli titanem.

U svarového spoje nátrubku parogenerátoru složeného z oceli P265GH a 08Ch18N10T hrozí zároveň korozní napadení. V blízkosti přechodu uhlíkové oceli se svarovým kovem hrozí koroze pod napětím. Na straně nerezové austenitické oceli pak může hrozit mezikrystalová koroze [36].

3.1 Koroze pod napětím

Prokázaným degradačním jevem u heterogenních spojů pracujících pod zatížením v korozním prostředí je korozní praskání pod napětím KPN na straně uhlíkové oceli. U zkoumaného svarového spoje je z hlediska KPN kritické spojení na straně uhlíkové oceli P265GH. Vznik KPN je ovlivněn třemi faktory (obrázek 1) [16, 32]:

- náchylností materiálu ke KPN,
- korozním prostředím,
- tahovými napětími.



Obrázek 1: Spolupůsobící faktory vyvolávající KPN [16].

Heterogenní svarový spoj nátrubku parogenerátoru je materiálově a strukturně nehomogenní. Mezi uhlíkovým ZM a svarovým kovem vzniká přechodová zóna s komplikovanou mikrostrukturou a měnícím se chemickým složením. Zároveň na spoj působí měnící se pracovní zatížení spolu s teplotně vyvolanými napětími v důsledku rozdílné teplotní vodivosti a teplotní roztažnosti austenitické a feriticko-perlitické oceli. Austenitické oceli mají tepelnou roztažnost až o 50 % větší a naopak tepelnou vodivost o 30 % nižší. Spoj je navíc vystaven koroznímu prostředí díky pracovnímu médiu [17,36].

V případě působení uvedených vlivů mohou být i zbytková napětí po svařování dostatečně velká k vyvolání KPN. Vyvolání KPN mohou způsobit i různé koncentrátoři napětí vnesené technologií, mikrotrhlinami vzniklými cyklickým zatížením nebo korozními důlky [16,36]. KPN se zároveň rozvíjí rychleji s rostoucí teplotou.

Autor [14] uvádí, že ve Švédsku probíhá materiálový výzkum ohledně heterogenních svarů používaných v jaderné elektrárně Oskarshamn s reaktorem typu BWR. Konkrétně se zabývají i mezikrystalovou korozi pod napětím. Svarový kov tvořený austenitickým PM OK AUTROD 308Lsi, byl podroben zkoumání z hlediska obsahu δ -feritu pod 5 % a jeho vlivu na náchylnost spoje ke KPN. První výsledky ukazují, že se snižujícím se obsahem δ -feritu se zvyšuje rychlost šíření trhlin. Zároveň výsledky ukazují na větší náchylnost vzorků k iniciaci trhlin, jestliže klesá obsah δ -feritu. Závěr je takový, že běžně je požadován obsah δ -feritu nad 2 %, ale autor doporučuje obsah nad 5 %.

Problém KPN byl zkoumán i na primárním okruhu elektrárny s reaktorem typu PWR při teplotě vody 292 °C. Svarový spoj složený z nízkolegované oceli A508 a austenitické oceli AISI 309L byl také testován z hlediska náchylnosti ke KPN testem SSRT (slow strain rate test). Ke koroznímu praskání docházelo v přechodovém pásmu na straně nízkolegované oceli. Náchylnost ke KPN přechodové zóny je ovlivněna mikrostrukturou, chemickým složením a nerovnoměrným rozdělením napětí a deformací ve svaru během SSRT.

Na straně austenitického ZM v přechodové zóně může dojít ke snížení obsahu chrómu a niklu. Zároveň může být snížen obsah δ -feritu. Tyto faktory vedou ke KPN. Snížení obsahu chrómu může vést ke ztrátě ochranné protikorozní vrstvy. Nižší obsah niklu znamená nižší houževnatost. Při absenci δ -feritu může dojít k mezikrystalové korozi MKK na straně austenitického materiálu. MKK může být tedy způsobena v austenitu v pásmu zcitlivění, kdy dojde k ochuzení zrn o chróm, který se rozpustí v matici. Komplikovaná mikrostruktura a skoková změna chemického složení navyšují elektrochemický rozdíl rozhraní [37].

4 Vliv geometrie svarových ploch na svar

K zajištění bezchybného spojení ZM a SK je potřeba upravit na spojovaných dílech svarové plochy – vytvořit úkosy. Vytvořené úkosy po slícování dílu vytvářejí drážky. U návrhu tupého svaru musí být zohledněny teploty tání a efekt promísení. Velké drážky snižují promísení, umožňují lepší kontrolu viskózního svarového kovu a vytváří prostor pro manipulaci s obloukem. Tvar úkosu by měl umožňovat vhodné promísení v prvních housenkách při svařování z jedné strany. Nesprávné promísení by mohlo vést k nevyhovujícím mechanickým vlastnostem. Úkosy heterogenních svarů bývají stejné jako u homogenních spojů. Svary jsou často ponechány ve stavu, v jakém byly po svařování. Mohou

se však odstranit přebytečná převýšení kořene svaru, čímž se odstraní případné defekty v kořeni. Navíc se tím eliminují vruby a štěrby. Odstranění kořene navíc přispívá proveditelnosti nedestruktivních zkoušek, jako jsou radiografie, penetrační zkouška a ultrazvuková inspekce. Stejně lze odstranit i převýšení koruny svaru. Výhody jsou stejné [8].

Kolektiv autorů [31] uvádí, že rovnováha svarové lázně je dána povrchovými silami svarové lázně ve vztahu k oblouku na hranici tavenina-plyn, hydrodynamickým tlakem lázně (včetně hmotnosti lázně) a tlakem oblouku. Poměr těchto sil určuje, zda bude kořen konkávní nebo konvexní. Šířkou úkosu lze ovlivnit kontrolu povrchového napětí lázně na rozhraní kov-plyn. Tloušťka otupení určuje hmotnost lázně udržovanou silou povrchového napětí na povrchu kořene a určuje požadovanou konvexnost svaru v poloze PA a PF. Šířka úkosu a tloušťka otupení také ovlivňují možnost kontroly vnějšího povrchu svarové lázně a dále kontrolu formování kořene spoje v pozici PE. Díky smáčivosti svarové lázně s povrchem úkosu a hmotnosti svarové lázně se snižuje konkávnost spoje v poloze PG při specifické šířce úkosu a zároveň se tím eliminuje pokles svarové lázně. K vytvoření povrchu kořene se u metody WIG může nebo nemusí použít přídavný materiál. Důležité je věnovat pozornost povrchu po obvodu kořenové vrstvy. Nesmí se vytvořit konvexní povrch, protože při kladení dalších vrstev by se mohly objevit studené spoje.

Díky lokálně vnesenému teplu a následnému rychlému ochlazení vzniká v okolí svarů zbytkové napětí nebo deformace. Zbytkové napětí má negativní vliv na mechanické vlastnosti svaru (např. odolnost křehkému lomu), únavovou odolnost KPN. Je prokázáno, že heterogenní svarové spoje selhávají dříve, než je odhadovaná doba provozu. U většiny spojů austenit/ferit dochází k porušení v TOO feritické oceli. Dále je prokázáno, že zbytkové napětí je jedním z hlavních důvodů poruchy svarů v TOO během provozu. Procesní parametry, jako typ svařovací metody, rychlost svařování, napětí a proud, mají vliv na zbytková napětí. Dále jsou zbytková napětí ovlivňována i tvarem úkosu, úhlem rozevření úkosu, kořenovou mezerou nebo svařovanou tloušťkou. V dnešní době je prosazováno předpovídat zbytková napětí a tepelné cykly za pomoci simulace a navrhnout tak optimální svar. Simulace jsou však velmi složité s ohledem na změnu mechanických vlastností v rámci svaru. Spojované materiály (austenit/ferit) mají navíc odlišné koeficienty tepelné roztažnosti a spolu s fázovými transformacemi také ztěžují predikci napětí. Rozdíl v koeficientu tepelné roztažnosti způsobuje asymetrické rozdělení zbytkových napětí [32].

Akbari [32] se zabýval simulací a ověřováním její platnosti při svařování heterogenního spoje trubek. Zkoumal vliv úhlu otevření úkosu typu V a vliv velikosti kořenové mezery na zbytková napětí při zachování konstantních podmínek svařování. Z výsledků došel k závěru, že obě proměnné nemají výrazný vliv na zbytková napětí v axiálním směru trubky jak na vnějším tak na vnitřním povrchu. Zvětšení úhlu úkosu a kořenové mezery vedlo k vyšším tlakovým axiálním napětím na vnitřním povrchu a k vyšším tahovým napětím na vnějším povrchu pouze na straně uhlíkové oceli.

Během svařování heterogenních spojů se objevují problémy spojené s difúzí uhlíku, promíšením legur, slabými metalurgickými spojeními, vysokými zbytkovými napětími a praskáním. Obecně je známo, že zbytková napětí výrazně snižují odolnost proti lomu a únavě. Autor [33] porovnával vliv úkosu na teplotní historii, zbytková napětí a deformace. Byla

provedena numerická simulace v SW Sysweld, která byla dále ověřena experimentálně. Podle autora má geometrie úkosu významný vliv na zbytková napětí a deformace. Jako nejvhodnější z hlediska prevence koroze pod napětím shledává úkos X a K. Jedná se však o studii svařování desek.

Další autor [34] také zkoumal vliv úhlu otevření úkosu V při jinak konstantních podmínkách svařování korozivzdorné oceli AISI 304L a uhlíkové oceli AISI 1040. Byly zkoušeny úhly 30°, 45°, 60° a dva druhy PM. Ke svaření těchto materiálů byla použita metoda WIG a svařovací proud 120 A. Svary byly podrobeny zkoušce tahem. Při zkoušce došlo k přetržení ve svarovém kovu, což bylo zapříčiněno přítomností karbidických precipitátů v blízkosti svarového kovu a TOO. S větším úhlem úkosu narůstaly nepatrně zkoumané mechanické vlastnosti, konkrétně mez pevnosti, mez kluzu, tažnost a kontrakce. Tažnost je důležitým ukazatelem tvárnosti svaru. PM s větším obsahem uhlíku tvořil spoje s nižšími mechanickými hodnotami, protože dochází ve větší míře k precipitaci karbidů u nerezové oceli. Z pozorování makrostruktury došel autor k závěru, že největší TOO vykazoval svar s nejmenším úhlem otevření úkosu. V tomto případě totiž menší plocha snižuje přestup tepla.

Abbass a kolektiv [35] se zabývali vlivem úhlu V úkosu na korozní odolnost nízkouhlíkové oceli při svaření austenitickým přídavným materiálem. Pro svařování 5mm platů použili metodu WIG a zkoumali vliv zvětšujícího se úhlu úkosu s otupením 2 mm. Během svařování byla konstantní kořenová mezera 1 mm a konstantní svařovací parametry. Při stejném vneseném teple roste se zvyšujícím se úhlem úkosu 30°, 45°, 60° obsah přídavného materiálu a teplo je do základního materiálu odváděno větší plochou. Díky tomu roste rychlost ochlazování postupně směrem ze svarového kovu do TOO a základního materiálu. Bylo vypořádáno, že s větším úhlem úkosu bylo dosaženo jemnější struktury v TOO a svarovém kovu.

Autor uvádí, že se korozní chování svaru odvíjí od mikrostrukturní heterogenity. Při svařování metodou WIG se mikrostruktura mění od hrubé lící struktury ve svarovém kovu po jemně rekrytalizovanou strukturu s TOO až do tvářené struktury základního materiálu. Se zvyšující se hodnotou úhlu úkosu však rostla rychlost elektrochemické koroze díky zvětšujícímu se množství přídavného materiálu.

Vedle toho byla zjištěna dobrá svařitelnost nízkouhlíkové oceli s austenitickým PM E316L [35].

5 Obloukové svařování

Svařováním kovů a jejich slitin dochází k vytvoření nerozebíratelného spojení za využití tepelné, mechanické či radiační energie. Spoj vznikne působením meziatomových sil a adhezivních vazeb na plochách aktivovaných teplem nebo tlakem. Pro většinu tavných metod svařování se jako zdroj tepla využívá elektrického oblouku [3].

Elektrický oblouk je označení pro elektrický výboj válcového tvaru soustředěného do tenkého sloupce. U elektrického oblouku se rozlišuje jádro a obal. Jádro sloupce tvoří ionizovaný plyn - plazma. Teplota jádra dosahuje hodnot až 16 000 K a teplota obalu se pohybuje okolo 7000 K [4]. Elektrický oblouk vhodný ke svařování je nízkonapěťový elektrický vysokotlaký

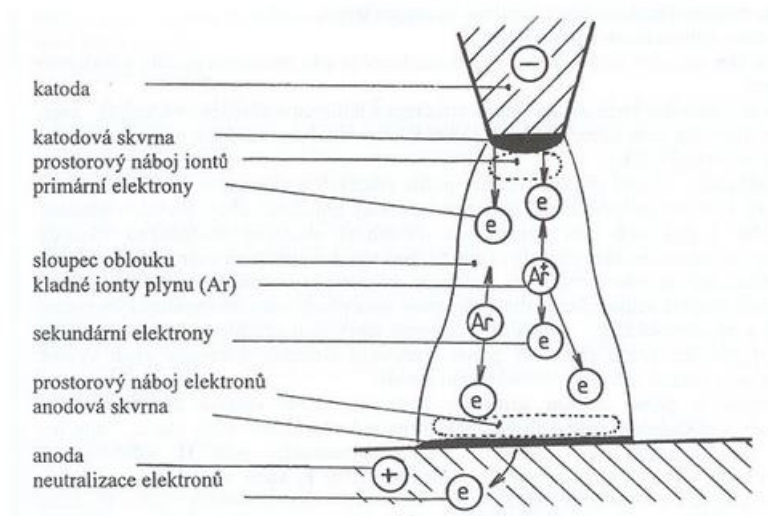
výboj. Každý oblouk je brán v elektrickém obvodu jako odpor, závisící na parametrech výboje [5]. Charakteristické znaky elektrického oblouku jsou uvedeny v tabulce 2.

Charakteristické znaky oblouku
malý potenciální rozdíl na elektrodách
proud v řádech ampérů až 10^3 ampér
velká proudová hustota katodové skvrny
intenzivní světelné záření elektrod i oblouku
intenzivní vyzařování UV záření

Tabulka 2: Charakteristické znaky oblouku [4].

V tabulce 1 jsou uvedeny charakteristické znaky oblouku. Stabilně hořící oblouk je podmíněn dostatečným napětím a proudem k udržení ionizace prostředí. Hoření oblouku je ovlivněno následujícími vlivy:

- chemickým složením plazmatu, materiálem elektrod, částečně i okolní atmosférou,
- tvarem a geometrickým uspořádáním elektrod,
- tepelnou vodivostí základního materiálu, elektrody a plazmatu.



Obrázek 2: Jednotlivé části oblouku [4].

5.2 Tepelný příkon a tepelně ovlivněná oblast (TOO)

Při procesu je intenzivní zdroj tepla soustředěn do malého objemu materiálu, čímž dochází k rychlému ohřevu materiálu. Lokálně dochází k natavení určitého objemu materiálu a díky tepelné vodivosti se zahřívá blízké okolí svarové lázně. Změny v teplotách způsobují fázové i strukturní změny doprovázené změnami objemu a tím vytvoření vnitřních napětí a deformací. Rozsah změn se odvíjí od typu základního materiálu, technologie svařování a množství vneseného tepla na jednotku délky. Vnesené teplo na jednotku délky svaru se vyjadřuje měrným tepelným příkonem svařování Q_v (1) [17]:

$$(1) Q_v = \eta \cdot \frac{U \cdot I}{10^3 \cdot v} [kJ/mm],$$

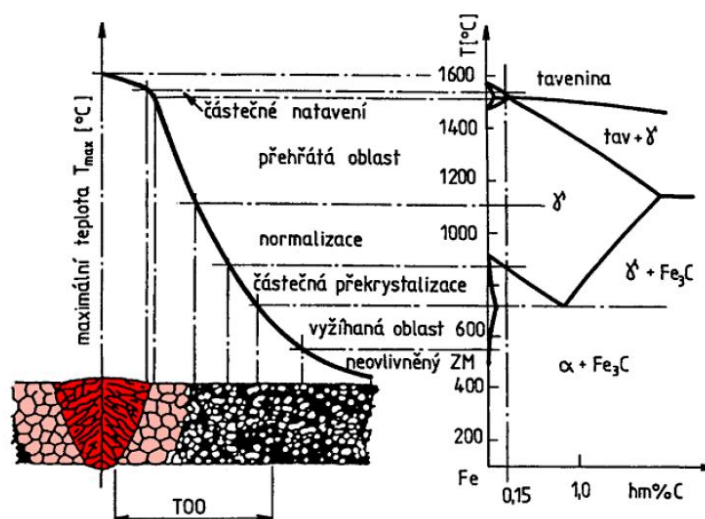
Q_v	[kJ/mm]	tepelný příkon,
η	[-]	koeficient účinnosti svařování, pro WIG $\eta=0,6$
U	[V]	napětí
I	[A]	svařovací proud
v	[mm/s]	rychlost svařování.

Vnesené teplo má vliv na promíšení svaru a tím dochází i k ovlivnění výsledné struktury svarového kovu. Kromě promíšení ovlivňuje vnesené teplo také přilehlé oblasti základních materiálů svaru [17].

Tepelně ovlivněná oblast je část základního materiálu blízkého tavné lázni, která nevyhnutelně podléhá tepelným účinkům svařování. Díky působení tepla dochází ke strukturním přeměnám. Vlastnosti TOO po svařování jsou velice důležité, protože zde často významně ovlivňují spolehlivost svaru. Podle vzdálenosti od svaru vznikají části TOO, které jsou různě ovlivněné teplem ze svařovacího cyklu. TOO se může rozdělit do různých částí, které odpovídají určitému tepelnému zpracování (viz obrázek 3). Šířka jednotlivých pásem TOO se odvíjí od teploty přehřevu, teploty interpass a tepla vneseného danou svařovací metodou. Dalšími vlivy jsou rychlost ochlazování, velikost nebo tloušťka svařence. Obecně se šířka jednotlivých oblastí pohybuje v řádech milimetrů [16].

Rozlišujeme následující zóny [17]:

1. oblast částečného natavení vytvářející přechod mezi svarovým kovem a TOO – často dochází k redukci pouze na linii či plochu, díky minimálnímu rozdílu teploty solidu a likvidu,
2. oblast přehřátá – s teplotami nad A_3 překračujícími teplotu pro hrubnutí primárních zrn,
3. oblast s teplotou nad A_3 kdy dochází k úplné transformaci $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ Oblast mezi teplotami A_3 ž A_1 s neúplnou polymorfní přeměnou,
4. oblast s teplotou pod A_1 ve které probíhají změny v rámci tuhého roztoku α .



Obrázek 3: Tepelně ovlivněné oblasti svarového spoje [17].

6 Metoda TIG/WIG

Metoda WIG patří mezi metody tavného svařování. Při této metodě dochází k hoření oblouku v inertním plynu mezi netavící se wolframovou elektrodou a základním materiálem. Německá zkratka WIG znamená Wolfram Inert gas. Lze se však setkat i s označením TIG - Tungsten Inert Gas nebo GTAW - Gas Tungsten Arc Welding. V angličtině se metoda označuje jako TIG a v Americe pak především GTAW.

Jak již bylo zmíněno, tato metoda využívá hoření oblouku v inertním plynu o vysoké čistotě minimálně 99,995 %. Využívá se argonu, helia či jejich směsí. Přídavný materiál je ve formě drátu dodáván ručně nebo automaticky podle způsobu svařování.

Při použití stejnosměrného proudu se svařují středně a vysoce legované oceli, měď, zirkon, titan, molybden a další. Hliník, hořčík a jejich slitiny se svařují proudem střídavým. Svařováním wolframovou elektrodou se spojují i těžce svařitelné materiály a s vysokou afinitou ke kyslíku, jako jsou např. titan a zirkon. Dají se spojovat i materiály různorodé jako ocel s mědí, bronzem či niklovými slitinami nebo vytvářet návary. Oblasti použití metody WIG uvádí tabulka 3.

Oblasti použití metody WIG
svařované vysokolegované oceli používané v chemickém, farmaceutickém, potravinářském či energetickém průmyslu
žáruvzdorné a žárupevné oceli (kotle, pece, výměníky)
slitiny titanu a speciální slitiny pro letecký a kosmický průmysl
svařování slitin hliníku

Tabulka 3: Oblasti použití svařovací metody WIG [3].

Výhody metody WIG oproti ostatním tavným metodám [3,6]:

- inertní plyn zajišťuje efektivní ochranu svarové lázně a přehřáté oblasti základního materiálu vůči účinkům vzdušného kyslíku,
- inertní plyn zároveň zabraňuje propalu prvků a tím vzniku strusky - výsledkem je čistý povrch spoje,
- příznivé formování svarové housenky na straně povrchu i kořenové části
- není třeba použít tavidlo, ale lze ho použít,
- přídavný materiál si svářeč dává dle potřeby,
- možnost svařování bez přídavného materiálu,
- vytváří elektrický oblouk ve velkém rozsahu proudů,
- zajišťuje vysokou operativnost při svařování v polohách,
- vytváří svary vysoké kompaktnosti i u materiálů náchylných k naplynění a oxidaci při vyšších teplotách,
- snadná obsluha a přesná regulace svařovacích parametrů,
- malá teplotně ovlivněná oblast (TOO) a minimální deformace,
- dobře ovladatelná a viditelná svarová lázeň (nedochází k neustálému přísunu přídavného materiálu obloukem),
- množství vneseného tepla do svaru, se dá dobře dávkovat,
- svařovací oblouk je velice flexibilní - tvar a směr oblouku lze ovládat magnetickým polem.

6.1 Svařovací proudy

Jedním z nejdůležitějších parametrů svařování je proud. Od něj se dále odvíjí hloubka průvaru, svařovací rychlost, produktivita a kvalita svaru. V základu se vybírá ze tří druhů proudů: stejnosměrný proud s přímou polaritou (DCEN), stejnosměrný s nepřímou polaritou (DCEP) a střídavý proud [8].

Svařování stejnosměrným proudem

Při svařování stejnosměrným proudem je elektroda připojena k zápornému pólu a základní materiál k pólu kladnému (tzv. přímé zapojení). Teplo v oblouku je nerovnoměrné a zhruba 1/3 připadá na elektrodu a 2/3 celkového tepla se přenáší na základní materiál. Díky tomuto rozdělení tepla není elektroda tepelně přetěžována a svarová lázeň má velkou hloubku závaru.

Přímé polarity se využívá při spojování všech typů oceli, mědi, niklu, titanu a jejich slitin. V ochranné atmosféře směsi argonu a nejméně 75 % helia se toto zapojení používá pro svařování hliníkových slitin. Vysoká vodivost helia zajistí předávání velkého množství tepla do svarové lázně. Přivedené teplo umožňuje i roztavení povrchových oxidů, které vlivem povrchových sil stahují k okraji svarové lázně, střed zůstává čistý. Nepřímá polarita není většinou využívána z důvodu vysokého tepelného zatížení elektrody [3].

Svařování střídavým proudem

Svařování střídavým proudem při kladné polaritě elektrody se používá na svařování hliníkových a hořčíkových slitin, protože během procesu dochází k čistícímu účinku. Toho se využívá k odstranění těžkovatelných oxidických vrstev, kterými se hliník pasivuje. Tenká vrstva Al_2O_3 má teplotu tavení okolo 2050 °C a brání tak metalurgickému spojení materiálů, neboť pokrývá povrch roztaveného hliníku s teplotou tání okolo 658 °C. Čistícího účinku dosáhneme zapojením elektrody na kladný pól zdroje. Na základním materiálu se vytváří katodová skvrna, která se přemisťuje na místa pokrytá oxidy a hledá místo s nejnižší emisní energií. Na těchto místech potřebují elektrony nižší emisní energii a zároveň se jedná o místo s nejsilnější vrstvou oxidu. Po zasažení katodovou skvrnou se oxidy odpaří. Zároveň na oxidickou vrstvu působí dynamickým účinkem proud argonových iontů o relativně vysoké hmotnosti, které jsou urychlené směrem k lázni. Při kladném zapojení elektrody se vytvoří pouze malý závar. Při opačném zapojení se dosahuje vysoké hloubky závaru, protože do lázně dopadají urychlené elektrony.

Během svařování střídavým proudem dochází k periodickému střídání polarity. Zjednodušeně lze říci, že dochází ke střídání fáze svařování a čištění [3].

Svařování impulsním režimem

Impulsní svařování je varianta metody WIG, kdy se periodicky střídají vyšší a nižší hodnoty proudu. Rozlišuje se hodnota základního proudu I_z a proudu impulsního I_p . Základní proud I_z , s běžně nízkou hodnotou (okolo 10 - 15 A) zajišťuje jen ionizaci plynu za čas t_z . V případě, že je doba základního proudu delší než dvojnásobek doby pulzního proudu, dojde k úplnému ztuhnutí svarové lázně. To je výhodné u svařování vysocelegovaných ocelí. Pokud bude doba

základního proudu kratší, lázeň pouze zmenší svůj rozměr, ale nezuhne. V důsledku toho dostaneme v praxi zvláště hladký svar s plynulým přechodem do materiálu.

Impulsní proud I_p natavuje za čas t_p svarovou lázeň a zároveň s tím i přídavný materiál. Tento proud zajišťuje dobrý průvar a je nastavován svářečem. Rozměry svarové lázně se dají definovat velikostí amplitudy impulsního proudu a dobou jeho trvání. Tímto se zároveň velice přesně reguluje dávkování hodnoty vneseného tepla a tvarování svarové lázně. Průměrná hodnota proudu při impulsním režimu je nižší než během klasického způsobu svařování konstantním proudem. To se projevuje malou TOO, výbornými plastickými vlastnostmi včetně nižší náchylností k praskání a menšími deformacemi.

Součtem času základního proudu a času impulsního proudu získáme čas cyklu $t_c = t_z + t_p$, který zároveň udává frekvenci pulzního svařování. Při pulzním svařování vznikají estetické svary s překrytím 50 - 70 %, tzv. penízkové svary. Z tohoto hlediska je velice důležitým parametrem svařovací rychlost. Rychlost musí být sladěna s ostatními parametry a zvláště pak s frekvencí. Platí, že pro vyšší frekvence může být vyšší i svařovací rychlost [3,6].

Při impulsním svařování se používají:

- dlouhé pulsy od 1 do 10 s, pro tloušťku materiálu 4 - 6 mm,
- střední pulsy o frekvenci 1 - 100 Hz, tloušťky od 0,8 - 5 mm,
- velmi krátké pulsy s frekvencí 1 - 20 MHz, svary titanu, speciálních ocelí a malých tloušťek 0,2 - 0,8 mm.

6.2 Wolframová elektroda

Jak už z názvu vyplývá, při metodě WIG se používá netavicí se wolframové elektrody. Wolfram je jako materiál elektrody vhodný díky své vysoké teplotě tavení okolo 3380 °C. Elektrody jsou vyráběny spékáním čistého wolframu nebo wolframu legovaného oxidy kovů, které jsou v elektrodě rovnoměrně rozptýleny. Jedná se o oxidy těchto prvků: thoria, lanthanu, ceru, zirkonia, yttria. Přísady oxidů snižují teplotu ohřevu elektrody o 1000 °C, zvyšují životnost, zlepšují zapalování oblouku a díky zvýšené emisi elektronů zvyšují stabilitu oblouku. Zvýšení emise lze zajistit sníženou výstupní prací při uvolnění elektronů. Prvky s nízkou výstupní prací (již zmíněné) nemají dobré mechanické vlastnosti jako katodový materiál, a proto se do wolframových elektrod přidávají jako oxidické příměsi. Při disociaci se daný prvek uvolňuje a pokrývá špičku elektrody a zvyšuje tím podstatně termoemisi elektronů. Další výhodou oxidů je vyšší proudová zatížitelnost způsobená vysokou teplotou tavení oxidů. Pro odlišení jednotlivých typů elektrod se používá barevné značení uvedené v tabulce 4 [3,7]. V experimentální části byla použita wolframová elektroda WL20.

Označení elektrody	Barvené značení	Legování
WP	zelená	čistý wolfram 99,8 %
WT10	žlutá	thorium 1,0 %
WT20	červená	thorium 2,0 %
WT30	fialová	thorium 3,0 %
WT40	oranžová	thorium 4,0 %
WC20	šedá	cerium 2,0 %
WL10	černá	lanthan 1,0 %
WL15	zlatá	lanthan 1,5 %
WL20	modrá	lanthan 2,0 %
WZ08	bílá	zirkon 0,8 %

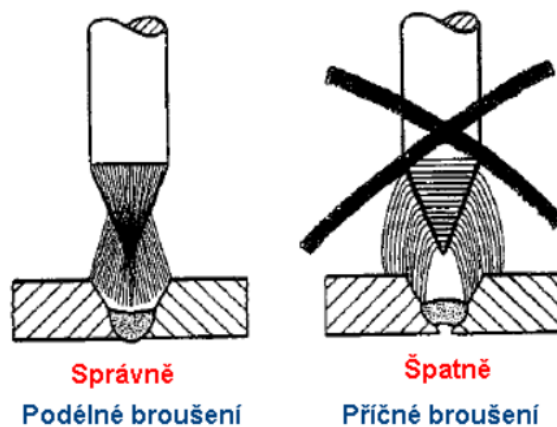
Tabulka 4: Značení a legování wolframových elektrod [3].

Příprava elektrody

Tvar špičky elektrody výrazně ovlivňuje průběh svařování. Špička se brousí tak, aby její délka byla 1 - 1,5 násobek průměru elektrody. Na špičce je dobré vytvořit otupení s průměrem zhruba 10 % průměru elektrody. Vytvořeným otupením se sníží zatížení špičky a prodlouží se tak životnost celé elektrody. Při mechanickém namáhání mají elektrody tendenci uvolňovat částičky podél zrn. Broušení tedy musí probíhat opatrně, lehkou silou a velmi jemně. Při větším tlaku během broušení vzniká teplo, které může vést k napětí na hranicích zrn a poškození hranic zrn. Z tohoto důvodu není vhodné ruční broušení, namísto toho se používá bruska s jemným brusným kotoučem. Čím jemnější broušení proběhne, tím vyšší bude životnost elektrody. V ideálním případě jsou používány speciální brusky přímo na wolframové elektrody. Elektrody by se měly přebroušovat pravidelně a po kontaktu s tavnou lázní okamžitě [3,7].

Směr broušení

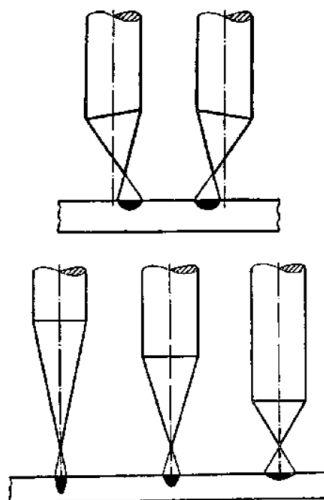
Důležitý je i směr broušení elektrody. Elektroda je nutné brousit tak, aby rýhy po broušení byly rovnoběžné s podélnou osou elektrody. Tím je zajištěno hoření oblouku na konci elektrody. Vzniklé rýhy po příčném broušení způsobují vylamování částiček materiálu a nestabilní oblouk. Uvolněné částičky poté mohou znečistit svarovou lázeň. Po příčném broušení má elektroda navíc větší sklon k lámavosti. Vliv broušení špičky je znázorněn na obrázku 4 [7].



Obrázek 4: Vliv polohy osy elektrody vůči směru broušení [7].

Vystředění

Dalším důležitým faktorem při svařování je vystředění špičky do osy elektrody. Při vyosení pravděpodobněji vznikne nestabilní oblouk. Zvláště u automatizovaného svařování může excentricita způsobit, že nebude energie z elektrody přenášena na požadované místo. Tento problém je zachycen na obrázku 5 [3,7].



Obrázek 5: Vliv excentricity špičky elektrody na přesnost svařování [7].

Úhel nabroušení

Úhel nabroušení má společně s průměrem elektrody rozhodující vliv na kvalitu svarového spoje. Ostrý úhel způsobí přenos energie na malou plochu s velkým natavením. Naopak tupý úhel elektrody přenáší stejně velký proud na větší plochu s mělkým natavením. Úhel nabroušení souvisí s již zmíněnou délkou špičky [3,7].

Typ elektrody, její průměr a způsob nabroušení se volí podle následujících faktorů [3]:

- druh svařovacího proudu,
- polarita na elektrodě při stejnosměrném proudu,
- velikost svařovacího proudu v závislosti na druhu základního materiálu a jeho tloušťce,
- typ, hloubka a tvar svarového úkosu.

6.3 Plyny vstupující do procesu svařování

Ochranné plyny chrání netavící se elektrodu a svarovou lázeň včetně jejího okolí proti okolnímu vlivu vzduchu, a to především proti oxidaci či naplynění. Použitým typem plynu je možné zároveň ovlivnit podmínky pro zapálení a stabilitu oblouku, přenos tepla a tvar svaru. Původně se používalo jako ochranného plynu helia pro svařování slitin hořčíku a hliníku. Dnes se používá hlavně argon [5, 7].

Argon

Argon je nejlevnější a zároveň nejpoužívanější inertní plyn. Argon disponuje malou tepelnou vodivostí a nízkým ionizačním potenciálem 15,8 eV. Nízký ionizační potenciál vede k dobrému zapalování oblouku. Oblouk se vyznačuje vysokou stabilitou i při relativně velkých vzdálenostech, umožňuje vysokou proudovou zatížitelnost a teplota sloupce oblouku dosahuje vysokých hodnot. Hustota argonu odpovídá hodnotě 1,784 kg·m³ a je tedy zhruba 1,4krát těžší než vzduch. Díky tomu vytlačuje hlavně v poloze PA efektivně vzduch, čímž zajistí ochranu svarové lázně. Argon má zároveň nízkou citlivost vůči proudění. Běžně se používá plyn argonu o čistotě 99,995 % značení 4,5. U materiálu s vysokou afinitou ke kyslíku je nutné použít plyn s vyšší čistotou 99,998 % (značeno 4,8) nebo dokonce o čistotě 99,999 (značeno 5,0) [3].

Helium

Helium je narozdíl od argonu velmi lehký plyn s hustotou 0,178 kg·m³. K tomu, aby byla zajištěna dostatečná ochrana svaru, je zvyšován průtok plynu. Helium má o hodně vyšší tepelnou vodivost oproti argonu a také ionizační potenciál je vyšší (24,6 eV). Díky vysokému ionizačnímu potenciálu se oblouk špatně zapaluje a při větší délce není stabilní. Vysoká tepelná vodivost helia zajišťuje i vysoké množství přeneseného tepla obloukem. Toho se využívá u svařování hliníkových slitin a mědi větší tloušťky [3].

Směs argonu a helia

Kombinací těchto argonu a helia získáme výhodné vlastnosti obou plynů. U metody WIG se využívá hlavně kombinací 70 % Ar + 30 % He, Ar-He 50/50, 30 % Ar + 70 % He. Se zvyšujícím se obsahem helia roste napětí na oblouku. To se pozitivně projevuje na tvaru a rozměrech svaru. Použitím směsi plynů se zvyšuje rychlost svařování, hloubka závaru a lze tím i snížit přehřev kovů s vysokou tepelnou vodivostí. Dnes se již směsi dodávají v namíchané v tlakové láhvi [3].

Směs argonu a vodíku

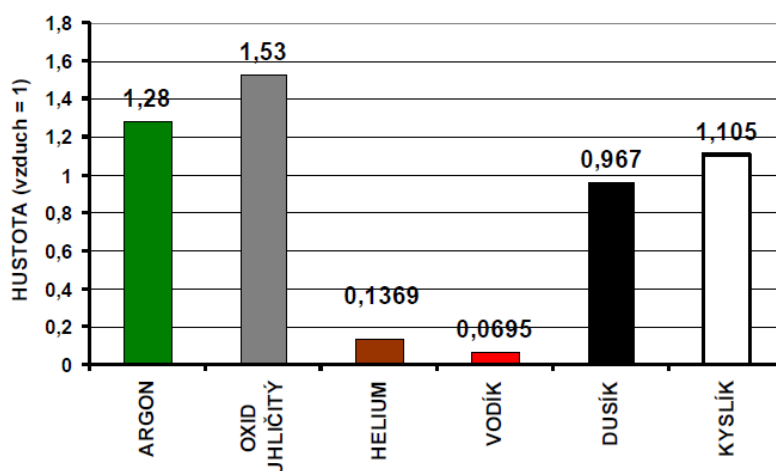
Obdobné vlastnosti jako směs argonu a helia vykazuje kombinace argonu s vodíkem. Vodík zlepšuje díky vysoké tepelné vodivosti energetickou bilanci oblouku. Při přidání 5 – 10 % vodíku dochází k redukci oxidů na povrchu svaru, čímž je maximalizována jeho čistota. Vodík je však používán pouze při svařování vysoce legovaných austenitických a austenitoferitických ocelí Cr-Ni či niklu a jeho slitin. Při podílu 10 % vodíku je dosaženo lepšího tvaru, hloubky závaru a vyšší svařovací rychlosti až o 30 – 50 %. Naopak směs s vodíkem se nepoužívá u svařování martenzitických a feritických Cr-Ni ocelí, protože vodík je příčinou praskavosti za studena. U svařování hliníkových slitin a mědi hrozí nebezpečí vysoké pórovitosti spoje [3].

Směs argonu s dusíkem

Dusík, stejně jako vodík, je dvouatomový plyn s vyšší tepelnou vodivostí. Přenáší tedy do svarové lázně větší množství tepla. Běžně se používá pro svařování mědi a její slitin při obsahu 10 % dusíku [3].

Formovací plyny pro ochranu kořene svaru

Formovací plyny mají schopnost ochrany kořene svaru a vysokovyhřáté oblasti blízkého základního materiálu před oxidací. Tyto plyny dělíme na inertní, redukční a nereagující se svařovaným materiálem. U slitin, které nejsou náchylné na vodíkovou křehkost, jsou používány směsi argonu s obsahem 2 – 10 % vodíku nebo s obsahem 5 – 20 % dusíku. Mezi tyto slitiny patří vysoce legované austenitické oceli a niklové slitiny. Ostatní materiály jsou náchylné ke vzniku trhlin nebo pórovitosti vlivem vodíku, z toho důvodu se jako formovacích plynů využívá helia a argonu. Během svařování trubek či dutých těles ve svislé poloze je nezbytné přivádět plyn těžší než vzduch do spodní části válce tak, aby se vzduch vytěsnil bez promísení směrem nahoru. Naopak lehčí plyn (dusík, vodík, helium) se přivádí do horních částí a vytlačuje vzduch spodem (obr. 6) [3].



Obrázek 6: Graf s porovnáním hustot plynů používaných během svařování metodou WIG [3].

7 Orbitální svařování

Orbitální svařování je metoda tavného svařování používaná převážně ke spojování trubek. Tento způsob svařování byl vyvinut v 60. letech na základě požadavků vesmírného průmyslu na kvalitu svarů hydraulických systémů. Obloukové orbitální svařování představovalo v 80. letech jedno z významných zlepšení v průmyslu. Mezi běžně používané metody využívané k orbitálnímu svařování patří WIG, MAG a tandemové MAG svařování. Proces orbitálního svařování je dobře zavedený v různých průmyslových sektorech díky dobré kvalitě svarů a dobré opakovatelnosti. Automatické orbitální svařování představuje alternativu k ručním obloukovým metodám s vyšší rychlostí svařování. Mechanizované orbitální svařování navíc zajišťuje stejnou kvalitu svarových spojů za poměrně krátkých pracovních cyklů. Celý proces svařování je řízen a kontrolován počítačem. Elektroda se během procesu svařování pohybuje kruhovou trajektorií okolo osy spojovaných trubek ve vodící hlavici. Název *orbitální* vychází z kruhového pohybu konaného elektrodou [9,13,14,23].

Již od počátků bylo orbitální svařování spojeno s metodou WIG, již byl u výsledného svaru zajištěn hladký, čistý povrch. Existují i aplikace, kde se na kořenovou vrstvu kvůli vysokým nárokům na čistotu kořene použije metoda WIG a na další krycí vrstvy pak případně metoda s tavící se elektrodou. Metoda WIG se používá tam, kde je požadována vysoká čistota svaru s výsledným čistým, hladkým povrchem. Jedná se o průmysl chemický, potravinářský či energetický. Navíc je výhodné že metodu orbitálního svařování lze využít při výrobě, ale i při opravách přímo na místě. Svařování probíhá v kontrolované ochranné atmosféře plynu. Proces je velmi čistý. Během svařování nedochází k vnikání částic a nežádoucímu rozstříku. Orbitální svařování se používá pro spojování převážně nerezových trubek a splňuje nejprísnější požadavky na výsledné mechanické vlastnosti a vzhled. V případě, že jsou nastaveny všechny parametry správně, bývá podíl vad menší než 1 %. Rozhodující jsou především následující parametry [23]:

- tvar elektrody,
- tlak formovacího a ochranného plynu a jeho čistota,
- příprava úkosů a povrchu,
- kvalita heftů (nutné provedení též v ochranné atmosféře),
- použitý proud,
- kvalita spojovaných materiálů, případně přídavného materiálu.

Výhody orbitálního svařování

Ve srovnání s ručním svařováním vykazuje automatizovaný proces vyšší produktivitu. Mechanizovaný proces je zároveň spolehlivý na provedení schválených svařovacích postupů a odpadáají tak časově náročné opravné práce. Jakmile je nastaven a odladěn správný svařovací program, svařovací cykly mohou být opakovány bez odchylek a defektů.

K obsluze orbitální svářečky stačí zaškolený pracovník k obsluze stroje a odpadá tudíž starost se zajištěním certifikovaného svářeče k provedení svaru.

Orbitální svařování může být realizováno ve stísněných prostorech přímo na místě opravy, za špatných světelných podmínek či přítomnosti radiace. Jedinou podmínkou je správné usazení svařovací hlavy, která může být obsluhována na dálku z bezpečné vzdálenosti. Často lze využít obsluhu přes videokamery.

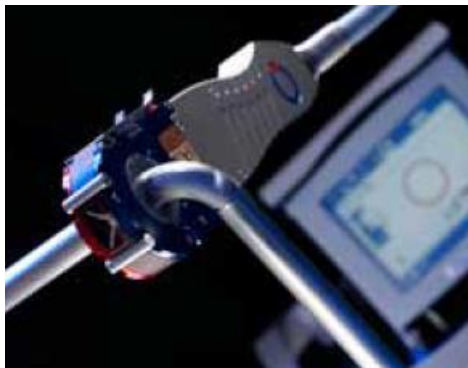
Moderní orbitální svářečky monitorují během svařování parametry v reálném čase a mohou je ukládat. Tato data mohou sloužit ke sledování a řízení kvality [9].

Orbitální svařovací sestava se skládá z:

- z programovatelného zdroje,
- svařovací hlavy,
- podavač drátu (pokud to vyžaduje daná aplikace).

Svařovací hlavy uzavřené

Uzavřené hlavy (obr. 7) jsou navrženy k autogennímu svařování bez přídavného materiálu. Jejich velikosti pokrývají svařované průměry od 1,6 mm až do 168 mm. Kromě austenitických ocelí jsou vhodné ke svařování kovů náchylných k oxidaci jako je titan, zirkon a jejich slitiny. Podle použití se hlavy upínají ke spojovaným trubkám jednou či dvěma upínacími svorkami [9].



Obrázek 7: Uzavřená svařovací hlava Polysoude pro orbitální svařování [9].

Svařovací otevřené U - hlavy

Otevřené svařovací hlavy (obr. 8) jsou navrženy pro svařování metodou WIG s přídavným nebo bez přídavného materiálu. Používají se pro svařování trubek s průměry od 8 mm do 275 mm. U-hlavy jsou vybaveny hořákem WIG s tryskou na ochranný plyn. Během svařování lze snadno kontrolovat oblouk. Asymetrická konstrukce hlavy dovoluje uchycení ve stísněných prostorech blízko stěny nebo blízko ohybu.

Podavač drátu může být zakomponován ve svařovací hlavici nebo vně. Výběr podavače drátu závisí na dostupné velikosti cívky přídavného materiálu, druhu aplikace a požadavku na mobilitu celé svařovací sestavy [9].



Obrázek 8: Otevřená svařovací U – hlavice Polysoude pro orbitální svařování [9].

Orbitální svařování WIG typicky začíná předfukem ochranného plynu. Po předfuku dochází k zapálení oblouku, vytvoření svarové lázně a provaření. Teprve poté se s nastaveným zpožděním začíná otáčet svařovací hlavice. Rychlost otáčení je spočítána pro většinu trubek tak, aby bylo dosaženo rychlosti elektrody vůči povrchu okolo 5 IPM (127 mm/min). Podle rychlosti svařování lze určit čas cyklu, ke kterému ale musí být připočteno počáteční zpoždění před vytvořením lázně a dokončení svaru s postupným poklesem proudu.

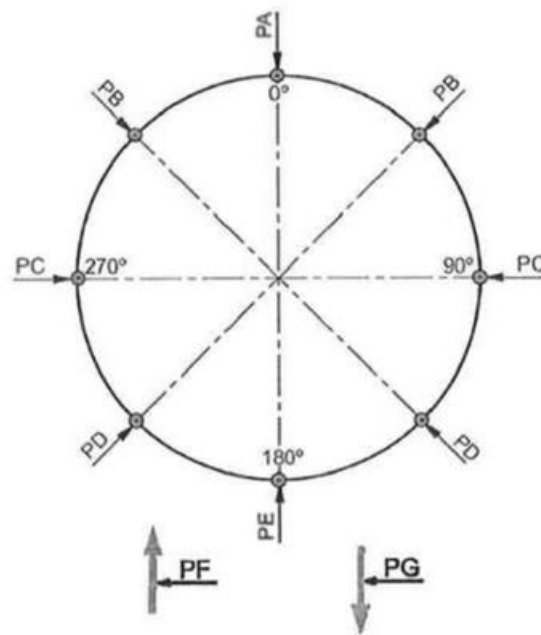
Svařovací proud se odvíjí od tloušťky materiálu. Autor [24] doporučuje 1 A na 0,001 inch (0,025 mm). Tento počáteční proud by měl být v průběhu svařování snižován.

Trubky menších průměrů jsou svařovány bez pulzního proudu, u masivnějších rozměrů se používá pulzní proud k lepší kontrole svarové lázně v různých polohách a redukuje tak stékání lázně. V poslední fázi je nastaven sektor, který překrývá začátek svařování a dochází k postupnému snižování pulzního proudu z důvodu zabránění tvorby kráteru či díry. Po ukončení svařování následuje dofuk plynu až do doby, než poklesne teplota materiálu na takovou úroveň, aby už nedocházelo k přebytečné oxidaci.

U některých aplikací je potřeba spojované trubky manuálně sestehovat. V takovém případě je nutné použít formovací plyn, aby při následném orbitálním svařování nedocházelo k vychýlení oblouku kolem nechráněného stehu. Zoxidované stehy mohou být totiž iniciátorem koroze [24].

7. 1 Polohy při orbitálním svařování

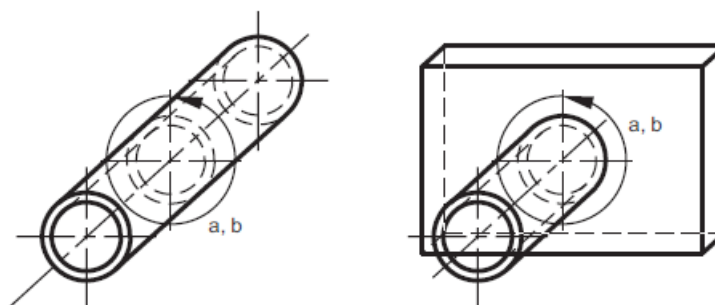
Během svařovacího procesu se elektroda otáčí kolem trubek o více než 360°. Dochází tak ke svařování ve všech svařovacích polohách. To je důležité vzít v úvahu vzhledem k tomu, že v průběhu svařování dochází ke změně směru působících sil na svarovou lázeň. Polohy svařování jsou popsány normou ČSN EN ISO 6947 a jsou naznačeny na obrázku 9. Názvy poloh jsou uvedeny v tabulce 5. Stejná norma zároveň popisuje polohu PK zvláště pro orbitální svařování. Jedná se o polohu, při které elektroda koná kruhový pohyb kolem trubky o 360°. Lze tedy říci, že poloha PK zahrnuje všechny polohy. Poloha PK je znázorněna na obrázku 10.



Obrázek 9: Polohy při orbitálním svařování [12].

Poloha	Název
PA	poloha vodorovná shora
PB	poloha vodorovná šikmo shora
PC	poloha vodorovná
PD	poloha vodorovná šikmo nad hlavou
PE	poloha vodorovná nad hlavou
PG	poloha svislá dolů
PF	poloha svislá nahoru

Tabulka 5: Popis poloh svařování [5].



Obrázek 10: Znázornění polohy PK [20].

U orbitálního svařování, kdy je trubka pevně fixována a svařovací hlavice krouží kolem spojovaných materiálů, je zásadním problémem chování tavné lázně v různých polohách svařování. V poloze vodorovné shora PA působí gravitační i elektromagnetická síla ve stejném směru a působí tak pozitivně na provaření. Ve vertikální poloze stoupání PF stéká

tavná lázeň proti směru pohybu elektrody, čímž se vytváří pouze tenká vrstva tekutého kovu a oblouk tak může působit více zpříma na základní materiál. Tím dochází k lepšímu provaření. V opačném případě, tedy při klesání elektrody v poloze PG, stéká tavná lázeň ve směru svařování a dochází tak k hromadění tavné lázně v oblasti oblouku. Tím klesá kontakt základního materiálu s obloukem a dochází ke ztížení průvaru. V poloze svařování nad hlavou PE proti sobě působí gravitační a elektromagnetická síla. To opět negativně ovlivňuje průvar [26].

K úspěšnému provedení svaru je třeba mít pod kontrolou svarovou lázeň kovu po celý cyklus svařování. Během procesu se mění polohy svařování a tím se mění i vliv působících sil na svarovou lázeň. Zohledněna musí být i teplota svařovaných dílů. Z těchto důvodů je k orbitálnímu svařování používán pulzní proud [24,26].

Během času pulzního proudu t_p zůstává pulzní proud I_p na vyšší hodnotě a svarová lázeň zvětšuje svůj objem na maximum. Dochází zároveň k tavení a mísení materiálů.

Během času základního proudu t_z zůstává proud na nižší hodnotě I_z , čímž dojde ke zchlazení svarové lázně. Lázeň zároveň sníží svůj objem na minimum a zmírní se účinky gravitace.

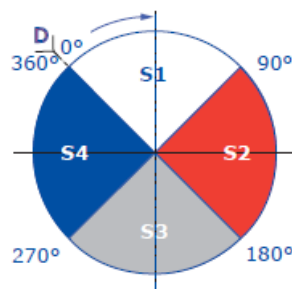
To je důležité v poloze 12 a 6 hodin (PA/PE), v nichž je díky působení pulzního proudu minimalizováno zborcení svaru. V poloze 3 a 9 hodin (PF/PG) pak pulzní proud omezuje stékání svarové lázně. Bez pulzního proudu by tak mohlo dojít ke změně vzdálenosti elektrody od svaru (vlivem nárůstu objemu tavné lázně). Tato mezera by měla být během procesu svařování konstantní, aby nedošlo ke změně napětí [24,26].

Poměr pulzního proudu k základnímu se pohybuje v rozmezí 2:1 až 5:1. Pro nastavení a experimentální odladění je vhodný jako výchozí poměr 3:1 (pulzní/základní).

Frekvence pulzu závisí na požadovaném překrytí vrstev, které vzniknou v důsledku pulzního svařování. [24,26].

Nicméně u trubek s tloušťkou větší než 10 mm a o průměrech nad 140 mm mohou hodnoty základního proudu dosahovat podobných hodnot pulzního proudu tak, že skoro nedochází k pulznímu svařování [24,26].

V mnoha případech použití pulzního proudu nestačí k dosažení uspokojivých výsledků svařování. Z toho důvodu je třeba navíc nastavit parametry pulzního proudu s ohledem na polohy svařování. Dráha, kterou opisuje elektroda, se proto dělí na tzv. sektory. Na hranicích každého sektoru dochází ke změně svařovacích parametrů z důvodu změny polohy svařování. Sektory jsou rozloženy v kruhu, tedy v 360° jak naznačuje obrázek 11. Na uvedeném obrázku lze vidět rovnoměrné rozložení sektorů. V praxi mohou být sektory rozloženy složitěji a může jich být více v závislosti na vneseném teplu a poloze během svařování. Pro polohu elektrody lze použít označení úhly nebo polohu odpovídající hodinám [9,24,26].



Obrázek 11: Příklad rozdělení trajektorie elektrody na sektory [9].

7.2 Určení parametrů orbitálního svařování

Výrobci a dodavatelé svařovacích zařízení nabízejí vypočítané a přednastavené programy pro svařování různých typů materiálů o různých rozměrech. Je dobré z tohoto nastavení vycházet, avšak dodavatelé nemohou vyvinout programy pro všechny možné aplikace. Předpřipravené aplikace navíc většinou znamenají kompromis mezi maximální svařovací rychlostí a kvalitou svaru. V případě, že neexistuje program pro danou aplikaci nebo chceme dosáhnout lepších výsledků svařování, se dá řídit jistými pravidly pro tvorbu vlastního programu. Tato pravidla platí obecně a mohou posloužit jako základ pro další experimenty při určování finálních parametrů [24].

- Délka oblouku

Nastavení obloukové mezery závisí na svařovacím proudu, stabilitě oblouku a přesnosti připravených úkosů trubky. Cílem je udržovat během svařování elektrodu v konstantní vzdálenosti tak, aby nedošlo k vytlačování kovu.

K základní hodnotě $\approx 0,25$ mm (autor uvádí hodnotu v palcích - 0,010) je třeba připočítat polovinu hodnoty provaření (většinou tloušťka stěny). V případě, že by stěna trubky byla 1 mm silná, by měla být délka počátečního oblouku $0,25 + 0,5 = 0,75$ mm [24].

- Rychlost svařování

Rychlost svařování se odvíjí od stavu svarové lázně a přísunu PM. Většinou je snaha docílit vysoké rychlosti svařování při zachování dobré kvality svarů. Rychlost elektrody by se měla pohybovat okolo 100 až 254 mm/min, převedeno přibližně ze 4 až 10 IPM (inch per minute). Vyšších rychlostí se využívá u tenčích materiálů, u tlustších pak pomalejších. Vhodná počáteční rychlost ladění je okolo 127 mm/min (5 IPM) [24].

- Svařovací proud

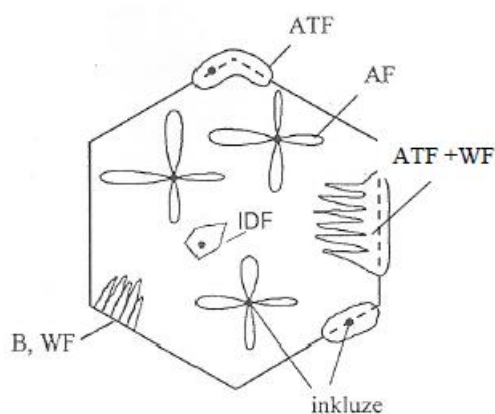
Svařovací proud bývá vybrán podle materiálů, tloušťky stěny, svařovací rychlosti a ochranného plynu. Zásadní je dosažení plného provaření kořene bez defektů. Počáteční hodnotu lze určit tak, že na 0,0254 mm (0,001 in) tloušťky připočítáme 1 A v případě nerezové oceli. V případě tloušťky stěny 2,5 mm by pak proud odpovídal zhruba 100 A. Během orbitálního svařování se hodnoty svařovacího proudu postupně snižují v jednotlivých sektorech za účelem kompenzace hromadění tepla v trubkách. Při stejné hodnotě proudu by během celého svařování docházelo k příliš velkému provaření a převyšování kořene. Většinou se u orbitálního svařování využívá minimálně 4 sektorů. Proud klesá postupně v každém sektoru. V případě rozdělení na 4 sektory by koncový proud ve 4. sektoru měl mít hodnotu 80% proudu v sektoru 1. Svařovací proudy v sektoru 2 a 3 by měly odpovídat postupnému snižování na hodnotu proudu v posledním sektoru [24].

Při svařování metodou WIG je rozlišováno více způsobů přísunu drátu. Mezi ně patří kontinuální přísun a dynamický pulzní. Kontinuální přísun je přínosný s ohledem na

svařování v poloze PE. Během kontinuálního spojení drátu a lázně zaručuje povrchové napětí stabilnější proces svařování. Nedochozí tak k tvorbě kapek, které by mohly znečistit elektrodu.

Svarové housenky v poloze PF a PE vykazují nižší geometrické charakteristiky oproti jiným polohám. Nízkou smáčivost v poloze PF lze objasnit tak, že svarová lázeň stéká opačným směrem, než jakým postupuje tuhnutí. Zároveň v této poloze dochází k největšímu provaření, protože díky stékání svarové lázně je oblouk v přímějším kontaktu se ZM. Naopak v poloze PG stéká svarová lázeň ve směru postupu svařování. Oblouk je tak v kontaktu s lázní a do ZM v pevném stavu se přeneše méně tepla z oblouku. V poloze PE získávají svary vyšší převýšení díky působení gravitace na svarovou lázeň. Při porovnání svařování pulzním proudem a proudem konstantním vykazují svary vyšší převýšení při použití pulzního proudu. Přestože průměrný proud je stejný, při použití pulzního proudu je zapotřebí více PM [27].

Natavená zóna vzorků svařovaných nižšími proudy vykazuje jemnější strukturu s větším obsahem acikulárního feritu. Acikulární ferit (obr. 12) se iniciuje na nekovových částicích uvnitř zrn. Při použití vyšších proudů se ve struktuře objevuje alotriomorfní ferit a Widmannstättenova struktura. Alotriomorfní ferit (obr. 12) inicuje na rozdíl od acikulárního feritu na hranicích austenitických zrn na vyskytujících se inkluzích nebo precipitátech. Widmannstättenova struktura může nukleovat buď na alotriomorfním feritu nebo na hranicích zrn austenitu. Widmannstättenova struktura (obr. 12) je typická feritickými jehlicemi prorůstajícími dovnitř zrna. Použití pulzního proudu vede ke vzniku acikulárního feritu díky menšímu vnesenému teplu než při použití proudu konstantního. Dochází tak k rozdílným rychlostem ochlazování. TOO byla tvořena feritem, alotriomorfním feritem a menším množstvím acikulárního feritu. Menší tepelný příkon při použití pulzního proudu vede k menším původním zrnům austenitu. Tím narůstá podíl hranic zrn, který podporuje vznik alotriomorfního feritu. Na druhou stranu svařování nižšími proudy vede k vnesení menšího množství tepla a narůstá tím rychlost ochlazování. Zvýšená rychlost ochlazování podporuje vznik alotriomorfního feritu a sekundárního feritu [27,53].



Obrázek 12: Schéma nukleace feritu/bainitu (B-bainit, WF-widmannstättenův ferit, AF-acikulární ferit, ATF-alotriomorfní ferit, IDF –idiomorfní ferit) [53].

Traidia [28] zkoumal vliv rychlosti přísunu drátu na tavnou lázeň za pomoci počítačové simulace. Výpočty poukazují na lokální zmenšení hloubky provaření v oblasti teplotně

ovlivněné přísunem drátu. Tento jev je tím zřetelnější, čím menší je proud. S přísunem drátu se navíc zvětšuje objem tavné lázně a dochází k poklesu průměrné teploty. V případě, že budeme chtít zvýšit výkon k provaření kořene, musíme nezbytně zvýšit rychlost přísunu drátu. Přisun drátu ale omezuje provaření a způsobuje nestability při svařování mimo polohu. Jestliže je rychlost natavování drátu je vyšší než rychlost přísunu drátu, dochází k přerušovanému zásobování tavné lázně drátem. Hlavní výhoda tohoto zásobování tkví v tom, že roztavení drátu není závislé na tavné lázni. Kapky kovu jsou formovány a odděleny před dosažením lázně za pomoci gravitační síly a tahové síly plazmatu. Výhody síly povrchového napětí mizí a může docházet k znečištění elektrody rozstříkem v různých polohách.

V poslední době jsou zkoumány různé způsoby vylepšení metody WIG. Jedním z vylepšení této metody může být použití vysokofrekvenčních vibrací drátu. Rovnice popisuje tento stav jako rovnováhu sil soudržnosti a sil oddělujících [26]:

$$F_p = F_g + F_t + F_v,$$

kde F_p znamená povrchové síly, F_g gravitační sílu, F_t tahovou sílu plazmatu a F_v představuje mechanický efekt vibrací.

















Bylo vyzorováno, že je vhodné nastavit velkou rychlost drátu tak, aby došlo k oddělení kapky kovu až v lázni a předešlo se tím kontaminaci elektrody. Tím se dosáhne větší stability procesu a průvaru podobně jako u manuálního procesu, jelikož nedochází k přebytečnému přísunu drátu [26].

Autor [26] vyvinul systém přísunu drátu synchronizovaný s frekvencí pulzního proudu svařování. Přídavný materiál se tak posouvá do lázně a taví se pouze během pulzního proudu. Na konci pulzního proudu dochází k zasunutí drátu zpět ven z lázně a během základního proudu nedochází k přísunu drátu. Díky tomu, že nemusí být dodržovaný kontinuální přísun drátu, je rychlost přísunu drátu nezávislá na energii oblouku a může dojít k navýšení svařovací rychlosti. Touto technikou tedy lze zlepšit přenos kovu a produktivitu svařování. Autor však neuvádí vliv na mikrostrukturu a mechanické vlastnosti spoje.

Kořenová vrstvu lze považovat za nejkritičtější oblast nejen při svařování trubek. Kořenové vrstva je v kontaktu s proudícím médiem a musí odolávat korozi. Hlavním požadavkem na kořenovou vrstvu je kompletní provaření. To bývá ztíženo horším přístupem elektrody k materiálu. Výběr vhodných parametrů svařování kořene ztěžuje fakt, že parametry musí být zvoleny tak, aby došlo k provaření, ale zároveň nesmí dojít k propadnutí kořene. Mohou se objevit i jiné defekty, jakými jsou různé vměstky. Dříve byly všechny svary zhotovovány ručně a kvalita spoje tak záležela na zručnosti svářeče, který podle vizuální kontroly mohl během svařování ovlivnit vzdálenost elektrody, výkmit elektrody nebo vzhled housenky k zaručení dobré kvality svaru. Dnes se čím dál více používají ke svařování stroje, u kterých je problém zajištění technik jako při ručním svařování, ale požadavek na kvalitu svarů je stejný [26,29]. Autor [29] zkoumal vliv formovacího plynu na vnitřní povrch kořene v různých polohách orbitálního svařování WIG. Použitím formovacího plynu můžeme pomocí

stlačeného plynového polštáře podepřít tekutý kov, který má tendenci se propadávat. Tekutý kov pak tuhne a vytváří plošší povrch. Podle autora je nejlepšího efektu při použití formovacího plynu dosaženo v poloze mezi 11 a 1 hodinou, tedy v poloze podobné PA. Je to způsobeno tím, že v této poloze působí tlak formovacího plynu proti gravitační síle působící na lázeň. Během orbitálního svařování mění gravitační síla, povrchové síly, síly oblouku a síly tlaku formovacího plynu svůj směr vzhledem k lázni (obr.13) a svařovací proces se tím komplikuje.

Zároveň byly porovnávány formovací plyny – argon, dusík, vzduch. Z těchto plynů se jako nejlepší z hlediska ochrany před oxidací jevil argon. Argon také vykazoval nejlepší rozložení tvrdosti ve svaru. U zbylých dvou plynů byla patrná fluktuace tvrdosti, která mohla být způsobena kontaminací dusíkem, čímž došlo k vytvrzení roztoku. Z hlediska mikrostruktury formovací plyny nepřispěly ke zjevným změnám, ve všech svarech byly patrné dendrity (delta ferit) v austenitické matici [29].

poloha oblouku	tok svarové lázně	působící síly			
		gravitační	povrchové napětí	tlak oblouku	formovací plyn
mezi 11 a 1 hodinou	stéká a zůstává u zadní části oblouku				
mezi 7 a 11 hodinou	stéká směrem k oblouku				
mezi 5 a 7 hodinnou	náchylnost k propadávání				
mezi 1 a 5 hodinou	stéká k zadní části oblouku a hromadí se				

Obrázek 13: Působící síly a jejich směr během orbitálního svařování [29].

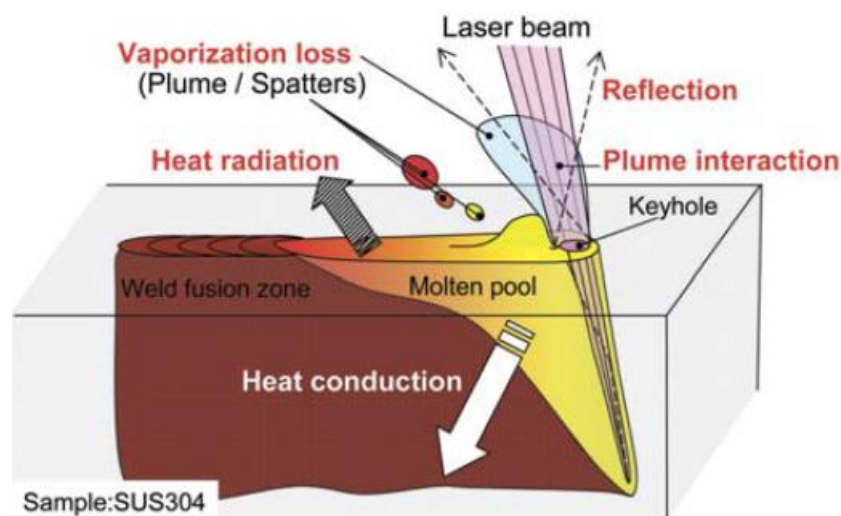
Kolektiv autorů [30] zkoumal vliv velikosti pulzního proudu a množství dusíku v ochranném plynu na obsah delta feritu. Podíl delta feritu ve struktuře by se měl pohybovat v rozmezí 3 – 12 %, aby se zabránilo tvorbě trhlin za horka a tvorbě feritického síťoví. Vliv podílu dusíku v ochranné atmosféře byl zkoumán kvůli stabilizačním účinkům dusíku na austenit. Bylo vyzpozorováno, že čím vyšší pulzní proud byl použit, tím více bylo delta feritu ve struktuře. To je pravděpodobně způsobeno tím, že se zvyšující se hodnotou pulzního proudu klesá rozpustnost dusíku, jak bylo pozorováno při svařování oceli AISI 304L metodou WIG.

8 Obloukové metody orbitálního svařování v porovnání s laserovým

Laserové svařování je většinou realizováno v „key-hole“ módu (obr. 14). K vytvoření díry je zapotřebí fokusovat laserový svazek o vysoké výkonové hustotě do bodu o průměru 0,1 až 0,5 mm. Teplo absorbované z paprsku zahřívá materiál, taví ho a nakonec dochází i k jeho odpařování. Teplo absorbované materiálem se rovnoměrně rozkládá po stěně vytvořené díry. Díky tomuto módu lze získat úzké svary s hlubokým průvarem a rychlost ochlazování, hlavně v kritickém rozsahu teplot 800-500 °C, je mnohem vyšší než u obloukových metod. Tím vzniká i menší TOO (teplotně ovlivněná oblast) s jemnozrnnou strukturou a menšími deformacemi.

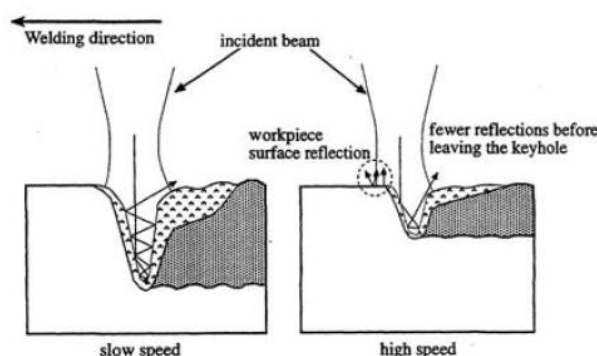
Celková účinnost laserového svařování se odvíjí od účinnosti metody a laserového zdroje. Účinnost je dána i absorpcí a účinností natavení. Absorpce je dána materiálem, vlnovou délkou laserového svazku a svařovacím systémem. Energie se ztrácí následujícími mechanizmy [44]:

- vedením a prouděním z natavené oblasti,
- energie spotřebovaná k natavení kovu,
- energie spotřebovaná na odpaření kovu,
- energie laseru odražená od výparů kovu,
- energie laseru odražená od základních materiálů,
- energie laseru odražená od „key-hole“,
- ztráty sáláním svarové oblasti.



Obrázek 14: Schéma tvorby „key-hole“ [44].

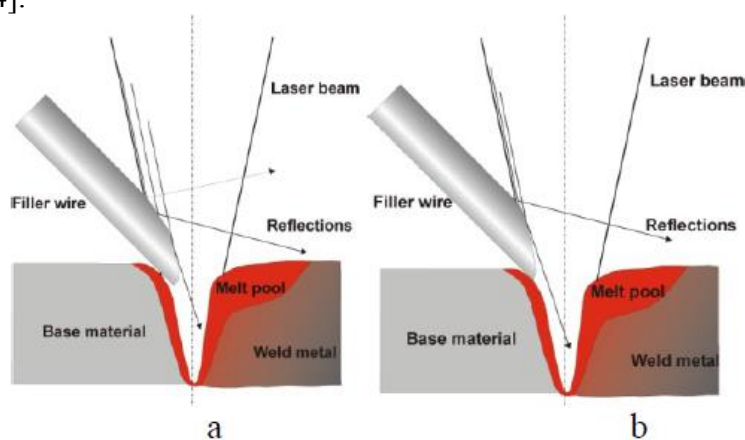
Absorpce laserového paprsku závisí na svařovací rychlosti. Se zvyšující se rychlostí svařování absorpce klesá, snižuje se totiž hloubka průvaru a dochází tak k méně odrazům paprsku ve vytvořené díře. Čím více odrazů v díře proběhne, tím je absorpce větší (obr. 15).



Obrázek 15: Vliv rychlosti svařování na absorpci [44].

Hlavní nevýhodou laserového svařování jsou vysoké nároky na přípravu úkosů. Pro běžný tupý svar je největší možná mezera mezi materiály do 10 % tloušťky svařovaného materiálu. To vyžaduje přípravu obráběním nebo laserovým řezáním. I za použití těchto metod je však proveditelnost náročná. Geometrie úkosů se totiž může lišit podle jednotlivých šarží i podle jednotlivých spojů. K zaplnění mezery je zapotřebí přídavného materiálu. Obvykle se používá přídavný materiál ve formě drátu, možný je však i prášek. Použití laserového svařování s přídavným drátem je velmi náročné zejména z hlediska správného nastavení pozice drátu a nastavení parametrů procesu.

Během svařování s přídavným drátem dochází k odrazu laserového svazku (obr. 16). Ten je způsoben studeným drátem a přísunem drátu mimo fokusační bod. Laserový paprsek se tak odráží od přídavného drátu. Tento odraz lze zmenšit správným nastavením parametrů pozice a přísunu drátu [44].



Obrázek 16: Vliv odlišného úhlu přísunu drátu na odraz laserového paprsku [44].

U orbitálního svařování trubek, při němž se svařovací hlavice otáčí jednou či více otáčkami okolo vytvářeného spoje, je využíváno více metod. U trubek s větší tloušťkou (nad 5 mm) se používají metody s tavicí se elektrodou, pro tenkostěnné trubky se využívá metody WIG (do 5 mm). Těmito metodami se dosahuje dobré kvality svarů, ale rychlost svařování a hloubka tavné lázně jsou do jisté míry omezeny. Z toho důvodu byly vyvinuty systémy se dvěma elektrodami a dvěma podavači drátu za účelem zvýšení produktivity. Tím se ale potenciál produktivity vyčerpal.

Moderní vysokovýkonné lasery mohou překonat tradiční metody svařování v hloubce závaru a rychlosti svařování při dobré kvalitě svaru. Moderní pevnolátkové lasery, vláknové a diskové mohou mít výkon až 50 kW [14].

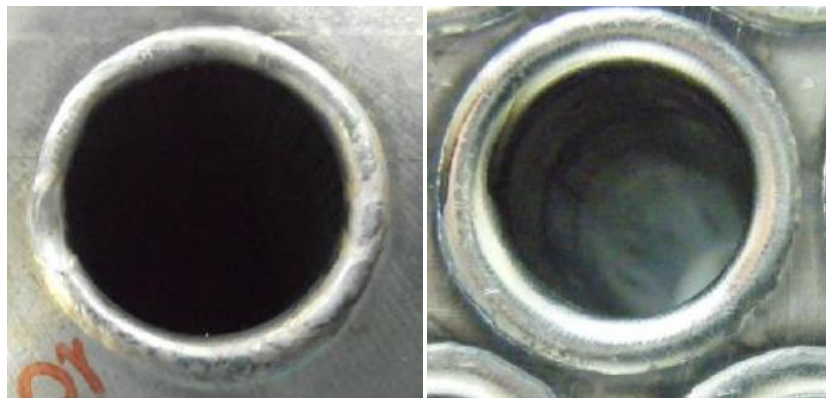
Při větší produkci je většinou rozhodujícím parametrem rychlost výroby, která je mimo jiné ovlivněna i rychlostí svařování. U materiálů s tloušťkou 1 mm je běžné dosáhnout rychlosti 10 mm/min, což je hodnota mnohem vyšší než u tradičních metod svařování.

Největší rozdíl mezi konvenčními metodami a svařováním laserem je v množství vneseného tepla. Laserový paprsek produkuje úzký svarový spoj při rychlém přenosu energie z paprsku do materiálu. Odhadovaná energie vnesená do vysokopevnostní oceli o tloušťce 1 mm se v případě laseru pohybuje okolo 15 J/cm, u metody WIG nejméně kolem 60 J/cm a u metody MAG odpovídá 85 J/cm. Tento odhad je důležitý jak z hlediska nákladů, tak z hlediska vlivu na mechanické vlastnosti svarového spoje. Mechanické vlastnosti bývají lepší při použití laseru.

Laserovým svařováním jsou zajištěny úzké svary díky vysokým rychlostem ochlazování. Rychlým ochlazením zároveň dochází k menšímu tepelnému ovlivnění. Příliš vysoké rychlosti svařování či ochlazování však mohou způsobit problémy. V případě svařování oceli s vysokým obsahem uhlíku mohou být výsledné teplotně ovlivněné zóny příliš tvrdé. Spoj pak může být náchylný k praskání, pokud je předpokládáno cyklické zatížení. Tento problém lze eliminovat správným výběrem laserového zdroje, správnými parametry fokusace či předeřevy nebo následným tepelným zpracováním. Mezi další výhody laserového svařování patří kvalita povrchu s malou oxidací a minimální rozstřík na kořenové straně i bez použití formovacího plynu u běžných uhlíkových ocelí a nerezů. Ochranný plyn se používá pouze u vnější vrstvy, čímž při větší produkci dochází k úsporám. Většinou se jako ochranný plyn používá argon [15].

Kvalitou povrchu se zabývá i článek z evropského projektu ORBITAL. Autoři článku zde prezentují výsledky zkoušek svařování trubek k trubkovnici. Při zkoušce porovnávali svařování laserovou hlavici a orbitální svařování WIG. Povrch svaru metodou WIG se jevil hladší a kvalitnější (obr. 17). Svary provedené oběma metodami prošly penetrační zkouškou bez indikace vady.

Ve stejném článku autoři zmiňují, že při laserovém svařování došlo k menšímu smrštění průměru trubky než při svařování metodou WIG [13].



Obrázek 17: Vizuální porovnání orbitálního svaru vytvořeného laserem (vlevo) a metodou WIG (vpravo)[13].

K orbitálnímu svařování se dá uvažovat o použití dvou typů laserů s dostatečným výkonem – vláknovým laserem a CO₂ laserem. Oba tyto typy mají dostatečný výkon ke svařování. Nejpoužitelnějšími se jeví vláknové lasery. Mají totiž větší účinnost a vlnovou délku okolo 1,06 μm . Tato vlnová délka umožňuje vedení laserového paprsku optickými vlákny. Díky kratší vlnové délce je zároveň energie vnášena do materiálu s větší účinností oproti CO₂ laserům. U CO₂ laserů musí být navíc kvůli zhruba 10-krát větší vlnové délce veden paprsek

soustavou zrcátek. U orbitálního svařování by tak při použití CO₂ laseru musela být soustava otáčejících se zrcátek. Porovnání laserů z hlediska vhodnosti k laserovému svařování je uvedeno v tabulce 6 [40,41,42].

	CO ₂ LASER	Nd:YAG	Vysokovýkonný diodový laser	Vysokovýkonný vláknový laser
vlnová délka [μm]	10,6	1,064	0,78 až 0,94	1,07
max. energie paprsku[kW]	40	5	6	17
účinnost [%]	10	3 až 10	20 až 40	30
vedení paprsku	zrcátka	vlákno	přímo/vlákno	vlákno
vhodné pro svařování velkých průřezů	+	0	-	+
přenosnost	-	-	+	+
rozměrové nároky	-	-	0	+

Tabulka 6: Porovnání laserů z hlediska vhodnosti k orbitálnímu svařování, + vhodné, - nevhodné, 0 neutrální [42].

Porovná-li se svařování trubky z uhlíkové oceli o tloušťce 1,5 mm metodou WIG a laserovou metodou (nutno započítat ceny energie a ochranných plynů), vyjde dle [15] následující: Svařování metodou WIG nebo plasmou se využije tam, kde je požadována perfektní kvalita svaru, běžně u nerezových ocelí. Technologie WIG je omezena rychlostí, zvláště u větších tloušťek materiálu. Je třeba vzít v úvahu i dvojnásobnou spotřebu ochranných plynů při použití formovacího plynu k nezbytné ochraně kořenu.

Laserové svařování trubek a profilů představuje do budoucna perspektivní technologii především z hlediska produktivity.

Mezi nevýhody laserových systémů patří jejich citlivost na seřízení a správnou údržbu laserové optiky spolu s přesným strojním zařízením. Díky vyvolané vysoce soustředěné energii musí být polohování velmi přesné. Zároveň jsou vysoké i nároky na kvalitu úkosů jsou vysoké. Také mezera mezi spojovanými materiály je omezena jistou velikostí. V případě, že bychom chtěli tuto mezeru zvětšit, musí být použit přídavný materiál tak, aby došlo k vyplnění mezery kovem. PM materiál se používá ve formě prášku nebo drátu. V případě použití drátu může docházet k odrazům laserového paprsku právě od PM a musí být věnována pozornost správnému nastavení přisunu drátu. Špatné nastavení procesu může způsobit nekvalitní svarový spoj s vadou, která není snadno odhalitelná. Laserové systémy mají navíc vysoké pořizovací náklady [13,15,40,41,43].

Experimentální část

9 Úvod do experimentální části

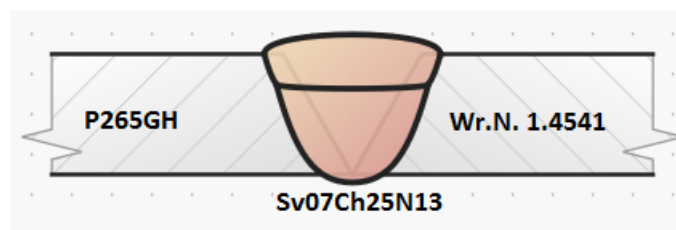
Cílem experimentální části bylo odladit proces orbitálního svařování pro úkos tvaru V tak, aby vytvořený svar splnil kvalitativní požadavky k použití na JET. Zhotovené svary prošly vizuální zkouškou VT a zkouškami ultrazvukem UT a rentgenem RT. Ladění vychází z již vytvořeného programu svařování pro stejný typ svaru s úkosem tvaru U, který byl vytvořen firmou ČEZ Energoserwis. Dále bylo provedeno metalografické vyhodnocení struktury. Zkoumán byl vliv geometrie úkosu na vnesené teplo a promíšení základních materiálů s přídatným materiálem. Smyslem experimentu bylo ověřit myšlenku, že vlivem použití V úkosu by mělo dojít k většímu promíšení ZM s SK a tudíž i k většímu nalegování oblasti spoje na straně uhlíkové oceli za účelem zvýšení odolnosti spoje proti KPN. Díky zvolení úkosu typu V se dá však očekávat větší vnesené teplo a tím i větší zbytková napětí, která odolnost vůči KPN snižují. Lze také očekávat, že se snižující se hodnotou otupení V úkosu bude klesat energie potřebná na provaření kořene. Porovnání vlivu tvaru úkosů je uvedeno v tabulce 7.

Vliv tvaru úkosu	
U	V
snižuje promíšení	zvyšuje promíšení
lepší přístup při stehování	horší přístup při stehování
složitější příprava úkosu obráběním	méně náročná příprava úkosu obráběním

Tabulka 7: Porovnání vlastností úkosů.

9.1 Použité materiály

Tato práce je realizována svařování heterogenního spoje, tzn. svařování dvou základních materiálů nízkouhlíkové oceli P265GH a nerezové oceli Wr.N. 1.4541 (obr. 18). Přídatným materiálem je Sv07Ch25N13, tedy austenitický materiál s vysokým obsahem chrómu. Oba materiály P265GH a Wr.N. 1.4541 jsou ekvivalenty pro materiály používané u heterogenních spojů na JET. Uhlíková ocel P265GH je materiálovým ekvivalentem oceli 22K. Ocel Wr.N. 1.4541 je pak ekvivalentem oceli 08CH18N10T.



Obrázek 18: Materiály použité v experimentální části.

9.1.1 Základní materiál P265GH

Jedná se o nízkouhlíkovou, feriticko-perlitickou ocel s minimální mezí kluzu 265 MPa, která se používá za vyšších teplot. Používá se jako materiál na kotle nebo tlakové nádoby. Oceli s označením P (oceli pro tlakové nádoby) mají snížený obsah uhlíku a nečistot (síra, fosfor), ale obsah manganu je lehce navýšen. Díky chemickému složení (tabulka 8) je svařitelnost tohoto materiálu zaručená [18]. Případnými ekvivalenty jsou ocel 22K dle GOST 2246-70 nebo ocel ČSN 41 2022. Chemické složení a mechanické vlastnosti dané tavby 12294 jsou uvedeny v tabulkách 8 a 9. Materiál byl dodán ve formě hladké bezešvé trubky (EN 10216-2) o průměru 57 mm a tloušťce stěny 2,9 mm. Struktura dodaného ZM je patrná na obrázku 19.

P265GH	C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	Al	Mo	Ti	V	Nb
	požadované složení v hmot. %												
Min.	-	-	-	-	-	-	-	-	0,02	-	-	-	-
Max.	0,2	1,4	0,4	0,025	0,02	0,3	0,3	0,03	-	0,08	0,04	0,02	0,01
	tavba 12294												
	0,15	0,48	0,25	0,013	0,013	0,17	0,04	0,07	0,021	0,02	0,002	0,003	<0,001

Tabulka 8: Požadavky na chemické složení oceli P265GH a složení tavby 12294 [38].

Číslo tavby 12294		Mez kluzu	Pevnost v tahu	Tažnost
		Re _H	R _m	A5
		[MPa]	[MPa]	[%]
Předpis	Min.	265	410	23
	Max.	-	570	-
Tavba 12294		418	508	31

Tabulka 9: Požadavky na mechanické vlastnosti materiálu P265GH a vlastnosti tavby 12294 [38].



Obrázek 19: Feriticko-perlitická struktura ZM P265GH, normalizačně válcováno.

9.1.2 Základní materiál Wr.N. 1.4541

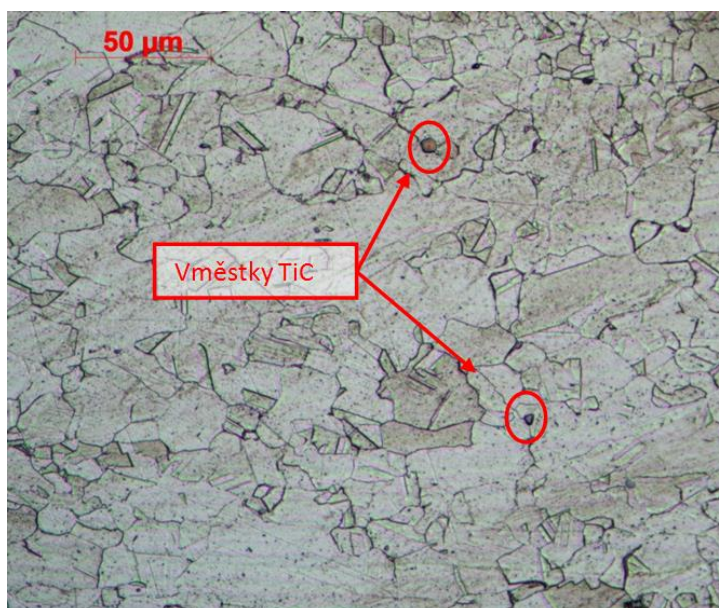
Materiálem je korozivzdorná austenitická ocel stabilizovaná titanem (chemické složení tab. 10). Příkladkem titanu snižuje riziko vzniku interkrystalické koroze MKK, chrání ocel před zcitlivěním a zajišťuje stabilitu při vyšších teplotách a tlacích. Svařitelnost je dobrá, materiál nevyžaduje předehřevy ani tepelné zpracování po svařování. Používá se na tepelné výměníky, součásti jaderných zařízení nebo v potravinářském průmyslu [18]. Ekvivalentem oceli je 08Ch18N10T (GOST 5632-72). Chemické složení a mechanické vlastnosti dané tavby N06908 jsou uvedeny v tabulkách 10 a 11. Materiál byl dodán ve formě hladkých bezešvých trubek (ČSN EN 10216-5) o průměru 57 mm a tloušťce stěny 2,9 mm. Struktura tohoto materiálu je na obrázku 20.

Wr.N. 1.4541	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	N	Ti
	požadované složení									
Min.	-	-	-	-	-	10,5	16,5	2	-	5*(C+N)
Max.	0,08	2	0,75	0,04	0,015	13,5	18	2,5	0,1	0,7
	tavba N06908									
	0,031	0,563	1,05	0,031	0,004	10,536	16,652	2,053	0,012	0,374

Tabulka 10: Chemické složení v hmot. % oceli X6CrNiMoTi 17-12-2 [39].

Číslo tavby		Mez kluzu	Pevnost v tahu	Tažnost	Maximální tvrdost
		Rp 0,2	Rm	A5	HRB
		[MPa]	[MPa]	[%]	
Předpis	Min.	210	515	35	-
	Max.	-	730	-	99
N06908		280	587	54	75

Tabulka 11: Mechanické vlastnosti X6CrNiMoTi 17-12-2 při pokojové teplotě [39].



Obrázek 20: Austenitická struktura ZM s karbidickými vměstky a patrným dvojčatěním po tváření.

9.1.3 Přídavný materiál Sv07Ch25N13

Tato nestabilizovaná austenitická ocel (chemické složení viz tab. 12) se používá na výrobu svařovacích drátů. Vyznačuje se vysokým obsahem chromu a dobrou korozní odolností. Minimální požadované mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 13.

Chemické složení P265GH v hmotnostních %								
	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Co
Min.	-	0,14	0,9	22,8	11,8	-	-	-
Max.	0,09	1	2	26	14	0,018	0,025	0,05
Tavba 103056								
	0,052	0,48	1,85	23,39	13,31	0,005	0,015	0,037

Tabulka 12: Chemické složení PM v hmot. % [50].

Tavba 103056		Mez kluzu		Pevnost v tahu		Tažnost	Kontrakce	Vrubová houževnatost
		R _{p0,2} [MPa]		R _m [MPa]		A5 [-]	Z [-]	KCU 2 [J/cm ²]
		20 °C	350 °C	20 °C	350 °C	20 °C	20 °C	20 °C
Předpis	Min.	284	176	441	153	25	35	49
	Max.							
103056		470	375	600	435	39	59	203

Tabulka 13: Minimální požadované mechanické vlastnosti Sv07Ch25N13 [50].

9.2 Použití Schäfflerova diagramu

K odhadu vlastností a mikrostruktury po svařování a rychlém ochlazení austenitické oceli se používá Schaefflerův diagram. Tento diagram byl poprvé publikován v roce 1949 a od té doby se používá k odhadu obsahu feritu v austenitické nerezové oceli. Diagram je složen z polí různých fází a isoferitických čar. Prvky, které se používají k výpočtu niklového ekvivalentu, podporují tvorbu austenitu a prvky, jež bývají použity k výpočtu chromového ekvivalentu, podporují tvorbu feritu. Ekvivalenty niklu a chromu dohromady určují podíl jednotlivých fází ve struktuře. Diagram se používá i k odhadu feritu v heterogenních spojích. Správné množství feritu ve svarovém kovu je zásadní. Feritická struktura potlačuje vznik trhlin za horka, protože dokáže pojmout prvky jako síru a fosfor, které jinak segregují ve svarovém kovu. Segregací může dojít k navýšení zbytkových napětí. Negativním efektem přítomnosti feritu je náchylnost k selektivní korozi v korozním prostředí. Podíl hranic zrn feritu nad 10 % může vést k selektivní korozi a k prasknutí. Zmíněný podíl je žádoucí v rozmezí 2 až 10 % [10, 16].

Na obrázku 20 je diagram vytvořený pro kombinaci základních materiálů P265GH, Wr.N. 1.4541 a Sv07Ch25N13. Nejdříve byly spočítány ekvivalenty niklu Ni_E a chromu Cr_E pro jednotlivé materiály podle vzorce (3). Na základě toho byly do diagramu vyneseny body pro daný materiál. Ekvivalenty a barevné rozlišení materiálů v diagramu je uvedeno v tabulce 14. Ekvivalenty byly vypočteny podle naměřeného složení taveb materiálů v hmotnostních procentech [17]:

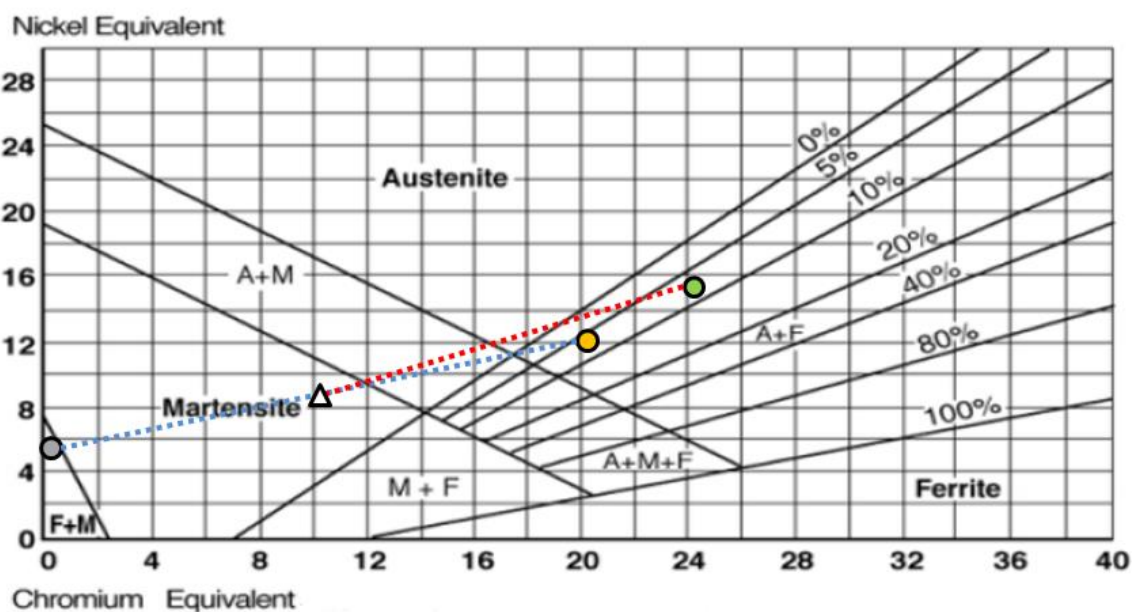
$$(3)Cr_E = \%Cr + \%Mo + 0,5 \cdot \%W + \%V + 1,5 \cdot \%Si + 0,5 \cdot \%Nb + \%Ti$$

$$Ni_E = \%Ni + 30 \cdot \%C + 0,5 \cdot \%Mn + 50 \cdot \%N$$

	P265GH ZM	Wr.N. 1.4541 ZM	SV-07Ch25N13 PM
Cr_E	0,44	20,65	23,75
Ni_E	4,81	12,35	14,20

Tabulka 14: Vypočtené ekvivalenty chromu a niklu pro použité materiály dle taveb s barevným rozlišením pro diagram (obrázek 21).

Při svařování byla elektroda umísťována nepatrně blíže k austenitické oceli z důvodu její vyšší teploty tání. Vyšší teplota tání souvisí s nižší tepelnou vodivostí (viz kapitola 2). Za předpokladu, že je elektroda při svařování umísťována více ke korozivzdorné oceli je možné odhadnout stejné promíšení obou základních materiálů. To je znázorněno bílým trojúhelníkem v polovině spojnice (modré) bodů základních materiálů (obrázek 21). Spojíme-li vzniklý bod (bílý trojúhelník) s bodem přídavného materiálu (zelený bod), můžeme na této spojnici odhadnout výslednou strukturu pro různé hodnoty promíšení. Například při promíšení, při kterém by ve svarovém kovu bylo 50 % základního materiálu a 50 % přídavného materiálu, by vznikla struktura odpovídající bodu v polovině červené spojnice. Podle sestrojeného diagramu by tak vznikla austeniticko-martenzitická struktura. Ideální struktura z hlediska obsahu δ – feritu by pak odhadem z diagramu vznikla při promíšení zhruba 5 – 35 % základních materiálů. Pak by ve svarovém kovu bylo obsaženo mezi 2 až 10 % požadovaného množství δ – feritu.



Obrázek 21: Schaefflerův diagram [16].

10 Použitá zařízení

Orbitální sestava

K samotnému svařování byla použita sestava od francouzské firmy Polysoude. Sestava se skládá ze svařovacího zdroje, svařovací hlavy, podavače drátu a dálkového ovladače.

Svařovací zdroj Polysoude P6

Jedná se o mobilní svařovací invertorový zdroj napájený třífázovou soustavou o napětí 400 V. Zdroj (obr. 23) je schopný generovat proud až 400 A. Pro pohodlnější obsluhu je zdroj také vybaven programovatelnou jednotkou, kterou lze ovládat pomocí uživatelského rozhraní firmy Polysoude přes dotykovou obrazovku. Proces lze pak během svařování kontrolovat dálkovým ovládáním (obr. 22) a dělat tak korekce parametrů v průběhu svařování. Parametry z procesu svařování zaznamenávají a je možné si je vytisknout. Zdroj je také vybaven chladícím okruhem pro svařovací hlavu. Na svařovacím zdroji je možné naprogramovat 6 parametrů:

- průtok ochranného plynu,
- hodnoty pulzního proudu a jeho frekvenci,
- rychlost otáčení svařovací hlavy,
- rychlost přísunu drátu,
- nastavení AVC (Arc Voltage Control),
- výkmit elektrody.

Svařovací hlava MUIV 115

Otevřené svařovací U-hlavy jsou navrženy ke svařování metodou WIG bez přídavného drátu nebo s přídavným drátem. Tento typ je určen pro trubky o průměru 50 až 115 mm. Hlava se skládá ze svařovací desky, upínacích svorek, elektromotorů pro otáčení hlavy a výkmit elektrody. Hlava (obr. 22) je navíc opatřena chlazeným hořákem WIG. Hlavu lze ovládat pomocí dálkového ovládání. Zařízení je také vybaveno funkcí AVC (Arc Voltage Control), která upravuje délku svařovacího oblouku podle nastaveného napětí. Pomocí této funkce je udržováno konstantní nastavené napětí a eliminují se tak nepřesnosti výroby, nepřesnosti úpravy úkosů a vliv změny nárůstu objemu svarové lázně.

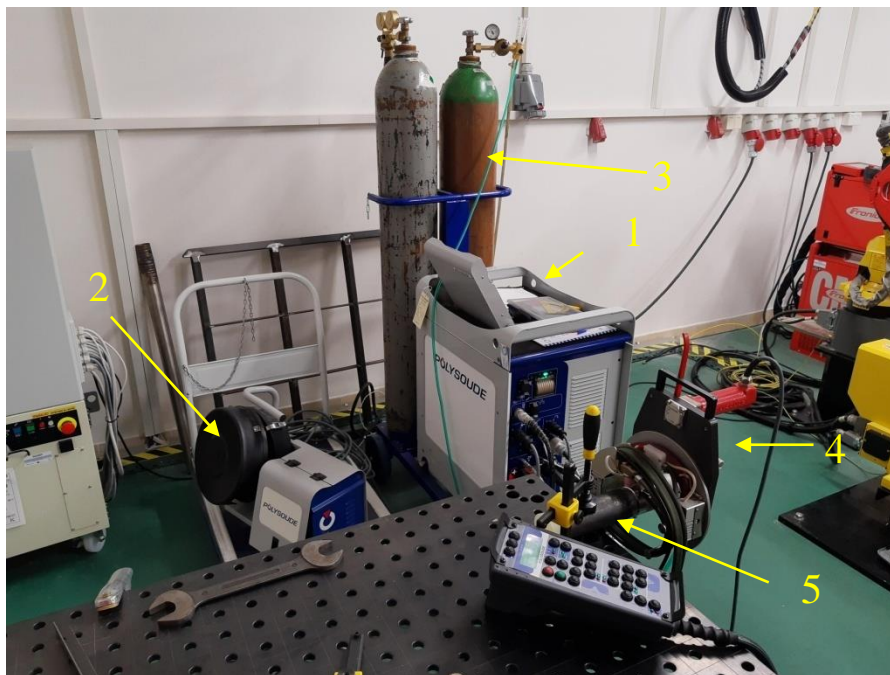
Ochrany svaru je dosaženo v okolí elektrody tam, kam je namířen proud plynu vycházející z trysky. Ke svařování byla použita wolframová elektroda WL 20 legovaná oxidem lanthanu La_2O_3 o průměru 2,4 mm a délce 50mm. Špička elektrody byla zbroušena do vrcholového úhlu 30° .

Podavač drátu P3

Jedná se o nezávislý přenosný mechanismus pro dodávku PM (obr. 23). Podavač musí být zapojen k oddělenému zdroji elektrického proudu.



Obrázek 22 : Otevřená svařovací hlava s dálkovým ovladačem.



Obrázek 23: Uspořádání svařovací sestavy – 1 svařovací zdroj, 2 podavač drátu, 3 láhev s argonem, 4 svařovací hlava, 5 sestehované trubky.

Postup experimentu:

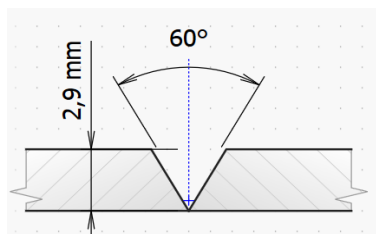
- příprava úkosů trubek,
- obroušení trubek v okolí úkosů,
- očištění a nastehování pod ochranným plynem,
- odladění procesu svařování,
- nedestruktivní vizuální vyhodnocení,
- nedestruktivní ultrazvukové vyhodnocení,
- příprava a vyhodnocení vzorků na metalografii,
- vyhodnocení průběhu tvrdosti,
- porovnání vneseného tepla.

11 Příprava úkosů

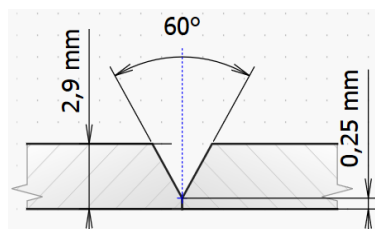
Celkem byly připraveny 3 typy úkosů s úhlem otevření 60° (obr. 24-27). Vzájemně se odlišovaly rozměry otupení (tabulka 15). Geometrie úkosů je naznačena na obrázku 4 až 7. Svařování proběhlo na 2 vrstvy - kořenovou a krycí (obrázek 28).

Úkos s V otevřením 60°	
Bez otupení	Obr. 24
Otupení 0,25 mm	Obr. 25
Otupení 0,50 mm	Obr. 26
Úkos U	
Obr. 27	

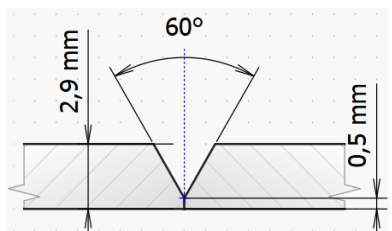
Tabulka 15: Variace jednotlivých svařovaných úkosů.



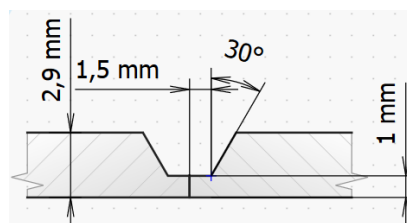
Obrázek 24: Úkos V bez otupení.



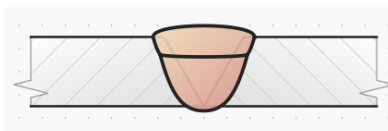
Obrázek 25: Úkos V otupení 0,25 mm.



Obrázek 26: Úkos V otupení 0,5 mm.



Obrázek 27 : Úkos U.



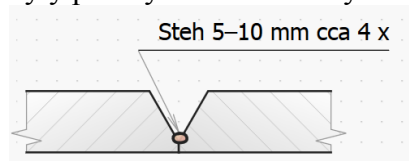
Obrázek 28 : Schéma uložení jednotlivých housenek.

Očištění trubek

Před stehováním byly trubky zhruba do 40 mm od začátku úkosu vybroušeny do kovového lesku lamelovým brusným kotoučem. Účelem této operace je odstranění nečistot a oxidů z blízkého okolí svaru k zabránění znečištění a zanesení svaru.

Stehování

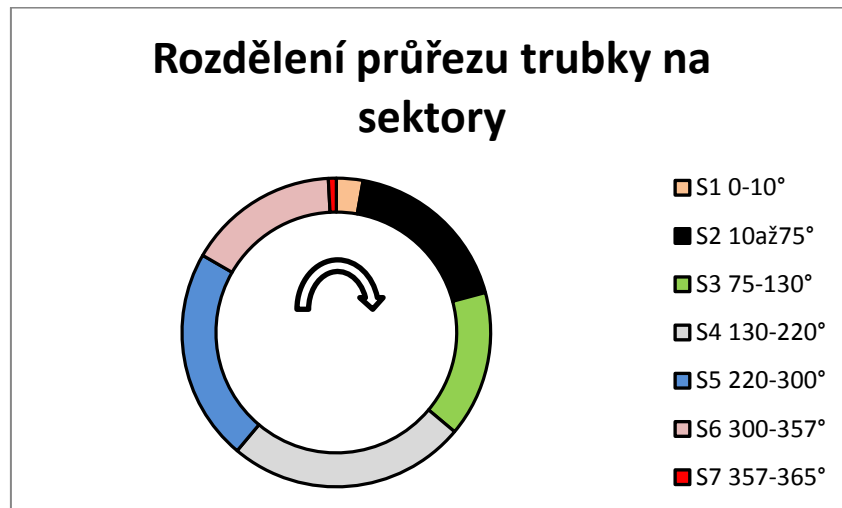
Stehování trubek bylo provedeno metodou 141 ručně. Byl použit proud 35 až 40 A bez přídavného materiálu. U každé dvojice trubek byly vytvořeny 3 - 4 stehy (obr. 29). Před samotným stehováním byly plochy úkosů očištěny a odmaštěny acetonem



Obrázek 29: Steh po obvodu trubky pro všechny úkosy.

12 Odladění procesu svařování

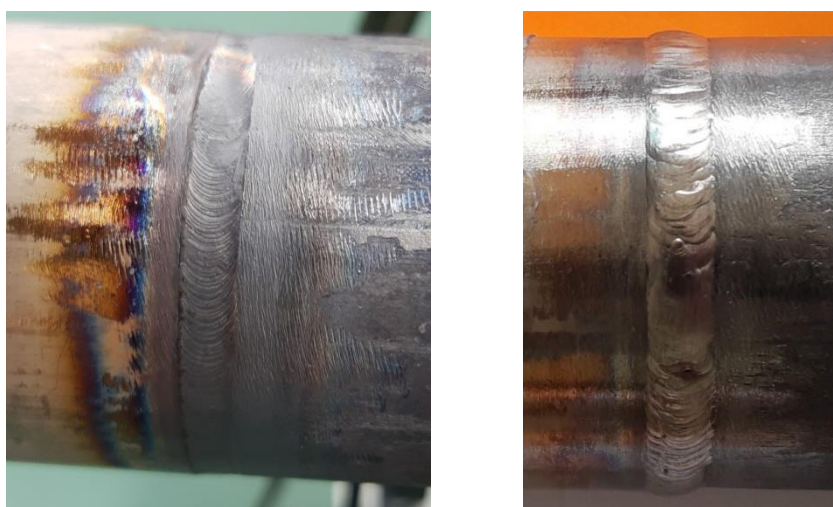
Parametry pro orbitální svařování byly převzaty z programu vytvořeného firmou ČEZ Energoservis (tab. 16). Program byl vytvořený pro typ spoje se shodným tvarem úkosu U, ale pro odlišný průměr trubek. Bylo tedy dané rozdělení průřezu trubky na 7 sektorů, které zůstalo zachováno (obr. 30). Zároveň zůstaly během svařování všech vzorků konstantní hodnoty průtoku ochranného a formovacího plynu. Bylo však potřeba odladit svařovací proud a rychlost podávání drátu u jednotlivých typů úkosů. Svařování proběhlo na 2 vrstvy – krycí a kořenovou (obr. 31). S lišící se tloušťkou otupení úkosů bylo třeba přizpůsobit hodnoty pulzního proudu pro daný typ úkosu. Zároveň změnou tvaru úkosu i změnou otupení dochází ke změně plochy úkosu a tím ke změně objemu, který je třeba vyplnit přídavným materiálem tak, aby se vytvořil svar s odpovídajícím převýšením. Proto bylo zapotřebí upravit i rychlost přísunu drátu na odpovídající hodnotu. Materiály vstupující do procesu svařování jsou uvedeny v tabulce 17. Seznam vzorků, které byly svařeny během ladění procesu, jsou uvedeny v tabulce 18. Ve stejné tabulce je uvedeno i značení vzorků.



Obrázek 30: Rozdělení průřezu trubky na sektory s naznačeným směrem svařování (poslední sektor z části překrývá první).

Sektor	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Kořenová vrstva							
I_p [A]	110	105	105	95	95	90	100
I_z [A]	60	60	58	55	55	55	58
V_{dr} [mm/min]	250	250	300	300	300	300	350
U [V]	8	7,9	7,8	7,8	7,8	7,9	8
V_{oh} [mm/min]	50	50	50	50	50	50	50
Krycí vrstva							
I_p [A]	70	65	64	62	60	57	62
I_z [A]	40	40	40	40	40	40	42
V_{dr} [mm/min]	350	330	280	200	250	270	280
U [V]	8,6	8,4	8,4	8,4	8,5	8,5	8,5
V_{oh} [mm/min]	50	50	50	50	50	50	50

Tabulka 16: Původní program – dále upravován jen pulzní proud kořenové vrstvy a rychlost přísunu drátu v obou vrstvách.



Obrázek 31: Vzhled kořenové vrstvy (vlevo) a krycí vrstvy (vpravo) po svařování.

Základní materiál		
	Materiál 1	Materiál 2
ZM	P265GH	Wr.N. 1.4541
Průměr [mm]	57	57
Tloušťka stěny [mm]	2,9	2,9
Stehování	Bez PM	
Odmaštění	Aceton	
Přídavný materiál		
Označení	Sv-07Ch25N13	
Průměr [mm]	1	
Elektroda		
Typ	Lanthan	
Průměr [mm]	2,4	
Úhel nabroušení [°]	30	
Otupení [mm]	0,2	
Ochranný plyn		
Typ	Argon	
Množství průtoku [l/min]	14 l/min	
Formovací plyn		
Typ	Argon	
Množství průtoku [l/min]	2 l/min	

Tabulka 17: Materiály vstupující do procesu svařování.

Typ úkosu	Vzorek
U	U1
	U2
	U3
V otupení 0,25 mm	V25_1
	V25_2
	V25_3
V otupení 0,50 mm	V50P1
	V50P2
	V50P3
	V50_1
	V50_2
	V50_3
V bez otupení	V0_1
	V0_2
	V0_3
	V0_4
	V0_5

Tabulka 18: Seznam svařovaných vzorků s označením podle typu úkosu.

12.1 Úkos U

První vzorek U1 byl svařen podle parametrů programu dle Energoservisu (ES). Kořen byl podle očekávání a vizuální kontroly vyhovující, a proto došlo u dalších vzorků U2, U3 pouze k úpravě rychlosti podávání drátu při provedení krycí vrstvy. Parametry svařování u vzorku U1 jsou uvedeny v příloze – příloha 1.

U vzorku U2 došlo pouze k navýšení rychlosti podávání drátu během svařování krycí vrstvy od sektoru S2 o 50 mm/min a v sektoru S5 o dalších 50 mm/min. Změna je zaznamenána v příloze – příloha 2), symbol + znamená +50 mm/min, tzn. ++d znamená +100 mm/min.

U vzorku 3 byla navýšena rychlost podávání drátu během svařování krycí vrstvy v programu od sektoru S2 až do konce o 50 mm/min. Během svařování, pak bylo na dálkovém ovládní opět přidána rychlost od sektoru S5 o 50 mm/min (příloha 3).

12.2 Úkos V50

První úprava programu pro kořenovou vrstvu proběhla u V úkosu s otupením 0,50 mm z důvodu největšího počtu vzorků k odladění. U prvního vzorku V50P1 proběhla změna rychlosti podávání drátu s ohledem na zmenšení objemu, kterou je potřeba vyplnit PM. Podle výpočtu se obsah průřezů úkosů U a V s otupením liší zhruba o polovinu. Původní myšlenka byla tedy snížit i rychlost o polovinu. To by však znamenalo snížení rychlosti drátu v sektoru S1 z 250 na 125 mm/min. Minimální nastavitelná rychlost podavače je však jen 150 mm/min. Z toho důvodu byla nastavena tato hodnota a byl zachován stejný rozdíl v rychlostech podávání drátu v ostatních sektorech, tedy z nastavených hodnot pro úkos U, byla pro úkos V rychlost snížena v každém sektoru o 100 mm/min (příloha 7). Toto nastavení se osvědčilo. Došlo k dostatečnému vyplnění a naopak nedocházelo ke zvětšení objemu svarové lázně a k zanášení elektrody. Hodnoty proudu odpovídaly hodnotám v původním programu pro úkos U. Tyto hodnoty však bylo potřeba navýšit, jelikož nedošlo k provaření kořene ani v jednom sektoru. Z toho důvodu byla zhotovena pouze kořenová vrstva.

U druhého vzorku V50P2 (tabulka-příloha 8) byla navýšena hodnota pulzního proudu v každém sektoru o 10 A. Pouze v sektoru S3 a S4 byl vzhledem k poloze navýšen proud o 5 A. Důvodem byla obava z možného stékání svarové lázně vlivem gravitace k elektrodě a horšímu působení tepla oblouku na ZM. K provaření kořene došlo pouze v sektoru S3, S5 a S6. V sektoru S6 došlo k provaření pouze do oblasti heftu. Dále už kořen provařený nebyl. Krycí vrstva nebyla zhotovena.

U následujícího vzorku V50P3 (tabulka-příloha 9) byly navýšeny hodnoty pulzního proudu kořenové vrstvy o 5 A v sektorech, kde u vzorku V50P2 nedošlo k provaření, tzn. v sektorech S1, S2, S4 a S5. Zároveň byla přidána 1 sekunda k času 3 sekund před začátkem otáčení svařovací hlavy po zapálení oblouku k větší akumulaci tepla a snazšímu provaření v sektoru S1. Kořen podle vizuální kontroly vykazoval dostatečné provaření, proto byla zhotovena i krycí vrstva. Zde se upravila rychlost přísunu drátu o polovinu hodnoty pro krycí vrstvu z programu pro úkos U. Tam, kde nešla snížit hodnota o polovinu, byla nastavena minimální nastavitelná hodnota 150 mm/min. Během svařování krycí vrstvy došlo k úpravě rychlosti

přísunu drátu v sektoru S5 o 3 x +50 mm/min (+++d tabulka 14). Tento přídavek byl příliš velký. Proto byla rychlost v sektoru S6 opět snížena o 2 x 50 mm/min (--d tabulka 14).

U vzorku V50_1 byla u parametrů pro svaření kořenové vrstvy upravena pouze hodnota pro začátek otáčení hlavy po zapálení oblouku ze 4 s na 6 s. Kořenová vrstva byla dle vizuální zkoušky provařena. V krycí vrstvě byly použity stejné hodnoty pro rychlost drátu jako u vzorku V50P3. Během svařování byla dálkovým ovladačem rychlost navýšena od sektoru S3 o 50 mm/min+d (tabulka-příloha 4).

U vzorku V50_2 (tabulka-příloha 5) byla oproti vzorku V50_1 upravena doba před začátkem otáčení hlavy z 6 s na 5 s z důvodu převýšeného kořene u vzorku V50_1. Ostatní parametry zůstaly pro kořenovou vrstvu nezměněné. V krycí vrstvě byla navýšena rychlost drátu o 50 mm/min v sektorech S1, S2 a S3. Před začátkem svařování však byl nastaven špatný úhel přísunu drátu a elektrody, díky čemuž došlo k velkému nárůstu objemu svarové lázně v sektoru S4. To mělo za následek kontakt elektrody s lázní a zkrat, který přerušil svařování. Zbytek krycí vrstvy byl dokončen se správným nastavením, avšak nelze vyhodnotit, zda bylo navýšení rychlosti drátu vhodné.

Poslední vzorek V50_3 s otupením 0,5 mm (tabulka-příloha 6) měl navýšený pulzní proud svařování v sektorech S3 a S4 o 5 A. Po vizuální kontrole předchozího vzorku V50_2 došlo k navýšení těchto hodnot k dosažení rovnoměrnějšího provaření kořene. U krycí vrstvy byla přidána rychlost přísunu drátu během svařování v sektorech S3 až S7 o 50 mm/min. V sektorech S5 a S6 bylo velké převýšení. Vhodnější se proto jeví parametry pro krycí vrstvu použité u vzorku V50_1.

12.3 V25

U vzorků s otupením 0,25 mm byla nastavena stejná rychlost podávání drátu v kořenové vrstvě jako u vzorků s otupením 0,5 mm. Hodnoty pulzního proudu byly u vzorku V25_1 ponechány jako v původním programu dle ES (tabulka-příloha 10). Provaření kořene bylo dle vizuální kontroly slabé. Z toho důvodu nebyla provedena krycí vrstva ani další NDT.

Vzhledem ke slabému provaření kořene V25_1 bylo plošně přidáno 5 A pulzního proudu u vzorku V25_2 (tabulka-příloha 11). U stejného vzorku podle vizuální kontroly po svařování nedošlo k dostatečnému k provaření v sektoru S4. Dále nebyla zhotovena další vrstva ani NDT.

U vzorku V25_3 bylo přidáno 5 A pulzního proudu v sektoru S4. Kořen se jevil podle vizuální kontroly provařený. U krycí vrstvy byly použity parametry z průběhu svařování vzorku V50_1. Byla pouze pozměněna rychlost v sektoru S1 (tabulka-příloha 12).

12.4 Úkos V0

Vzhledem k absenci otupení u posledního úkosu tvaru V byly ponechány původní parametry programu podle ES u vzorku V0_1. Rychlost přísunu drátu byla přepočtena podle změny obsahu průřezu úkosů. Poměrem U/V0 byla vynásobena původní rychlost přísunu drátu u úkosu U. Kořen se neprovařil v sektorech S1, S2 a S4. U tohoto vzorku vznikla zhruba

v polovině sektoru S5 díra při stehování, a proto bylo svařování před tímto místem ukončeno. Při svařování by totiž kvůli automatickému udržování velikosti oblouku došlo k zajetí elektrody do vzniklého otvoru a následnému kontaktu elektrody s materiálem. Parametry krycí vrstvy byly nastaveny dle programu pro úkos U a jeví se jako vyhovující (tabulka - příloha 13).

U vzorku V0_2 byly navýšeny hodnoty pulzního proudu o 5 A v sektorech, ve kterých u předchozího vzorku nedošlo k provaření, tedy v sektorech S1, S2 a S4. Zároveň byl navýšen čas před začátkem otáčení hlavy T30 o 1s, aby došlo k provaření počátku svaru. Podle vizuální kontroly byl kořen provařen. Krycí vrstva zůstala stejná jako u V0_1. Stejnými parametry jako V0_2 byl svařen i vzorek V0_3, u kterého proběhlo zároveň měření teplotních cyklů. Parametry svařování V0_2 a V0_3 jsou uvedeny v přílohách 14 a 15.

U vzorku V0_4 byly za účelem rovnoměrnějšího provaření kořene, na základě vizuální zkoušky předchozích vzorků, navýšeny hodnoty pulzních proudů v sektorech S2, S6 a S7 o 5 A. Podle vizuální kontroly bylo provaření kořene rovnoměrnější. Parametry krycí vrstvy zůstaly neměnné (tabulka-příloha 16).

Po provedení zkoušek RT a UT bylo zjištěno, že u vzorků V0_2, V0_3 a V0_4 jsou studené spoje. U vzorku V0_4 byly studený spoj pouze v sektoru S4, kdy nebyly jinak ani patrné stopy stehování. Bylo zjištěno, že navyšováním pulzního proudu, dochází v sektoru S4 ke zvětšení svarové lázně, která následně zhoršuje vlivem působení gravitace přenos tepla do ZM (kapitola 7.1). Tento jev myšlenka byla následně ověřena na vzorku V0_5.

U vzorku V0_5 byla oproti vzorku V0_4 navýšena hodnota pulzního proudu v sektoru S1 pro rovnoměrnější kořen. Dále došlo ke snížení pulzního proudu v sektoru S4. Ostatní parametry zůstaly nezměněné (tabulka-příloha 17). Během svařování došlo k navýšení rychlosti přísunu drátu dálkovým ovladačem, což zapříčinilo hromadění velkého množství kovu v okolí svarové lázně, vznik pórů i následné přituhnutí drátu na jedné straně ZM. Oproti ostatním úkosům byly trubky pro tento vzorek připravovány dodatečně a stehy byly chybně zhotoveny s přídavným materiálem. Z toho důvodu se v kořenové vrstvě objevily vady v poloze okolo stehů. U vzorku V0_4 tyto vady nevznikly.

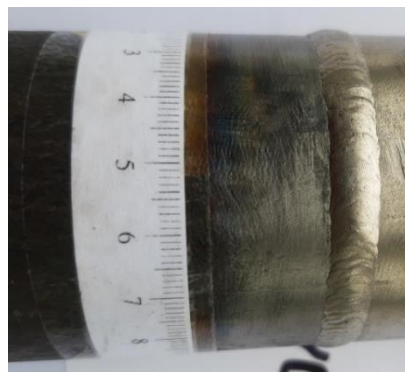
13 Nedestruktivní zkoušení

Pro kontrolu kvality svarů proběhlo i nedestruktivní testování zhotovených svarů k odhalení nežádoucích vad. Metody byly zvoleny na základě pokynů normy pro výběr metod nedestruktivního zkoušení ČSN EN ISO 17 635:2018. Byla provedena zkouška vizuální VT, ultrazvuková UT a radiografická RT.

Hodnocení proběhlo dle normy ČSN EN ISO 5817, která uvádí stupně jakosti svaru značené B, C, D. Stupněm B je označován nejvyšší možný stupeň kvality svaru. Stupeň B zároveň splňuje jakostní požadavky k použití na jaderné elektrárně. Z toho důvodu byly zmapovány vady, které nesplňovaly kritéria přístupnosti pro stupeň kvality B. Vyhodnocení nedestruktivních zkoušek u jednotlivých vzorků je v příloze (přílohy 1-17). Polohy vad jsou zaznamenány v orientačních schématech ve stejné příloze. Vady byly lokalizovány pomocí měřítka (v mm).

13.1 Vizuální zkouška (VT)

Pro první kontrolu svaru proběhla po svařování vizuální zkouška (dle ČSN EN ISO 17 637:2016). Kvůli špatné přístupnosti proběhla kontrola kořenové vrstvy nepřímo za pomoci zrcátka a svítilny. Na trubky bylo umístěno měřítko s počátkem shodným se začátkem svařování, které pomohlo lokalizovat polohu vady (obr. 32).



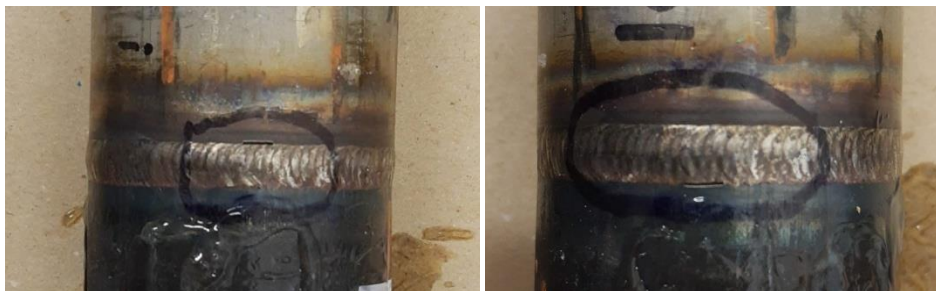
Obrázek 32: Měřítka umístěná na spojených trubkách, vzorek V0_5.

13.2 Ultrazvuková zkouška (UT)

Tato zkouška byla provedena impulzovou odrazovou metodou dle ČSN EN ISO 16810:2014. Využívá se při ní odraženého nebo rozptýleného signálu od libovolného rozhraní ve zkoušeném předmětu. Signál je charakterizován amplitudou a její polohou na časové základně. Za účelem nastavení ultrazvuku byla vyjiskřováním zhotovena umělá vada - referenční měřka (parametry tabulka 19). Trubka vybraná k vyjiskřování prošla

nejdříve radiografickou zkouškou, tak aby umělá vada byla zhotovena na místě bez dalších vad. Umělá vada byla zhotovena na straně uhlíkové i nerezové oceli (obr. 33) k simulaci studeného spoje (4011 dle ČSN EN 5817) nebo podobné diskontinuity ve svaru.

Na základě echa byla zjištěna velikost amplitudy pro danou vadu. Tato hodnota byla nastavena jako prahová, se kterou byla poté srovnávána echa během měření. Překročení této hodnoty znamenalo indikaci vady. Všechny vady byly potvrzeny buď vizuálním, nebo radiografickým zkoušením. Jako vazebný prostředek k přenosu ultrazvuku do materiálu byl použit glycerin.



Obrázek 33: Umělá vada zhotovená vyjiskřováním (vlevo na straně austenitického materiálu, vpravo na straně uhlíkové oceli).



Obrázek 34: Defektoskop k provádění inspekce ultrazvukem.

Umělá vada - heterogenní svar	
základní materiál 1	uhlíková ocel P265GH
Základní materiál 2	austenitický nerez Wr.N. 1.4541
Přídavný materiál	austenitický Sv07Ch25N13
tloušťka stěny	2,9 mm
průměr trubky	57 mm
vada pod úhlem	45°
do hloubky	1,5 mm
vada na straně austenitu i uhlíkové oceli	

Tabulka 19: Parametry umělé vady vytvořené k nastavení ultrazvuku.

13.3 Radiografická kontrola (RT)

Tato nedestruktivní metoda testování je popsána v normě ČSN EN ISO 17 636 – 1. Norma doporučuje uspořádání zkoušky a způsob jejího provedení. Vzorky byly nejdříve prozařovány přes dvě stěny ve 4 polohách po otočení o 90° k obsazení celého obvodu trubky. Poté bylo zjištěno, že je dostačující provést snímky pouze ve dvou polohách po pootočení trubky o 90°. Podle zkoušeného materiálu bylo nastaveno na rentgence (obr. 35) napětí 100 kV a proud 5,5 A.



Obrázek 35: Radiografická inspekce.

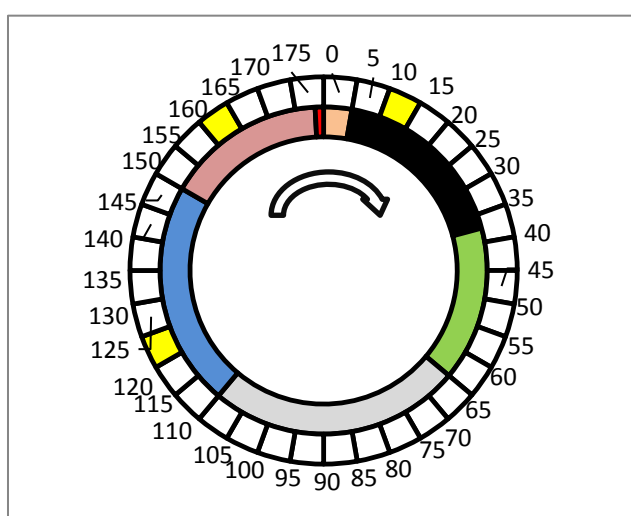
Z vyhodnocení NDT vyplývá, že byly úspěšně odladěny parametry pro úkos V s otupěním 0,5 mm a pro úkos V bez otupění - vzorky V50_1, V50_2, V50_3 a V0_5. Tabulky s odladěnými parametry podle experimentu jsou uvedeny v přílohách 18 a 19. U těchto vzorků byly zjištěny nepřijatelné vady v místech, kde byly trubky před svařováním stehovány. Stehy vytváří na povrchu úkosu nehomogenitu, na kterou mechanizované svařování nedokáže zareagovat a může tak dojít k tvorbě vad ve formě studeného spoje 4013, neprovařeného kořene 4021 nebo

dokonce póru 2011. Oblast stehu z pohledu kořene je zachycena na obrázku 36. Na obrázku je patrné i znečištění kořene v důsledku nedostatečného očištění vnitřku trubek před svařováním.



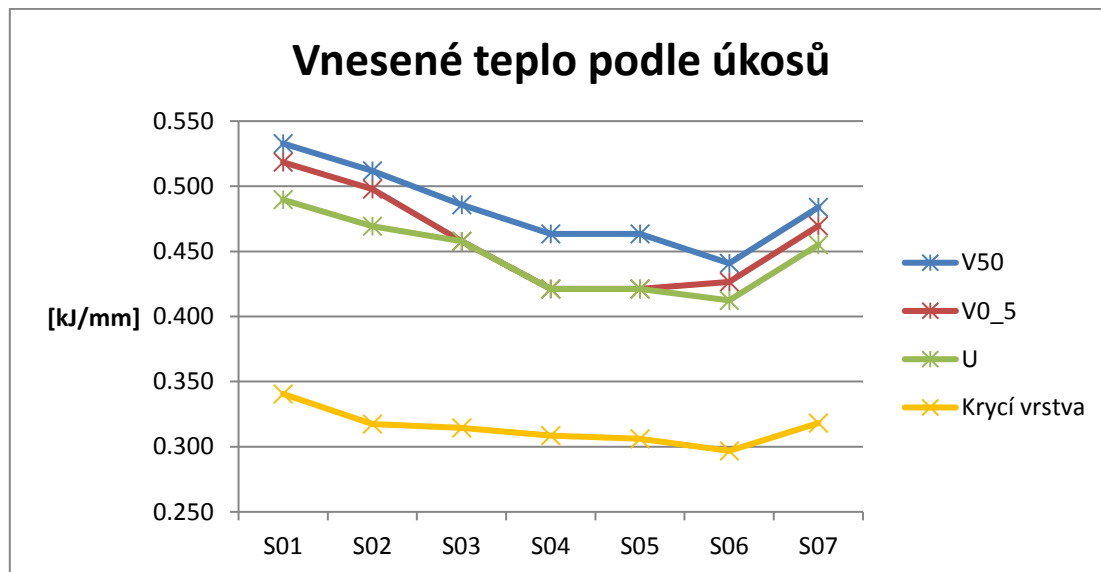
Obrázek 36: Studený spoj na místě původního stehu – svařenec V0_5 (steh v poloze 50).

Návrhem k eliminaci těchto vad je změna umístění stehů do sektorů, ve kterých dochází s ohledem na polohu svařování k snazšímu provaření (obr. 37). Prvním navrhovaným místem je začátek sektoru S2, ve kterém je hodnota pulzního proudu vysoká a zároveň nedochází ve větší míře ke stékání svarové lázně vlivem gravitace ve směru svařování. Druhým místem je začátek sektoru S5 kdy má naopak svarová lázeň tendenci stékat proti směru svařování a teplo z oblouku tak může působit více na ZM. Třetí navrhovaná poloha stehu by mohla být mezi zmíněnými dvěma stehy, tak aby nezasahovala do koncového sektoru. Dalo by se uvažovat o snížení počtu stehů. Svařovací hlavice je však během svařování umístěna na jedné z trubek a stehy tak musejí přenášet váhu trubky i hlavice. Snížením počtu stehů klesá únosnost vytvořeného stehování.



Obrázek 37: Návrh umístění stehů k eliminaci vad (vlevo), čísla označují přibližnou polohu v mm podle umístěného měřítka (vpravo).

14 Porovnání vneseného tepla



Obrázek 38: Grafické porovnání vneseného tepla v jednotlivých sektorech kořenových vrstev a krycí vrstvy (vypočítaného podle nastavených parametrů).

Na základě parametrů odladěných programů bylo přibližně vypočteno vnesené teplo. Nejdříve byl pro každý sektor podle nastaveného pulzního proudu a základního proudu vypočten průměrný proud I_A proud podle vzorce (2) [49]. Hodnoty trvání pulzního proudu t_p a základního proudu t_z byly během svařování shodně 50 ms. Následně bylo vypočítané vnesené teplo v kJ/mm podle vzorce (1 Kapitola 5.2). Vypočítané hodnoty průměrného proudu a vneseného tepla na jednotku délky jsou uvedeny v příloze 20 a graficky znázorněny na obrázku 38.

$$(2)I_A = \frac{I_p \cdot t_p + I_z \cdot t_z}{t_p + t_z} \text{ [A]}$$

$$(1)Q_v = \frac{0,6 \cdot I_A \cdot U}{v_{oh}} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{mm}} \right]$$

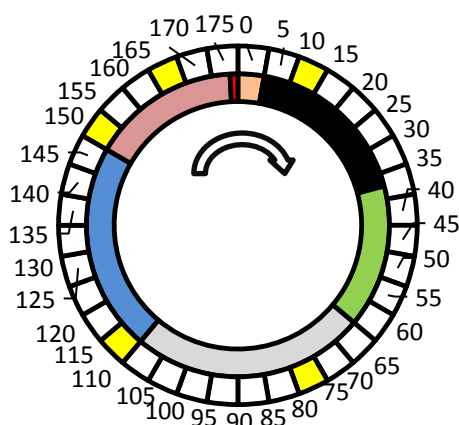
Podle očekávání bylo největší teplo vneseno u vzorků s úkosem V s otupením 0,5 mm. Se zvyšující se tloušťkou otupení bylo potřeba navýšit hodnotu pulzního proudu k provaření a tím vzrostlo i vnesené teplo u kořenové vrstvy. Na obrázku 38 je patrné, že vnesené teplo a tedy i parametry během svařování byly u vzorků V0_5 a V50_3 v sektorech S3 až S5 shodné. Vnesené teplo má vliv na promíšení svarového kovu se základními materiály, strukturu TOO a tím pádem i na mechanické vlastnosti. Z obrázku lze vyčíst, že během svařování dochází k postupnému snižování vneseného tepla. Vnesené teplo se v tomto případě snižuje díky postupnému snižování pulzního proudu v jednotlivých sektorech. U odladěných programů bylo potvrzeno, že pulzní proud v koncovém sektoru S6 odpovídá zhruba 80 % hodnoty pulzního proudu v počátečním sektoru S1. Toto nastavení bylo doporučeno podle kapitoly 7.2. Stejně tak bylo prokázáno, že dochází k postupnému snižování svařovacího

proudu. V případě této práce byl v programu svařování ještě sektor S7, ale zde dochází k částečnému překryvu se sektorem S1 a z toho důvodu dochází k nárůstu pulzního proudu k zajištění plynulého přechodu mezi sektory.

15 Metalografické hodnocení

K metalografickému hodnocení byl vybrán svařenec V0_5. U tohoto svařence se povedlo odladit svařovací program a zároveň u něj bylo u tohoto svařence vneseno menší množství energie než v programu odladěném pro úkos V s otupěním 0,5 mm. Vzhled koruny kořene svaru je zachycen v příloze 77. Konkrétně byly odebrány vzorky v poloze 13, 80, 110, 150 a 168 (obr. 39). Vzorky z oblasti 80 (sektor S4) a 150 (sektor S5) byly vybrány z toho důvodu, že navazovaly na oblasti, ze kterých byly odebrány vzorky pro korozní zkoušky pod napětím. Díky tomu lze následně vyhodnotit vliv struktury na výsledek této korozní zkoušky. Oblast 80 navíc spadá do sektoru S4, kde na svarovou lázeň působí gravitační síla komplikující provaření kořene. Oblasti 110 a 167 představují místa stehů (sektor S6). Z polohy 13 byl odebrán vzorek za účelem srovnání se vzorkem 521_2_2.

U vzorku 521_2_2 bylo použito laserové svařování s polohovadlem. Tento vzorek byl do metalografického hodnocení zahrnut za účelem porovnání vlastností mikrostruktury spoje svařené laserem a metodou WIG. Svařování laserem proběhlo bez PM na trubkách o průměru 44,5 mm a tloušťce stěny 2,6 mm. Parametry svařování jsou uvedeny v příloze 21. Během laserového svařování docházelo k otáčení trubek v polohovadle, ale zdroj tepla svoji polohu neměnil na rozdíl od orbitálního svařování. Svařování tedy proběhlo v poloze PA. Poloha 13 byla pro srovnání se vzorkem svařeným laserem vybrána proto, že ji stále považovat za polohu svařování PA. Polohu v rozmezí 0 ° až 10 ° nešlo pro srovnání použít, protože zde dochází k překrývání sektoru S1 a S7. Zároveň zde dochází k postupnému snižování proudu - „doběhnutí“ oblouku a vytvoření charakteristického zakončení ve tvaru šipky (obrázek 39).



Obrázek 39 : Místa odběru vzorků k metalografii (vlevo) a zakončení svaru vpravo.

Vzhledem k odlišné odolnosti obou ZM a SK vůči leptadlům byly vzorky nejdříve leptány roztokem 3% Nitalu ke zviditelnění struktury uhlíkové oceli. Svarový kov a austenitický ZM byly proti Nitalu odolné, následně bylo provedeno leptání SK a austenitického ZM. K leptání svarového kovu byla použita směs kyseliny dusičné HNO_3 , kyseliny chlorovodíkové HCl a glycerinu (pro zpomalení reakce) v poměru 1:2:2.

15.1 Metalografické hodnocení trubky V0_5 svařené metodou WIG

Na základě pozorování makrostruktury vzorků V0_5 (přílohy 24 až 32) lze vidět, že v kořenové části je plynulý přechod mezi ZM a SK bez přebytku převýšení kořene. Krycí vrstva pak vykazuje převýšení bez ostrého vrubu. Výjimkou je vzorek V0_5 167, který odpovídá místu, v němž během stehování došlo k narušení úkosu a vytvoření díry v úkosu. Tím vznikl vrub ještě před samotným provedením kořenové vrstvy (příloha 32). Následně došlo k poměrně velkému převýšení kořene vůči austenitickému ZM, vytvoření ostrého vrubu kořene a zoxidování okolí díry, protože vnitřek trubky nebyl vyplněn formovacím plynem. V důsledku technologické chyby, kdy byl použit ke stehování vzorku V0_5 použit odlišný PM, jsou patrné dvě odlišné oblasti SK s odlišnou strukturou.

V oblasti kořene téměř všech vzorků došlo na straně uhlíkové oceli v kořenové části nebo v přechodu krycí a kořenové vrstvy k podtavení ZM. Šířka TOO vzorků svařence V0_5 se pohybuje mezi 4 až 5 mm. Na makrostrukturním snímku je patrný i výkyv elektrody v krycí vrstvě.

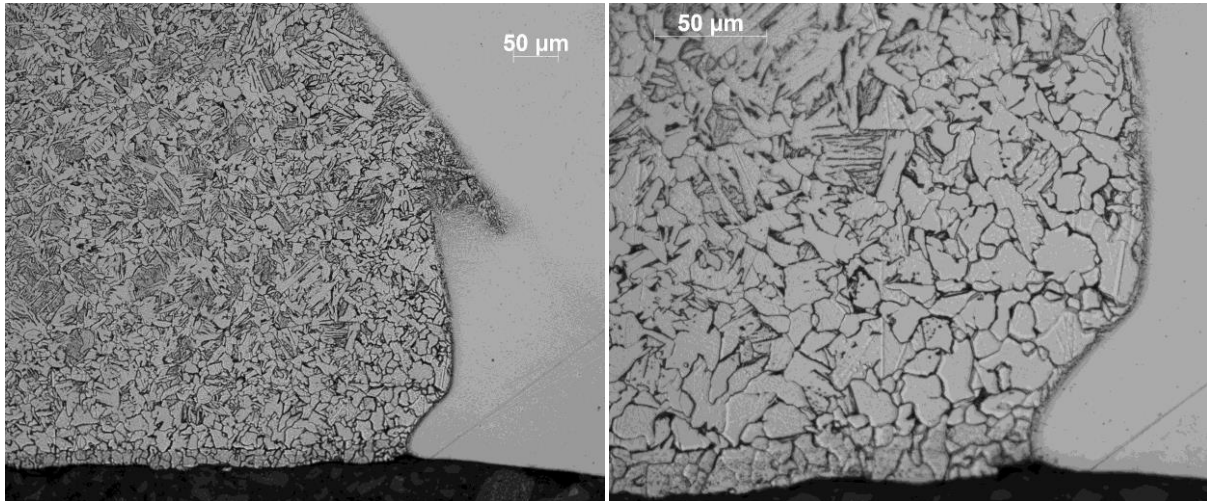
Dále byl pozorován přechod mezi ZM P265GH a SK včetně TOO. Z hlediska mikrostruktury bylo patrné na straně uhlíkové oceli patrné oduhličené pásmo v blízkosti linie ztavení v kořenové vrstvě všech vzorků. Struktura se směrem od linie ztavení do TOO postupně měnila ve Widmanstättenovu strukturu, tzn. feriticko-perlitickou s jehlicovitým tvarem feritu. Feritické jehlice vyrůstají na hranicích původních zrn a rostou směrem dovnitř původního zrna. Zhrubnutí zrna spolu s Widmanstättenovou strukturou snižují pevnost a houževnatost TOO. Patrný byl také mírný nárůst velikosti zrna s narůstající vzdáleností od linie ztavení. Na obrázku 40 lze pozorovat i oxidickou vrstvu u povrchu kořene, pravděpodobně kvůli nedostatečnému očištění před svařením.

Směrem ke krycí vrstvě klesala šířka oduhličení (obrázek 41). V krycí vrstvě nedošlo k tak velkému oduhličení uhlíkového ZM jako u kořenové vrstvy. V TOO přilehlé linii ztavení krycí vrstvy je patrná především Widmannstättenova struktura s hrubozrnnou strukturou. Důvodem je nižší vnesené teplo, což zapříčinilo rychlý odvod tepla a nižší rychlost difúze. Snímky struktur ZM P65GH v oblasti linie ztavení jsou uvedeny v přílohách 37 až 63.

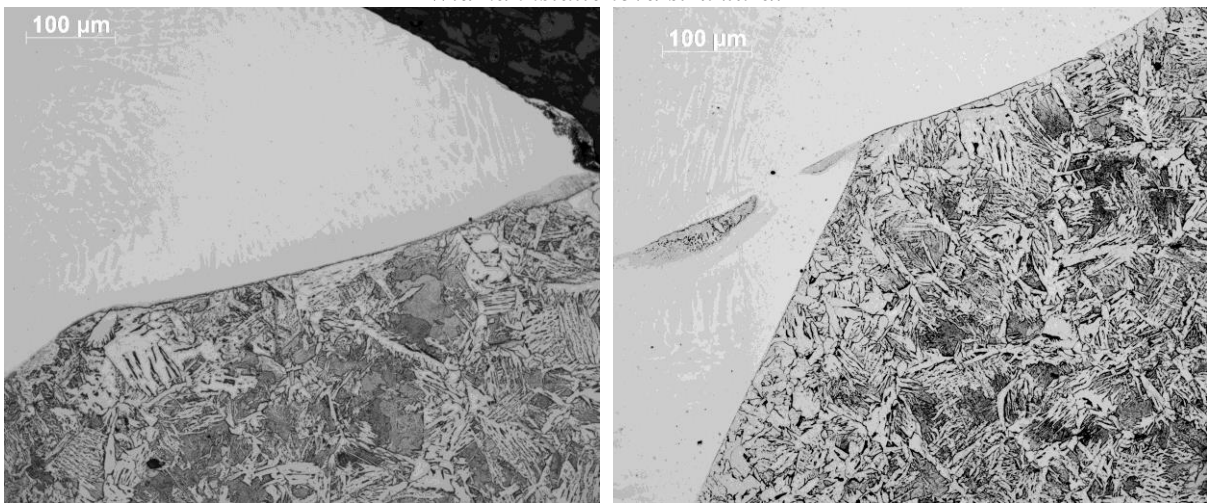
Vlivem oduhličení došlo procesem difúze k vytvoření přechodového pásma mezi uhlíkovým ZM a svarovým kovem. Směrem do svarového kovu vznikla karbidická pásma podél linie ztavení. Tato pásma vykazovala větší šířku v kořeni, zatímco směrem ke krycí vrstvě byl patrný pokles šířky. Tloušťka této vrstvy se pohybovala okolo 30 μm (obr. 42). V případě, že došlo k podtavení ZM P265GH, došlo k vytvoření karbidů i v okolí tohoto podtavení. K podtavení došlo většinou přímo v kořeni svaru nebo v přechodu mezi krycí a kořenovou vrstvou.

Kořenová část svarového kovu (obr. 43) je tvořena buněčnou strukturou vznikající při velkém podchlazení. Tato struktura je pro pulzní svařování typická. Převážně v mezibuněčných

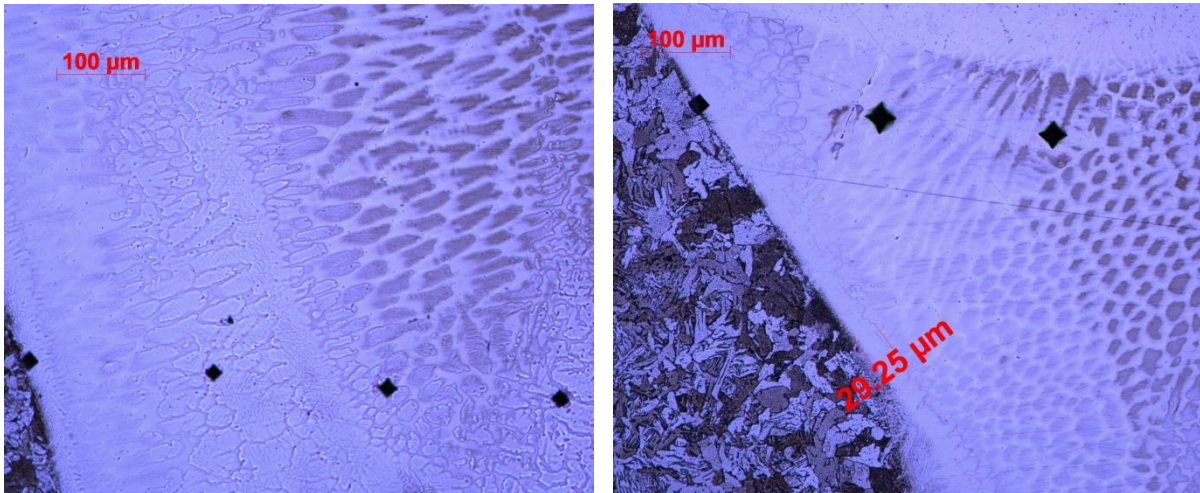
prostorech jsou patrné karbidické částice. Některé mají načervenalou barvu a jedná se tak pravděpodobně o karbidy titanu. V kořenové části SK nebyl nalezen δ -ferit. Svarový kov v krycí vrstvě byl tvořen dendritickou strukturou s δ -feritem v mezidendritických prostorech (obr. 44).



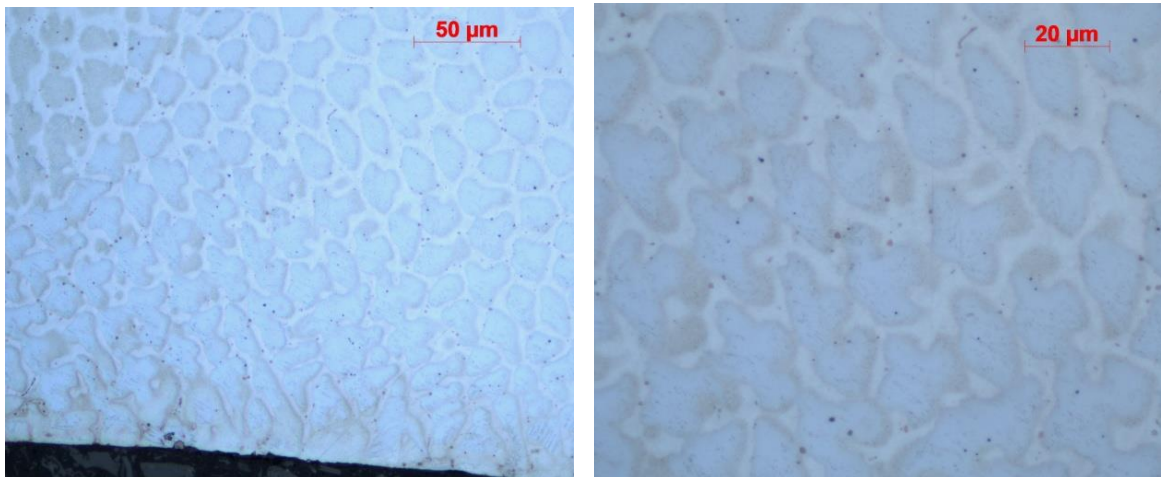
Obrázek 40: Oblast kořene V0_5 13, patrná oduhliččená zóna u linie ztavení, na kterou navazuje Widmannstättenova struktura.



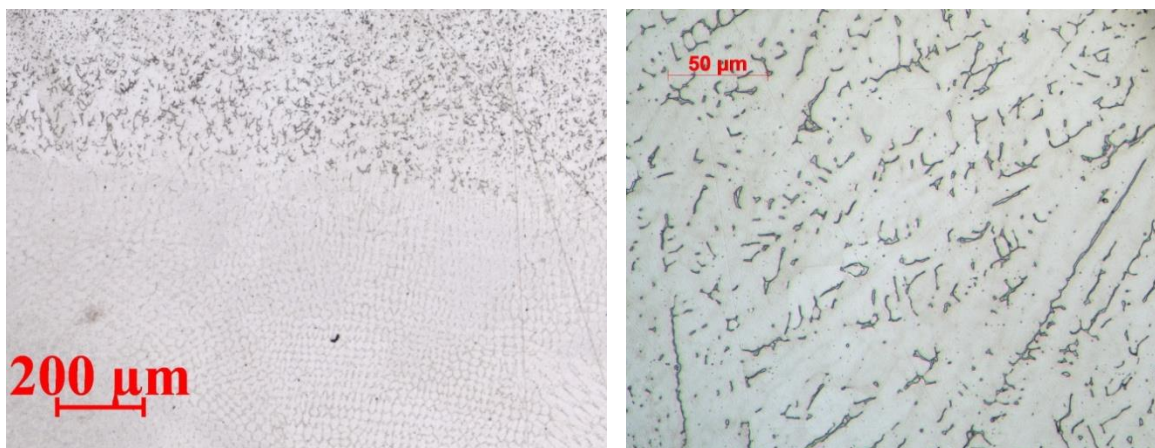
Obrázek 41: Vzorek V0_5 80 přechod P265GH / SK – povrch (vlevo) a přechod kořenová-krycí vrstva s podtavením ZM (vpravo).



Obrázek 42: Vlevo široké karbidické pásmo kořene v důsledku podtaveného ZM ve svarovém kovu, vpravo karbidické pásmo u přechodu kořenové a krycí vrstvy – vzorek V0_5 150.



Obrázek 43: Buněčná struktura svarového kovu v kořenové části 200x a 500x– vzorek V0_5 poloha 80.

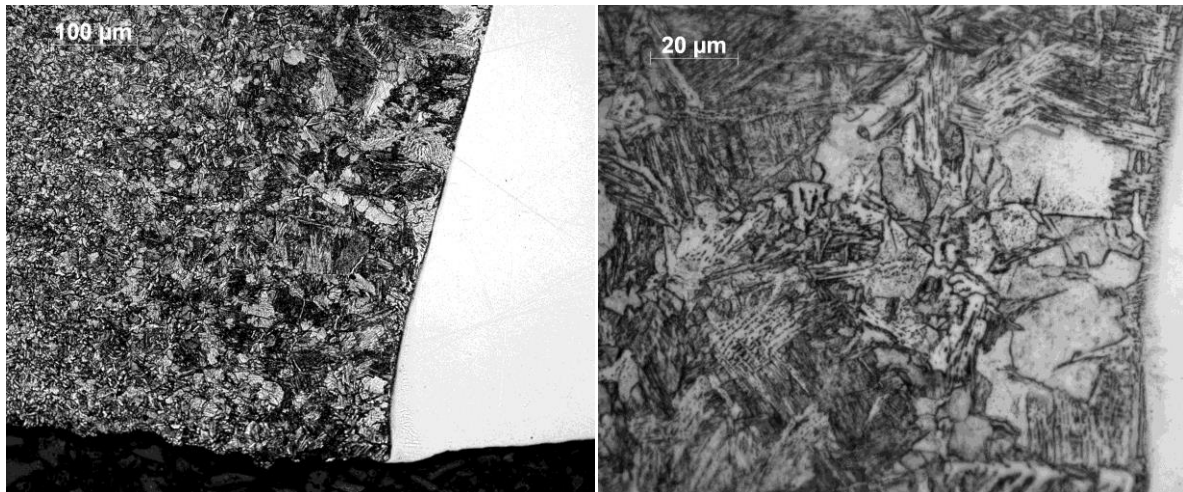


Obrázek 44: Vlevo přechod mezi kořenovou a krycí vrstvou ve svarovém kovu (přechod buněčné struktury na dendritickou), vpravo patrný δ ferit v mezidendritických prostorech krycí vrstvy – vzorek V0_5, poloha 80.

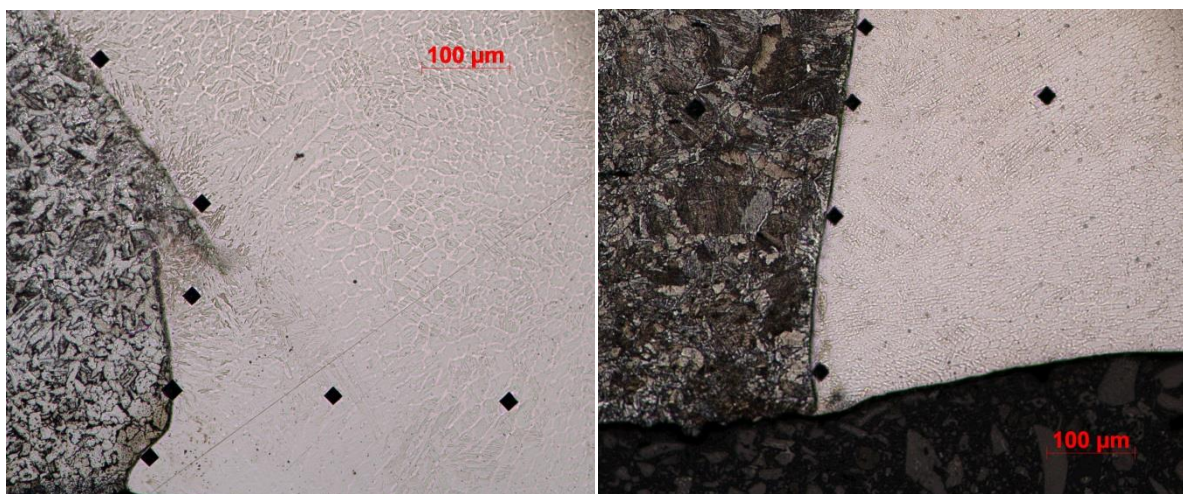
15.2 Metalografické hodnocení vzorku z laserového svařování

U vzorku svařeného laserem jsou patrné póry v oblasti svarového kovu. Jedná se však o zkušební vzorek z procesu odlaďování parametrů laserového svařování a bylo možné očekávat, že se správnými parametry budou problémy s póry odstraněny. U vzorku svařeného laserem vykazovala TOO šířku okolo 1 mm. Kořen svaru je lehce propadlý, ale s plynulým přechodem mezi ZM. Koruna svaru vykazuje mírné převýšení bez ostrých přechodů (příloha 22).

U laserového svařování nebyla pozorována oduhlíčená zóna, jelikož byla díky vysoké ochlazovací rychlosti potlačena difúze. To ovlivnilo i na šířku pásma karbidů podél linie ztavení. Karbidické pásmo, jehož šířka se pohybovala okolo 10 μm , není tak široké jako vzorků trubky svařené metodou WIG ($\approx 30 \mu\text{m}$). Struktura ZM P265GH v blízkosti linie ztavení vykazovala hrubozrnnost. Ve struktuře byla patrná zrna feritu obklopená ostrými jehlicemi základních struktur, nejspíše horního a spodního bainitu (obr. 45). Porovnání oblasti přechodové zóny vzorku svařeného metodou WIG a vzorkem svařeným laserem je na obrázku 46.



Obrázek 45: Struktura v oblasti kořene u vzorku svařeného laserem 200x a 1000x.

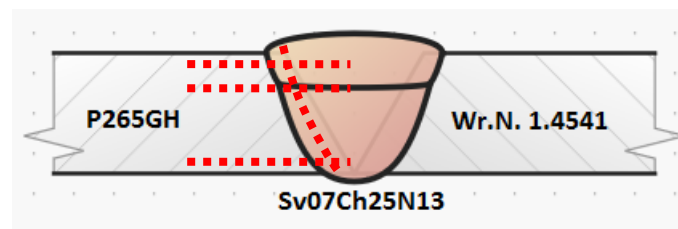


Obrázek 46: Porovnání kořenové oblasti V0_5 13 (vlevo) a 521_2_2 (vpravo) po naleptání struktury. SK.

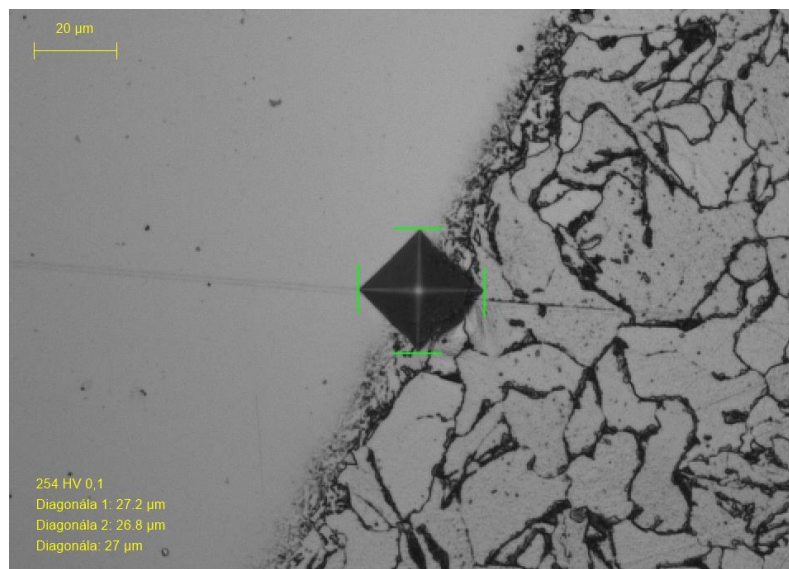
16 Zkouška mikrotvrdomosti

Mikrotvrdomost byla sledována v oblasti přechodu mezi ocelí P265GH a SK. V této oblasti se dle zkušeností z provozu objevil problém s korozním praskáním pod napětím u svarových spojů na JET. K zachycení průběhu mikrotvrdomosti byla vyvinuta metodika měření mikrotvrdomosti v kořenové vrstvě, v krycí vrstvě a v oblasti přechodu těchto dvou vrstev od ZM přes TOO až do SK. Proběhlo měření mikrotvrdomosti HV 0,1 dle Vickerse, se zatěžovací silou 0,98 N.

Měření v kořenové a krycí vrstvě proběhlo přibližně 0,1 mm od povrchu kořene nebo koruny svaru. Jednotlivé středy vtisků byly vzdáleny 0,2 mm dle doporučení normy ČSN EN 6507-1. Ke zjištění průběhu tvrdosti v přechodové zóně proběhlo měření i podél linie ztavení směrem od kořene ke koruně svaru v SK (obr. 47). Průběh mikrotvrdomosti u jednotlivých vzorků je v příloze spolu s makrostrukturním snímkem zachycujícím umístění vtisků (přílohy 22 až 33).



Obrázek 47: Schematické znázornění umístění série vtisků během měření průběhu tvrdosti.



Obrázek 48: Vtisk v oblasti přechodu uhlíková ocel - SK

Hodnoty mikrotvrdomosti v TOO se ve všech polohách 13, 80, 110, 150 a 167 vzorku V0_5 se pohybovaly okolo 150 HV 0,1. Nebyl pozorován výraznější vliv krycí nebo kořenové vrstvy na průběh tvrdosti v TOO. K nárůstu tvrdosti došlo až v oblasti linie ztavení a přechodové oblasti mezi ZM P265GH a SK. Největší mikrotvrdomost 208 HV 0,1 byla naměřena v TOO koruny svaru v poloze 13 ve vzdálenosti přibližně 1 mm od linie ztavení. Z hodnot mikrotvrdomosti lze vyloučit přítomnost zákalných struktur v TOO. Naopak zvýšená mikrotvrdomost v přechodové oblasti potvrzuje přítomnost karbidických pásem.

K zachycení průběhu mikrotvrdosti v přechodové zóně mezi SK a ZM P265GH bylo provedeno měření podél linie ztavení směrem od koruny svaru ke kořenu. Průběh dosažených hodnot u analyzovaných vzorků je připojen v přílohách 22 až 33.

U vzorku svařeného laserem byl patrný nárůst mikrotvrdosti již v TOO před přechodovou zónou P265GH-SK. Hodnoty mikrotvrdosti potvrzují přítomnost zákalných struktur v TOO i karbidů podél linie ztavení v SK. Tvrdost směrem do SK mírně klesá, avšak z důvodu absence PM je tvrdost v celé oblasti SK vysoká okolo 350 HV 0,1 a klesá až v ZM Wr.N. 1.4145. Průběh tvrdosti vzorku svařeného laserem je v příloze 22.

Diskuze

Jedním z cílů této práce bylo odladění procesu orbitálního svařování heterogenních svarů pro odlišné typy úkosů. Pro automatizované svařování je zásadní příprava a přesnost úkosů svařovaných materiálů. U ručního způsobu svařování může svářeč zareagovat na nepřesnosti v průběhu operace, to ale u automatizovaného svařování není možné a je potřeba dodržet vysoké nároky na přesnost sesazení dílů a přípravu jejich úkosů. Na přesnost mají vliv již samotné polotovary. Polotovary v podobě trubek vykazují určitou ovalitu, již je ovlivněno přesné sesazení a lícování trubek.

Pro orbitální svařování byla potřeba nejprve trubky sestehovat. Vytvořením stehu se do drážky úkosu vnáší další nepřesnost a dochází k ovlivnění tvaru úkosu. Z důvodu co nejmenšího ovlivnění tvaru úkosu byly stehy provedeny bez PM za použití nízkého proudu. U operace stehování se projevila odlišnost tvaru úkosů. Úkos tvaru U poskytuje dostatek prostoru pro manipulaci svářeče s elektrodou uvnitř úkosu a tomu odpovídala i lepší kvalita stehu. Naopak u úkosu tvaru V byl prostor pro manipulaci mnohem menší a zmenšoval se ještě s narůstající tloušťkou otupení. Následkem malého prostoru a tvaru úkosu došlo i k natavení hran úkosů a vytváření výstupků v úkosu V (obr. 49). Úkos V bez otupení je problematické sestehovat. Kvůli absenci otupení hrozí během stehování zborcení úkosu a vytvoření díry.



Obrázek 49: Porovnání stehu úkosu U (vlevo) a V (vpravo).

Výhodou úkosu tvaru V je jednodušší zhotovení oproti úkosu U. Při výrobě úkosu V bývá sražena hrana pod daným úhlem a případně vytvořené otupení. Ke zhotovení úkosu U je však během obrábění potřeba více technologických kroků, což se projevuje i na ceně úkosu.

Při použití úkosu tvaru V je díky menšímu objemu úkosu zapotřebí méně PM k vyplnění drážky SK. Výhody daných typů úkosů jsou uvedeny v tabulce 20.

Úkos	U	V
Prostor při stehování a kvalita stehu	+	-
Technologická náročnost přípravy	-	+
Náklady na přípravu	-	+
Spotřeba PM	-	+

Tabulka 20: Porovnání výhodnosti úkosů.

Parametry pro odladění byly převzaty ze svařovacího programu firmy ČEZ Energoservis, který byl vytvořen pro úkos tvaru U s průměrem trubek 44,5 mm a tloušťkou stěny 2,6 mm. V rámci této práce byly ale svařovány trubky s průměrem 57 mm a tloušťkou stěny 2,9 mm. Svařování proběhlo na 2 vrstvy – kořenovou a krycí. V první fázi byly svařeny trubky s úkosem U s původními parametry programu k ověření, zda lze rozdělení sektorů použít i pro větší průměr trubky. Svařování kořenové vrstvy proběhlo v pořádku a rozdíl v průměru trubek neměl vliv. Vlivem větší tloušťky došlo k úpravě rychlosti podávání drátu z důvodu vyplnění úkosu PM.

Hodnoty pulzního proudu výchozího programu pro kořenovou vrstvu odpovídají doporučeným svařovacím parametrům v kapitole 7.2. Pulzní proud se postupně snižuje a v koncovém sektoru odpovídá zhruba 80 procentům počáteční hodnoty.

Během ladění se ukázalo, že nestačí v případě špatného provaření pouze zvýšit hodnotu pulzního proudu, ale je nutné brát v úvahu i polohu svařování. U vzorků s úkosem V bez otupení byl postupně navyšován pulzní proud z důvodu neprovaření. U vzorku V0_4 došlo k neprovaření kořene v sektoru S4 (poloha PE), přestože u vzorku V0_3 došlo k provaření při nižších hodnotách pulzního proudu. Důvodem zřejmě bylo působení gravitační síly v této poloze, v níž má tavná lázeň při použití vyššího pulzního proudu větší objem a zabraňuje tak provaření. Tato myšlenka byla potvrzena u vzorku V0_5, u něhož byla hodnota pulzního proudu v sektoru S4 snížena a kořen byl dostatečně provařený. Parametry svařování jednotlivých vzorků jsou uvedeny v přílohách 1 až 17.

Po svaření byly vzorky podrobeny vizuální zkoušce, na základě které proběhla případná úprava svařovacích parametrů u dalších vzorků. Vizuální zkouškou lze odhalit pouze povrchové vady. Z toho důvodu následovaly za účelem odhalení případných objemových vad zkouška radiografická a zkouška ultrazvukem. Častými vadami především v oblasti kořenové vrstvy byly studený spoj 4013, neprovařený kořen 4021 nebo vrub v kořeni 5013. Tyto vady vznikly v důsledku nízkých hodnot svařovacího proudu. Problémovými místy se pak ukázaly být původní místa stehů. V těchto místech vznikly během stehování u úkosů tvaru V v důsledku malého prostoru odchylky od tvaru úkosu. Odchylky od tvaru úkosu pak měly za následek zmíněné vady. Jedním z možných řešení, jak zabránit vzniku vad, by mohlo být umístění stehů do vhodných poloh. Vhodná by mohla být poloha v okolí PA (160 – 20 mm), aby steh nezasahoval do oblasti počátku a konce svaru. Další vhodnou polohou se jeví oblast odpovídající poloze PF (120-160 mm). Navrhované umístění stehů (viz obr. 37). V poloze PA nedochází ke stékání svarové lázně vlivem gravitační síly a v poloze PF naopak stéká svarová lázeň opačným směrem než je postup svařování. Díky tomu dochází ke snazšímu provaření. Schéma navrženého umístění stehů je na obrázku 37.

Odladění svařovacího programu se podařilo u úkosu tvaru V s otupením 0,5 mm (příloha 18) a úkosu V bez otupení (příloha 19). Vady u vzorků svařených těmito programy se vyskytovaly v místech původního stehování.

U odladěných programů pro úkos V bez otupení, V s otupením 0,5 mm a úkos U proběhl přibližný výpočet vneseného tepla na základě svařovacích parametrů. Vnesené teplo má mimo jiné vliv na velikost promísení ZM se SK a na strukturní změny v TOO. Podle očekávání bylo nejvíce tepla vneseno u úkosu V s otupením 0,5 mm, kdy byl nastaven největší pulzní proud k provaření otupení. Nejméně tepla bylo vneseno u vzorku s úkosem U. Hodnoty vneseného tepla u úkosu V bez otupení a úkosu U se překrývaly v sektoru S3, S4 a S5 z důvodu stejných hodnot pulzních proudů.

K metalografickému hodnocení byl na základě dobrých výsledků NDT vybrán svařenec V0_5 s úkosem V bez otupení. U tohoto vzorku bylo zároveň vneseno menší množství tepla v porovnání s úkosem V s otupením 0,5 mm. Bylo odebráno 5 vzorků z polohy 13, 80, 110, 150 a 167. Polohy 80 a 150 přiléhaly k oblastem, z nichž byly odebrány vzorky ke korozním zkouškám pod napětím. V této práci nejsou tyto zkoušky dále rozebírány. Vzorky z polohy 110 a 150 odpovídaly místům stehování. Vzorek z polohy 13 byl odebrán z oblasti, ve které nedochází k překryvu mezi sektorem S1 a S7 a zároveň ji lze ještě považovat za polohu odpovídající PA. Tento vzorek byl porovnán se vzorkem svařeným laserem bez PM právě v poloze PA.

Z pohledu makrostruktury není patrný výraznější vliv polohy měnící se během orbitálního svařování na tvar svaru u V0_5. Kořen přechází u všech vzorků do ZM bez ostrých vrubů a není převýšený ani propadlý. Viditelné je přesazení v poloze 13 a 150. V poloze 167 byl patrný vliv díry, která vznikla během stehování. V důsledku díry v úkosu se vytvořila zoxidovaná část kořene a ostrý vrub. Zdeformovaný tvar kořenové vrstvy poté ovlivnil i krycí vrstvu přičemž nedošlo k úplnému vyplnění svaru (příloha 32).

Při zkoumání makrostruktury jsou zjevná podtavení ZM P265GH v oblasti kořene a přechodu mezi krycí a kořenovou vrstvou. K podtavení dochází díky turbulentnímu charakteru tvorby svarové lázně.

U vzorků svařence V0_5 bylo v kořenové vrstvě patrné oduhličené pásmo v TOO ZM P265GH. Toto pásmo přilehá k linii ztavení a vzniká v důsledku vyšší rozpustnosti uhlíku v austenitu. Tím se zároveň podél linie ztavení difúzí vytvořila přechodová vrstva o šířce zhruba 30 μm . Šířka přechodové vrstvy se zvětšila v případě přítomného podtavení ZM uhlíkové oceli v SK, kdy dochází k difúzi uhlíku i z těchto podtavení do SK. Kolem linie ztavení byly v přechodové zóně patrné lokální zákalné struktury. Zákalné struktury se vyskytovaly především v okolí podtavení a jejich přítomnost byla potvrzena i zvýšenou tvrdostí. Šířka přechodového pásma se směrem ke koruně svaru postupně snižovala a opět narůstala v přechodovém pásmu mezi kořenovou a krycí vrstvou. V krycí vrstvě byla šířka menší, okolo 10 μm . Na šířku přechodového pásma má vliv vnesené teplo, které podporuje difúzi.

Směrem ke koruně svaru zároveň klesá šířka oduhličeného pásma. Oduhličené pásmo je v TOO nebezpečné, jelikož se do této měkké oblasti během provozního zatížení soustředí plastické deformace.

Na oduhličené pásmo navazovala Widmannstättenova struktura, která v krycí vrstvě navazovala přímo na linii ztavení. Widmannstättenova struktura je typická vznikem feritických jehlic na hranici původních austenitických zrn. Tato struktura vzniká při takové rychlosti ochlazení, kdy už nevznikají zákalné struktury, ale zároveň je ještě potlačena difúze potřebná k vytvoření rovnovážné struktury. Feritické jehlice dále rostou směrem do perlitické struktury. Díky jehlicovitému charakteru Widmannstättenova struktura snižuje houževnatost TOO.

Po naleptání SK bylo patrné podél linie ztavení přítomné pásmo karbidů nebo intermetalických částic. Tyto částice vykazovaly jehlicovitou strukturu s vysokou tvrdostí až 430 HV 0,1 způsobující křehkost struktury. Kombinace oduhličeného pásma a tvrdé, křehké přechodové zóny snižuje odolnost spoje proti únavě. K identifikaci částic přechodové zóny by bylo vhodné provést měření chemického složení. Toto měření by zároveň posloužilo k analýze přítomnosti Cr a Ni, tedy prvků zvyšující korozní odolnost.

V kořenové části byla patrná výrazná buněčná struktura subzrn austenitu. Buněčná struktura vzniká při velké rychlosti ochlazování a je typická pro pulzní způsob svařování. V mezibuněčných prostorech bylo přítomno množství karbidických částic. Vměstky v materiálu snižují jeho houževnatost, především na hranicích zrn. Zjevné byly podle narůžovělé barvy karbidy TiC. Vměstky TiC vznikly pravděpodobně díky obsahu Ti v uhlíkové oceli a zároveň vysokému promísení SK s austenitickým ZM, který je stabilizován právě Ti. Z mikroskopického pozorování nebyl nalezen v kořenové vrstvě δ -ferit. Jak je uvedeno v kapitole 1, obsah feritu ve svarovém kovu se snižuje se zvyšujícím se promísením základních materiálů. To je patrné i v Schäfflerovu diagramu (kapitola 9.2). Krycí vrstva krystalizovala dendriticky s δ -feritem v mezidendritických prostorech, což odkazuje na menší promísení vlivem nižších hodnot svařovacích proudů.

Měření mikrotvrdomosti bylo provedeno na straně uhlíkové oceli přes TOO, linii ztavení a přechodové pásmo. V TOO se naměřená mikrotvrdomost pohybovala kolem hodnoty 150 HV 0,1 a bylo možné vyloučit přítomnost křehkých základních struktur. U některých vzorků, v závislosti na poloze, ze které byl vzorek odebrán, docházelo k mírnému poklesu mikrotvrdomosti u linie ztavení v důsledku oduhličení. Poté vlivem základních struktur a přítomností karbidů v přechodové zóně tvrdost vzrostla. V kořenové vrstvě se hodnota pohybovala okolo 400 HV 0,1. Ve srovnání s doporučenou maximální tvrdostí v TOO, jež by měla dosahovat hodnoty 380 HV (dle ČSN EN ISO 15 614), je tato hodnota relativně vysoká. Doporučení se však týká měření tvrdosti. Hodnoty mikrotvrdomosti vycházejí z důvodu odlišného zatížení vždy o trochu vyšší.

V kořenové části vzorků svařených metodou WIG byla naměřena vysoká mikrotvrdomost v oblasti přechodové zóny mezi uhlíkovou ocelí a SK. Tvrdost směrem do SK opět poklesla. Výjimkou byl vzorek z polohy 13, kde k poklesu hodnoty HV 0,1 směrem do SK nedošlo. Z toho důvodu proběhlo měření tvrdosti v kořenové části přes celou oblast SK. Naměřená mikrotvrdomost se pohybovala nad hodnotou 400 HV 0,1 (příloha 25). Vysoká tvrdost v této části je pravděpodobně způsobena velkým promísením z důvodu vyšších svařovacích proudů na počátku svařování. Při vysokém promísení vzniká ve SK podle Schäfflerova diagramu (viz kapitola 9.2) struktura austenitu s martenzitem.

K porovnání se vzorky svařenými metodou WIG byl z metalografického hlediska a z hlediska mikrotvrdomosti hodnocen vzorek svařený laserem. Pro laserové svařování je typická velká koncentrace energie na malé ploše. Díky tomu vykazují svary zhotovené laserem malou šířku TOO. Vzorek svařený laserem vykazoval užší TOO o šířce zhruba 1 mm. Šířka vzorku svařeného metodou WIG se pohybovala okolo 4 mm. Díky vysoké rychlosti ochlazování nebyla přechodová zóna mezi uhlíkovou ocelí a SK skoro patrná. V TOO uhlíkové oceli v blízkosti linie ztavení nedošlo v důsledku vysoké rychlosti ochlazení k oduhličení, ale vytvořila se zde základní struktura. Přítomnost základních struktur byla potvrzena naměřenou tvrdostí. Vysoká tvrdost okolo 350 HV 0,1 byla naměřena i v SK v důsledku absence PM během svařování. Vysoká mikrotvrdomost v TOO a SK svarového spoje způsobuje jeho křehkost a snižuje odolnost dynamickému namáhání. Snižování tvrdosti v SK by bylo možné dosáhnout použitím PM ve formě prášku nebo drátu. Použití drátu jako PM u laserového svařování je však náročné na odladění procesu (viz kapitola 8).

K vyhodnocení odolnosti svarových spojů s daným typem úkosu by bylo vhodné doplnit metalografické hodnocení a zkoušku tvrdosti o další mechanické zkoušky např. zkoušku tahem nebo o korozní zkoušku pod napětím. Získané hodnoty by měly být ověřeny na větším počtu vzorků.

Závěr

Tato práce byla zaměřena na odladění procesu svařování heterogenního svarového spoje. Celkem bylo svařeno 18 vzorků se 4 různými typy otupení (úkos U, úkosy V s otupením 0,25mm a 0,50 mm, úkos V bez otupení). Program pro úkos U byl dodán firmou ČEZ Energoservis. Samotné ladění pak proběhlo na základě vlastních úprav některých parametrů tohoto programu.

Po svaření byly svařence posouzeny pomocí vizuální zkoušky, na základě které pak docházelo ke změně svařovacích parametrů. Vzorky, jež byly vizuální zkouškou zhodnoceny jako vyhovující, byly za účelem odhalení objemových vad následně zkoumány radiografickou kontrolou a ultrazvukovou zkouškou. Odhaleny byly především vady jako studené spoje v oblasti kořene 4013, neprovaření kořene 4021 a póry 201. Problémovými místy se ukázaly být původní místa stehů. K zamezení vzniku vad v těchto místech bylo navrženo umístění stehů do vhodných sektorů.

Kromě oblastí zmíněných stehů byly úspěšně odladěny svařovací programy pro úkos V s otupením 0,50 mm a pro úkos V bez otupení. U vzorků svařených těmito programy proběhlo porovnání vneseného tepla. Největší hodnoty vneseného tepla na jednotku délky byly vypočteny pro program svařování vzorku s úkosem V s otupením 0,50 mm. Druhé nejvyšší hodnoty vykazoval program pro úkos V bez otupení, v sektorech S3, S4 a S6 byly hodnoty vypočtené pro tento úkos stejné jako pro úkos U.

K metalografickému hodnocení byl vybrán svařenec V0_5, tedy původní trubka s úkosem V bez otupení. Vzorek byl vybrán na základě dobrých výsledků NDT zkoušek a malých hodnot vypočteného tepla. Celkem bylo z tohoto svařence odebráno 5 vzorků k metalografickému hodnocení, konkrétně z poloh 13, 80, 110, 150 a 167. Polohy 80 a 150 byly vybrány proto, že navazovaly na oblasti, ze kterých byly odebrány vzorky pro korozní zkoušky pod napětím. Polohy 110 a 167 představovaly místa původních stehů. Poloha 13, odpovídající poloze svařování PA, byla z metalografického hlediska porovnána se vzorkem svařeným laserem taktéž v poloze PA.

Metalografickými rozbory bylo zjištěno, že na rozhraní ZM-SK straně uhlíkové oceli dochází k oduhličení ZM a naopak nauhličení přechodové oblasti, ve které pak vznikají zákalné struktury a pásma karbidů s vysokou mikrotvrdostí. Tato oblast ovlivňuje průběhu mikrotvrdosti nejdříve poklesem tvrdosti v oduhličené zóně a následným prudkým vzrůstem v důsledku přítomnosti zákalných struktur a karbidického pásma. Tyto změny v mechanických vlastnostech a změny mikrostruktury jsou nežádoucí, protože snižují odolnost svaru vůči cyklickému namáhání a snižují jeho životnost.

Použité zdroje:

- [1] Junek, L. *Experimentální program na vybraných vyjmutých heterogenních svarových spojích z nátrubků N5 a N6 parogenerátorů na 2.HVB*. Ústav aplikované mechaniky Brno s.r.o, 2017
- [2] Janovec, J. *Technická zpráva ČEZ č. 12-17. Analýza heterogenních svarových spojů nátrubků N5.2, N6.1 N6.2 parogenerátoru 2. HVB ETE*, 2017
- [3] Kubíček, J. *Základní metody tavného svařování*. [online], [cit. 2019-10-23]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/studium/index.php?stranka=opory>
- [4] Moravec, J. *Elektrický oblouk - jak vzniká a jak se zhasí?*. [online], [cit. 2019-10-23]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/elektricky-oblouk>
- [5] Kolektiv autorů. *Technologie svařování a zařízení: Učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: Zerros, 2001. ISBN 80-85771-81-0.
- [6] *WIG svařování 1 - základní principy*. [online], [cit. 2019-10-27]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2008011702>
- [7] *Wolframové elektrody pro WIG svařování*. [online], [cit. 2019-10-27]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2006111201>
- [8] Olson, D. *ASM HANDBOOK Welding, brazing, and soldering (Vol. 6)*. Metals Park, OH: ASM International, 1993. ISBN 10: 0871703823
- [9] *The orbital welding handbook – updated edition: 01/2016*. Polysoude Nantes SAS. [online], [cit. 2019-11-5]. Dostupné z: <https://www.polysoude.com/orbital-welding-handbook/>
- [10] KOU, S. *Welding Metallurgy*. Second edition .John-Wiley&Sons, 2003. ISBN 0-471-43491-4
- [11] Askeland, D., Fulay, P., Wright, W. *The Science and Engineering of Materials*. Sixth edition. ISBN-13: 978-0-495-29602-7
- [12] *The various positions for orbital welding: optimizing the assembly of the tubes*, [online]. [cit. 8-12-2019]. Dostupné z: <https://www.axxair.com/en/blog/the-various-positions-for-orbital-welding-optimizing-the-assembly-of-the-tubes>

- [13] Vandewynckéle, A. , Vaamonde, E., Fontán, M. , Herwig, P., Mascioletti, A. *Laser Welding Head Tailored to Tube-Sheet Joint Requirements for Heat Exchangers Manufacturing*, Physics Procedia, Volume 41, 2013, Pages 144-152, ISSN 1875-3892, Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389213000771>
- [14] Vänskä, Mikko & Purtonen, Tuomas & Salminen, Antti. *Orbital cutting and welding of stainless steel tubes with a fiber laser*. 612-620, 2011 [online]. [cit. 2019-11-9]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/290314284_Orbital_cutting_and_welding_of_stainless_steel_tubes_with_a_fiber_laser
- [15] T. Mužík, S. Němeček, *Laser welding replacing WIG*, [online]. [cit. 2019-11-9]. Dostupné z: <https://www.industrial-lasers.com/welding/article/16485609/laser-welding-replaces-WIG>
- [16] Bäck, M. *Welding of dissimilar metals in different welding positions, Dissertation*, 2016, [online]. [cit. 2019-11-9]. Dostupné z: <http://www.divaportal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A915802&dswid=4499>
- [17] Kolektiv autorů. *Materiály a jejich svařitelnost: Učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: Zerros, 2001. ISBN 80-85771-85-3.
- [18] Kolařík, L., Kolaříková, M., Husák, O. *Orbital Welding of Heterogeneous Joints*. Materials Science Forum. 919, 2018 [online] [cit. 19-11-2019]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/324418242_Orbital_Welding_of_Heterogeneous_Joints
- [19] Nayak, J. *Welding metallurgy and different welding processes*, [online]. [cit. 2019-11-26]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/harshangak/welding-metallurgy-and-different-welding-processes>
- [20] Norma ISO 6947:2019 (en) *Welding and allied processes — Welding positions*, [online]. [cit. 27-11-2019]. Dostupné z: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:6947:en>
- [21] Běňo, M. *Zvýšení životnosti a provozní spolehlivosti heterogenních svarových spojů zařízení jaderné energetiky*. Ostrava, 2015. ISBN 978-80-248-3669-0
- [22] Moravec, J. *KURZY SVÁŘEČSKÝCH TECHNOLOGŮ A INŽENÝRŮ IWT / IWE Svarování netavící se elektrodou v inertní atmosféře metoda WIG*, [online]. [29-11-2019]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/41528206-Svarovani-netavici-se-elektrodou-v-inertni-atmosfere-metoda-WIG.html>

- [23] *Ultimate guide to orbital welding*, [online]. [cit. 8-12-2019]. Dostupné z: <https://www.orbitalft.com/ultimate-guide-to-orbital-welding/>
- [24] Mannion, B., Heinzman, J. *Setting up and determining Parameters for Orbital Tube Welding*, The Fabricator, May 1999, [online].[10-3-2020]. Dostupné z: <https://www.pro-fusiononline.com/feedback/fab-may99.htm>
- [25] Henon, B. *Orbital welding of 316L Stainless Steel Tubing*, Arc Machines, Inc. [online].[10-3-2020]. Dostupné z: <https://www.arcmachines.com/applications/fusion-butt-welding/316l-stainless-steel-tubing>
- [26] e Silva, R.H.G., dos Santos Paes, L.E., Marques, C. et al. *Performing higher speeds with dynamic feeding gas tungsten arc welding (GTAW) for pipeline applications*. J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. 41, 38, 2019, [online].[10-3-2020]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs40430-018-1529-2>
- [27] Figueirôa, D., Pigozzo, I., e Silva, R., de Abreu Santos, T. & Filho, S. *Influence of welding position and parameters in orbital WIG welding applied to low-carbon steel pipes*, Welding International, 31:8, 583-590, 2017, [online].[10-3-2020]. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09507116.2016.1218615>
- [28] A. Traidia, F. Roger, E. Guyot, J. Schroeder, G. Lubineau, *Hybrid 2D-3D modeling of GTA welding with filler wire addition*, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 55, Issues 15-16, 2012, Pages 3946-3963, ISSN 0017-9310, [online].[10-3-2020]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931012001743>
- [29] Hung-Ta Kuo, Kuan-Chywan Tu, *Development of Welding Parameters of Automatic GTAW Process for Pipes with Variant edge preparation*, Institute of Nuclear Energy Research, [online].[10-3-2020]. Dostupné z: <https://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn214/idn214.htm>
- [30] G Lothongkum, E Viyanit, P Bhandhubanyong, *Study on the effects of pulsed WIG welding parameters on delta-ferrite content, shape factor and bead quality in orbital welding of AISI 316L stainless steel plate*, Journal of Materials Processing Technology, Volume 110, Issue 2, 2001, Pages 233-238, ISSN 0924-0136, [online].[10-3-2020]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092401360000875X>
- [31] V A Bukarov, S I Poloskov & Yu S Ishchenko (2003) *Special features of controlling weld root formation in orbital welding non-rotating joints in pipes*, Welding International, 17:9, 721-727, [online].[10-3-2020]. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1533/wint.2003.3188>

- [32] Akbari, Davood & Farahani, Mohammadreza & Soltani, Nasser. (2012). *Effects of the weld groove shape and geometry on residual stresses in dissimilar butt-welded pipes*. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. 47. 73-82. [online].[10-3-2020]. Dostupné z:
https://www.researchgate.net/publication/258186772_Effects_of_the_weld_groove_shape_and_geometry_on_residual_stresses_in_dissimilar_butt-welded_pipes
- [33] Quan Chen, Jiang Yang, Xinghui Liu, Jingli Tang, Bensheng Huang, *Effect of the groove type when considering a thermometallurgical-mechanical model of the welding residual stress and deformation in an S355JR-316L dissimilar welded joint*, Journal of Manufacturing Processes, Volume 45, 2019, Pages 290-303, ISSN 1526-6125, [online].[10-3-2020]. Dostupné z:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612519302166>
- [34] Eriek Wahyu Restu Widodo, Vuri Ayu Setyowati, Suheni, Ahmad Rilo Hardianto. *Influences of Groove Angles and Filler Metals on 304L Stainless Steel to AISI 1040 Carbon Steel Dissimilar Joint by Gas Tungsten Arc Welding*, , E3S Web Conf. 130 01008, 2019. [online].[10-3-2020]. Dostupné z:
https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/56/e3sconf_ic-amme2018_01008/e3sconf_ic-amme2018_01008.html
- [35] Abbass, Muna & Hassan, Kharia. *Influence of the butt joint design of WIG welding on corrosion resistance of low carbon steel*. American Journal of Scientific and Industrial Research, 2012. [online].[10-3-2020]. Dostupné z:
https://www.researchgate.net/publication/271352911_Influence_of_the_butt_joint_design_of_WIG_welding_on_corrosion_resistance_of_low_carbon_steel
- [36] PILOUS, V., STRÁNSKÝ, K. *Strukturní stálost návarů a svarových spojů v energetickém strojírenství*. Praha: Academia, 1989. Studie ČSAV, 1989, č. 7. ISBN: 8020000070.
- [37] Li, G.F. & Congleton, J. *Stress corrosion cracking of a low alloy steel to stainless steel transition weld in PWR primary waters at 292°C*. Corrosion Science. 42. 1005-1021. 10.1016/S0010-938X(99)00131-6, 2000. [online].[10-3-2020]. Dostupné z:
https://www.researchgate.net/publication/222168105_Stress_corrosion_cracking_of_a_low_alloy_steel_to_stainless_steel_transition_weld_in_PWR_primary_waters_at_292C
- [38] ČEZ a.s., Protokol o vstupní kontrole č. 15VKT4788
- [39] ČEZ a.s., Protokol o vstupní kontrole č. 15VKT4983

- [40] Allen, C. *A brief review of recent developments in laser welding processes for ferritic pipe steels*. Australian Welding Journal, Vol.52,2007. [online]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/a-brief-review-of-recent-developments-in-laser-welding-processes-for-ferritic-pipe-steels#ref4>
- [41] D. S. Howse, R. J. Scudamore, G.S. Booth, *Yb Fibre Laser/MAG Hybrid Processing for Welding of Pipelines*, Commission IV, 58th IIW Annual Assembly in Prague,2005. [online]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/yb-fibre-laser-mag-hybrid-processing-for-welding-of-pipelines-july-2005#ref2>
- [42] Vietz,Kohn,Thomy,Vollertsen. *Innovation in the Welding Technology for Pipeline Construction*. Pipeline Technology 2006 Conference,2006 [online].[10-3-2020]. Dostupné z: <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:N8taNo9QHKEJ:https://www.pipelineconference.com/sites/default/files/papers/421%2520Vietz.pdf+&cd=1&hl=cs&ct=clnk&gl=cz&client=firefox-b-d>
- [43] Salminen, Antti. *The filler wire - Laser beam interaction during laser welding with low alloyed steel filler wire*. MECHANIKA. Nr. 4,2010 [online].[10-3-2020]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/228442593_The_filler_wire_-_Laser_beam_interaction_during_laser_welding_with_low_alloyed_steel_filler_wire
- [44] Yousuke KAWAHITO, Naoyuki MATSUMOTO, Youhei ABE, Seiji KATAYAMA, *Laser Absorption Characteristics in High Power Fiber Laser Welding of Stainless Steel*, QUARTERLY JOURNAL OF THE JAPAN WELDING SOCIETY, 2009, Volume 27, Issue 3, Pages 183-188, Online ISSN 2434-8252 Dostupné z: https://www.jstage.jst.go.jp/article/qjwjs/27/3/27_3_183/_article
- [45] Technická norma ČSN EN ISO 17 635:2018. *Nedestruktivní zkoušení – Obecná pravidla pro kovové materiály*, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018
- [46] Technická norma ČSN EN ISO 16 810:2014. *Nedestruktivní zkoušení ultrazvukem – Obecné zásady*, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014
- [47] Technická norma ČSN EN ISO 17 637:2016. *Nedestruktivní zkoušení svarů – Vizuální kontrola tavných svarů*, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016

- [48] Technická norma ČSN EN ISO 17 636-1:2013 Nedeštruktivní zkoušení svarů – Radiografické zkoušení, Část 1, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví
- [49] COLLIE WELDING.*Heat input calculators*. [online], [cit. 2019-10-23]. Dostupné z: <https://www.colliewelding.com/hicalculators.php>
- [50] ČEZ a.s., Protokol o vstupní kontrole č. 17VKT6071
- [51] Technická norma ČSN EN ISO 15 614:2018. *Stanovení kvalifikace postupů svařování kovových materiálů – Zkouška postupu svařování – Část 1: obloukové a plamenové svařování ocelí a obloukové svařování slitin niklu*, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018
- [52] Jandera, M., Židlický, B., Šorf, M. *Příručka pro navrhování konstrukcí z korozivzdorné oceli*. Praha: nakladatelství ČVUT v Praze, 2017. ISBN 978185942 2359
- [53] Mazancová, E. *Technické materiály I*. Ostrava: VŠB Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2577-9

Seznam obrázků

<i>Obrázek 1: Spolupůsobící faktory vyvolávající KPN [16].</i>	str.	17
<i>Obrázek 2: Jednotlivé části oblouku [4].</i>	str.	21
<i>Obrázek 3: Tepelně ovlivněné oblasti svařového spoje [17].</i>	str.	22
<i>Obrázek 4: Vliv polohy osy elektrody vůči směru broušení [7].</i>	str.	27
<i>Obrázek 5: Vliv excentricity špičky elektrody na přesnost svařování [7].</i>	str.	27
<i>Obrázek 6: Graf s porovnáním hustot plynů používaných během svařování metodou WIG [3].</i>	str.	29
<i>Obrázek 7: Uzavřená svařovací hlavice Polysoude pro orbitální svařování [9].</i>	str.	31
<i>Obrázek 8: Otevřená svařovací U – hlavice Polysoude pro orbitální svařování [9].</i>	str.	32
<i>Obrázek 9: Polohy při orbitálním svařování [12].</i>	str.	33
<i>Obrázek 10: Znázornění polohy PK [20].</i>	str.	33
<i>Obrázek 11: Příklad rozdělení trajektorie elektrody na sektory [9].</i>	str.	34
<i>Obrázek 12: Schéma nukleace feritu/bainitu (B-bainit, WF-widmannstättenův ferit, AF-acukulární ferit, ATF-alotriomorfní ferit, IDF –idiomorfní ferit) [53].</i>	str.	36
<i>Obrázek 13: Působící síly a jejich směr během orbitálního svařování [29].</i>	str.	38
<i>Obrázek 14: Schéma tvorby „key-hole“ [44].</i>	str.	39
<i>Obrázek 15: Vliv rychlosti svařování na absorpci [44].</i>	str.	40
<i>Obrázek 16: Vliv odlišného úhlu přisunu drátu na odraz laserového paprsku [44].</i>	str.	40
<i>Obrázek 17: Vizuální porovnání orbitálního svaru vytvořeného laserem (vlevo) a metodou WIG (vpravo)[13].</i>	str.	41
<i>Obrázek 18: Materiály použité v experimentální části.</i>	str.	43
<i>Obrázek 19: Feriticko-perlitická struktura ZM P265GH, normalizačně válcováno.</i>	str.	44
<i>Obrázek 20: Austenitická struktura ZM s karbidickými vměstkami a patrným dvojčatěním po tváření.</i>	str.	45
<i>Obrázek 21: Schaefflerův diagram [16].</i>	str.	47
<i>Obrázek 22 : Otevřená svařovací hlava s dálkovým ovladačem.</i>	str.	49
<i>Obrázek 23: Uspořádání svařovací sestavy – 1 svařovací zdroj, 2 podavač drátu, 3 láhev s argonem, 4 svařovací hlava, 5 sestehované trubky.</i>	str.	49
<i>Obrázek 24: Úkos V bez otupení.</i>	str.	50
<i>Obrázek 25: Úkos V otupení 0,25 mm.</i>	str.	50
<i>Obrázek 26: Úkos V otupení 0,5 mm.</i>	str.	50
<i>Obrázek 27 : Úkos U.</i>	str.	50
<i>Obrázek 28 : Schéma uložení jednotlivých housenek.</i>	str.	50
<i>Obrázek 29: Steh po obvodu trubky pro všechny úkosy.</i>	str.	51

<i>Obrázek 30: Rozdělení průřezu trubky na sektory s naznačeným směrem svařování (poslední sektor z části překrývá první).</i>	str.	52
<i>Obrázek 31: Vzhled kořenové vrstvy (vlevo) a krycí vrstvy (vpravo) po svařování.</i>	str.	52
<i>Obrázek 32: Měřítka umístěná na spojených trubkách, vzorek V0_5.</i>	str.	57
<i>Obrázek 33: Umělá vada zhotovená vyjiskřováním (vlevo na straně austenitického materiálu, vpravo na straně uhlíkové oceli).</i>	str.	58
<i>Obrázek 34: Defektoskop k provádění inspekce ultrazvukem.</i>	str.	58
<i>Obrázek 35: Radiografická inspekce.</i>	str.	59
<i>Obrázek 36: Studený spoj na místě původního stehu – svařenec V0_5 (steh v poloze 50).</i>	str.	60
<i>Obrázek 37: Návrh umístění stehů k eliminaci vad (vlevo), čísla označují přibližnou polohu v mm podle umístěného měřítka (vpravo).</i>	str.	60
<i>Obrázek 38: Grafické porovnání vneseného tepla v jednotlivých sektorech kořenových vrstev a krycí vrstvy (vypočítaného podle nastavených parametrů).</i>	str.	61
<i>Obrázek 39 : Místa odběru vzorků k metalografii (vlevo) a zakončení svaru vpravo.</i>	str.	62
<i>Obrázek 40: Oblast kořene V0_5 13, patrná oduhličená zóna u linie ztavení, na kterou navazuje Widmannstättenova struktura.</i>	str.	64
<i>Obrázek 41: Vzorek V0_5 80 přechod P265GH / SK–povrch (vlevo) a přechod kořenová-krycí vrstva s podtavením ZM (vpravo).</i>	str.	64
<i>Obrázek 42: Vlevo široké karbidické pásmo kořene v důsledku podtaveného ZM ve svarovém kovu, vpravo karbidické pásmo u přechodu kořenové a krycí vrstvy – vzorek V0_5 150.</i>	str.	65
<i>Obrázek 43: Buněčná struktura svarového kovu v kořenové části 200x a 500x– vzorek V0_5 poloha 80.</i>	str.	65
<i>Obrázek 44: Vlevo přechod mezi kořenovou a krycí vrstvou ve svarovém kovu (přechod buněčné struktury na dendritickou), vpravo patrný δ ferit v mezidendritických prostorech krycí vrstvy – vzorek V0_5, poloha 80.</i>	str.	65
<i>Obrázek 45: Struktura v oblasti kořene u vzorku svařeného laserem 200x a 1000x.</i>	str.	66
<i>Obrázek 46: Porovnání kořenové oblasti V0_5 13 (vlevo) a 521_2_2 (vpravo) po naleptání struktury. SK.</i>	str.	66
<i>Obrázek 47: Schematické znázornění umístění série vtisků během měření průběhu tvrdosti.</i>	str.	67
<i>Obrázek 48: Vtisk v oblasti přechodu uhlíková ocel - SK</i>	str.	67
<i>Obrázek 49: Porovnání stehu úkosu U (vlevo) a V (vpravo).</i>	str.	69

Seznam tabulek

<i>Tabulka 1: Porovnání tepelné roztažnosti a tepelné vodivosti mezi uhlíkovou a austenitickou Cr-Ni ocelí [52].</i>	str.	15
<i>Tabulka 2: Charakteristické znaky oblouku [4].</i>	str.	21
<i>Tabulka 3: Oblasti použití svařovací metody WIG [3].</i>	str.	23
<i>Tabulka 4: Značení a legování wolframových elektrod [3].</i>	str.	26
<i>Tabulka 5: Popis poloh svařování [5].</i>	str.	33
<i>Tabulka 6: Porovnání laserů z hlediska vhodnosti k orbitálnímu svařování, + vhodné, - nevhodné, 0 neutrální [42].</i>	str.	42
<i>Tabulka 7: Porovnání vlastností úkosů.</i>	str.	43
<i>Tabulka 8: Požadavky na chemické složení oceli P265GH a složení tavby 12294 [38].</i>	str.	44
<i>Tabulka 9: Požadavky na mechanické vlastnosti materiálu P265GH a vlastnosti tavby 12294 [38].</i>	str.	44
<i>Tabulka 10: Chemické složení v hmot. % oceli X6CrNiMoTi 17-12-2 [39].</i>	str.	45
<i>Tabulka 11: Mechanické vlastnosti X6CrNiMoTi 17-12-2 při pokojové teplotě [39].</i>	str.	45
<i>Tabulka 12: Chemické složení PM v hmot. % [50].</i>	str.	46
<i>Tabulka 13: Minimální požadované mechanické vlastnosti Sv07Ch25N13 [50].</i>	str.	46
<i>Tabulka 14: Vypočtené ekvivalenty chromu a niklu pro použité materiály dle taveb s barevným rozlišením pro diagram (obrázek 21).</i>	str.	47
<i>Tabulka 15: Variace jednotlivých svařovaných úkosů</i>	str.	50
<i>Tabulka 16: Původní program – dále upravován jen pulzní proud kořenové vrstvy a rychlost přísunu drátu v obou vrstvách.</i>	str.	52
<i>Tabulka 17: Materiály vstupující do procesu svařování.</i>	str.	53
<i>Tabulka 18: Seznam svařovaných vzorků s označením podle typu úkosu.</i>	str.	53
<i>Tabulka 19: Parametry umělé vady vytvořené k nastavení ultrazvuku.</i>	str.	59
<i>Tabulka 20: Porovnání výhodnosti úkosů.</i>	str.	69

Seznam příloh

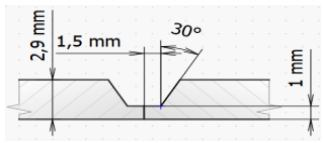
<i>Příloha 1: Parametry svařování a poloha vad vzorku U1.</i>	str.	87
<i>Příloha 2: Parametry svařování a poloha vad vzorku U2.</i>	str.	88
<i>Příloha 3: Parametry svařování a poloha vad vzorku U3</i>	str.	89
<i>Příloha 4: Parametry svařování a poloha vad vzorku V50_1.</i>	str.	90
<i>Příloha 5: Parametry svařování a poloha vad vzorku V50_2.</i>	str.	91
<i>Příloha 6: Parametry svařování a poloha vad vzorku V50_3.</i>	str.	92
<i>Příloha 7: Proměnné parametry svařování a nedestruktivní vyhodnocení svaru V50P1 (bez provaření kořene, další NDT zkoušky nebyly provedeny).</i>	str.	93
<i>Příloha 8: Proměnné parametry svařování a nedestruktivní vyhodnocení svaru V50P2 (bez provaření kořene, další NDT zkoušky nebyly provedeny.)</i>	str.	93
<i>Příloha 9: Parametry svařování a poloha vad vzorku V50P3.</i>	str.	94
<i>Příloha 10: Proměnné parametry svařování a nedestruktivní vyhodnocení svaru V25_1 (bez provaření kořene, další NDT zkoušky nebyly provedeny).</i>	str.	95
<i>Příloha 11: Proměnné parametry svařování a nedestruktivní vyhodnocení svaru V25_2 (bez provaření kořene, další NDT zkoušky nebyly provedeny).</i>	str.	95
<i>Příloha 12: Parametry svařování a poloha vad vzorku V25_3.</i>	str.	96
<i>Příloha 13: Parametry svařování a poloha vad vzorku V0_1.</i>	str.	97
<i>Příloha 14: Parametry svařování a poloha vad vzorku V0_2.</i>	str.	98
<i>Příloha 15: Parametry svařování a poloha vad vzorku V0_3.</i>	str.	99
<i>Příloha 16: Parametry svařování a poloha vad vzorku V0_4.</i>	str.	100
<i>Příloha 17: Parametry svařování a poloha vad vzorku V0_5.</i>	str.	97
<i>Příloha 18 : Doporučené hodnoty programu svařování na základě experimentu pro úkos V s otupením 0,5 mm.</i>	str.	102
<i>Příloha 19 : Doporučené hodnoty programu svařování na základě experimentu pro úkos V bez otupení.</i>	str.	102
<i>Příloha 20: Vypočtený průměrný proud a vnesené teplo na jednotku délky pro jednotlivé sektory u daných vzorků s odladěnými programy.</i>	str.	103
<i>Příloha 21: Parametry laserového svařování vzorku 521_2_2 – použití výkon 4100 W.</i>	str.	104
<i>Příloha 22: Makrostruktura vzorku svařeného laserem s průběhem měření tvrdosti HV 0,1.</i>	str.	105

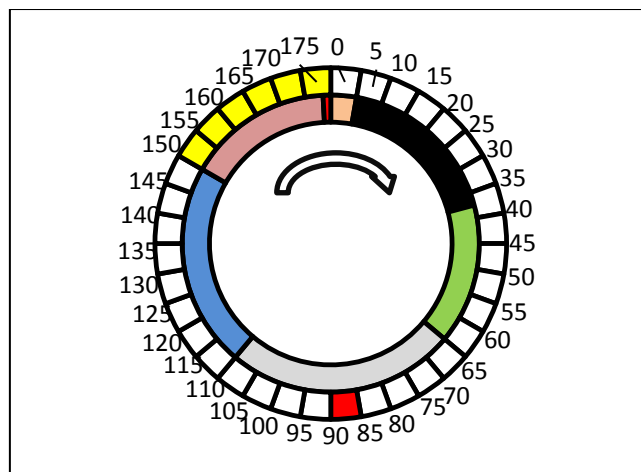
<i>Příloha 23: Průběh tvrdosti HV 0,1 u vzorku svařeného laserem (svislá osa tvrdost-vodorovná osa jednotlivé vtisky).</i>	str.	105
<i>Příloha 24: Makrostruktura svaru vzorku V0_5 (poloha 13) s průběhem měření tvrdosti HV 0,1.</i>	str.	106
<i>Příloha 25: Průběh tvrdosti HV 0,1 u vzorku V0_5 v poloze 13 (svislá osa tvrdost-vodorovná osa jednotlivé vtisky).</i>	str.	106
<i>Příloha 26: Makrostruktura svaru vzorku V0_5 (poloha 80) s průběhem měření tvrdosti HV 0,1.</i>	str.	107
<i>Příloha 27 : Průběh tvrdosti HV 0,1 u vzorku V0_5 v poloze 80 (svislá osa tvrdost-vodorovná osa jednotlivé vtisky).</i>	str.	107
<i>Příloha 28: Makrostruktura svaru vzorku V0_5 (poloha 110) s průběhem měření tvrdosti HV 0,1.</i>	str.	108
<i>Příloha 29: Průběh tvrdosti HV 0,1 u vzorku V0_5 v poloze 110 (svislá osa tvrdost-vodorovná osa jednotlivé vtisky).</i>	str.	108
<i>Obrázek 30: Makrostruktura svaru vzorku V0_5 (poloha 150) s průběhem měření tvrdosti HV 0,1.</i>	str.	109
<i>Příloha 31: Průběh tvrdosti HV 0,1 u vzorku V0_5 v poloze 150 (svislá osa tvrdost-vodorovná osa jednotlivé vtisky).</i>	str.	109
<i>Příloha 32: Makrostruktura svaru vzorku V0_5 (poloha 167-steh) s průběhem měření tvrdosti HV 0,1.</i>	str.	110
<i>Příloha 33: Průběh tvrdosti HV 0,1 u vzorku V0_5 v poloze 167 (svislá osa tvrdost-vodorovná osa jednotlivé vtisky).</i>	str.	110
<i>Příloha 34: Snímky TOO uhlíkové oceli v kořenové části vzorek svařený laserem-521_2_2.</i>	str.	111
<i>Příloha 35: Příloha 34: Snímky TOO uhlíkové oceli ve středu vzorku svařeného laserem-521_2_2.</i>	str.	111
<i>Příloha 36: Snímky TOO uhlíkové oceli v oblasti koruny svaru - vzorek svařený laserem-521_2_2.</i>	str.	111
<i>Příloha 37: Snímky TOO uhlíkové oceli v kořenové části vzorek V0_5, poloha 13 (WIG).</i>	str.	112
<i>Příloha 38: Snímky TOO uhlíkové oceli v oblasti přechodu krycí a kořenové vrstvy-vzorek V0_5, poloha 13 (WIG).</i>	str.	112
<i>Příloha 39: Snímky TOO uhlíkové oceli v části koruny svaru - vzorek V0_5, poloha 13 (WIG).</i>	str.	112
<i>Příloha 40: Snímky TOO uhlíkové oceli v kořenové části vzorek V0_5, poloha 80 (WIG).</i>	str.	113
<i>Příloha 41: Snímky TOO uhlíkové oceli v oblasti přechodu krycí a kořenové vrstvy-vzorek V0_5, poloha 80 (WIG).</i>	str.	113
<i>Příloha 42: Snímky TOO uhlíkové oceli v části koruny svaru - vzorek V0_5, poloha 80 (WIG).</i>	str.	113

<i>Příloha 43: Snímky TOO uhlíkové oceli v kořenové části vzorek V0_5, poloha 150 (WIG).</i>	str.	114
<i>Příloha 44: Snímky TOO uhlíkové oceli v oblasti přechodu krycí a kořenové vrstvy-vzorek V0_5, poloha 150(WIG).</i>	str.	114
<i>Příloha 45: Snímky TOO uhlíkové oceli v části koruny svaru - vzorek V0_5, poloha 150 (WIG).</i>	str.	114
<i>Příloha 46: Přejchod uhlíková ocel / SK – oblast kořene, vzorek svařený laserem 521_2_2.</i>	str.	115
<i>Příloha 47: Přejchod uhlíková ocel / SK – oblast středu svaru, vzorek svařený laserem 521_2_2.</i>	str.	115
<i>Příloha 48: Přejchod uhlíková ocel / SK – oblast koruny svaru, vzorek svařený laserem 521_2_2.</i>	str.	115
<i>Příloha 49: Přejchod uhlíková ocel / SK – oblast kořene, vzorek V0_5 poloha 13.</i>	str.	116
<i>Příloha 50: Přejchod uhlíková ocel / SK – oblast přechodu kořenové a krycí vrstvy, vzorek V0_5 poloha 13.</i>	str.	116
<i>Příloha 51: Přejchod uhlíková ocel / SK – oblast koruny svaru, vzorek V0_5 poloha 13.</i>	str.	116
<i>Příloha 52: Přejchod uhlíková ocel / SK – oblast kořene, vzorek V0_5 poloha 80</i>	str.	117
<i>Příloha 53: Přejchod uhlíková ocel / SK – oblast přechodu kořenové a krycí vrstvy, vzorek V0_5 poloha 80.</i>	str.	117
<i>Příloha 54: Přejchod uhlíková ocel / SK – oblast koruny svaru, vzorek V0_5 poloha 80.</i>	str.	117
<i>Příloha 55: Přejchod uhlíková ocel / SK – oblast kořene, vzorek V0_5 poloha 110.</i>	str.	118
<i>Příloha 56: Přejchod uhlíková ocel / SK – oblast přechodu kořenové a krycí vrstvy, vzorek V0_5 poloha 110.</i>	str.	118
<i>Příloha 57: Přejchod uhlíková ocel / SK – oblast koruny svaru, vzorek V0_5 poloha 110.</i>	str.	118
<i>Příloha 58: Přejchod uhlíková ocel / SK – oblast kořene, vzorek V0_5 poloha 150.</i>	str.	119
<i>Příloha 59: Přejchod uhlíková ocel / SK – oblast přechodu kořenové a krycí vrstvy, vzorek V0_5 poloha 150.</i>	str.	119
<i>Příloha 60: Přejchod uhlíková ocel / SK – oblast koruny svaru, vzorek V0_5 poloha 150.</i>	str.	120
<i>Příloha 61: Přejchod uhlíková ocel / SK – oblast kořene, vzorek V0_5 poloha 167.</i>	str.	120
<i>Příloha 62: Přejchod uhlíková ocel / SK – oblast přechodu kořenové a krycí vrstvy, vzorek V0_5 poloha 167.</i>	str.	120
<i>Příloha 63: Přejchod uhlíková ocel / SK – oblast koruny svaru, vzorek V0_5 poloha 167.</i>	str.	121
<i>Příloha 64: Radiografické snímky s vizuálním porovnáním – vzorek U1.</i>	str.	122-123
<i>Příloha 65: Radiografické snímky s vizuálním porovnáním – vzorek U2.</i>	str.	124-125

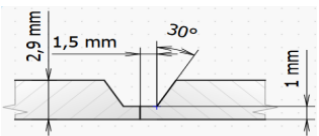
<i>Příloha 66: Radiografické snímky s vizuálním porovnáním – vzorek U3.</i>	str.	126-127
<i>Příloha 67: Radiografické snímky s vizuálním porovnáním – vzorek V50P.</i>	str.	128-129
<i>Příloha 68: Radiografické snímky s vizuálním porovnáním – vzorek V50_1.</i>	str.	130-131
<i>Příloha 69: Radiografické snímky s vizuálním porovnáním – vzorek V50_2.</i>	str.	132-133
<i>Příloha 70: Radiografické snímky s vizuálním porovnáním – vzorek V50_3.</i>	str.	134
<i>Příloha 71: Radiografické snímky s vizuálním porovnáním – vzorek V25_3.</i>	str.	135
<i>Příloha 72: Radiografické snímky s vizuálním porovnáním – vzorek V0_1.</i>	str.	136
<i>Příloha 73: Radiografické snímky s vizuálním porovnáním – vzorek V0_2.</i>	str.	137
<i>Příloha 74: Radiografické snímky s vizuálním porovnáním – vzorek V0_3.</i>	str.	138
<i>Příloha 75: Radiografické snímky s vizuálním porovnáním – vzorek V0_4.</i>	str.	139
<i>Příloha 76: Radiografické snímky s vizuálním porovnáním – vzorek V0_5.</i>	str.	140
<i>Příloha 77: vzorek V0_5.</i>	str.	141-142

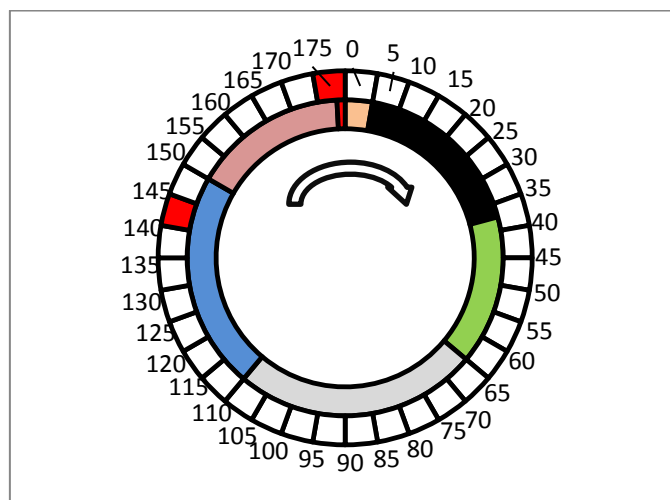
Příloha

Označení trubky	U1						
Typ úkosu	U						
Sektor	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07
Kořenová vrstva							
I_p [A]	110	105	105	95	95	90	100
V_{dr} [mm/min]	250	250	300	300	300	350	350
Krycí vrstva							
V_{dr} [mm/min]	350	330	280	200	250	270	280
NDT							
indikace-označení							
Poloha vady [mm]	VT		RT	UT			
	Kořen	Povrch					
90 (steh)			4011				
150-180	nedokončený svar						

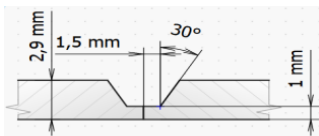


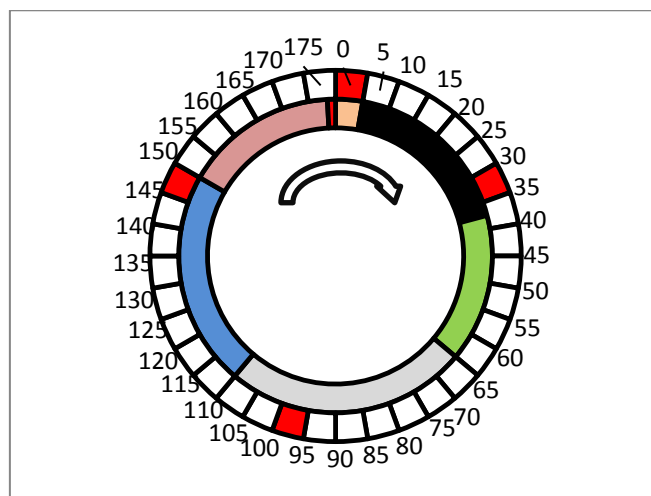
Příloha 1: Parametry svařování a poloha vad vzorku U1.

Označení trubky	U2						
Typ úkosu	U						
Sektor	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07
Kořenová vrstva							
I_p [A]	110	105	105	95	95	90	100
V_{dr} [mm/min]	250	250	300	300	300	350	350
Krycí vrstva							
V_{dr} [mm/min]	350	330+d	280+d	200+d	250++d	270++d	280++d
NDT							
indikace-označení							
Poloha vady [mm]	VT		RT	UT			
	Kořen	Povrch					
140		511	511				
180	5013	511	5013				

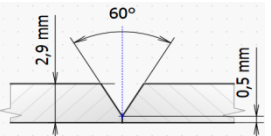


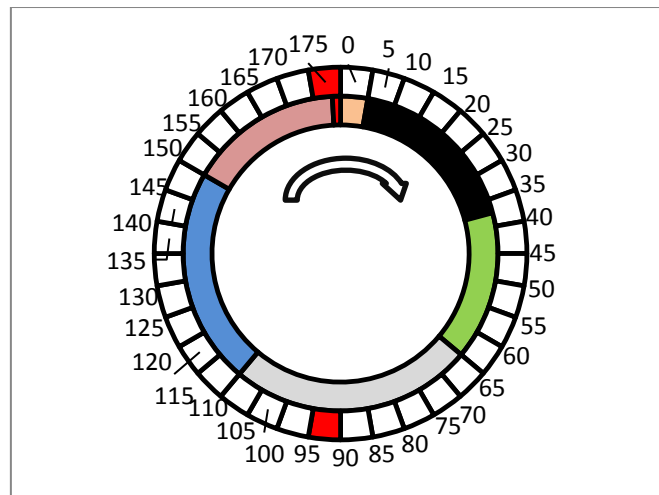
Příloha 2: Parametry svařování a poloha vad vzorku U2.

Označení trubky	U3						
Typ úkosu	U						
Sektor	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07
Kořenová vrstva							
I_p [A]	110	105	105	95	95	90	100
V_{dr} [mm/min]	250	250	300	300	300	350	350
Krycí vrstva							
V_{dr} [mm/min]	350	380	330	250	300+d	320+d	330+d
NDT							
indikace-označení							
Poloha vady [mm]	VT		RT	UT			
	Kořen	Povrch					
0			4011	4011			
35 (heft)	4021		4021				
98 (heft)			300				
148 (heft)	4021						

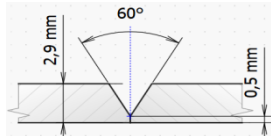


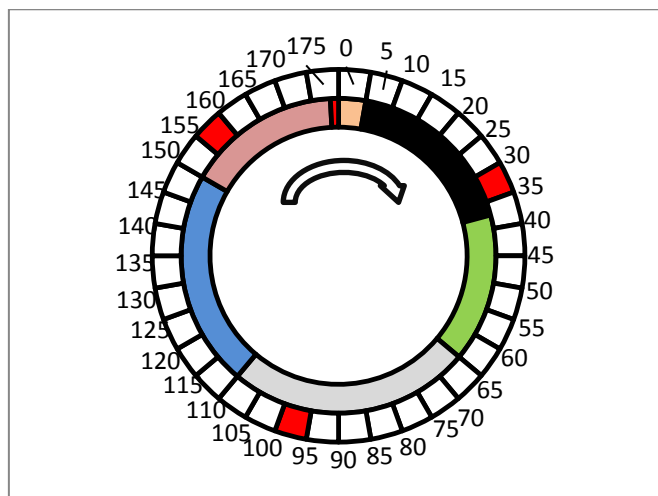
Příloha 3: Parametry svařování a poloha vad vzorku U3.

Označení trubky	V50_1						
Typ úkosu	V otupení 0,5 mm						
Sektor	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07
Kořenová vrstva							
I_p [A]	125	120	110	105	110	100	110
V_{dr} [mm/min]	175	205	150+d	150+d	15+d	150+d	160+d
Krycí vrstva							
V_{dr} [mm/min]	175	205	150+d	150+d	15+d	150+d	160+d
NDT							
indikace-označení							
Poloha vady [mm]	VT		RT	UT			
	Kořen	Povrch					
93 (heft)	4021		4021				
178			4011	4011			

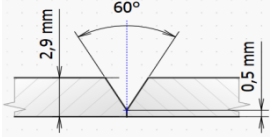


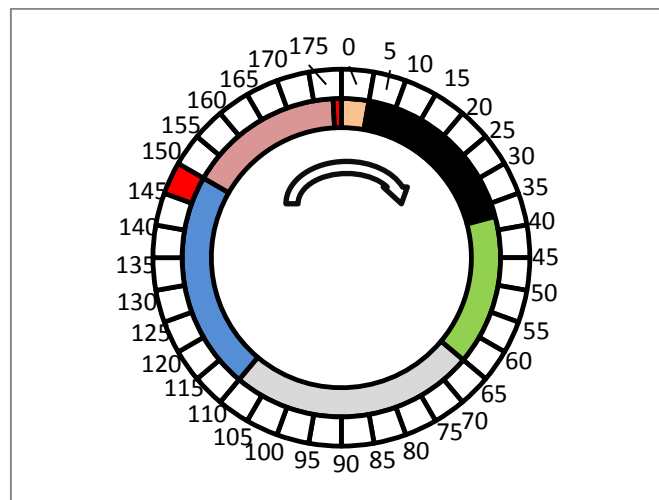
Příloha 4: Parametry svařování a poloha vad vzorku V50_1.

Označení trubky	V50_2						
Typ úkosu	V otupení 0,5 mm						
Sektor	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07
Kořenová vrstva							
I_p [A]	125	120	110	105	110	100	110
V_{dr} [mm/min]	175	205	150+d	150+d	15+d	150+d	160+d
Krycí vrstva							
V_{dr} [mm/min]	175	205	150+d	150+d	15+d	150+d	160+d
NDT							
indikace-označení							
Poloha vady [mm]	VT		RT	UT			
	Kořen	Povrch					
35(heft)	4013		4013				
85-140		513					
90-105 (heft)	4013		4013				
140			4011	4011			
155(heft)	516		516				

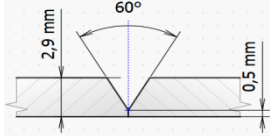


Příloha 5: Parametry svařování a poloha vad vzorku V50_2.

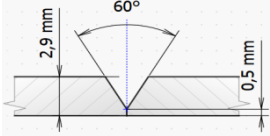
Označení trubky	V50_3						
Typ úkosu	V otupení 0,5 mm						
Sektor	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07
Kořenová vrstva							
I_p [A]	125	120	115	110	110	100	110
V_{dr} [mm/min]	150	150	200	200	200	200	250
Krycí vrstva							
V_{dr} [mm/min]	175	205	150+d	150+d	150+d	150+d	160+d
NDT							
indikace-označení							
Poloha vady [mm]	VT		RT	UT			
	Kořen	Povrch					
148 (heft)	4013		4013				



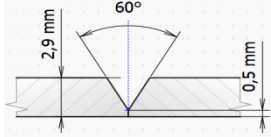
Příloha 6: Parametry svařování a poloha vad vzorku V50_3.

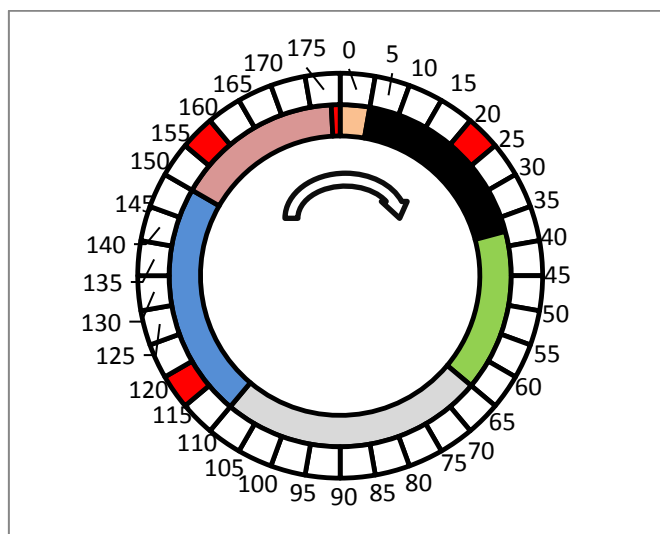
Označení trubky	V50P1						
Typ úkosu	V otupení 0,5 mm						
Sektor	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07
Kořenová vrstva							
I_p [A]	110	105	105	95	95	90	100
V_{dr} [mm/min]	150	150	200	200	200	200	250
Krycí vrstva							
V_{dr} [mm/min]	krycí vrstva neprovedena						

Příloha 7: Proměnné parametry svařování a nedestructivní vyhodnocení svaru V50P1 (bez provaření kořene, další NDT zkoušky nebyly provedeny).

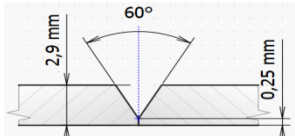
Označení trubky	V50P2						
Typ úkosu	V otupení 0,5 mm						
Sektor	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07
Kořenová vrstva							
I_p [A]	120	115	110	100	105	100	110
V_{dr} [mm/min]	150	150	200	200	200	200	250
Krycí vrstva							
V_{dr} [mm/min]	krycí vrstva neprovedena						

Příloha 8: Proměnné parametry svařování a nedestructivní vyhodnocení svaru V50P2 (bez provaření kořene, další NDT zkoušky nebyly provedeny.)

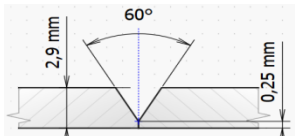
Označení trubky	V50P3						
Typ úkosu	V otupení 0,5 mm						
Sektor	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07
Kořenová vrstva							
I_p [A]	125	120	110	105	110	100	110
V_{dr} [mm/min]	150	150	200	200	200	200	250
Krycí vrstva							
V_{dr} [mm/min]	175	205	150	150	150+++d	150--d	160
NDT							
indikace-označení							
Poloha vady [mm]	VT		RT	UT			
	Kořen	Povrch					
20			2011				
120 (heft)	4021						
158 (heft)			2011				



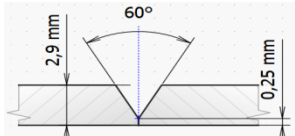
Příloha 9: Parametry svařování a poloha vad vzorku V50P3.

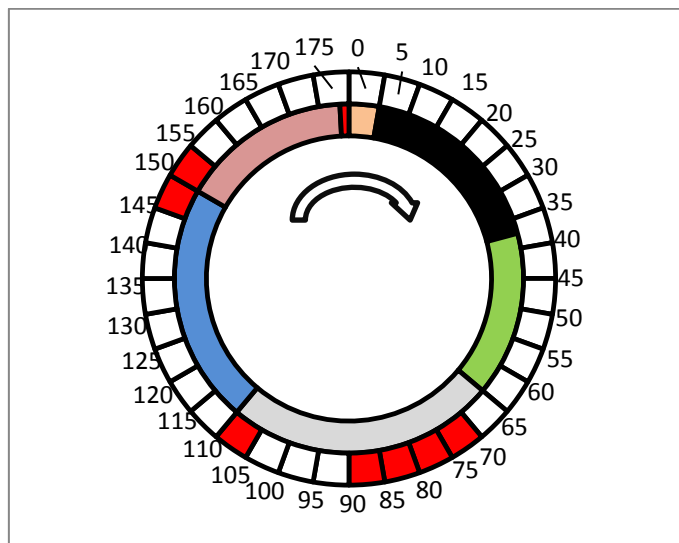
Označení trubky	V25_1						
Typ úkosu	V otupení 0,25 mm						
Sektor	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07
Kořenová vrstva							
I_p [A]	110	105	105	95	95	90	100
V_{dr} [mm/min]	150	150	200	200	200	200	250
Krycí vrstva							
V_{dr} [mm/min]	bez krycí vrstvy						

Příloha 10: Proměnné parametry svařování a nedestruktivní vyhodnocení svaru V25_1 (bez provaření kořene, další NDT zkoušky nebyly provedeny).

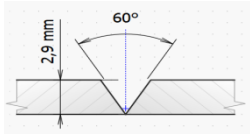
Označení trubky	V25_2						
Typ úkosu	V otupení 0,25 mm						
Sektor	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07
Kořenová vrstva							
I_p [A]	115	110	110	100	100	95	105
V_{dr} [mm/min]	150	150	200	200	200	200	250
Krycí vrstva							
V_{dr} [mm/min]	bez krycí vrstvy						

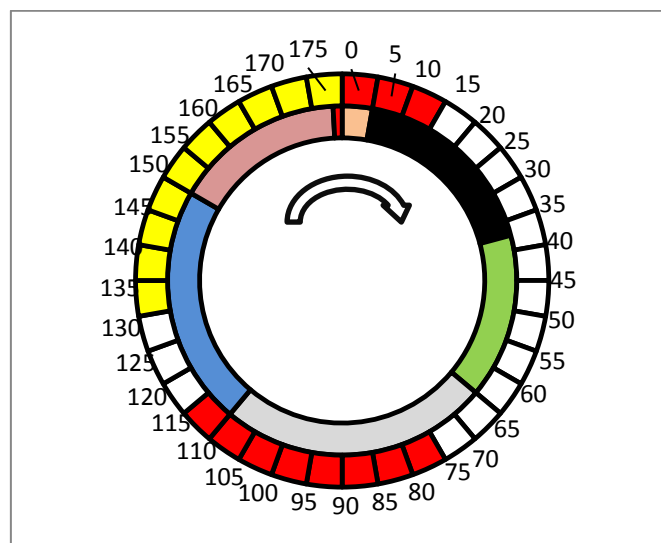
Příloha 11: Proměnné parametry svařování a nedestruktivní vyhodnocení svaru V25_2 (bez provaření kořene, další NDT zkoušky nebyly provedeny).

Označení trubky	V25_3						
Typ úkosu	V otupení 0,25 mm						
Sektor	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07
Kořenová vrstva							
I_p [A]	115	110	110	105	100	95	105
V_{dr} [mm/min]	150	150	200	200	200	200	250
Krycí vrstva							
V_{dr} [mm/min]	215	250	250	200	200	200	210
NDT							
indikace-označení							
Poloha vady [mm]	VT		RT	UT			
	Kořen	Povrch					
70-90	4021		4021				
105 (heft)	4013		4013	4011			
145-155(heft)			4013				

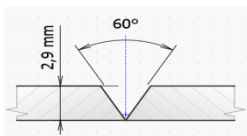


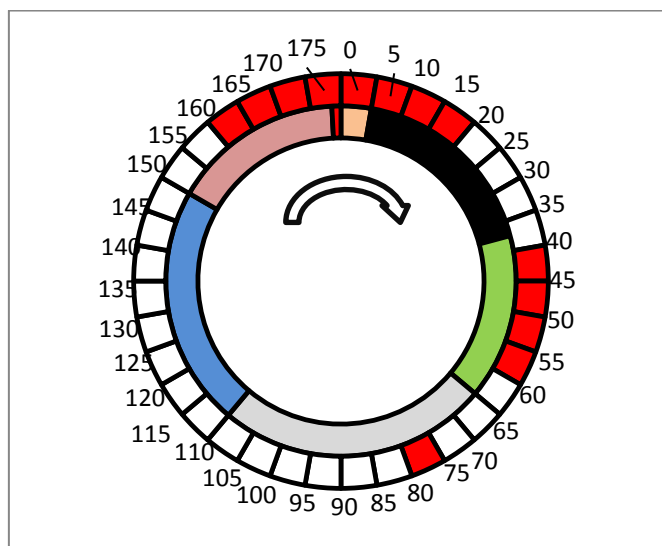
Příloha 12: Parametry svařování a poloha vad vzorku V25_3.

Označení trubky	V0_1							
Typ úkosu	V bez otupení							
Sektor	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07	
Kořenová vrstva								
I_p [A]	110	105	105	95	95	90	100	
V_{dr} [mm/min]	156	156	187	187	187	187	218	
Krycí vrstva								
V_{dr} [mm/min]	350	330	280	200	250	270	280	
NDT								
indikace-označení								
Poloha vady [mm]	VT		RT	UT				
	Kořen	Povrch						
75-115	4021		4021					
0-15	4021		4021					
130-180	nedokončený svar							

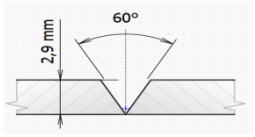


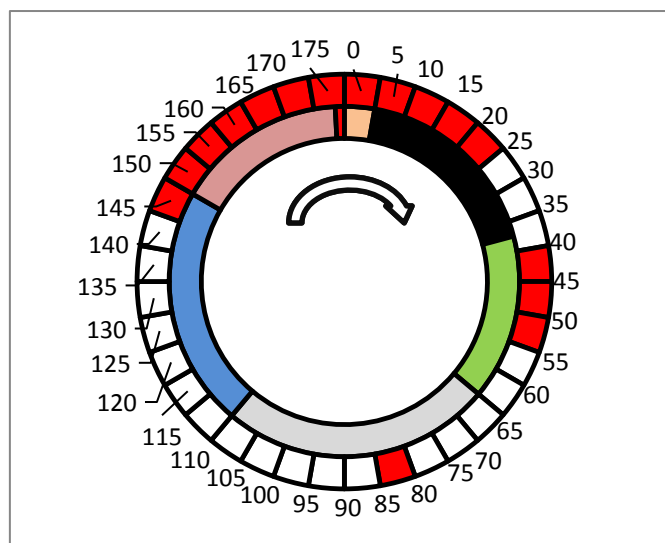
Příloha 13: Parametry svařování a poloha vad vzorku V0_1.

Označení trubky	V0_2						
Typ úkosu	V bez otupení						
Sektor	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07
Kořenová vrstva							
I_p [A]	115	110	105	100	95	90	100
V_{dr} [mm/min]	156	156	187	187	187	187	218
Krycí vrstva							
V_{dr} [mm/min]	350	330	280	200	250	270	280
NDT							
indikace-označení							
Poloha vady [mm]	VT		RT	UT			
	Kořen	Povrch					
40-60	4021		4021				
75 (heft)			303				
75 (heft)	4013		4013				
160-20 (heft)	4021						

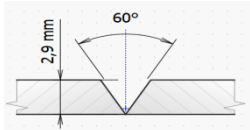


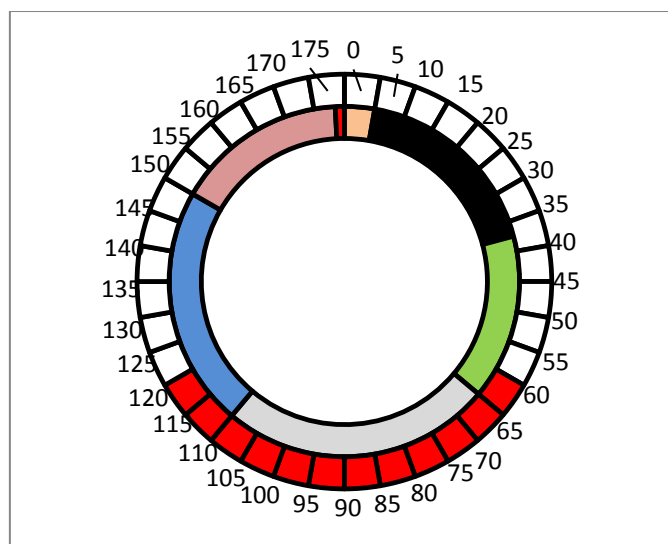
Příloha 14: Parametry svařování a poloha vad vzorku V0_2.

Označení trubky	V0_3						
Typ úkosu	V bez otupení						
Sektor	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07
Kořenová vrstva							
I_p [A]	115	110	105	100	95	90	100
V_{dr} [mm/min]	156	156	187	187	187	187	218
Krycí vrstva							
V_{dr} [mm/min]	350	330	280	200	250	270	280
NDT							
indikace-označení							
Poloha vady [mm]	VT		RT	UT			
	Kořen	Povrch					
40-55	4021		4021				
75 (heft)			303				
75 (heft)	4013		4013				
10		511	511				
40-50		511	511				
150		511	511				

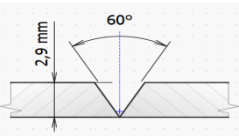


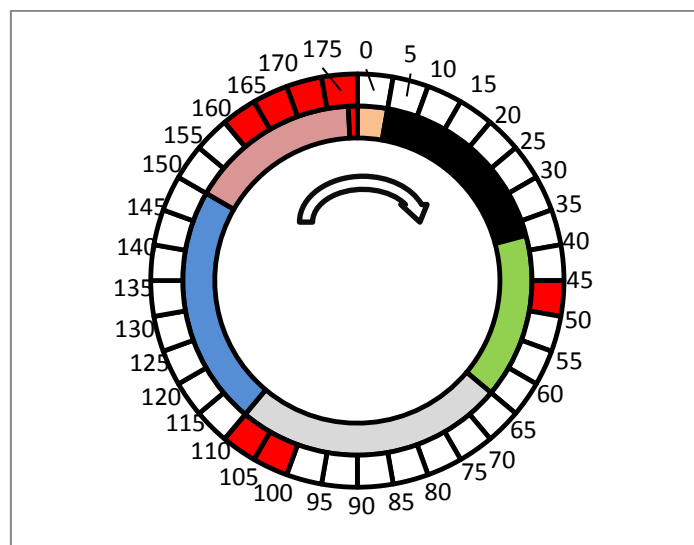
Příloha 15: Parametry svařování a poloha vad vzorku V0_3.

Označení trubky	V0_4						
Typ úkosu	V bez otupení						
Sektor	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07
Kořenová vrstva							
I_p [A]	115	115	105	100	95	95	105
V_{dr} [mm/min]	156	156	187	187	187	187	218
Krycí vrstva							
V_{dr} [mm/min]	350	330	280	200	250	270	280
NDT							
indikace-označení							
Poloha vady [mm]	VT		RT	UT			
	Kořen	Povrch					
60 - 120	4021		4021				
95 (heft)			303				



Příloha 16: Parametry svařování a poloha vad vzorku V0_4.

Označení trubky	V0_5						
Typ úkosu	V bez otupení						
Sektor	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07
Kořenová vrstva							
I_p [A]	115	115	105	100	95	95	105
V_{dr} [mm/min]	156	156	187	187	187	187	218
Krycí vrstva							
V_{dr} [mm/min]	350	330	280	200	250	270	280
NDT							
indikace-označení							
Poloha vady [mm]	VT		RT	UT			
	Kořen	Povrch					
45-50 (heft)	4013		4013				
100-110 (heft)	4013						
160-0 (heft)	4013						
155-0		511	511				



Příloha 17: Parametry svařování a poloha vad vzorku V0_5.

Doporučené hodnoty programu - úkos V s otupením 0,50 mm							
Sektor	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Kořenová vrstva							
I_p [A]	125	120	110	105	110	100	110
I_z [A]	60	60	58	55	55	55	58
V_{dr} [mm/min]	150	150	200	200	200	200	250
U [V]	8	7,9	7,8	7,8	7,8	7,9	8
V_{oh} [mm/min]	50	50	50	50	50	50	50
Krycí vrstva							
I_p [A]	70	65	64	62	60	57	62
I_z [A]	40	40	40	40	40	40	42
V_{dr} [mm/min]	175	205	200	200	200	200	210
U [V]	8,6	8,4	8,4	8,4	8,5	8,5	8,5
V_{oh} [mm/min]	50	50	50	50	50	50	50

Příloha 18 : Doporučené hodnoty programu svařování na základě experimentu pro úkos V s otupením 0,5 mm.

Doporučené hodnoty programu - úkos V bez otupení							
Sektor	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Kořenová vrstva							
I_p [A]	120	115	105	95	95	95	105
I_z [A]	60	60	58	55	55	55	58
V_{dr} [mm/min]	156	156	187	187	187	187	218
U [V]	8	7,9	7,8	7,8	7,8	7,9	8
V_{oh} [mm/min]	50	50	50	50	50	50	50
Krycí vrstva							
I_p [A]	70	65	64	62	60	57	62
I_z [A]	40	40	40	40	40	40	42
V_{dr} [mm/min]	350	350	280	200	250	250	260
U [V]	8,6	8,4	8,4	8,4	8,5	8,5	8,5
V_{oh} [mm/min]	50	50	50	50	50	50	50

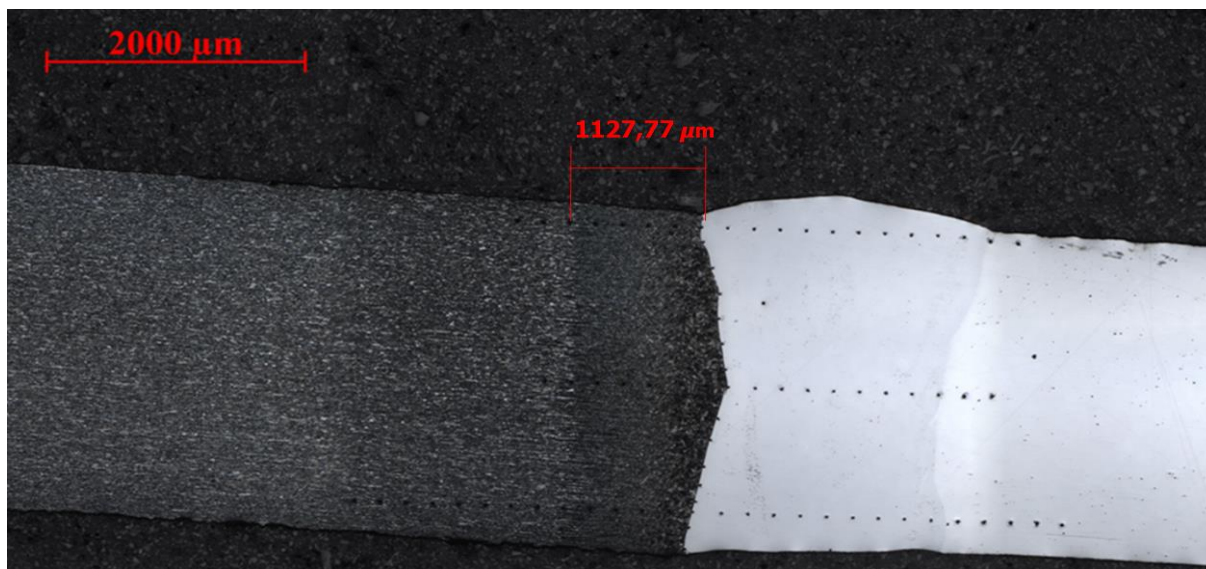
Příloha 19 : Doporučené hodnoty programu svařování na základě experimentu pro úkos V bez otupení.

Vzorek	Parametr	Sektor						
		S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07
V50_3	I_A [A]	92,5	90	86,5	82,5	82,5	77,5	84
	Q_v [kJ/mm]	0,533	0,512	0,486	0,463	0,463	0,441	0,484
V0_5	I_A [A]	90	87,5	81,5	75	75	75	81,5
	Q_v [kJ/mm]	0,518	0,498	0,458	0,421	0,421	0,427	0,469
U	I_A [A]	85	82,5	81,5	75	75	72,5	79
	Q_v [kJ/mm]	0,490	0,469	0,458	0,421	0,421	0,412	0,455
Krycí vrstva	I_A [A]	55	52,5	52	51	50	48,5	52
	Q_v [kJ/mm]	0,341	0,318	0,314	0,308	0,306	0,297	0,318

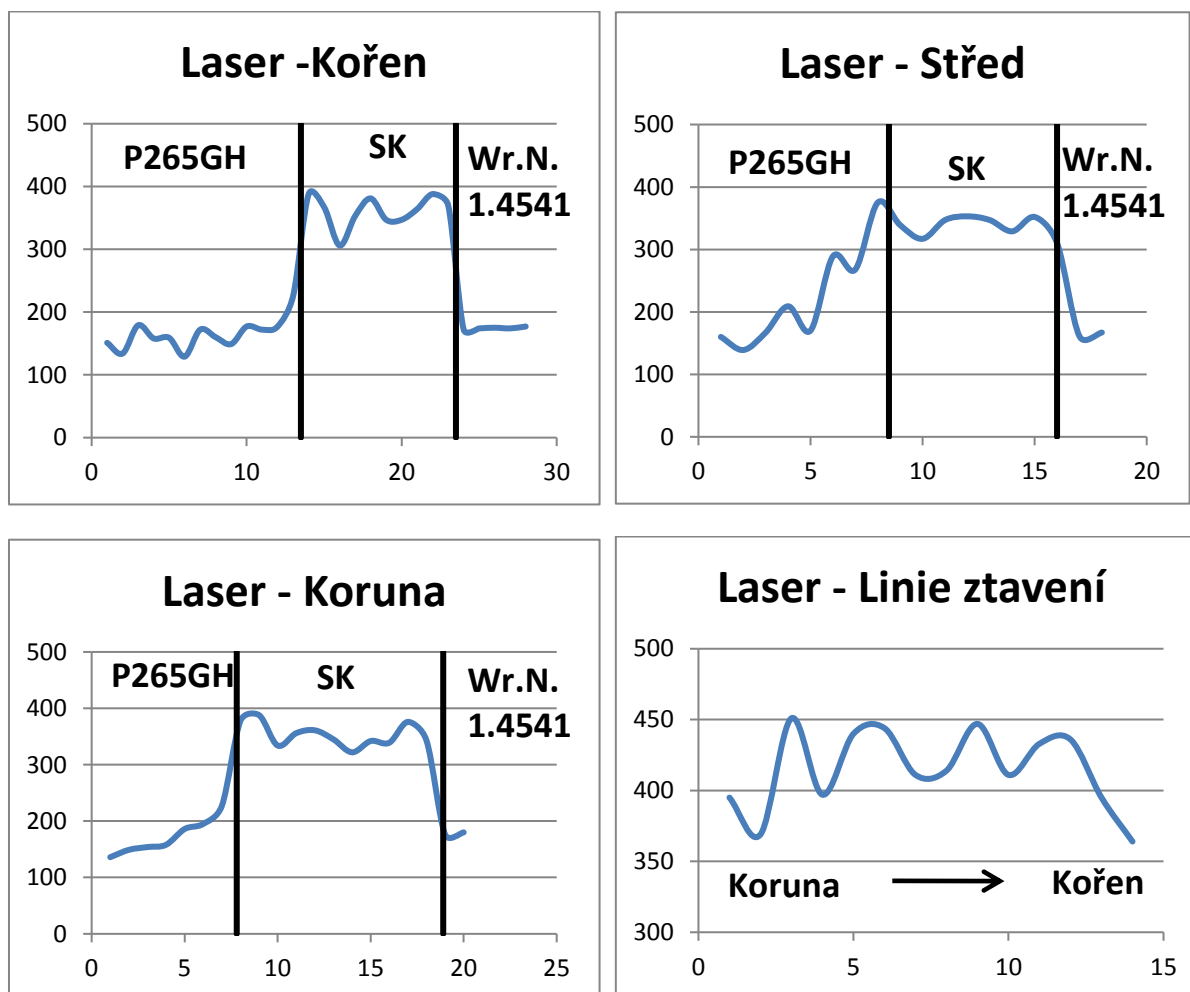
Príloha 20: Vypočtený průměrný proud a vnesené teplo na jednotku délky pro jednotlivé sektory u daných vzorků s odladěnými programy.

ZÁZNAM PARAMETRŮ SVAŘOVÁNÍ	
dle ČSN EN ISO 15609-4	
Výrobce	LaserTherm spol.s.r.o Plzeňská 157/98,150 00 PRAHA 5
<p>Číslo záznamu Svářečský operátor podle EN ISO 14732 Metoda svařování Svařovací zařízení Laserový zdroj Systém přenosu paprsku Typ zařízení Typ paprsku Specifikace základního materiálu 1 Specifikace základního materiálu 2 Tloušťka materiálu 1 Tloušťka materiálu 2 Vnější průměr Přídavný materiál, rozměr Typ spoje Poloha svařování Upínací přípravek Příprava svarových ploch Stehování</p>	<p>1007/01 Zajíc Jiří, Matouš Viktora 521 podle EN ISO 4063 LASERLINE LDF 10000-100 Přímý Vláknový Laser Optickým vláknem CW (kontinuální) Gaussovský MAT. P265GH - TRUBKA OCELOVÁ, BEZEŠVÁ, PŘESNÁ MAT. 1.4541 - TRUBKA OCELOVÁ, BEZEŠVÁ, PŘESNÁ t mat. 1 = 2,6 mm t mat. 2 = 2,6 mm 44,5 Ne Tupý spoj PA Sklíčidlo SKL- 315 Obrobení, odmaštění Metodou 521, bez přídavného materiálu</p> <p style="text-align: right;">Revize 0</p>
TVAR SPOJE	TECHNIKA SVAŘOVÁNÍ

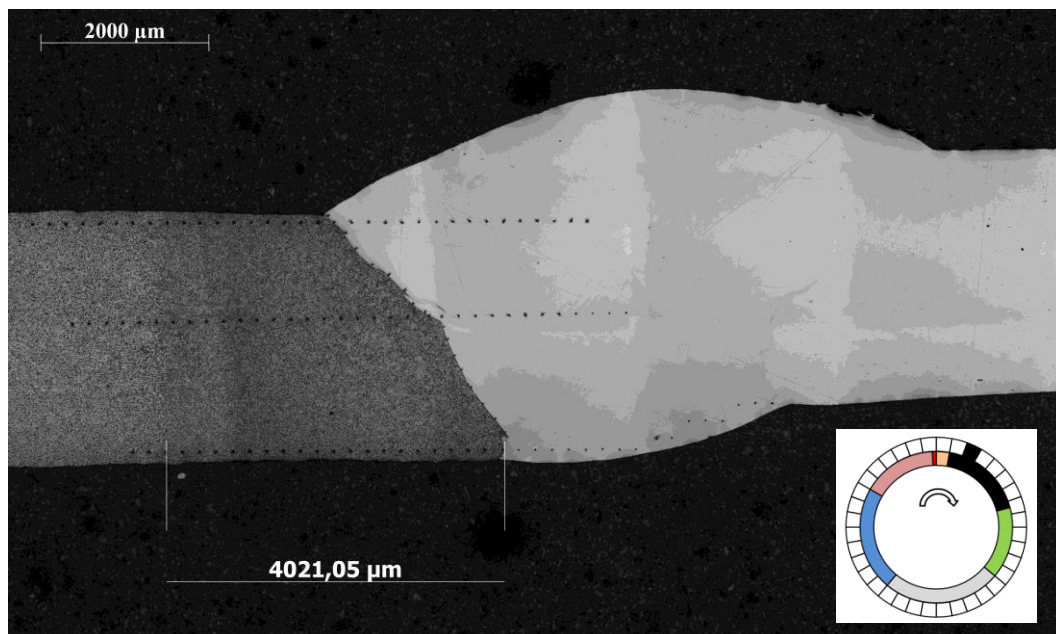
Příloha 21: Parametry laserového svařování vzorku 521_2_2 – použití výkon 4100 W.



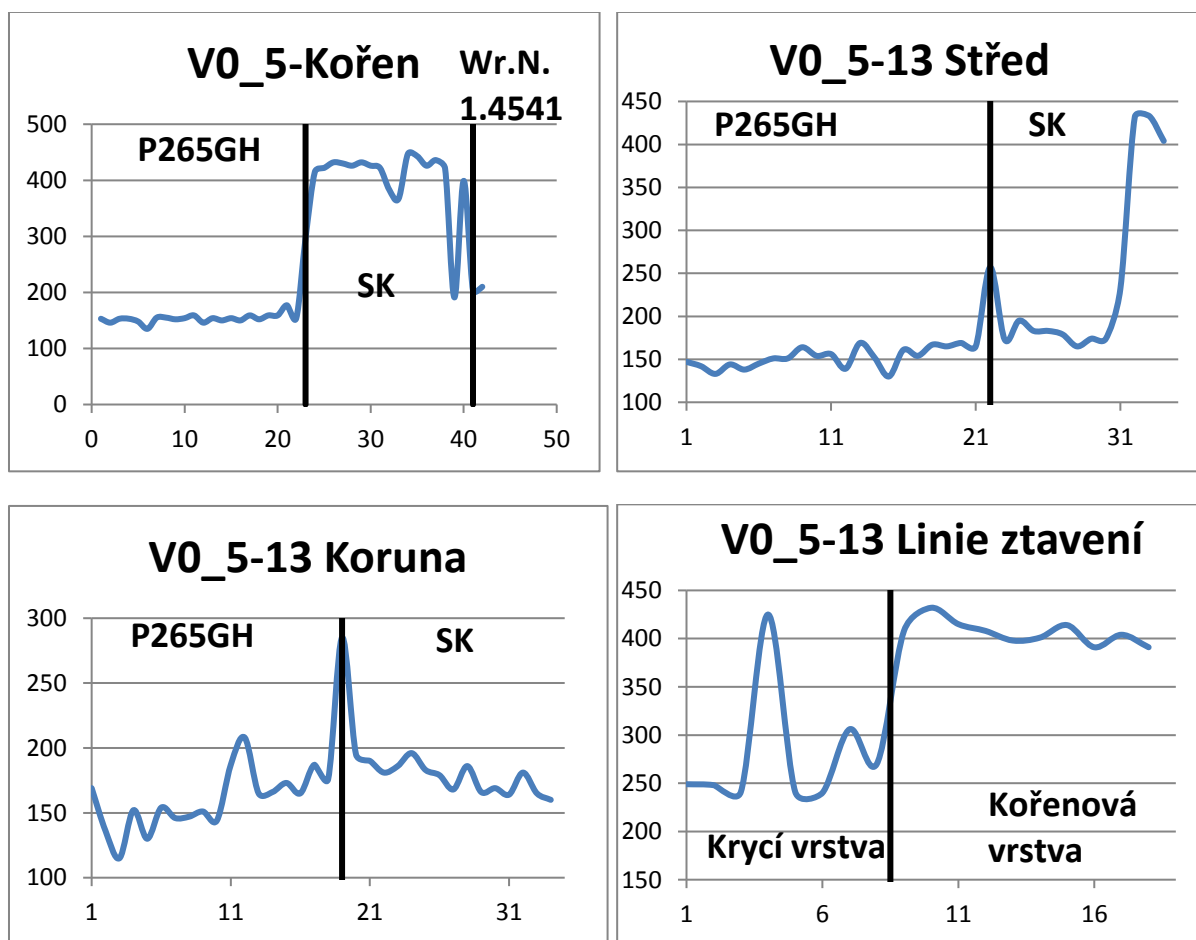
Příloha 22: Makrostruktura vzorku svařeného laserem s průběhem měření tvrdosti HV 0,1.



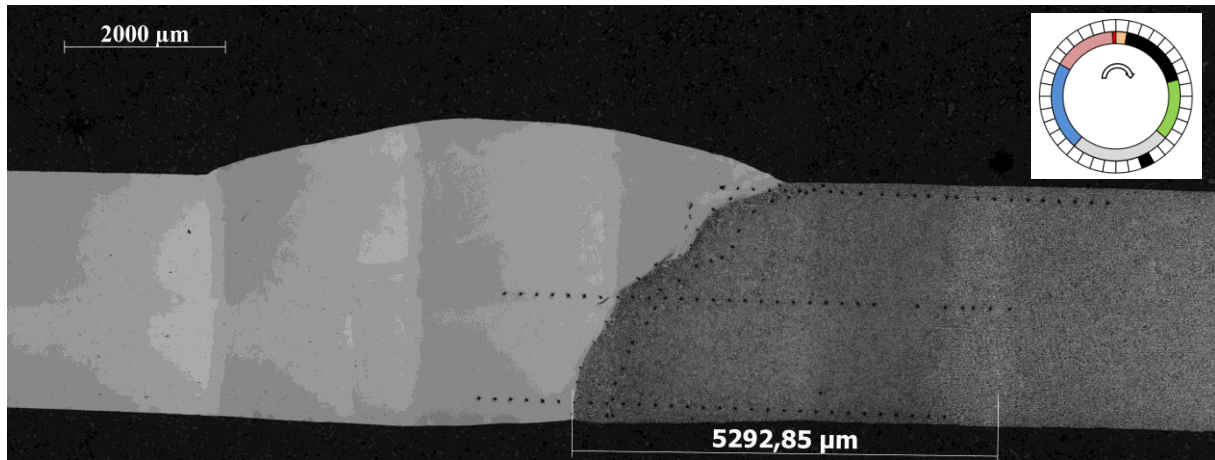
Příloha 23: Průběh tvrdosti HV 0,1 u vzorku svařeného laserem (svislá osa tvrdost-vodorovná osa jednotlivé vtisky).



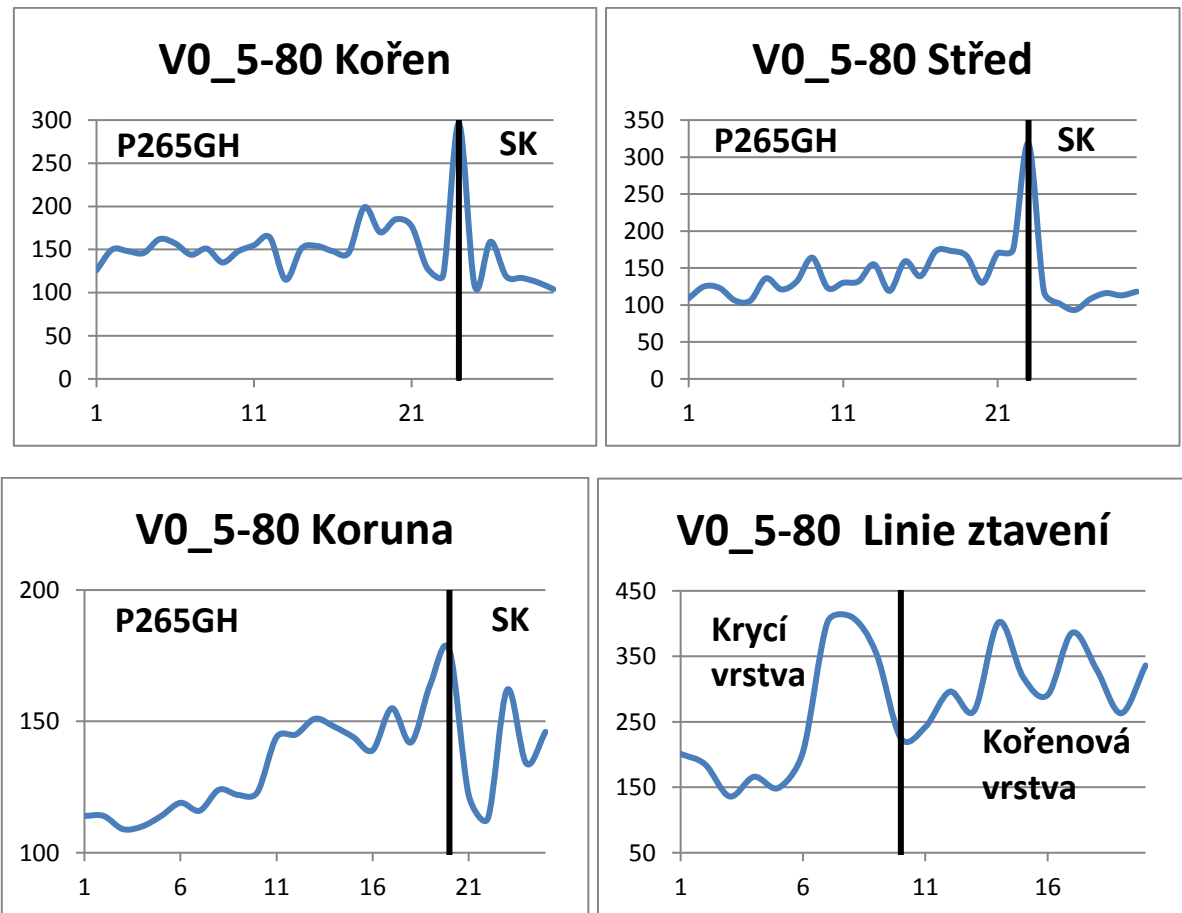
Příloha 24: Makrostruktura svaru vzorku V0_5 (poloha 13) s průběhem měření tvrdosti HV 0,1.



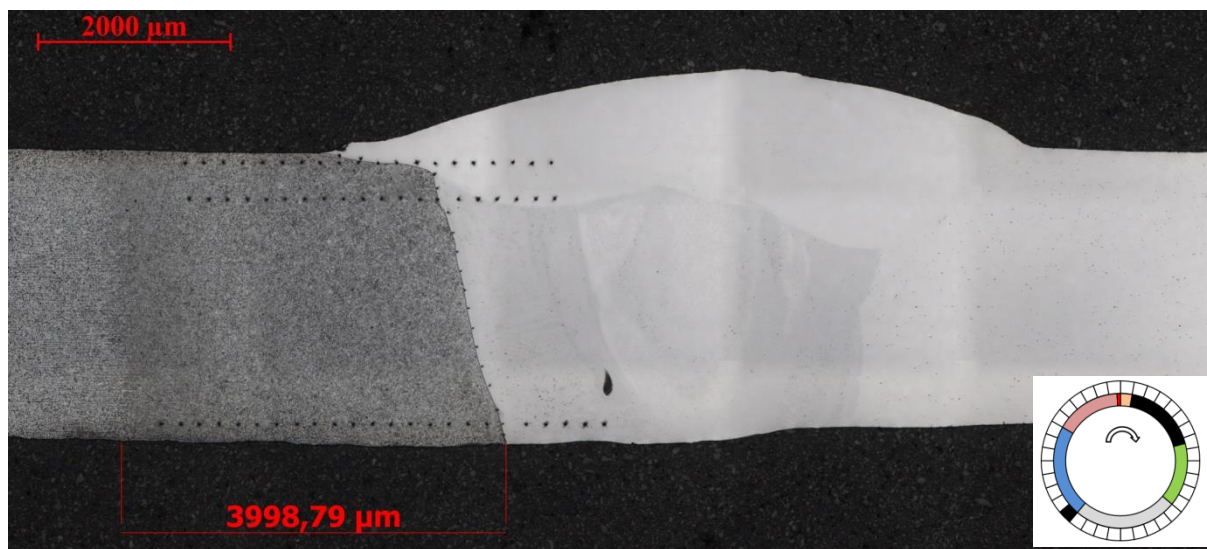
Příloha 25: Průběh tvrdosti HV 0,1 u vzorku V0_5 v poloze 13 (svislá osa tvrdost-vodorovná osa jednotlivé vtisky).



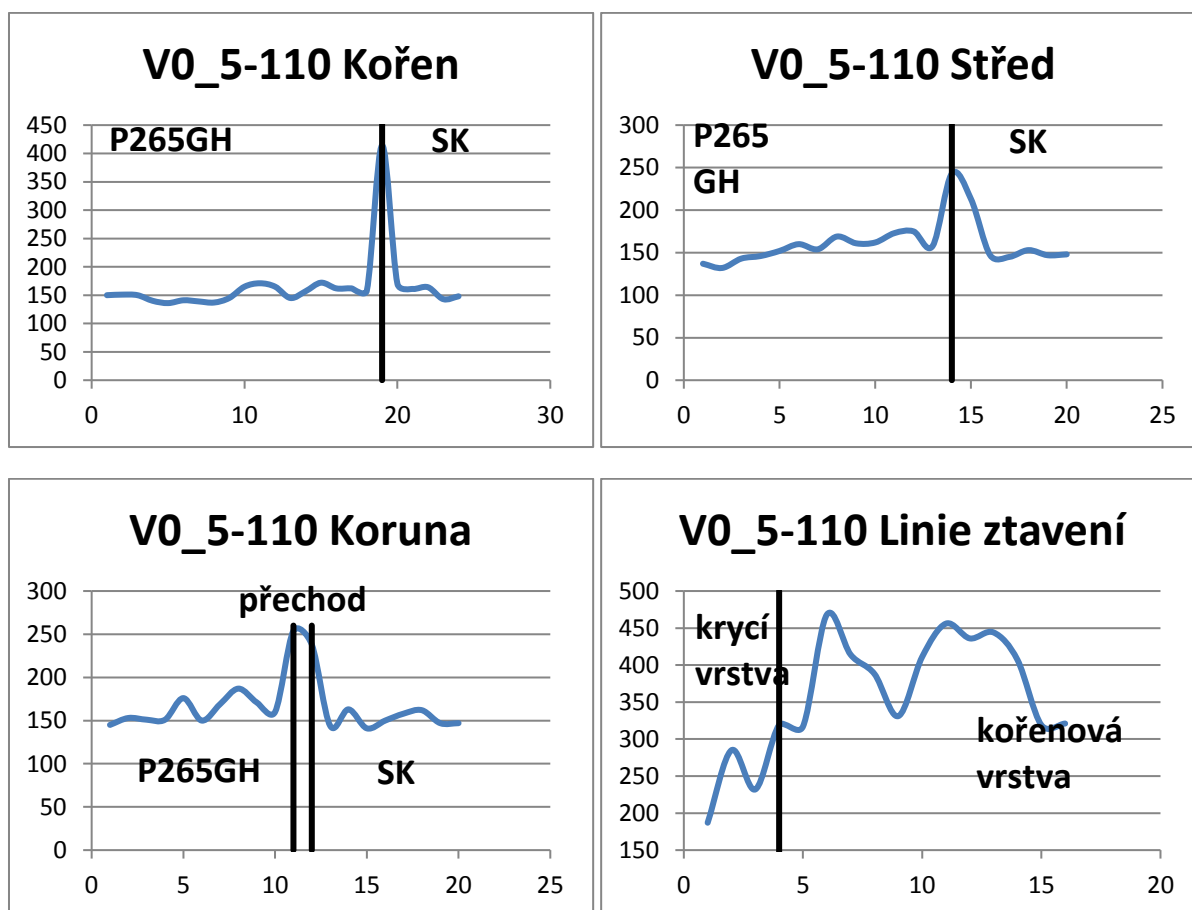
Příloha 26: Makrostruktura svaru vzorku V0_5 (poloha 80) s průběhem měření tvrdosti HV 0,1.



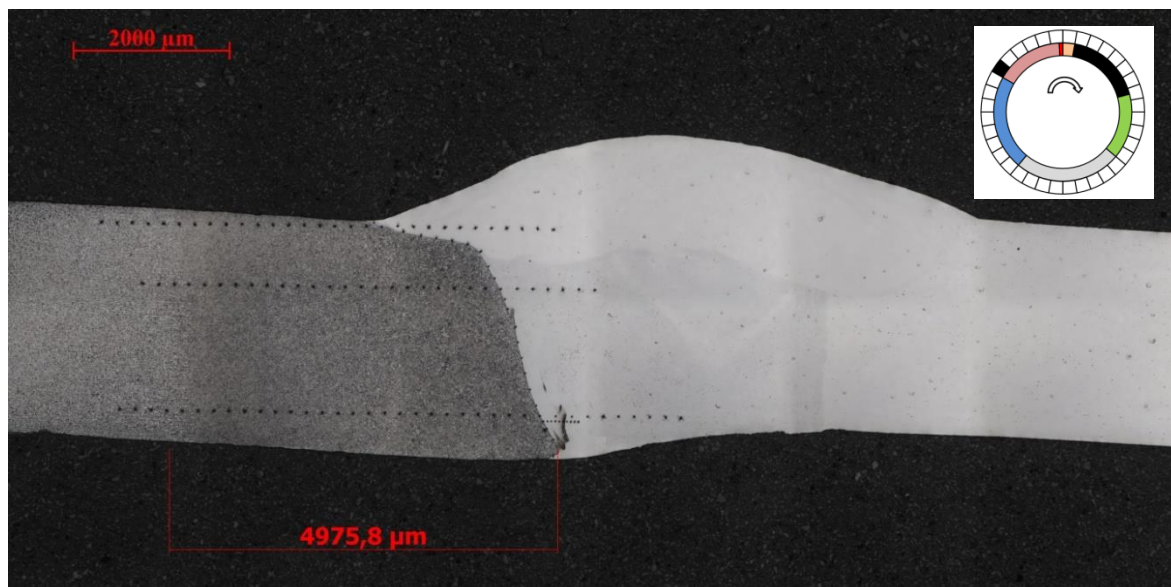
Příloha 27 : Průběh tvrdosti HV 0,1 u vzorku V0_5 v poloze 80 (svislá osa tvrdost-vodorovná osa jednotlivé vtisky).



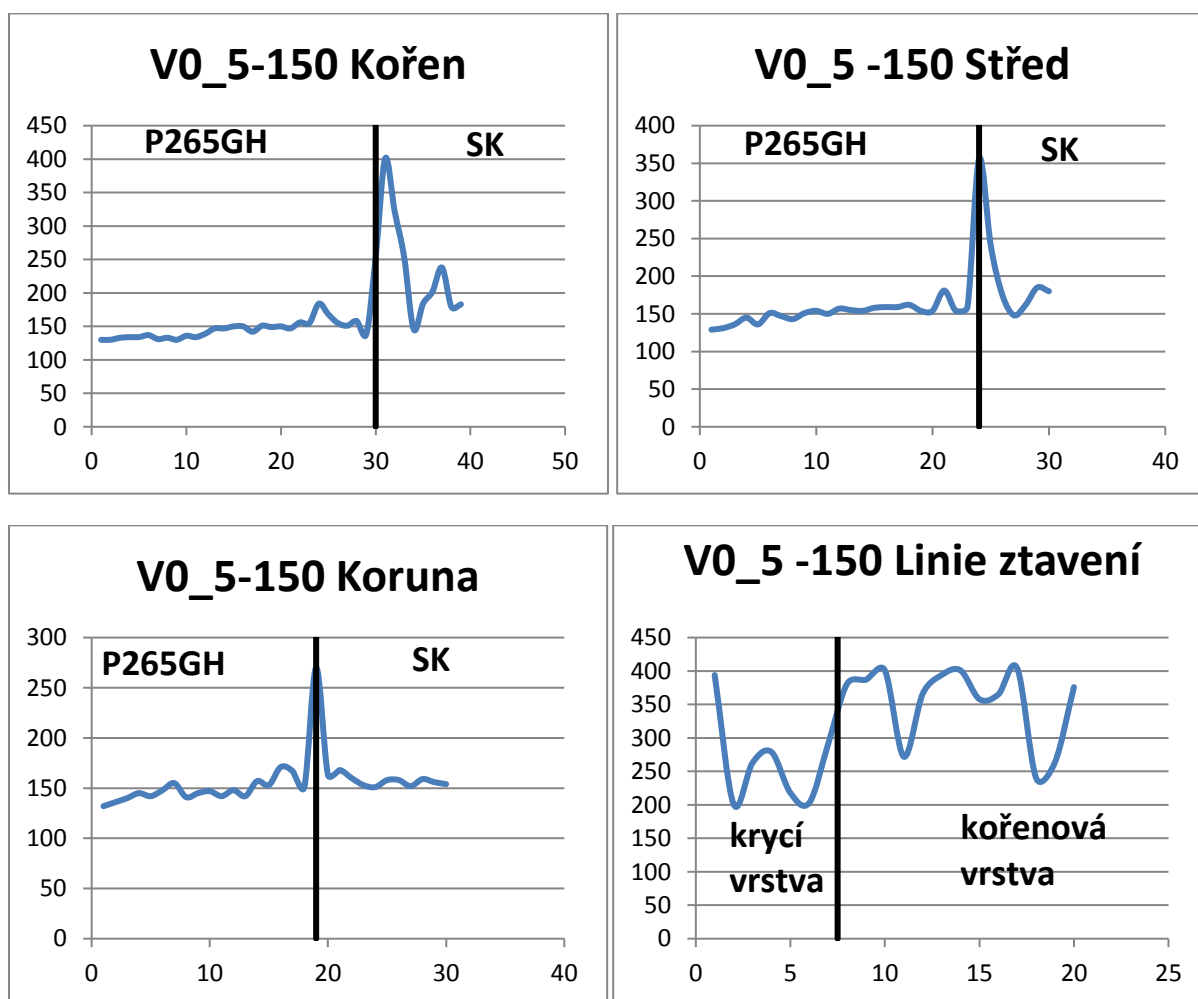
Příloha 28: Makrostruktura svaru vzorku V0_5 (poloha 110) s průběhem měření tvrdosti HV 0,1.



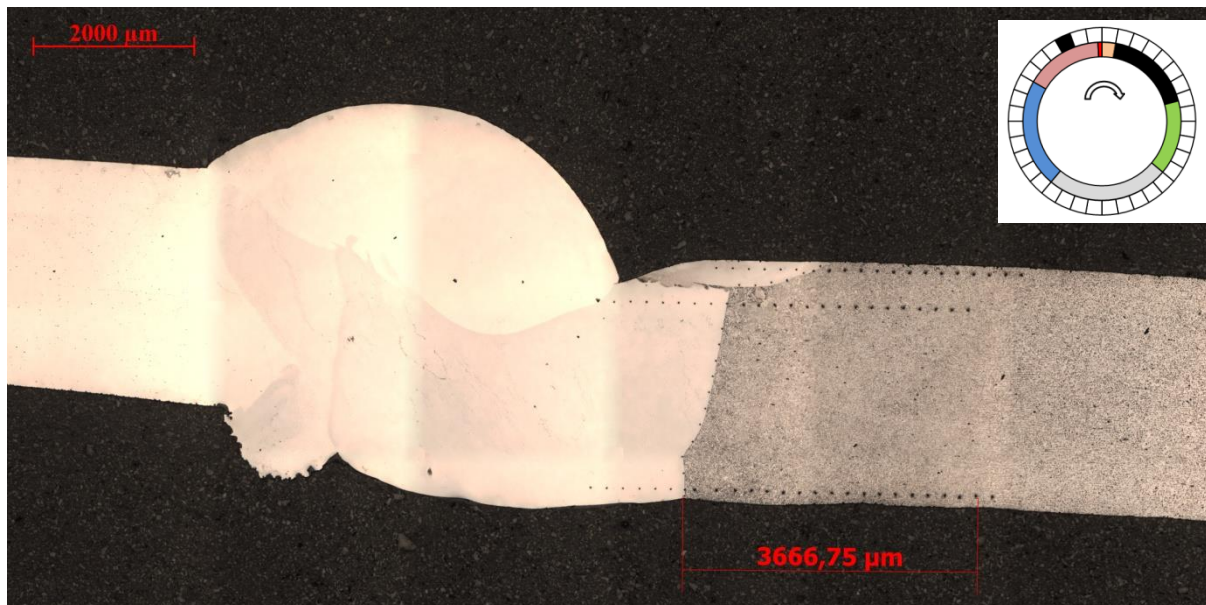
Příloha 29: Průběh tvrdosti HV 0,1 u vzorku V0_5 v poloze 110 (svislá osa tvrdost-vodorovná osa jednotlivé vtisky).



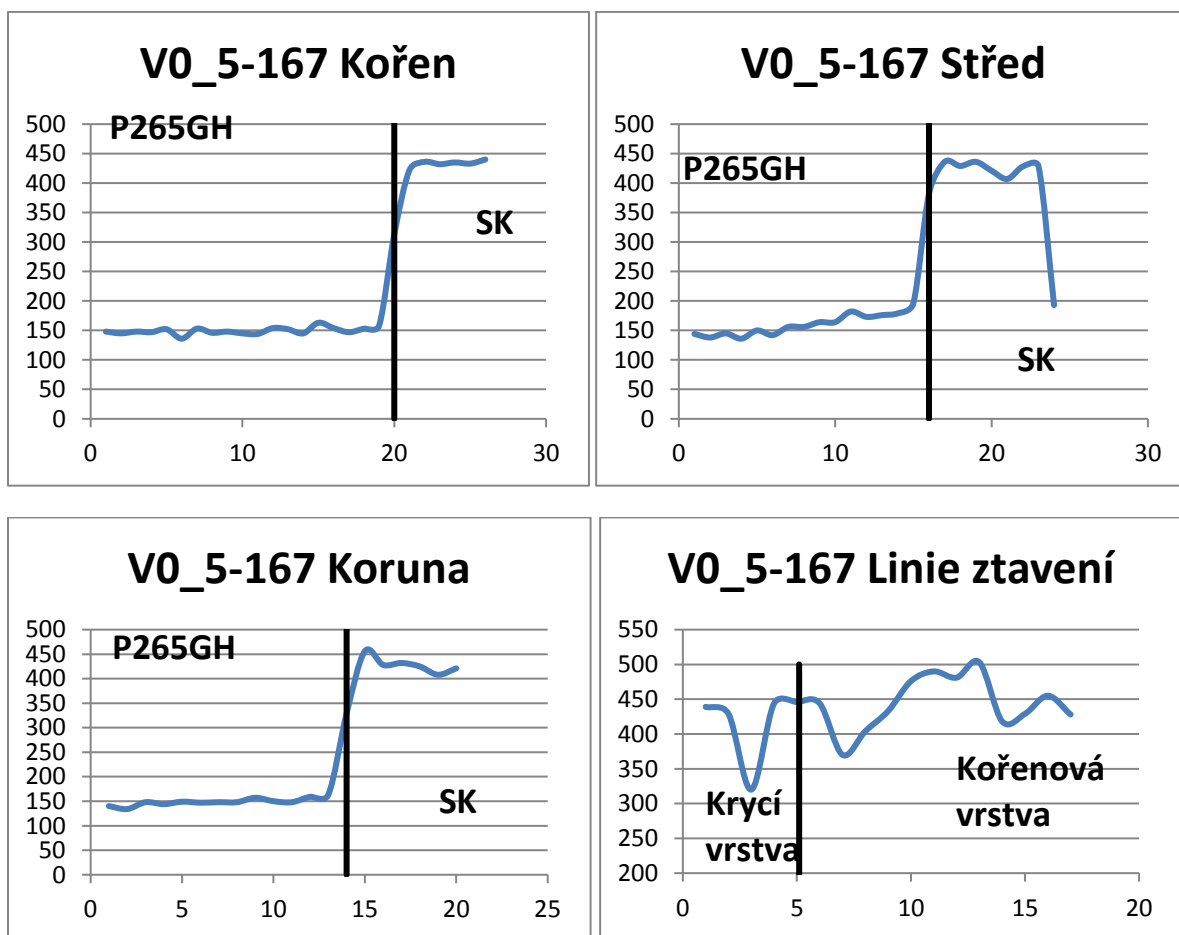
Obrázek 30: Makrostruktura svaru vzorku V0_5 (poloha 150) s průběhem měření tvrdosti HV 0,1.



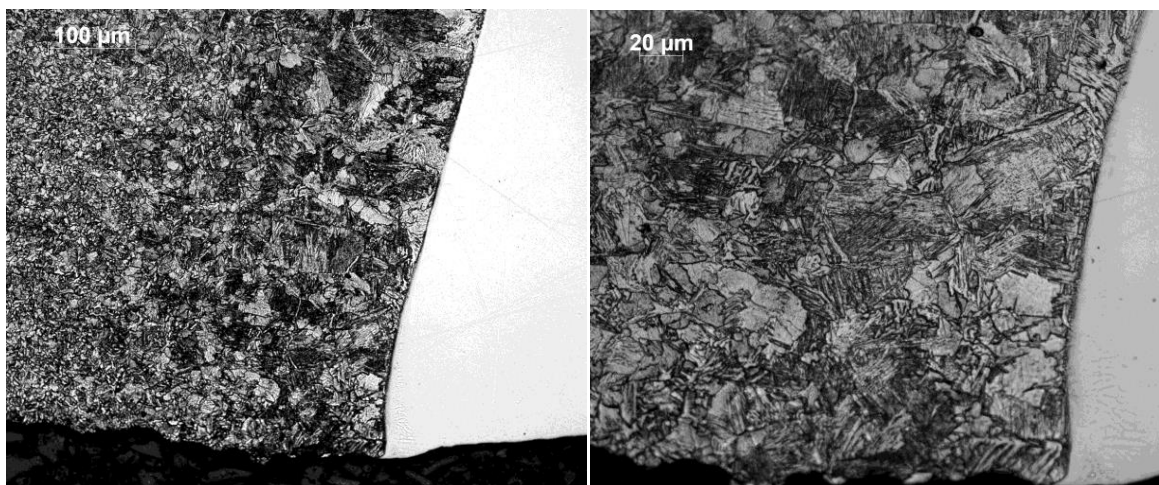
Příloha 31: Průběh tvrdosti HV 0,1 u vzorku V0_5 v poloze 150 (svislá osa tvrdost-vodorovná osa jednotlivé vtisky).



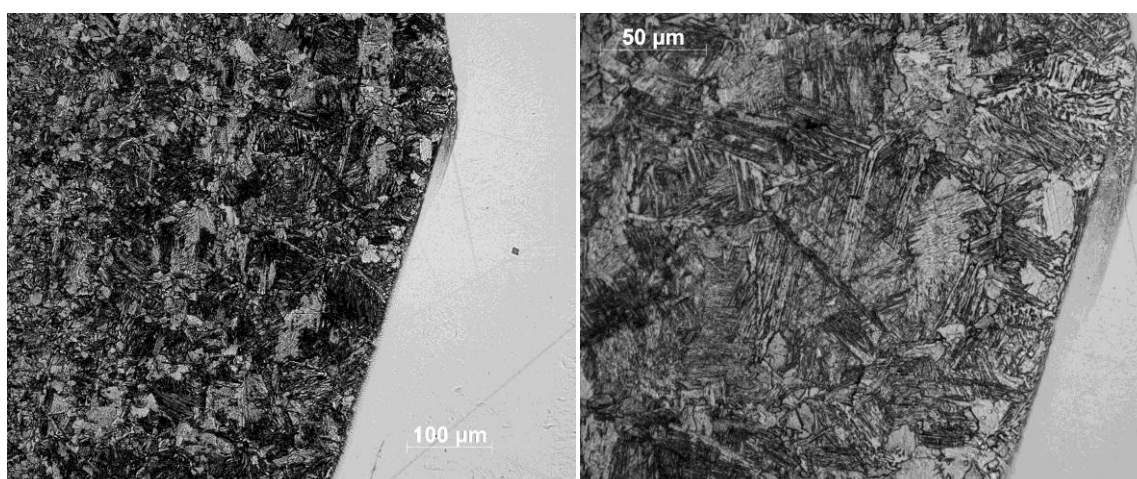
Příloha 32: Makrostruktura svaru vzorku V0_5 (poloha 167-steh) s průběhem měření tvrdosti HV 0,1.



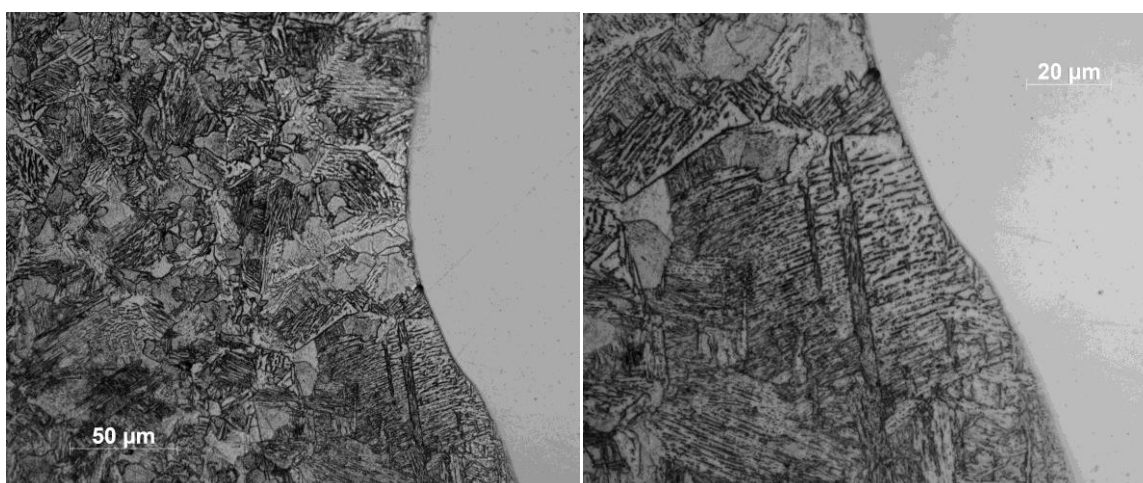
Příloha 33: Průběh tvrdosti HV 0,1 u vzorku V0_5 v poloze 167 (svislá osa tvrdost-vodorovná osa jednotlivé vtisky).



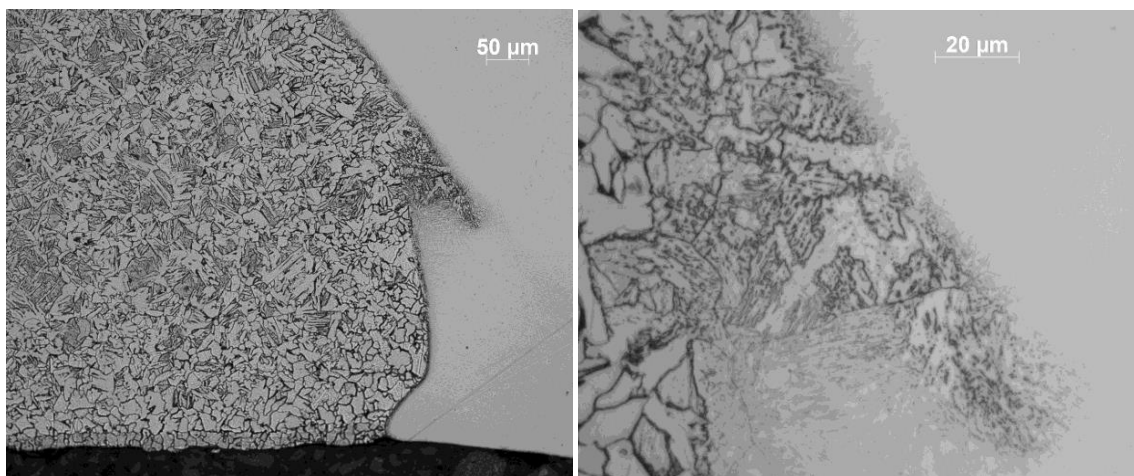
Příloha 34: Snímky TOO uhlíkové oceli v kořenové části vzorek svařený laserem-521_2_2.



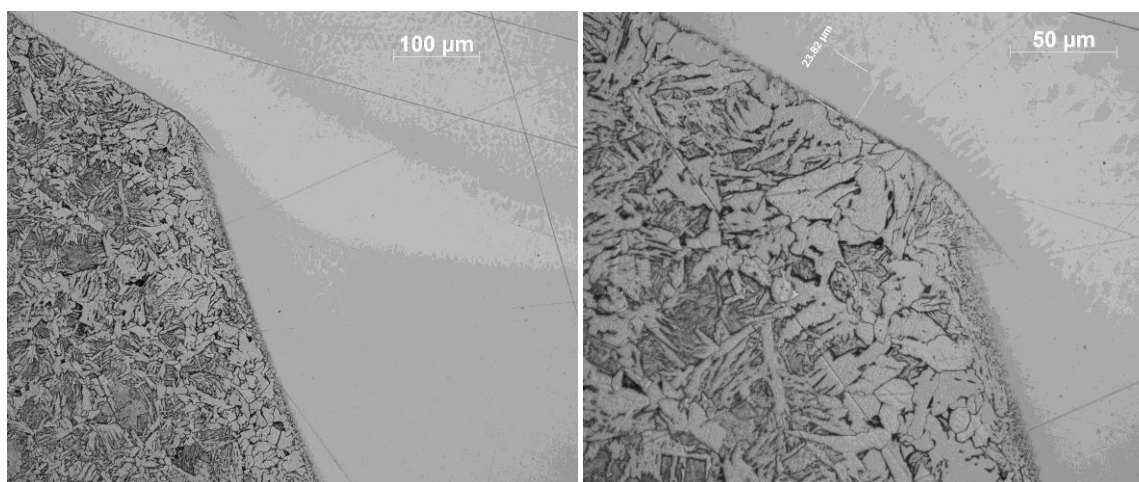
Příloha 35: Příloha 34: Snímky TOO uhlíkové oceli ve středu vzorku svařeného laserem-521_2_2.



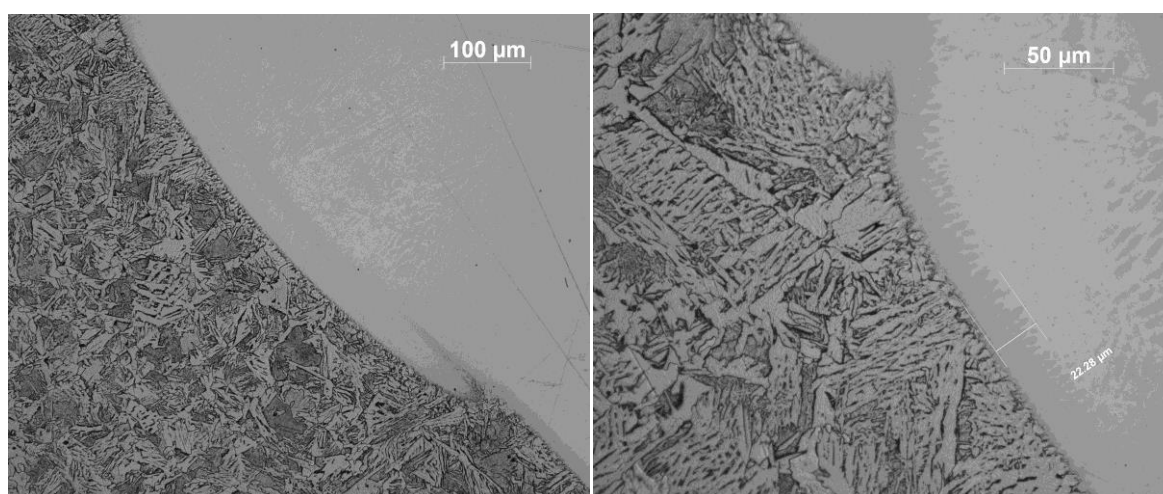
Příloha 36: Snímky TOO uhlíkové oceli v oblasti koruny svaru - vzorek svařený laserem-521_2_2.



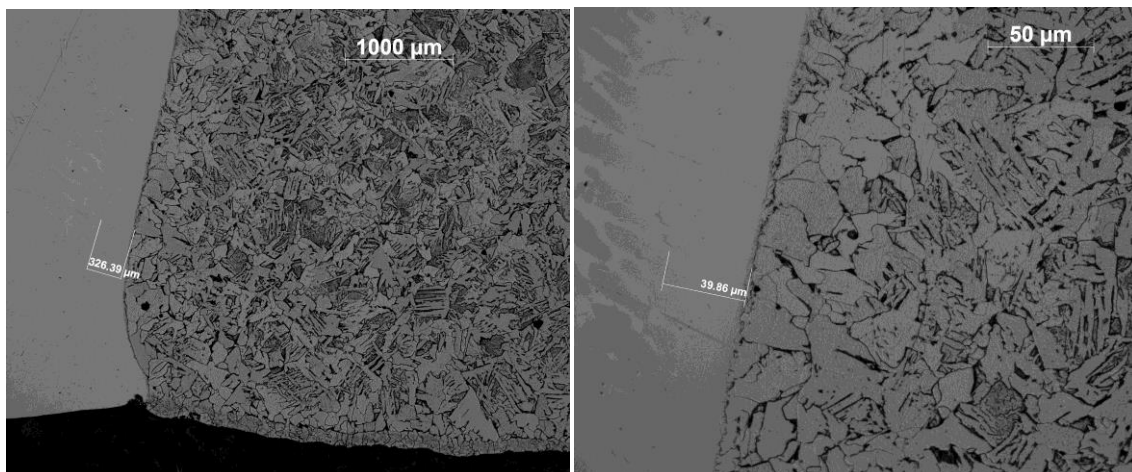
Příloha 37: Snímky TOO uhlíkové oceli v kořenové části vzorek V0_5, poloha 13 (WIG).



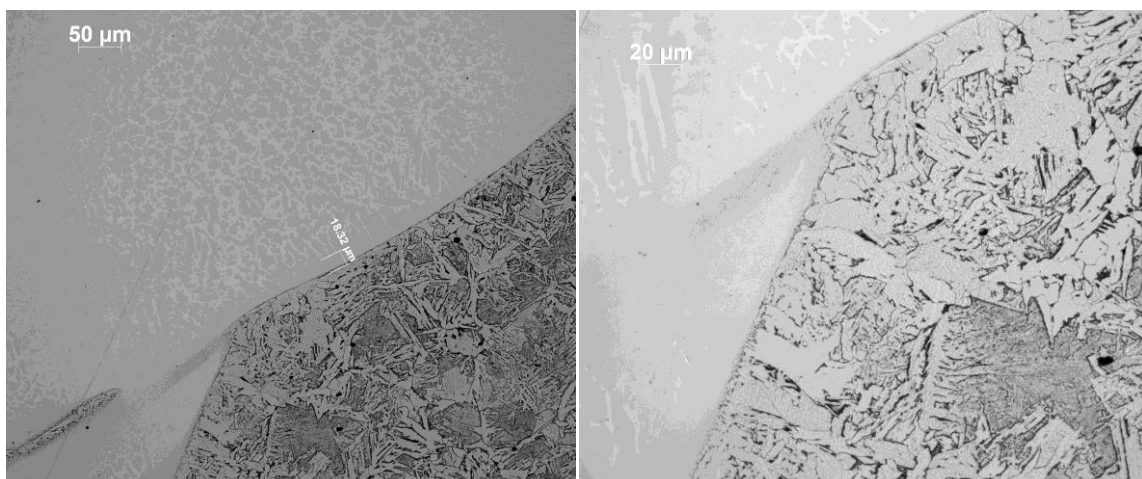
Příloha 38: Snímky TOO uhlíkové oceli v oblasti přechodu krycí a kořenové vrstvy-vzorek V0_5, poloha 13 (WIG).



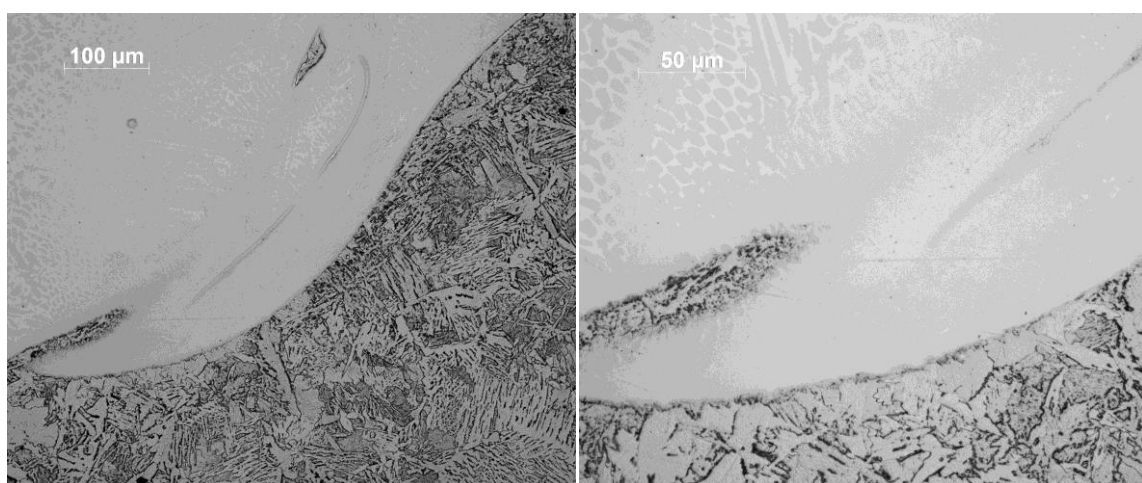
Příloha 39: Snímky TOO uhlíkové oceli v části koruny svaru - vzorek V0_5, poloha 13 (WIG).



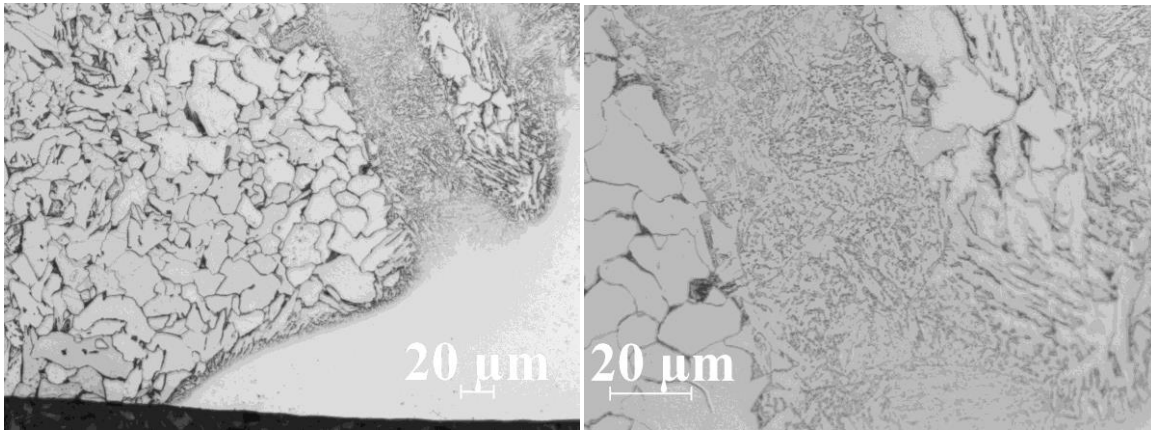
Příloha 40: Snímky TOO uhlíkové oceli v kořenové části vzorek V0_5, poloha 80 (WIG).



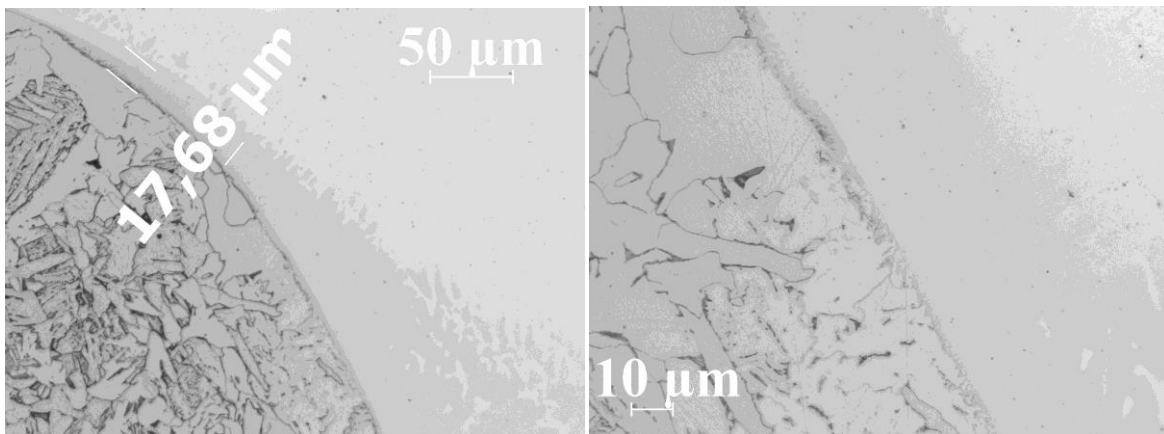
Příloha 41: Snímky TOO uhlíkové oceli v oblasti přechodu krycí a kořenové vrstvy-vzorek V0_5, poloha 80 (WIG).



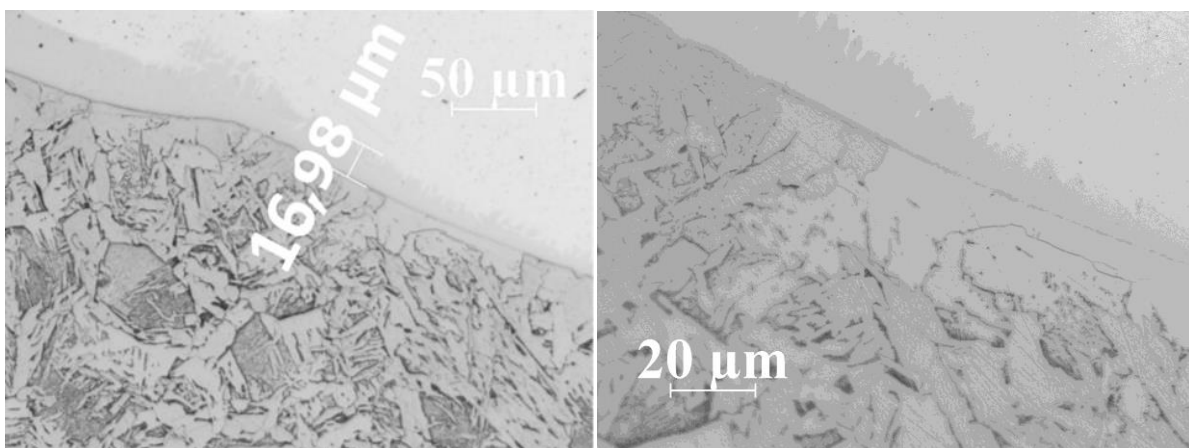
Příloha 42: Snímky TOO uhlíkové oceli v části koruny svaru - vzorek V0_5, poloha 80 (WIG).



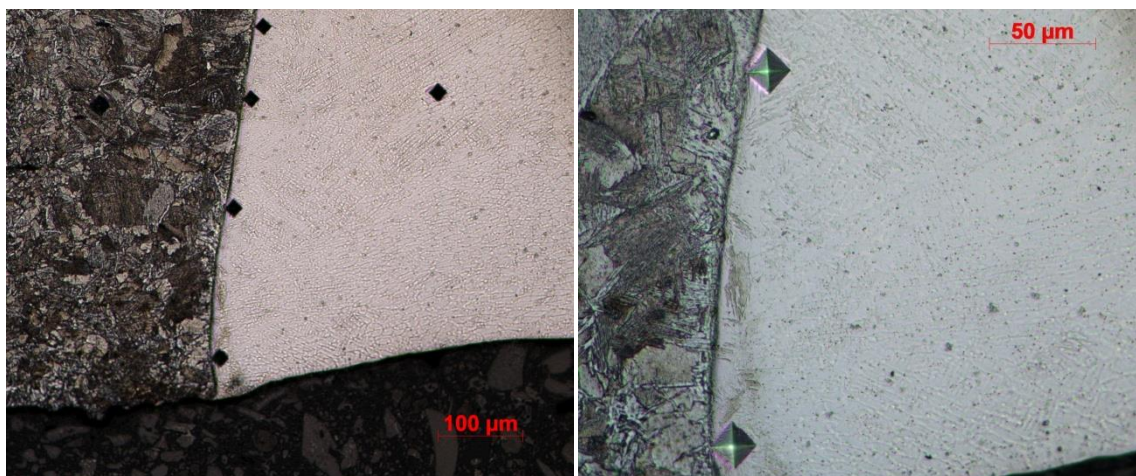
Příloha 43: Snímky TOO uhlíkové oceli v kořenové části vzorek V0_5, poloha 150 (WIG).



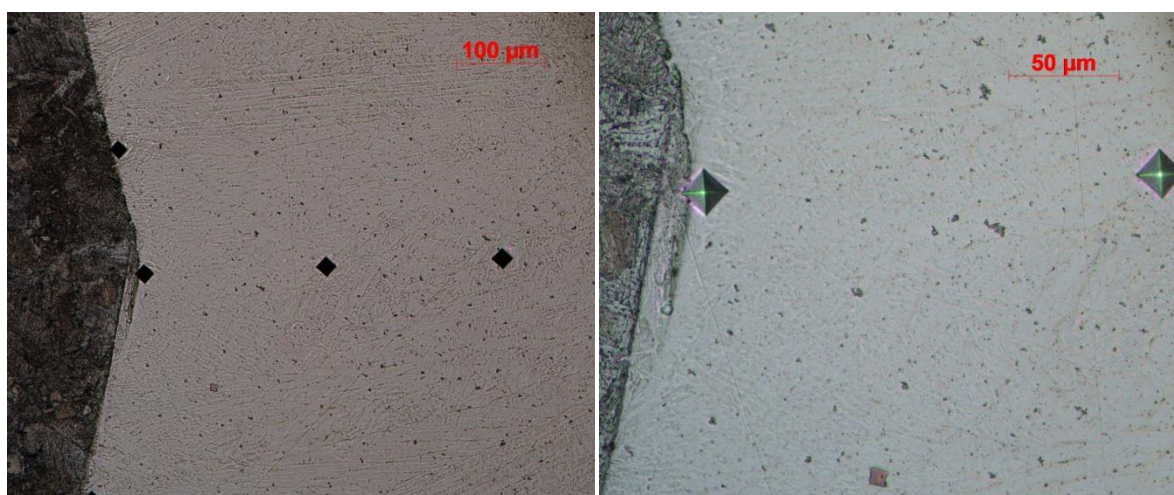
Příloha 44: Snímky TOO uhlíkové oceli v oblasti přechodu krycí a kořenové vrstvy-vzorek V0_5, poloha 150(WIG).



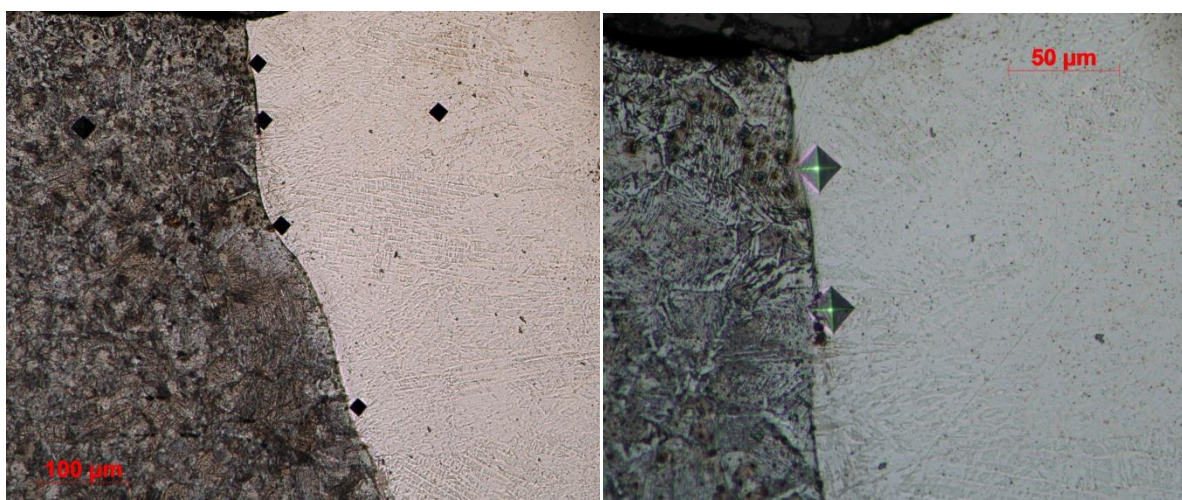
Příloha 45: Snímky TOO uhlíkové oceli v části koruny svaru - vzorek V0_5, poloha 150 (WIG).



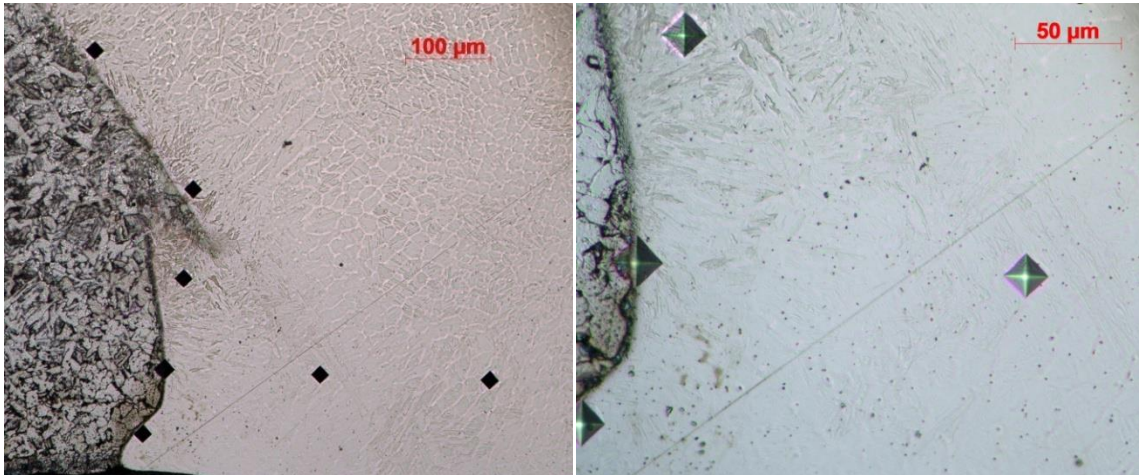
Příloha 46: Přejchod uhlíková ocel / SK – oblast kořene, vzorek svařený laserem 521_2_2.



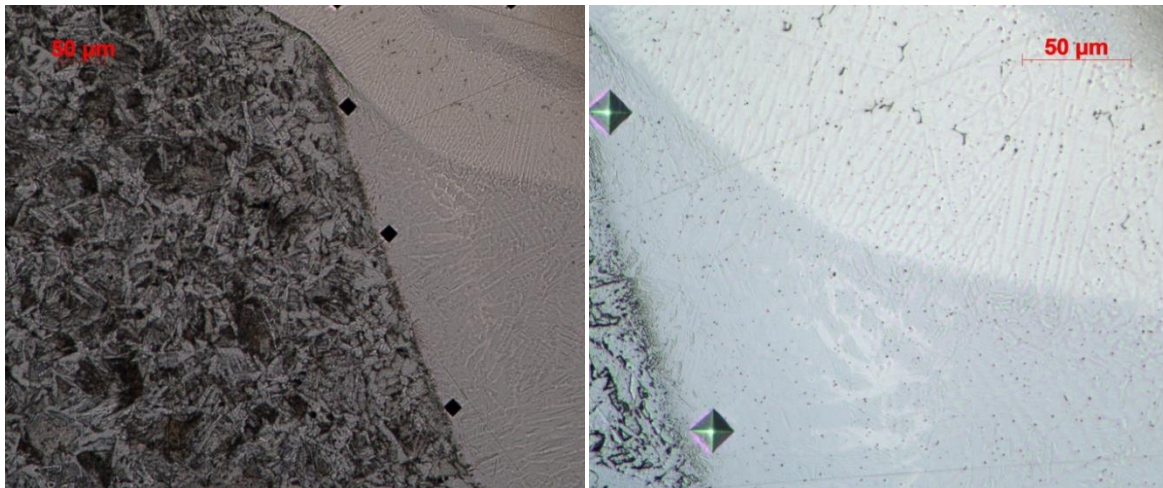
Příloha 47: Přejchod uhlíková ocel / SK – oblast středu svaru, vzorek svařený laserem 521_2_2.



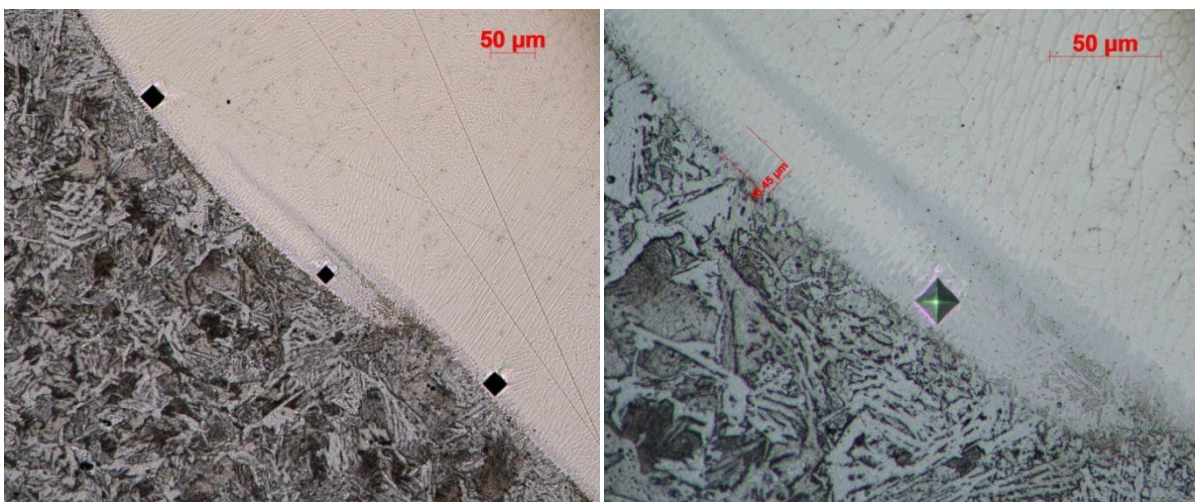
Příloha 48: Přejchod uhlíková ocel / SK – oblast koruny svaru, vzorek svařený laserem 521_2_2.



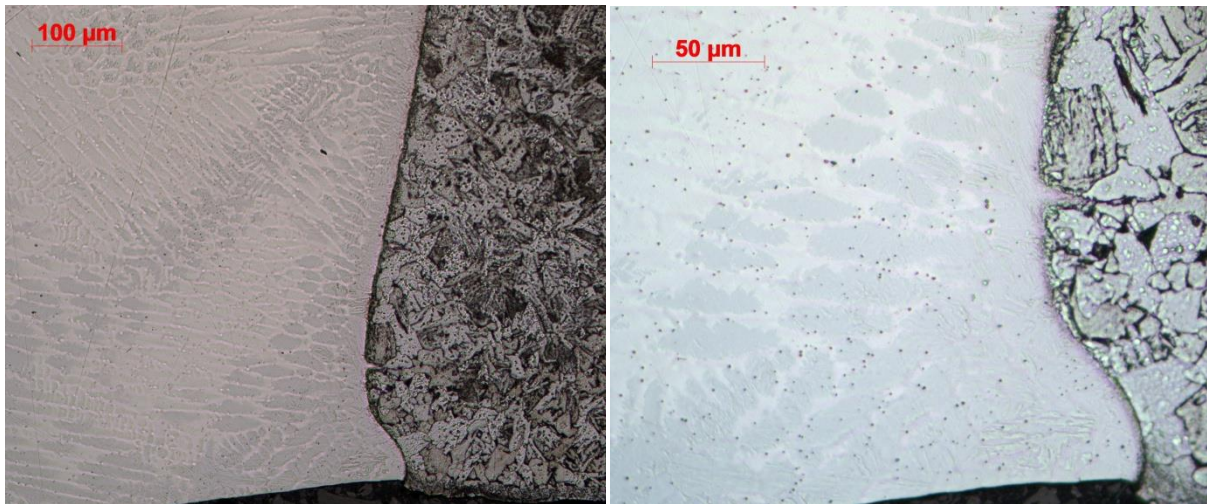
Příloha 49: Přejchod uhlíková ocel / SK – oblast kořene, vzorek V0_5 poloha 13.



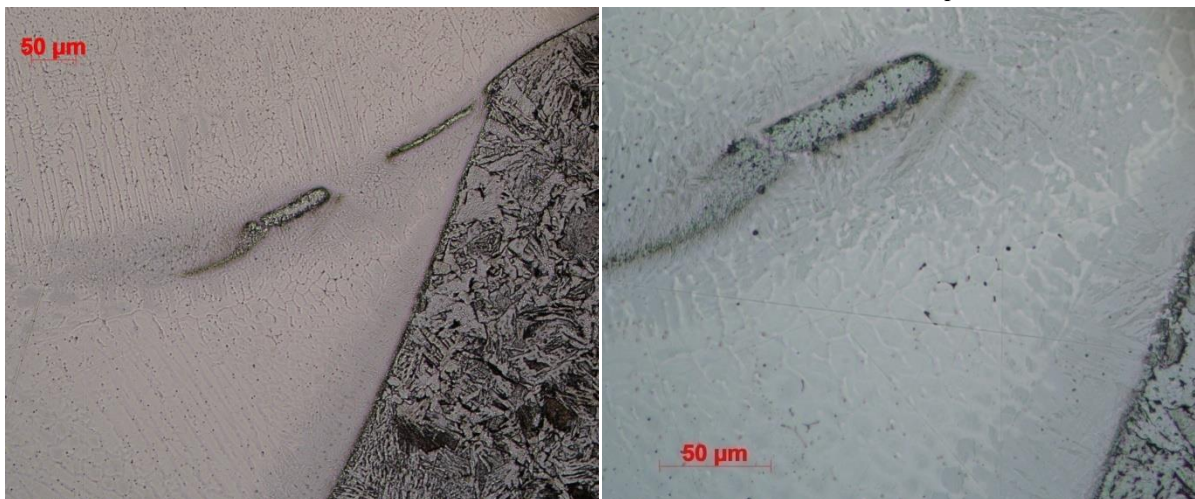
Příloha 50: Přejchod uhlíková ocel / SK – oblast přechodu kořenové a krycí vrstvy, vzorek V0_5 poloha 13.



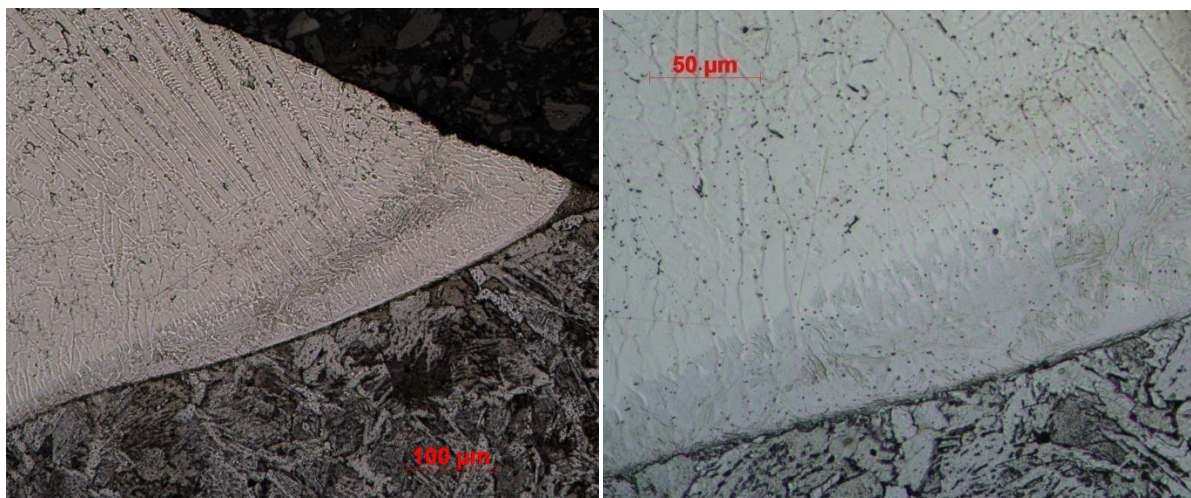
Příloha 51: Přejchod uhlíková ocel / SK – oblast koruny svaru, vzorek V0_5 poloha 13.



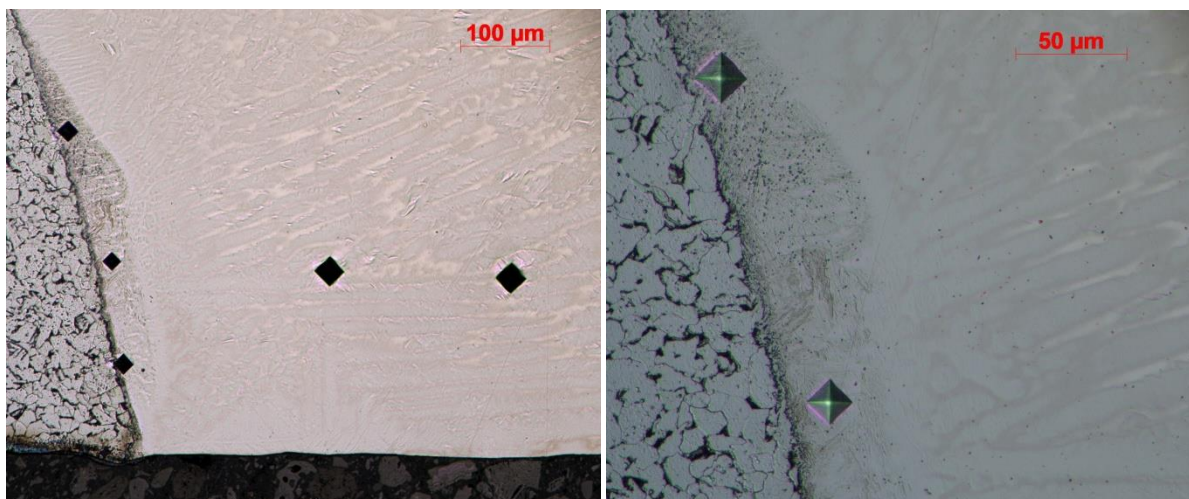
Příloha 52: Přejchod uhlíková ocel / SK – oblast kořene, vzorek V0_5 poloha 80.



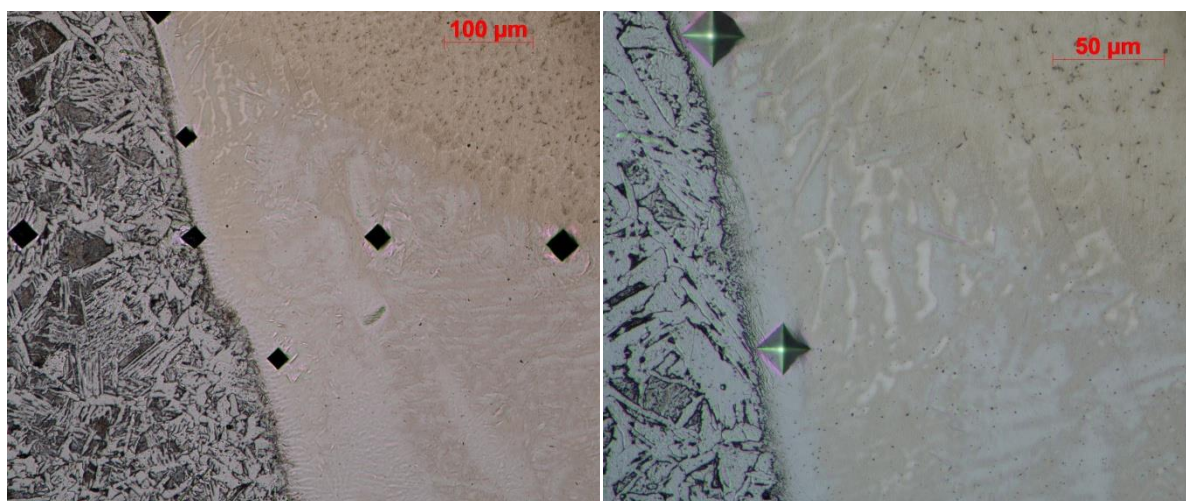
Příloha 53: Přejchod uhlíková ocel / SK – oblast přechodu kořenové a krycí vrstvy, vzorek V0_5 poloha 80.



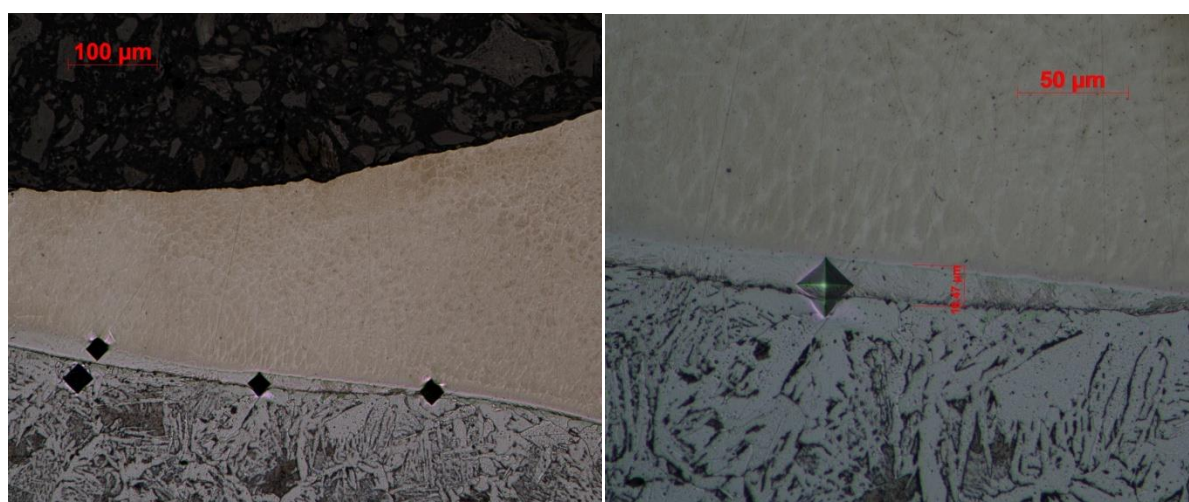
Příloha 54: Přejchod uhlíková ocel / SK – oblast koruny svaru, vzorek V0_5 poloha 80.



Příloha 55: Přejchod uhlíková ocel / SK – oblast kořene, vzorek V0_5 poloha 110.

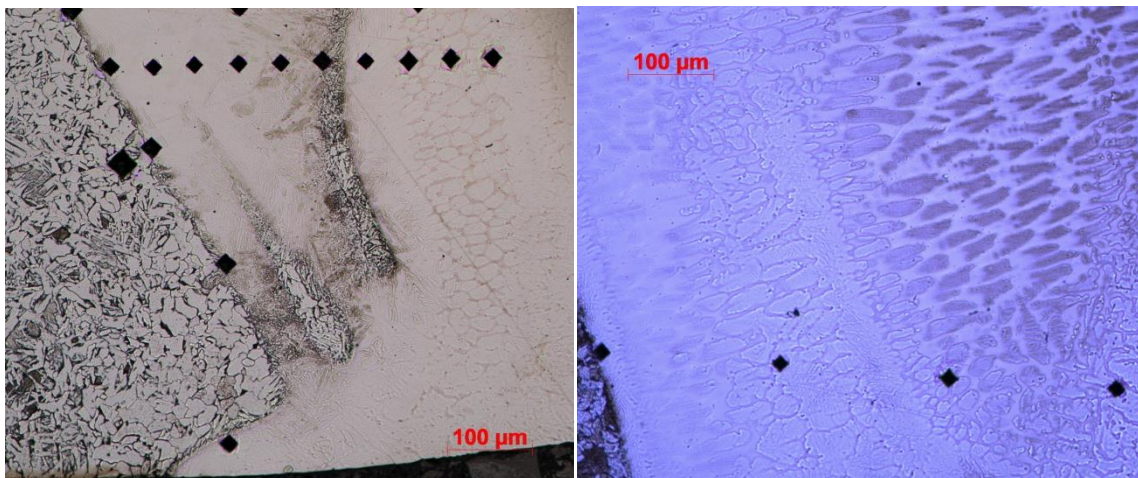


Příloha 56: Přejchod uhlíková ocel / SK – oblast přechodu kořenové a krycí vrstvy, vzorek V0_5 poloha 110.

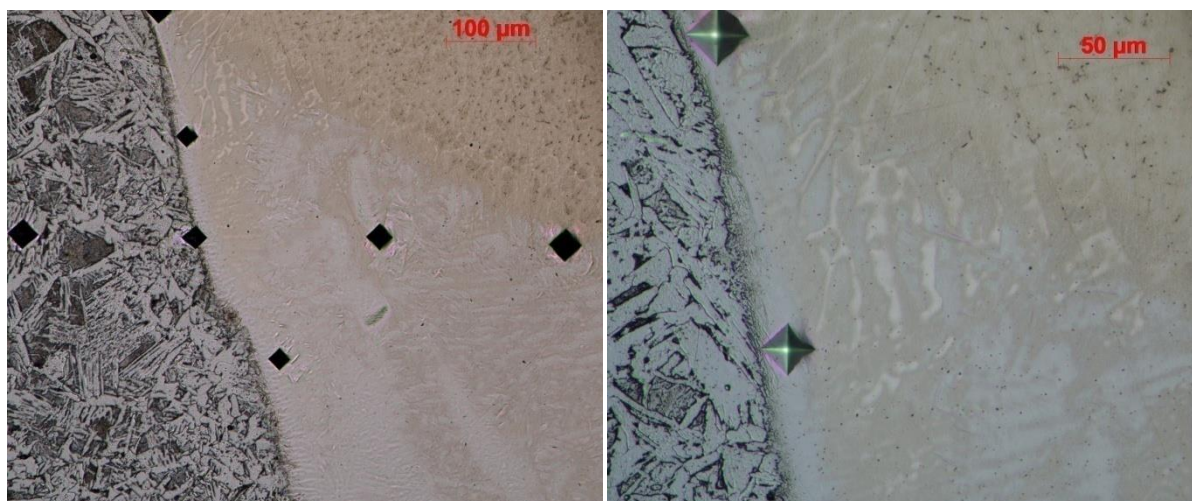


Příloha 57: Přejchod uhlíková ocel / SK – oblast koruny svaru, vzorek V0_5 poloha 110.

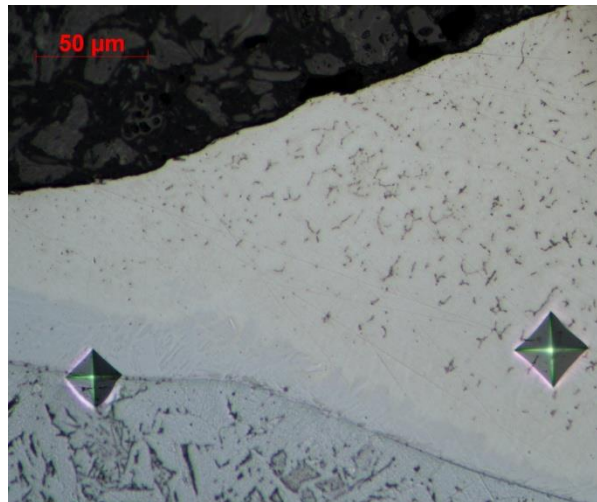
110 povrch



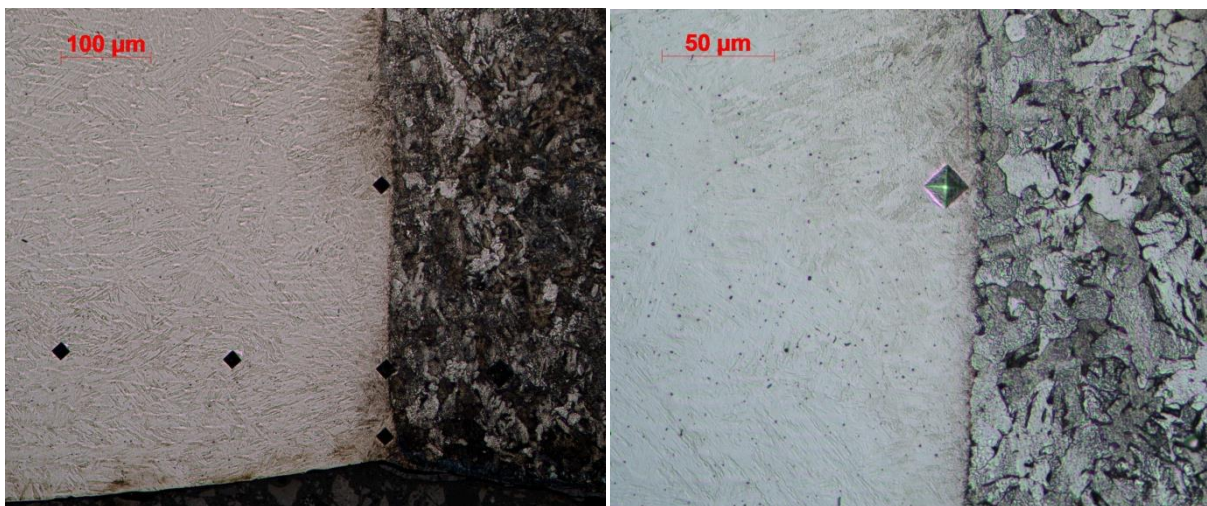
Příloha 58: Přejít uhlíková ocel / SK – oblast kořene, vzorek V0_5 poloha 150.



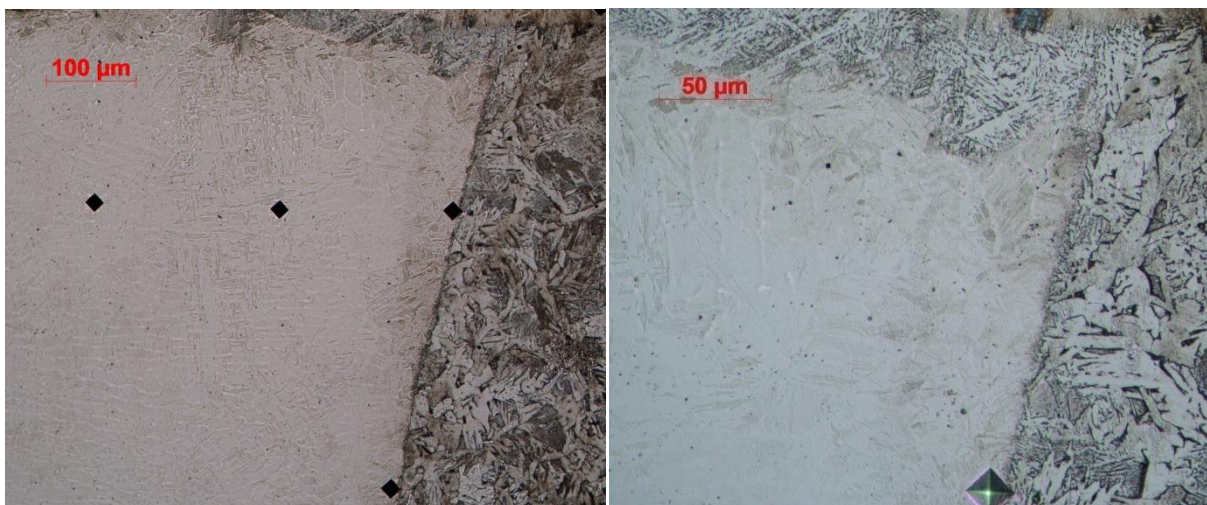
Příloha 59: Přejít uhlíková ocel / SK – oblast přechodu kořenové a krycí vrstvy, vzorek V0_5 poloha 150.



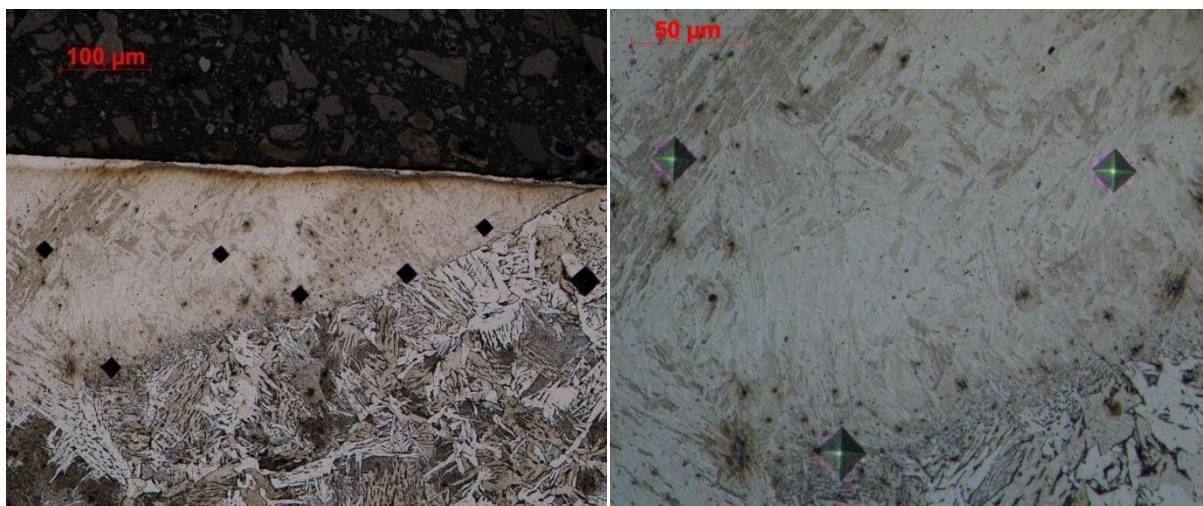
Příloha 60: Přejchod uhlíková ocel / SK – oblast koruny svaru, vzorek V0_5 poloha 150.



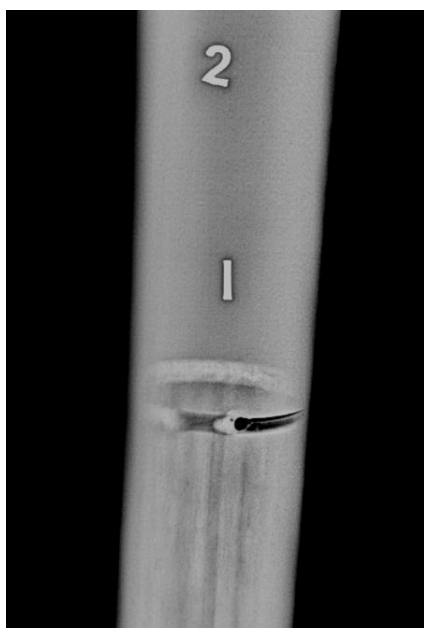
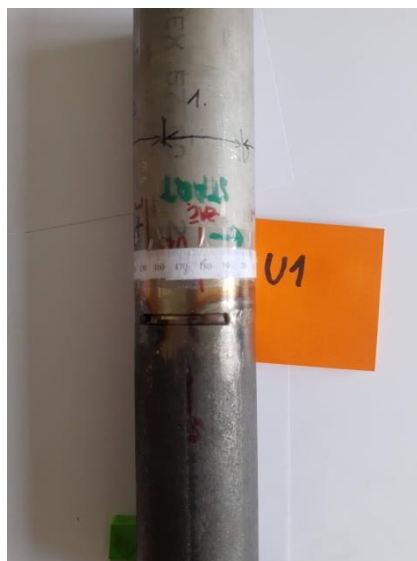
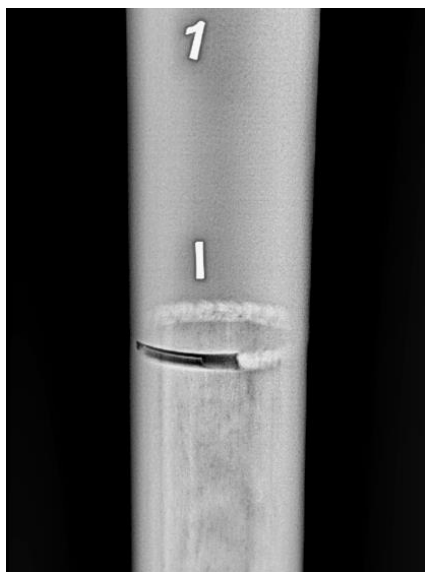
Příloha 61: Přejchod uhlíková ocel / SK – oblast kořene, vzorek V0_5 poloha 167.

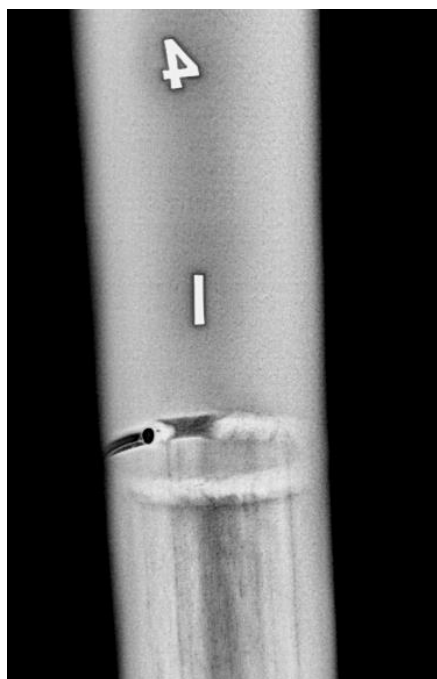
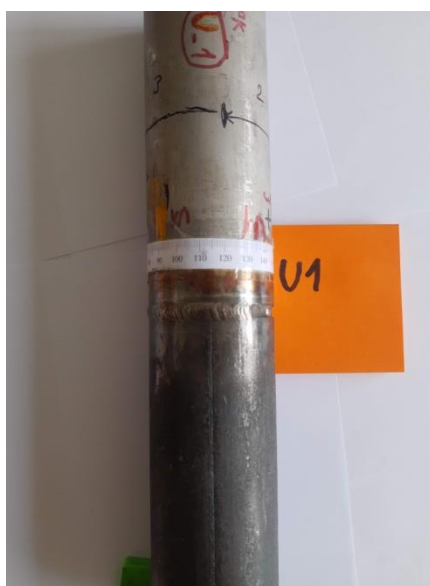
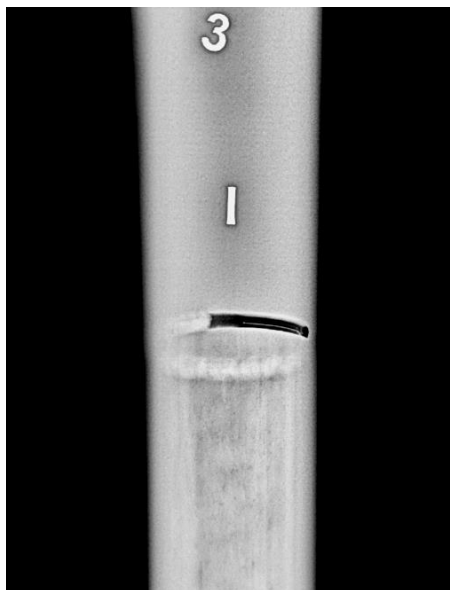


Příloha 62: Přejchod uhlíková ocel / SK – oblast přechodu kořenové a krycí vrstvy, vzorek V0_5 poloha 167.

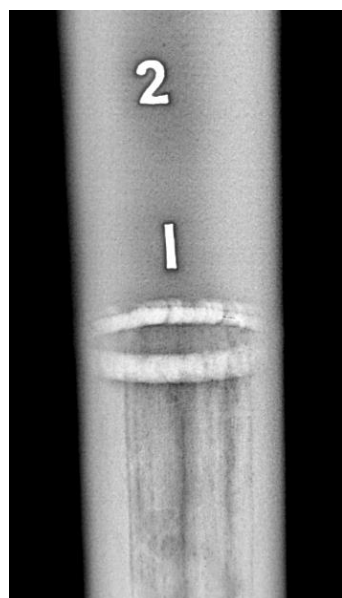
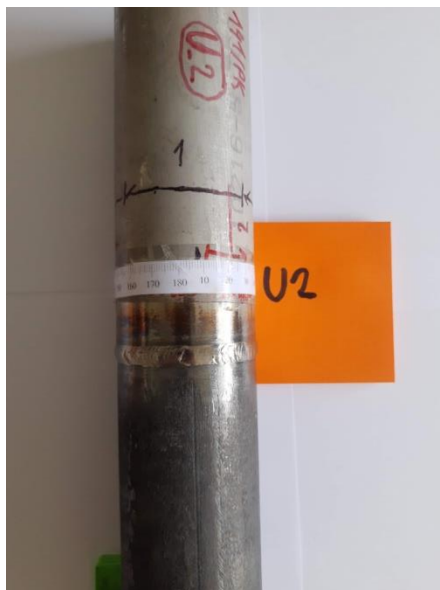
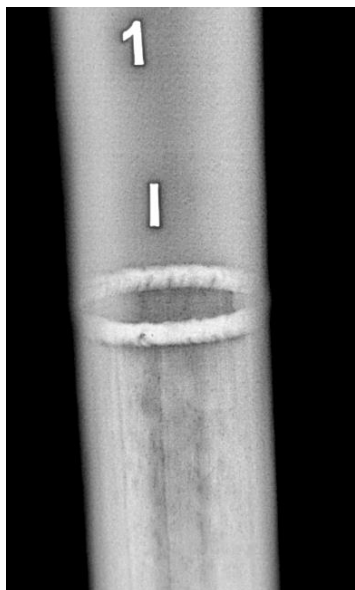


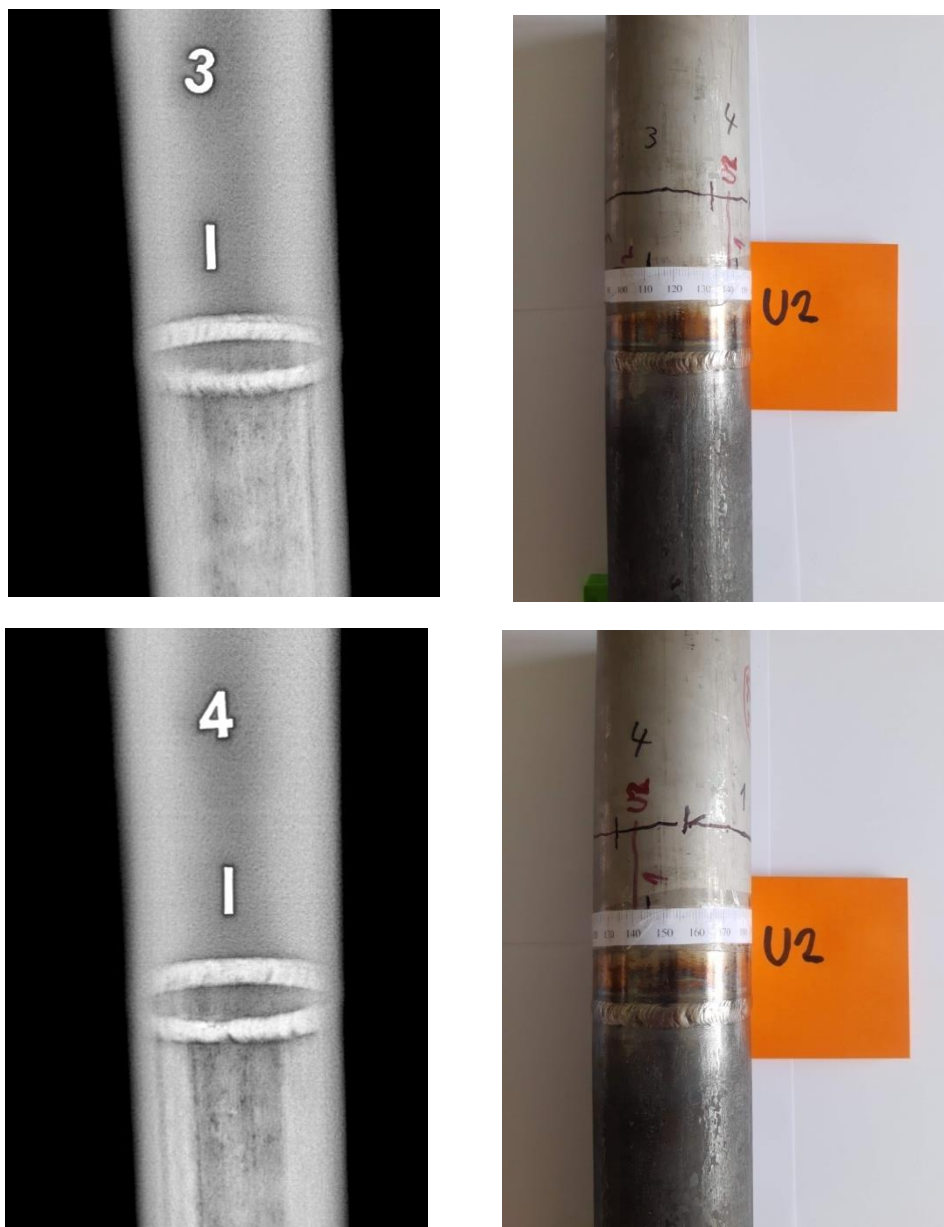
Příloha 63: Přejed uhlíková ocel / SK – oblast koruny svaru, vzorek V0_5 poloha 167.



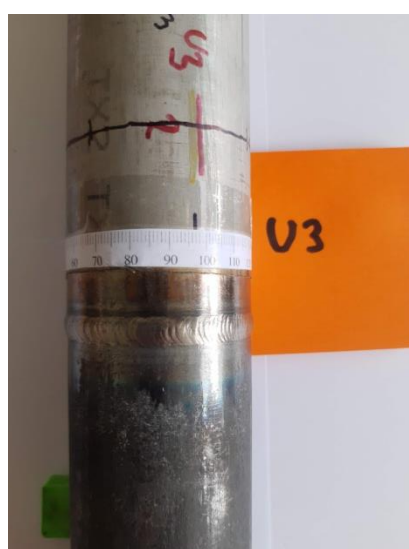
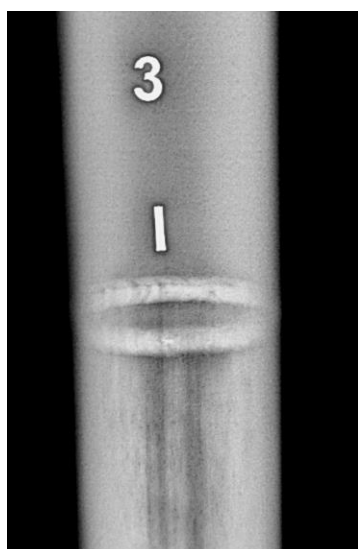
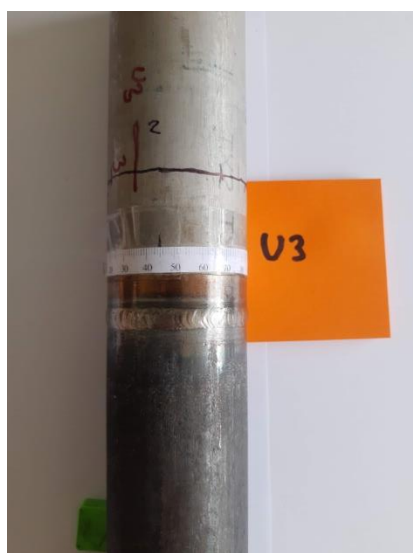
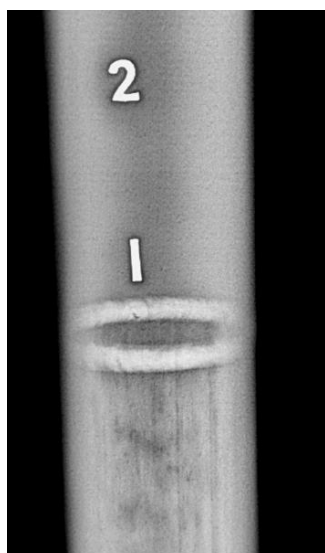
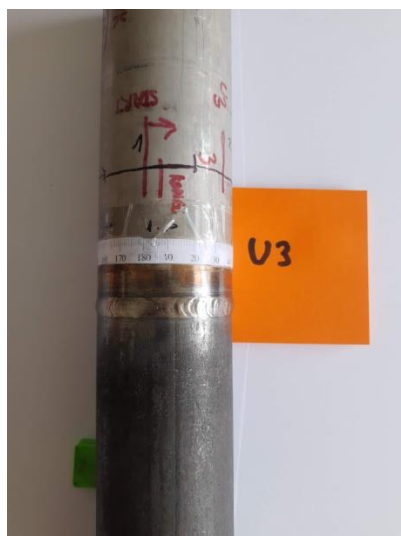
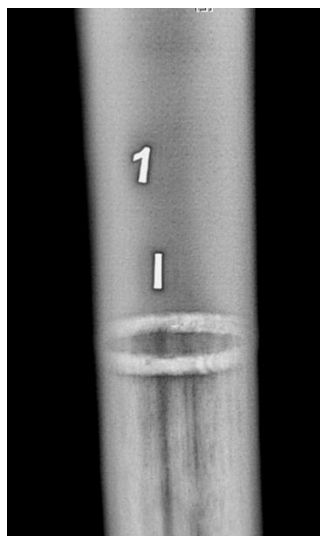


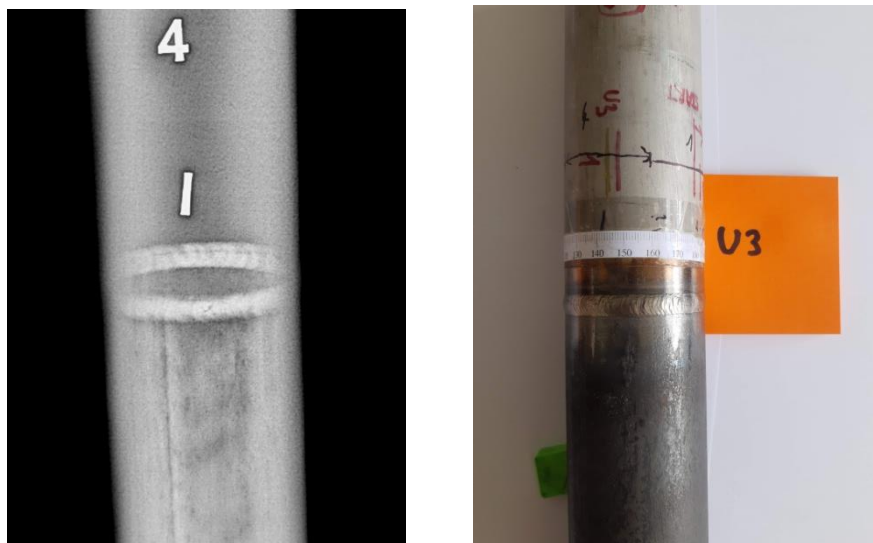
Příloha 64: Radiografické snímky s vizuálním porovnáním – vzorek U1.



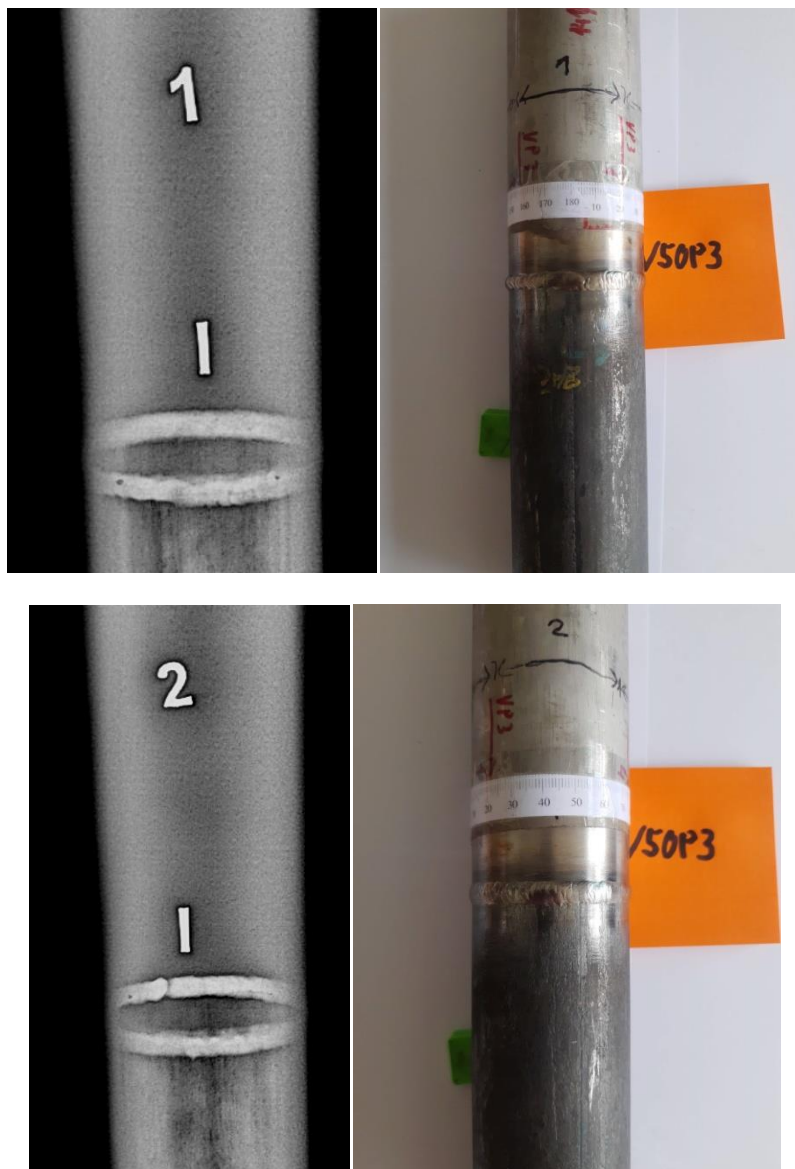


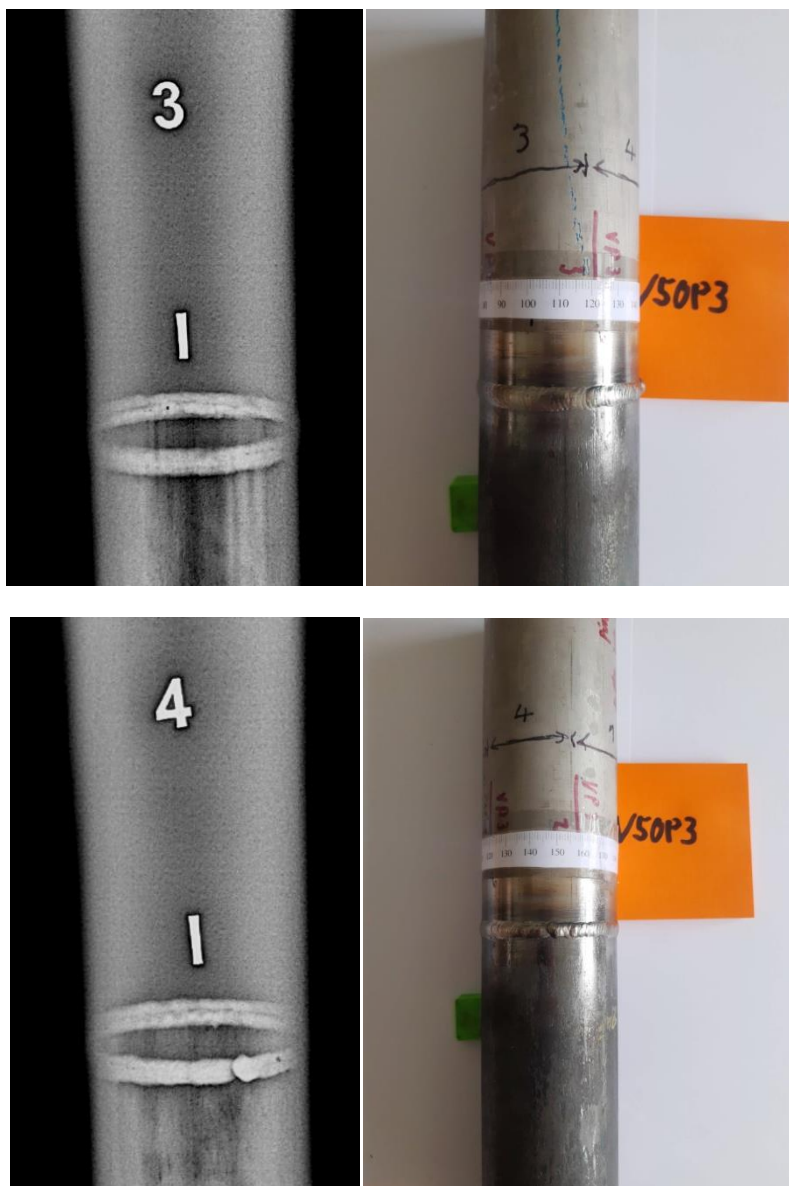
Příloha 65: Radiografické snímky s vizuálním porovnáním – vzorek U2.



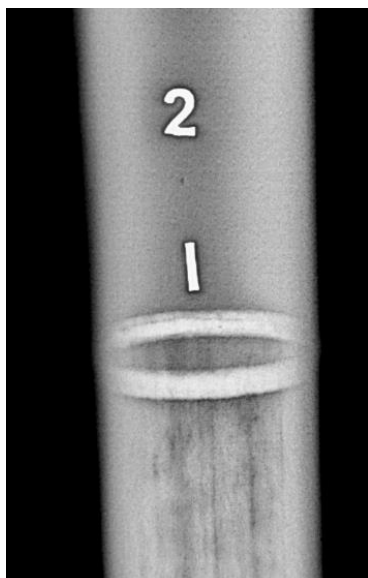
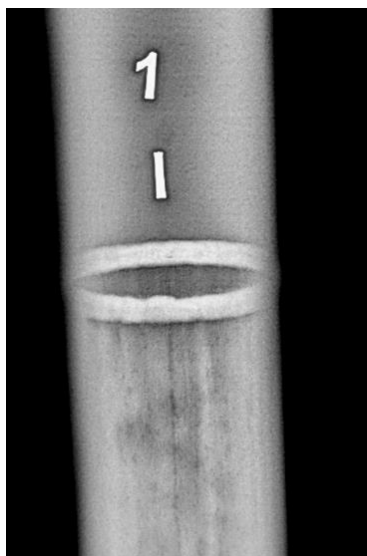


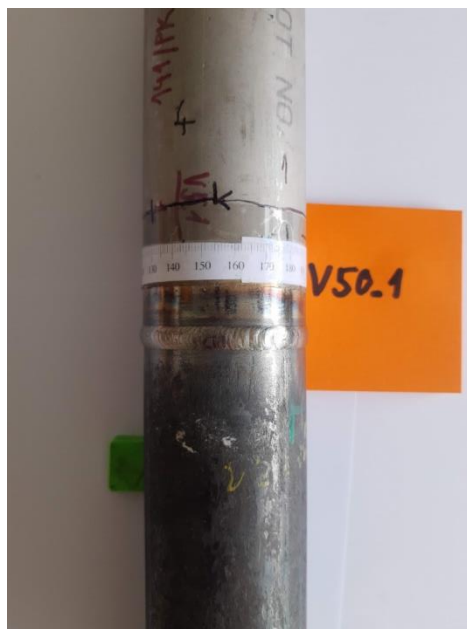
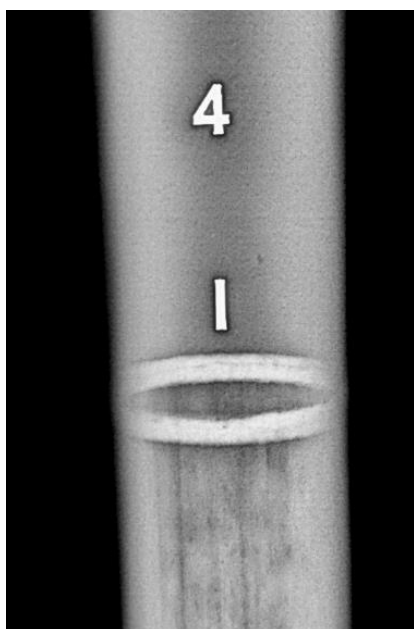
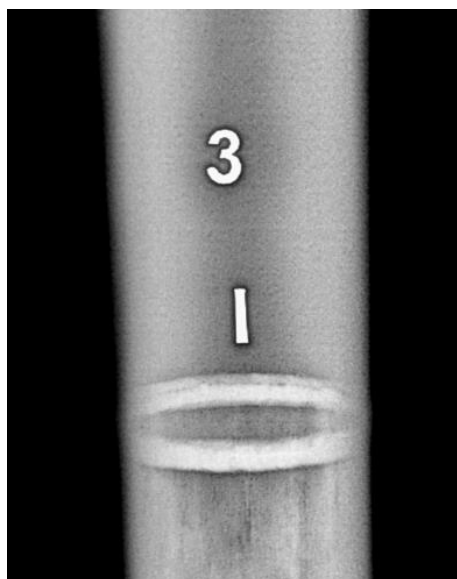
Příloha 66: Radiografické snímky s vizuálním porovnáním – vzorek U3.



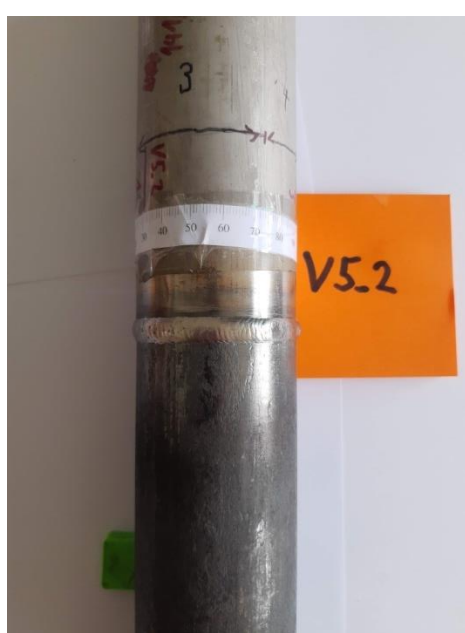
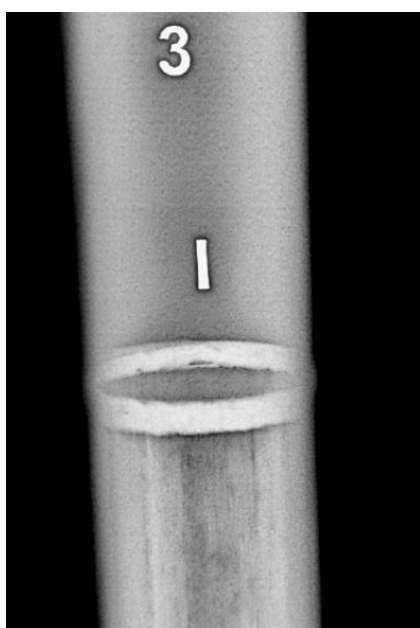
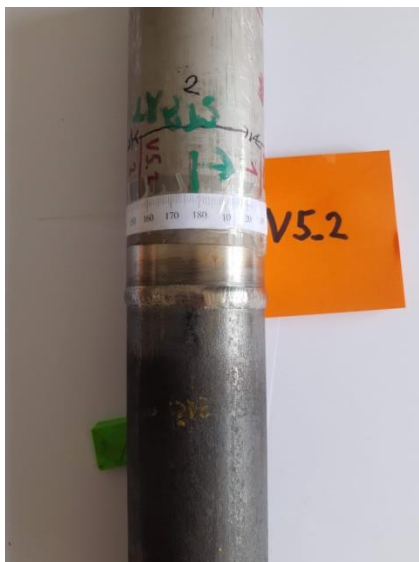
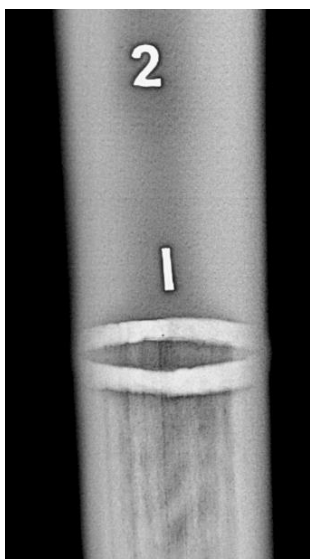
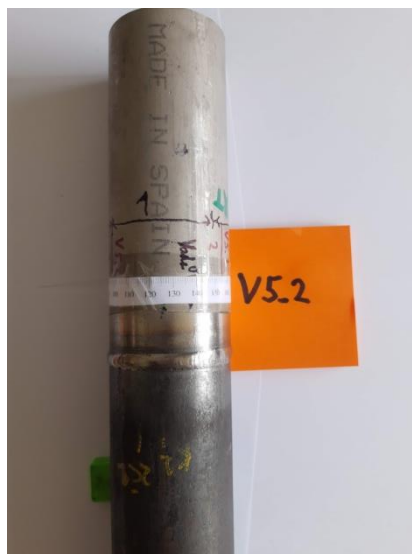
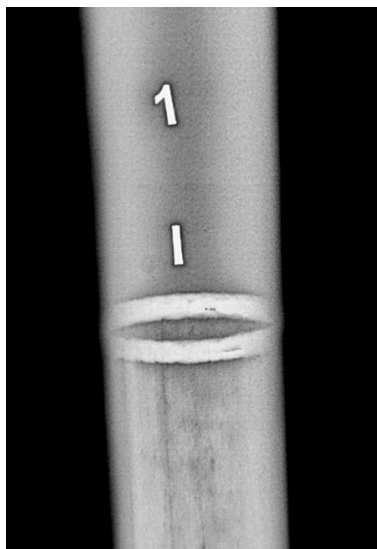


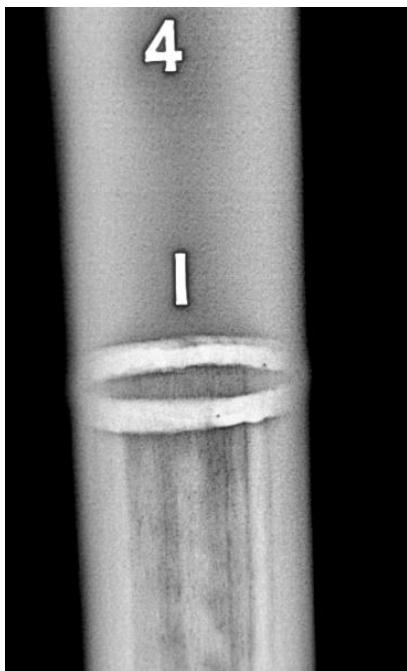
Příloha 67: Radiografické snímky s vizuálním porovnáním – vzorek V50P3.



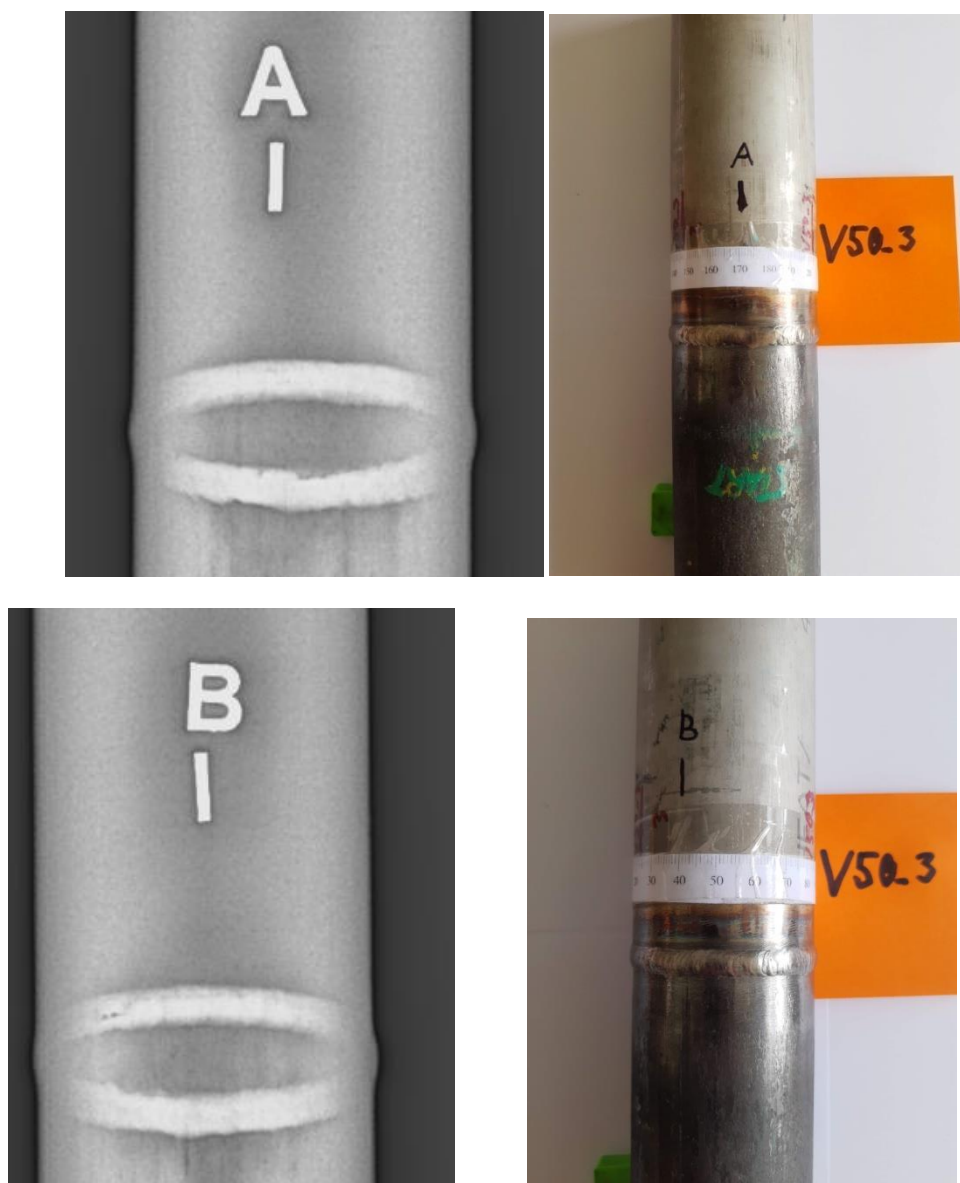


Příloha 68: Radiografické snímky s vizuálním porovnáním – vzorek V50_1.

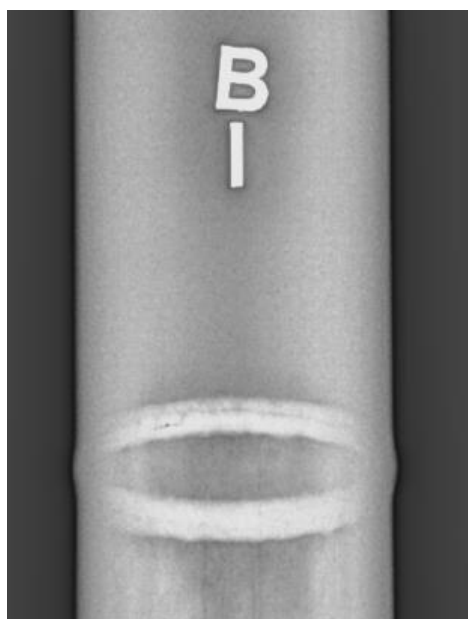
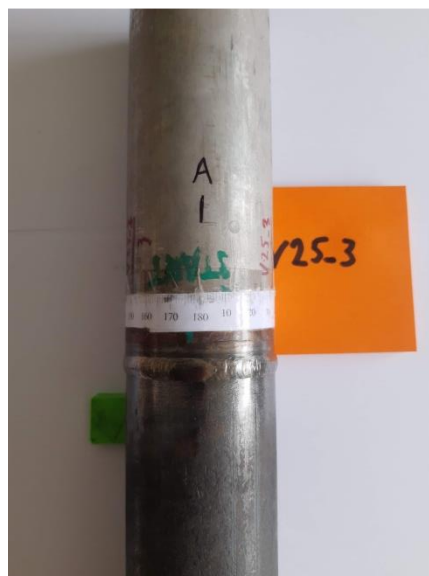
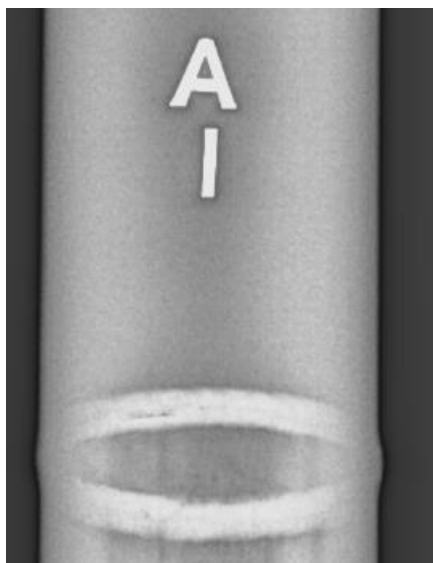




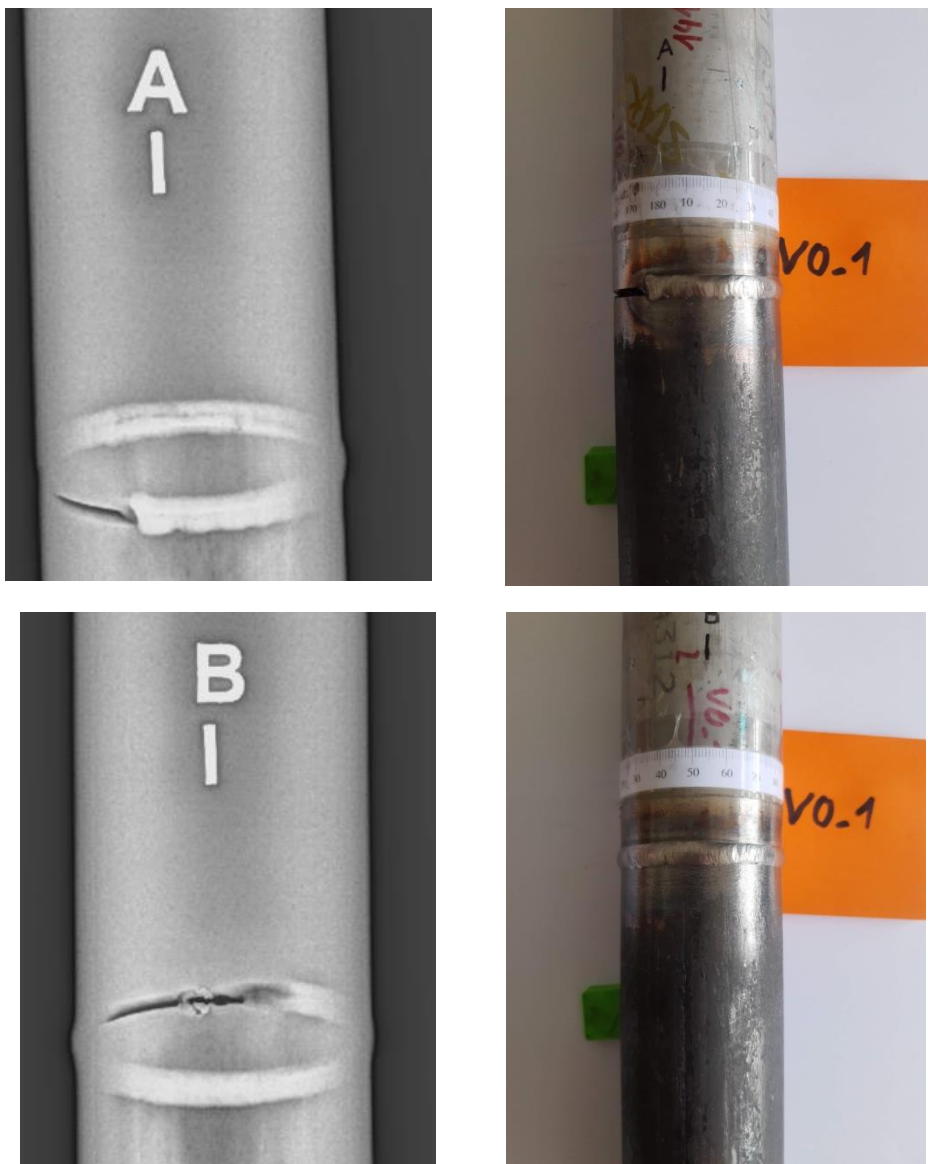
Příloha 69: Radiografické snímky s vizuálním porovnáním – vzorek V50_2.



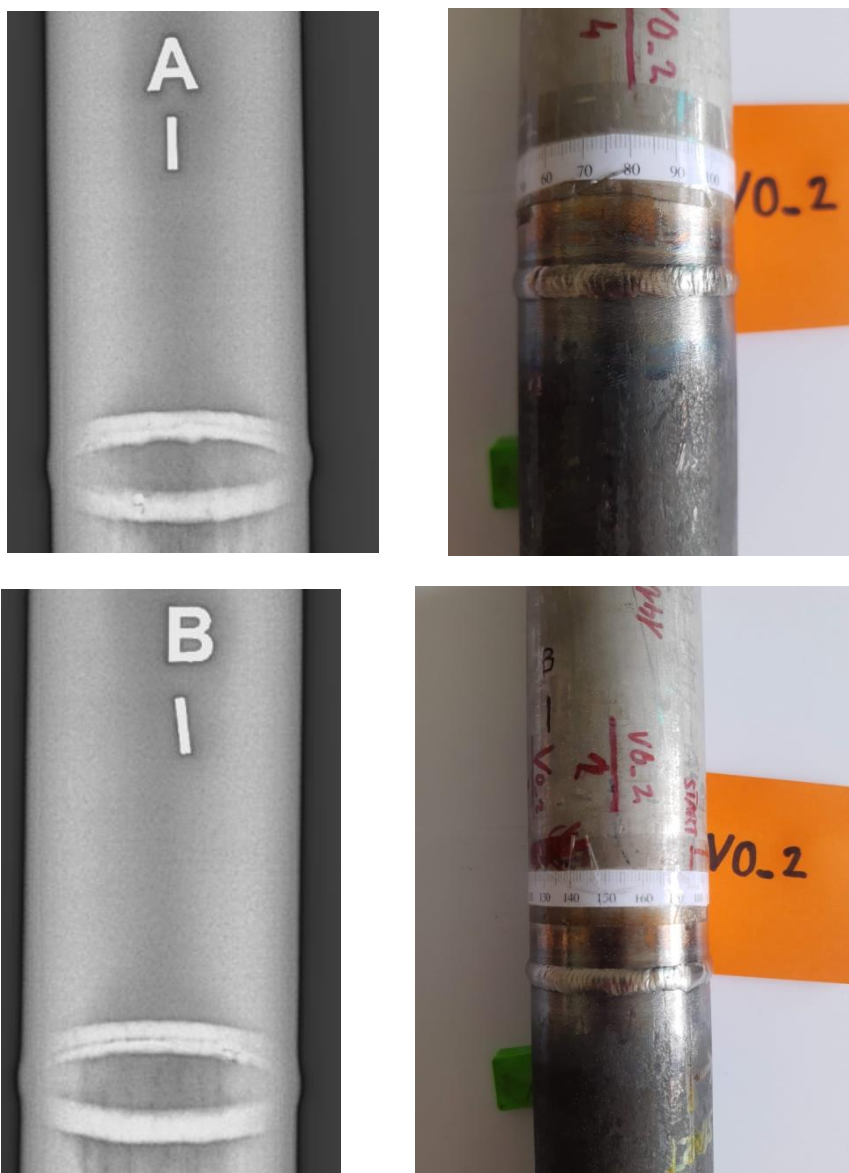
Příloha 70: Radiografické snímky s vizuálním porovnáním – vzorek V50_3.



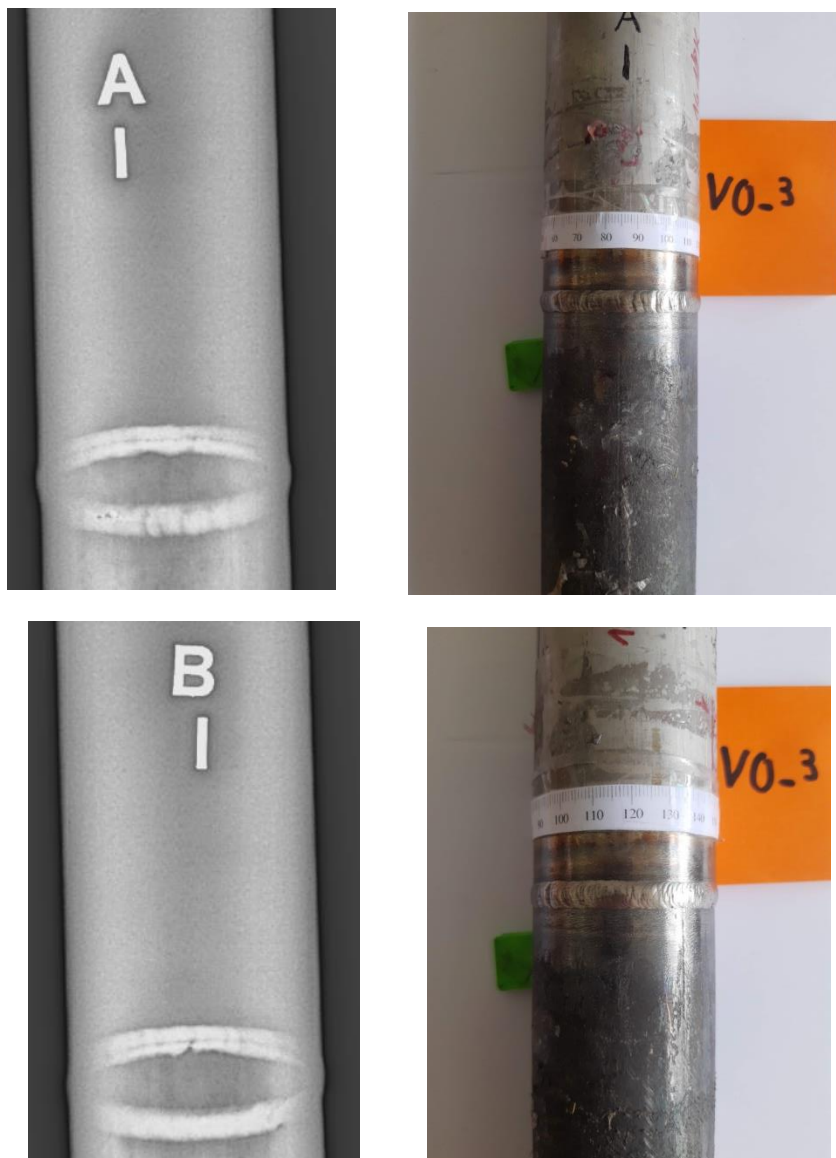
Příloha 71: Radiografické snímky s vizuálním porovnáním – vzorek V25_3.



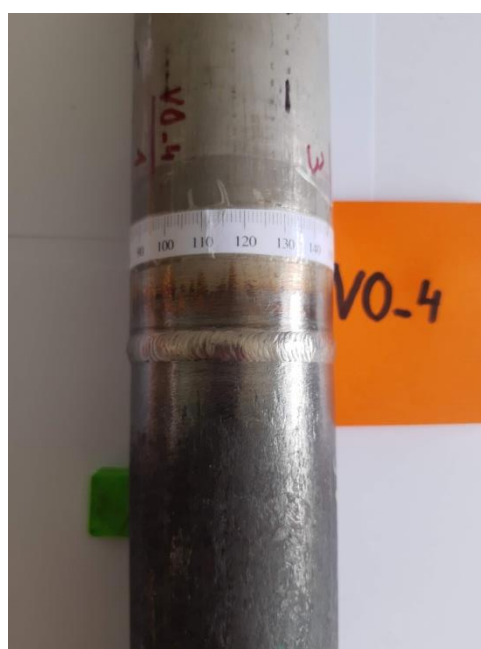
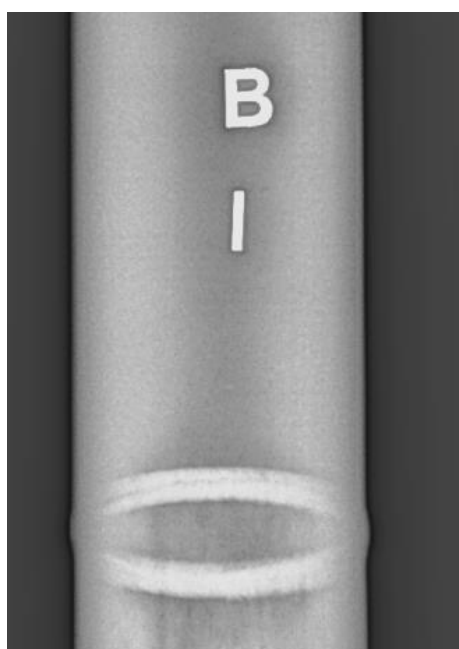
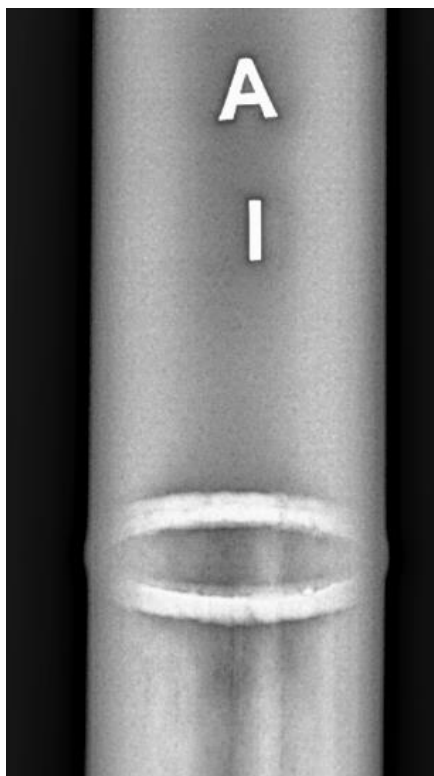
Příloha 72: Radiografické snímky s vizuálním porovnáním – vzorek V0_1.



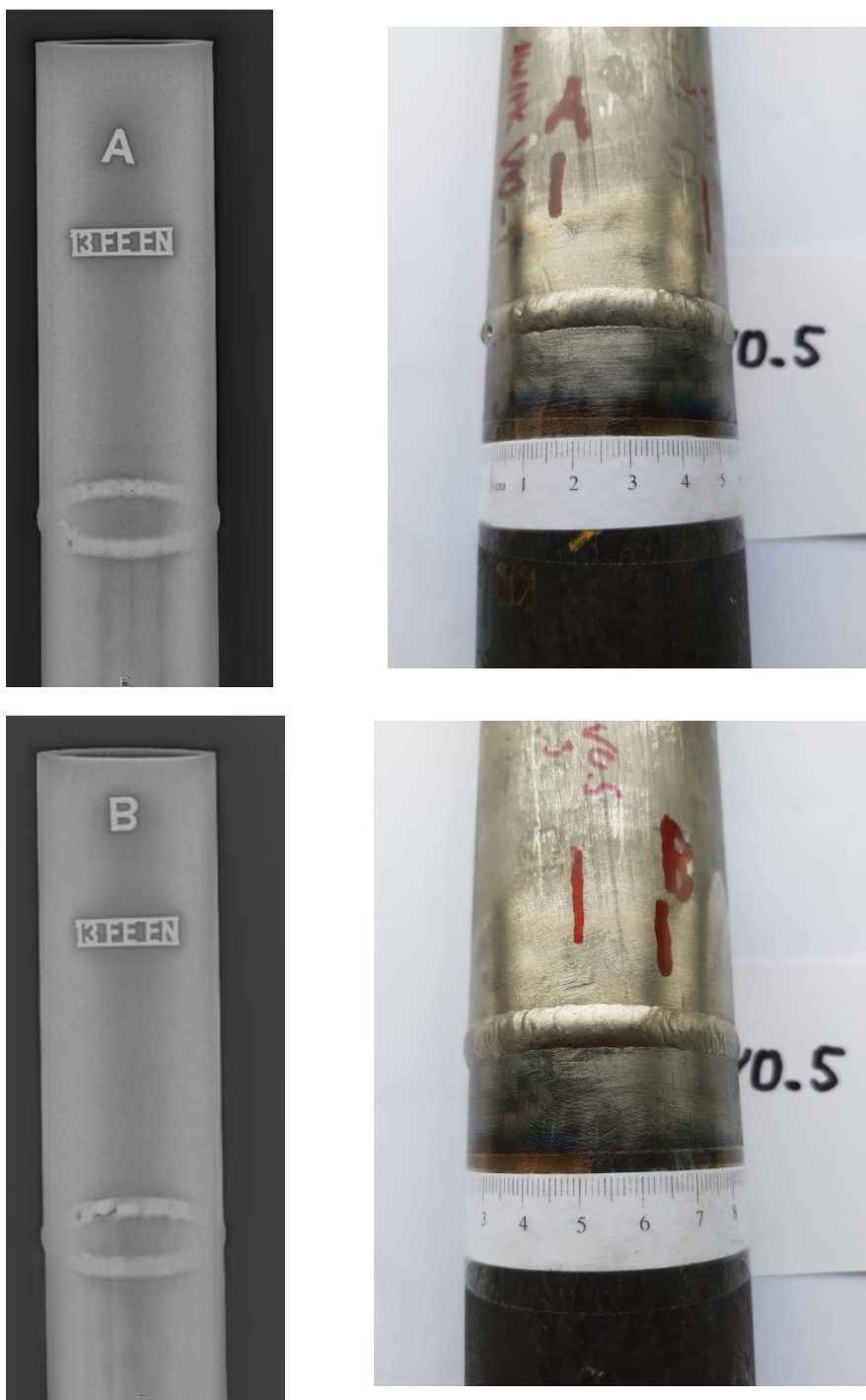
Příloha 73: Radiografické snímky s vizuálním porovnáním – vzorek V0_2.



Příloha 74: Radiografické snímky s vizuálním porovnáním – vzorek V0_3.

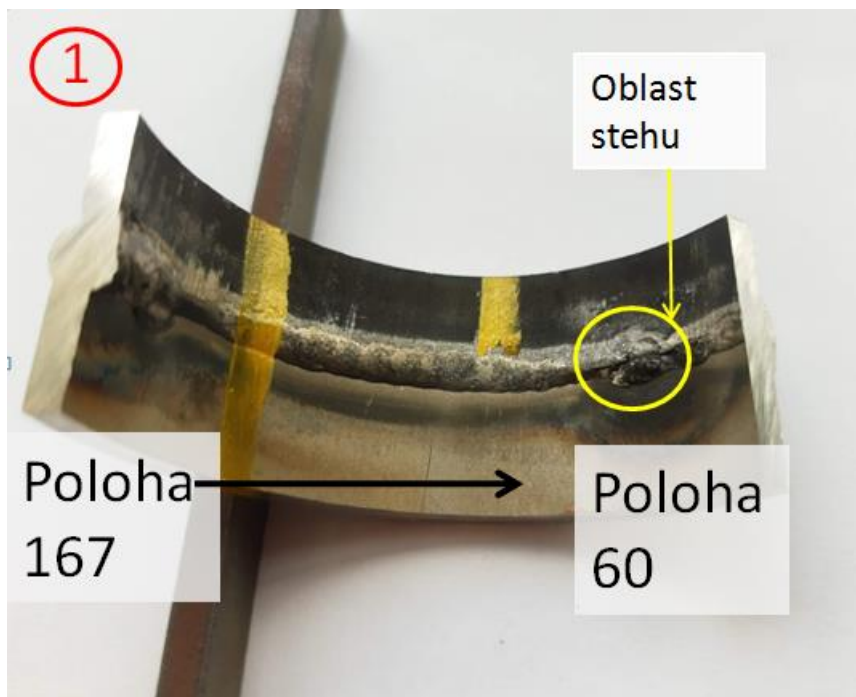


Příloha 75: Radiografické snímky s vizuálním porovnáním – vzorek VO_4.



Příloha 76: Radiografické snímky s vizuálním porovnáním – vzorek V0_5.





Příloha 77: vzorek V0_5.