

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: 2301R016 Materiály a strojírenská metalurgie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Orbitální svařování trubek z oceli 316L

Autor: **Ondřej LUKÁŠEK**
Vedoucí práce: **Ing. Pavla Klufová**

Akademický rok 2017/2018

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne: 17.5.2018

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji Ing. Pavle Klufové za odborné rady, pomoc a trpělivost při vypracování této bakalářské práce. A rád bych poděkoval celé své rodině a také všem z rodilé vsi Žimutice za psychickou podporu během vytváření práce.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Lukášek	Jméno Ondřej	
STUDIJNÍ OBOR	2301R016 – Materiály a strojírenská metalurgie		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Klufová	Jméno Pavla	
PRACOVISŤE	ZČU – FST – KMM		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Orbitální svařování trubek z oceli 316L		

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

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	62	TEXTOVÁ ČÁST	38	GRAFICKÁ ČÁST	24
---------------	----	---------------------	----	--------------------------	----

STRUČNÝ POPIS	Bakalářská práce se zabývá optimalizací parametrů orbitálního svařování pro trubky z oceli AISI 316L. V teoretické části uvádí základní pojmy a metody orbitálního svařování a přibližuje svařovaný materiál. V experimentální části jsou porovnány výsledky ze svařů pomocí metalografického hodnocení a hodnocení mikrotvrdosti.
KLÍČOVÁ SLOVA	Orbitální svařování, TIG svařování, AISI 316L, metalografie, měření mikrotvrdosti

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Lukášek		Name Ondřej	
FIELD OF STUDY	2301R016 – Material science and technology			
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Klufová		Name Pavla	
INSTITUTION	ZČU – FST – KMM			
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable	
TITLE OF THE WORK	Orbitální svařování trubek z oceli 316L			

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

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	62	TEXT PART	38	GRAPHICAL PART	24
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION	Bachelors thesis deals with optimization of orbital welding parameters for AISI 316L steel pipes. In the theoretical part, it presents basic terms and methods of orbital welding and approximates the welded material. In the experimental part the results from metallographic evaluation and evaluation of the microhardness of individual welds are compared.
KEY WORDS	Orbital welding, TIG welding, AISI 316L, metallography, measurement of microhardness

Obsah

1	ÚVOD	11
2	TECHNOLOGIE ORBITÁLNÍHO SVAŘOVÁNÍ	12
2.1	VÝHODY A NEVÝHODY ORBITÁLNÍHO SVAŘOVÁNÍ.....	12
2.2	HISTORIE ORBITÁLNÍHO SVAŘOVÁNÍ	12
2.2.1	<i>Historie TIG svařování</i>	<i>13</i>
3	SPOLEČNOSTI VYRÁBĚJÍCÍ ZAŘÍZENÍ PRO ORBITÁLNÍ SVAŘOVÁNÍ.....	14
4	VYUŽITÍ ORBITÁLNÍHO SVAŘOVÁNÍ V PRAXI.....	15
5	TECHNOLOGIE TIG SVAŘOVÁNÍ	18
5.1	WOLFRAMOVÉ ELEKTRODY	18
5.2	PROUDY VE SVAŘOVÁNÍ	19
5.3	PŘÍDAVNÝ SVAŘOVACÍ DRÁT	20
5.4	SVAŘOVACÍ PLYNY	20
5.5	SPECIFIKA ORBITÁLNÍHO SVAŘOVÁNÍ	22
5.6	VHODNOST MATERIÁLU PRO ORBITÁLNÍ SVAŘOVÁNÍ	24
6	ZAŘÍZENÍ A PŘÍPRAVA SVARU PRO ORBITÁLNÍ SVAŘOVÁNÍ	25
6.1	KOMPONENTY ZAŘÍZENÍ PRO ORBITÁLNÍ SVAŘOVÁNÍ.....	25
6.2	PŘÍPRAVA SVARU.....	27
7	SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ	31
8	ÚVOD DO EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI	33
8.1	ZAŘÍZENÍ	34
8.1.1	<i>Zařízení pro orbitální svařování</i>	<i>34</i>
8.1.2	<i>Metalografické zařízení</i>	<i>35</i>
8.2	PRACOVNÍ POSTUPY	36
9	SPECIFIKACE POSTUPU SVAŘOVÁNÍ (WPS)	37
10	HODNOCENÍ SVARŮ	43
10.1	METALOGRAFICKÉ HODNOCENÍ SVAROVÝCH SPOJŮ	43
10.2	ZKOUŠKA MIKROTVRDOSTI	53
11	VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAMU.....	56
12	ZÁVĚR	57
13	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	58

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Kontejner na vyhořelé palivo [8]	15
Obrázek 2 – Svařování pro aplikace ve sterilním prostředí [9].....	16
Obrázek 3 - Sestava ventilů [10].....	16
Obrázek 4 - Trubky na výrobu polovodičových součástí [11]	17
Obrázek 5 - Broušení elektrody [12]	18
Obrázek 6 – Vyosení špičky elektrody [13].....	19
Obrázek 7 - Délka špičky elektrody [14]	19
Obrázek 8 - Svařovací polohy [15]	22
Obrázek 9 - Pulzní proud [1]	22
Obrázek 10 - Příklad svarových sektorů [1].....	23
Obrázek 11 – Přípravy svaru pro svařování trubek zarovnaných s pouzdrem: 1) standartní, 2) J příprava, 3) V příprava a 4) Povrchová drážka pro svar [1]	28
Obrázek 12 - Příprava svaru pro svařování zapuštěných trubek: D – standartní příprava bez drážky, E – J příprava, F – V příprava, G – svařování za deskou [1].....	29
Obrázek 13 - Přípravy svaru pro vnitřní svařování za trubkou [1].....	29
Obrázek 14 - Zdroj napájení Polysoude P6 CW [28]	34
Obrázek 15 - Otevřená hlava Polysoude MUIV 115 AVC/OSC [29]	34
Obrázek 16 - Světelný optický mikroskop Carl Zeiss Observer Z1M [31]	35
Obrázek 17 - Nastehovaná trubka	36
Obrázek 18 - Základní geometrické parametry svaru.....	43
Obrázek 19 – Ocel 316L, zvětšeno 500x.....	43
Obrázek 20 - Makroskopické zachycení svarového spoje OS1 M1, zvětšeno 25x.....	44
Obrázek 21 - Hranice ztavení svarového spoje OS1 M1, zvětšeno 100x.....	44
Obrázek 22 - Osa svaru svarového spoje OS1 M1, zvětšeno 100x	44
Obrázek 23 - Makroskopické zachycení svarového spoje OS2 M1, zvětšeno 25x	45
Obrázek 24 - Hranice ztavení svarového spoje OS2 M1, zvětšeno 100x	45
Obrázek 25 - Osa svaru svarového spoje OS2 M1, zvětšeno 100x.....	45
Obrázek 26 - Makroskopické zachycení svarového spoje OS2 M2, zvětšeno 25x.....	46
Obrázek 27 - Hranice ztavení svarového spoje OS2 M2, zvětšeno 100x.....	46
Obrázek 28 - Osa svaru svarového spoje OS2 M2, zvětšeno 100x	46
Obrázek 29 - Makroskopické zachycení svarového spoje OS3 M1, zvětšeno 25x	47
Obrázek 30 - Hranice ztavení svarového spoje OS3 M1, zvětšeno 100x	47

Obrázek 31 - Osa svaru svarového spoje OS3 M1, zvětšeno 100x	47
Obrázek 32 - Makroskopické zachycení svarového spoje OS3 M2, zvětšeno 25x	48
Obrázek 33 - Hranice ztavení svarového spoje OS3 M2, zvětšeno 100x	48
Obrázek 34 - Osa svaru svarového spoje OS3 M2, zvětšeno 100x	48
Obrázek 35 - Makroskopické zachycení svarového spoje OS4 M1, zvětšeno 25x	49
Obrázek 36 - Hranice ztavení svarového spoje OS4 M1, zvětšeno 100x	49
Obrázek 37 - Osa svaru svarového spoje OS4 M1, zvětšeno 100x.....	49
Obrázek 38 - Makroskopické zachycení svarového spoje OS4 M2, zvětšeno 25x.....	50
Obrázek 39 - Hranice ztavení svarového spoje OS4 M2, zvětšeno 100x.....	50
Obrázek 40 - Osa svaru svarového spoje OS4 M2, zvětšeno 100x.....	50
Obrázek 41 - Makroskopické zachycení svarového spoje OS5 M1, zvětšeno 25	51
Obrázek 42 - Hranice ztavení svarového spoje OS5 M1, zvětšeno 100x	51
Obrázek 43 - Osa svaru svarového spoje OS5 M1, zvětšeno 100x.....	51
Obrázek 44 - Makroskopické zachycení svarového spoje OS5 M2, zvětšeno 25x.....	52
Obrázek 45 - Hranice ztavení svarového spoje OS5 M2, zvětšeno 100x.....	52
Obrázek 46 - Osa svaru svarového spoje OS5 M2, zvětšeno 100x	52
Obrázek 47 - Zkouška dle Vickerse [34].....	53
Obrázek 48 - Struers Durascan G5 [35]	53
Obrázek 49 - Poloha a označení vtisků mikrotvrdosti svaru OS1	54

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Vhodnost ochranných plynů pro vybrané kovy [1]	21
Tabulka 2 - Vhodnost formovacích plynů pro vybrané kovy [1]	21
Tabulka 3 – Obsah prvků v oceli AISI 316L uveden v hmotnostních procentech [25].....	33
Tabulka 4 - Označení oceli dle norem [25]	33
Tabulka 5 - Proměnné parametry pro jednotlivé svary	37
Tabulka 6 - Mikrotvrdost základního materiálu.....	54

Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratka	Jednotky	Název
AISI	-	American Iron and Steel Institute
ASME	-	American Society of Mechanical Engineers
AVC	-	Automatic voltage control
ČSN	-	Československé státní normy
DCEN	-	Direct current electrode negative
DCEP	-	Direct current electrode positive
DIN	-	Deutsches Institut für Normung
EN	-	European Norm
I_b	[A]	I_{23}
I_h	[A]	I_{22}
La	-	Lanthan
MAG	-	Metal active gas
MIG	-	Metal inert gas
T_b	[ms]	Doba působení vysokého elektrického proudu
T_h	[ms]	Doba působení nízkého elektrického proudu
TIG	-	Tungsten Inert Gas
TOO	-	Tepelně ovlivněná oblast svaru
WPS	-	Specifikace postupu svařování
ZM	-	Základní materiál

1 Úvod

Dnešní svět je světem technologií, které se neustále mění. Pokrok a vývoj se projevuje ve všech oblastech vědy. Svařování jako technologie je pro dnešní svět nenahraditelná a drží se pomyslného vrcholu ve výrobě nerozebíratelných spojů. Rostoucím problémem této technologie je snižující se počet řádně kvalifikovaných a schopných svářečů. Pro udržení konkurenceschopnosti se musí lidská síla nahradit, a tudíž musí docházet k vývoji v oblasti automatizace. Automatizace svařování přinesla zároveň možnost lepšího udržení kvality svaru, protože byl potlačen lidský faktor. Ať už v podobě svařovacích robotů nebo programovatelných svařovacích rozhraní. Dnes již běžně fungují automatizované svařovací linky, které zaručují přesnou a kontinuální výrobu. V porovnání s jinými technologiemi, které zpracovávají kovy, jako jsou slévání nebo tváření je svařovací zařízení méně náročné na počáteční kapitál. Další výhodou může být svařitelnost heterogenních materiálů, výroba finálních svařenců nebo svařování konstrukcí na těžko dostupných místech. Proto se svařování hojně využívá v nejrůznějších odvětvích průmyslu jako je doprava, energetika nebo farmacie. A právě kvůli široké škále využití a stálému zdokonalování si svařování udrží své místo mezi výrobními technologiemi.

Orbitální svařování je poměrně mladé odvětví obloukového svařování. Ale i když se jedná o specializované odvětví svařování, nachází i tak velké množství uplatnění. S výhodou vytváří svary, které by manuálně bylo téměř nemožné vytvářet. Technologie orbitálního svařování je automatizovaná, takže zařízení pracuje na základě zadaných parametrů. A právě správná volba parametrů je pro orbitální svařování klíčová. Díky automatizaci je možné vytvářet při stejných parametrech a podmínkách téměř identické svary. To je velkou výhodou pro vytváření stejně kvalitních svarových spojů.

Cílem experimentální části předložené bakalářské práce je najít optimální svařovací parametry pro zajištění kvalitního svarového spoje u trubek o průměru $\varnothing 60,3$ mm a tloušťce stěny 2 mm z oceli AISI 316L. Optimalizovanými parametry jsou I_{22} a I_{23} , což jsou svařovací proudy typické pro pulzní svařování. Jednotlivé svary budou porovnávány podle metalografických hodnocení a hodnocení mikrotvrdoosti.

2 Technologie orbitálního svařování

Orbitální svařování je specializovaná oblast svařování, u které se k sváření obrobků využívá technologie TIG svařování s pulzním proudem. Specifikem orbitálního svařování je rotační pohyb wolframové elektrody okolo osy obrobku o 360 stupňů. Rotační pohyb okolo obrobku je umožněn pomocí svařovací hlavy. Pro technologii orbitálního svařování je charakteristické využití netavící se wolframové elektrody, která je během procesu svařování (popřípadě spolu s přídavným drátem) a vzniklou tavnou lázní chráněna ochranným plynem. Dále se používá formovací plyn, který je vháněn dovnitř svařenců tak, aby zajistil ochranu vznikající svarové lázně během její solidifikace. TIG, Tungsten Inert Gas, symbolizuje svařování wolframovou netavící se elektrodou v ochranné atmosféře plynu.

Základní dvě metody orbitálního svařování jsou spojení trubky s trubkou (tube-to-tube), popřípadě potrubí s potrubím (pipe-to-pipe) a druhá metoda je svařování trubky do pouzdra (tube-to-tubesheet). [1]

2.1 Výhody a nevýhody orbitálního svařování

Výhody:

- Využívá se primárně pro svařování nerezových ocelí.
- Lze využít i pro svařování slitin niklu, hliníku, mědi, zlata, hořčíku, tantalu, titanu, zirkonu a jejich slitin. V jistých případech lze svařit i mosaz a bronz. Při využití přídavného drátu mohou být vytvářeny heterogenní svarové spoje.
- Metodou orbitálního svařování lze svařovat ve všech polohách okolo osy obrobku.
- Proces orbitálního svařování je velmi přesný a spolehlivý. U svaru je malá šance na výskyt vad.
- Lze ovlivňovat mnoho parametrů svařování a většinou nezávisle na sobě.
- TIG svařování lze provádět s přídavným drátem nebo bez něho.
- Možnost automatického řízení napětí elektrického oblouku a intenzity svarového proudu nabízí širokou škálu variant využití.

Nevýhody:

- V porovnání s ostatními metodami svařování je přesun z jednoho místa sváření na jiné delší.
- Svařovací zařízení je komplexnější, než ostatní klasické metody a vyžaduje vyšší investiční náklady, než zařízení pro ruční svařování. [1]

2.2 Historie orbitálního svařování

Během šedesátých let dvacátého století potřeboval letecký průmysl extrémně přesný proces svařování, kterým by se daly spojovat součásti leteckých dílů. V době, kdy probíhal „Vesmírný závod“ byl tento svařovací postup potřebný pro kovové trubky, potrubí a mnoho dalších obtížně svařitelných částí jako sestavy z nerezové oceli či titanové palivové potrubí. Z toho důvodu vznikla nová technologie zvaná orbitální svařování.

Po využití ve vesmírném programu se následně v sedmdesátých letech tato technologie dostala do farmaceutického průmyslu, kde byla využita jako prostředek pro vymýcení kontaminace při destilačních metodách, výrobu ventilů s membránami a tlakoměry.

V osmdesátých letech došlo k velkému vývoji technologie orbitálního svařování. Byly vynalezeny menší a přenosná zařízení, která měla spolehlivější zdroj napájení. Zároveň došlo k vylepšení v oblasti ovladatelnosti zařízení. To vedlo k automatizaci technologie. Automatizace rozšířila oblast využití orbitálního svařování a tím se technologie zpopularizovala.

V dnešní době je proces orbitální svařování řízen pomocí počítače. Tato technologie umožňuje vytvářet svary vysoké jakosti bez vad. [2]

2.2.1 Historie TIG svařování

TIG svařování bylo zkompletováno v roce 1941 V. H. Pavleckou a R. Meredithem, kteří pracovali pro společnost Northrop Aircraft. Právě tito dva vědci navrhli postup s netavicí se wolframovou elektrodou, který byl vhodný pro svařování hořčíku, niklu a hliníku v ochranné atmosféře hélia. Před objevem této technologie však probíhaly série individuálních výzkumů. Již v roce 1889 si byl Charles L. Coffin vědom ochrany roztaveného svarového kovu. Proto navrhl postup, ve kterém byl svar prováděn pod neoxidujícím médiem. V tomto případě pod tavidlem. Ve 20. letech 20. století byl navržen postup svařování Irvingem Langmuirem, který dosahoval vysokých teplot vhodných pro svařování při hoření elektrického oblouku mezi dvěma wolframovými elektrodami v atmosféře vodíku. Do výše zmíněného roku 1941 byly vydány patenty na různé druhy ochranných atmosfér jako směs vodíku a dusíku v 1925. V roce 1926 následoval argon a helium a směs propanu a vodíku. V roce 1927 pak byla navržena ochranná směs propanu a oxidu uhličitého.

Na konci první poloviny minulého století došlo k zaregistrování patentu svařování pulzním proudem. Tento způsob svařování pracuje na principu pravidelného střídání vysokého a nízkého svařovacího proudu. S touto technologií přišel Nelson E. Anderson. Se selenovým usměřovačem bylo možné použít transformátor jako zdroj stejnosměrného svařovacího proudu. Tyto transformátory byly později upraveny tak, aby mohly generovat vysokofrekvenční proud, který je pro vhodný pro tuto metodu svařování. Následné kroky směřovaly k optimalizaci průběhu svařovacích proudů a napětí v čase. [3]

3 Společnosti vyrábějící zařízení pro orbitální svařování

Polysoude

Tato společnost je původem z Francie z města Nantes. Polysoude vznikl v roce 1961 a navrhuje, vyrábí a prodává všechny druhy zařízení s použitím procesů obloukového svařování. Ať už je to orbitální svařování, automatizované svařování s horkým nebo studeným přídavným drátem. Její holdingová společnost Global Welding Technologies sídlí v Rakousku. Výrobky této firmy se využívají v průmyslových oborech a vyžadují nejvyšší úroveň kontroly jakosti. Sídlo firmy v České Republice je ve městě Pacově. [4]

Pro naplnění experimentálního programu této bakalářské práce se bude využívat zařízení právě od firmy Polysoude. [4]

Kemppi

Společnost Kemppi pochází z Finska z města Lahti. Vznikla v roce 1949. Společnost dnes zahrnuje i dceřiné společnosti ve 13 zemích a vyváží svařovací soupravy a programy do více než 60 zemí. Výroba probíhá v domovském Finsku a v Indii. Indická část výroby souvisí s vývozem, který je primárně orientován na východ a do Asie. Zabývá se jak výzkumem, výrobou, tak i prodejem příslušenství pro technologii orbitálního TIG svařování, dále pak MIG/MAG svařování včetně výrobků na stejnosměrný i střídavý proud. [5]

Lincoln electric

Společnost Lincoln electric vznikla v USA. Stala se však světovým výrobcem a tudíž i nadnárodní společností, která se věnuje svařování. Ať už to jsou zařízení pro oblouková svařování, ochranné pomůcky, spotřební materiál, orbitální svařování nebo plně automatické svařovací systémy. Společnost byla založena roku 1895, kdy vyráběla elektromotory. Dnes vyváží se svými 42 pobočkami svařovací potřeby pro 160 zemí na celém světě. [6]

4 Využití orbitálního svařování v praxi

Letecký průmysl a kosmonautika

V současné době mohou vysokotlaké systémy jednoho letadla obsahovat více než 1500 svarů. Většina těchto svarů je svařena pomocí automatizovaného zařízení pro orbitální svařování. Přesné ovládání vstupu tepla při svařování je důležitým aspektem technologie, jelikož umožňuje zabránění nadměrnému tepelnému ovlivnění nebo deformacím svařovaných součástí. Orbitální svařování navíc umožňuje vytvářet pro konkrétní parametry téměř identické svary, což je leteckým průmyslem vyžadováno. Kromě vysokotlakých systémů jsou využívány i na hydraulických linkách, brzdových potrubích a palivových vedeních. [1] [7]

Jaderná energetika

Jaderný průmysl vyžaduje, aby šlo svařovat v těžko dostupných pozicích. Svar by měl být odolný vůči vysokým tlakům a značnému teple. Zároveň se jedná i o svařování, kde je třeba mobilní zdroj energie nebo jsou podmínky ztíženy vlhkostí. Výhodou orbitálního svařování v tomto případě je i přesná opakovatelnost svarů a preciznost technologie, která zaručuje i čistotu a trvanlivost svaru. Svařovací postupy a kvalita svarů je kontrolována příslušnými orgány. Důkazem toho, že je orbitální svařování lepší volba, než manuální svařování v jaderném průmyslu je PWR jaderná elektrárna v Angra v Brazílii, kde se přímo při stavbě porovnávaly tyto dvě metody. [1]



Obrázek 1 - Kontejner na vyhořelé palivo [8]

Farmaceutický průmysl

Výroba ve farmaceutickém průmyslu vyžaduje vysoké nároky na hygienu. Orbitální svařování zaručuje svary bez vad, které jsou klíčové pro růst mikroorganismů v trubičkách pro farmaceutické nebo biotechnologické laboratoře. Sterilita vedení výrobků je hlídána přísnými normami. Svary by neměly vylučovat žádné látky a měly by odolávat vysoké teplotě, které se využívá při sterilizaci. Koroze materiálu je v tomto odvětví průmyslu naprosto nepřipustná. [1]



Obrázek 2 – Svařování pro aplikace ve sterilním prostředí [9]

Potravinářský průmysl

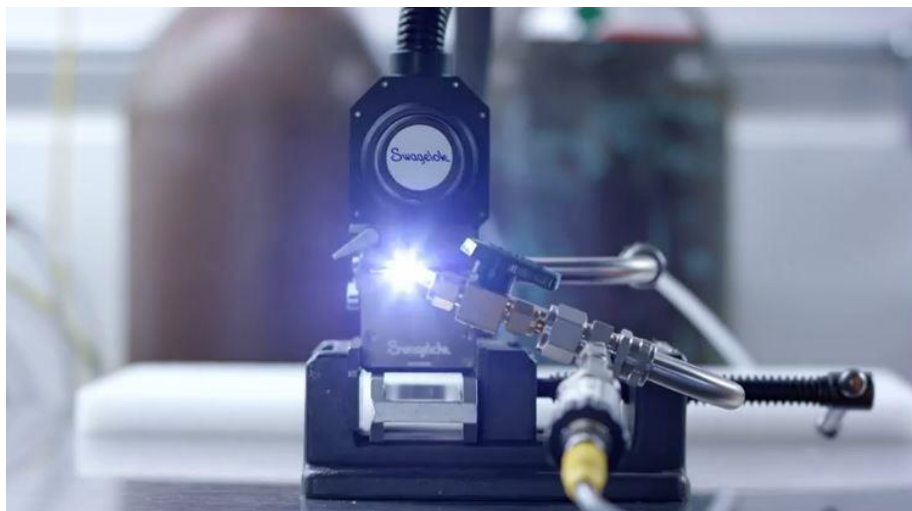
V potravinářském průmyslu platí téměř stejné hygienické nároky jako u farmaceutického průmyslu. Tudiž u svaru nesmí docházet k vzniku trhlin, pórů nebo propadlin v oblasti kořene svaru, kde by mohlo dojít k zachycení a růstu bakterií. Technologie orbitálního sváření zaručuje hladké povrchy uvnitř trubek, které zajišťují jednoduché čištění a sterilizaci potrubního systému. Uplatnění svařovací technologie lze najít pro systémy vedení potravinářských, nápojových i mléčných výrobků. [1]



Obrázek 3 - Sestava ventilů [10]

Výroba polovodičových zařízení

Pro výrobu polovodičových součástí jsou svařovány trubky z nerezové oceli jako procesní plynovody. Jsou vytvářeny od průměru 6,3 mm o tloušťce stěny 1 mm. Tento úkol je prováděn jen zkušenými operátory, kteří jsou vyškolení na technologii orbitálního svařování. [1]



Obrázek 4 - Trubky na výrobu polovodičových součástí [11]

Chemický průmysl

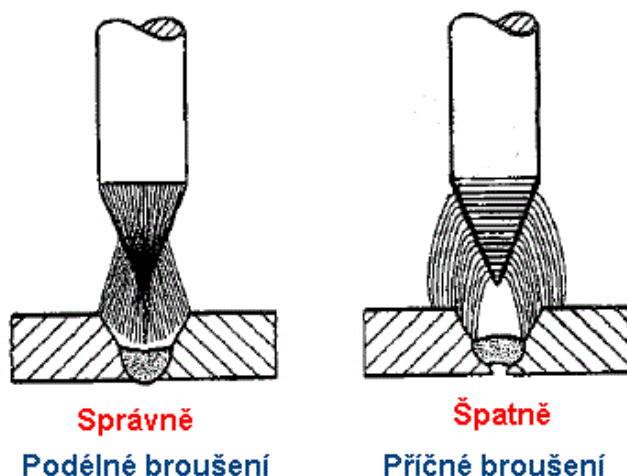
Pro chemický průmysl jsou za pomoci orbitálního svařování vytvářeny svary trubek, potrubí, výměníků tepla a konvertorů. Tyto součásti bývají vyrobeny z korozi-vzdorné nebo žárupevné oceli nebo slitin titanu, zirkonu, niklu či chromu. Pro sestavení jednoho tepelného výměníku může být třeba až několik tisíc svarů. Životnost kompletu závisí na úrovni kvality každého svaru. Od toho se odvíjí kontrola a sledovanost svařovacích procesů. [1]

5 Technologie TIG svařování

5.1 Wolframové elektrody

Wolfram je vysoce žárovzdorný kov, který má teplotu tání 3410 °C. Odolá teplotu elektrického oblouku a udržuje si svou tvrdost i při vyšších teplotách. V minulosti se užívaly wolframové elektrody s thoriem. Thorium se však přestalo využívat z důvodu jeho radioaktivity. Dnes se wolframové elektrody legují například Ce, Zr nebo La, které nejsou radioaktivní. Svar svařený těmito elektrodami vykazuje srovnatelné vlastnosti, jako u elektrod legovaný thoriem. [1]

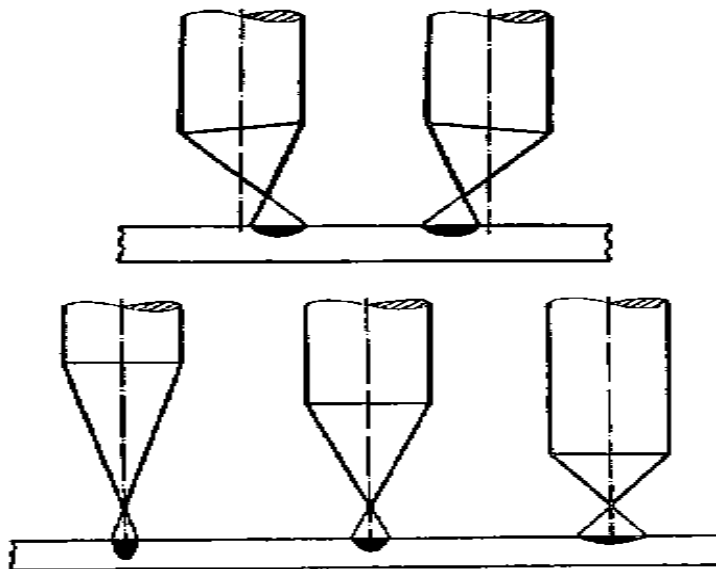
Aby bylo dosaženo přesných výsledků a zároveň i opakovatelné přesnosti svaru je nutné wolframovou elektrodu brousit. Úprava se provádí pomocí brusky. Konstrukce a tvar brusky musí zajišťovat, aby běžely brusné rýhy na zúžené části elektrody rovnoběžně se strukturou zrna elektrody. Tím se zaručí lepší zapalování a vyšší stabilita oblouku. [1]



Obrázek 5 - Broušení elektrody [12]

Důležité je, aby byla špička přesně v ose elektrody. Při excentricitě vzniká nebezpečí nestabilního oblouku. Tento problém hrozí i u automatického svařování. V případě, kdy elektroda má špičku mimo osu, bude i přes přesnou fixaci k obrobku při orbitálním svařování převáděná energie mimo požadované místo. S tímto souvisí i úhel vybroušené špičky elektrody. [1] [26]

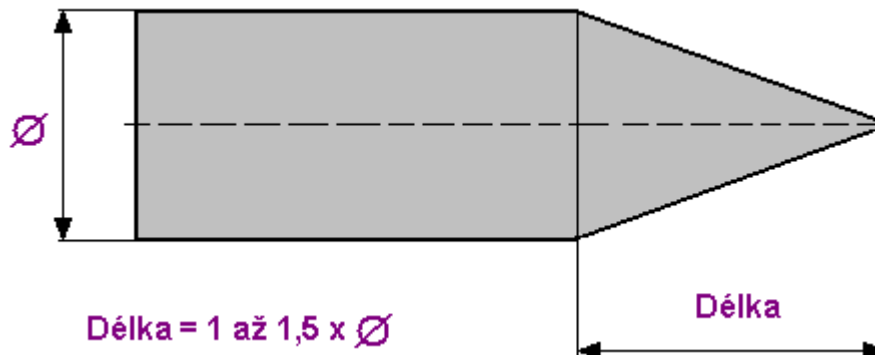
Příklady úhlu nabroušení a vyosení špiček elektrod:



Obrázek 6 – Vyosení špičky elektrody [13]

Wolframové elektrody se obvykle vyrábějí v průměrech:

1,0 mm; 1,6 mm; 2,0 mm; 2,4 mm; 3,2 mm; 4,0 mm; 4,8 mm; 6,0 mm a 6,4 mm. [26]



Obrázek 7 - Délka špičky elektrody [14]

Standartní vyráběné délky jsou: 50 mm, 75 mm, 150 mm a 175 mm. [1] [26]

5.2 Proudý ve svařování

TIG svařování nabízí sváření jak stejnosměrným, tak střídavým proudem. Nejčastěji se používá stejnosměrný proud, který je vhodný téměř pro každý materiál. Střídavý proud se využívá hlavně u hliníku a jeho slitin. [1]

Stejnospměrný proud

Technologie svařování stejnosměrným proudem je založena na principu, při kterém je elektroda připojená k záporným svorkám zdroje napájení, a proto funguje jako katoda. Tomuto nastavení se říká DCEN (Direct Current Electrode Negative). Při této metodě se

předpokládá, že přibližně 70 % množství uvolněné energie je přeměněno na teplo. To znamená, že účinnost je přibližně 0,7 v poměru užité energie vůči uvolněné energii. Druhou konfigurací je DCEP neboli Direct Current Electrode Positive. Ta se využívá jen velmi výjimečně. Při této metodě je většina tepla převáděna do wolframové elektrody a proto musí být chlazena, čímž se liší od metody DCEN. [1]

Střídavý proud

Při svařování střídavým proudem se střídavě mění polarita na elektrodě. Pokud je polarita kladná, elektroda funguje jako anoda. Díky čistícímu efektu anody budou odstraněny oxidy z povrchu obrobku. Během záporné polarity wolframové elektrody funguje jako katoda a teplo, jež se vytváří, se přenáší na obrobek. V této fázi zároveň elektroda chladne. [1]

5.3 Přídavný svařovací drát

Přídavný drát se využívá podle tloušťky svařence. Dále se využívá při vytváření svarů z heterogenních materiálů. Pokud spojuje trubky z rozdílných materiálů, musí mít podobnou teplotu tání jako materiály základní. Využívá se v situacích, kdy se části legujících materiálů mohou během svařování vypařovat nebo vytváří směsi. Příkladem může být, pokud se chrom sloučí s uhlíkem a vytváří se tak karbidy chromu. Výsledný nedostatek chromu ve svaru může způsobit ztrátu odolnosti vůči korozi, což je nežádoucí efekt. [1]

5.4 Svařovací plyny

Ochranné plyny

Svařovací ochranné plyny se v technologii svařování využívají z důvodu ochrany proti oxidaci tavné lázně. [1]

Argon

Argon se běžně používá jako ochranný plyn v TIG svařování. Oblouk se v argonové ochranné atmosféře vyznačuje výbornou stabilitou. I při nízkém proudu je energie z oblouku omezena na úzkou oblast. Argon je navíc díky své inertnosti kompatibilní se všemi typy základních materiálů. Ochranné plyny by měly mít pro standardní TIG svařování čistotu 99,995 %. Kovy, které jsou označovány jako citlivé pro svary jako například titan, tantal, zirkon a jejich slitiny vyžadují čistotu alespoň 99,998 %. [1]

Argon s vodíkem

Přídavkem vodíku do argonu lze zvýšit energii svařování až o 5 %. Smísením argonu s vodíkem je získán lepší průnik oblouku a vyšší svařovací rychlosti. Zároveň má směs argonu s vodíkem redukční vlastnosti a tím chrání roztavený kov proti infekci atmosférickým kyslíkem. Uhlíkové oceli mají tendenci vodík absorbovat, čímž by mohlo dojít k následné poréznosti nebo praskání svaru za studena. Tudíž se směs argonu s vodíkem nedoporučuje vždy a pro svařování hliníku a titanu jsou přísně zakázány. [1]

Argon s héliem

Přidáním hélia do argonu lze také zvýšit vnesené teplo do svaru. Helium vede dobře teplo. Obsah hélia se pohybuje okolo 20 %, 50 %, 70 % nebo lze využít i čisté helium. Čisté helium je využíváno pro svařování titanu a jeho slitin, protože na titan nemá žádné negativní účinky. Napětí oblouku pod heliem je výrazně vyšší, než pod argonem. Obloukový sloupec je u hélia širší a umožňuje hlubší průnik. Helium je využíváno pro svařování kovů s vysokou tepelnou vodivostí, jako je měď, hliník a slitiny lehkých kovů. Jelikož je helium lehký plyn, ve srovnání s argonem se musí zvýšit průtoková rychlost pro stejné pokrytí dvakrát až třikrát.

Směs argonu, hélia a dusíku se používají pro svařování duplexní oceli a super duplexní oceli. [1]

Tabulka 1 - Vhodnost ochranných plynů pro vybrané kovy [1]

	Argon	Argon + vodík	Argon + hélium	Argon + dusík	Helium
Uhlíkové oceli	Doporučené	Možné	Možné	Nevhodné	Možné
Austenitické oceli	Doporučené	Možné	Možné	Možné	Možné
Duplexní oceli	Možné	Možné	Možné	Doporučené	Možné
Měď	Doporučené	Zakázané	Doporučené	Možné	Doporučené
Hliník	Doporučené	Zakázané	Doporučené	Nevhodné	Doporučené
Titan	Doporučené	Zakázané	Doporučené	Zakázané	Doporučené

Formovací plyny

Většina aplikací orbitálního svařování má vysoké požadavky na kvalitu svaru v oblasti kořene. Nároky jsou vysoké, jelikož právě kořen bude v budoucnu v kontaktu s přepravovaným médiem. Aby se zamezilo kontaktu atmosférického kyslíku a kořene svaru, využívá se takzvaný formovací plyn. Ten závisí na svařovaném materiálu, většinou se do plynové směsi přidávají komponenty jako dusík nebo vodík. [1]

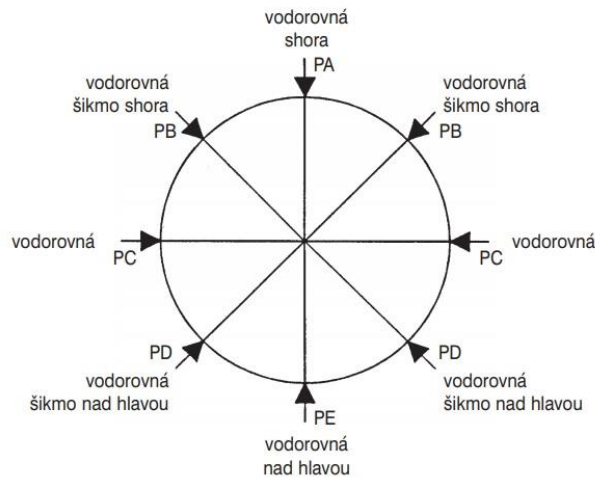
Tabulka 2 - Vhodnost formovacích plynů pro vybrané kovy [1]

	Argon	Dusík	Vodík s Argonem/dusíkem
Uhlíkové oceli	Doporučené	Doporučené	Nevhodné
Austenitické oceli	Doporučené	Doporučené	Doporučené
Duplexní oceli	Možné	Doporučené	Možné
Měď	Doporučené	Možné	Možné
Hliník	Doporučené	Nevhodné	Zakázané
Titan	Doporučené	Zakázané	Zakázané

5.5 Specifika orbitálního svařování

Svařovací pozice orbitálního svařování

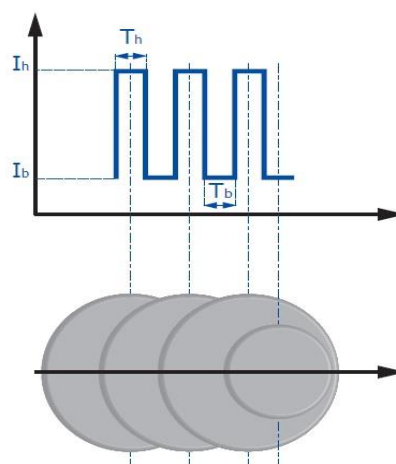
Označení svařovacích poloh pro svařování trubek je specifikováno v normě ASME, oddíl IX a v Evropské normě EN 287 / EN ISO 6947.



Obrázek 8 - Svařovací polohy [15]

Pulzní proud

Aby bylo orbitální svařování úspěšné, je nutné kontrolovat svarovou lázeň kovu během celého svařovacího cyklu. Je nutné brát v potaz, že se situace během procesu průběžně mění. Při svařování v poloze PD/PE nesmí dojít vlivem gravitace nebo změnou tepelného stavu obrobku k odlišné solidifikaci svarové lázně. Nejúčinnější opatření k udržení kontroly při všech polohách je použití pulzního svařovacího proudu. Podstatou pulzního svařování je změna proudu mezi dvěma různými úrovněmi.



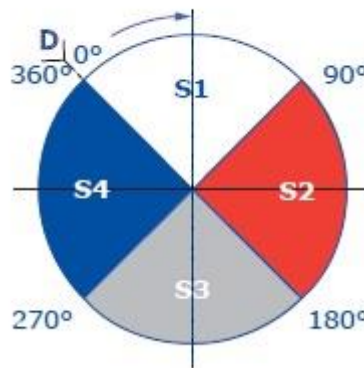
Obrázek 9 - Pulzní proud [1]

Během doby T_h svarového proudu I_h zůstává vysoké napětí, což vede k vytvoření velkého množství svarové lázně. Následně se během času T_b tavenina za nízkého proudu I_b ochlazuje a snižuje objem na minimum, což zmírňuje gravitační účinky.

Pulzní proud je výhodný pro většinu aplikací orbitálního svařování, jelikož zjednodušuje a urychluje stanovení svařovacích parametrů. Nicméně pokud mají být svařeny trubky o velkých průměrech s tloušťkou stěny přes 10 mm, úroveň intenzity I_b se musí zvýšit a to až do úrovně I_h , což vede k sjednocení intenzity proudu a tudíž k nepulznímu svařování. [1]

Sektorování obrobku

V mnoha případech využití orbitálního svařování není pulzní proud dostačující k dosažení přijatelného svaru. Parametry musí být zohledněny vzhledem ke skutečným požadavkům svaru. Dráha svařování je proto dělena do různých zón zvaných sektory. Parametry svařování se mění na hranicích předepsaných sektorů.



Obrázek 10 - Příklad svarových sektorů [1]

Popis sektorů

- 1) Sektor S1 od 0° do 90° je v rovině
- 2) Sektor S2 od 90° do 180° je ve svislém směru dolů
- 3) Sektor S3 od 180° do 270° je spodní rovina nad hlavou
- 4) Sektor S4 od 270° do 360° je vertikálně nahoru

V závislosti na poloze svařování a tepelných podmínkách obrobku, který je nepřetržitě ohříván procesem svařování se hodnoty parametrů mění na počátku každého sektoru. V praxi však nejsou sektory rozděleny pravidelně, jako je ukázáno na obrázku 10). Počty a úhlová rozpětí sektorů se mohou měnit v důsledku různých svařovacích aplikací. [1]

V experimentálním programu předložené bakalářské práce sektorování obrobku využito nebylo.

5.6 Vhodnost materiálu pro orbitální svařování

Svařováním wolframovou elektrodou v ochranné atmosféře, na níž je orbitální svařování založeno, lze vytvářet i za náročných podmínek jako je kontaminace atmosférickými plyny vysoce kvalitní svary. Příkladem mohou být kovy jako Ti, Zr, Nb, u kterých může i malé množství atmosférického kyslíku, dusíku nebo vodíku snížit odolnost proti tažnosti a korozi. Běžně se využívá ke svařování nerezových ocelí včetně austenitických, feritických a martenzitických. Využívá se i u slitin na bázi Ni, které jsou na kvalitu technologie svařování též velmi náročné. V neposlední řadě lze touto metodou svařovat i slitiny hliníku, u kterých se ochrannou atmosférou zabráňuje vzniku oxidů Al_2O_3 nebo slitiny hořčíku a mědi. [16]

Metoda TIG svařování je vhodná pro svařování tenkých plechů a fólií z téměř všech svařitelných kovů, protože je možné řídit elektrický proud při velmi nízkých hodnotách (2 až 5 A) potřebných pro tyto tloušťky. Orbitální svařování není vhodné pro svařování kovů a slitin s velmi nízkými teplotami tání, jako jsou pájky s cínovým olovem a slitinami na bázi zinku. Důvodem je vysoká teplota oblouku, kvůli které nelze řádně řídit svařovou lázeň. [16]

6 Zařízení a příprava svaru pro orbitální svařování

6.1 Komponenty zařízení pro orbitální svařování

Pro vytvoření svaru orbitálním svařováním jsou obecně potřeba tři komponenty:

- Programovatelný zdroj energie a dálkové ovládání
- Svařovací hlava
- Podavač drátu, je-li pro svar nutný

Výkon zařízení závisí na konstrukci výše uvedených součástí. [1]

Programovatelné zdroje napájení

Pro orbitální svařování je využíván zdroj energie, který se skládá z několika podsestav. První částí jsou jeden nebo dva napájecí měniče k napájení oblouku a v případě svařování s horkým drátem je nutné mít i napájení drátového plniče. Dnes jsou moderní zdroje typu Invertor. Další částí je programovatelná řídicí jednotka, která funguje buď na integrovaném, nebo na externím počítači. Napájení vyžaduje i chladicí okruh pro hořák, svařovací a upínací nástroje. Ze zdroje je napájena i záznamová jednotka pro svařovací procesy.

Zdroje energie pro orbitální svařování se mohou dělit do tří kategorií s určitými oblastmi využití. [1]

Přenosné zdroje energie

Aby zdroj splňoval kritérium přenosnosti, musí být jeho hmotnost a objem minimalizovány. Stroj musí být přenášen na místo určení samotným provozovatelem práce. Tím je však omezen i výkon svářečky. Pracují na jednofázovém napětí o síle 230 V. Programování a vývoj parametrů se provádí na grafickém uživatelském rozhraní. Napájecí zdroje tohoto typu pro orbitální svařování mohou ovládat až čtyři osy najednou. Lze řídit proud ochranného plynu, intenzitu svarového proudu, počet impulzů, rychlost otáčení svařovací hlavy a podávání drátu. Chladicí systém používá vodu a je součástí svařovací hlavy, kde tvoří uzavřené smyčky. [1]

Středně velké mobilní zdroje

Středně velké mobilní stroje jsou svou zvýšenou hmotností těžké k ruční přepravě. Jejich mobilita je tedy určena lokálně, což je například místnost nebo hala. Tyto zdroje jsou určeny na připojení pro třífázové vývody na 415 V a disponují svařovacím proudem až 540 A. Zdroj může být ovládán i dálkově. Středně velké zdroje dokáží udržet až 6 os. Každou z nich lze samostatně naprogramovat a řídit. Pro každou osu lze nastavit průtok ochranného plynu, intenzitu proudu svařování, rychlost otáčení svařovací hlavy a rychlost podávání drátu. [1]

Zdroj napájení v plné velikosti

Svou velikostí mohou být vybaveny v plném rozsahu a splnit tak přesně potřeby nutné k zamýšlenému úkolu svařování. V závislosti na modelu může stroj dodávat svařovací proud od 300 A do 550 A. Zdroj je napájen třífázovým proudem 415 V. Programování probíhá

stejně jako u předešlých zdrojů. Zdroje napájení jsou nastaveny na práci se šesti i více osami, které lze programovat a řídit. Programování zdroje lze provádět offline nebo online pomocí PC s nainstalovaným softwarem. [1]

Svařovací hlavy pro technologii orbitálního svařování

Hlavy svařující trubku s trubkou

Uzavřené svářecí hlavy

Uzavřené svářecí hlavy jsou určeny k autogennímu svařování trubek bez přídavného drátu. Jejich rozpětí svařovaných průměrů trubek se pohybuje od 1,6 mm do 168 mm. Takto lze kvalitně svařovat austenitickou nerezovou ocel, kovy náchylné k oxidaci, titan, zirkon a jejich slitiny. V závislosti na aplikaci jsou pro uzavření uzávěru komorové hlavy potřeba jedna nebo dvě dvojice upínacích pouzder. [1]

Otevřené svářecí hlavy typu U

Otevřené svařovací hlavy byly vytvořeny jako nástroj pro orbitální svařování TIG s možností aplikace přídavného drátu. Průměr svařovaných trubek, které mohou být svařeny, se pohybuje od 8 mm do 275 mm. Tyto svářecí hlavy jsou vybaveny wolframovou elektrodou s difuzérem plynu. Asymetrický tvar otevřené hlavy umožňuje provádět svar ve velmi malé vzdálenosti od stěny trubky či ohybu. Umístování hlavy lze provádět manuálně nebo pomocí motorizovaného posuvníku. [1]

Svařovací hlavy s nosným profilem

Jedná se o otevřené svařovací hlavy, které jsou upevněny na nosiči. Tento nosič se pohybuje po kolejnicích, které jsou umístěny okolo svařované trubky nebo potrubí. Tyto koleje mohou být namontovány na trubkách o průměru od 114 mm. Tloušťka stěny trubky nebo potrubí, které vyžadují vícenásobné svařování, musí unést robustní design svářecí hlavy s příslušenstvím, vozík, na kterém je hlava umístěna a kolejnice, po kterých se vozík bude pohybovat. Mezi příslušenství patří AVC a oscilační zařízení a cívka podavače drátu o hmotnosti do 5 kg. Případně mohou být připojeny kamery, které uživateli umožňují náhled na operaci. Tyto hlavy jsou běžně vybaveny TIG technologií, tedy wolframovou elektrodou a výstupem pro ochranný plyn. [1]

Hlavy pro svařování trubek do pouzder

Uzavřená svařovací hlava pro svařování trubek do pouzder

Uzavřené svařovací hlavy jsou určeny pro TIG svařování. Svařovat by se měly trubky do pouzder a to bez přídavného drátu. Svar je prováděn v ochranném plynu v plynové komoře, která nabízí dobrou ochranu proti oxidaci. Při upínání je do trubice vložen středící trn a svařovaná trubice je mechanicky trnem roztažena. [1]

Otevřená svařovací hlava pro svařování trubek do pouzder

Otevřené svařovací hlavy tohoto typu se užívají pro svařování trubek s plnicím drátu nebo bez něj. Tuto hlavu lze aplikovat na trubky od průměru 10 mm do 60 mm. TIG elektroda se otáčí kolem trubky, která může být vyčnívající, zapuštěná nebo zarovnaná s vnější plochou. Ochranný plyn chrání pouze oblouk a malé přilehlé okolí. Pokud svařovaný materiál vyžaduje vyšší ochranu proti kyslíku a oxidaci, lze situaci zlepšit instalováním takzvané plynové komory. Svařovací hlava může být vybavena podavačem drátu. Je možné svařovací hlavu držet pomocí pneumatického upínání. To udrží v pracovní poloze hlavu během celého procesu. To umožňuje ovládání několika svařovacích hlav jednou osobou zároveň. [1]

Podavače drátu

Obecně je možné integrovat zařízení pro podávání drátu do hlavy pro orbitální sváření nebo může být instalován jako externí podavač. Výběr z plnicích zařízení závisí na faktorech, jako jsou dostupnost drátu na vhodné cívice a zda aplikace vyžaduje předehřívání přídavného drátu. [1]

6.2 Příprava svaru

Příprava u svařování trubek

Příprava trubek před svařováním se značně liší u manuálního a orbitálního TIG svařování. Svary pro technologii orbitálního svařování jsou vždy navrženy tak, aby mezi trubkami v kořenové ploše svaru byla minimální svarová mezera. Aby mohl vzniknout účinně oblouk, musí se úhel u standartních příprav V svaru zvýšit na 30 ° až 37 °. S tímto druhem svaru nemůže dojít k úplné penetraci. Proto jsou předepsané konkrétní úpravy ploch před svařováním pro rozdílné průměry, aby se případným komplikacím předešlo.

Před zahájením orbitálního svařování musí být svařované trubky nastaveny v pozici určené pro svar. Kontrolována je primárně nesouosost trubek, která je tolerována velikostí poloviny tloušťky svarového kořene. Aby nedošlo ke vzniku vad v oblasti kořene, je doporučeno, aby svar proběhl buď bez použití, nebo jen s minimálním využitím přídavného drátu. Pokud jsou svařovány slitiny niklu, titanu nebo nerezové oceli je běžně využíván formovací plyn.

K přípravě svaru patří rozhodnutí, zda bude nutné vícevrstevné svařování. Pokud ano, pak záleží, jestli bude operace prováděna na svářečce se čtyřmi nebo se šesti osami. Svařovací operace se čtyřmi řízenými osami nabízí pouze techniku úzkého svaru, které se umísťují vedle sebe. Pokud se pracuje na zařízení se šesti řízenými osami, je možné hořák nastavit vůči obrobku bočně. Při následné oscilaci takto sklopeného hořáku mohou být jednotlivé housenky překryty. Svařování s šestiosým nástrojem je produktivnější a lépe automatizovatelné. To umožňuje operátorovi, aby se soustředil na kontrolu kvality svaru. [1]

Příprava u svařování trubky do pouzdra

Ve srovnání s ručním svařováním vyžaduje orbitální svařování určitou zvláštní pozornost. Chyby soustřednosti mezi vnitřním a vnějším průměrem musejí být minimalizovány, aby bylo možné opakovat polohování elektrod. Ve standartních aplikacích,

kdy trubka vystupuje z pouzdra, je zarovnána s pouzdem nebo je zapuštěna do pouzdra se svařovací hlava vyrovná uvnitř trubky, zatímco samotná operace probíhá na vnějším průměru.

Stejně jako u V svarů je prakticky nemožné, aby došlo k spolehlivému roztavení základu trubky, zvláště pokud se jedná o svislé svařování. V tomto případě je tento spoj nahrazen svarem J.

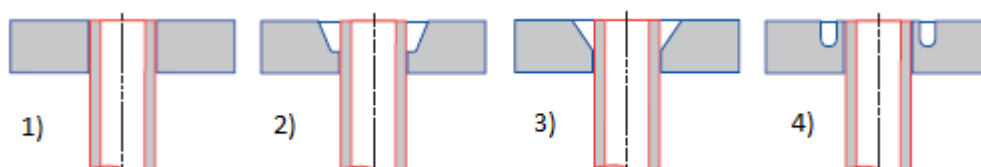
V některých případech je kvůli tepelné vodivosti nutné zmenšit mezeru mezi trubkou a pouzdem malou expanzí trubky. Tato úprava je nutná ještě před svařováním. Pokud však dojde k většímu ovlivnění, může dojít k problému opakovatelnosti svaru. Velikost úpravy je těžké určit. Většinou se však přistupuje individuálně a v závislosti na tloušťce trubky a očekávané kvalitě svaru. [1]

Svařování trubek zarovnaných s pouzdem

V závislosti na využití této technologie se orbitálně svařuje s přídavným drátem nebo bez něho. Níže jsou uvedeny základní typy přípravy svarových spojů. [1]

Svařování trubky zarovnané s pouzdem bez přídavného drátu

Při tomto svařování se nejčastěji užívá typ přípravy 1 a v některých situacích i typ 4 (viz Obr. 11). Bez přídavného drátu se svařuje hlavně v případě, pokud jsou svařovány trubky o malých průměrech, pro které jsou vytvářeny speciální svařovací hlavy. Tato technologie se využívá například pro kondenzátory, kde se svařují 1 mm silné stěny vyrobeny z titanu s pouzdem z oceli. [1]



Obrázek 11 – Přípravy svaru pro svařování trubek zarovnaných s pouzdem: 1) standardní, 2) J příprava, 3) V příprava a 4) Povrchová drážka pro svar [1]

Svařování trubky zarovnané s pouzdem s přídavným drátem

Svařovací zařízení zajištěné se čtyřmi nebo pěti řízenými osami mohou být využity pro tuto metodu. Svařovací hlava by měla být přizpůsobena určitým požadavkům. Mezi ně může patřit možnost integrovaného podavače drátu místo externího, možnost využití plynové komory na ochranný plyn při svařování titanu, možnost naklonění elektrody o úhel 0° až 15° nebo využití automatické napěťové kontroly, které je pro tuto technologii doporučeno. Obecně platí, že se pro svařování s přídavným drátem využívá typ přípravy 1,2 a 3. U typu 3 je velké riziko, že nedojde k dokonalému provaření kořene svaru, a proto je užíván méně. [1]

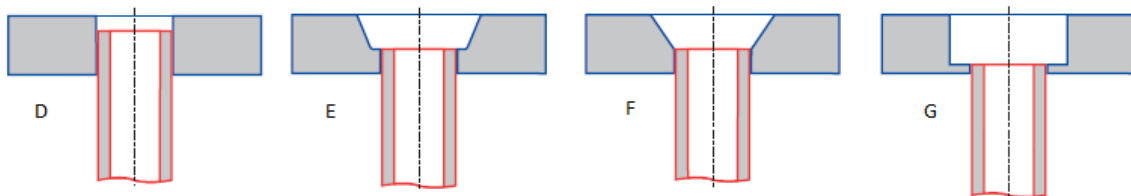
Svařování vyčnívající trubky

Takto svařované trubky se vždy svařují s přídavným drátem, ale v některých případech proces začíná navařením obrobků bez použití drátu. Níže jsou uvedeny typy spojů pro tuto technologii.

Vybavení by mělo obsahovat možnost řídit čtyři nebo pět os. Úhel hořáku se liší v závislosti na velikosti vyčnívající části trubky. Standartní úhel hořáku je mezi 15° a 30° . Úhel 15° se přednostně využívá u tenkostěnných trubek o síle trubky meze 1,6 mm až 2,1 mm. Úhel 30° se běžně užívá od tloušťky stěny 2,5 mm. Výčnělek trubky od základny musí být nejméně 5 mm, aby se zabránilo tavení trubice. [1]

Svařování zapuštěné trubky

Různé typy svarových spojů touto metodou jsou uvedeny na obrázku níže.

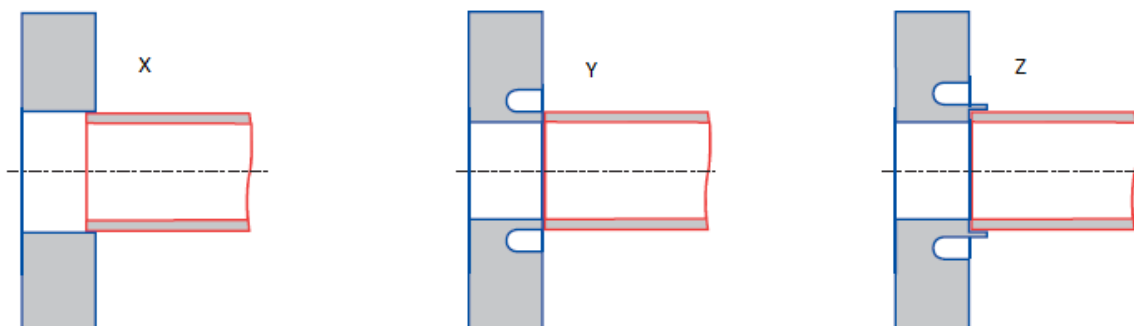


Obrázek 12 - Příprava svaru pro svařování zapuštěných trubek: D – standartní příprava bez drážky, E – J příprava, F – V příprava, G – svařování za deskou [1]

Svařovací sestava je vybavena otevřenou svařovací hlavou a elektrodou, které je řízena po čtyřech nebo pěti osách. Tato sestava může být využita pro typy svarů D, E a F. Typ přípravy G se využívá primárně v petrochemickém průmyslu. V této aplikaci je nezbytné použít AVC metodu. [1]

Vnitřní svařování za trubkou

Aby se zabránilo korozi mezery mezi trubkou a pouzdrem, je svar proveden uvnitř trubky na zadní straně pouzdra. Tento typ aplikace potřebuje vyšší přesnost přípravy obrobků před svařováním. Některé návrhy svarů jsou uvedeny na obrázku níže.



Obrázek 13 - Přípravy svaru pro vnitřní svařování za trubkou [1]

Příprava svaru typu X se nedoporučuje. Hmotnostní rozdíl mezi trubkou a pouzdrém je moc velký a tudíž se dosahuje špatné penetrace při svařování. Příprava typu Y předchází svým tvarem problému s penetrací. Poslední příprava typu Z je využívána z více důvodů. Prvním důvodem je, že založením trubky do pouzdra dojde k zarovnání na otvor a dodržení souososti obrobků. Dalším výhodou je složení límce, který se zataví a tím zvyšuje pevnost spoje. Navíc touto metodou můžeme docílit konkávního typu svaru. [1]

7 Současný stav poznání

Informace ze současného stavu poznání v technologii orbitálního svařování a TIG svařování byly získány z databázi Scopus a Web of Science.

Kolektiv autorů Vandewynckéle, A, Vaamonde, E., Fontán, M. a další se v citačním zdroji [17] věnovali náhradě TIG orbitálního svařování laserovou technologií u svarů výměníků tepla. Laserové svařování je rychlejší a levnější na výrobní náklady. Nicméně hlavní nevýhodou laserového svařování je nutná přesnost polohování svařovací hlavy vůči svaru. Na tomto problému se již pracuje v rámci evropského projektu ORBITAL. [17]

V březnu roku 2016 byla zdůrazněná optimalizace orbitálního TIG svařování s využitím pro satelity. Optimalizace se týkala u svařování nerezové oceli o průměru 6 mm a tloušťce 0,7 mm pro družicový posuvný systém. Byly provedeny podrobné experimenty a výsledkem byla metodika, jež identifikuje právě optimální parametry, jako jsou proud, otáčky svařovací hlavy a mezera mezi elektrodou a svarem a vyzdvihuje i důsledky kombinací jednotlivých parametrů. Touto problematikou zpracovali autoři Kartikeyan, M., Naikan, V.N.A. a další.[18]

Institute of Materials, Minerals and Mining vydal článek týkající se rychlosti tavení drátu při svařování obloukem s konstantním napětím. Běžný model zohledňující účinky elektrického odporu a teplotu oblouku je popisován parabolou. Zkoušky s napájecími zdroji však ukazují, že rychlost tavení se může lišit kvůli teplotě tavení kovu, při které vykazuje tavený drát rozdílné vodivé vlastnosti, než drát v pevné fázi. Toto téma zpracovali autoři Modenesi, P.J., Starling, C.M.D. a Reis, R.I.. [19]

V databázi Scopus je uveden článek zpracovaný autory Porelette, L., Roux, J.C. a dalšími, který je věnován výzkumu zbytkových napětí ve svarech. Elsevier v dubnu roku 2017 zveřejnila cíl vytvořit jednoduchý a rychlý model pro výpočet zbytkových napětí ve svaru v závislosti na rozměrech a svařovacích parametrech. Tento model je založen na numerických experimentech, které jsou vyrobeny ze simulací více systémových konečných prvků. Dosavadní výsledky poukazují na úspěšnost i pro nelineární multi-fyzikální svařovací aplikace. [20]

V citačním zdroji [21] se kolektiv autorů v čele s autorem Figueiroa, D.W. věnoval orbitálnímu svařování silnostěnných trubek o velkými průměry. Nejdůležitější vlastností orbitálního svařování TIG je konstantní změna pozice svařování, zatímco elektroda sleduje geometrický profil trubek. V této souvislosti byly zkoumány orbitální TIG sváry u trubek s velkými průměry a silnými stěnami. Vyhodnocení bylo provedeno pomocí mikrostrukturální analýzy a porovnání s mikrotvrdostí dle Vickerse. [21]

Brazilská asociace pro svařování Soldagem & Inspecao se zabývala zbytkovým napětím v trubkách svařovaných orbitálním TIG svařováním. Zkušební vzorky byly podrobeny svařováním za různých podmínek. Následně byly podrobeny měření vnitřních napětí v rentgenovém difraktometru a byly odebrány i vzorky pro metalografickou analýzu. Bylo zjištěno, že zbytkové pnutí je na povrchu svaru tlakové a klesá se zvyšující se svařovací energií a je menší u potrubí svařovaných pulzací. Metalografická analýza ukázala očekávanou mikrostrukturu pro použitý materiál. Tento výzkum zpracovali pro databázi Web of science autoři de Oliveira, G.L.G., de Miranda, H.C. a Farias J.P.. [22]

Autoři Atieh S., Dalin J.M. a spol. se věnovali využití technologie orbitálního TIG svařování u Velkého hadronového urychlovače. Při prvním dlouhém vypnutí LHC bylo potřeba ustálení spojů mezi supravodivými magnety. Přístup se vytvořil orbitálním řezáním

svařovaných nerezových pouzder. Po konsolidaci jsou rukávy znovu svařeny právě pomocí orbitálního TIG svařování. Zákrok byl důkladně připravován vzhledem k náročnosti na provoz. Kontrola kvality je založena na kvalifikaci procesu svařování, vybavení a obsluze, záznamu výrobních parametrů pomocí nových, moderních přístrojů a pravidelných auditech procesů výroby. [23]

Science and technology of welding and joining otiskl článek, který se zabýval tlakem v oblouku a vlivem tlaku ochranného plynu na povrch svarové lázně při TIG svařování. TIG svařování je nejčastěji užíváno pro zkoumání obloukového svařování, jelikož je čisté a snadno ovladatelné. Studie probíhala tak, že se měnilo nastavení tlaku ochranného plynu a průměr nádoby plynu. Dokázalo se, že tlak od ochranného plynu na okolí se zvyšoval v rostoucím tlakem vývěvy plynu a se snižujícím se průměrem ovlivňované plochy. Článek byl sepsán autory H.S. Ham a S.M. Cho. [24]

8 Úvod do experimentální části

Předmětem experimentu bakalářské bylo provedení 5 svarů na trubkách z oceli AISI 316L. Svary byly realizovány s využitím technologie orbitálního svařování, ale za odlišných svařovacích parametrů. Jednotlivé svary pak byly podrobeny metalografickému zkoumání a měření mikrotvrdosti. Výsledky pak budou porovnány a svar s nejlepšími vlastnostmi bude následně vybrán jako předloha pro příští svarové spoje. Výstupem této bakalářské práce by měly být optimalizované parametry pro svar trubek o průměru 60,3 mm s tloušťkou stěny 2 mm z materiálu AISI 316L.

Základní materiál byl dodán o délce trubky 1 m. Pro přesné sesazení svarových ploch byl základní materiál rozřezán na polotovary o délce 200 mm a 300 mm. Tyto polotovary byly následně nastehovány pomocí ručního TIG svařování tak, aby mezi svarovými plochami vznikla pouze minimální mezera. Stehování bylo provedeno na svářečce Magicwave 4000. Každý spoj byl nastehován 3 stehy pod proudem 47 A. Jako upínací část pro orbitální svařování sloužila část o délce 300 mm.

Experimentální materiál - ocel AISI 316L

Jedná se korozi-vzdornou austenitickou ocel. Hlavními legujícími prvky jsou Cr, Ni a Mo. Ocel AISI 316L je vysoce odolná proti kyselinám vyjma kyseliny dusičné. Tento materiál je paramagnetický a nelze ho zakalit. Tato ocel je dobře svařitelná bez rizika mezikrystalové koroze v oblasti tepelného ovlivnění a vhodná k tváření za studena. [25]

Tabulka 3 – Obsah prvků v oceli AISI 316L uveden v hmotnostních procentech [25]

Obsah chemických prvků v hm. %							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
max 0,03	max 1,00	max 2,00	max 0,045	max 0,03	16,0 - 18,0	10,0 – 14,0	2,00 – 3,00

Tabulka 4 - Označení oceli dle norem [25]

Označení dle norem			
Din W. Nr.	ČSN	AISI	DIN
1.4404	17 349	316L	X2CrNiMo 17-12-2

Ocel AISI 316 L se využívá na výrobu konstrukčních dílů, přístrojů a aparátů chemického průmyslu s vysokým chemickým namáháním, popřípadě dílů, které mohou přijít do styku s mořskou vodou. Zároveň se hodí i do potravinářství. Použití pro styk s vodou je omezeno hraničním obsahem Ni. [25]

8.1 Zařízení

8.1.1 Zařízení pro orbitální svařování

Zdroj napájení Polysoude P6 CW

Jedná se o zdroj napájení svařovacího oblouku a zároveň obsahuje řídicí elektroniku a chlazení hořáku. Rozsah pulzního proudu je mezi 5 až 300 A s časy od 10 do 3300 ms. [27]



Obrázek 14 - Zdroj napájení Polysoude P6 CW [28]

Otevřená hlava Polysoude MUIV 115 AVC/OSC

MUIV 115 AVC/OSC je otevřená svařovací hlava určená pro orbitální svařování svaru mezi dvěma trubkami vyrobena společností Polysoude. Svary jsou provedeny technologií TIG svařování a to s přídavným materiálem nebo bez něj. Hlavou MUIV 115 lze svařovat trubky o vnějším průměru od 25 do 115 mm. [27]



Obrázek 15 - Otevřená hlava Polysoude MUIV 115 AVC/OSC [29]

8.1.2 Metalografické zařízení

Metalografická pila Discotom 6

Jedná se o univerzální metalografickou pilu od společnosti Struers. Pila se vyznačuje funkcí konstantní rychlosti posuvu. Zároveň zajišťuje efektivní chlazení, čímž předchází zahřívání materiálu. [30]

Citopress – 10

Montážní lis pro zalisování metalografických vzorků za tepla od společnosti Struers. Jde o jednokomorový lis, který se vyznačuje krátkou dobou lisování. Umožňuje lisování vzorků do puků o průměru 30 mm nebo 50 mm. Tlak, doba ohřevu i doba chlazení jsou vzájemně nezávislé, což nabízí variabilitu procesu a přizpůsobení konkrétnímu vzorku. [30]

Metalografická bruska LaboPool 21

Metalografická bruska se využívá zároveň pro broušení i leštění vzorku. Brusné disky a lešticí plátna se upínají na kotouče do brusky magneticky. [30]

Světelný optický mikroskop Carl Zeiss Observer Z1M

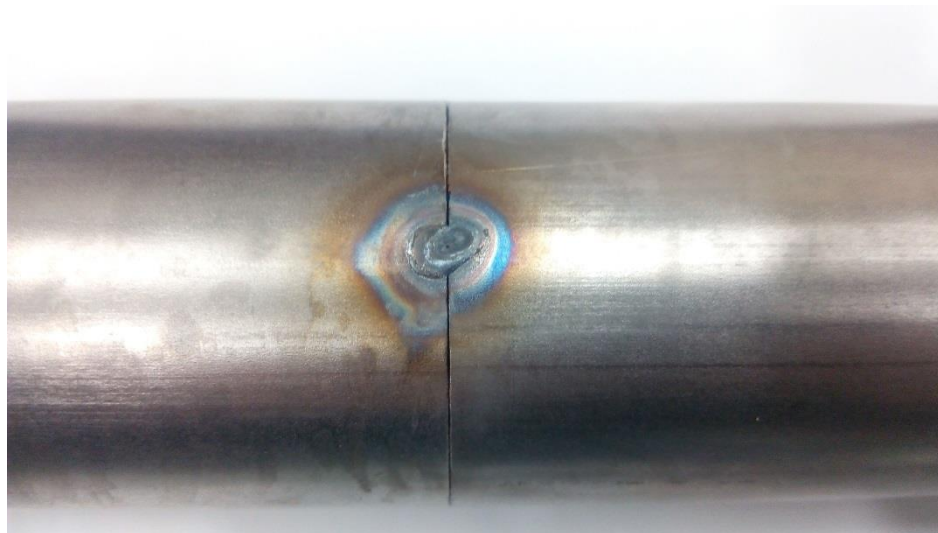
Optický mikroskop Zeiss disponuje motorizovaným stolkem, který se může pohybovat ve všech 3 základních osách x,y a z. Přesnost posuvu se uvádí 10nm. Pohyb v ose z umožňuje vytváření snímků topografie povrchu a hodnocení drsnosti povrchu. Objektivy umožňují přiblížení od 25x až do 1000x. Pro předloženou bakalářskou práci bylo využito zvětšení 25x pro makrosnímky svarů a zvětšení 100x pro mikrosnímky hranice ztavení svarů a osy svarů. [30]



Obrázek 16 - Světelný optický mikroskop Carl Zeiss Observer Z1M [31]

8.2 Pracovní postupy

Příprava trubek před orbitálním svařováním spočívala v rozřezání polotovarů na trubky o rozměrech 300 mm a 200 mm. Nařezané části byly zbaveny otřepů a začištěny. Po očištění řezných ploch bylo provedeno nastehování polotovaru o délce 300 mm s polotovarem o délce 200 mm. Stehy byly provedeny ručně technologií TIG na svářečce Magicwave 4000. Svařovací proud při stehování byl 47 A. Každé spojení trubky bylo tvořeno 3 stehy.



Obrázek 17 - Nastehovaná trubka

Postup svařování

Trubka, jež byla upravena dle výše zmíněného postupu, byla upnuta na svařovací stůl. Následně byly konce trubky zajištěny proti úniku formovacího plynu pomocí aluminiové fólie. Skrze jednu z fólií byla zavedena hadička, díky níž byl vpouštěn do uzavřené oblasti formovací plyn, v tomto případě Ar. Poté byla na svařenec upnuta svařovací hlava tak, aby wolframová elektroda byla v pozici nad nastehovaným spojem trubek. Dalším krokem bylo navedení elektrody na výchozí pozici pro svařování pomocí dálkového ovládní svařovací hlavy. Nakonec byly do programovatelného zdroje napájení nastaveny požadované parametry a byl proveden svar.

Postup metalografie

Svařené trubky byly nejprve naděleny na menší vzorky pomocí metalografické pily Struers – Discotom 6. K řezání nerezové oceli byl využit řezný kotouč 250x1,6x32 s označením W9A B250. Vzorky byly následně zalisovány za tepla do elektricky vodivé hmoty, komerčně distribuované spol. Struers pod obchodním názvem Multifast. Aby bylo možné pozorovat i tepelně ovlivněnou zónu svaru, vzorky musely být zalisovány do kotouče o průměru 50 mm. Zalisování proběhlo v lisu Struers – Citopress 10. Dále byly vzorky ručně broušeny na stroji Struers – Labopol 21. Byla využita brusná plátina MD Piano o hrubosti 80, 220, 500, 1200. Leštění bylo provedeno diamantovou suspenzí 3 μ m a 1 μ m na leštících plátnech. Posledním krokem před pozorováním vzorku bylo leptání. Struktura vzorku byla zviditelněna pomocí směsi chemických látek: HNO₃, HCl, HF a peroxidem vodíku. Následné pozorování bylo provedeno na světelném optickém mikroskopu Carl Zeiss Observer ZIM.

9 Specifikace postupu svařování (WPS)

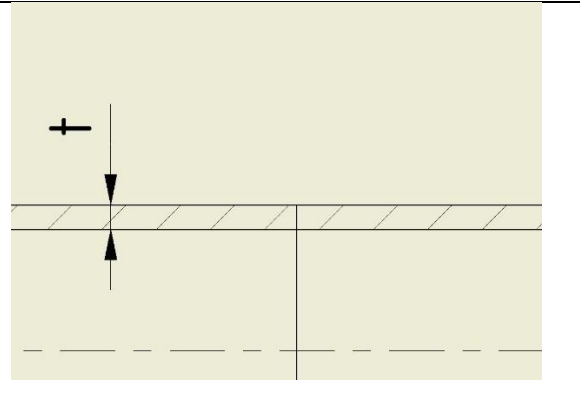
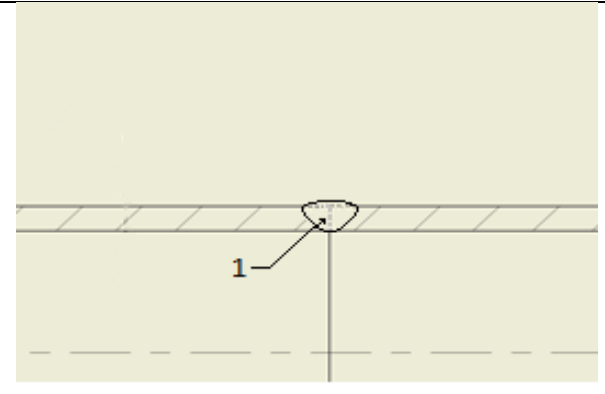
Postup svařování je stanovený průběh činností před svařováním, v průběhu a po skončení zhotovování svarového spoje. Uvádí se odkazy na metodu svařování, základní a přídavné materiály, přípravu svarových ploch, teplotu předehřevu, popřípadě interpass teplotu. Zároveň je popsána skladba housenek a vrstev svaru, tepelné zpracování svaru a nezbytné použité zařízení. [32]

Bylo provedeno celkem 5 svařů, které se lišily pouze v parametrech svařovacího proudu I_{22} a I_{23} viz tabulka 5.

Tabulka 5 - Proměnné parametry pro jednotlivé svařování

Označení svaru	OS1	OS2	OS3	OS4	OS5
Horní proud I_{22} [A]	85	80	80	100	60
Dolní proud I_{23} [A]	27	20	15	30	15

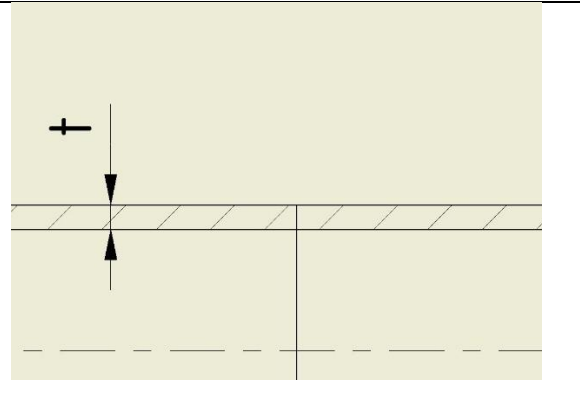
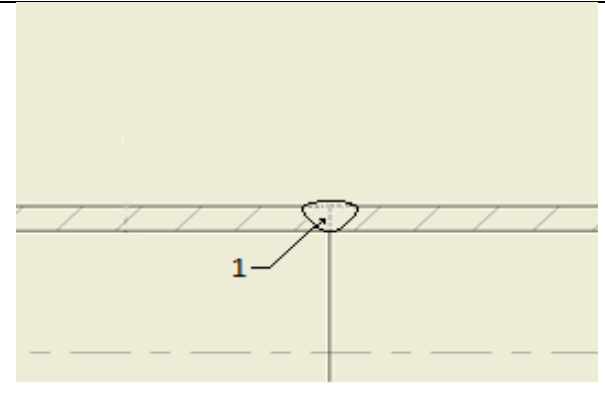
Svar OSI

Základní materiál:	Nerezová ocel	Metoda svařování:	142
Označení:	AISI 316L	Druh svaru:	I
Vnější průměr:	60,3 mm	Pozice elektrody před počátkem svařování (h):	1l (PB-PA)
Tloušťka stěny (t):	2 mm		
Tvar spoje		Postup svařování	
			

Parametry svařování	
Svarová housenka	1
Metoda svařování	142
Horní svařovací proud I_{22} [A]	85
Dolní svařovací proud I_{23} [A]	27
Proudový čas T_{22} [ms]	149
Proudový čas T_{23} [ms]	260
Rychlost otáčení hlavy [mm/min]	85

Druh ochranného plynu	Argon (99,995 %)
Průtok ochranného plynu [l/min]	12
Druh formovacího plynu	Argon
Průtok formovacího plynu [l/min]	8
Typ svařovací hlavy	MUIV 115 AVC/OSC
Materiál elektrody	WLa
Průměr elektrody/úhel ostření	Ø 2,4 mm / 30°
Vzdálenost elektrody od povrchu trubky	3 mm

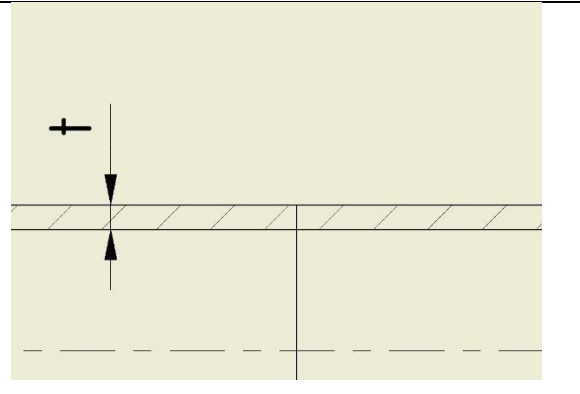
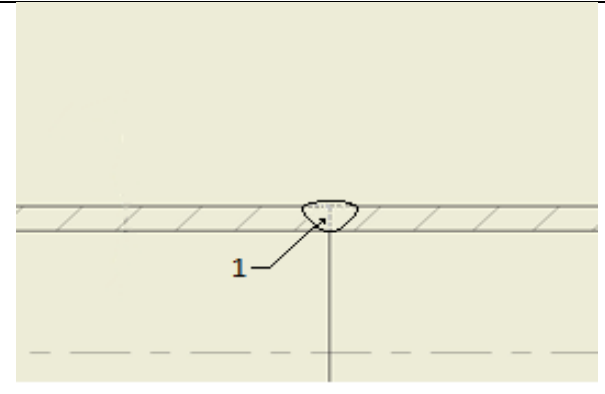
Svar OS2

Základní materiál:	Nerezová ocel	Metoda svařování:	142
Označení:	AISI 316L	Druh svaru:	I
Vnější průměr:	60,3 mm	Pozice elektrody před počátkem svařování (h):	10 (PB)
Tloušťka stěny (t):	2 mm		
Tvar spoje		Postup svařování	
			

Parametry svařování	
Svarová housenka	1
Metoda svařování	142
Horní svařovací proud I_{22} [A]	80
Dolní svařovací proud I_{23} [A]	20
Proudový čas T_{22} [ms]	149
Proudový čas T_{23} [ms]	260
Rychlost otáčení hlavy [mm/min]	85

Druh ochranného plynu	Argon (99,995 %)
Průtok ochranného plynu [l/min]	12
Druh formovacího plynu	Argon
Průtok formovacího plynu [l/min]	8
Typ svařovací hlavy	MUIV 115 AVC/OSC
Materiál elektrody	WLa
Průměr elektrody/úhel ostření	\varnothing 2,4 mm / 30°
Vzdálenost elektrody od povrchu trubky	3 mm

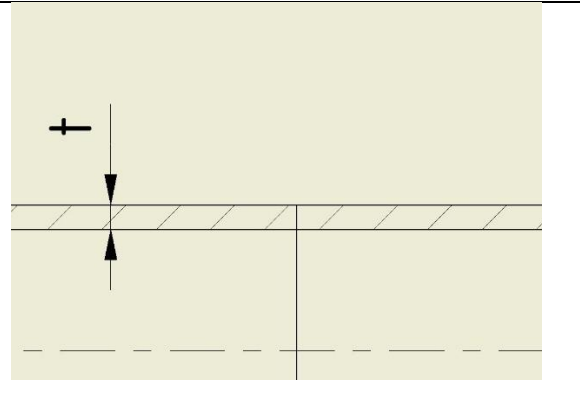
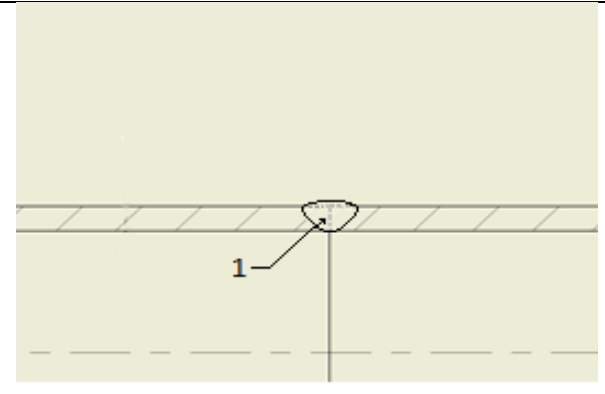
Svar OS3

Základní materiál:	Nerezová ocel	Metoda svařování:	142
Označení:	AISI 316L	Druh svaru:	I
Vnější průměr:	60,3 mm	Pozice elektrody před počátkem svařování (h):	1l (PB-PA)
Tloušťka stěny (t):	2 mm		
Tvar spoje		Postup svařování	
			

Parametry svařování	
Svarová housenka	1
Metoda svařování	142
Horní svařovací proud I_{22} [A]	80
Dolní svařovací proud I_{23} [A]	15
Proudový čas T_{22} [ms]	149
Proudový čas T_{23} [ms]	260
Rychlost otáčení hlavy [mm/min]	85

Druh ochranného plynu	Argon (99,995 %)
Průtok ochranného plynu [l/min]	12
Druh formovacího plynu	Argon
Průtok formovacího plynu [l/min]	8
Typ svařovací hlavy	MUIV 115 AVC/OSC
Materiál elektrody	WLa
Průměr elektrody/úhel ostření	Ø 2,4 mm / 30°
Vzdálenost elektrody od povrchu trubky	3 mm

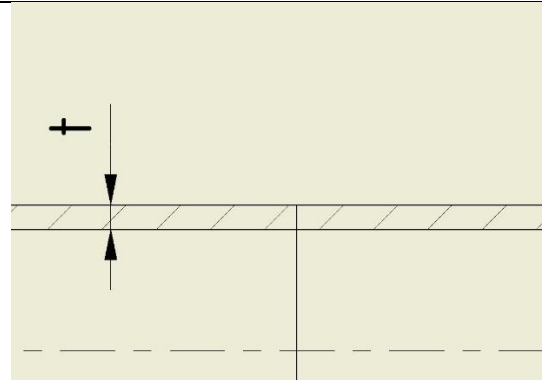
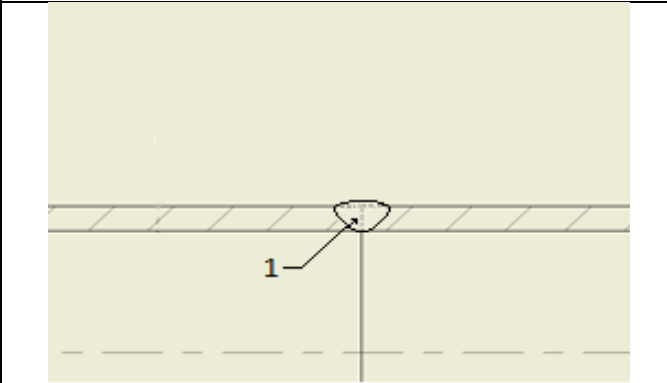
Svar OS4

Základní materiál:	Nerezová ocel	Metoda svařování:	142
Označení:	AISI 316L	Druh svaru:	I
Vnější průměr:	60,3 mm	Pozice elektrody před počátkem svařování (h):	10 (PB)
Tloušťka stěny (t):	2 mm		
Tvar spoje		Postup svařování	
			

Parametry svařování	
Svarová housenka	1
Metoda svařování	142
Horní svařovací proud I_{22} [A]	100
Dolní svařovací proud I_{23} [A]	30
Proudový čas T_{22} [ms]	149
Proudový čas T_{23} [ms]	260
Rychlost otáčení hlavy [mm/min]	85

Druh ochranného plynu	Argon (99,995 %)
Průtok ochranného plynu [l/min]	12
Druh formovacího plynu	Argon
Průtok formovacího plynu [l/min]	8
Typ svařovací hlavy	MUIV 115 AVC/OSC
Materiál elektrody	WLa
Průměr elektrody/úhel ostření	\varnothing 2,4 mm / 30°
Vzdálenost elektrody od povrchu trubky	3 mm

Svar OS5

Základní materiál:	Nerezová ocel	Metoda svařování:	142
Označení:	AISI 316L	Druh svaru:	I
Vnější průměr:	60,3 mm	Pozice elektrody před počátkem svařování (h):	10 (PB)
Tloušťka stěny (t):	2 mm		
Tvar spoje		Postup svařování	
			

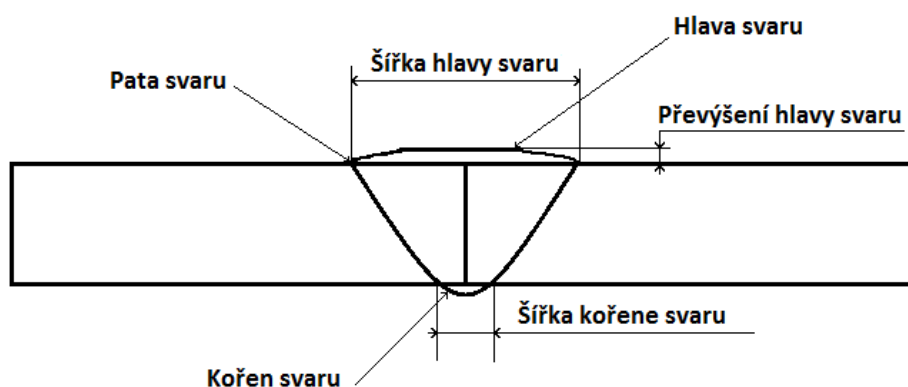
Parametry svařování	
Svarová housenka	1
Metoda svařování	142
Horní svařovací proud I_{22} [A]	60
Dolní svařovací proud I_{23} [A]	15
Proudový čas T_{22} [ms]	149
Proudový čas T_{23} [ms]	260
Rychlost otáčení hlavy [mm/min]	75

Druh ochranného plynu	Argon (99,995 %)
Průtok ochranného plynu [l/min]	12
Druh formovacího plynu	Argon
Průtok formovacího plynu [l/min]	8
Typ svařovací hlavy	MUIV 115 AVC/OSC
Materiál elektrody	WLa
Průměr elektrody/úhel ostření	Ø 2,4 mm / 30°
Vzdálenost elektrody od povrchu trubky	3 mm

10 Hodnocení svarů

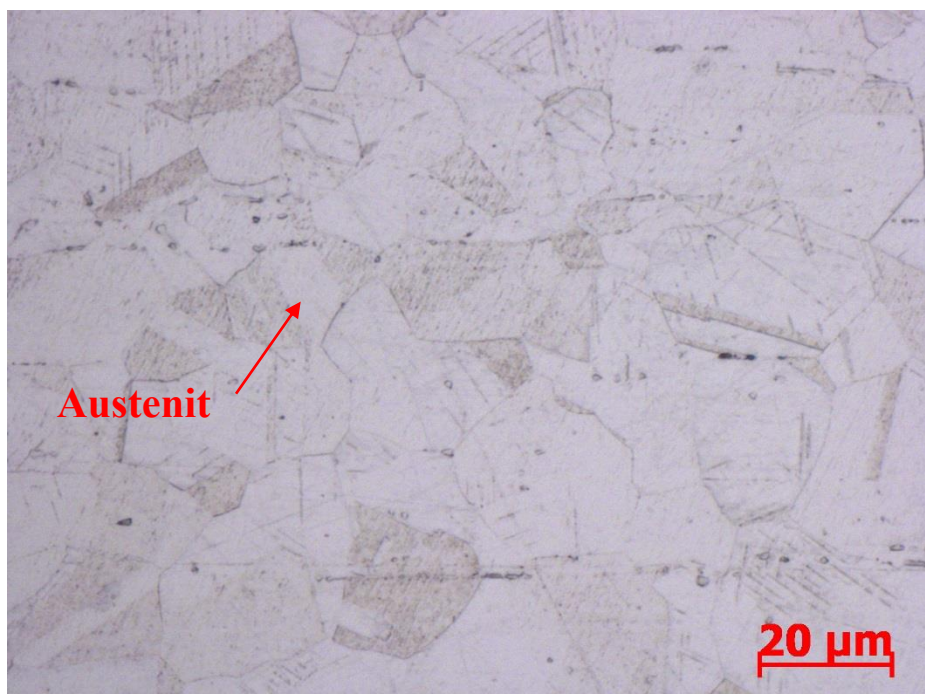
10.1 Metalografické hodnocení svarových spojů

V metalografickém hodnocení svarů jsou svary kontrolovány dle normy ČSN EN ISO 6520-1, která se zabývá vadami svarů. Zároveň jsou pozorovány i geometrické rozměry svarů dle obrázku 18. Snímky pro metalografické hodnocení byly zachyceny při zvětšení 25x pro makrostrukturu a 100x pro mikrostrukturu svaru. Rozdělení svarů na vzorky M1 a M2 bylo provedeno z důvodu lepší orientace mezi jednotlivými snímky svarů.



Obrázek 18 - Základní geometrické parametry svaru

Základní materiál

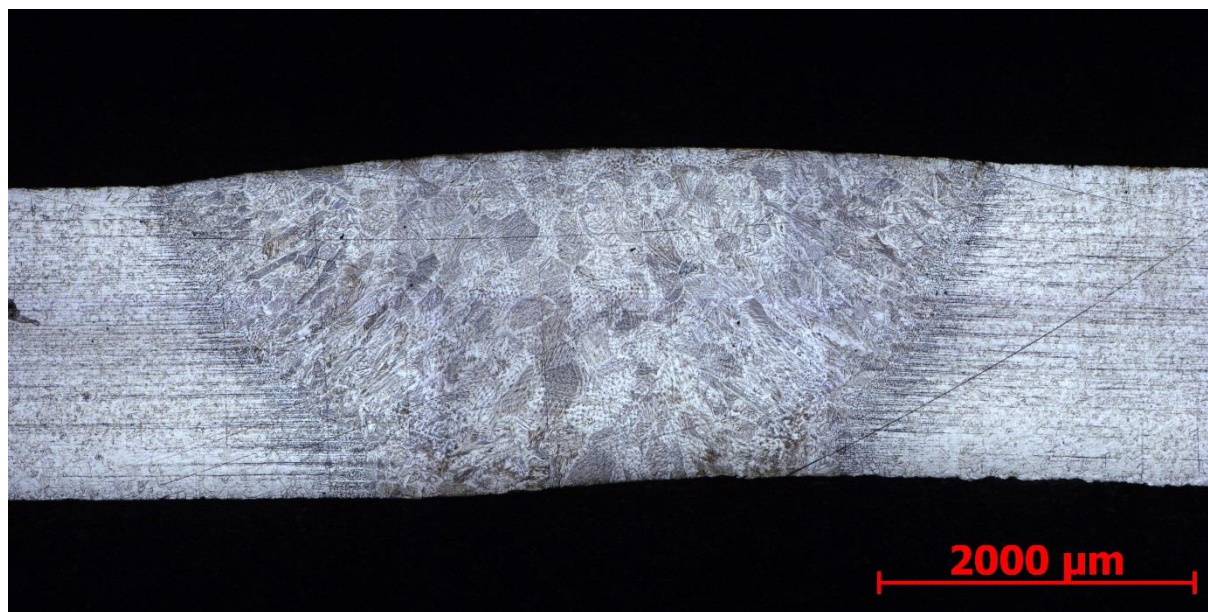


Obrázek 19 – Ocel 316L, zvětšeno 500x

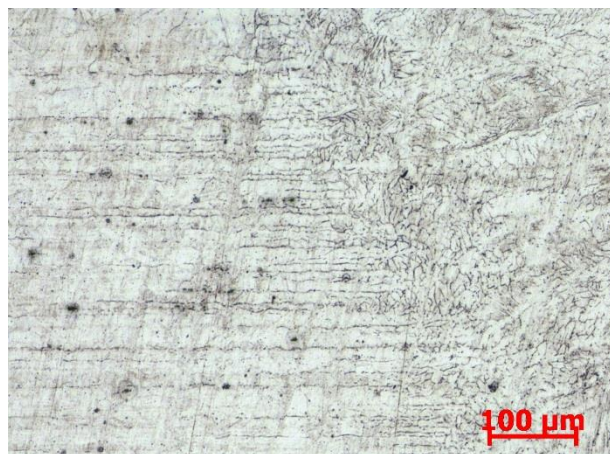
Na obrázku 19 jsou vidět austenitická zrna a struktura základního materiálu. Polotovarem jsou trubky, které byly vytvořeny tažením. Takže vzniklá struktura byla ovlivněna tvářecím procesem.

Metalografické hodnocení svarů

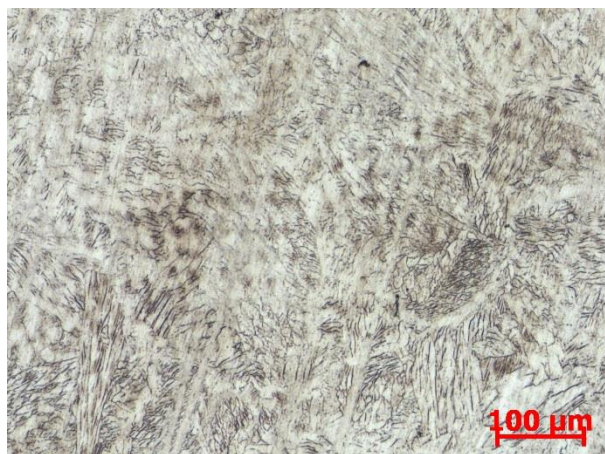
Svar OS1 M1



Obrázek 20 - Makroskopické zachycení svarového spoje OS1 M1, zvětšeno 25x



Obrázek 21 - Hranice ztavení svarového spoje OS1 M1, zvětšeno 100x



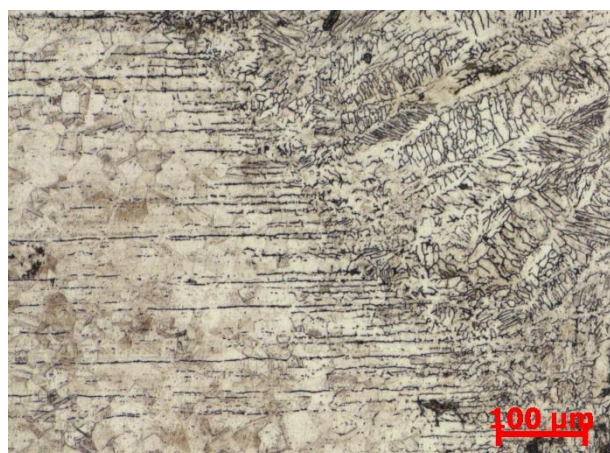
Obrázek 22 - Osa svaru svarového spoje OS1 M1, zvětšeno 100x

Z makroskopického hodnocení Svaru OS1 M1 na obrázku 20 je jasně patrný provařený kořen svarového spoje. Na tomto vzorku byla provedena zkouška mikrotvrdomosti. Šířka hlavy svaru je 5286 μm a šířka kořene svaru je 2866 μm . Převýšení svaru je zanedbatelné. Dle chemického složení a Schaefflerova diagramu se jedná o austenitickou slitinu, ve které se nachází zastoupení feritu maximálně do 10%. Na hranici ztavení je zřetelná změna struktury základního materiálu od oblasti, kde byla vytvořena svarová lázeň.

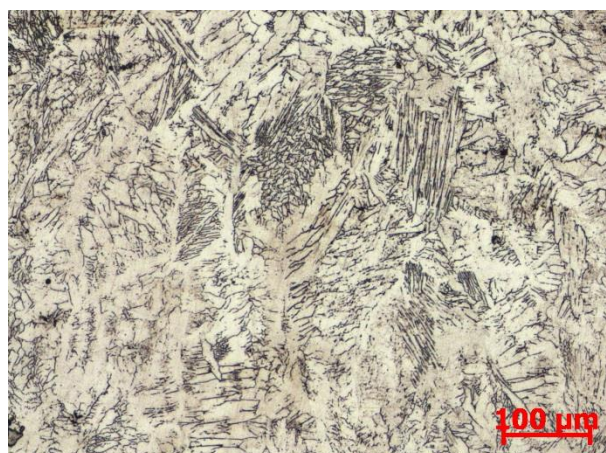
Svar OS2 M1



Obrázek 23 - Makroskopické zachycení svarového spoje OS2 M1, zvětšeno 25x



Obrázek 24 - Hranice ztavení svarového spoje OS2 M1, zvětšeno 100x



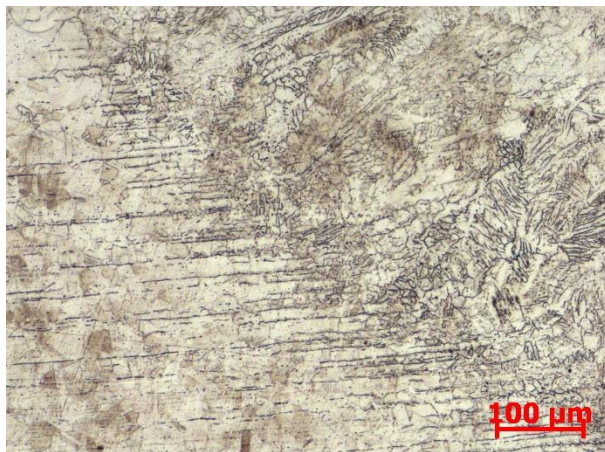
Obrázek 25 - Osa svaru svarového spoje OS2 M1, zvětšeno 100x

Dle obrázku 23 je vidět, že nebyl kořen při daných parametrech u vzorku OS2 M1 dostatečně provařen. Vzhledem k nedovařenému kořeni svaru, na tomto vzorku nebyla provedena zkouška mikrotvrlosti. Šířka hlavy svaru byla odměřena na 4421 μm . Převýšení svaru je zanedbatelné. V kořenové části svaru je vidět menší rozdíl v sesazení trubek, který byl pravděpodobně způsoben nepřesným upnutím při nabodování trubek k sobě.

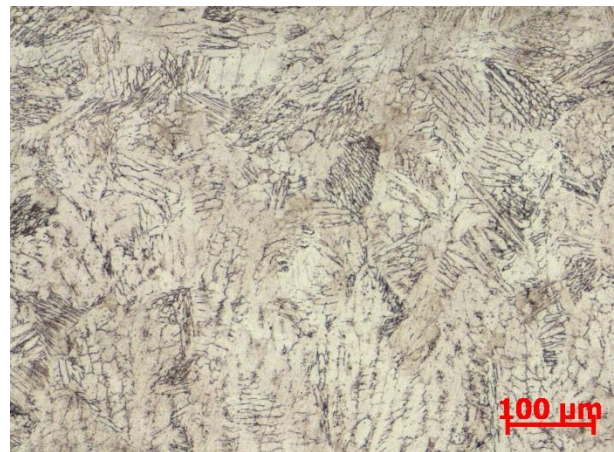
Svar OS2 M2



Obrázek 26 - Makroskopické zachycení svarového spoje OS2 M2, zvětšeno 25x



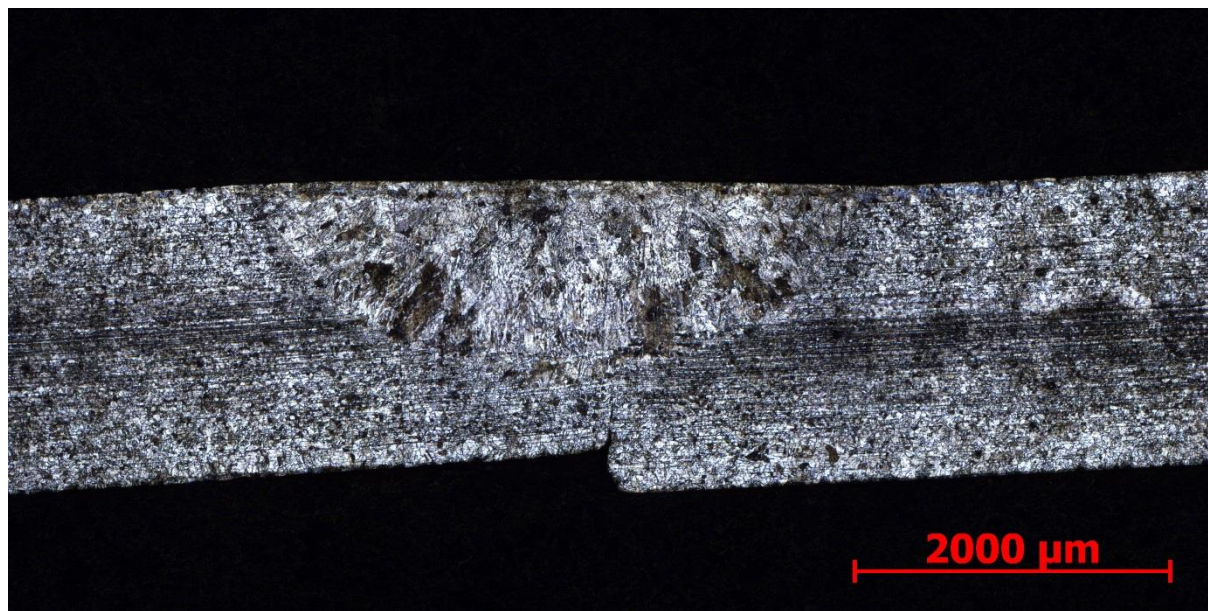
Obrázek 27 - Hranice ztavení svarového spoje OS2 M2, zvětšeno 100x



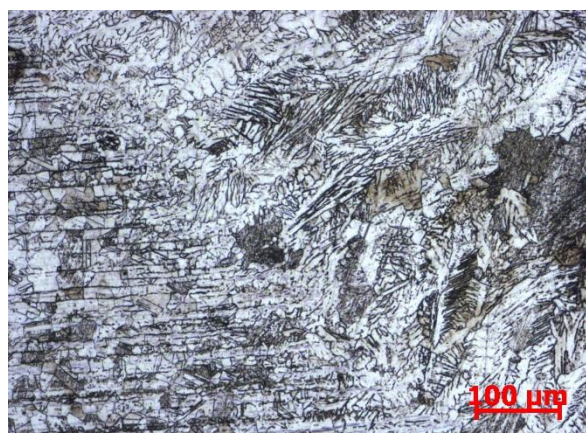
Obrázek 28 - Osa svaru svarového spoje OS2 M2, zvětšeno 100x

Vzorek OS2 M2 byl odebrán z oblasti zápalu oblouku. Nastavený proud v zápalu neměl dostatečnou penetraci na to, aby se dokázal svařit kořen svaru již při zápalu oblouku. Šířka hlavy svaru byla změřena jako 4294 μm . Na obrázku 26 je zřetelněji vidět nevhodné sesazení trubek před svařováním. Zde už rozdíl sesazení činí 0,25 mm. I pokud by došlo ke správnému provaření kořene, mohlo by nevhodné sesazení trubek vést ke koncentraci napětí při namáhání ve svarovém spoji a tím snížit mechanickou odolnost svaru.

Svar OS3 M1



Obrázek 29 - Makroskopické zachycení svarového spoje OS3 M1, zvětšeno 25x



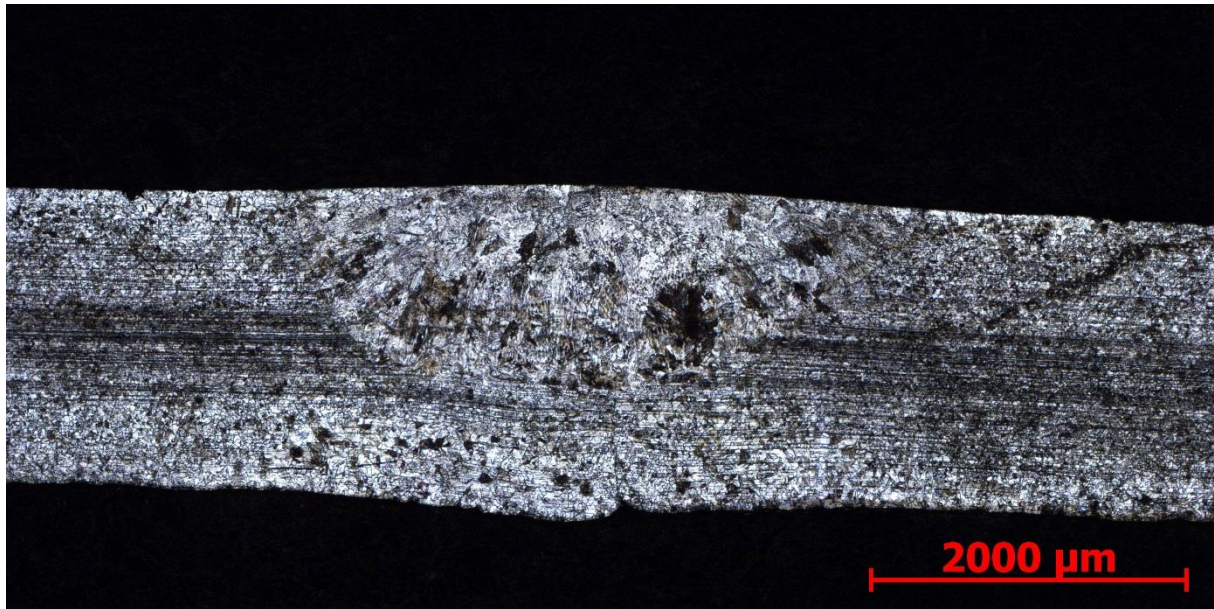
Obrázek 30 - Hranice ztavení svarového spoje OS3 M1, zvětšeno 100x



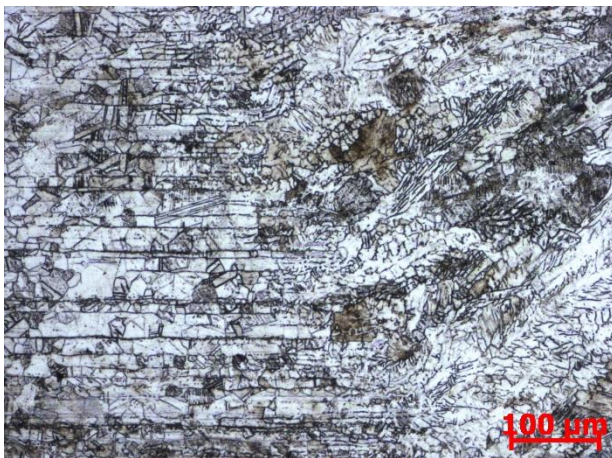
Obrázek 31 - Osa svaru svarového spoje OS3 M1, zvětšeno 100x

Vzorek OS3 M1 byl odebrán na počátku housek v místě, kde došlo k zápalu oblouku. Z obrázku 31 je vidět, že kořen svaru nebyl dostatečně provařen. U vzorku nebyla provedena zkouška mikrotvrdomosti. Dle snímku 31 je vidět nepřesné sesazení trubek před nastehováním. Tato nepřesnost mohla zapříčinit nedovařený kořen svaru. Šířka hlavy svaru měří 3893 μm .

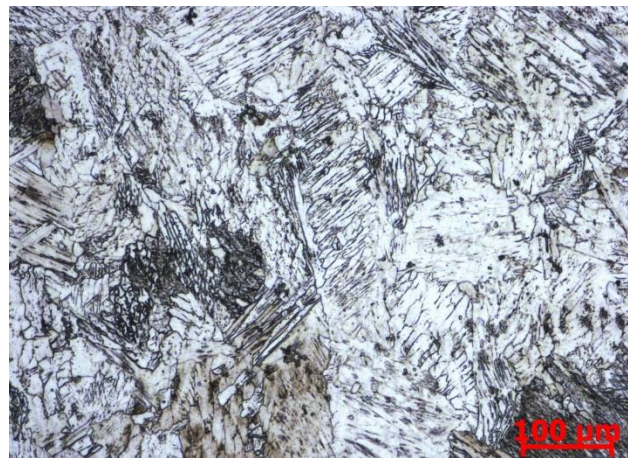
Svar OS3 M2



Obrázek 32 - Makroskopické zachycení svarového spoje OS3 M2, zvětšeno 25x



Obrázek 33 - Hranice ztavení svarového spoje OS3 M2, zvětšeno 100x



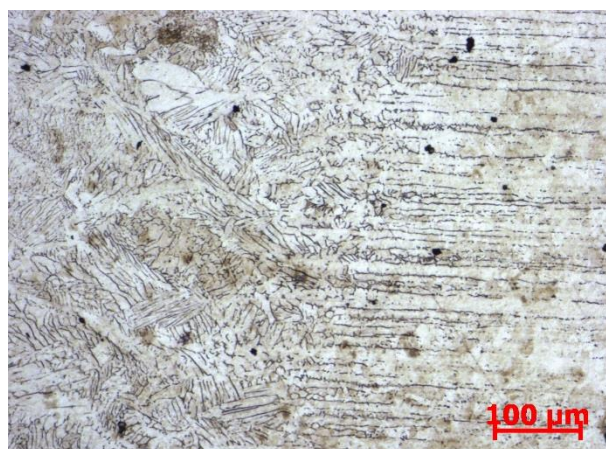
Obrázek 34 - Osa svaru svarového spoje OS3 M2, zvětšeno 100x

Šířka hlavy svaru měří 3969 μm. Převýšení svarové housenky od základního materiálu je zanedbatelné. Na hranici ztavení je zřetelné oddělení oblasti svarové lázně a základního materiálu.

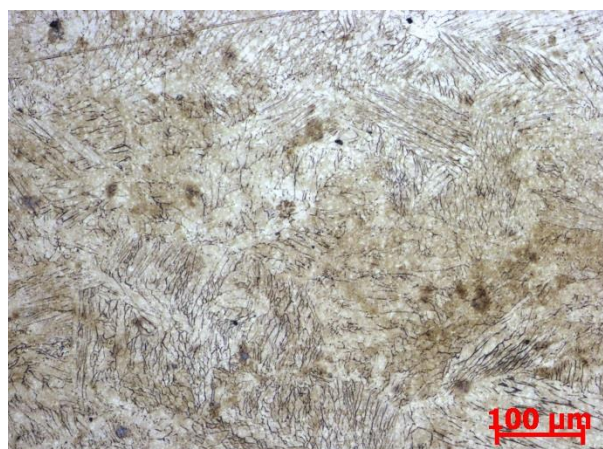
Svar OS4 M1



Obrázek 35 - Makroskopické zachycení svarového spoje OS4 M1, zvětšeno 25x



Obrázek 36 - Hranice ztavení svarového spoje OS4 M1, zvětšeno 100x



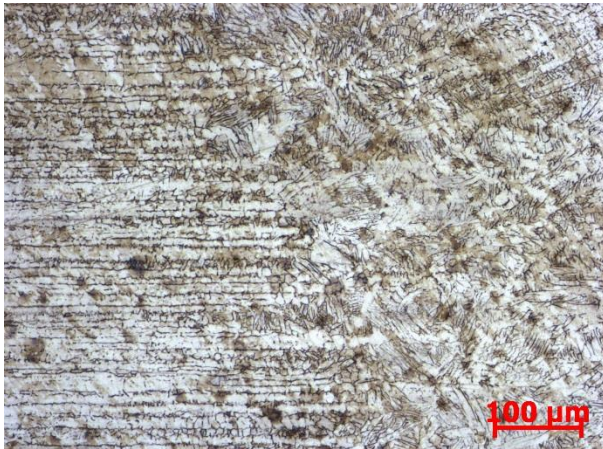
Obrázek 37 - Osa svaru svarového spoje OS4 M1, zvětšeno 100x

Vzorek OS4 M1 byl odebrán z prostředku svarové housenky v oblasti stabilního oblouku. Z obrázku 37 je vidět výrazný propad svarového spoje jak v oblasti kořene svaru, tak i ve vrchní části svaru. Propad činí dle měření 268 μm . Propad mohl být způsoben příliš vysokou teplotou svarové lázně nebo příliš malým průtokem formovacího plynu. I přes výrazný propad svaru došlo k provaření kořene svaru. Na tomto vzorku byla provedena zkouška mikrotvrdosti. Šířka hlavy svaru měří 6135 μm a v oblasti kořene svaru byla šířka změřena na 5085 μm .

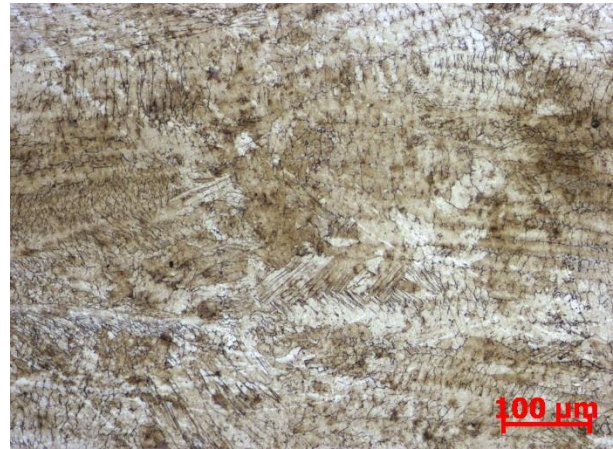
Svar OS4 M2



Obrázek 38 - Makroskopické zachycení svarového spoje OS4 M2, zvětšeno 25x



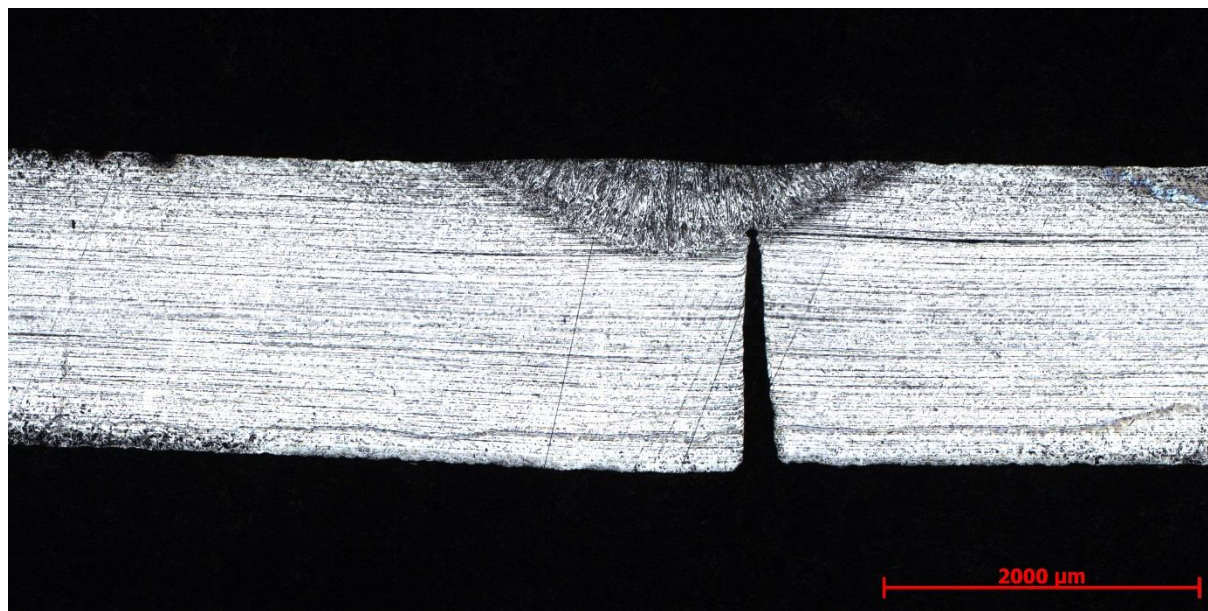
Obrázek 39 - Hranice ztavení svarového spoje OS4 M2, zvětšeno 100x



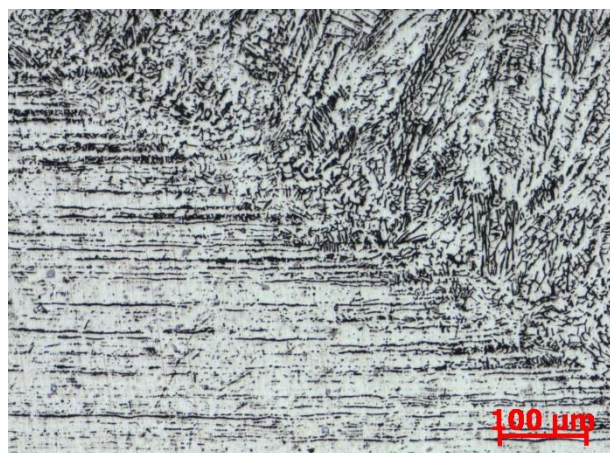
Obrázek 40 - Osa svaru svarového spoje OS4 M2, zvětšeno 100x

Vzorek OS4 M2 byl odebrán z počátku housek v oblasti zápalu oblouku. Šířka hlavy svaru byla změřena na 5153 μm a šířka svaru u kořene byla změřena na 4047 μm . Na hranici ztavení není vidět výrazná hranice oddělení oblasti svarové lázně od základního materiálu.

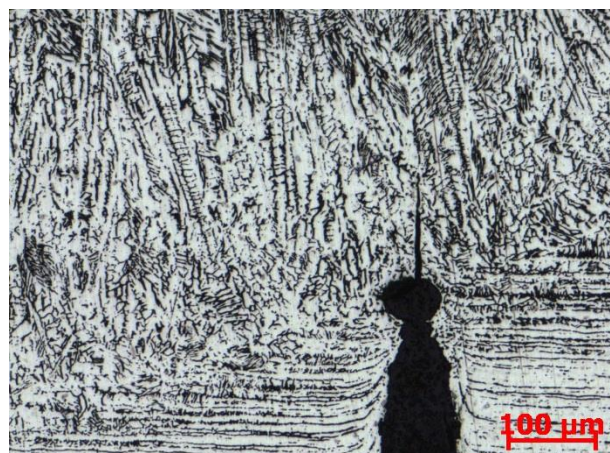
Svar OS5 M1



Obrázek 41 - Makroskopické zachycení svarového spoje OS5 M1, zvětšeno 25



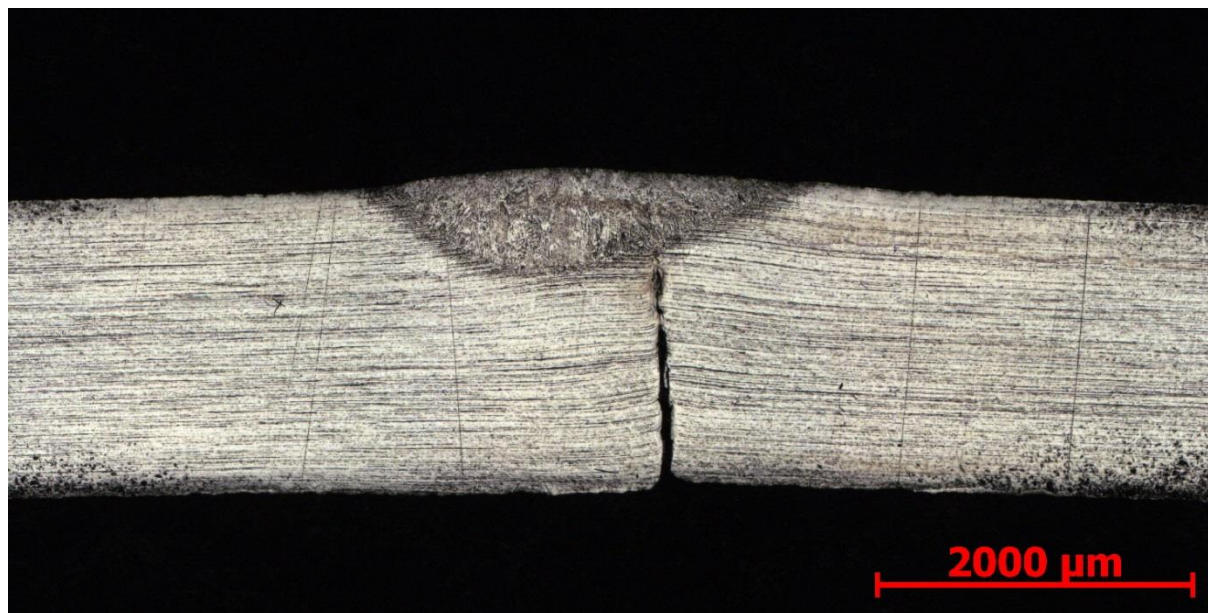
Obrázek 42 - Hranice ztavení svarového spoje OS5 M1, zvětšeno 100x



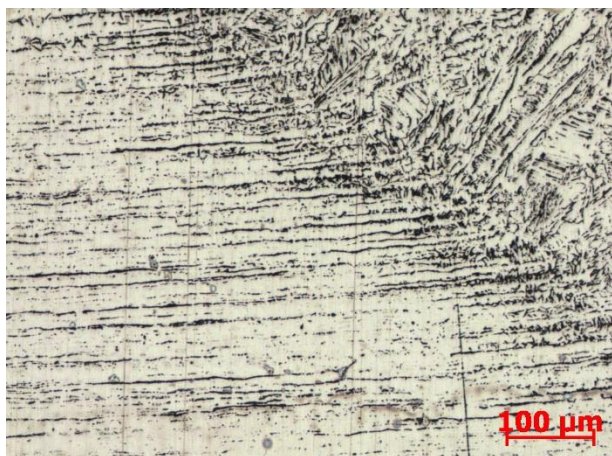
Obrázek 43 - Osa svaru svarového spoje OS5 M1, zvětšeno 100x

Vzorek OS5 M1 byl odebrán z počátku svarové housenky v oblasti zápalu oblouku. Na snímku 41 je vidět, že elektroda byla vycentrována mimo střed svarové mezery. Kořen svaru nebyl svařen. Proto na tomto vzorku nebyla provedena zkouška mikrotvrdomosti. Na snímku osy svaru je vidět trhlinka vycházející ze svarové mezery. Ta pravděpodobně vznikla nevhodnou manipulací při přípravě vzorku. Šířka hlavy svaru u tohoto vzorku měří 2890 μm . Na obrázku 43 je vidět dendritická struktura.

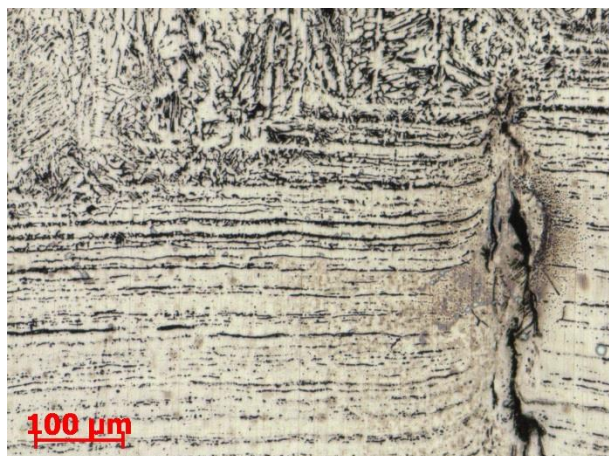
Svar OS5 M2



Obrázek 44 - Makroskopické zachycení svarového spoje OS5 M2, zvětšeno 25x



Obrázek 45 - Hranice ztavení svarového spoje OS5 M2, zvětšeno 100x

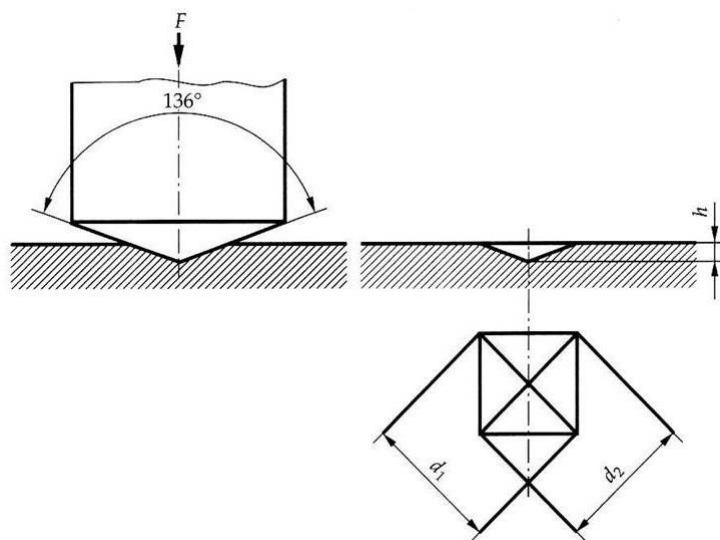


Obrázek 46 - Osa svaru svarového spoje OS5 M2, zvětšeno 100x

Vzorek OS5 M2 byl odebrán ze středu svarové housenky, kde byl svařovací oblouk stabilní. Šířka hlavy svaru měří 2791 μm . Na obrázku 46 je vidět nerovnoměrnost ohřevu základního materiálu, která je způsobena nepřesným upnutím elektrody, mimo svarovou mezeru. Svarová mezeru umožňovala při procesu rychlejší odvod tepla, a proto se v její oblasti utvářela svarová lázeň pomaleji a méně. Rychlejší odvod tepla v této oblasti souvisí i s různorodou strukturou, která vznikla v oblasti svarové lázně.

10.2 Zkouška mikrotvrdomosti

Zkouška mikrotvrdomosti proběhla dle metody Vickerse. U této metody je indentorem diamantový čtyřboký jehlan o vrcholovém úhlu 136° . Mikrotvrdomost se určuje ze vzdálenosti úhlopříček vtisku. Jedná se o nejpřesnější metodu měření tvrdosti. [33]



Obrázek 47 - Zkouška dle Vickerse [34]

Zkouška mikrotvrdomosti byla provedena pouze u vzorků základního materiálu, OS1 a OS4 a to zatížením HV 0,1, což odpovídá síle o tíze 0,1 kg na stroji Struers Durascan G5. Pro měření základního materiálu bylo provedeno 5 vtisků. Ze svařovaných vzorků byly vybrány pouze ty, u kterých došlo k provaření kořene svaru. U vzorků OS2, OS3 a OS5 nedošlo k provaření kořene svaru a tudíž by zkouška mikrotvrdomosti postrádala smysl. U zkoušených vzorků OS1 a OS4 bylo následně provedeno pro každý vzorek 30 vtisků ve vzdálenosti 0,3 mm od sebe. Vzdálenost 0,3 mm byla zvolena tak, aby minimální vzdálenost mezi vtisky byla rovna 2,5x úhlopříčka vtisku. Měření proběhlo dle normy ČSN EN ISO 6507-1.



Obrázek 48 - Struers Durascan G5 [35]

Výsledky ze zkoušky mikrotvrdomosti jsou znázorněny v následujících grafech:

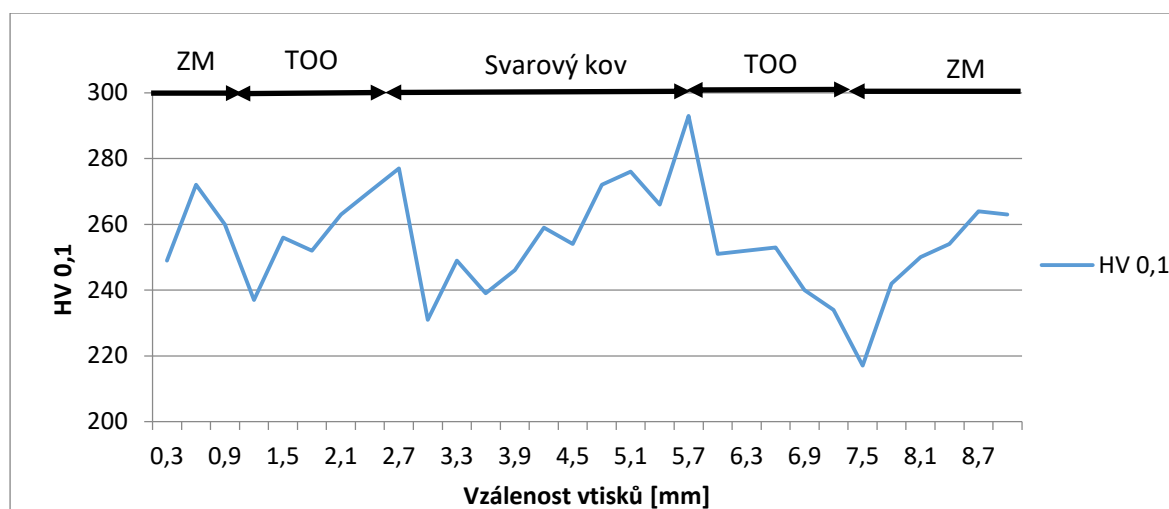
Mikrotvrdomost základního materiálu

Tabulka 6 - Mikrotvrdomost základního materiálu

Naměřené hodnoty					
Vtisk	1	2	3	4	5
Tvrdomost [HV 0,1]	231	219	232	242	229

Průměrná hodnota mikrotvrdomosti základního materiálu je dle naměřených hodnot 231 ± 8 HV 0,1. Dle informačního zdroje [36] má tato ocel mít v netvářeném stavu tvrdost mezi 150 - 200 HV. Rozdíl v tvrdosti mezi naměřenou hodnotou a hodnotou zdroje [36] je zapříčiněn tím, že polotovary použité v experimentální části byly tvářeny při tažení. Tím se jejich tvrdost zvýšila.

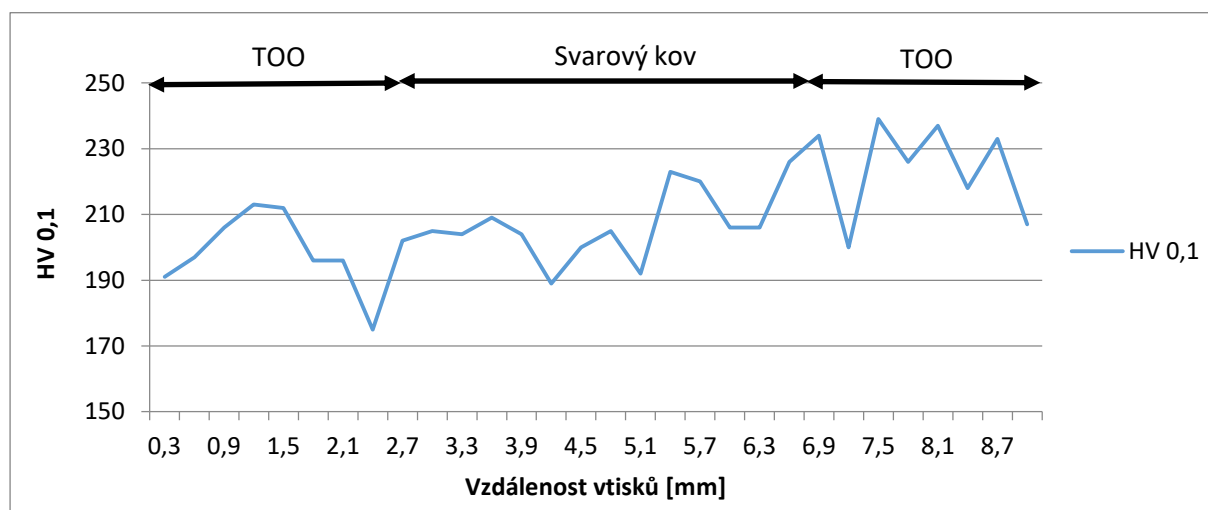
Mikrotvrdomost svaru OS1



Obrázek 49 - Poloha a označení vtisků mikrotvrdomosti svaru OS1

Z obrázku 49 a grafu mikrotvrdości svaru OS1 je možné vyčíst mikrotvrdość pro jednotlivé vtisky. Nejvyšší tvrdość byla změřena v oblasti 9. vtisku s 277 HV 0,1 a 19. vtisku s 293 HV 0,1. Tyto vtisky se nacházejí v oblasti ztavení, kde vniká nejjemnější struktura. Tato mikrotvrdość je vyšší, než naměřená mikrotvrdość základního materiálu. Rozdíl by mohl být způsoben strukturní změnou svarového kovu během procesu svařování nebo velikostí vzniklého zrna.

Mikrotvrdość svaru OS4



Hodnoty mikrotvrdości svaru OS4 byly ovlivněny zvýšenou teplotou polotovaru. Zvýšená teplota byla způsobena zkušebním svařováním polotovaru. Přidané teplo mohlo ovlivnit vzniklou svarovou strukturu a tím i mikrotvrdość svarového kovu.

11 Vyhodnocení experimentální programu

Cílem experimentálního programu bylo nalezení optimálních svařovacích parametrů pro orbitální svařování pro trubku o průměru $\varnothing 60,3$ mm a tloušťkou stěny 2 mm z oceli AISI 316L. Optimalizovanými parametry v předložené bakalářské práci byly svařovací proudy I_{22} a I_{23} .

V rámci experimentálního programu bakalářské práce bylo provedeno 5 svarů. Svary byly provedeny dle záznamu WPS. Pro každý svar byly vybrány a připraveny dle metalografických postupů jeden až dva vzorky z rozdílných oblastí svarové housenky. Ty byly následně podrobeny metalografickému hodnocení jak makrostruktury, tak mikrostruktury. Makrostruktura byla pozorována při zvětšení 25x. Mikrostruktura byla pozorována při zvětšení 100x.

Při hodnocení makrostruktury byly dle normy ČSN EN ISO 6520-1 nalezeny vady. U vzorků OS2, OS3 a OS5 byla nalezena vada neprovařeného kořene svaru označována dle normy jako ISO 6052-1-4021. U vzorku OS5 M1 byla nalezena u kořene svaru podélná trhlinka označovaná jako vada ISO 6520-1-1011. Na svaru OS4 byla identifikována vada ISO 6052-1-5091, což je proláklina ve vodorovné poloze.

Dále byla provedena zkouška mikrotvrdosti dle Vickerse. Nejdříve bylo provedeno 5 vtisků do základního materiálu. Aritmetický průměr získaných hodnot včetně směrodatné odchylky byl 231 ± 8 HV 0,1. Následně byla měřena mikrotvrdost u vzorků s provařeným kořenem svaru, tzn. u svarů OS1 a OS4. Pro každý ze svarů bylo provedeno 30 vtisků. Ty byly měřeny rovnoměrně napříč svarem se vzdáleností mezi vtisky 0,3 mm.

Na svaru OS1 nebyly nalezeny žádné vady, a tudíž dopadl v metalografickém hodnocení nejlépe. Zároveň i mikrotvrdost svarového kovu byla vyšší, než mikrotvrdost základního materiálu. V rámci porovnání výsledků byly tedy zvoleny parametry $I_{22} = 85$ A a $I_{23} = 27$ svaru OS1 jako nevhodnější pro výrobu svarových spojů pro zadaný materiál.

12 Závěr

Práce byla věnována technologii orbitálního svařování a s ní související technologii TIG svařování. Na počátečních stranách jsou uvedeny obecná fakta o orbitálním svařování, výhody a nevýhody této technologie a následně historie orbitálního a TIG svařování. Dále jsou zmíněny informace o společnostech zabývajících se výrobou zařízení pro orbitální svařování. Dále je popsáno využití technologie a poté už potřebné zařízení a specifikace pro danou technologii, jako jsou příprava wolframové elektrody, popis ochranného a formovacího plynu, popis svařovací hlavy, popis funkce zdroje napětí a v neposlední řadě příprava svarových ploch pro jednotlivé metody.

V experimentálním programu byly shrnuty výsledky z praktické části bakalářské práce. Bylo popsáno zařízení, na kterém bylo provedeno svařování vzorků a metalografie. Zmíněny byly i jednotlivé postupy přípravy vzorků. Pro každý svar byl sepsán WPS, který popisoval použité parametry při svařování. Dále byly uvedeny makroskopické a mikroskopické snímky vzorků svarů. Následně bylo provedeno měření mikrotvrdomosti u základního materiálu, svaru OS1 a OS4. Nakonec byly jednotlivé výsledky sepsány do vyhodnocení experimentálního programu.

Výsledkem bakalářské práce jsou proudové parametry svaru OS1, který dle metalografického hodnocení a hodnocení mikrotvrdomosti dopadl v porovnání s ostatními svary nejlépe. Nejvhodnějšími zkoušenými parametry jsou tedy $I_{22} = 85 \text{ A}$ a $I_{23} = 27 \text{ A}$. Za použití těchto parametrů nebyly pozorovány žádné vady svarové housenky ani TOO a mikrotvrdomost vzniklé svarové oblasti byla vyšší, než mikrotvrdomost základního materiálu.

13 Seznam použité literatury

- [1] *The orbital welding handbook* [online]. 1. Nantes: Polysoude, 2009 [cit. 2017-11-06]. ISBN PN-0509078. Dostupné z: https://static1.squarespace.com/static/54becf2ae4b09fae314e6e56/t/57a89018c534a5bcf978da/1470664738648/Orbital_Welding_Handbook_EN_LR.PDF
- [2] The History of Orbital Welding. *Orbital Fabrications* [online]. United Kingdom: Orbital Fabrications, 2017 [cit. 2017-12-07]. Dostupné z: <http://www.orbitalfabrications.co.uk/history-orbital-welding/>
- [3] Svařování netavící se elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-11-05]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Svařování_netavící_se_elektrodou_v_ochranné_atmosféře_inertního_plynu
- [4] Company presentation. *Polysoude* [online]. Nantes: Polysoude, 2000 [cit. 2017-08]. Dostupné z: <http://www.polysoude.com/about-polysoude/about-us/>
- [5] Kemppi. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-11-25]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Kemppi>
- [6] Lincoln Electric. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-11-25]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Lincoln_Electric
- [7] *Aerospace* [online]. Connecticut: Magnatech, 2017 [cit. 2017-11-08]. Dostupné z: <http://www.magnatechllc.com/markets-aerospace.php>
- [8] Kontejner. In: *Arc Machines* [online]. Pacoima, CA: Arc Machines, 2017 [cit. 2017-11-09]. Dostupné z: <http://www.arcmachines.com/sites/default/files/images/canister03.jpg>
- [9] Steril welding. In: *Diverse welding* [online]. Perth: Diverse welding, 2014 [cit. 2017-11-08]. Dostupné z: http://www.diversewelding.com.au/assets/public/files/styles/project_page_full/public/034_DWS_Chemeq_20100831_Web_0.jpg?itok=v8CgItCz

- [10] Dairy valve assemblies. In: *Magnatech* [online]. Connecticut: Magnatech, 2017 [cit. 2017-11-08]. Dostupné z: http://www.magnatechllc.com/images/dairy_valve_assemblies.png
- [11] Welding shot. In: *Swagelok* [online]. Minnesota: Swagelok, 2017 [cit. 2017-11-08]. Dostupné z: <https://minnesota.swagelok.com/~media/Distributor%20Media/L-N/Minnesota/Services/Welding/Welding%20Shot.ashx?h=417&la=en&w=753>
- [12] Vliv broušení. In: *Svarbazar* [online]. Česká republika: Svarbazar, 2006 [cit. 2017-10-29]. Dostupné z: https://www.svarbazar.cz/phprs/image/200611121807_vlivbrouseni.gif
- [13] Vliv špičky. In: *Svarbazar* [online]. Česká republika: Svarbazar, 2006 [cit. 2017-10-29]. Dostupné z: https://www.svarbazar.cz/phprs/image/200611121809_vlivspicky.gif
- [14] Délka špičky elektrody. In: *Svarbazar* [online]. Česká republika: Svarbazar, 2006 [cit. 2017-10-29]. Dostupné z: https://www.svarbazar.cz/phprs/image/200611121808_spicka.gif
- [15] Označení svařovacích poloh. In: *Hanoušek* [online]. Pardubice: Hanoušek, 2014 [cit. 2017-11-08]. Dostupné z: <http://www.hanousek.cz/editor/filestore/File/Oznaceni%20svarovacich%20poloh.pdf>
- [16] LIENERT, T. *ASM handbook - Wending Fundamentals and Processes*. Materials Park: ASM International, 2011. ISBN 978-1-61503-133-7.
- [17] VANDEWYNCKÉLE, A., E. VAAMONDE, M. FONTÁN, P. HERWIG a A. MASCIOLETTI. Laser Welding Head Tailored to Tube-Sheet Joint Requirements for Heat Exchangers Manufacturing. *Physics Procedia* [online]. 2013, **41**, 144-152 [cit. 2017-11-08]. DOI: 10.1016/j.phpro.2013.03.063. ISSN 18753892. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1875389213000771>
- [18] KARTHIKEYAN, A., E. NAIKAN, M. NARAYAN a P. SUDHAKAR. Orbital TIG welding process parameter optimization using design of experiment for satellite application. *International Journal of Performability Engineering* [online]. 2016, **12**, 155-172 [cit. 2017-11-08]. DOI: 10.1016/j.phpro.2013.03.063. ISSN 09731318. Dostupné z: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84992152259&origin=resultlist>
- [19] MODENESI, P. J., C. M. D. STARLING a R. I. REIS. Wire melting phenomena in gas metal arc welding. *Science and Technology of Welding and Joining* [online]. 2013, **10**(5), 610-616 [cit. 2017-12-08]. DOI:

- 10.1179/174329305X57446. ISSN 1362-1718. Dostupné z:
<http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/174329305X57446>
- [20] PORTELETTE, Luc, Jean-Christophe ROUX, Vincent ROBIN a Eric FEULVARCH. *A Gaussian surrogate model for residual stresses induced by orbital multi-pass TIG welding* [online]. 2017, **183**, 27-37 [cit. 2017-12-08]. DOI: 10.1016/j.compstruc.2017.01.009. ISSN 00457949. Dostupné z:
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045794916302073>
- [21] FIGUEIRÔA, Daniel Wallerstein, Ivan Olszanski PIGOZZO, Régis Henrique Gonçalves e SILVA, Tiago Felipe de Abreu SANTOS a Severino Leopoldino URTIGA FILHO. *Influência da Posição e dos Parâmetros de Soldagem na Soldagem TIG Orbital Aplicada a Tubulações de Aço Baixo Carbono* [online]. 2015, **20**(4), 446-455 [cit. 2017-11-08]. DOI: 10.1590/0104-9224/SI2004.11. ISSN 0104-9224. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045794916302073>
- [22] DE OLIVEIRA, DE MIRANDA a FARIAS. Residual Stress Evaluation in Small Diameter Pipes Welded Using Orbital TIG Process. *SOLDAGEM & INSPECAO* [online]. 2009, **14**(2), 114-121 [cit. 2017-11-13]. Dostupné z: https://apps.webofknowledge.com/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=3&SID=D113LPOLL4VXKIWGLjV&page=1&doc=1
- [23] ATIEH, BERTINELLI, DALIN, PERIN, SAVARY a TOCK. Welding and quality control for the consolidation of the LHC superconducting magnets and circuits. *IPAC 2014: Proceedings of the 5th International Particle Accelerator Conference* [online]. 2014, **5**, 2709-2711 [cit. 2017-11-08]. Dostupné z: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84928343670&origin=resultlist>
- [24] HAM, H-S, D-S OH a S-M CHO. Measurement of arc pressure and shield gas pressure effect on surface of molten pool in TIG welding. *Science and Technology of Welding and Joining* [online]. 2013, **17**(7), 594-600 [cit. 2017-12-08]. DOI: 10.1179/1362171812Y.0000000052. ISSN 1362-1718. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/1362171812Y.0000000052>
- [25] Nerezová ocel 1.4404. *Inox* [online]. Praha: Inox, 2017 [cit. 2017-11-08]. Dostupné z: <http://www.inoxspol.cz/nerezova-ocel-14404.html>

- [26] Wolframové elektrody pro TIG svařování. *Svarbazar* [online]. Česká Republika: Svarbazar, 2006 [cit. 2017-11-08]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2006111201>
- [27] *Polysoude* [online]. Nantes [cit. 2018-03-08]. Dostupné z: <http://www.polysoude.com/us/orbital-and-automated-welding/orbital-tube-and-pipe-welding/>
- [28] Zdroj P6 CW. In: *Tubefirst* [online]. UK, 2018 [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <http://www.tubefirst.com/newsdetail.php?ID=2877>
- [29] Svařovací hlava MUIV 115. In: *Kemppi* [online]. Rusko, 2018 [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <https://kemppi-nn.ru/catalog/Polysoude/MU-IV>
- [30] *KMM ZCU* [online]. Plzeň, 2017 [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <http://www.kmm.zcu.cz/Okatedre/vybavenikatedry.html>
- [31] Optický mikroskop. In: *Zeiss* [online]. USA, 2018 [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <https://www.zeiss.com/microscopy/us/products/light-microscopes/axio-observer-for-materials.html>
- [32] Stanovení a kvalifikování postupů svařování. *Česká svářečská společnost ANB* [online]. Praha: CWS-ANB, 2018, 2018 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=36>
- [33] SKÁLOVÁ, Jana, Rudolf KOVAŘÍK a Vladimír BENEDIKT. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 4. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. ISBN 978-80-7043-417-8
- [34] Zkouška tvrdosti dle Vickerse. In: *Hardness test* [online]. 2006 [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <http://me.aut.ac.ir/staff/solidmechanics/alizadeh/Hardness%20Test.htm>
- [35] DuraScan. In: *Struers* [online]. USA, 2018 [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <https://www.struers.com/en/Products/Hardness-testing/Hardness-testing-equipment/DuraScan-G5>
- [36] Ocel 316L. *PXGroup* [online]. PXGroup, 2018 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://www.pxgroup.com/sites/default/files/316L1.4404.pdf>