

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Optimalizace vysokorychlostního záznamu pro použití u svařovacích procesů

Autor:

Bc. Jan Černý

Vedoucí práce:

Ing. Petr Beneš, Ph.D.

Akademický rok 2017/2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan ČERNÝ**

Osobní číslo: **S16N0065P**

Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie**

Název tématu: **Optimalizace vysokorychlostního záznamu pro použití u svařovacích procesů**

Zadávací katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

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

1. Vysokorychlostní záznam - fyzikální podstata snímání obrazu vysokými rychlostmi, omezení a specifikace vysokorychlostního záznamu.
2. Problematika osvětlení vysokorychlostních jevů.
3. Přehled současného stavu moderních svařovacích technologií.
4. Fyzikální a optické jevy odehrávající se při procesu svařování.
5. Návrh experimentálního programu.
6. Experimentální program.
7. Technickoekonomické zhodnocení použití vysokorychlostního záznamu u svařovacího procesu, možnosti využití naměřených výsledků a parametrů v praxi.
8. Diskuze výsledků.
9. Závěr.

Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**

Rozsah kvalifikační práce: **50-60 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

IDT - Motion Studio, User manual, 2015.

Kinko Tsuji (Editor), *The Micro-World Observed by Ultra High-Speed Cameras: We See What You Don't See*, Springer International Publishing ,2017, ISBN: 978-3-319-61490-8.

vědecké a odborné články ze serveru www.sciencedirect.com

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Beneš, Ph.D.**

Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Konzultant diplomové práce: **Ing. Pavla Klufová**

Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Datum zadání diplomové práce: **20. září 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **25. května 2018**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

V Plzni dne 20. září 2017



Prof. Dr. Ing. Antonín Kríž
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....
podpis autora

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Černý	Jméno Jan	
STUDIJNÍ OBOR	„Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Beneš Ph.D.	Jméno Petr	
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KMM		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Optimalizace vysokorychlostního záznamu pro použití u svařovacích procesů		

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

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	79	TEXTOVÁ ČÁST	79	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Diplomová práce se zaměřuje na použití vysokorychlostní kamery v oblasti svařování. Cílem je získat vysokorychlostní záznam svařovacího procesu z orbitálního svařování nerezových trubek metodou TIG. Analýzou tohoto svařovacího procesu lze objevit případné nedostatky, které se dají změnou svařovacích parametrů eliminovat. Souběžně s analýzou se dělají mechanické zkoušky a metalografie. Výsledkem je kvalitní svar s minimem vad.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	vysokorychlostní kamera, vysokorychlostní záznam, laserové osvětlení, orbitální svařování, TIG

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Černý	Name Jan	
FIELD OF STUDY	„Department of Material Science and Technology“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Beneš, Ph.D.	Name Petr	
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Optimization of high speed recording for use in welding processes		

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

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	79	TEXT PART	79	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The master's thesis focuses on the use of high speed cameras in the field of welding. The aim is to obtain a high speed record of the welding process from the orbital welding of stainless steel tubes by the TIG method. An analysis of this welding process may reveal possible shortcomings, which can be eliminated by changing the welding parameters. Mechanical tests and metallography are done simultaneously with the analysis. The result is a high quality weld with a minimal amount of defects.
KEY WORDS	high-speed camera, high-speed recording, laser lighting, orbital welding, TIG

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu této diplomové práce panu Ing. Benešovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, za pomoc a rady a za veškerý čas a trpělivost, které pomohly k vytvoření této práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a přítelkyni za neustálou podporu.

Poděkování 1. SGS projektu

Diplomová práce vznikla na základě řešení studentského projektu SGS – 2016-036 „Analýza, vývoj a modifikace strojírenské technologie v oblasti objemového zpracování moderních materiálů, využívaných v oblasti energetických strojů, dopravních prostředků a souvisejících strojírenských aplikací.“

Poděkování projektu VVRC

Presentované výsledky byly finančně podpořeny Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy - projekt LQ1603 Výzkum pro SUSEN. Práce byla realizována na velké infrastruktuře Udržitelná energetika (SUSEN) vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0108 a CZ.02.1.01/0.0/0.0/15_008/0000293.

Obsah

1. Úvod do řešené problematiky	4
2. Vysokorychlostní záznam	5
2.1 Historie	5
2.2 Vysokorychlostní kamera	5
2.2.1 Použití	7
2.2.2 Princip kamery	8
2.3 Parametry vysokorychlostní kamery	9
2.3.1 Citlivost obrazového snímače	9
2.3.2 Doba expozice	9
2.3.3 Trigger	10
2.3.4 Dynamický rozsah	10
2.3.5 Hloubka ostrosti	10
2.3.6 Clona	11
2.4 Objektiv	11
2.5 Omezení vysokorychlostních kamer	12
2.5.1 Kapacita paměti	12
2.5.2 Osvětlení	12
2.5.3 Filtrace extrémně jasných objektů	13
3. Vznik svarového spoje u obloukového svařování	14
3.1 Elektrický oblouk	15
3.2 Metalurgické reakce	15
4. Technologické parametry obloukového svařování	16
4.1 Svařovací proud	16
4.2 Svařovací napětí	16
4.3 Rychlost svařování	17
4.4 Geometrie wolframové elektrody	17
5. Vady svarů	18
6. TIG (Tungsten Inert Gas) – obloukové svařování netavící se wolframovou elektrodou v inertním plynu – metoda 141	19
7. Orbitální svařování	23
7.1 Uzavřené svařovací hlavy	24
7.2 Otevřené svařovací hlavy	25

8.	Experimentální program	27
8.1	Použitá zařízení.....	27
8.1.1	Vysokorychlostní kamera	27
8.1.2	Objektiv.....	28
8.1.3	Spektrální filtr	28
8.1.4	Osvětlení	28
8.1.5	Orbitální svářečka	29
8.2	Materiál.....	30
8.3	Postup experimentu	30
8.3.1	Nastavení orbitální svářečky	31
8.3.2	Nastavení vysokorychlostní kamery	32
8.3.3	Nastavení laserového osvětlení.....	33
8.3.4	Příprava vzorků na svařování.....	36
8.3.5	Vyhodnocení získaných záznamů.....	38
8.4	Svařování	38
8.4.1	Svar číslo 1 – OS1.....	39
8.4.2	Svar číslo 2 – OS2.....	41
8.4.3	Svar číslo 3 – OS3.....	42
8.4.4	Svar číslo 4 – OS4.....	43
8.4.5	Svar číslo 5 – OS5.....	44
8.4.6	Svar číslo 6 – OS6.....	45
8.4.7	Svar číslo 7 – OS7.....	46
8.5	Příprava vzorků na mechanické zkoušky	49
8.6	Rentgenová zkouška	50
8.7	Mechanické zkoušky	55
8.7.1	Zkouška tahem	55
8.7.2	Zkouška 3 – bodovým ohybem.....	59
8.7.3	Zkouška tvrdosti.....	61
8.8	Metalografické hodnocení svarových spojů	63
9.	Diskuze výsledků	71
10.	Závěr.....	73
	Použitá literatura	74

Použité zkratky a jednotky

Zkratky

Obr. – obrázek
Tab. – tabulka
Max. – maximální, maximálně
Min. – minimální, minimálně
Pozn. – poznámka
Např. – například

Jednotky

° - stupeň
°C – stupeň Celsia
m - metr
cm – centimetr
mm – milimetr
nm – nanometr
min - minuta
s – sekunda
ms – milisekunda
ns - nanosekunda
μs – mikrosekunda
W – watt
Hz – hertz
kHz – kilohertz
A – ampér
mA – miliampér
V - volt
kV – kilovolt
MPa – megapascal
Mpx – megapixel
GB – gigabyte

1. Úvod do řešení problematiky

Svařování je možno definovat jako technologický proces, při kterém dojde k vytvoření nerozebíratelného spojení dvou součástí. Obecným požadavkem je vytvoření takových termodynamických podmínek, při kterých je umožněn vznik nových meziatomárních vazeb. Za běžných podmínek (teplota a tlak) je termodynamický stav materiálu stabilní (resp. metastabilní). Působením tepelné nebo tlakové energie na materiál dojde k lokálnímu natavení základního (a přídavného) materiálu. Po ztuhnutí svarové lázně vznikne svarový spoj. Ze součástí jednoduchých tvarů (pásky, plechy, profily, tyče), výkovek a odlitků tak mohou vzniknout složitější součásti a celé konstrukce.

Svarový spoj však může být kritickým místem konstrukce z hlediska její spolehlivosti, životnosti a bezpečnosti provozu. To je způsobeno vlivem degradačních procesů, které se při svařování vyskytují. Vždy dochází ke změně struktury a mechanických vlastností v okolí svarového spoje. Často při svařování vznikají různé vady, které jsou koncentrátory napětí. Vady mohou být viditelné pouhým okem nebo v horším případě skryté. Svarový spoj tak může být náchylný ke křehkému lomu nebo může mít sníženou mez únavy.

Při svařování elektrickým obloukem je zapálen elektrický oblouk, který je zdrojem tepla. Základní a přídavný materiál toto teplo přijímá a tím dochází k lokálnímu natavení materiálu a vzniku svarové lázně. Tento proces je však nedokonalý a dochází při něm k rozstříku nataveného kovu, prskání, bublání atd. Ve svarovém spoji tak vznikají nejrůznější typy vad. Snahou je svarový proces upravit a zdokonalit tak, aby případné vady byly eliminovány a výsledný svarový spoj byl co možná nejkvalitnější.

V sériové výrobě jsou na kvalitu a ekonomičnost výroby kladeny vysoké nároky. Proto je třeba mít všechny procesy perfektně odladěné, neboť i malá nepřesnost může vést k zastavení celé výroby. A jednou z možností jak odladit výrobní procesy jsou vysokorychlostní kamery.

Vznik svarového spoje je velmi rychlý proces, který běžné záznamové zařízení ani lidské oko není schopno zachytit. Proto se v poslední době začínají ve velkém používat vysokorychlostní kamery, které jsou schopné takto rychlý děj zaznamenat. Lze přesně pozorovat jak se základní i přídavný materiál natavuje, rozlévá a zase tuhne. Dále lze pozorovat rozstřík kovu atd. Důkladným zkoumáním získaného vysokorychlostního záznamu je možné analyzovat svařovací proces a najít problém. Úpravou svařovacích parametrů, změnou ochranné atmosféry nebo změnou přídavného materiálu lze pak tento problém odstranit.

Hlavním cílem diplomové práce je u experimentálního svařovacího programu vytvořit optimalizovaný postup zachycení vysokorychlostních jevů, které se při svařování uplatňují. Správným nastavením všech parametrů vysokorychlostní kamery a optické cesty bude získán vysokorychlostní záznam, ze kterého bude zhotovena analýza svařovacího procesu. Po vyhodnocení vysokorychlostního záznamu, mechanických zkoušek, záznamu z rentgenu a metalografie vytvořeného svaru bude upraven samotný svařovací proces tak, aby výsledný svar byl co možná nejkvalitnější.

2. Vysokorychlostní záznam

Vysokorychlostní záznam si lze představit jako záznam sekvence po sobě jdoucích snímků, zaznamenaných velmi vysokou záznamovou frekvencí. Tato sekvence umožňuje zobrazit, změřit a pochopit události, které se staly příliš rychle na to, aby je mohlo zachytit lidské oko. Čím vyšší je frekvence záznamu, tím více si lze zpomalit zaznamenaný děj. Vysokorychlostní záznam se nahrává pomocí vysokorychlostních kamer. [1,2]

Důležitou veličinou kamer je jejich snímková frekvence, která se udává v Hertziích [Hz] nebo ve snímcích za vteřinu [fps] (z anglického: frames per second). Tato veličina udává, kolik snímků je zaznamenáno během jedné vteřiny (např. 1000 fps). Nejmodernější a nejdražší vysokorychlostní kamery jsou schopny zaznamenat až 1 milion fps. [1]

2.1 Historie

V roce 1948 společnost filmových a televizních techniků (SMPTE) definovala vysokorychlostní záznam jako skupinu po sobě jdoucích snímků zachycených s rychlostí 128 fps a vyšší. Zdravé lidské oko je přitom schopno zachytit pouze 30 fps. Když se rychlost snímání srovná se schopnostmi lidského oka, dostaneme až šestinásobné zpomalení zaznamenávaného děje. [1,2]

Vysokorychlostní kamera není produktem dnešní doby. Byla používána už v minulém století v éře analogového záznamu na filmový pás. Pomocí speciálního mechanismu se pás filmu určité (omezené) délky uvedl do pohybu relativně vysokou rychlostí a záznam o vysoké frekvenci byl proveden s využitím soustavy rotujících zrcadel. Vysokorychlostní kamery mají za sebou dlouhý vývoj. Důležité mezníky: [1,3]

- 1980 – První vysokorychlostní kamera využívající VHS záznam
- 1983 – První vysokorychlostní kamera specializovaná pro vojenské účely
- 1990 – První vysokorychlostní kamera využívající S-VHS záznam
- 1990 – První vysokorychlostní kamera využívající technologii CMOS
- 1994 – První barevná vysokorychlostní digitální kamera
- 1994 – První vysokorychlostní digitální kamera využívající CMOS technologii
- 1995 – První tříčipová vysokorychlostní digitální kamera
- 1997 – První vysokorychlostní kamerový systém schopný ukládat digitální i analogový záznam na pásku S-VHS
- 2003 – První jednočipová vysokorychlostní digitální kamera s HD (rozlišením 720p)
- 2005 – První tříčipová vysokorychlostní digitální kamera s full HD (rozlišením 1080p)

2.2 Vysokorychlostní kamera

Kamera je optoelektronické zařízení, sloužící k zachycení pohyblivého obrazu. Klasické kamery zaznamenávají 20 až 30 snímků za vteřinu. Kamery, které zaznamenávají více jak 128 snímků za vteřinu nebo mají čas expozice menší než 0,001 vteřiny, můžeme označit za vysokorychlostní (viz *obr. 1*). Podstatou je zaznamenat rychlý jev (pohyb), který lidské oko není samo schopno zaznamenat. Vysokorychlostní záznam se poté přehraje zpomaleně s klasickým snímáním (25 – 50 fps). Například jev, který trvá jednu vteřinu,

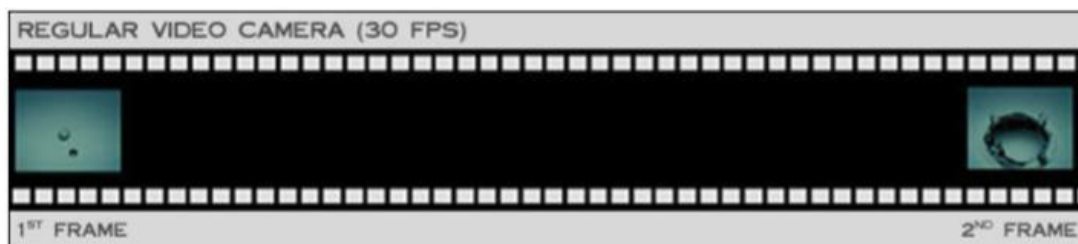
tak můžeme pozorovat až 10 minut. Na *obr. 2* a *obr. 3* je vidět rozdíl mezi běžnou a vysokorychlostní kamerou při záznamu padající kapky vody na pevnou podložku. [1]

Současné digitální vysokorychlostní kamery mají proti historickým analogovým výhodou nejen ve vyšší variabilitě volitelné frekvence záznamu, ale i v celkové době snímání děje, která je omezena pouze kapacitou paměťového média a také možností snímání děje i v čase před spuštěním kamery (tzv. pretrigger). [3]

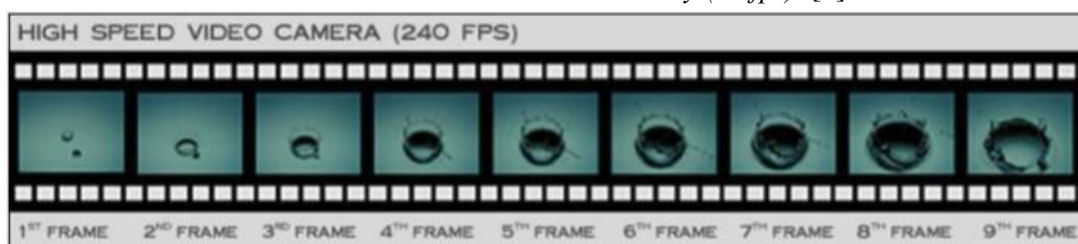
Výraznou předností digitálního záznamu je, že je použitelný nejen ke kvalitativní analýze zobrazeného děje nebo jevu, ale umožňuje i analýzu kvantitativní, tj. hodnocení s využitím aktuálních hodnot fyzikálních veličin. Vzhledem k tomu, že k jednotlivým snímkům záznamu lze přiřadit reálný relativní čas, je možné porovnáním sousedních obrázků stanovit vektory rychlosti a zrychlení pohybujících se prvků, rychlosti změny tvaru těles či vizuálních projevů zkoumaných jevů apod. Přesnost takto stanovených hodnot analyzovaných veličin je ovlivněna především rozlišením (kvalitou) záznamu, dále bitovou hloubkou záznamu, metodou kvantifikace dat a kvalitou použité optické soustavy (objektivu), která je zatížena vadami zobrazení (distorze, astigmatismus apod.). Pokud jsou použité objektivy kvalitní, vady jsou zanedbatelné. Pro přesná měření se používají speciálně kalibrované objektivy. Nezanedbatelnou roli hraje i správné zaostření objektivu na snímávaný objekt po celou dobu trvání záznamu, zejména při snímání pohybujícího se tělesa. [3]



Obr. 1 – vysokorychlostní kamera Olympus i-speed 2. [1]



Obr. 2 – záznam z běžné kamery (30 fps). [4]



Obr. 3 – záznam z vysokorychlostní kamery (240 fps). [4]

2.2.1 Použití

Zpomalený záznam se využívá k diagnostice a analýze daného jevu. Díky vysokorychlostnímu záznamu se podařilo vyřešit a pochopit spoustu problémů a jevů, které byly do té doby neřešitelné. Jedná se například o biomechaniku zvířat a hmyzu. Podařilo se zachytit a pochopit šíření tlakové vlny při výbuchu. Vědci si pomocí nejmodernějších vysokorychlostních kamer potvrzují pravdivost fyzikálních jevů. Vysokorychlostní kamery mají široký rozsah použití. Používají se zejména pro: [1,2,4]

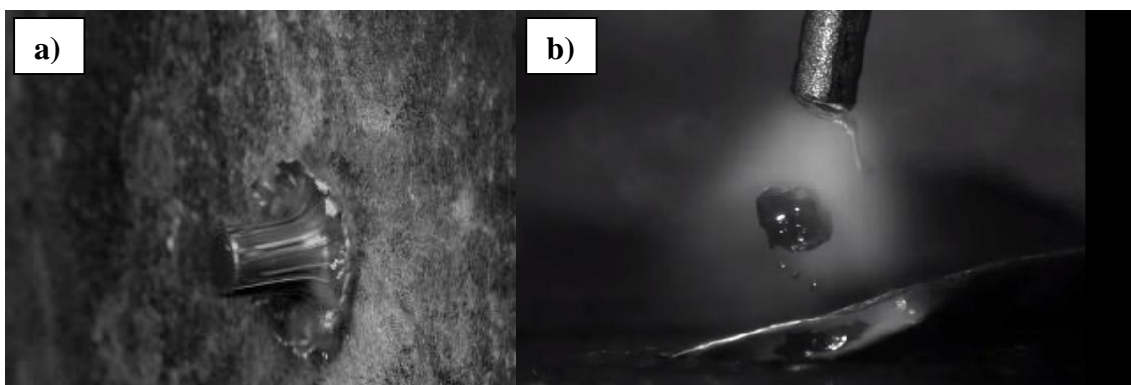
- věda a výzkum
- lékařství
- letecký průmysl
- vojenský průmysl
- kosmický průmysl
- automobilový průmysl
- zábavní průmysl

Vojenský průmysl – vysokorychlostní kamery se zde používají hlavně na balistické experimenty. Sleduje se například vliv střely na ústí hlavně, výtok plynů z hlavně a jejich dostatečný účinek na střelu. Dále se může sledovat rotační pohyb střely, její tříštivost o pevnou překážku (viz *obr. 4 a*) nebo pronikání střely měkkou překážkou. Kromě střel se pomocí vysokorychlostních kamer sleduje odolnost pancíře a brnění.

Strojírenský průmysl – v sériové výrobě jsou kladeny veliké nároky na kvalitu, plynulost a ekonomičnost výrobního procesu. Pomocí vysokorychlostní kamery se nastavuje a kontroluje chod výrobní linky (seřizují se stroje). Díky tomu se snižuje zmetkovitost a nepřesnost ve výrobě a zároveň se zvyšuje rychlost linky (roste efektivita výroby).

Materiálové zkušebnictví – sledují se vysokorychlostní záznamy průběhů trhacích zkoušek, vznik lomů a průběh destrukce materiálu při statickém i dynamickém zatížení. Dále je možno sledovat tvorbu třísek u rezných nástrojů. Na *obr. 4 b*) je vidět průběh svařovacího procesu u obloukového svařování tavící se elektrodou.

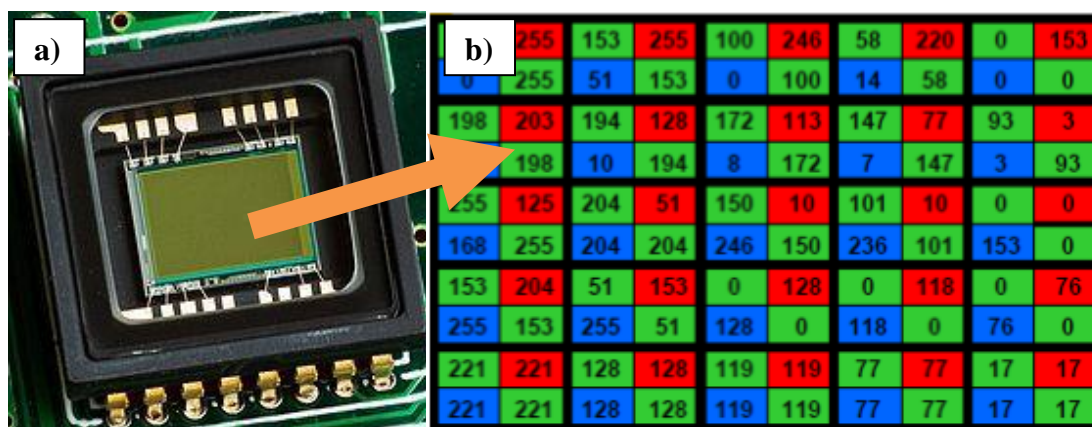
Automobilový průmysl – jsou zde veliké nároky na bezpečnost. Proto se pomocí kamer natáčejí crash testy vozidel. Náraz trvá zlomek vteřiny a je nutné ho dobře zaznamenat. Vyhodnocením záznamu se určují slabá místa karoserie, která se poté modifikují. Dále se hodnotí účinnost bezpečnostních pásů, airbagů a celkový vliv nárazu na testovací figuríny. Kromě crash testů se ještě sleduje proudění vzduchu okolo karoserie ve větrném tunelu.



Obr. 4 – snímek vysokorychlostního záznamu a) střely tříštící se o zed', b) obloukového svařování tavící se elektrodou. [2,4]

2.2.2 Princip kamery

Vysokorychlostní kamery mají princip snímání obrazu stejný jako kamery klasické. Světlo (fotony) se odráží od snímaného předmětu a prochází objektivem přes soustavu zrcadel, čoček a filtrů (viz obr. 6). Světlo poté dopadne na obrazový snímač (viz obr. 5 a)) CCD nebo CMOS, kde se přemění na proud elektronů (elektrické napětí). Elektrické napětí je úměrné intenzitě dopadajícího světla. Za čipem se nachází analogově – digitální převodník, který elektrický signál převede do digitální formy. Ze signálů pro jednotlivé body se nakonec vytvoří digitální data, které elektronika převede na dynamický obraz. Oba obrazové snímače (CCD i CMOS) využívají fotocitlivé buňky umístěné na ploše čipu, které zaznamenají proud fotonů, a podle jeho velikosti určí intenzitu jasu obrazu. Oba čipy také využívají barevné filtry sloužící k rozdělení obrazu na tři základní barevné složky: červenou, zelenou a modrou (RGB). Pokud známe v každém dostatečně malém bodě jas zelené, červené a modré barvy, jsme schopni zobrazit všechny barvy vnímatelné lidským zrakem. Výsledný obraz je složen z jednotlivých pixelů tvořících obrazovou matici. Každému pixelu je přiřazena intenzita od 0 do 255 (viz obr. 5 b)). Moderní vysokorychlostní kamery jsou buď jednočipové, což je levnější varianta nebo tříčipové, které jsou dražší, ale zaznamenaný obraz je podstatně kvalitnější. Výsledný obraz se ukládá na paměťové medium (paměťová karta, flash disk nebo HDD). [1,2]



Obr. 5 – a) CCD snímač, b) hodnota intenzity v jednotlivých fotoreceptorech v obrazové matici. [2,3]



Obr. 6 – proud fotonů procházející v kameře soustavou čoček a dopadající na obrazový snímač. [5]

2.3 Parametry vysokorychlostní kamery

Každá vysokorychlostní kamera má konkrétní parametry, které jsou dány konstrukcí, kvalitou použitých komponentů a procesními algoritmy (maximální rychlost, se kterou se přenášejí a ukládají data). Mezi klíčové komponenty patří obrazové snímače (CCD, CMOS). Mezi klíčové parametry každé kamery patří: [3,5]

- maximální snímací frekvence (fps)
- rozlišení obrazového snímače
- typ obrazového snímače (monochromatický nebo barevný)
- snímková kapacita (maximální doba záznamu)
- minimální doba expozice
- citlivost obrazového snímače a jeho bitová hloubka (dynamický rozsah)
- možnost synchronizace více kamer v síti
- funkce trigger, pretrigger a posttrigger

2.3.1 Citlivost obrazového snímače

Citlivost se značí podle normy ASA/ISO a pohybuje se v rozmezí od 12 do 3200 u barevných obrazových snímačů. Obvyklé hodnoty jsou ISO 100, 200 a 400. U monochromatických obrazových snímačů jsou hodnoty ISO daleko vyšší. Obecně platí, že čím vyšší citlivost obrazový snímač vysokorychlostní kamery má, tím vyšších snímacích frekvencí nebo kratších expozic můžeme dosáhnout se stejnou úrovní osvětlení. Platí to i jinak - pro stejnou snímkovou frekvenci a expoziční dobu můžeme použít zdroj světla s nižším výkonem. Citlivost snímače je velmi důležitá ve všech případech, kdy jediným možným zdrojem osvětlení je běžné denní světlo. Někteří výrobci - ve snaze prezentovat vysoké hodnoty citlivosti - udávají její hodnoty změřené s použitím dodatečného zesílení signálu pomocí různých doplňkových funkcí (např. elektronickým zvyšováním zisku snímače - gain), slučováním pixelů (binning) apod. Spolu s takovým zvýšením hodnoty citlivosti se totiž zvyšuje i úroveň nežádoucího šumu, a kvalita výsledného snímku tím znatelně klesá. Je proto důležité znát vždy podmínky, za kterých byly publikované hodnoty naměřené. K tomu účelu by vždy měla být jednoznačně udána konkrétní norma, podle které bylo měření citlivosti prováděno. [3,5,6]

2.3.2 Doba expozice

Je doba, po kterou se na obrazovém snímači shromažďuje světlo a převádí se do elektronické podoby. Může se zdát, že vše vyřeší dostatečně vysoká snímací frekvence, ale není tomu tak pokaždé. I když je snímková frekvence dostatečně vysoká z hlediska optimálního rozlišení jednotlivých fází snímaného děje, nastávají v praxi případy, kdy i v rámci jediného snímku je proces natolik rychlý, že způsobí rozmazaný (neostrý) obraz. Tomu lze zabránit vhodným snížením expoziční doby (např. na 1/10 doby trvání snímku). Je to naprosto stejné, jako v případě klasické fotografie. Nesmí se ale zapomínat na to, že s každým zkrácením expozice vzrůstají nároky na intenzitu osvětlení. [5,6]

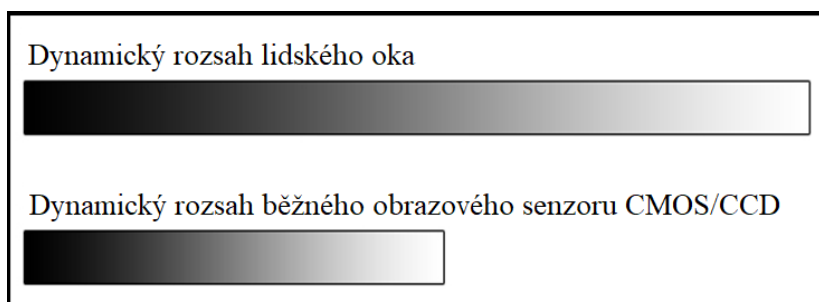
2.3.3 Trigger

Vysokorychlostní kamery se obvykle spouštějí pomocí triggeru. Jedná se o elektronický spouštěcí signál, který udává, v jakém okamžiku má dojít k záznamu obrazu. Používá se hlavně tam, kde je plynulá výroba nebo kde je nutné přesně definovat okamžik snímání. Impulzem pro zahájení snímání slouží různá čidla. Nejčastěji jsou indukční, kapacitní, optické nebo mechanické. [3]

Kamery neustále nahrávají obraz ve smyčce. Jednotlivé snímky se nahrávají a zase mažou (nejnovější snímek nahradí snímek nejstarší). Je to kvůli úspoře místa v paměti, která je obecně malá. V okamžiku začátku snímání (sepnutí triggeru) kamera uloží i několik desítek (stovek) snímků před začátkem snímání. Těto funkci se říká pretrigger. Tímto způsobem je zaručeno, že nahrávaný děj bude zaznamenán celý. Tohoto se využívá například při záznamu kulky letící do překážky nebo při záznamu výbuchu. [2]

2.3.4 Dynamický rozsah

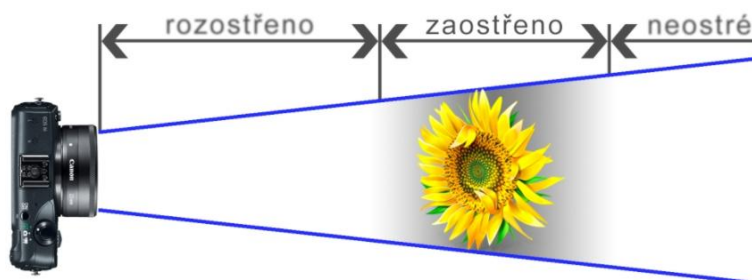
Dynamický rozsah je schopnost současně sledovat velmi světlá a tmavá místa. Lidské oko má veliký dynamický rozsah. Klasickým příkladem je květina stojící na okenním parapetu. Lidské oko dokáže současně vnímat květinu i sledovat scénu za oknem. To běžná kamera nedokáže. Čím má obrazový snímač větší citlivost, tím je větší podíl jasu mezi nejsvětlejším a nejtmaším bodem a kamera má větší dynamický rozsah. [3,5]



Obr. 7 – porovnání dynamického rozsahu lidského oka a obrazového senzoru. [5]

2.3.5 Hloubka ostrosti

Vyjadřuje rozdíl vzdálenosti nejbližšího a nejvzdálenějšího předmětu, které se na výsledném snímku lidskému oku jeví ještě jako ostré. Se zvětšující se ohniskovou vzdáleností, klesá hloubka ostrosti. Se zmenšující se clonou, hloubka ostrosti naopak roste (viz obr. 9). S rostoucí vzdáleností předmětu od objektivu hloubka ostrosti roste. Na obr. 8 je vidět rozsah vzdáleností, kdy se předmět ještě jeví jako ostrý. [3,5]

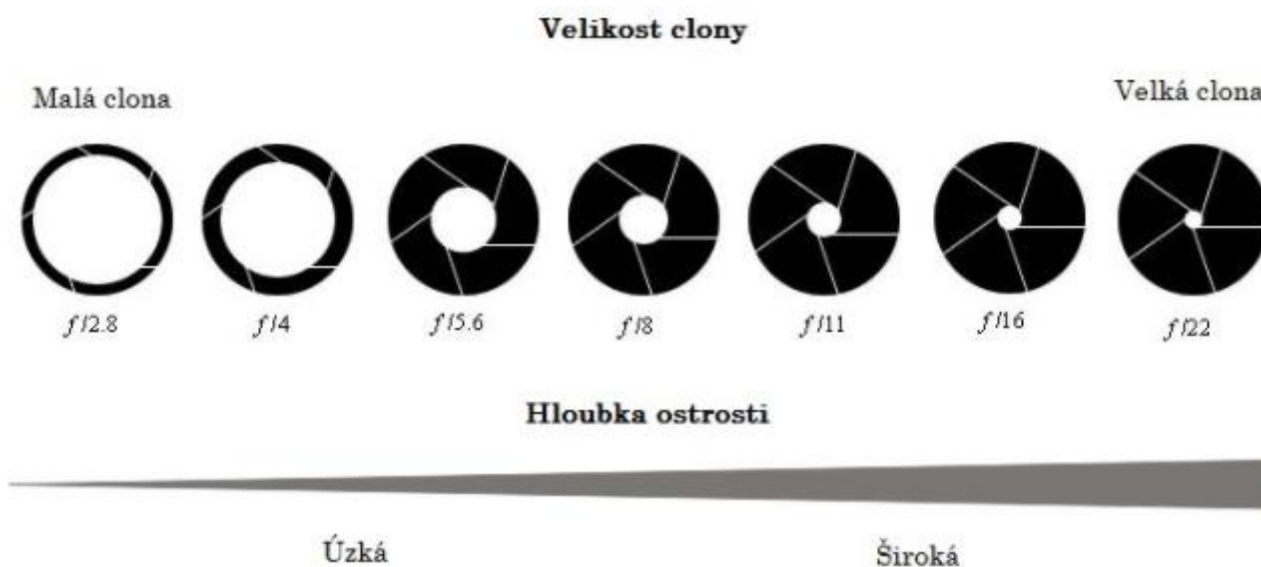


Obr. 8 – vliv vzdálenosti na hloubku ostrosti. [5]

2.3.6 Clona

Je zařízení, které reguluje množství světla procházejícího objektivem. Funguje na podobném principu jako lidská oční zornička a kontroluje množství světla, které dopadá na obrazový snímač nebo fotocitlivý materiál. Jedná se o otvor, jehož velikost se dá podle potřeby měnit.

Důležitým parametrem je clonové číslo, které udává světlost objektivu. Jedná se o poměr ohniskové vzdálenosti a průměru vstupní čočky. Čím je clona více zavřená, tím je větší clonové číslo (viz obr. 9). Zvýšení clonového čísla (zmenšení otvoru v cloně) má vliv i na hloubku ostrosti. To znamená, že objektiv dokáže lépe zachytit blízké i vzdálené objekty, tj. nastavení malého otvoru v cloně je výhodou. [3,5]



Obr. 9 – velikost clony a její vliv na hloubky ostrosti. [5]

2.4 Objektiv

Objektiv je soustava čoček, která soustředí světlo na obrazový snímač. Tato optická soustava může být schopna měnit svoji ohniskovou vzdálenost a tím zoomovat. Ohnisková vzdálenost je velmi důležitý parametr každého objektivu (udává se v mm) a významně ovlivňuje získaný záznam. Součástí objektivů může být také clona, která reguluje množství světla, které projde na obrazový snímač.

Objektiv s dlouhou ohniskovou vzdáleností se obvykle používá tam, kde je potřeba sledovat malou plochu, nebo kde musí být kamera umístěna dál od scény. Dlouhá ohnisková vzdálenost znamená větší zvětšení. Nevýhodou tohoto typu objektivu je zmenšení zdánlivé vzdálenosti objektů v záběru ve směru osy pohledu. Tento jev nazýváme kompresí perspektivy. Objektiv s dlouhou ohniskovou vzdáleností mívá obvykle nižší světelnost (vyšší clonové číslo), a proto obraz není tak jasný.

Objektiv s krátkou ohniskovou vzdáleností se obvykle používá tam, kde je potřeba sledovat velkou plochu, nebo kde musí být kamera umístěna blízko u scény. Objektivy s velmi krátkou ohniskovou vzdáleností deformují perspektivu záběru a tento jev nazýváme soudkové zkreslení. [5,7]

2.5 Omezení vysokorychlostních kamer

Vysokorychlostní kamera má stejně jako jiná zařízení svá omezení, která závisí na použitém hardwaru kamery. Mezi největší problémy vysokorychlostních kamer patří kapacita jejich vnitřní paměti a rychlost ukládání jednotlivých snímků do ní. Dále sem patří problematika osvětlení scény při velmi vysokých fps a filtrace extrémně jasných objektů.

2.5.1 Kapacita paměti

Maximální počet snímků za vteřinu (fps) je úměrný rozlišení nahrávaného obrazu. Se zvětšujícím se rozlišením klesá fps a naopak. Je tedy dobré vzít v úvahu, zda nahrávaný děj má mít vyšší rozlišení s nižším fps nebo maximální fps s nižším rozlišením. S tím souvisí i délka záznamu, která se pohybuje maximálně v řádu několika vteřin (viz *tab. 1*).

Problémem u vysokorychlostních kamer je ukládání jednotlivých zaznamenaných snímků do paměti, protože se zpracovává obrovské množství dat. U kamer, které mají vysoké rozlišení (např. 2048 x 1536 pixelů, což jsou 3 Mpx) a počet zaznamenaných snímků přesahuje 1000 fps, je rychlost záznamu až 10 GB za vteřinu. To je extrémní hodnota. Reálnější je například rozlišení 250 x 200 pixelů a rychlost záznamu 20000 fps. V tomto případě se uloží 1 GB za vteřinu. Nahrávání obrazu je tedy velmi rychlé, ale ukládání jednotlivých snímků je podstatně pomalejší. [1]

Nahrávací parametry		MAX počet obrázků	Nahrávací čas [sec]	MAX počet obrázků	Nahrávací čas [sec]
FPS	Rozlišení v pixelech	Standardní paměť - 512 MB		Rozšířená paměť - 1 GB	
125	640x480	2184	17,5	4368	34,9
250	640x480	2184	8,7	4368	17,5
500	640x480	2184	4,4	4368	8,7
1000	640x480	2184	2,2	4368	4,4
125	320x240	8736	69,9	17472	139,8
250	320x240	8736	34,9	17472	69,9
500	320x240	8736	17,5	17472	34,9
1000	320x240	8736	8,7	17472	17,5

Tab. 1 – kapacitní tabulka vysokorychlostní kamery TroubleShooter 1000. [1]

2.5.2 Osvětlení

Velkým problémem při použití vysokorychlostní kamery je osvětlení snímané scény. Se zvyšující se záznamovou frekvencí klesá intenzita osvětlení. To souvisí s dobou expozice (rychlostí závěrky) jednotlivých snímků. Clonou tak prochází mnohem méně světla. Zaznamenaný děj tak může být i za přímého slunečního záření šerý nebo úplně tmavý. V případě záznamu při velmi vysokých fps je proto nutné použít externí zdroj osvětlení. Nejčastěji se používají: [2]

- LED svítidla
- Halogenová osvětlení
- Laserová osvětlení
- Výbojky

Laserové osvětlení

Speciální lasery mohou mít specifické míry intenzity a barvy. Díky vysoké opakovací frekvenci pulzních laserů lze dosáhnout účinné doby trvání závěrky v obvyklém rozmezí 30 – 250 ns na frekvencích až 50 kHz bez nutnosti použití zesilovače obrazu. Laser je nutné seřídit tak, aby jeho frekvence odpovídala frekvenci počtu snímků za sekundu. Typicky se laserového osvětlení využívá v balistice, kde rychlosti dějů běžně přesahují 700 m/s. Při záznamu svařovacího procesu je možné pomocí laserového osvětlení odfiltrovat elektrický oblouk. Velkou výhodou pulzních laserů je, že při svícení nevyzařují příliš velké teplo, a tudíž nejsou snímány objekty ovlivněny tepelným účinkem (tavení vláken, ohřívání plastů). Nevýhodou je značná složitost synchronizace laserového osvětlení a vysokorychlostní kamery. [4,6]

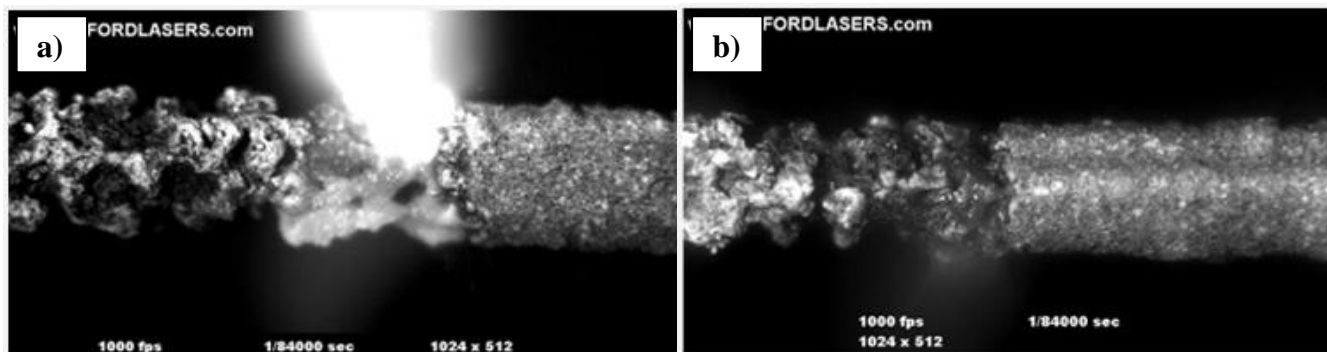
Halogenové osvětlení

Halogenová žárovka je speciální druh žárovky, která má v atmosféře uvnitř baňky přidanou sloučeninu halového prvku (halogenu – nejčastěji brom nebo jod). Vláknem žárovky tak dosahuje vyšší teploty, a díky tomu se zvyšuje světelná účinnost a bělost světla. Baňka halogenové žárovky je s ohledem na vyšší teploty vyrobena z křemenného skla s přísadou oxidu ceričitého. Výhodou halogenového osvětlení je konstantní světelné záření, jednoduchá obsluha a bezpečnost (nehrozí ztráta zraku při přímém pohledu do reflektoru). Nevýhodou je značné ohřívání osvětleného předmětu. [8]

2.5.3 Filtrace extrémně jasných objektů

V případě nahrávání extrémně jasných objektů (obloukové svařování, spalování nebo výbuch) je třeba použít filtr. Bez něj by byl záznam přesvětlený nebo zcela bílý a také by se mohl poškodit obrazový senzor (CCD, CMOS). Spektrální filtr většinu tohoto nežádoucího světla odstraní. [4]

Proces svařování elektrickým obloukem vyzařuje do okolí velmi jasné světlo, které pokrývá široké spektrum světla. Pokud má být svařovací proces popsán, musí být světlo z elektrického oblouku eliminováno (odfiltrováno). Toho se dosáhne použitím speciálního spektrálního filtru, který je připevněn na objektivu kamery. Filtr blokuje většinu světla v určitých vlnových délkách. Filtrem tak projde velmi úzké pásmo vlnových délek. Na *obr. 10* je vidět záznam elektrického oblouku s použitím spektrálního filtru a záznam bez použití spektrálního filtru. [4]



Obr. 10 – záznam elektrického oblouku a) bez filtru, b) s filtrem. [4]

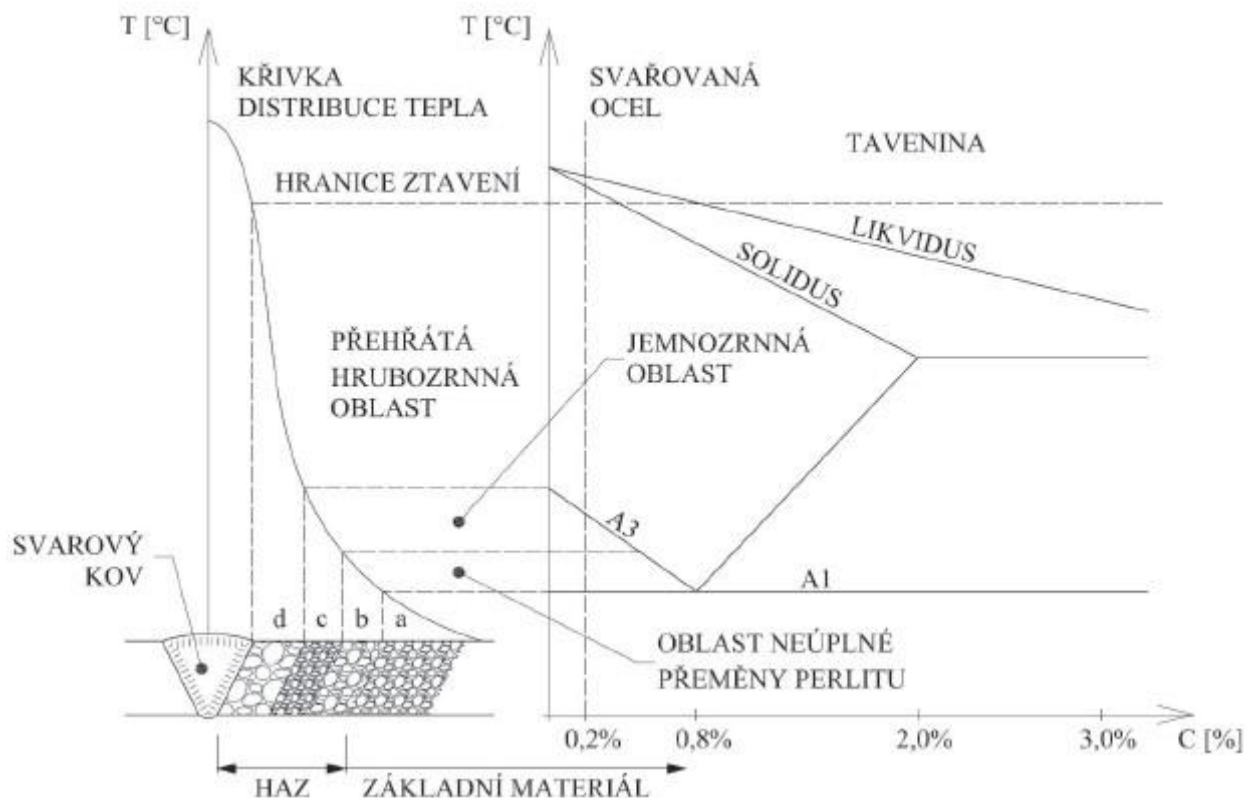
3. Vznik svarového spoje u obloukového svařování

Podstatou vzniku svarového spoje je hoření elektrického oblouku mezi elektrodou a základním materiálem. Proces svařování vyžaduje aktivaci kontaktních ploch, tj. dodání aktivační energie pro překonání bariery potenciální energie povrchových atomů. U obloukového svařování je to termická aktivace (tepelná energie z elektrického oblouku). Teplo získané z elektrického oblouku tak natavuje základní a přídavný materiál. Vznikne svarová lázeň, která po ztuhnutí vytvoří svarový spoj. [10]

Spojení kovu nastane působením meziatomových sil a adhezních vazeb na teplem aktivovaných kontaktních plochách. Základem vazby je mrak valenčních elektronů, které mohou volně přecházet od atomu k atomu. Ke kovové vazbě tedy dochází, pokud přitažlivé síly mezi kovovými ionty a elektronovým mrakem převyšují odpuzivé síly elektronů v tomto mraku. Ionty jsou uspořádány podle přesně definovaného rozložení, podle něhož v pevných látkách existují mezi ionty síly přitažlivé a odpuzivé.

Tekutá fáze je vázána na povrch tuhé fáze adhezními silami a při tuhnutí taveniny se slabé adhezní síly mění na chemickou vazbu ve formě krystalové mřížky. Rostou nová zrna a původní rozhraní tavenina a tuhá fáze zaniká. Růst zrn je orientován proti směru odvodu tepla a kolmo na izotermy. Svarový kov je charakterizován tzv. dendritickou krystalizací, přičemž velikost dendritů závisí na množství přivedeného tepla na jednotku délky svaru.

V oblasti okolo svarového spoje dochází k překrystalizačním pochodům vlivem vysokých teplot. Tato oblast se nazývá teplem ovlivněná oblast, neboli TOO (viz obr. 11). Celý proces svařování je doprovázen metalurgickými reakcemi. [10]



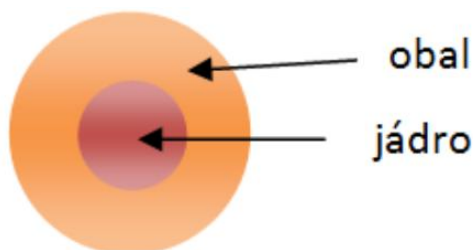
Obr. 11 – teplem ovlivněná oblast – TOO. [9]

3.1 Elektrický oblouk

Plynné prostředí za normálních podmínek nevede elektrický proud, ale může ho vést za zvláštních podmínek. Tyto podmínky způsobí v plynu vznik volných částic s elektrickým nábojem. Plyn se stane elektricky vodivým za těchto podmínek:

- silné elektrické pole
- vysoká teplota
- nízký tlak plynu

Elektrický oblouk je zářící elektrický výboj válcového tvaru soustředěný do tenkého sloupce, který se skládá z jádra a obalu (viz *obr. 12*). Jádro elektrického oblouku je tvořeno ionizovaným plynem (plazmatem), který přenáší elektrický proud. Teplota jádra se pohybuje okolo 16000°C. Obal elektrického oblouku je tvořen rozžhavenými plyny, které mají teplotu až 7000°C. Obal jádra má velký teplotní spád. To má velký vliv na chlazení elektrického oblouku. Dochází zde k výměně tepla pomocí vedení mezi okolním prostředím a elektrickým obloukem. Elektrický oblouk má velkou proudovou hustotu, která závisí na velikosti proudu a může být až několik tisíc ampér na cm². Elektrický oblouk je znázorněn na *obr. 13*. [11]



Obr. 12 a 13 – řez elektrickým obloukem / elektrický oblouk mezi dvěma elektrodami. [11]

3.2 Metalurgické reakce

Nejdůležitějšími metalurgickými reakcemi jsou oxidační a desoxidační pochody probíhající v kapkách tavicí se elektrody a v roztaveném svarovém kovu. Tyto reakce zásadně ovlivňují tvar oblouku, povrch svarové housenky, přechod svarové housenky do základního materiálu a vnitřní čistotu svaru. Na rozsah reakcí má vliv především množství disociovaného kyslíku schopného slučovat se s prvky v tavenině. [10]

Vzniklé kapky svarového kovu jsou při přechodu do tavné lázně obohaceny kyslíkem a dosahují vysoké teploty, protože oxidační reakce je exotermická. Tyto reakce uvolňují teplo, které je difúzí vedeno do okolního materiálu a výsledkem je hlubší a oválnější svarová lázeň u svaru s ochranným plynem CO₂, který má větší oxidační schopnost než u směsi Ar + CO₂ nebo v čistém Ar. Slučováním oxidu FeO s C se tvoří bubliny CO, které jsou za určitých podmínek příčinou vzniku pórů a bublin. To je také jeden z důvodů, proč se musí provést dokonalá desoxidace taveniny svarového kovu.

Desoxidačními prvky jsou Mn a Si, kterými jsou přídavné materiály legovány v určitém poměru tak, aby vzniklá struska měla vhodnou tekutost a snadno vyplavala na povrch tavné lázně. [10]

Doporučený poměr mezi Mn a Si: 1,5 : 1 až 1,8 : 1
Optimální složení přídavných materiálů: C = 0,1%; Mn = 1,7% ; Si = 1,0%

4. Technologické parametry obloukového svařování

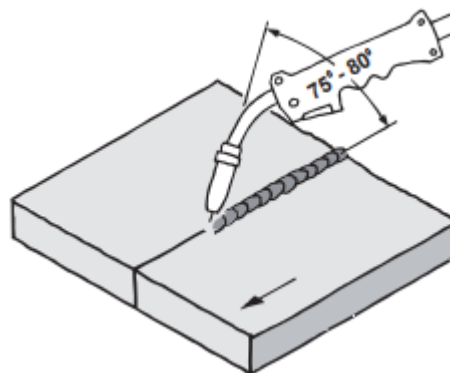
Při ručním svařování metodou TIG je hořák natočen ve směru pohybu (viz obr. 14). Díky tomu může oblouk roztavit základní kov před místem tavné lázně a umožnit tak co nejlepší průvar. Rychlost svařování se řídí tak, aby tavná lázeň nepředběhla oblouk a nedošlo tím ke vzniku studeného spoje. Kvalita svaru při svařování metodou TIG je závislá zejména na zručnosti svářeče a nastavení vhodných parametrů. Svařovací parametry se dají rozdělit na hlavní a vedlejší. [12]

Hlavní svařovací parametry metody TIG:

- svařovací napětí [V]
- svařovací proud [A]
- rychlost svařování [m/hod]

Vedlejší svařovací parametry metody TIG:

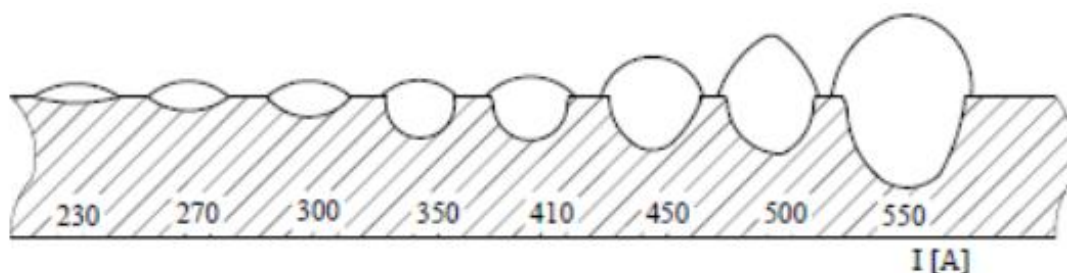
- průměr elektrody a přidavného drátu [mm]
- polarita a charakter svařovacího proudu
- sklon elektrody [°]
- indukčnost
- geometrie elektrody



Obr. 14 – správný sklon hořáku. [12]

4.1 Svařovací proud

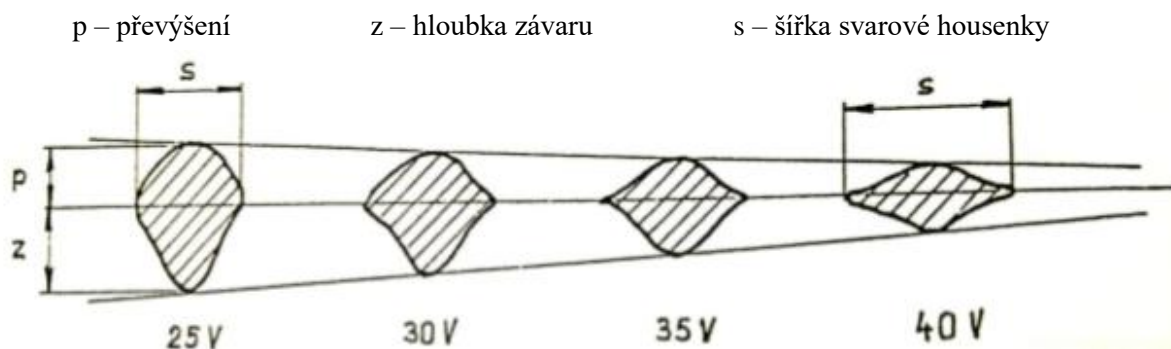
Hodnota svařovacího proudu je přímo úměrná intenzitě vneseného tepla do základního materiálu. Změnou svařovacího proudu lze tedy korigovat množství nataveného kovu. To ovlivní velikost průvaru svarové lázně do základního materiálu a celkově velikost svaru. Čím je tedy velikost svařovacího proudu větší, tím hlubší průvar vznikne (viz obr. 15). [12, 13]



Obr. 15 – vliv velikosti svařovacího proudu na změnu velikosti průvaru. [14]

4.2 Svařovací napětí

Změnou svařovacího napětí je možné měnit stabilitu elektrického oblouku, jejímž ukazatelem je rozstřík. Působí-li teplo vzniklé v elektrickém oblouku na rozsáhlé ploše materiálu, má to za následek zmenšení hloubky protavení a zvětšení šířky svarové housenky, mění se tak profil svaru (viz obr. 16). [12,13]



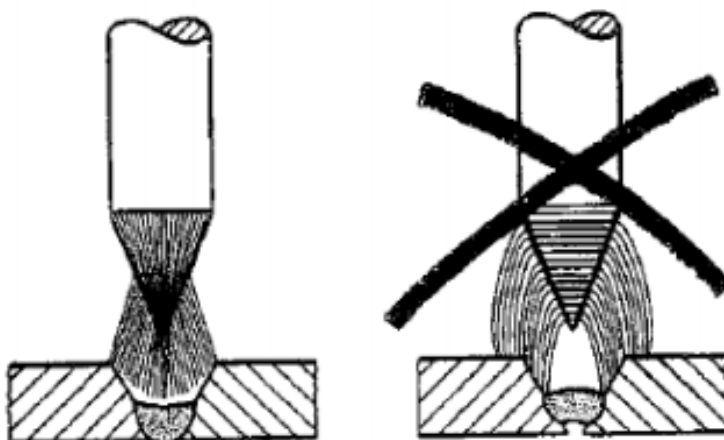
Obr. 16 – vliv velikosti napětí na hloubku provaření a tvar svarové housenky. [14]

4.3 Rychlost svařování

Je-li svařovací proud a napětí konstantní, tak se změnou rychlosti posuvu se mění velikost tepla vneseného do svarového spoje. Pokud je rychlost svařování malá, vneseného tepla do svaru je dostatek a natavení materiálu je dostatečné. Při vyšší rychlosti je velikost vneseného tepla menší a nemusí docházet k dostatečnému natavení materiálu. To může způsobit nedostatečné provaření (malý průvar). [12,13]

4.4 Geometrie wolframové elektrody

Vliv geometrie špičky wolframové elektrody má významný vliv na svařovací proces. Úhel špičky ovlivňuje velikost teplem ovlivněné oblasti, průvar a životnost elektrody v závislosti na svařovacích parametrech. Špička elektrody musí být broušená v podélné ose. Podélné vrypy totiž nemají vliv na stabilitu elektrického oblouku (viz obr. 17). Dále musí být špička elektrody souosá a její povrch by měl být co nejhladší. Elektrody se brousí na speciální brusce. [15]



Obr. 17 – vliv podélného a příčného způsobu broušení wolframové elektrody na elektrický oblouk. [15]

5. Vady svarů

Obecně se vadou svaru rozumí každá odchylka od předepsaných technických norem a předepsaných technických podmínek. Vady mohou být viditelné pouhým okem nebo skryté (kontrola pomocí NDT metod). Dále se rozdělují na vady plošné (např. trhliny, studené spoje, nedostatečný průvar) a na vady objemové (kovové i nekovové vměstky, bubliny, póry atd.). Příklady některých typů vad jsou na *obr. 18*. [12]

Trhliny - dají se dělit podle podmínek jejich vzniku na horké, studené, žíhací, lamelární a kráterové. Příčinou vzniku horkých trhlin je především chemické složení základního materiálu (vysoký podíl uhlíku a manganu, případně vyšší obsah síry). Vznikají při vysokých teplotách mezi 800 a 900°C. Studené trhliny vznikají především kvůli působení vodíku v tavné lázni, a také u ocelí s vyšším obsahem uhlíku nebo ocelí legovaných. Vznikají obvykle po zakončení svařování při teplotách pod 300°C. Trhliny lze z části eliminovat pomocí vhodných předehřevů, které sníží rychlost ochlazování.

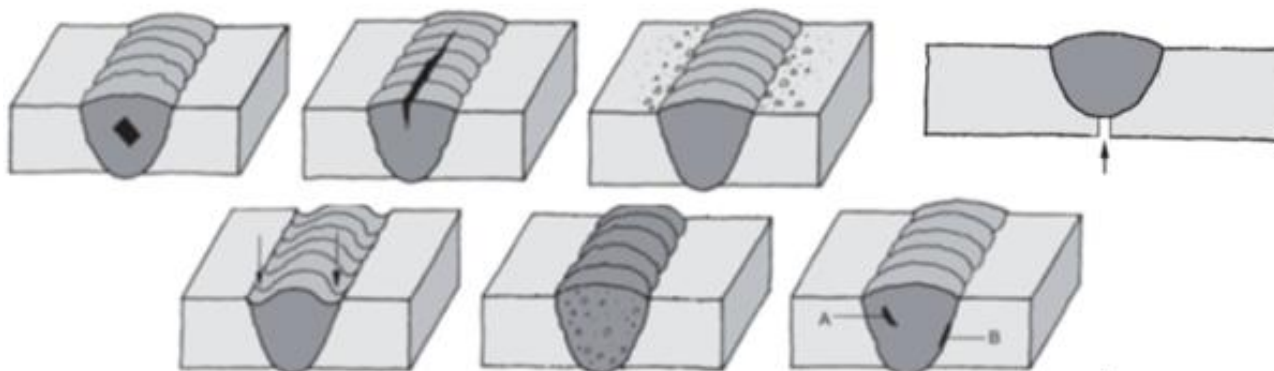
Nedostatečné průvary – vznikají při nedostatečném natavení základního materiálu nebo přilehlých svarových housenek. Mezi hlavní příčiny patří vysoká svařovací rychlost, nízký svařovací proud, nevhodná příprava svařovacích úkosů, předběhnutí svarové lázně, příliš vysoká housenka nebo velký průměr obalené elektrody.

Studené spoje – jsou způsobeny nedokonalým tavným spojením svarového kovu se základním materiálem nebo navařenou housenkou. Mezi hlavní příčiny patří nízký svařovací proud, nesprávné vedení elektrody, velká rychlost svařování a malý průměr elektrody.

Póry a bubliny – jsou objemové vady kulovitěho nebo protáhlého tvaru vyplněné plynem. Příčinou jejich vzniku může být špatně vysušená elektroda, vlhkost v plynu, nečistoty na svarových hranách, příliš dlouhý oblouk, vysoká svařovací rychlost nebo rychlé tuhnutí lázně v důsledku nízkého svařovacího proudu.

Vměstky – mohou být struskové (nedokonalé odstraňování strusky mezi jednotlivými svařovanými vrstvami) a kovové (především wolframové při vysokých proudech, při dotyku elektrody s tavnou lázní nebo porušení plynové ochrany).

Zápaly – jsou ostrá natavená prohloubení na hranicích svarové housenky a základního materiálu. Mezi hlavní příčiny patří příliš velký svařovací proud, dlouhý oblouk, nevhodný průměr elektrody, popřípadě je špatné vedení.

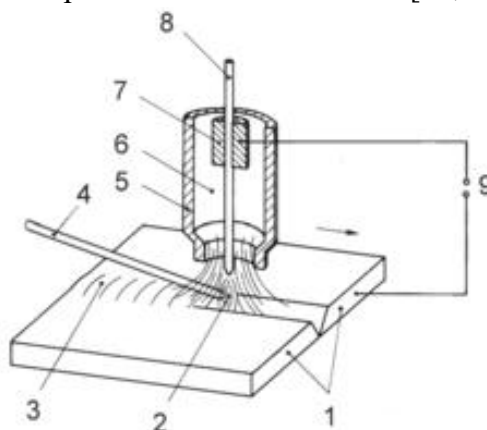


Obr. 18 – příklady defektů svarů odshora zleva: kovový nebo nekovový vměstek, trhlinka, rozstřík, nedostatečný průvar, zápal, bubliny / póry, studený spoj. [12]

6. TIG (Tungsten Inert Gas) – obloukové svařování netavící se wolframovou elektrodou v inertním plynu – metoda 141

Jedná se o rozšířenou metodu obloukového svařování, kde jsou svarová lázeň, elektroda a odtavující se kapky přídavného materiálu chráněny ochranným plynem proti nepříznivému působení okolní atmosféry (vzdušný kyslík a dusík). Používanými ochrannými plyny je u této metody argon, helium nebo jejich směs. Tyto plyny jsou netečné neboli inertní. Nevstupují do reakcí, které probíhají ve svarové lázni, ale pouze ji chrání. Kvůli vyšší ceně těchto plynů se tato metoda nepoužívá na svařování konstrukčních uhlíkových ocelí. Běžně se touto metodou svařuje vysocelegovaná ocel, hliník a jeho slitiny, slitiny mědi (zejména bronzy), slitiny titanu a obecně svařitelné lehké kovy. Velkou výhodou této metody svařování je dobře provařený kořen svaru. Na *obr. 19* je znázorněn princip svařování metodou TIG. [13, 16]

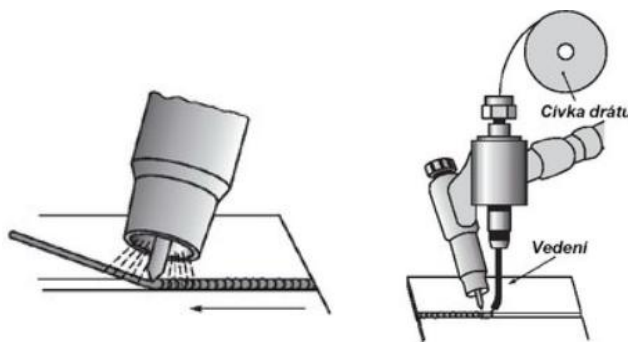
1. svařovaný materiál
2. elektrický oblouk
3. svar
4. přídavný drát
5. svařovací hubice
6. ochranný plyn
7. upínací kleština
8. wolframová elektroda
9. zdroj el. proudu



Obr. 19 – princip svařování metody TIG. [17]

Svařování metodou TIG může být provedeno buď pouze roztavením a slitím základních materiálů, nebo přidáním přídavného materiálu s podobným chemickým složením jaký má základní materiál. Zdrojem tepla je elektrický oblouk, který hoří mezi netavící se wolframovou elektrodou a základním materiálem. Teplo z elektrického oblouku natavuje základní (přídavný) materiál. Wolframová elektroda je upnuta pomocí kleštiny v hlavici hořáku. Přes kleštinu se do wolframové elektrody přenáší elektrický proud. Hořák je dále opatřen svařovací hubicí, kterou proudí ven inertní plyn. [16,17]

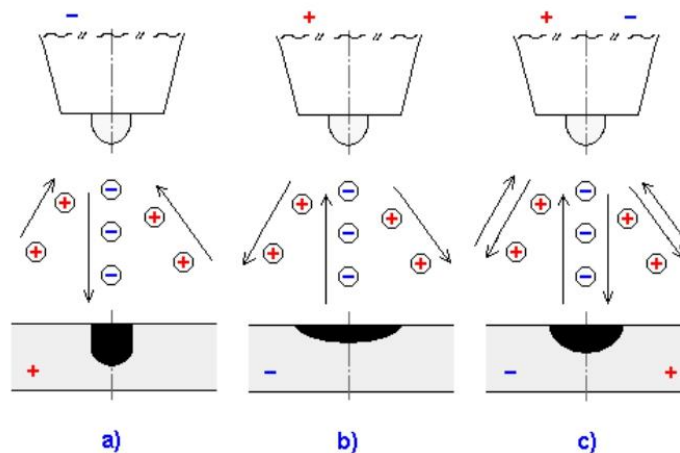
Přídavný materiál je do oblouku dodáván buď ručně ze strany (tyčinka, drát), nebo automaticky z cívky (drát, pásek). Tloušťka drátu se pohybuje od 0,6 do 2 mm. Při automatickém svařování je drát namotán na cívce a do místa svařování je přiváděn bowdenem přes systém kladek. Kladky jsou poháněny elektromotorem a jsou umístěny buď u cívky (tlačný systém) nebo přímo ve svařovací hubici (tažný systém) nebo kombinací obou systémů.



Obr. 20 – manuální a automatické dopravení přídavného materiálu do svarové lázně. [17]

Ochranný plyn je přiváděn do místa svaru z tlakové láhve přes průtokoměr, elektromagnetický ventil a svařovací hubici. Plyny se v tlakových láhvích dodávají ve směsích (přesné poměry jednotlivých plynů), nebo se používají tzv. směšovače, což je zařízení, které smíchá plyny v libovolném poměru. Směsi plynů mají vliv na pohyb svarové lázně, její čistotu a formování svaru. Dále mají vliv na snížení rozstříku a povrchového napětí svarové lázně. Složení ochranných plynů uvádí norma ČSN EN 439. [13, 16]

Při svařování metodou TIG se může použít zdroj stejnosměrného proudu (DC) nebo střídavého proudu (AC). Při svařování stejnosměrným proudem můžeme ještě použít přímou a nepřímou polaritu (viz obr. 21). [13,17]



Obr. 21 – možnosti zapojení elektrického zdroje u metody TIG; a) DC – přímá polarita, b) DC – nepřímá polarita, c) AC. [17]

Stejnoseměrný proud – přímá polarita

Jedná se o nejčastější zapojení, kdy je wolframová elektroda připojena na minus pól zdroje svařovacího proudu a základní materiál na plus pól. Elektronové proudí od elektrody k povrchu svařovaného materiálu, čímž 2/3 vzniklého tepla přechází do základního materiálu a 1/3 do wolframové elektrody. Díky tomu je svar úzký, má hluboký závar a elektroda není tolik tepelně namáhána. Oblouk se snadno zapaluje a klidně hoří. Nevýhodou je, že ionty plynu proudí od základního materiálu k elektrodě a nemají tak čistící účinek. Argon zde slouží pouze jako ochranný plyn. Toto zapojení se používá při svařování legovaných ocelí, mědi a titanu. [13,17]

Stejnoseměrný proud – nepřímá polarita

Při tomto způsobu zapojení je wolframová elektroda připojena na plus pól zdroje svařovacího proudu a základní materiál na minus pól. Elektroda je zde hodně tepelně namáhána (může dojít i k jejímu odtavení), protože až 2/3 vzniklého tepla přechází právě do elektrody a pouze 1/3 tepla do základního materiálu. Velkou výhodou je ovšem čistící efekt argonu. Ionizovaný argon se pohybuje od elektrody k základnímu materiálu a jednotlivé ionty bombardují povrch, a tím ho čistí od oxidické vrstvy, která vzniká svařováním některých materiálů (hliník, hořčík). Příčinou čistícího efektu je tzv. katodická skvrna. Ta neustále mění svojí polohu a vyhledává místa oxidů, které následně odstraňuje. Nevýhodou jsou široké svary s malou hloubkou závaru. [13,17]

Střídavý proud

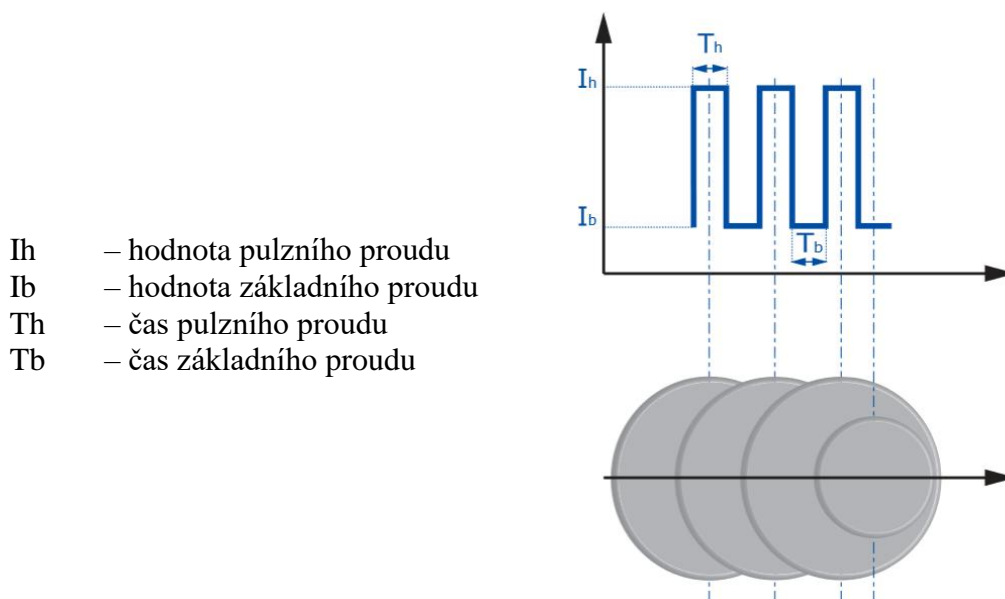
Toto zapojení se nejčastěji používá při svařování hliníku, hořčíku a jejich slitin. Je kombinací dvou předchozích způsobů zapojení. Periodicky se mění polarita a dochází tak k částečnému čistícímu účinku, a zároveň se wolframová elektroda nepřehřívá. Zjednodušeně řečeno dochází ke střídání fáze čištění a svařování. Starší svářečky měly sinusový průběh, moderní mají průběh obdélníkový. [13,17]

Pulzní svařování

Při tomto způsobu svařování dosáhneme sprchového bezzkratového přenosu kovu při poměrně malých proudech. Svařuje se pomocí stejnosměrného proudu i střídavého proudu. Podstatou je periodicky se střídající hodnoty elektrického proudu (viz obr. 22).

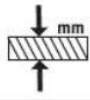



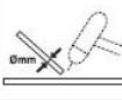
Základní svařovací proud I_h je nastaven svářečem na požadovanou hodnotu. Tento proud zajišťuje dobrý průvar. Proud I_b nastavuje buď manuálně svářeč, nebo jej nastavuje svářečka automaticky v závislosti na hlavním proudu I_h . Velikost I_b se většinou volí v procentech hlavního proudu I_h (cca 20 - 50%). Proud I_b zajistí ionizaci prostředí a tedy "podržení" hořícího oblouku, ale nestačí k vytvoření tavné lázně a materiál se ochladí. Výsledkem je menší tepelné ovlivnění základního materiálu. Správně nastavenými pulsy lze úspěšně ovlivňovat hloubku závaru i šířku svaru. Dochází k menšímu promíšení základního materiálu, což přináší výhody při svařování heterogenních spojů. Důležitou vlastností pulzního svařování je také to, že umožňuje provádění estetických svarů - tzv. penízkové svary s překrytím 50-70%. [17,18]

V závislosti na frekvenci střídání jednotlivých fází I_h a I_b mluvíme o běžném pulsu (0,25 - 25 Hz), nebo o vysokorychlostním pulsu (20 - 600 Hz). Běžný puls je ideální pro svařování nerezové oceli a tenkých plechů. Umožňuje svařování plechů různých tlouštěk a pomáhá svářeči řídit svařovací proces a získat tak přesnou a vzhledově pěknou svarovou housenku. Vysokorychlostní puls má koncentrovanější (zúžený) oblouk a důsledkem toho je výrazně menší tepelně ovlivněná oblast. [18]



Obr. 22 – průběh proudu při pulzním svařování a „penízkové svary“. [18]

V tab. 2 jsou uvedeny doporučené svařovací parametry (hodnota proudu, průtok plynu) v závislosti na typu a tloušťce materiálu, průměru wolframové elektrody, průměru přídavného drátu a velikosti svarové mezery. [17]

			I_2				
		(mm)	(A)	(mm)	(mm)	(l/min)	(mm)
TIG DC	Ocel	0.3 - 0.5	5 - 20	0.5	6.5	3	-
	Ss	0.5 - 0.8	15 - 30	1	6.5	3	-
		1	30 - 60	1	6.5	3 - 4	1
		1.5	70 - 100	1.6	9.5	3 - 4	1.5
		2	90 - 110	1.6	9.5	4	1.5 - 2.0
		3	120 - 150	2.4	9.5	5	2 - 3
	4	140 - 190	2.4	9.5 - 11	5 - 6	3	
	5	190 - 250	3.2	11 - 12.5	6 - 7	3 - 4	
	Slitiny s Cu	0.3 - 0.8	20 - 30	0.5 - 1	6.5	4	-
	Cu	1	80 - 100	1	9.5	6	1.5
1.5		100 - 140	1.6	9.5	8	1.5	
2		130 - 160	1.6	9.5	8	1.5	
TIG AC	Hliník	1	30 - 45	1 - 1.6	6.5	4 - 6	1.2 - 2
	Al	1.5	60 - 85	1.6	9.5	4 - 6	2
		2	70 - 90	1.6	9.5	4 - 6	2
		3	110 - 160	2.4	11	5 - 6	2

Tab. 2 – doporučené parametry při svařování metodou TIG. [17]

Svařovací zařízení jsou ruční, poloautomatická nebo automatická. U ručních zařízení má svářeč v jedné ruce svařovací hubici a v druhé přídavný materiál. U poloautomatických zařízení je automaticky podáván svařovací drát a svářeč vede ručně svařovací hubici. U automatických zařízení vytvoří svarový spoj pouze stroj (např. orbitalová svářečka). S automatizací výrazně roste produktivita svařování. [13,17]

Výhody metody TIG:

- svařování ve všech polohách
- minimální rozstřík a vývin jisker
- malá TOO -> malé deformace
- dobrá kontrola nad svarovou lázní
- výborná ochrana svarové lázně (svar netřeba dále upravovat – odstranění strusky atd.)
- dobrý profil svaru a hluboký závar
- snadná možnost robotizace a automatizace
- možnost svařovat velmi tenké plechy
- lze svařovat s přídavným materiálem i bez

Nevýhody metody TIG:

- dražší a komplikovanější zařízení
- vyšší cena ochranných plynů (argon, helium)
- vyšší nároky na údržbu
- nízká rychlost svařování = nižší produktivita

7. Orbitální svařování

Jedná se o specializovanou oblast svařování, která se používá převážně na svařování trubek a potrubí. Orbitální svařování se používá převážně v chemickém, farmaceutickém, leteckém, energetickém (ropovody, plynovody), jaderném a potravinářském průmyslu, kde jsou kladeny vysoké požadavky na kvalitu svarů. Jde především o perfektní provaření svaru, vytvoření kvalitního kořene svaru a vytvoření vizuálně estetické housenky. Je ale velmi obtížné dosáhnout vysokých kvalit svarů při různých svařovacích polohách. Jedná se hlavně o polohy PE (vodorovná nad hlavou) a PD (vodorovná šikmo nad hlavou). Kvůli problému s nekonstantní kvalitou svarových spojů se ruční svařování začalo postupně nahrazovat automatizovaným orbitálním svařováním. [19]

Orbitální svařování bylo vyvinuto v 60. letech 20. století americkou firmou Northrop Aircraft Inc. pro potřeby kosmického a leteckého průmyslu. Výzkum a vývoj vedl p. Vladimír H. Pavlečka (český rodák z Roudnice nad Labem), jeho spolupracovníkem byl Ing. Russ Meredith. Tento systém svařování trubek a potrubí se využíval zejména k výrobě komponent s vysokou odolností, jako jsou hydraulické systémy. Velmi rychle se také uchytil v jaderném průmyslu. Původně se používalo speciálně upraveného TIG hořáku, který byl umístěn na orbitálním nosiči. Nosič se pohyboval po speciálním ozubeném hřebeni. Tento způsob se u moderních otevřených svařovacích hlav využívá dodnes.

Orbitální svařování je tedy automatické svařování trubek a potrubí řízené počítačem. Orbitalová hlava se upevní pomocí upínacích kleštin ke vnější straně svařované trubky. Následně orbitalová hlava vykoná kruhový pohyb kolem osy svařované trubky a vytvoří svar. Kruhový pohyb se pohybuje v rozmezí 365°-375° kvůli zaručení provaření začátku a konce svaru. [19]

U orbitálního svařování se dají použít různé metody svařování. Nejčastěji je to metoda WIG/TIG. Dále se používá metoda MIG/MAG a laserové svařování. Lze svařovat s přídavným materiálem i bez přídavného materiálu. Pomocí orbitálního svařování se obvykle svařuje hliník a jeho slitiny, titan a nerezová ocel. Lze svařovat tenkostěnné i tlustostěnné trubky, záleží na použité svařovací hlavě. [20]

Systém každého orbitálního svařování je složen z těchto hlavních částí:

- zdroj energie a regulátor
- řídicí počítač
- svařovací hlava s upínacím zařízením
- případně mechanismus podávání drátu

Faktory, které mohou ovlivnit kvalitu svaru:

- délka elektrického oblouku
- velikost a pulzní frekvence svařovacího proudu
- rychlost svařování
- ochranný plyn
- základní materiál a přídavný materiál (je-li použit)
- rozměry svařovaných trubek
- příprava stykových ploch
- vědomosti a zkušenosti svářeče/operátora

Kvalitního svaru se dosáhne díky detailním znalostem všech svařovacích parametrů. Záleží na zkušenostech operátora, jak upraví jednotlivé parametry pro konkrétní úlohy. Orbitální svařování má stejně jako každá jiná metoda svařování svoje výhody a nevýhody.

Výhody:

- rychlá a přesná metoda
- konstantní délka elektrického oblouku
- konstantní rychlost posuvu
- přesné vedení svařovací hubice
- malé deformace a malá TOO
- opakovatelnost – vyšší produktivita při sériové výrobě
- estetika svaru
- netřeba manuálně zručných svářečů
- jeden svářeč/operátor může obsluhovat více svářeček najednou

Nevýhody:

- drahé pořizovací náklady
- nutná údržba
- složitost zařízení
- nutnost přesně obrobených stykových ploch
- potřeba kvalifikované obsluhy / operátora

Nejdůležitější částí orbitálního svařování jsou svařovací hlavy. V současné době se používají dva základní způsoby orbitálního svařování pro výrobu svarů typu trubka - trubka. Prvním je otevřená svařovací hlava a druhým je uzavřená svařovací hlava. Dále existuje speciální typ svařovací hlavy pro výrobu svarů typu trubka – trubkovnice. [20]

7.1 Uzavřené svařovací hlavy

Jejich konstrukce je tvořena uzavřenou svařovací komorou, ve které je inertní atmosféra. Při svařování se elektroda otáčí o 360° kolem osy svařovaných trubek. Pohyb je zajištěn pomocí elektromotoru a soustavy převodů uvnitř tělesa svařovací hlavy. Hlava se před samotným svařováním upne na vnější průměry svařovaných trubek. Aby nedocházelo k přehřívání, jsou uvnitř hlavy umístěny kanálky, kterými proudí chladicí kapalina.

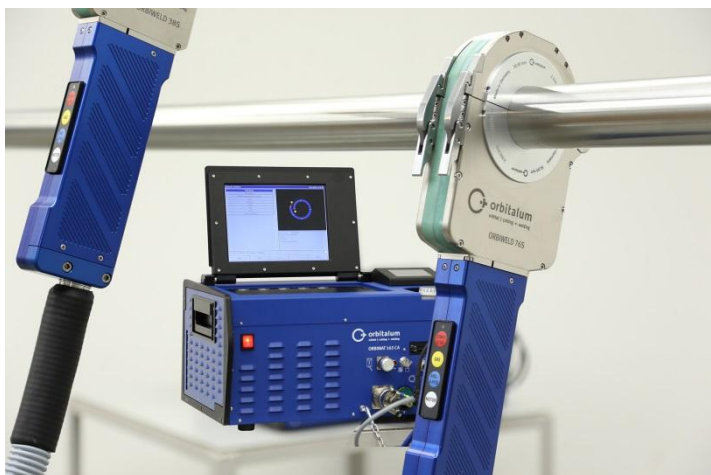
Průměry svařovaných trubek se běžně pohybují od 3 mm do 170 mm. Avšak je zapotřebí mít k dispozici upínací kazety s konkrétním průměrem, které dodává výrobce. Tento způsob svařování se používá hlavně na svařování tenkostěnných nerezových trubek. Používá se k tomu nejčastěji metoda TIG/WIG. [20]

Výhody:

- malé rozměry a hmotnost
- snadná manipulace a transport
- možnost svařovat velmi malé průměry
- uzavřená svařovací komora s inertní atmosférou

Nevýhody:

- náročné a složité upínání svařovací hlavy k trubkám
- nelze kontrolovat tavnou lázeň během svařování
- pouze metoda TIG/WIG



Obr. 23 a 24 – uzavřená svařovací orbitální hlava s el. zdrojem a řídicím PC / různé průměry uzavřených svařovacích orbitálních hlav. [20]

7.2 Otevřené svařovací hlavy

Jejich konstrukce je jednodušší než v případě uzavřených svařovacích hlav. Skládá se z upínacích excentrických kleštin, které lze snadno, přesně a pevně upnout na vnější průměr svařované trubky. Na kleštích je připevněn pohyblivý support, který pomocí elektromotoru vykonává rotační pohyb kolem osy svařované trubky. Na supportu je připevněna svařovací hlava s podavačem drátu. Hlava je také chlazená z důvodu přehřátí. Tento způsob je vhodný na svařování trubek velkých průměrů (obecně nad 170 mm) a větších tloušťek stěn. U tohoto způsobu svařování se dají použít různé metody. Nejčastěji se jedná o TIG/WIG, dále MIG/MAG a vhodná je také na laserové svařování.

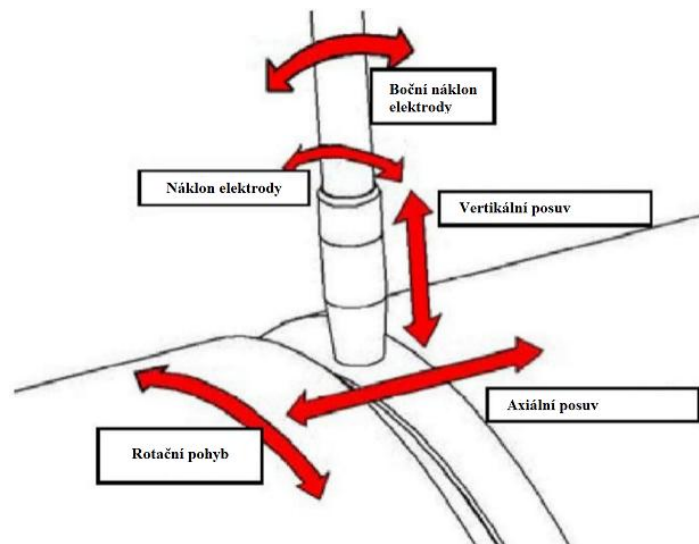
U moderních svařovacích systémů má elektroda k dispozici 4 stupně volnosti (viz obr. 25). Při snaze vyrobit co nejkvalitnější svar u tlustých trubek je to nezbytné. Pro přesné ovládání všech pohybů je zapotřebí výkonný počítač a připravený program. [20]

Výhody:

- snadné a rychlé upnutí
- snadná změna průměru
- možnost sledovat svarovou lázeň

Nevýhody:

- veliké rozměry a hmotnost
- obtížný transport
- nelze svařovat trubky o malém průměru



Obr. 25 – pohyby, které může elektroda vykonávat u otevřené svařovací orbitální hlavice. [19]



Obr. 26 – otevřená svařovací orbitální hlavice s přidavným drátem. [19]

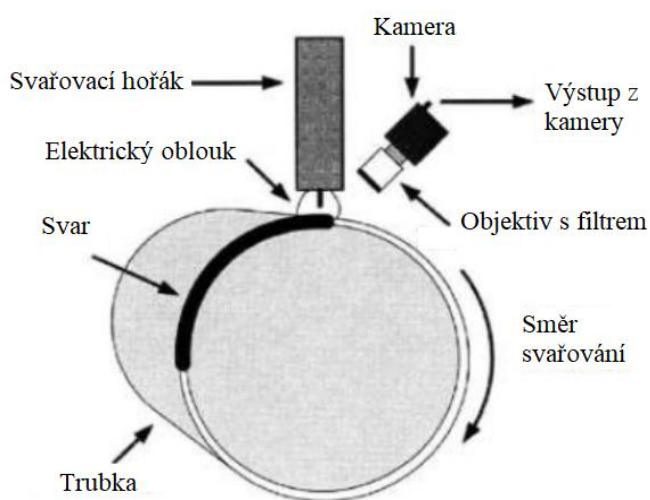


Obr. 27 – otevřená svařovací orbitální hlavice bez přidavného drátu. [19]

8. Experimentální program

V experimentální části diplomové práce byl pomocí vysokorychlostní kamery sledován svařovací proces u orbitálního svařování nerezových trubek. Byla použita otevřená orbitální svařovací hlavice z důvodu možnosti sledovat proces vzniku svaru pomocí kamery. To by u zavřené orbitální svařovací hlavice nebylo možné. Svařovalo se metodou 141 (TIG – obloukové svařování netavící se wolframovou elektrodou v inertním plynu). Na obr. 28 je znázorněno schéma experimentu diplomové práce.

Po odladění vysokorychlostní kamery a úspěšném záznamu svařovacího procesu následovala analýza a vyhodnocení svařovacího procesu. Hledaly se vady a nedostatky (např. rozstřík kovu, bubláni), které byly následně pomocí změny svařovacích parametrů eliminovány, a tím bylo dosaženo kvalitnějšího svaru. Souběžně se hledaly vnitřní vady pomocí rentgenu, kontrolovaly se mechanické vlastnosti svarových spojů a metalografie.



Obr. 28 - znázorněný návrh experimentálního programu diplomové práce.

8.1 Použitá zařízení

8.1.1 Vysokorychlostní kamera – jedná se o model NX4 – S3 (viz obr. 29) od amerického výrobce IDT (Integrated Design Tools, Inc.), který se specializuje na výrobu vysokorychlostních kamer a jejich příslušenství. Kamera má vysoký výkon pro široký rozsah aplikací, a je vybavena optickým triggerem. Záznam z ní je monochromatický (černobílý). Vnitřní paměť kamery má kapacitu 5 GB. [18]

Vysokorychlostní kamera IDT – NX4 – S3	
Maximální rozlišení	1024 x 1024
Maximální FPS při max rozlišení	3000 fps
Maximální FPS při min rozlišení	200 000 fps
Minimální doba expozice	1 [μs]
Max doba záznamu (3000 FPS/1024x1024)	1,3 [s]
Typ snímače	CMOS
Citlivost ASA/ISO	6000 ISO Mono, 2000 ISO Color
Provozní teplota	od – 40°C do +50°C
Rozměry (šířka, výška, délka)	64 x 64 x 69 [mm]

Tab. 3 – základní parametry kamery IDT – NX4 – S3. [18]



Obr. 29 – vysokorychlostní kamera IDT – NX4 – S3. [18]

8.1.2 Objektiv – na kameru byl připevněn objektiv AF-S NIKKOR 18-70mm od japonské firmy Nikon, která se zabývá vývojem a výrobou fotografické techniky. Objektiv se skládá ze tří ED skel pro minimalizaci barevné vady a dosažení vyššího rozlišení a kontrastu. Nejkratší zaostřitelná vzdálenost je 38 mm. Použitý závit na objektivu je typu C – Mount. [21]



Obr. 30 – objektiv Nikon AF-S NIKKOR 18-70mm, F3.5-4.5G ED. [21]

8.1.3 Spektrální filtr (optická propust') – z důvodu veliké intenzity světla, která vzniká při zapálení elektrického oblouku, je nutné chránit optické receptory čipu CMOS umístěného v kameře. Dále je nutné, aby laserové záření prošlo až k optickým receptorům. K tomu je potřeba použít speciální spektrální filtr, který většinu světla odfiltruje, ale laserové záření propustí. Díky tomu se kamera nezničí a natočený záznam bude pozorovatelný. Spektrální filtr je od americké firmy Thorlabs.

8.1.4 Osvětlení – podmínkou kvalitního záznamu je dobré osvětlení okolí vznikajícího svaru. Se zvyšujícími se zaznamenanými snímky za vteřinu (fps) klesá čas expozice a obraz se může zdát šerý nebo úplně tmavý. Pro dosažení kvalitního záznamu je tedy nutné použít světelný zdroj. V případě záznamu svařovacího procesu bylo použito vysoce výkonné pulzní diodové laserové osvětlení od finské firmy Cavitar Ltd. Konkrétně se jedná o model CAVILUX HF. Optický výkon tohoto zařízení je 500 W a vlnová délka je 810 ± 10 nm. Laserové osvětlení je zobrazeno na obr. 31. [6]

Druhým typem použitého osvětlení byl halogenový reflektor. Velikou výhodou halogenových žárovek je, že využívají usměrněného napájení a tím dochází ke konstantnímu světelnému záření (nevzniká blikání). Výkon tohoto osvětlení je 2x500 W. Reflektor je znázorněn na obr. 32.



Obr. 31 – pulzní laserové osvětlení CAVILUX HF. [6] Obr. 32 – halogenový reflektor 2x500 W. [8]

8.1.5 Orbitální svářečka

Orbitální svářečka je od francouzského výrobce svařovací techniky Polysoude. Skládá se z programovatelného napájecího zdroje, otevřené svařovací hlavy, podavače přídavného drátu (tlačný systém), tlakových nádob s ochranným plynem a dálkovým ovladačem. [18]

Zdrojem orbitální svářečky je středně velké mobilní zařízení se zabudovaným řídicím počítačem, chladicím zařízením pro hořák a dotykovým displejem. Jedná se o invertorový typ P6 CW. Napájeno je třífázovou soustavou o napětí 400 V. Maximální generovaný proud je 520 A. Napětí se nastavuje automaticky podle velikosti proudu. Lze svařovat konstantním nebo pulzním proudem. Zapalování elektrického oblouku probíhá bezkontaktně. Pomocí zdroje lze programovat až 6 veličin. Jedná se o:

- Maximální a minimální svařovací proud
- Průběh střídání jednotlivých impulzů
- Rychlost otáčení svařovací hlavy
- Vychylování (oscilace) svařovací hubice
- Rychlost a průběh podávání přídavného drátu
- Průběh průtoku ochranného plynu

Otevřená svařovací hlava je koncipována pouze pro svařování metodou TIG. Jedná se o model MUIV 115. Svařovací hlava je složena ze svařovací desky, elektromotoru pro rotační pohyb, servomotoru pro oscilační pohyb, upínacími svorkami, TIG hořákem s chlazením a odvíječem přídavného drátu. Maximální průměr trubky, na kterou lze hlavu upnout je 115 mm a minimální průměr je 50 mm. Hlavu lze ovládat pomocí dálkového ovladače. [18]



Obr. 33 – orbitální svářečka Polysoude – programovatelný zdroj / otevřená svařovací hlava / ovladač. [18]

Svařovací elektroda, která při experimentu byla použita, je vyrobena z wolframu, který je legován oxidem lanthanu (La_2O_3). Podíl lanthanu usnadňuje zapalování elektrického oblouku, a také má vliv na stabilní hoření elektrického oblouku i při nízkých proudech. WLa elektrody jsou univerzální téměř pro všechna použití a lze je použít pro svařování AC i DC proudem. Průměr použité elektrody byl 2,4 mm a špička byla broušena na úhel 30° . Elektroda je zobrazena na *obr. 34*. [15]



Obr. 34 – detail svařovací hubice s WLa elektrodou.

8.2 Materiál

Trubky použité při experimentu diplomové práce byly vyrobeny z materiálu 1.4307 (ekvivalent AISI 304L a ČSN 17 249). Jedná se o austenitickou korozivzdornou Cr-Ni ocel. Ocel má dobrou odolnost proti plošné korozi a velmi dobře odolává silně oxidujícím kyselinám. Tato ocel je nekalitelná, dobře leštitelná a obrobitelná. Vyznačuje se zaručenou svařitelností, i bez nutnosti použití přídatného materiálu. Po svařování je ocel odolná vůči mezikrystalové korozi. [22]

Ocel je nejčastěji používána pro výrobu zařízení, tlakových nádob a potrubí v potravinářském, farmaceutickém a chemickém průmyslu.

Trubky jsou svařované a mají rozměr 60,3 x 2 mm, jejich délka je jeden metr.

Chemické složení oceli 1.4307 [hm. %]						
C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S
max 0,03	max 2,00	max 1,00	17,0-20,0	10,0-12,5	max 0,045	max 0,030

Tab. 4 - chemické složení oceli 1.4307. [22]

8.3 Postup experimentu

Experiment se dělil na několik částí:

- Příprava a nastavení orbitální svářečky
- Příprava a nastavení vysokorychlostní kamery
- Příprava a nastavení laserového osvětlení
- Příprava vzorků na svařování
- Vyhodnocení záznamů získaných z kamery
- Příprava vzorků na mechanické zkoušky
- Vyhodnocení mechanických zkoušek
- Příprava a vyhodnocení vzorků na metalografii

8.3.1 Nastavení orbitální svářečky

Svary byly vytvořeny na programovatelné orbitální svářečce Polysoude. Ovládání svářečky a manipulace se svařovací hlavou bylo jednoduché a intuitivní. Nevyskytly se zde žádné problémy.

Na svářečce lze nastavit až šest různých parametrů. Z časových důvodů byl měněn pouze jeden parametr. Tím byl svařovací proud a měnila se jeho horní a dolní hodnota. Ostatní parametry zůstaly konstantní. Svařovalo se bez přídavného materiálu.

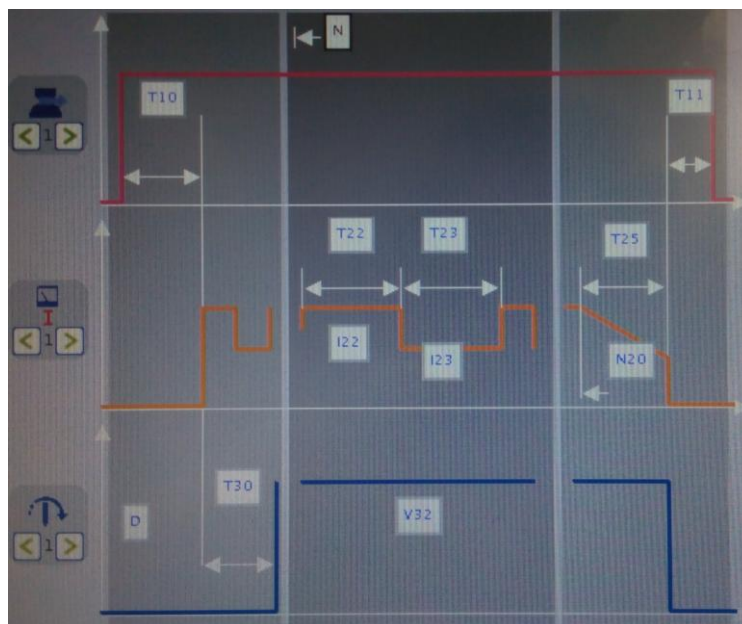
Konstantní svařovací parametry:

- Rychlost otáčení svařovací hlavy – 85 [mm/min]
- Průtok ochranného plynu – 12 [litrů/min]
- Průtok formovacího plynu – 8 [litrů/min]
- Čas působení horního proudu (T22) – 149 [ms]
- Čas působení dolního proudu (T23) – 260 [ms]
- Vzdálenost elektrody od povrchu trubky – 3 [mm]

Nekonstantní svařovací parametry:

- Velikost horního proudu (I22)
- Velikost dolního proudu (I23)

Dále byl nastaven průběh průtoku ochranného plynu a začátek otáčení svařovací hlavy (viz obr. 35). Předfuk ochranného plynu byl nastaven 5 vteřin před začátkem svařování (T10). Následovalo samotné svařování trubek. Orbitální hlava se začala otáčet 6,5 vteřiny po začátku svařování (T30) proti směru hodinových ručiček. Po konci svařování následoval 15 vteřinový dofuk ochranného plynu. To z důvodu ochrany materiálu proti korozi (T11).



Obr. 35 – nastavení parametrů na orbitální svářečce Polysoude, ze shora – průběh předfuku a dofuku ochranného plynu / velikost a doba působení horního a dolního proudu / průběh rotačního pohybu svařovací hlavy. [18]

Použitým ochranným plynem při svařování byl argon 4.8 (čistota 99.998 % Ar). Tento plyn je vhodný při svařování s důrazem na vyšší kvalitu spoje.

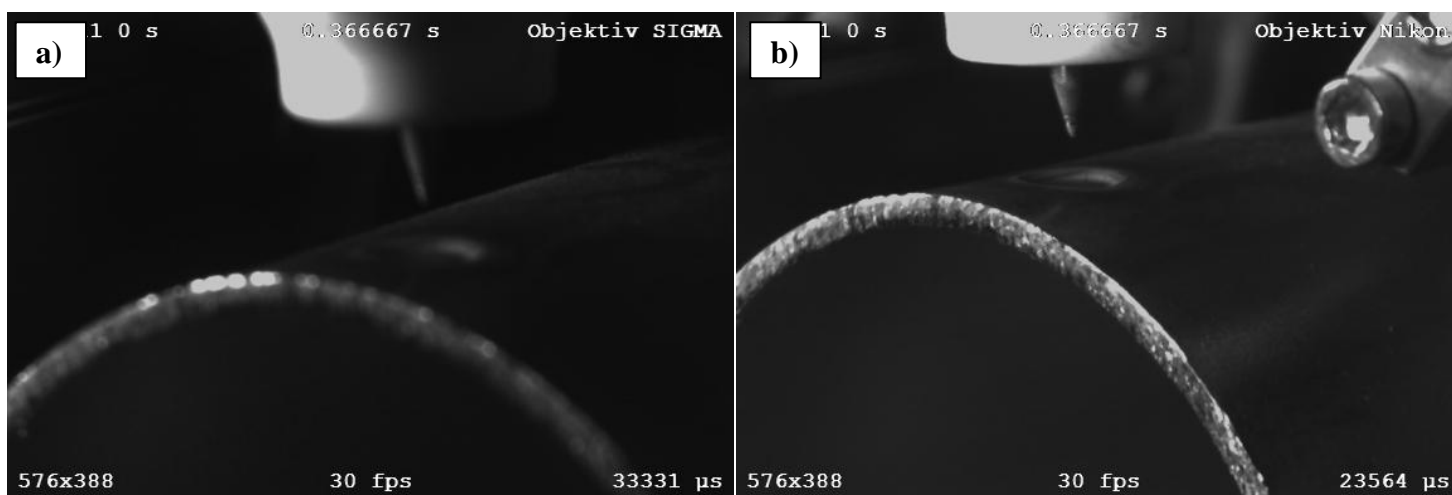
8.3.2 Nastavení vysokorychlostní kamery

Správné nastavení a odladění vysokorychlostní kamery bylo nejnáročnější částí experimentu. Bylo potřeba vyřešit problémy s objektivem a osvětlením snímané scény.

Prvním větším problémem, který musel být vyřešen, bylo zaostření objektu s připevněným spektrálním filtrem na objektivu. Filtr nepropouštěl téměř žádné světlo, a proto bylo prakticky nemožné nastavit kameru na konkrétní bod a následně zaostřit. Filtr se musel kvůli přesnému ostření neustále snímat a odnímat. Tento postup byl velmi zdoluhavý a nepřinesl žádné výsledky. Aby světelné podmínky byly ideální a problém se podařilo vyřešit, bylo nutné použít externí zdroj osvětlení. Tím bylo výkonné halogenového osvětlení, které dokázalo spektrální filtr přesvítit. Díky tomu se mohlo s kamerou manipulovat a zaostřovat i s připevněným spektrálním filtrem. Další výhodou použití externího zdroje osvětlení bylo, že na záznamu je kromě vzniku samotného svaru vidět i jeho nejbližší okolí. To je nezbytné pro komplexní hodnocení svařovacího procesu.

Ihned poté se vyskytl další problém. Nejprve byl na vysokorychlostní kameře připevněn objektiv SIGMA 70-200mm f/2,8 EX DG APO. Tento objektiv z neznámých příčin nedokázal zaostřit objekt s přidělaným spektrálním filtrem. Bez něj ostřil bez problémů. Záznamy svařovacího procesu byly proto rozmazané a nepoužitelné k analýze svařovacího procesu. Tento problém byl vyřešen použitím objektivu Nikon AF-S NIKKOR 18-70mm. Tento objektiv dokázal bez problému zaostřit objekt s připevněným spektrálním filtrem (viz obr. 36 b)). Velkou nevýhodou ovšem bylo, že tento objektiv neměl takové přiblížení jako objektiv SIGMA. Záznamy ze svařování byly tedy ostré, ale přiblížení nebylo ideální.

Pozn. – problém s ostřením u objektivu SIGMA se stále řeší s prodejcem techniky.



Obr. 36 – a) zaostření objektivu SIGMA s připevněným spektrálním filtrem, b) zaostření objektivu Nikon s připevněným spektrálním filtrem.

Dále bylo nutné vhodně nastavit parametry na samotné kameře a objektivu tak, aby získaný záznam byl co nejkvalitnější a dalo se z něj vyčíst maximum informací. Na záznamu mělo být v ideálním případě vidět roztavení základního materiálu, promíchání taveniny, tuhnutí taveniny, rozstřík kovu a případně další vady, které by mohly při procesu svařování vzniknout. Většina parametrů byla zvolena s ohledem na získané zkušenosti z předchozích mnohých měření a zkoušek.

Parametry nastavené na vysokorychlostní kameře a objektivu:

- Snímací frekvence – 400 [Hz]
- Čas expozice – 260 [μ s]
- Rozlišení – 416 x 544 (použita funkce ROI)
- Clona – f/22 (maximálně zavřená)
- Citlivost snímače – 6000 ISO (nelze měnit)

Clona v objektivu byla maximálně uzavřena ze dvou důvodů. Prvním byla velká intenzita světla od elektrického oblouku. Druhým důvodem byla požadovaná maximální hloubka ostrosti záznamu při daném přiblížení. Objektiv byl dále nastaven na maximální přiblížení a jeho vzdálenost od místa svařování byla nejkratší možná.

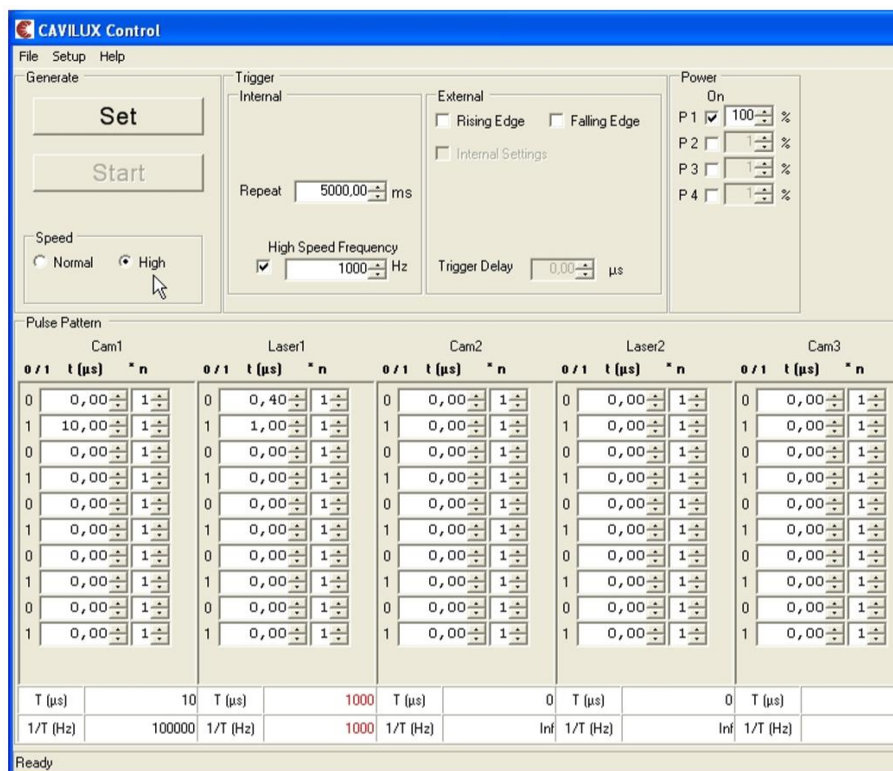
Snímací frekvence 400 Hz byla zvolena jako kompromis mezi minimální délkou záznamu a dostatečným zpomalením záznamu. Kvůli nedostatečnému přiblížení objektivu Nikon, tvořila oblast vzniku svaru jen malou část z celkového záběru záznamu. Proto se použila funkce ROI (region of interest), která umožňuje nahrávat záznam jen z určité oblasti. To umožnilo použít menší rozlišení záznamu (416 x 544), a ten díky tomu mohl být delší.

Expoziční čas (260 μ s) byl zvolen s ohledem na co nejoptimálnější světelné podmínky záznamu během svařovacího procesu.

8.3.3 Nastavení laserového osvětlení

Důležitým krokem celého experimentu bylo nastavení a odladění pulzního laserového osvětlení. Díky tomu mohl být elektrický oblouk přesvětlen a odfiltrován. Svařovací proces by se tak dal kvalitně zaznamenat, popsat a vyhodnotit. K tomu bohužel z technických důvodů nedošlo.

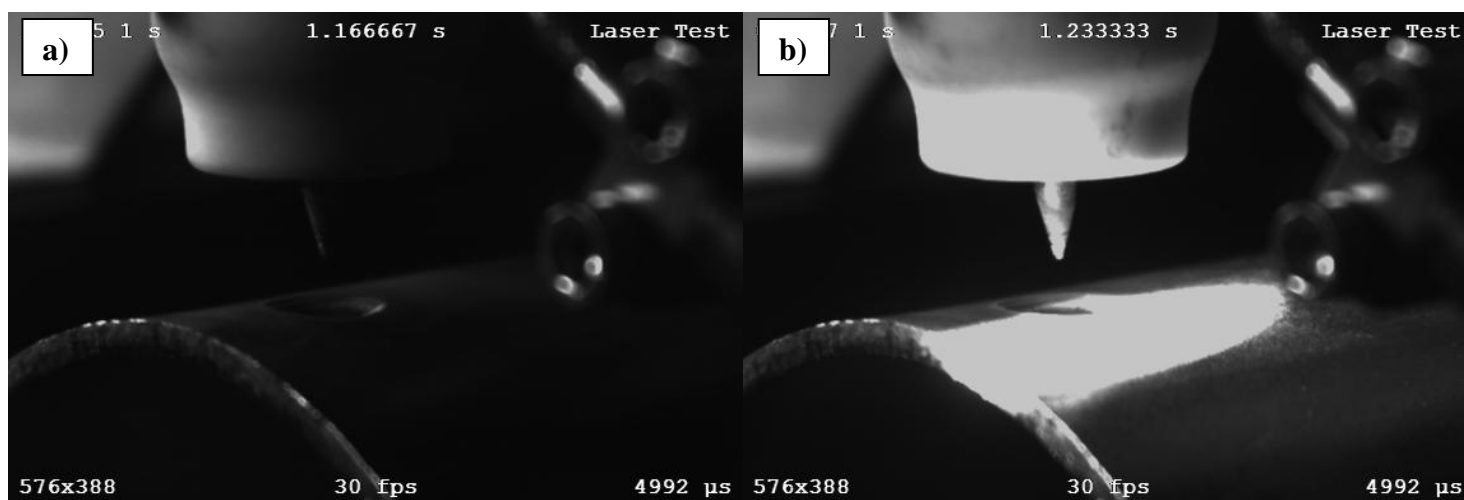
Prvním problémem který nastal, byla samotná synchronizace laserového osvětlení a vysokorychlostní kamery. Principem mělo být, že laser vysílá světlo jen tehdy, když obrazový snímač v kameře zachytává světlo. Toto je ale velmi těžko proveditelné, neboť nastavený čas expozice na kameře během svařování je velmi nízký. V programu, kterým se laserové osvětlení ovládá, byla nastavena stejná frekvence jako na vysokorychlostní kameře. Dále byly nastavovány časové intervaly pro jednotlivé pulzy (jak dlouho má laser svítit a jak dlouho nesvítit, viz *obr. 37*).



Obr. 37 – ovládací program pulzního laserového osvětlení.

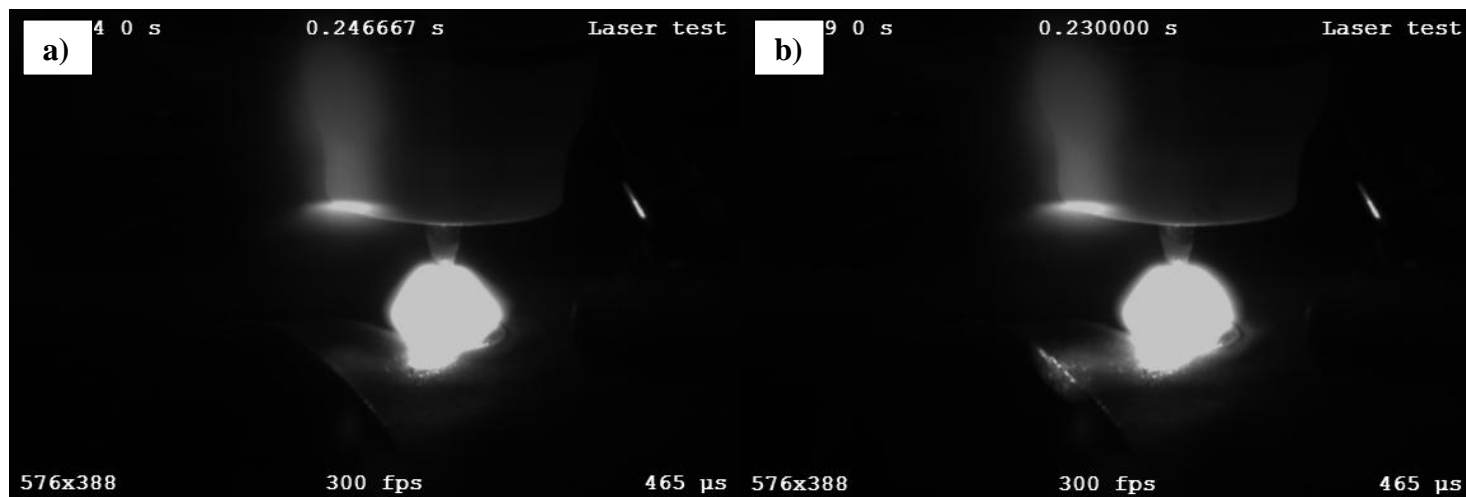
Na obr. 38 je vidět porovnání osvětlené scény pomocí laserového osvětlení a poté bez něho. V obou případech je scéna zároveň nasvětlena halogenovým osvětlením. Kdyby halogenové osvětlení bylo vypnuté, tak na obr. 38 a) není vidět nic a na obr. 38 b) jenom úzká oblast od laserového osvětlení. Z obrázků je tedy patrné, že laserové osvětlení je silné a mnohonásobně překonává osvětlení halogenové, ale osvětlená plocha je velice malá. To ale není problém, protože laserové osvětlení je zaměřeno přesně na oblast mezi svařovací elektrodu a svařovaný materiál, což je žádoucí.

V tomto případě byla vysokorychlostní kamera nastavena na 30 fps a čas expozice byl 4992 μm. Díky tomuto nastavení se podařilo laserový puls snadno zachytit. Při vyšších fps a nižších časech expozice (které jsou při nahrávání svařovacího procesu nezbytné) by bylo zachycení jednotlivých pulsů kamerou velice obtížné.



Obr. 38 – a) vypnuté laserové osvětlení, b) zapnuté laserové osvětlení.

V průběhu experimentu bylo vyzkoušeno mnoho různých variant nastavení, ale sesynchronizovat kameru a laserové osvětlení při vysokých fps a nízkých časech expozice se podařilo jen částečně. Byly zachyceny krátké okamžiky, kdy byla scéna osvětlena laserovým osvětlením a zároveň snímána kamerou. V podstatě šlo o rychlé blikání (viz obr. 39). Jednotlivé snímky, kde se synchronizace povedla, byly zkoumány a hodnoceny.



Obr. 39 – a) vypnuté laserového osvětlení při svařování, b) zapnuté laserové osvětlení při svařování.

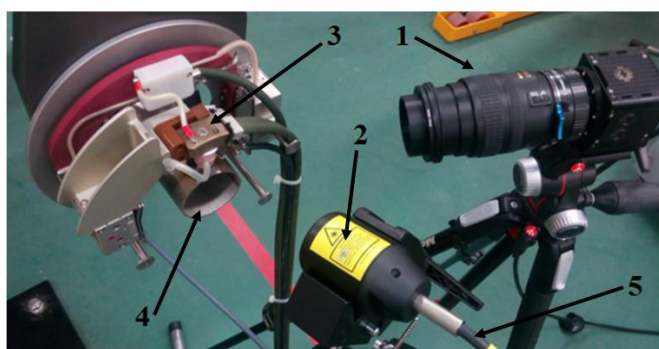
Zde ale nastal druhý a mnohem vážnější problém. Při zachycení svařovacího procesu, který byl osvětlen laserovým osvětlením (obr. 39 b)), nedošlo k odfiltrování elektrického oblouku, což se v ten okamžik předpokládalo. Kvůli tomu nebylo možné popsat to, co se odehrává ve svaru během svařování, což bylo jedním z cílů diplomové práce.

Problém byl pravděpodobně způsoben nedostatečnou intenzitou laserového osvětlení, nebo v nastavení laserového osvětlení. Obecně lze říci, že odfiltrovat elektrický oblouk je možné (viz obr. 4 b), 10 b)), ale prakticky je to velmi obtížné.

Z tohoto důvodu už nebylo laserové osvětlení během experimentu použito (bylo použito pouze halogenové osvětlení). Zaznamenával se tak pouze elektrický oblouk, který se dále vyhodnocoval.

Ovládání pulzního laserového osvětlení a synchronizace s kamerou je velmi složitá a časově náročná činnost. Při používání laserového osvětlení je nutností používat speciální ochranné brýle, jinak hrozí poškození nebo ztráta zraku. Na obr. 40 je vidět rozmístění jednotlivých zařízení při snaze odfiltrovat elektrický oblouk pomocí laserového osvětlení.

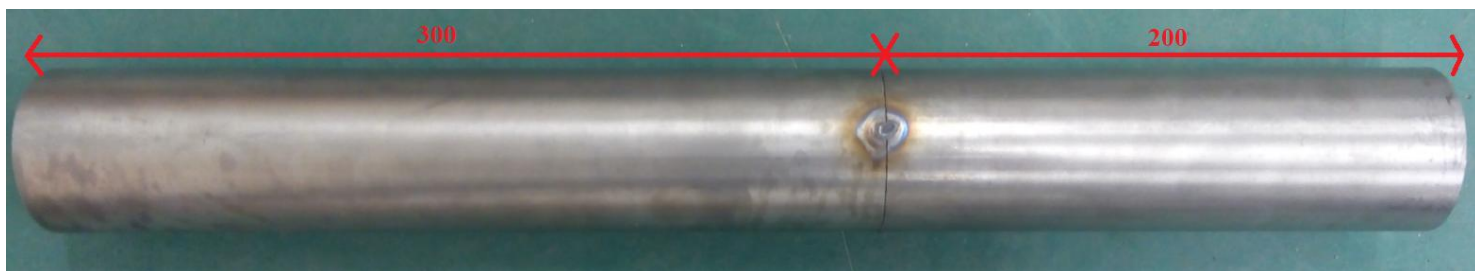
- 1 – vysokorychlostní kamera s objektivem a spektrálním filtrem
- 2 – optika laserového osvětlení
- 3 – otevřená orbitalová hlava
- 4 – svařovaný materiál
- 5 – optický kabel



Obr. 40 – rozmístění jednotlivých zařízení při experimentu.

8.3.4 Příprava vzorků na svařování

Celkem bylo pro experiment připraveno 7 vzorků, které byly svařeny a následně byly hodnoceny. Jelikož nebyly ve svařovací laboratoři k dispozici dva svařovací stoly s upínáky, které by zajistily upnutí a přesné sesazení svarových ploch, musel být základní materiál rozřezán na díly o délce 200 a 300 mm. Tyto díly byly následně sestehovány pomocí ruční metody TIG tak, aby mezi nimi nevznikla žádná mezera (viz obr. 41 a 42). Díky tomu nebylo potřeba při orbitálním svařování použít přídavného materiálu. U každé sestehované trubky se udělaly tři stehy po cca 120° pod proudem 47 A.

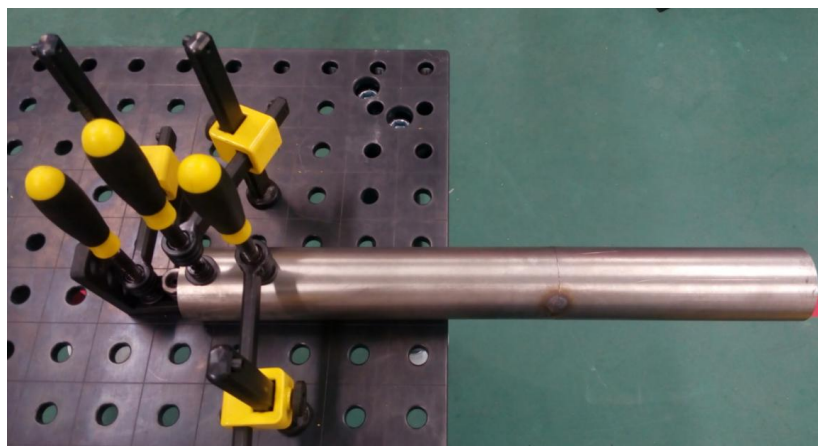


Obr. 41 – sestehovaná trubka.



Obr. 42 – detail sestehované trubky.

Delší část (300 mm) takto sestehovaných trubek byla následně upnuta pomocí tří upínáků na svařovací stůl (viz obr. 43). Poté byla na delší část trubky upnuta otevřená orbitální hlavice pomocí upínacích svorek. Z důvodu statické polohy vysokorychlostní kamery a otáčející se orbitalové hlavy nebylo možné zaznamenat svar po celém obvodu trubky. K hodnocení svařovacího procesu však stačilo svařit jen několik centimetrů trubky.



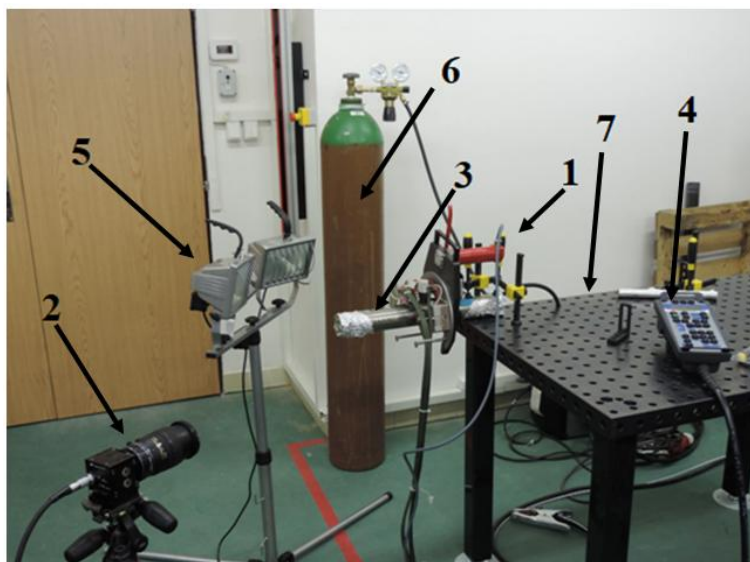
Obr. 43 – upnutí sestehované trubky ke svařovacímu stolu pomocí sklíčidel.

Z důvodu zabránění oxidace na vnitřní straně svařovaných trubek, a tím zlepšení kvality kořene svaru, bylo zapotřebí použít formovací plyn, který vytlačí okolní vzduch. Formovací plyn byl přiveden z tlakové láhve přes ucpávky do vnitřního prostoru trubky. Protože nebyly k dispozici ucpávky pro daný průměr trubky, byly vyrobeny improvizované ucpávky z hliníkové fólie (viz obr. 44). Použitým plynem byl argon 4.8 a průtok formovacího plynu byl nastaven na 8 litrů za minutu. Na obr. 45 je vidět vybavení (bez laserového osvětlení) a pracoviště, kde experiment diplomové práce probíhal.



Obr. 44 – improvizované ucpávky z Al folie a přívod formovacího plynu dovnitř svařované trubky.

- 1 – otevřená orbitální hlava
- 2 – vysokorychlostní kamera s objektivem a spektrálním filtrem
- 3 – sestehované trubky s Al ucpávkami
- 4 – dálkový ovladač
- 5 – halogenové osvětlení
- 6 – láhev s formovacím plynem
- 7 – svařovací stůl s upínáky



Obr. 45 – pracoviště, kde probíhal experimentu. [24]

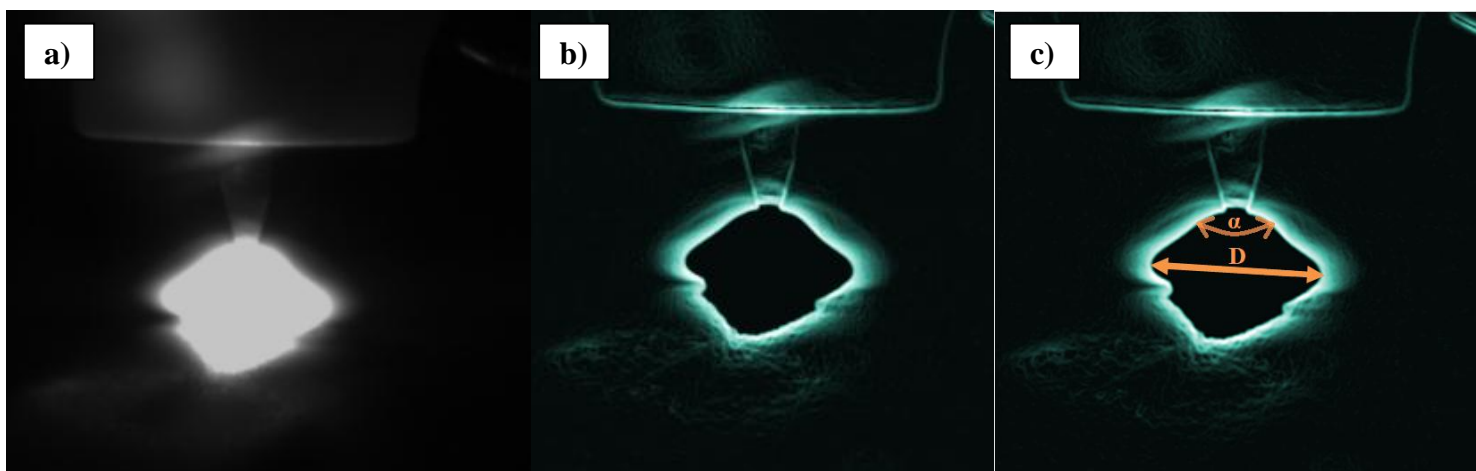
8.3.5 Vyhodnocení získaných záznamů

Velikost svařovacího proudu měla vliv na šířku elektrického oblouku D a jeho úhel α (viz *obr. 46 c*). Dále měla vliv na dobu tuhnutí svarové lázně, výslednou metalografii svaru a mechanické vlastnosti svaru.

Natočila se vždy dvě videa od každé varianty OS (OS – orbitální svařování). Poprvé byla kamera nastavena rovnoběžně s osou svařované trubky. Tím se zaznamenala šířka a úhel elektrického oblouku. Podruhé byla kamera nastavena šikmo k podélné ose svařované trubky. Díky tomu se zaznamenal samotný vznik svarového spoje a mohla se určit doba tuhnutí taveniny.

Avšak jeden nebo více snímků ze záznamu svařování (a tuhnutí svarové lázně) nemá dostatečnou vypovídací hodnotu. Proto v této práci nejsou k dispozici. Samotný záznam z vysokorychlostní kamery má vypovídací hodnotu mnohem větší. Všechna videa z kamery jsou k dispozici na přiloženém CD. V práci byly použity pouze snímky z určování šířky a úhlu elektrického oblouku.

Pro lepší vyhodnocení nahraných záznamů byly vybrané snímky upraveny v grafickém editoru GIMP. U každého snímku byly detekovány hrany. Ty se následně obarvily a snímek byl dokončen pomocí funkce úprava barevných křivek.



Obr. 46 – a) záznam ze svařování před úpravou, b) po úpravě v programu GIMP, c) měřené parametry elektrického oblouku.

8.4 Svařování

Celkem bylo svařeno 7 vzorků, u kterých se měnila pouze velikost horního a dolního svařovacího proudu. Ostatní svařovací parametry zůstaly stejné (viz kapitola 8.3.1). Svařovalo se bez přídavného materiálu. Jednotlivé svary byly označeny OS1 – OS7. V *tab. 5* je vidět přehled použitých svařovacích proudů, které byly pro jednotlivé varianty použity.

Velikost svařovacích proudů							
Varianta	OS1	OS2	OS3	OS4	OS5	OS6	OS7
Horní proud I22	85 A	80 A	80 A	100 A	60 A	120 A	50 A
Dolní proud I23	27 A	20 A	15 A	30 A	15 A	40 A	10 A

Tab. 5 – přehled použitých svařovacích proudů.

8.4.1 Svar číslo 1 – OS1

Po manuálním nastavení velikosti horního a dolního svařovacího proudu si orbitální svářečka sama nastavila optimální velikost horního a dolního svařovacího napětí (viz *tab. 6*).

Svařovací parametry OS1	
Horní svařovací proud I22	85 A
Dolní svařovací proud I23	27 A
Horní svařovací napětí U22	12,3 V
Dolní svařovací napětí U23	9,7 V

Tab. 6 – svařovací parametry u OS1.

Na záznamu z vysokorychlostní kamery nebylo kvůli elektrickému oblouku vidět, co se dělo přímo ve svaru. Bylo zaznamenáno pouze to, co se odehrávalo za svarem. To bylo promíchávání a tuhnutí svarové lázně.

Na začátku svařování bylo patrné, že elektrický oblouk natavuje základní materiál, ale nic více se nedalo ze záznamu vyčíst. Poté, co se začala orbitální hlava otáčet, se stal záznam zajímavějším. Bylo zde vidět, jak se roztavený základní materiál promíchával, postupně tuhnul a vytvářel se „penízkový“ svar (svar s překrytím cca 70 %).

Při působení horního proudu bylo do materiálu vneseno teplo, které vytvořilo tavnou lázeň. Tavná lázeň se roztekla do všech směrů, nejvíce však dozadu za elektrický oblouk. Lázeň tak měla tvar podobný elipse. Jakmile se horní proud změnil na dolní, klesla teplota svarové lázně a ta se částečně přelila zpět k elektrickému oblouku a částečně ztuhla. Jakmile se opět dolní proud změnil na horní, teplota se prudce zvýšila, vytvořilo se více taveniny a ta se opět rozlila za elektrický oblouk, kde částečně překryla už ztuhlou taveninu. Tímto způsobem vznikl výše zmíněný „penízkový“ svar, který byl na záznamu dobře viditelný.

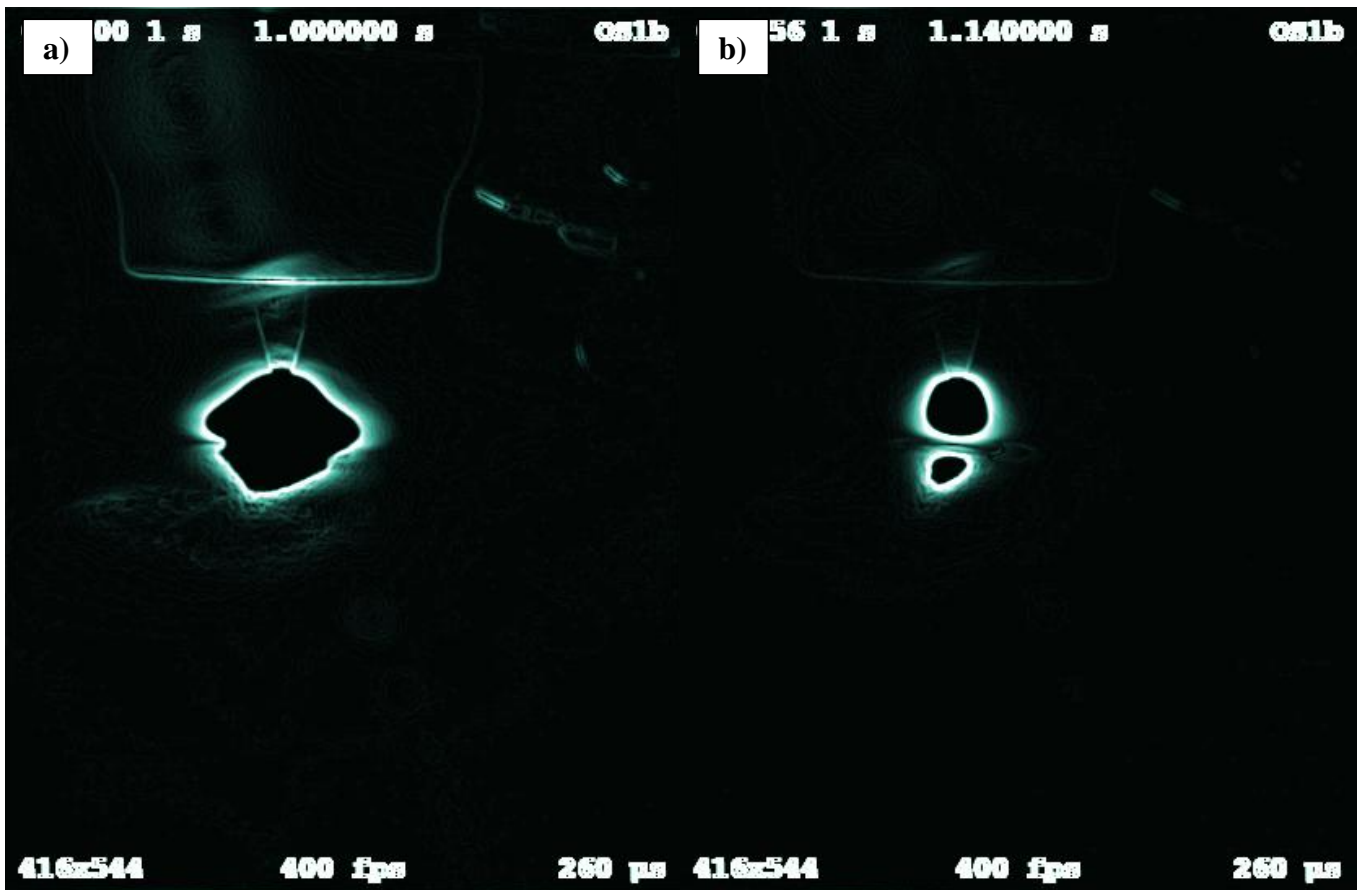
Neustálou změnou proudu se tavná lázeň přelávala sem a tam, a tím se promíchávala. Na záznamu to bylo viditelné díky drobným nečistotám, které byly v tavné lázni obsaženy. Tyto nečistoty se při změně proudu neustále pohybovaly. Z trajektorie pohybu nečistot lze vyvodit, že proudění tavné lázně bylo turbulentní.

Na záznamu z vysokorychlostní kamery byl dobře viditelný okamžik, kdy se tavenina při působení dolního proudu změnila v tuhou fázi. Díky možnosti přiřazení aktuálního času k jednotlivým snímkům vysokorychlostního záznamu, šlo poměrně snadno určit dobu tuhnutí svarové lázně.

V grafickém editoru GIMP byly upraveny vybrané snímky elektrického oblouku při působení horního a dolního proudu. Pomocí funkce měření vzdálenosti byla změřena šířka a úhel elektrického oblouku. Při působení dolního proudu nemělo měření úhlu elektrického oblouku smysl, protože byl vždy podobný kruhu. Naměřené hodnoty jsou zobrazeny v *tab. 7*.

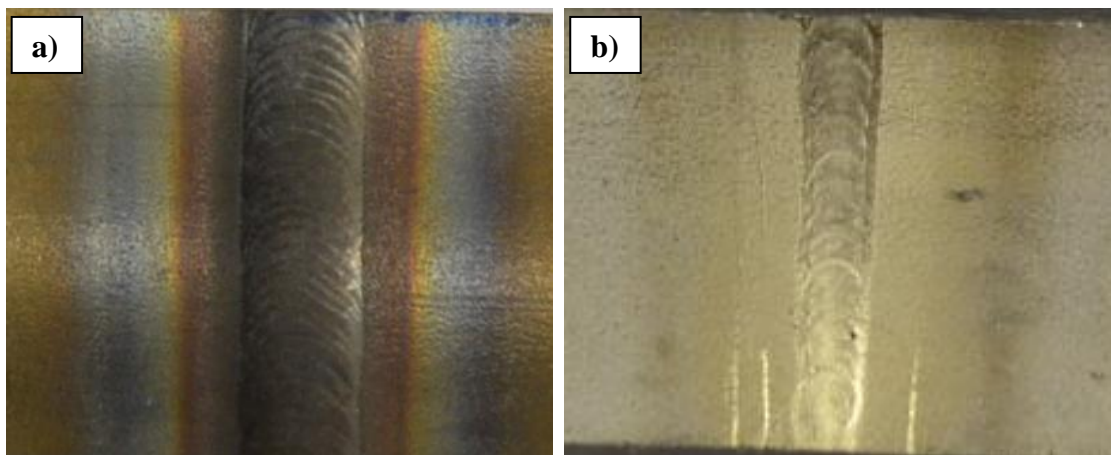
Naměřené hodnoty OS1	
Šířka elektrického oblouku – horní proud	6,9 mm
Šířka elektrického oblouku – dolní proud	2,8 mm
Úhel elektrického oblouku – horní proud	101°
Doba tuhnutí taveniny	172 ms

Tab. 7 – naměřené hodnoty ze svaru OS1.



Obr. 47 – upravené snímky svaru OSI, a) horní proud, b) dolní proud.

Na obr. 47 lze vidět elektrický oblouk při působení horního a dolního svařovacího proudu. Kromě samotného oblouku byl zde vidět i odraz elektrického oblouku v základním materiálu.



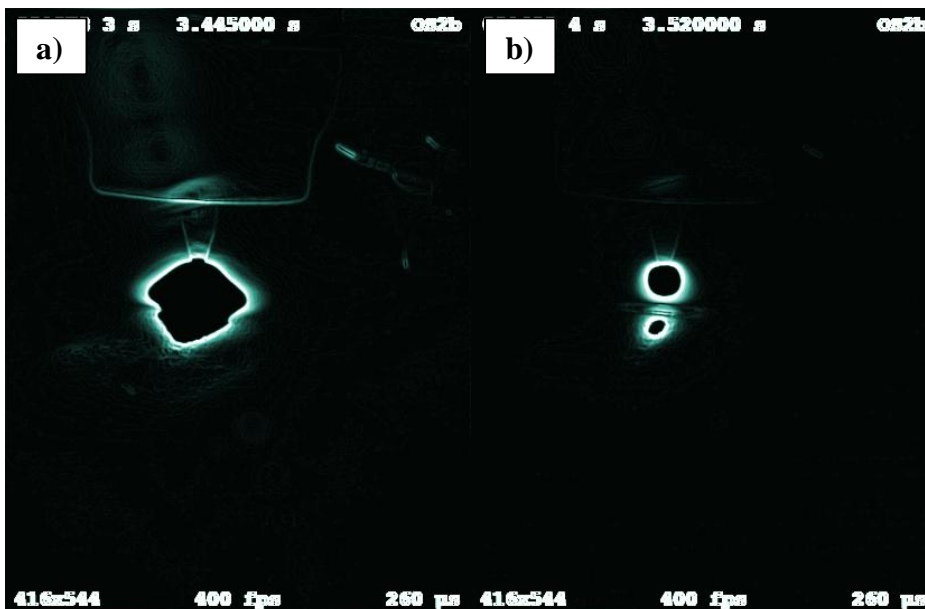
Obr. 48 – svar OSI a) vnější strana svaru b) vnitřní strana svaru.

Z obr. 48 b) je patrné, že svar měl dobře provařený kořen a z obr. 48 a) je vidět, že svar byl vizuálně bez vad. Z estetického hlediska byla svařová housenka v pořádku.

8.4.2 Svar číslo 2 – OS2

Svařovací parametry OS2	
Horní svařovací proud I22	80 A
Dolní svařovací proud I23	20 A
Horní svařovací napětí U22	11,8 V
Dolní svařovací napětí U23	9,5 V

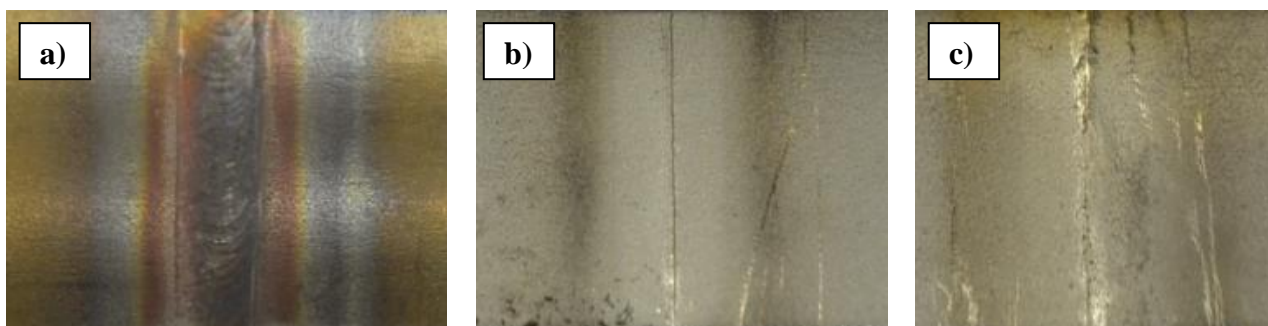
Tab. 8 – svařovací parametry u OS2.



Obr. 49 – upravené snímky svaru OS2, a) horní proud, b) dolní proud.

Naměřené hodnoty OS2	
Šířka elektrického oblouku – horní proud	6,4 mm
Šířka elektrického oblouku – dolní proud	2,1 mm
Úhel elektrického oblouku – horní proud	99,9°
Doba tuhnutí taveniny	166 ms

Tab. 9 – naměřené hodnoty ze svaru OS2.



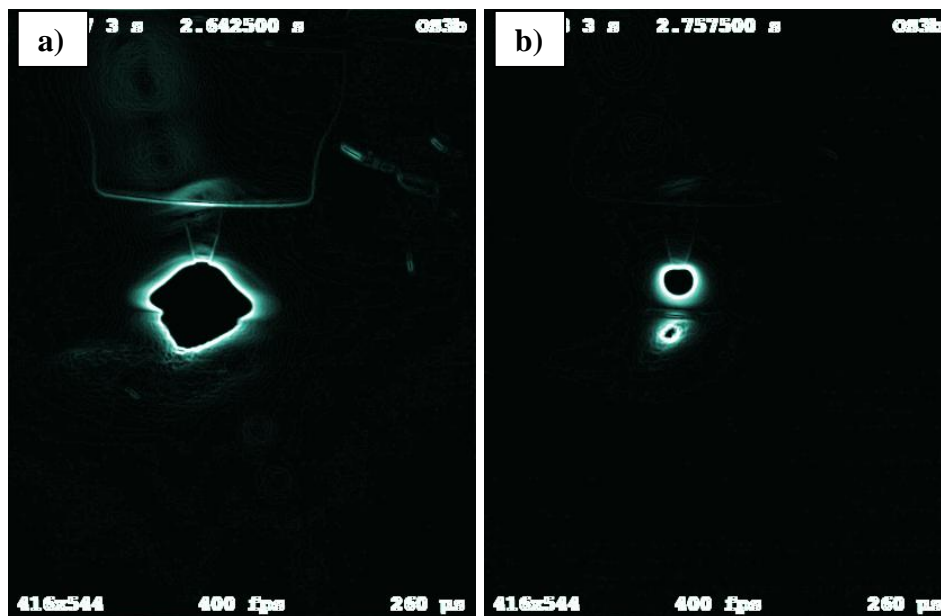
Obr. 50 – svar OS2 a) vnější strana svaru b) vnitřní strana svaru c) vnitřní strana svaru.

Z obr. 50 b) je zřejmé, že kořen svaru nebyl provařen a z obr. 50 c), že byl provařen jen částečně. Neprovařený kořen svaru je nepřijatelná vada. Do materiálu nebylo vneseno potřebné teplo, které by natavilo základní materiál v celém průřezu základního materiálu. Elektrický oblouk byl menší než u svaru OS1. To bylo způsobeno nižšími svařovacími proudy. Proces vzniku penízkového svaru byl srovnatelný s předchozím případem. Na vnější straně svaru nebyly opět zřejmé žádné vady.

8.4.3 Svar číslo 3 – OS3

Svařovací parametry OS3	
Horní svařovací proud I22	80 A
Dolní svařovací proud I23	15 A
Horní svařovací napětí U22	11,5 V
Dolní svařovací napětí U23	9,4 V

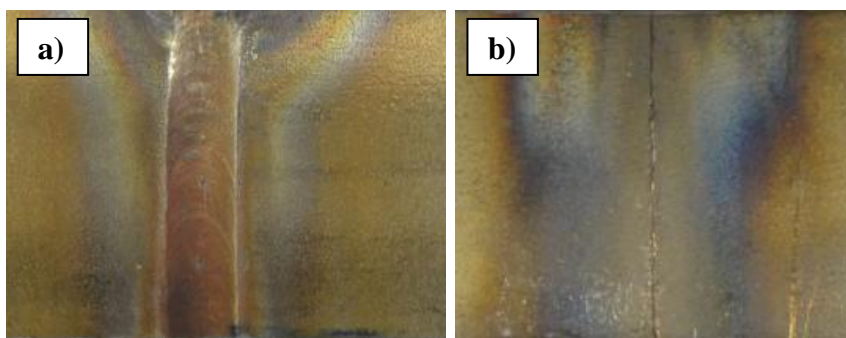
Tab. 10 – svařovací parametry u OS3.



Obr. 51 – upravené snímky svaru OS3, a) horní proud, b) dolní proud.

Naměřené hodnoty OS3	
Šířka elektrického oblouku – horní proud	6,4 mm
Šířka elektrického oblouku – dolní proud	2,0 mm
Úhel elektrického oblouku – horní proud	94.5°
Doba tuhnutí taveniny	151 ms

Tab. 11 – naměřené hodnoty ze svaru OS3.



Obr. 52 – svar OS3 a) vnější strana svaru b) vnitřní strana svaru.

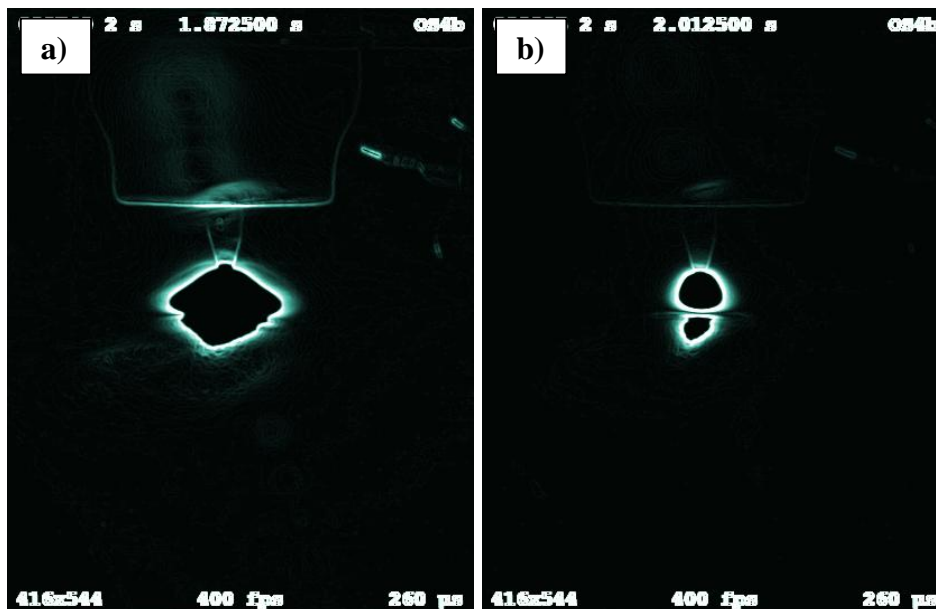
Z obr. 52 b) je vidět, že kořen svaru byl opět neprovařený. To se dalo předpokládat vzhledem k ještě nižším hodnotám svařovacích proudů než v případě OS2. Na vnější straně svaru nebyly patrné žádné vady.

Pozn. – z časových důvodů byly nejprve svařeny všechny trubky, které byly následně rozřezány. Až po rozřezání bylo zjevné, že kořeny svarů nejsou provařené.

8.4.4 Svar číslo 4 – OS4

Svařovací parametry OS4	
Horní svařovací proud I22	100 A
Dolní svařovací proud I23	30 A
Horní svařovací napětí U22	12,9 V
Dolní svařovací napětí U23	9,7 V

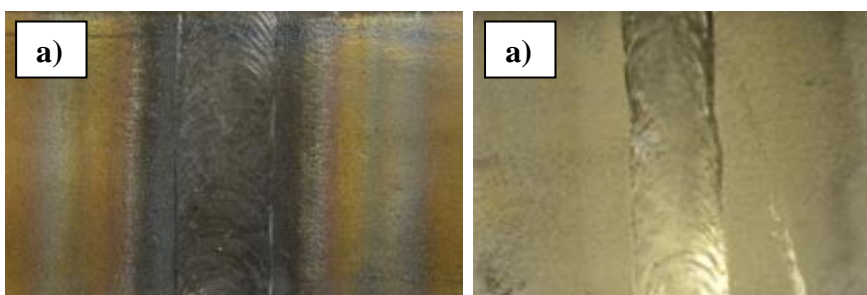
Tab. 12 – svařovací parametry u OS4.



Obr. 53 – upravené snímky svaru OS4, a) horní proud, b) dolní proud.

Naměřené hodnoty OS4	
Šířka elektrického oblouku – horní proud	7,4 mm
Šířka elektrického oblouku – dolní proud	2,9 mm
Úhel elektrického oblouku – horní proud	115,5°
Doba tuhnutí taveniny	214 ms

Tab. 13 – naměřené hodnoty ze svaru OS4.



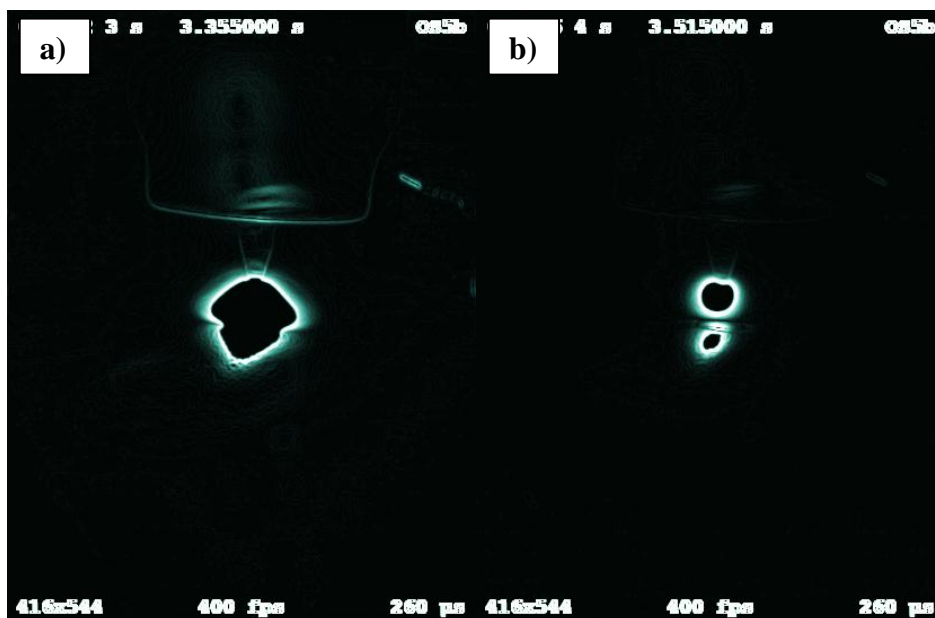
Obr. 54 – svar OS4 a) vnější strana svaru b) vnitřní strana svaru.

V tomto případě byl kořen svaru dobře provařený. Svar měl největší šířku a elektrický oblouk byl mnohem větší než v předchozích případech. Hodnoty proudu a tím pádem vnesené teplo do svaru bylo vyšší než v případě OS1. Kvůli tomu má svar větší teplem ovlivněnou oblast, která se negativně projevila na mechanických vlastnostech svaru. Na vnější ani vnitřní straně svaru nebyly vizuálně viditelné žádné vady ani porušení. Proces vzniku penízkového svaru probíhal stejným způsobem jako u předchozích svarů.

8.4.5 Svar číslo 5 – OS5

Svařovací parametry OS5	
Horní svařovací proud I22	60 A
Dolní svařovací proud I23	15 A
Horní svařovací napětí U22	10,5 V
Dolní svařovací napětí U23	10,1 V

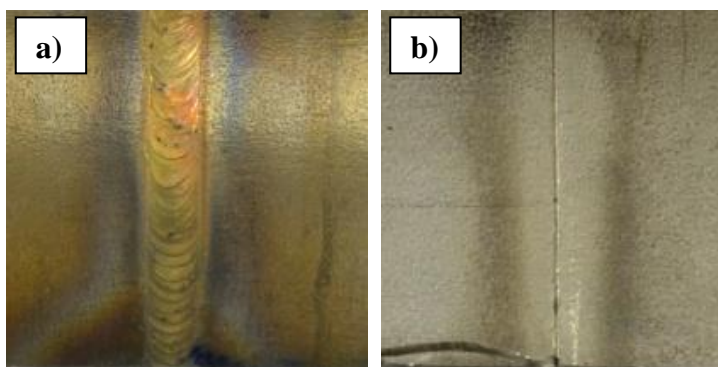
Tab. 14 – svařovací parametry u OS5.



Obr. 55 – upravené snímky svaru OS5, a) horní proud, b) dolní proud.

Naměřené hodnoty OS5	
Šířka elektrického oblouku – horní proud	5,5 mm
Šířka elektrického oblouku – dolní proud	2,1 mm
Úhel elektrického oblouku – horní proud	95°
Doba tuhnutí taveniny	132 ms

Tab. 15 – naměřené hodnoty ze svaru OS5.



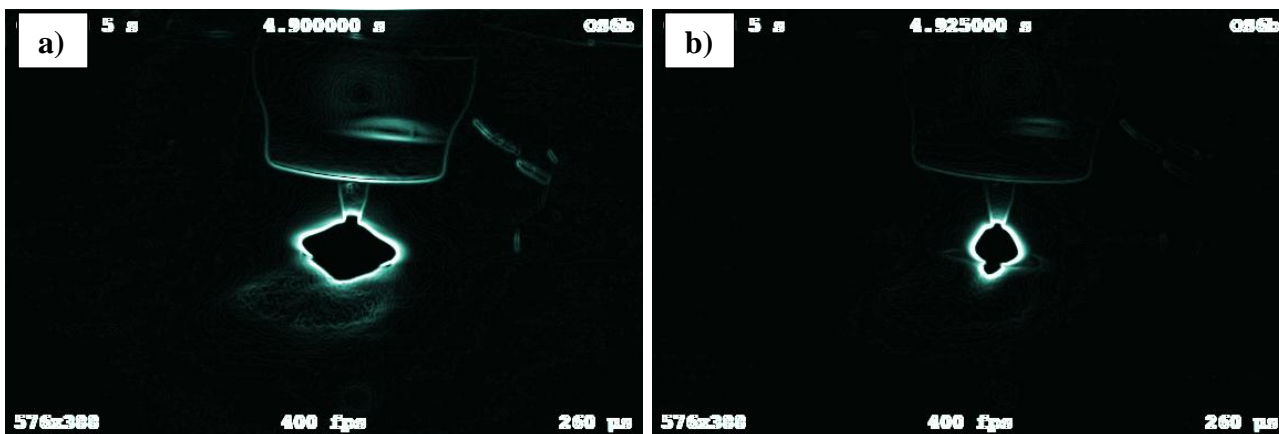
Obr. 56 – svar OS5 a) vnější strana svaru b) vnitřní strana svaru.

Z obr. 56 b) lze vyčíst, že v důsledku nízkých hodnot svařovacích proudů neměl svar provařený kořen. Svar byl velmi úzký a elektrický oblouk byl velmi malý. Neprovařený kořen svaru se zásadně projevil na jeho mechanických vlastnostech.

8.4.6 Svar číslo 6 – OS6

Svařovací parametry OS6	
Horní svařovací proud I22	120 A
Dolní svařovací proud I23	40 A
Horní svařovací napětí U22	15,7 V
Dolní svařovací napětí U23	10,9 V

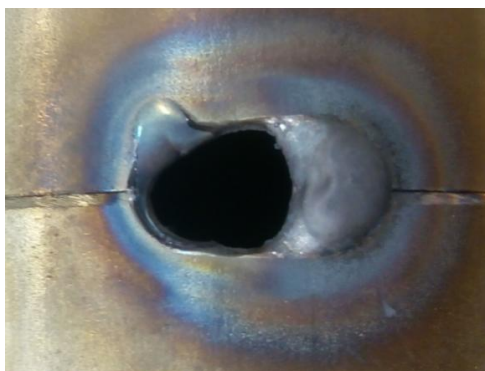
Tab. 16 – svařovací parametry u OS6.



Obr. 57 – upravené snímky svaru OS6, a) horní proud, b) dolní proud.

Naměřené hodnoty OS6	
Šířka elektrického oblouku – horní proud	7,45 mm
Šířka elektrického oblouku – dolní proud	3,45 mm
Úhel elektrického oblouku – horní proud	134,5°
Doba tuhnutí taveniny	-

Tab. 17 – naměřené hodnoty ze svaru OS6.



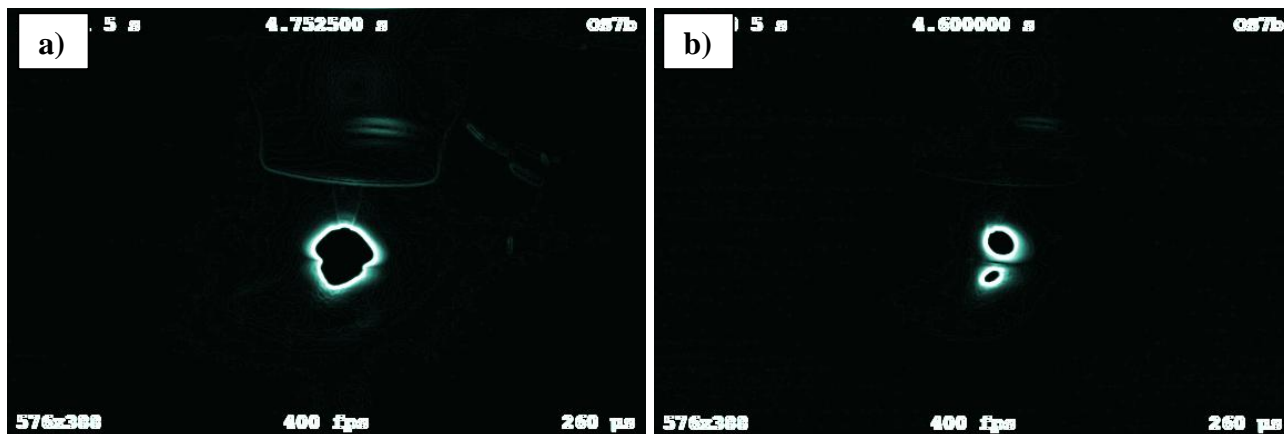
Obr. 58 – propálený základní materiál u svaru OS6.

Z obr. 58 je patrné, že svařovací proud 120 A vnesl do svaru příliš velké teplo. V okolí svařování byl základní materiál po pár vteřinách roztaven natolik, že se propadl dovnitř trubky. Při takto vysokých proudech nelze u 2 mm silného základního materiálu vytvořit svarový spoj. Z tohoto důvodu nemohly být u této varianty prováděny mechanické zkoušky.

8.4.7 Svar číslo 7 – OS7

Svařovací parametry OS7	
Horní svařovací proud I22	50 A
Dolní svařovací proud I23	10 A
Horní svařovací napětí U22	10,1 V
Dolní svařovací napětí U23	11,4 V

Tab. 18 – svařovací parametry u OS7.



Obr. 59 – upravené snímky svaru OS7, a) horní proud, b) dolní proud.

Naměřené hodnoty OS7	
Šířka elektrického oblouku – horní proud	4,6 mm
Šířka elektrického oblouku – dolní proud	2,1 mm
Úhel elektrického oblouku – horní proud	82,1°
Doba tuhnutí taveniny	-

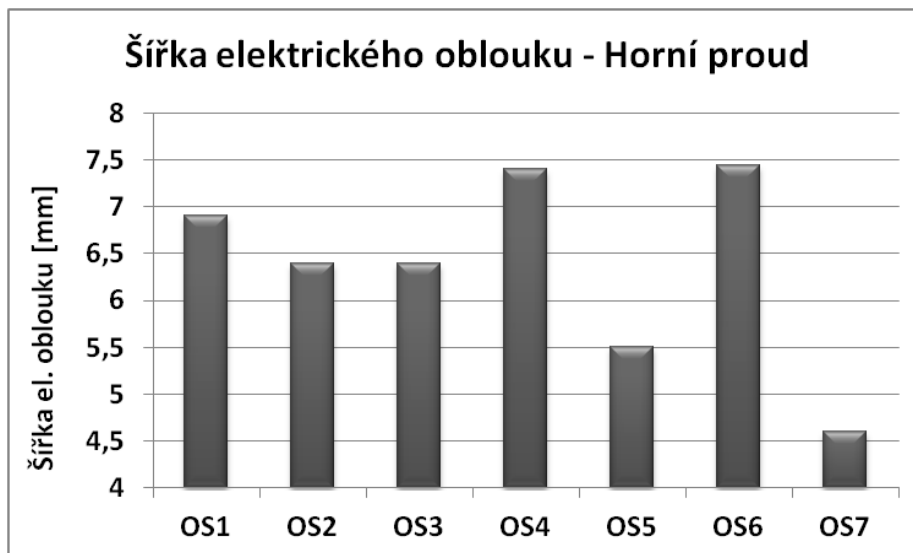
Tab. 19 – naměřené hodnoty ze svaru OS7.



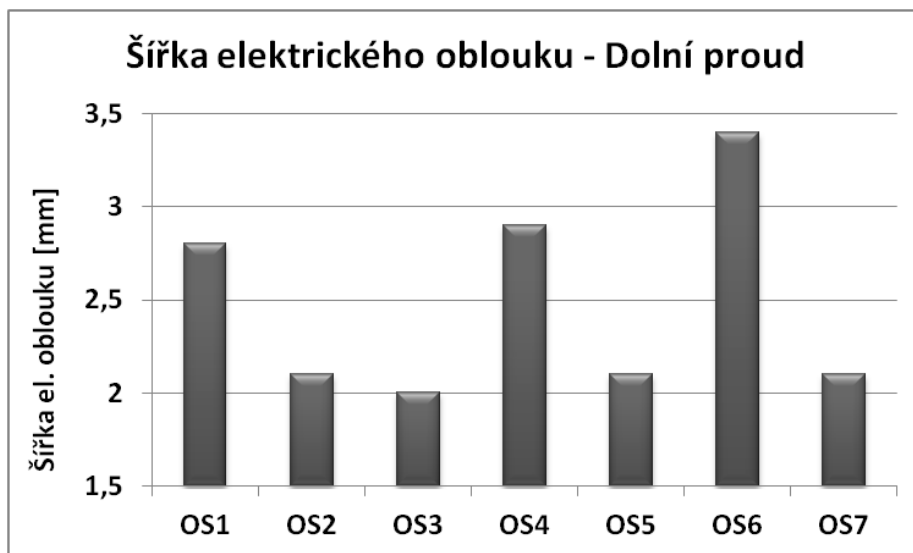
Obr. 60 – propálený základní materiál u svaru OS7.

Z obr. 60 lze vidět, že nedošlo ke vzniku svarového spoje. Vnesené teplo bylo příliš malé. Základní materiál byl na krajích lehce nataven, ale nedošlo k rozliti a promíchání taveniny obou základních materiálů. Z tohoto důvodu ani u této varianty nemohly být prováděny mechanické zkoušky.

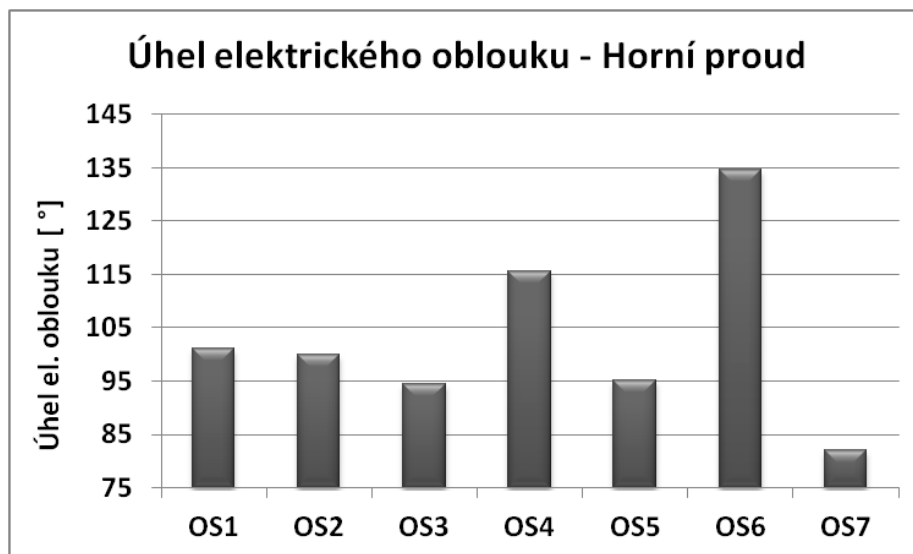
Ze záznamu bylo dobře viditelné, že i při nízkých hodnotách svařovacího proudu byl elektrický oblouk stabilní. To díky použití wolframové elektrody legované oxidem lanthanu. Ten usnadňuje zapalování a stabilizuje elektrický oblouk.



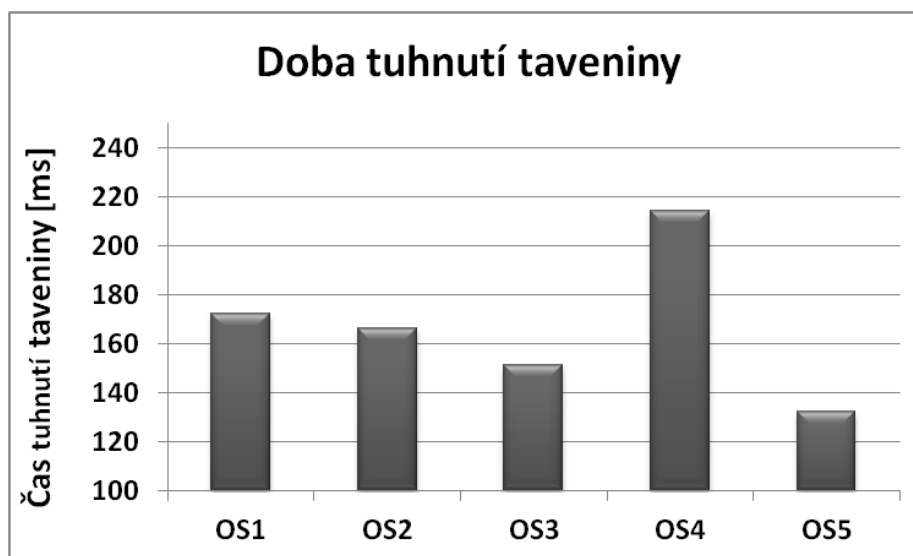
Graf 1 – porovnání šířky elektrického oblouku – horní proud.



Graf 2 – porovnání šířky elektrického oblouku – dolní proud.



Graf 3 – porovnání úhlu elektrického oblouku – horní proud.



Graf 4 – porovnání doby tuhnutí taveniny.

Z grafů 1 a 2 lze vidět, že čím větší byla hodnota elektrického proudu, tím větší byla šířka elektrického oblouku. Největší šířky elektrického oblouku při působení horního proudu tak podle předpokladu dosáhl svar OS6 (7,45 mm) a naopak nejmenší šířky dosáhl svar OS7 (4,6 mm). Při působení dolního proudu byla šířka elektrického oblouku největší u svaru OS6 (3,45 mm) a nejmenší u svaru OS3 (2,0 mm). Šířka elektrického oblouku u svaru OS7 při působení dolního proudu byla větší než šířka elektrického oblouku OS3, přestože byl svařovací proud u OS7 nižší. To bylo způsobeno malým vychýlením elektrického oblouku a také jeho malou deformací (elektrický oblouk byl lehce protáhlý).

Z grafu 3 je zřejmé, že se zvyšující se hodnotou elektrického proudu se zvětšoval i úhel rozevření elektrického oblouku. Největší úhel tak vznikl u svaru OS6 (134,5°) a nejmenší úhel vznikl u svaru OS7 (82,1°).

Na grafu 4 je vidět, že hodnota elektrického proudu měla i značný vliv na dobu tuhnutí taveniny. Čím byla hodnota elektrického proudu větší, tím se do materiálu vneslo více tepla a vytvořilo se i více taveniny, která pak tuhla mnohem pomaleji. U svaru OS4 vzniklo nejvíce taveniny a doba tuhnutí byla nejdelší (214 ms). Nejrychleji tavenina ztuhla u svaru OS5 (132 ms), protože se jí zde vytvořilo nejméně. U svaru OS6 a OS7 nebylo možné vyhodnotit dobu tuhnutí. V případě svaru OS6 bylo do materiálu vneseno příliš velké teplo a vzniklo v porovnání s ostatními svary velmi mnoho taveniny. Než stačila tavenina ztuhnout, došlo k jejímu propadu dovnitř trubky. U svaru OS7 bylo naopak teplo vnesené do materiálu příliš malé, a došlo pouze k natavení hran svařovaných trubek.

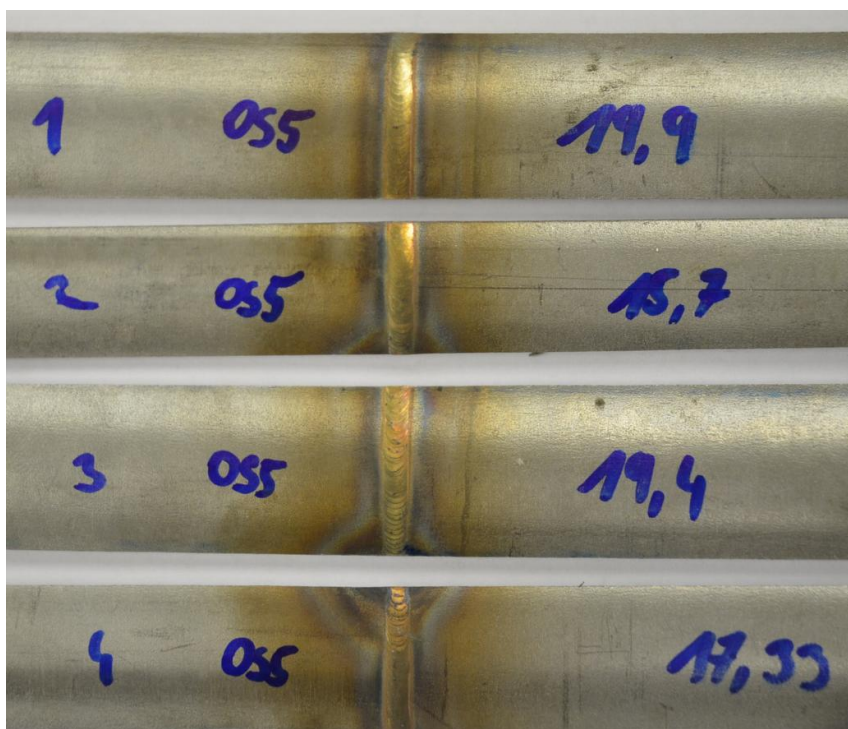
8.5 Příprava vzorků na mechanické zkoušky

Po získání vysokorychlostního záznamu byly svařené trubky poslány do dílny KMM. Zde byly na pásové pile ARG 220 Plus rozřezány na proužky o délce 220 mm a šířce 20 mm. Tyto vzorky byly použity pro rentgenové zkoušky, mechanické zkoušky svarů a metalografii. Kvůli omezenému počtu sestehovaných trubek (viz *obr. 41*), byly vyrobeny pouze 4 ks od každé varianty.

Pozn. – při přípravě trubek na svařování musely být trubky sestehovány pomocí ruční metody TIG. Kvůli tomu byly na některých vzorcích vidět části stehu, které tam být neměly. Dobře je to patrné na *obr. 61*, kde mezi vzorkem OS5-3 a OS5-4 byl steh.

Pro mechanické zkoušky byly vyrobeny vzorky pouze ze svarů OS1 – OS5. Vytvářet vzorky ze svarů OS6 a OS7 nemělo smysl, protože v prvním případě bylo do materiálu vneseno příliš velké teplo a základní materiál se tak propadl dovnitř trubky. Ve druhém případě bylo vnesené teplo do materiálu příliš malé a trubky se nesvařily.

Vyrobené vzorky měly mít stejnou šířku $20 \pm 0,1$ mm. Toto se bohužel nepodařilo dodržet a šířka jednotlivých vzorků se tak výrazně liší (viz *obr. 61*). V *tab. 20* je uvedena šířka jednotlivých vzorků.



Obr. 61 – ukázka různé šířky vyrobených vzorků na mechanické zkoušky, sada OS5.

Šířka jednotlivých vzorků pro mechanické zkoušky [mm]					
	OS1	OS2	OS3	OS4	OS5
1 vzorek	17,2	17,6	20,0	19,1	19,9
2 vzorek	19,4	19,0	18,7	18,1	15,7
3 vzorek	19,5	19,6	18,1	18,6	19,4
4 vzorek	19,3	18,9	18,9	23,5	17,3

Tab. 20 – šířka jednotlivých vzorků pro mechanické zkoušky.

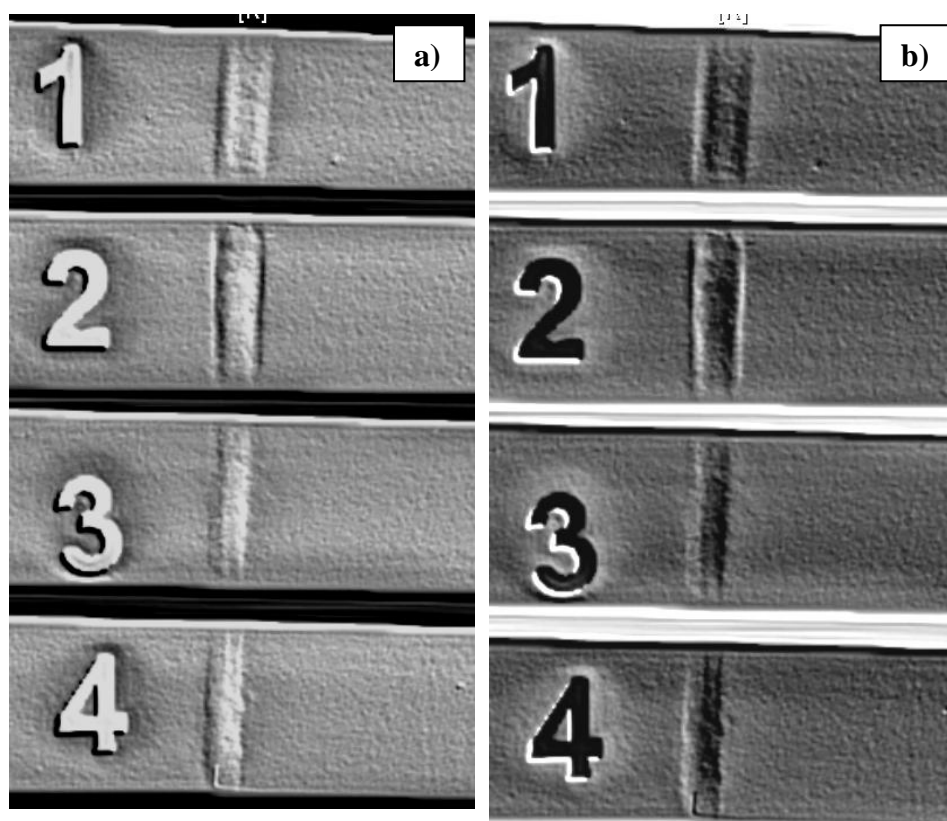
8.6 Rentgenová zkouška

Před mechanickými zkouškami byla nejprve provedena rentgenová zkouška. Tato zkouška patří do skupiny nedestruktivního zkoušení materiálu. Účelem je najít vnitřní vady, které nejsou okem viditelné.

Rentgenové záření je elektromagnetické vlnění s velmi krátkou vlnovou délkou, které má schopnost pronikat materiálem. Při průchodu záření zkoušeným materiálem dochází k zeslabení jeho intenzity podle tloušťky a hustoty materiálu. Pokud se v materiálu vyskytuje vada (např. dutina), není v tomto místě záření tolik pohlcováno jako v místě bez vady. To se na finálním snímku projeví zčernáním různé intenzity.

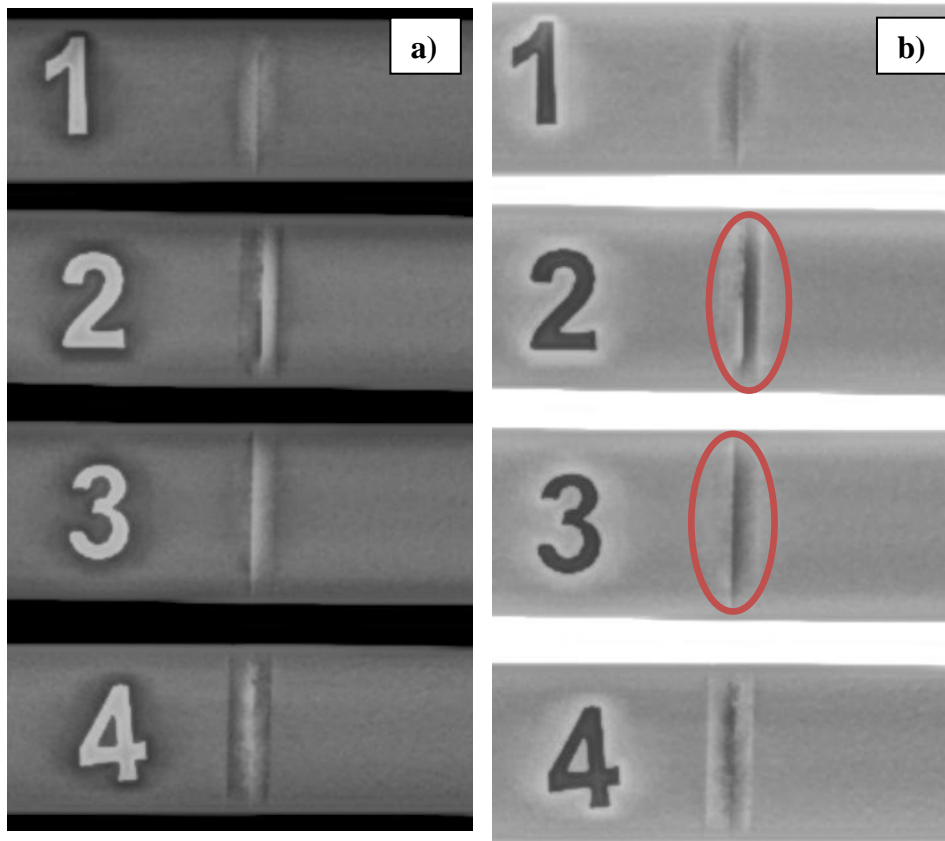
Rentgenová zkouška svarových spojů proběhla v rentgenové kabině. Zařízení se skládalo z rentgenové lampy ERESKO 42 MF-4 a přímého detektoru GE DXR250U-W. Toto zařízení dokáže detekovat vady větší než 0,2 mm.

Rentgenová lampy měla nastavenou hodnotu proudu na 4,5 mA a napětí bylo nastaveno na hodnotu 90 kV. Na vzorky byla položena olověná čísla kvůli identifikaci jednotlivých vzorků. Všechny vzorky byly zkontrolovány negativem i pozitivem.



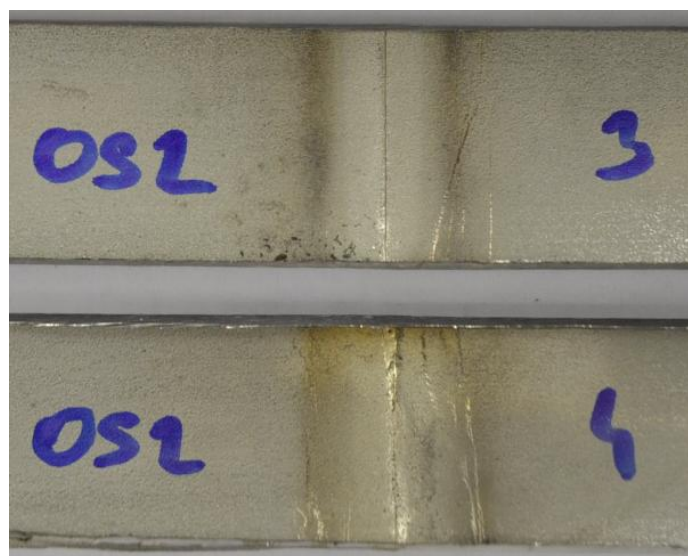
Obr. 62 – rentgenový snímek vzorků OS1, a) negativ, b) pozitiv.

Na obr. 62 lze vidět rentgenové snímky svarů z varianty OS1. Všechny svary byly bez viditelných vad. Pouze u vzorku OS1-2 byl svar lehce propadlý, což se na rentgenu projevilo výraznými hranami svaru. To byla ale zanedbatelná vada.

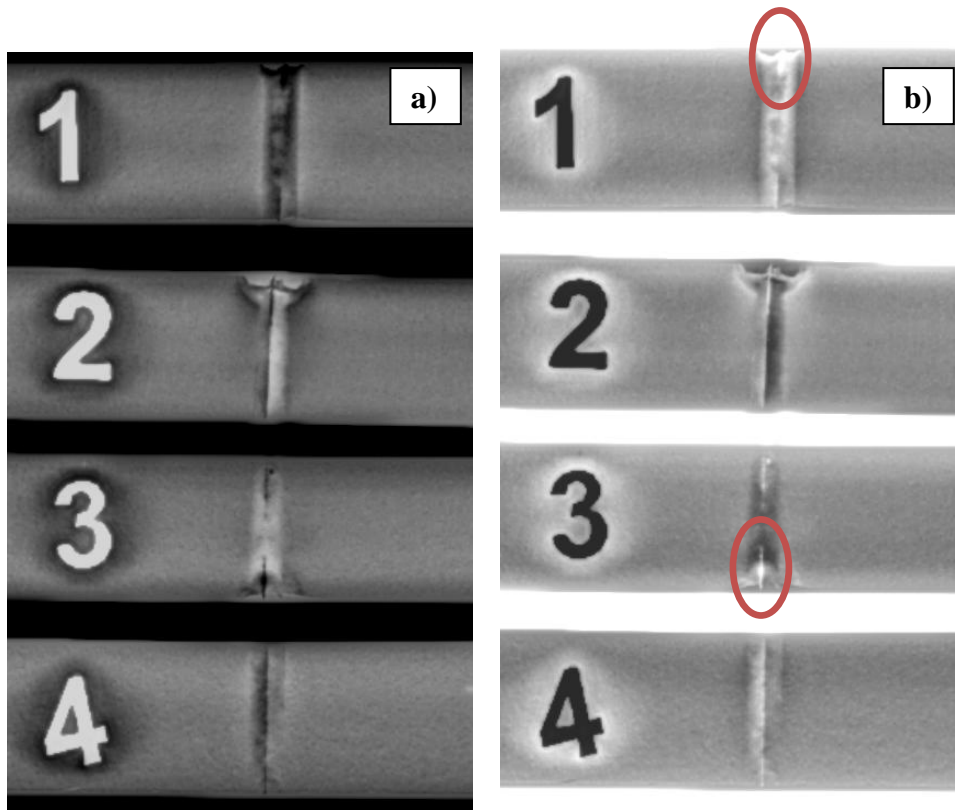


Obr. 63 – rentgenový snímek vzorků OS2, a) negativ, b) pozitiv.

Na obr. 63 jsou rentgenové snímky svarů z varianty OS2. Zde byly jasně viditelné neprovařené kořeny u všech vzorků. U vzorků OS2-2 a OS2-3 bylo vidět, že kořeny svarů nejsou provařeny vůbec (označeno červeně). U vzorků OS2-1 a OS2-4 byly kořeny provařeny jen částečně, což bylo dobře vidět vizuálně i na metalografii. Na obr. 64 je vidět fotka neprovařeného a částečně provařeného kořene svaru. Jiné vady na svarech objeveny nebyly.



Obr. 64 – vizuální porovnání vzorků OS2-3 a OS2-4.

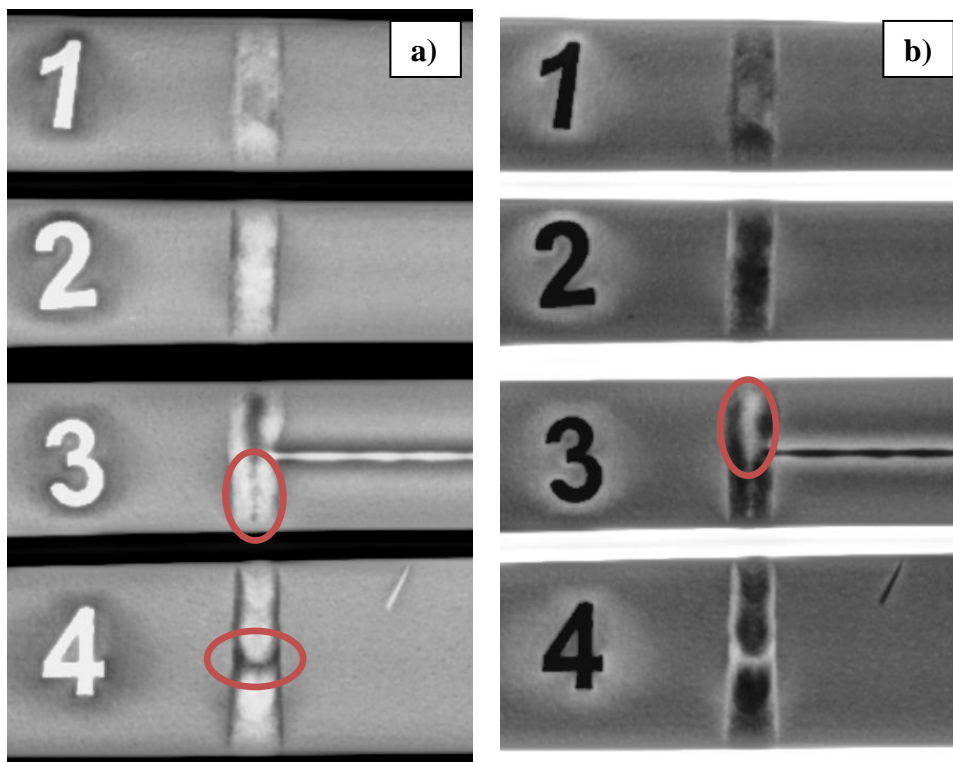


Obr. 65 – rentgenový snímek vzorků OS3, a) negativ, b) pozitiv.

Na tomto rentgenovém snímku byly opět patrné neprovařené kořeny, což se dalo předpokládat vlivem ještě nižšího svařovacího proudu než v případě svaru OS2. Na vzorku OS3-3 byla vidět vada, která vznikla v místě stehu při stehování trubky ruční metodou TIG. Jednalo se pravděpodobně o kráterovou trhlinu v kombinaci s pórem. Tato vada je vidět i na obr. 66. Ve svaru OS3-1 byly dobře viditelné drobné póry, které vznikly opět v místě stehu.



Obr. 66 – detail svaru OS3-3.

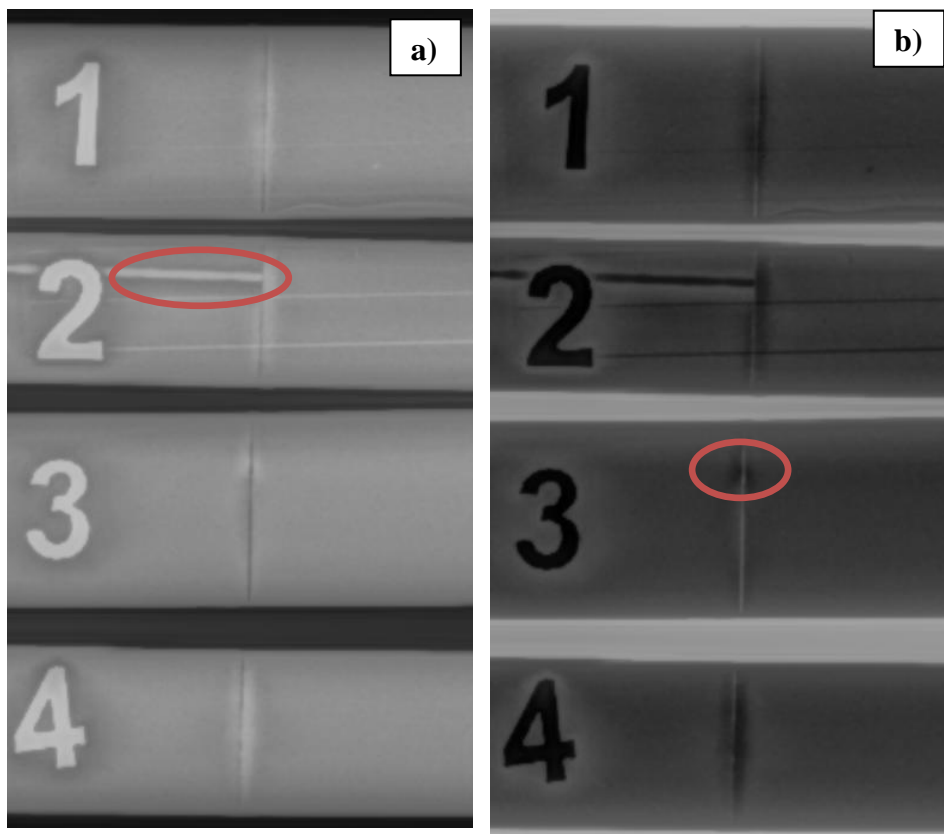


Obr. 67 – rentgenový snímek vzorků OS4, a) negativ, b) pozitiv.

Na obr. 67 jsou rentgenové snímky svarů z varianty OS4. Vzorky OS4-1 a OS4-2 byly bez vad. Na vzorku OS4-3 byl zjevný pór, který vznikl v místě podélného svaru trubky (tento svar vznikl při výrobě trubky). V tomto místě se při zkoušce tahem šířila trhlina. U ostatních vzorků z této varianty se při zkoušce tahem trhliny šířily v teplem ovlivněné oblasti. U svaru OS3-3 byly ještě objeveny i shluky menších pórů. Na vzorku OS4-4 byla vidět vada, která pravděpodobně vznikla nerovnoměrným tuhnutím svarového kovu. Kořen svaru se zde postupně zužoval. Tato vada byla dobře vidět na obr. 68.



Obr. 68 – detail kořene svaru vzorku OS4-4.



Obr. 69 – rentgenový snímek vzorků OS5, a) negativ, b) pozitiv.

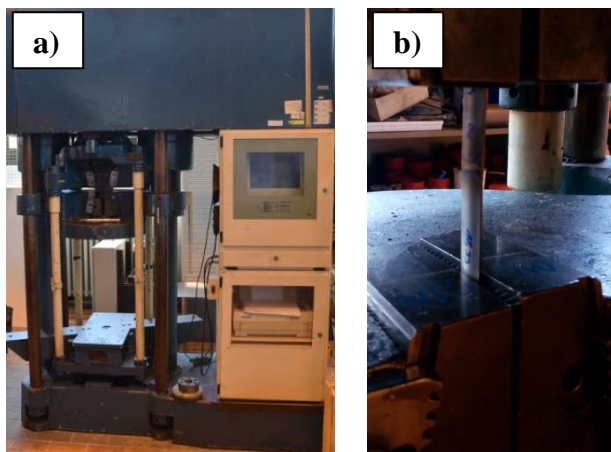
Na rentgenových snímcích svarů z varianty OS5 (viz obr. 69) byly opět viděny neprovařené kořeny u všech svarů. Kvůli nejnižším svařovacím proudům nešlo o nic nepředpokládaného. Na vzorku OS5-3 byla viditelná drobná vada, pravděpodobně šlo o pór. Na ostatních svarech vady viděny nebyly. Na vzorku OS5-2 byl zřetelný podélný svar z výroby trubky.

8.7 Mechanické zkoušky

8.7.1 Zkouška tahem

Zkouška tahem je základní a nejrozšířenější statickou zkouškou. Je zaznamenána závislost prodloužení zkušební vzorku na působící síle F . Z této závislosti jsou určovány vlastnosti materiálu. Jedná se zejména o mez pevnosti, mez kluzu, kontrakci a tažnost. [23]

Příčná zkouška tahem svarového spoje proběhla na univerzálním trhacím stroji DMG. Tento stroj vyvine sílu až 500 kN. Zkouška proběhla dle normy ČSN EN ISO 6892-1. Teplota při zkoušce byla 20°C a rychlost posuvu byla nastavena 30 mm/min.



Obr. 70 – a) univerzální trhací stroj DMG, b) detail upnutí vzorku v čelistech stroje.

Pro příčnou zkoušku tahem byly k dispozici 3 vzorky od každé varianty OS. Byly vybrány vzorky s přibližně stejnou šířkou. Pro konkrétní měření byla do počítače zadána vždy konkrétní šířka daného vzorku, a tento údaj byl počítačem přepočítán na plochu S_0 . Mez pevnosti v tahu byla vypočítána ze vztahu: [23]

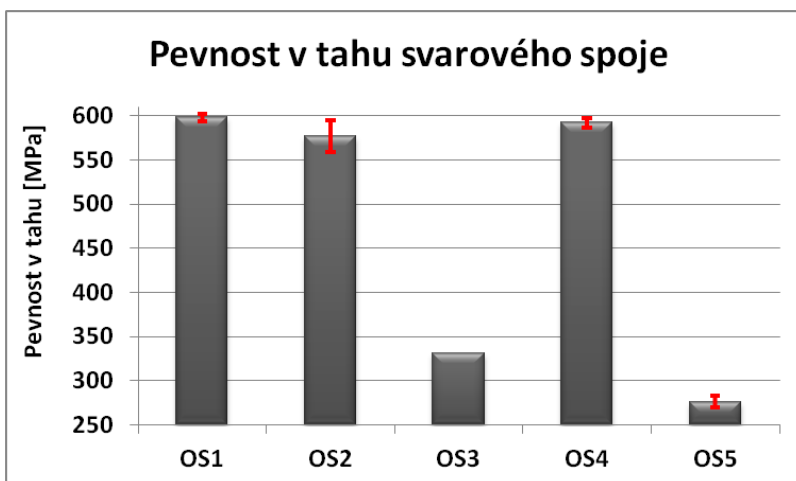
$$R_m = \frac{F_{max}}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (1)$$

U příčné zkoušky tahem svarových spojů je nejčastěji vyhodnocována pouze mez pevnosti. Mez kluzu, kontrakce i tažnost slouží pouze jako informativní hodnoty, neboť se v měřené délce vyskytuje svarový kov, teplem ovlivněná oblast i základní materiál, které značně ovlivňují získané hodnoty. Byla měřena pouze mez pevnosti.

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab. 21. Protokoly ze zkoušky tahem jsou uvedeny v příloze na konci diplomové práce. Pozn. – u OS3 se první a třetí měření nepodařilo z důvodu chyby obsluhy trhacího stroje.

Naměřené hodnoty meze pevnosti na trhacím stroji					
	OS1	OS2	OS3	OS4	OS5
1. vzorek	594 MPa	567 MPa	-	591 MPa	281 MPa
2. vzorek	599 MPa	566 MPa	331 MPa	588 MPa	269 MPa
3. vzorek	602 MPa	598 MPa	-	598 MPa	279 MPa
Průměr	598 ± 4 MPa	577 ± 18 MPa	331 MPa	592 ± 5 MPa	276 ± 6 MPa

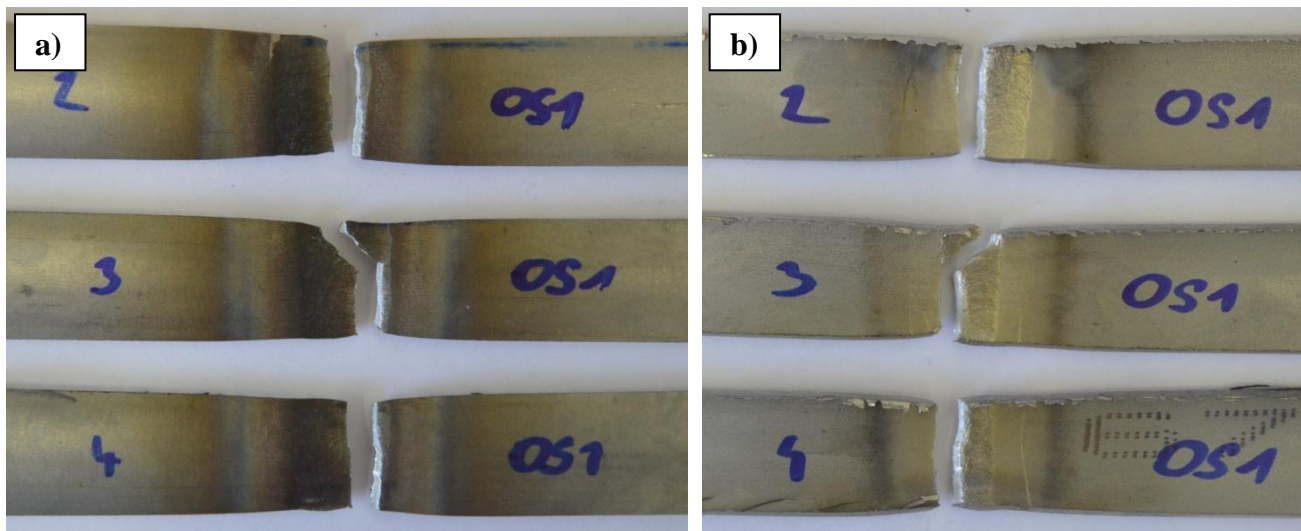
Tab. 21 – naměřené hodnoty meze pevnosti z trhacího stroje.



Graf 5 – porovnání průměrné meze pevnosti v tahu.

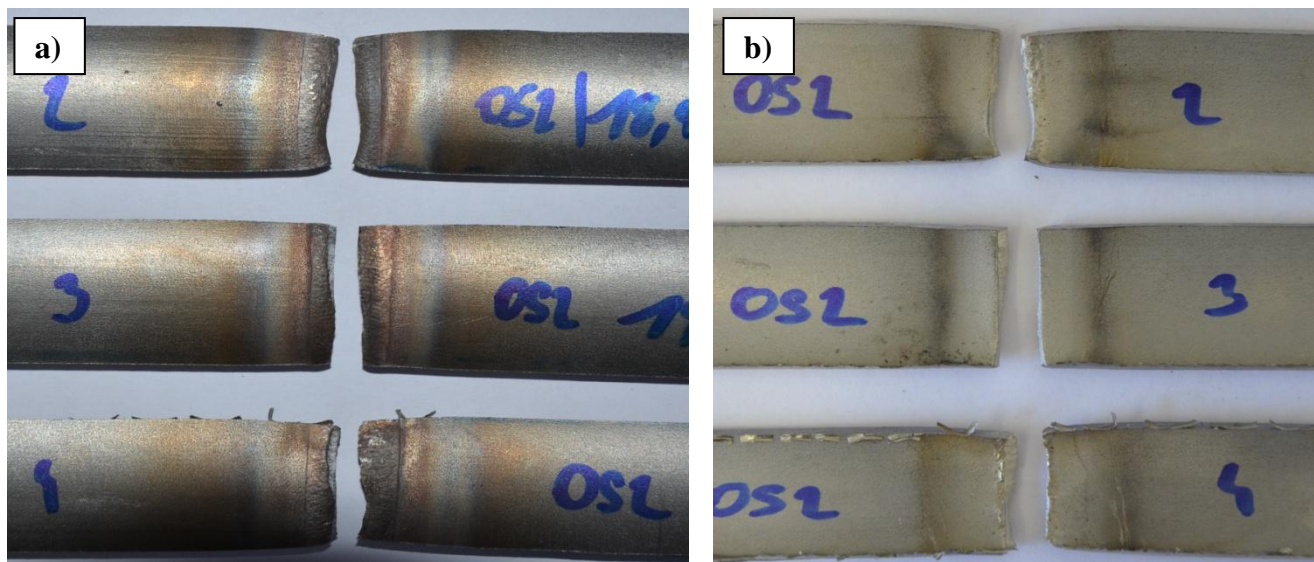
Na grafu 5 jsou znázorněny hodnoty meze pevnosti jednotlivých variant, červeně jsou označeny směrodatné odchylky. Z grafu je patrné, že největší průměrné pevnosti v tahu bylo dosaženo u svaru OS1. U svaru OS4 byla průměrná pevnost svaru nepatrně nižší než u svaru OS1. To bylo pravděpodobně způsobeno větší teplem ovlivněnou oblastí, která vznikla kvůli většímu vnesenému teplu do svaru. U varianty OS2 byl ve dvou případech částečně provařený kořen svaru a v jednom případě nikoliv. To se projevilo na hodnotách meze pevnosti. U částečně provařeného kořene, (vzorek OS2-4) byla hodnota meze pevnosti 598 MPa a u neprovařeného kořene (vzorek OS2-3) byla hodnota meze pevnosti 566 MPa. Svary OS3 a OS5 neměly kořen provařený vůbec a hodnoty meze pevnosti byly v porovnání s ostatními svary výrazně nižší. Nejvyšší mez pevnosti byla naměřena u vzorku OS1-4 (602 MPa) a nejmenší na vzorku OS5-3 (269 MPa).

Na obr. 71 – 75 jsou zobrazeny lomy všech zkušebních vzorků po statické zkoušce tahem. Tvar a poloha lomu přímo souvisí s vneseným teplem, které bylo do svaru přivedeno.



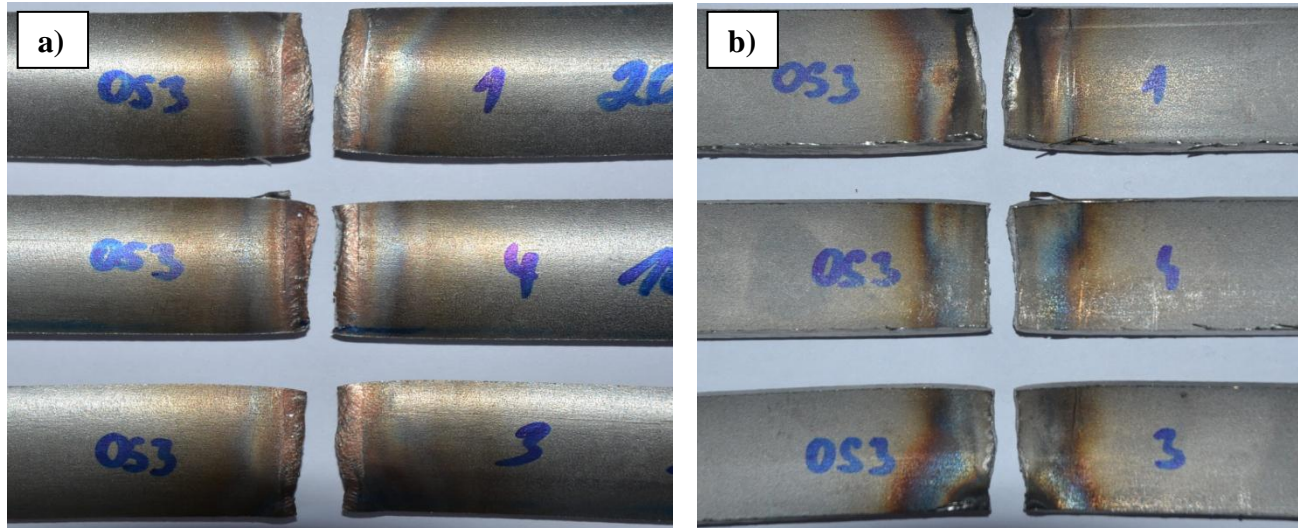
Obr. 71 – vizuální porovnání přetržených vzorků OS1, a) vnější strana svaru, b) vnitřní strana svaru.

Z obr. 71 je patrné, že lomy na vzorcích OS1-2 a OS1-4 se šířily v teplem ovlivněné oblasti a lom u vzorku OS1-3 se šířil částečně přes svar a částečně procházel teplem ovlivněnou oblastí. To mohlo být způsobeno drobnou vadou, která nebyla vizuálně ani rentgenem viditelná. Ve všech případech byla vidět značná kontrakce a prodloužení zkušebních vzorků. Tyto hodnoty ovšem nebyly vyhodnocovány.



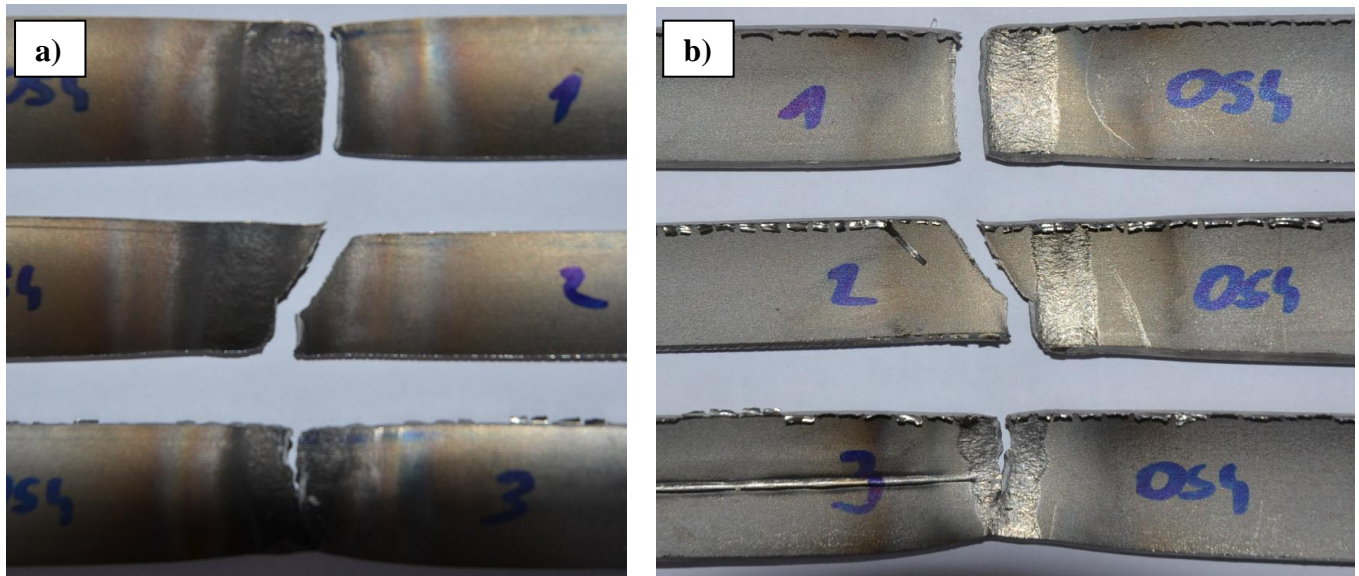
Obr. 72 – porovnání přetržených vzorků OS2, a) vnější strana svaru, b) vnitřní strana svaru.

V tomto případě nebylo vnesené teplo do svaru tak veliké jako u svaru OS1. Z obr. 72 lze vyčíst, že všechny tři lomy se šířily prostředkem svaru a nikoliv v teplem ovlivněné oblasti. Na vzorcích OS2-2 a OS2-4 byly kořeny o trochu více provařeny a oblasti lomu byly více zdeformovány než v případě vzorku OS2, kde nedošlo k provaření kořene svaru vůbec. To, že byly kořeny jen částečně provařeny, bylo dobře rozpoznatelné už na rentgenových snímcích.



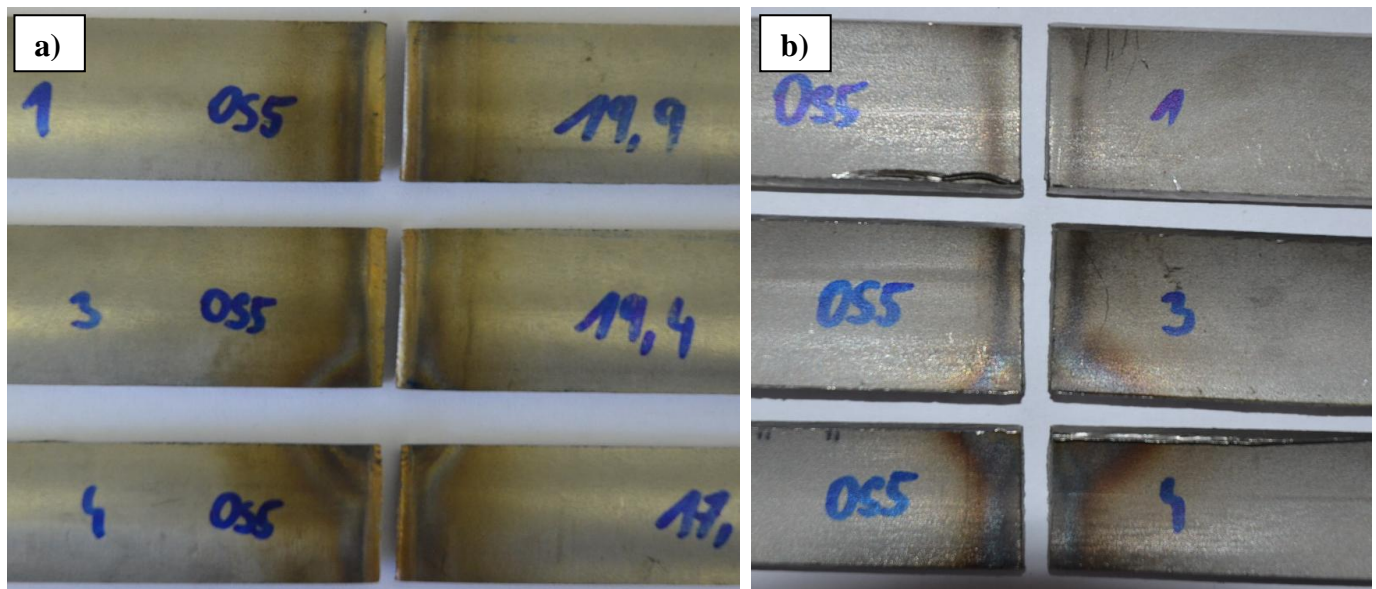
Obr. 73 – porovnání přetržených vzorků OS3, a) vnější strana svaru, b) vnitřní strana svaru.

U této varianty nebyly kořeny svaru kvůli nízké hodnotě dolního proudu provařeny vůbec. Všechny tři lomy se stejně jako v předchozím případě šířily středem svaru, což je z obr. 73 dobře viditelné. Prodloužení a kontrakce nebyly v tomto případě, kvůli nižším silám, tak výrazné. U svaru OS3-3 byl dole viděn bodový svar, který vznikl při ručním stehování trubek (viz kapitola 8.3.4).



Obr. 74 – porovnání přetržených vzorků OS4, a) vnější strana svaru, b) vnitřní strana svaru.

V tomto případě bylo vnesené teplo do materiálu největší a stejně tak byla největší i teplem ovlivněná oblast. Z obr. 74 lze vyčíst, že v případě vzorků OS4-1 a OS4-2 se lomy šířily v teplem ovlivněné oblasti. U vzorku OS4-3 nedošlo k úplnému přetržení zkušebního vzorku, neboť se trhací stroj po prudkém snížení napětí sám zastavil. Zajímavé je, že se lom šířil prostředkem svaru. To bylo způsobeno vnitřním defektem, který byl už dobře patrný na rentgenovém snímku (viz obr. 67). Kontrakce a prodloužení byly podobné jako u vzorků z varianty OS1.



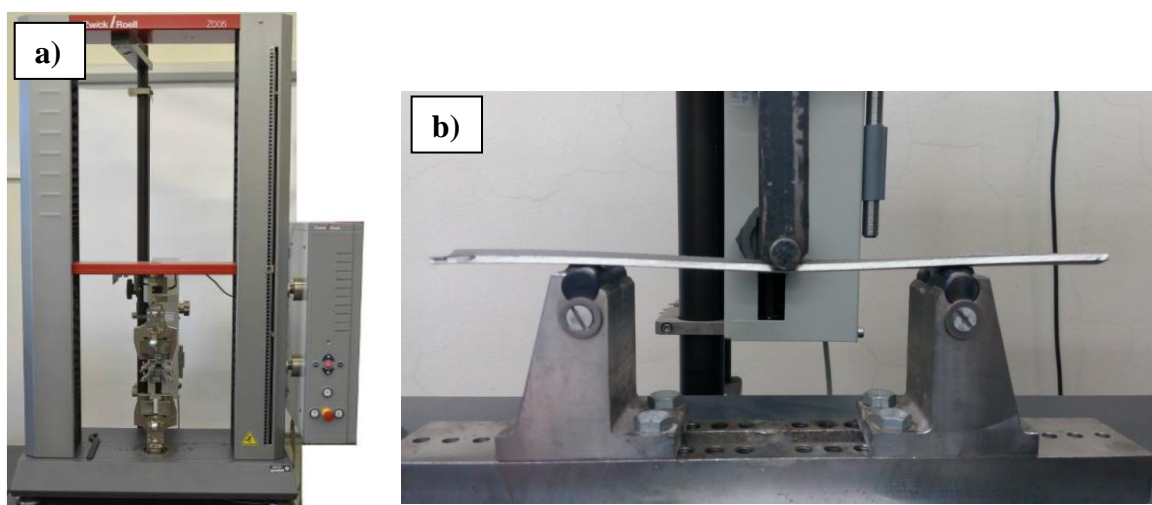
Obr. 75 – porovnání přetržených vzorků OS5, a) vnější strana svaru, b) vnitřní strana svaru.

Teplo vnesené do svaru OS5 bylo nejmenší. Na metalografii se dalo rozpoznat, že svar byl provařen maximálně do jedné čtvrtiny výšky základního materiálu, což se projevilo na mezi pevnosti v tahu, která byla nejmenší. Z obr. 75 je zřejmé, že lomy se šířily prostředkem svaru. Základní materiál nebyl tak plasticky deformován jako v předchozích případech. Kontrakce i tažnost byly minimální. Na vzorcích OS5-3 a OS5-4 byl opět viditelný steh, který vznikl při sestehování trubek.

8.7.2 Zkouška 3 – bodovým ohybem

Podstatou zkoušky je ohybová deformace zkušební vzorku. Ohyb je kombinací tlakového a tahového namáhání materiálu. Touto zkouškou jsou posuzovány plastické vlastnosti materiálu a sledována tvorba případných trhlin, které mohou při deformaci ohybem vzniknout. [23]

Statická zkouška ohybem byla provedena na univerzálním trhacím stroji Zwick/Roell Z005, který může vyvinout sílu až 5 kN. Vzorky byly uloženy tak, aby ohýbací trn tlačil na kořen svaru (simulace tlaku uvnitř trubky). Krajiní podpory byly od sebe vzdáleny 120 mm. Teplota během zkoušky byla 20°C. Zkouška proběhla podle normy ČSN EN ISO 5173. K dispozici byl jeden vzorek od každé varianty OS. Zkouška byla automaticky ukončena při dosažení 4 % deformace.



Obr. 76 – a) univerzální trhací stroj Zwick/Roell Z005, b) uložení zkušební vzorku.

Z důvodu rozdílné šířky zkušebních vzorků byla do počítače zadána vždy šířka konkrétního vzorku. Počítač si tuto hodnotu přepočítal na modul průřezu W_0 . Pro obdélníkový průřez je W_0 vypočítáno ze vztahu: [23]

$$W_0 = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad [mm^3] \quad (2)$$

b – šířka konkrétního vzorku

h – tloušťka stěny trubky (vždy 2 mm)

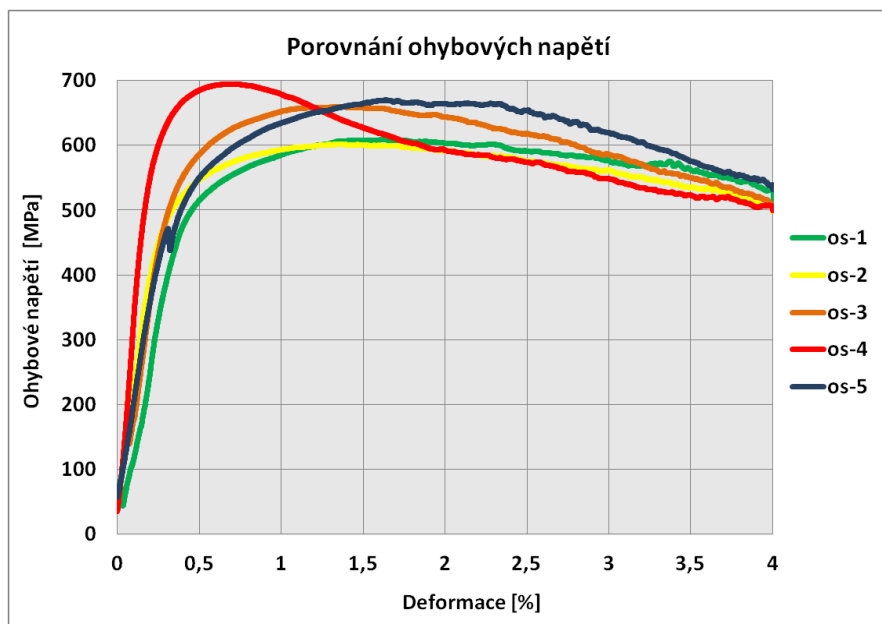
Hodnota ohybového momentu byla vypočítána ze vztahu: [23]

$$M_{o \max} = \frac{F_{\max} \cdot l}{4} \quad [Nm] \quad (3)$$

l – vzdálenost krajních podpěr (vždy 120 mm)

Hodnota maximálního ohybového napětí byla poté vypočítána ze vztahu: [23]

$$R_{mo} = \frac{M_{o \max}}{W_0} \quad [MPa] \quad (4)$$

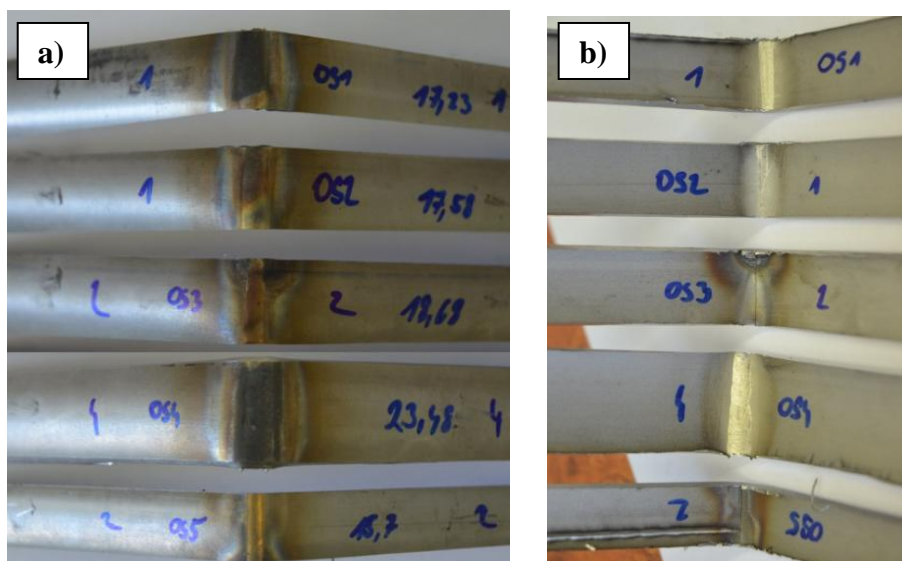


Graf. 6 – porovnání průběhu ohybových napětí v závislosti na deformaci.

Maximální ohybové napětí	
OS1	609,1 MPa
OS2	601,6 MPa
OS3	659,5 MPa
OS4	694,5 MPa
OS5	670,0 MPa

Tab. 22 – maximální ohybová napětí.

Z obr. 77 lze vyčíst, že na vnějších stranách všech vzorků nebyly po ukončení zkoušky objeveny žádné trhliny ani jiné vady. U vzorků OS1 a OS4 se na kořenech svarů také neobjevily žádné trhliny. Austenitická ocel byla hodně tvárná a pravděpodobně by se bez porušení deformovala dále (zkouška ukončena při dosažení 4 % deformace). Z tab. 22 i grafu 6 je zřejmé, že nejvyššího ohybového napětí dosáhl svar OS4 (694,5 MPa).



Obr. 77 – porovnání všech vzorků ze zkoušky ohybem, a) vnější strana trubky, b) vnitřní strana trubky.

8.7.3 Zkouška tvrdosti

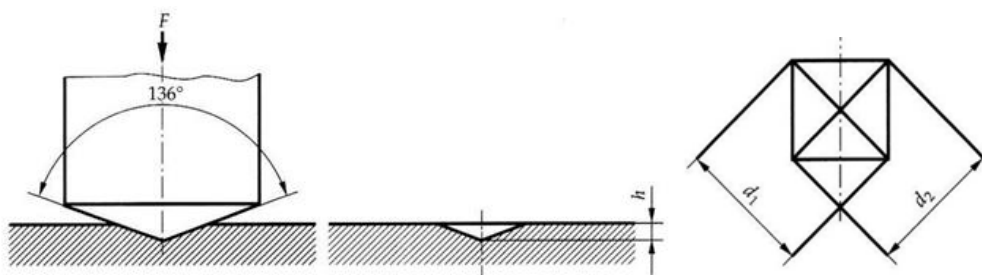
Tvrdot je definována jako odpor proti vnikání cizího tělesa. Zkoušky tvrdosti jsou rychlé, jednoduché a levné zkoušky, které slouží k doplnění hodnot mechanických vlastností zjištěných zkouškou tahem. Pro hodnocení tvrdosti svarových spojů se nejčastěji používají statické vnikací zkoušky, zejména zkouška tvrdosti podle Vickerse. Cílem je získat průběh tvrdosti svarového spoje. Proto se vtisky provádí ve svaru, teplem ovlivněné oblasti i v základním materiálu. [23]

Tvrdot podle Vickerse je dána normou ČSN EN ISO 6507-1. Tato zkouška vyžaduje kvalitní povrch. Při zkoušce tvrdosti podle Vickerse, se do povrchu tělesa vtláčeje diamantový indentor, který má tvar pravidelného čtyřbokého jehlanu s vrcholovým úhlem 136°. Zatěžovací síla působí na indentor po přesně stanovenou dobu. Po odlehčení se změří úhlopříčky vzniklého vtisku, ze kterých se určí průměrná hodnota. Z této hodnoty se následně vypočítá výsledná tvrdost podle vzorce: [23]

$$HV = \frac{0,189 \cdot F}{d^2} \quad (5)$$

F – zátěžná síla [N]

d – aritmetický průměr úhlopříček d_1 a d_2



Obr. 78 – schéma zkoušky tvrdosti dle Vickerse. [24]

Zkouška tvrdosti byla provedena na stroji Struers Durascan. Zatížení bylo $HV_{0,1}$, což odpovídá 100 gramům. Tvrdot se měřila pouze u vzorků OS1 a OS4, protože měly provařený kořen svaru. U vzorků OS2, OS3 a OS5 k provaření kořene nedošlo a zkouška tvrdosti tak postrádala smysl. [24]

U zkušebních vzorků OS1 a OS4 bylo vytvořeno 30 vtisků ve vzdálenosti 0,3 mm od sebe. Tato vzdálenost byla zvolena tak, aby se jednotlivé vtisky neovlivňovaly a zároveň měření pokrylo oblast svaru včetně tepelně ovlivněné oblasti a základního materiálu. Poloha a označení jednotlivých vtisků je vidět na obr. 80. [24]

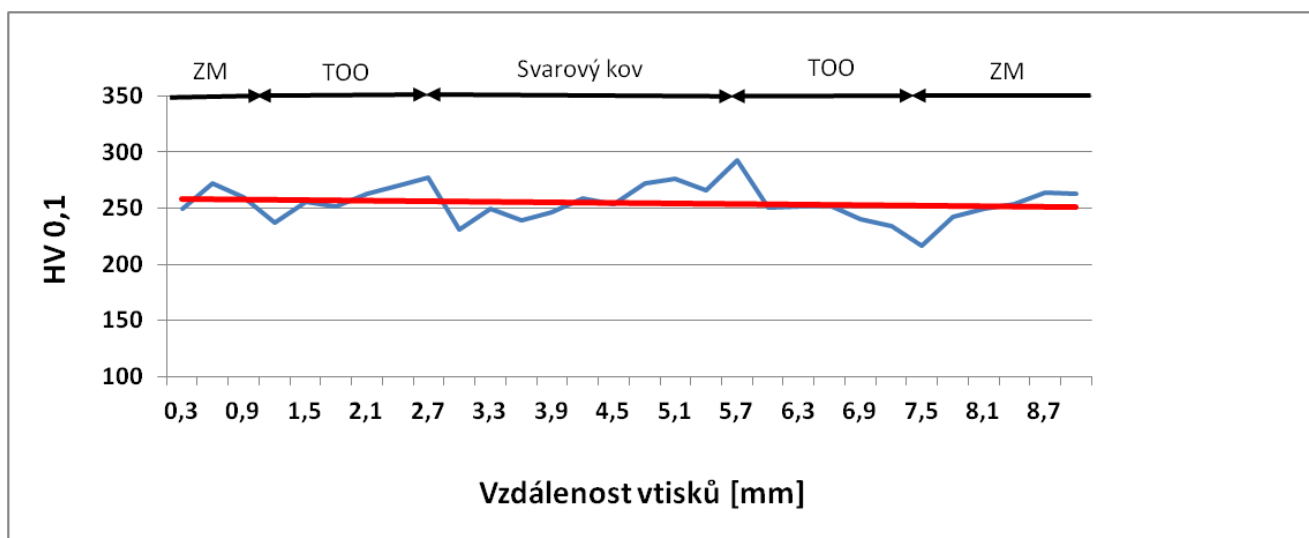


Obr. 79 – mikrotvrdoměr Struers Durascan. [24]

Nejprve byla změřena tvrdost základního materiálu. Vytvořilo se pět kontrolních vtisků, ze kterých byla vypočítána průměrná hodnota tvrdosti základního materiálu. Ta měla hodnotu $230,6 \pm 8 \text{ HV}_{0,1}$. Následovalo samotné měření tvrdosti svarového spoje.



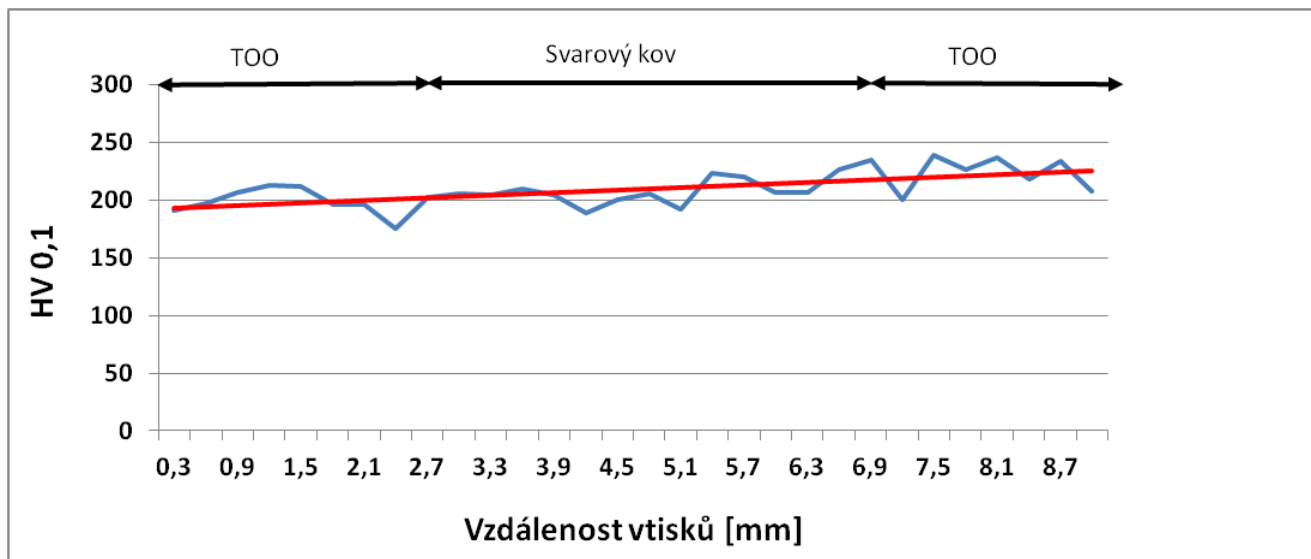
Obr. 80 – poloha a označení vtisků mikrotvrdosti u svaru OSI. [24]



Graf 7 – průběh tvrdosti u svaru OSI. [24]

Na grafu 7 je znázorněn průběh tvrdosti (modrá barva) a lineární aproximace funkce tvrdosti (červená barva). Z grafu lze vyčíst, že tvrdost byla ve všech bodech přibližně stejná. Největší tvrdost byla naměřena na rozhraní svarového spoje a teplem ovlivněné oblasti. Zde byly hodnoty tvrdosti okolo 270-280 $\text{HV}_{0,1}$. Tato tvrdost obvykle vzniká v důsledku martenzitické transformace, kdy se materiál ohřeje nad teplotu A_{C3} a následně se rychle ochladí. Ocel 1.4307 je ovšem nekalitelná. Nárůst tvrdosti v teplem ovlivněné oblasti mohl být způsoben tzv. sekundární tvrdostí. Ta vznikne při teplotě 550 – 600°C precipitací karbidotvorných legujících prvků (chrom). Austenit je tak o tyto prvky a uhlík ochuzen. Zároveň mohl být tento nárůst tvrdosti způsoben vznikem fázových transformací (bainitická a martenzitická přeměna). Kontrolou pomocí magnetu bylo totiž zjištěno, že ocel není 100% austenitická, ale obsahuje určité množství feritu.

V oblasti svaru a základního materiálu dosahovala tvrdost hodnoty 250 $\text{HV}_{0,1}$. Nejvyšší naměřená tvrdost měla hodnotu 293 $\text{HV}_{0,1}$ a nejmenší naměřená tvrdost měla hodnotu 217 $\text{HV}_{0,1}$. Průměrná tvrdost měla hodnotu $254,7 \pm 15 \text{ HV}_{0,1}$. [24]



Graf 8 – průběh tvrdosti u svaru OS4. [24]

Na grafu 8 je opět vidět průběh tvrdosti (modrá barva) a lineární průběh aproximace tvrdosti (červená barva). Dále je vidět, že tvrdost byla přibližně všude stejná. V grafu nejsou zahrnuty oblasti se základním materiálem. To bylo způsobeno mnohem větší šířkou svarového spoje než v předchozím případě. Nebyly zde patrné výrazné nárůsty tvrdosti v oblasti TOO. Nejvyšší naměřená tvrdost měla hodnotu 239 HV_{0,1} a nejmenší naměřená tvrdost měla hodnotu 175 HV_{0,1}. Průměrná tvrdost měla hodnotu 209,1 ± 15 HV_{0,1}. [24]

8.8 Metalografické hodnocení svarových spojů

Svařené trubky byly nejprve upraveny na menší vzorky pomocí metalografické pily Struers – Discotom 6. K řezání austenitické nerezové oceli byl použit řezný kotouč 250x1,6x32 s označením W9A B250. Vzorky byly následně zalisovány za tepla do hmoty 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 použita brusná plátina MD Piano o hrubosti 80, 220, 500, 1200. Leštění bylo provedeno diamantovou suspenzí 3 μm a 1 μm na leštících plátnech. Posledním krokem před pozorováním vzorků bylo leptání. Struktura vzorků byla zviditelněna pomocí směsi chemických látek: HNO₃, HCl, HF a peroxidem vodíku. Následné pozorování bylo uskutečněno na světelném optickém mikroskopu Carl Zeiss Observer.Z1m. [24]

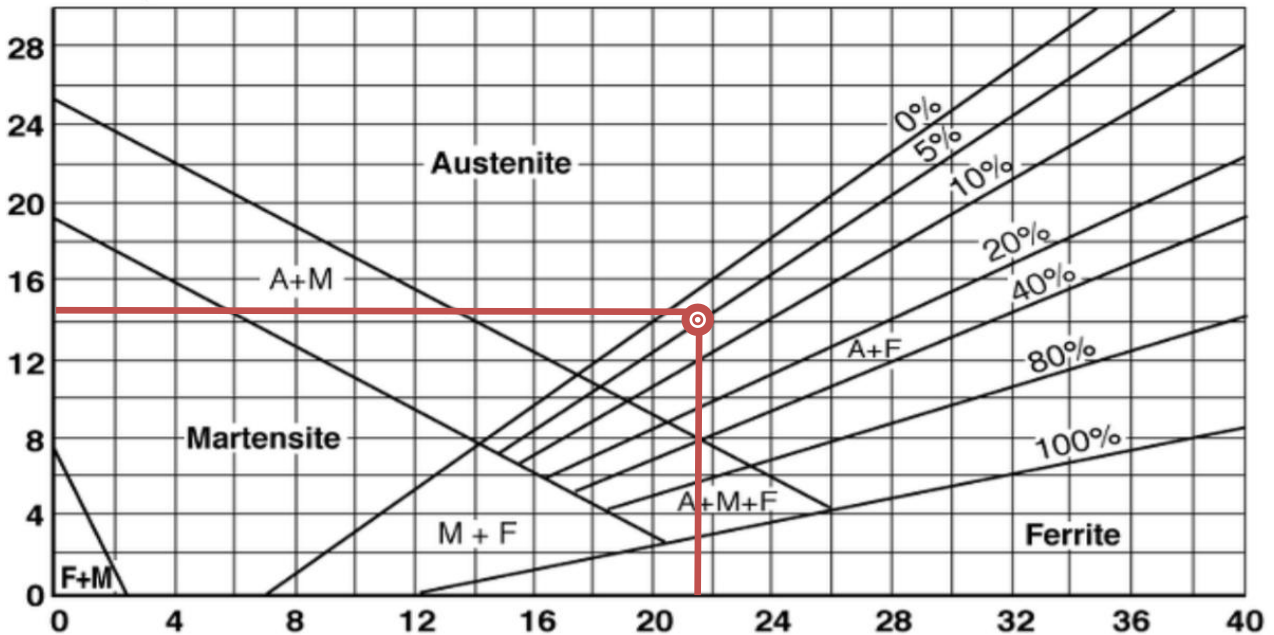
Hledaly se vady dle normy ČSN EN ISO 6520 a hodnotila se makrostruktura svarových spojů. Vzorky byly odebrány přibližně z prostředku svarové housenky.

Pro zadanou ocel 1.4307 byl sestrojen Schefflerův diagram.

Schaefflerův diagram oceli 1.4307

$$\begin{aligned}\text{Niklový ekvivalent} &= \%Ni + 30 \times \%C + 0,5 \times \%Mn \\ &= 12,5 + 30 \times 0,03 + 0,5 \times 2 \\ &= \mathbf{14,4 \%}\end{aligned}$$

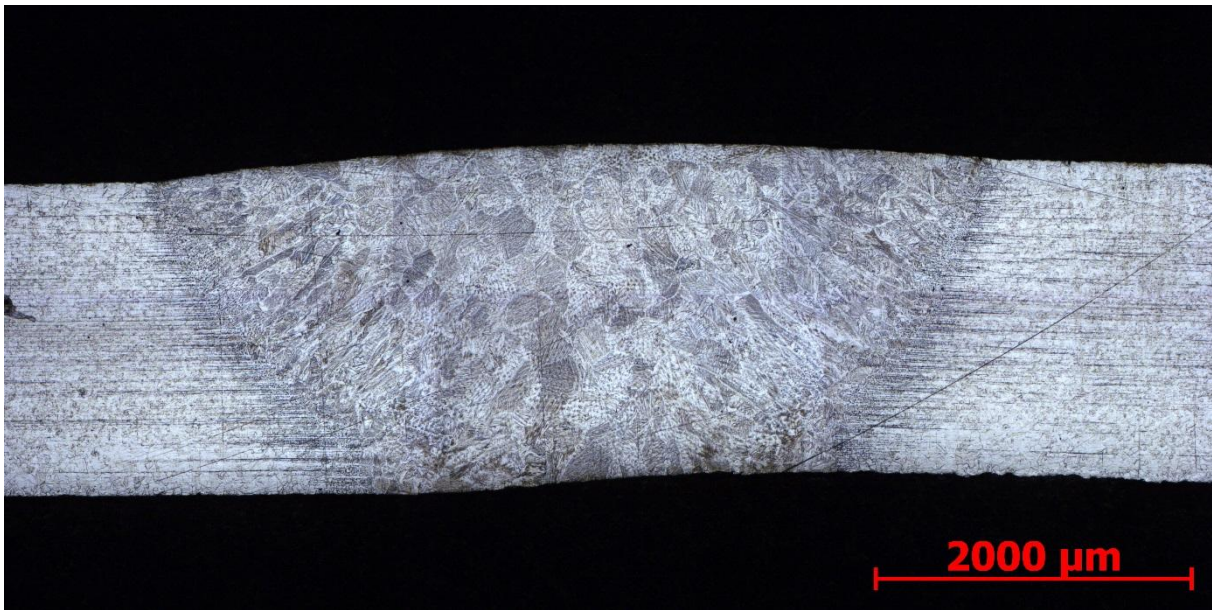
$$\begin{aligned}\text{Chromový ekvivalent} &= \%Cr + \%Mo + 1,5 \times \%Si + 0,5 \times \%Nb \\ &= 20 + 0 + 1,5 + 0 \\ &= \mathbf{21,5 \%}\end{aligned}$$



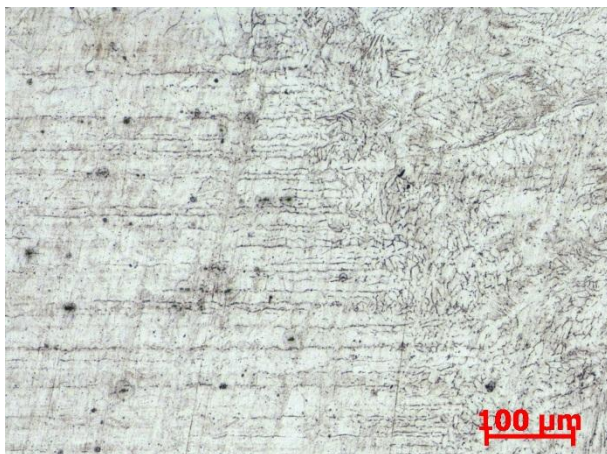
Graf 9 – Schaefflerův diagram pro ocel 1.4307. [25]

Z grafu 9 lze vyčíst, že ocel 1.4307 je složena přibližně z 95% austenitu a 5% feritu. I minimální podíl feritu ve struktuře měl vliv na struktury, které po svařování vznikly. I když je ocel nekalitelná, může se určité procento materiálu fázově přeměnit. To ovlivnilo hodnoty tvrdosti v teplem ovlivněné oblasti.

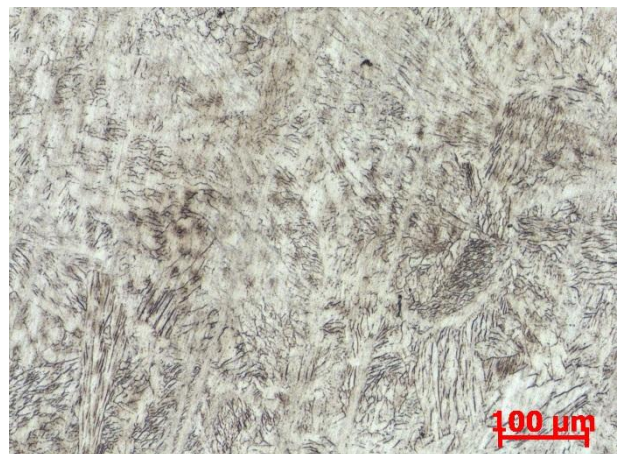
Svar OS1



Obr. 81 – makrostruktura svaru OS1, zvětšeno 25x. [24]



Obr. 82 - hranice ztavení svarového spoje OS1, zvětšeno 100x. [24]



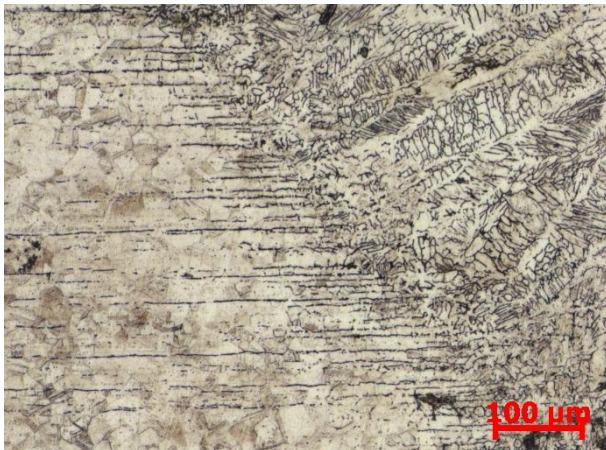
Obr. 83 – osa svaru svarového spoje OS1, zvětšeno 100x. [24]

Z makroskopického hodnocení svaru OS1 na *obr. 81* bylo jasně patrné, že kořen svarového spoje byl provařený. Nebyly zde viditelné žádné vady. Šířka svarové housenky byla 5286 μm a šířka kořene svaru byla 2866 μm. Převýšení svaru bylo zanedbatelné. Struktura svaru byla hrubozrná. Na hranici ztavení (viz *obr. 82*) byla zřetelná změna struktury základního materiálu od oblasti, kde byla vytvořena svarová lázeň. [24]

Svar OS2



Obr. 84 – makrostruktura svaru OS2, zvětšeno 25x. [24]



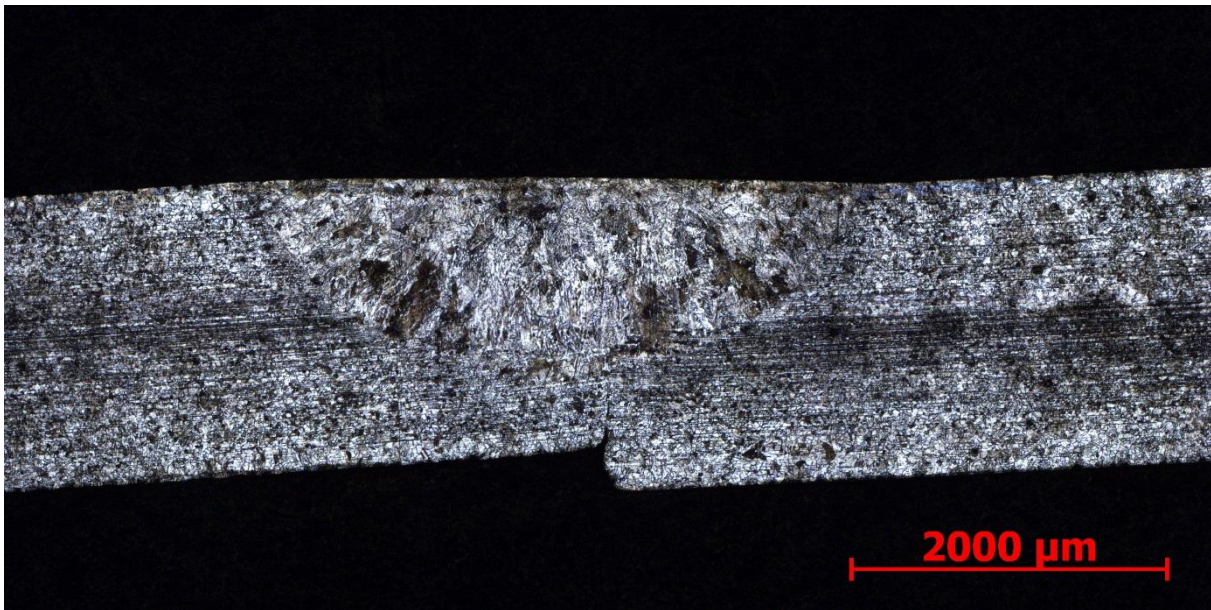
Obr. 85 – hranice ztavení svarového spoje OS2, zvětšeno 100x. [24]



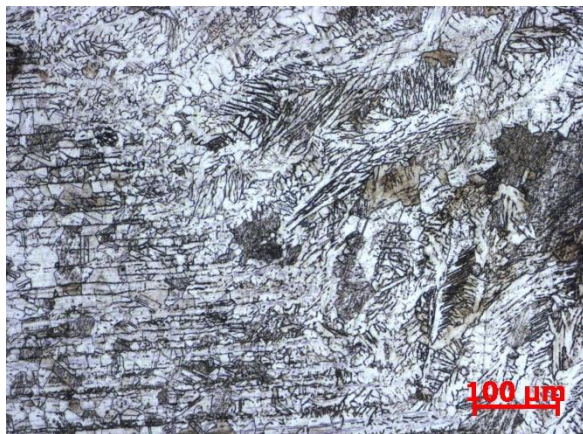
Obr. 86 - osa svaru svarového spoje OS2, zvětšeno 100x. [24]

Z obr. 84 je zřejmé, že u svaru OS2 nebyl zcela provařen kořen. Zvolené svařovací parametry byly nedostatečné. Šířka svarové housenky byla 4421 μm. Převýšení svaru bylo zanedbatelné. V kořenové části svaru byl vidět menší rozdíl v sesazení trubek, který byl způsoben nepřesným upnutím při stehování trubek k sobě. Kromě neprovařeného kořene, zde nebyly objeveny jiné vady. Na obr. 86 je dobře viditelná bainitická struktura (označeno červeně). Tato struktura se pravděpodobně vyskytovala i u svaru OS1 (zde ovšem nebyla tak zřetelná), kde byla příčinou malého nárůstu tvrdosti. [24]

Svar OS3



Obr. 87 – makrostruktura svaru OS3, zvětšeno 25x. [24]



Obr. 88 – hranice ztavení svarového spoje OS3, zvětšeno 100x. [24]



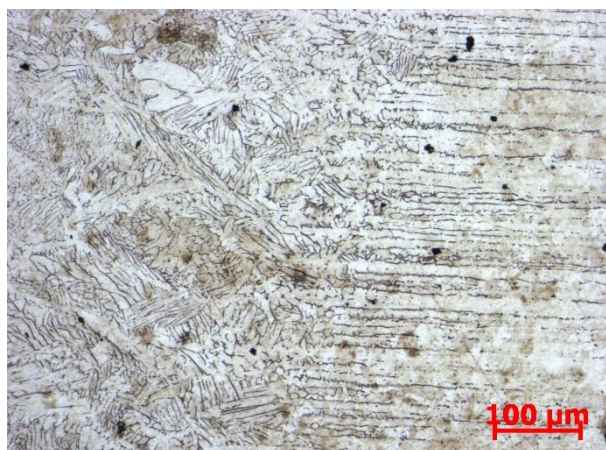
Obr. 89 – osa svaru svarového spoje OS3, zvětšeno 100x. [24]

Z obr. 87 je vidět, že kořen svaru nebyl provařen. Dále lze rozpoznat nepřesné sesazení trubek před stehováním, které je mnohem větší než v předchozím případě. Šířka svarové housenky byla změřena na 3893 μm. Jiné vady nebyly objeveny. I zde byla vidět na obr. 89 bainitická struktura. [24]

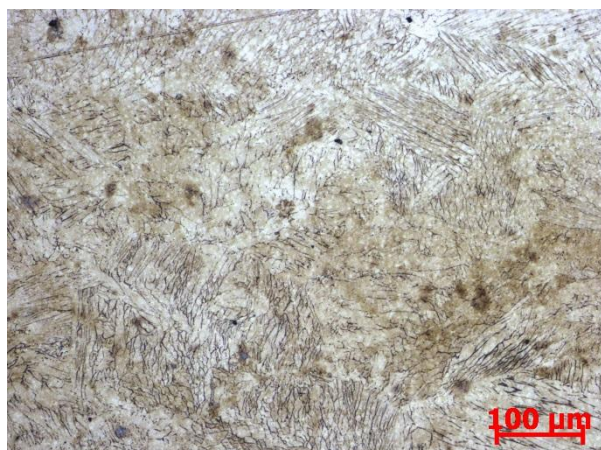
Svar OS4



Obr. 90 – makrostruktura svaru OS4, zvětšeno 25x. [24]



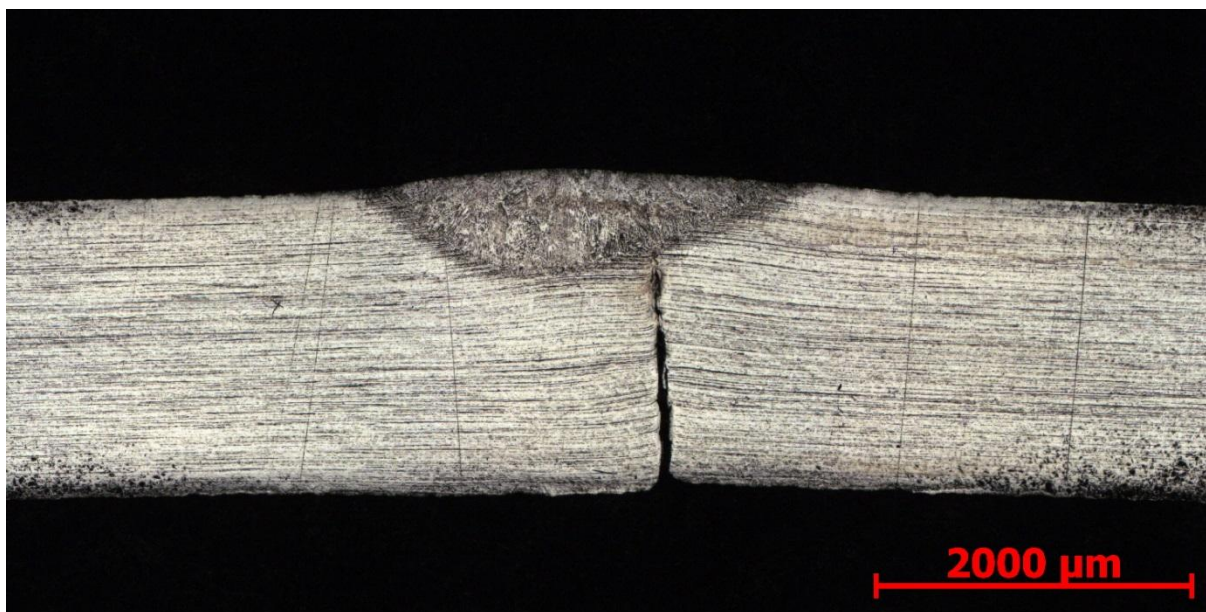
Obr. 91 – hranice ztavení svarového spoje OS4, zvětšeno 100x. [24]



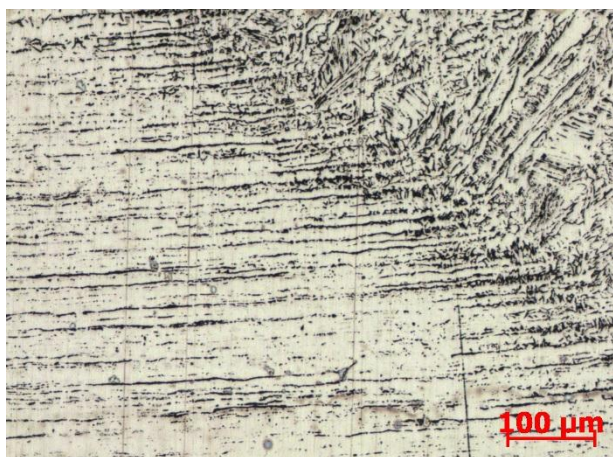
Obr. 92 – osa svaru svarového spoje OS4, zvětšeno 100x. [24]

Na obr. 90 je vidět výrazný propad svarového spoje jak v oblasti kořene svaru, tak i ve vrchní části svaru. Propad činil dle měření 268 μm. Propad byl způsoben příliš vysokou teplotou svarové lázně. I přes výrazný propad svaru došlo k provaření kořene svaru. Šířka svarové housenky měří 6135 μm a v oblasti kořene svaru byla šířka změřena na 5085 μm. Hranice ztavení zde nebyla tak výrazná. Z obr. 91 a 92 není struktura dobře čitelná. Dle normy ČSN EN ISO 6520 je propad svaru klasifikován jako vada s referenčním číslem 509, což je proláklina ve vodorovné poloze. [24]

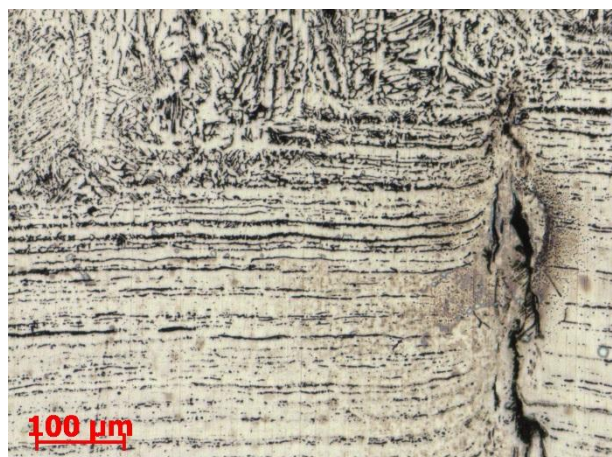
Svar OS5



Obr. 93 – makrostruktura svaru OS5, zvětšeno 25x. [24]



Obr. 94 – hranice ztavení svarového spoje OS5,
zvětšeno 100x. [24]



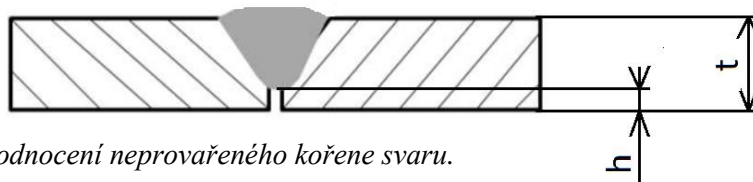
Obr. 95 – osa svaru svarového spoje OS5,
zvětšeno 100x. [24]

Z obr. 93 lze vypožorovat, že elektrický oblouk byl zapálen mimo svarovou mezeru. To bylo způsobeno nepřesným upnutím otevřené orbitální hlavy na svařovanou trubku. Šířka svaru byla změřena na 2791 μm. Kořen svaru nebyl provařen.

Norma ČSN EN ISO 6520 uvádí klasifikaci vad ve svarových spojích. Dle této normy, má neprovařený kořen svaru referenční číslo 4021. Definice této vady zní: Vada ve spojení základního materiálu v důsledku nedostatku svarového kovu v kořeni svaru.

Podle normy ČSN EN ISO 5817 se hodnotí, zda je konkrétní vada přípustná či nepřípustná. Neprovařený kořen svaru je hodnocen v jakosti B a C vždy jako vada nepřípustná. V jakosti D je svar hodnocen jako vada přípustná pouze v případě, že:

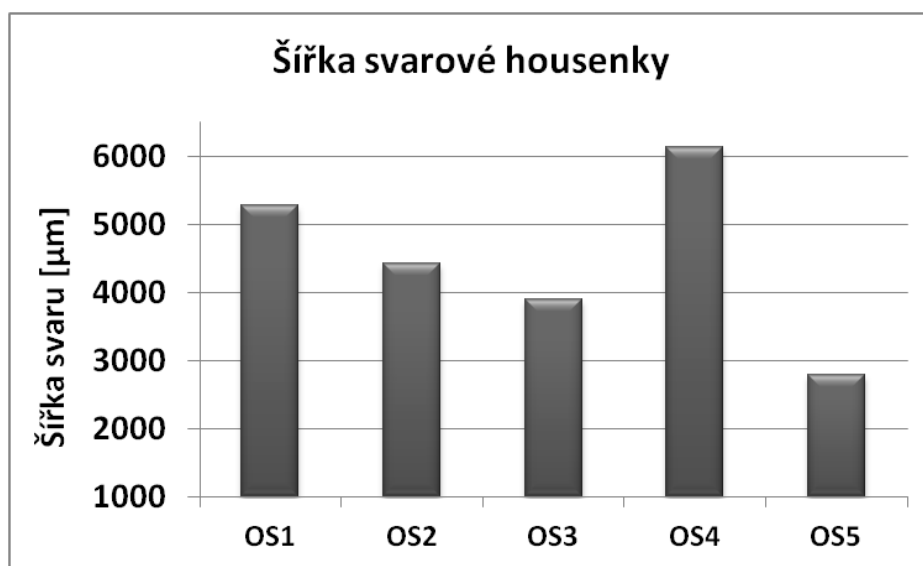
$h \leq 0,2 t$, ale $t \max 2 \text{ mm}$



Obr. 96 – hodnocení neprovařeného kořene svaru.

Kvůli neprovařenému kořenu u svaru OS2 byla dle normy ČSN EN ISO 5817 (viz obr. 96) tato vada vyhodnocena jako nepřípustná v jakosti B a C. V jakosti D byla tato vada hodnocena jako přípustná.

Svary OS3 a OS5 měly neprovařené kořeny, které byly hodnoceny jako nepřípustné vady ve všech jakostech.



Graf 10 – šířka svarové housenky.

Na grafu 10 lze vidět závislost mezi hodnotou svařovacího proudu a šířkou svarové housenky. Čím větší hodnota svařovacího proudu, tím větší šířka svaru. Nejširší svarovou housenku měl svar OS4 (6135 μm) a nejužší svarovou housenku měl svar OS5 (2791 μm). Graf je podobný grafu 1 (šířka elektrického oblouku v závislosti na svařovacím proudu).

9. Diskuze výsledků

Cílem práce bylo pomocí vysokorychlostní kamery získat vysokorychlostní záznam svařovacího procesu, který by sloužil k analýze daného svařovacího procesu. Na základě analýzy byly upraveny svařovací parametry tak, aby svarový spoj byl co možná nejkvalitnější.

Zaznamenat proces svařování bylo poměrně náročné. Příprava a nastavení vysokorychlostní kamery a laserového osvětlení byla časově i experimentálně velmi náročná činnost. Laserové osvětlení se kvůli technickým problémům nepodařilo správně zprovoznit. V důsledku těchto technických problémů nebylo možné provést plnou filtraci elektrického oblouku, čímž se nepodařilo plně popsat všechny parametry svařovacího procesu. Pomocí vysokorychlostního záznamu a pomocí obrazové analýzy se tak hodnotily parametry elektrického oblouku (šířka a úhel rozevření) a doba tuhnutí taveniny.

Ze záznamu byl patrný velký vliv svařovacího proudu na parametry elektrického oblouku. Čím byla nastavena větší hodnota svařovacího proudu, tím byla pozorována větší šířka a úhel rozevření elektrického oblouku. Podle předpokladů největší šířky elektrického oblouku při působení horního svařovacího proudu bylo dosaženo u svaru OS6 (7,45 mm) a naopak nejmenší šířky elektrického oblouku bylo dosaženo u svaru OS7 (4,6 mm). Při působení dolního svařovacího proudu byla šířka u svaru OS6 3,45 mm. Největší úhel rozevření elektrického oblouku byl u svaru OS6 ($134,5^\circ$) a nejmenší úhel rozevření byl u svaru OS7 ($82,1^\circ$). Dále bylo pozorováno, že hodnota svařovacího proudu má vliv na dobu tuhnutí svarové lázně. Tavenina ztuhla nejrychleji v případě svaru OS5 (132 ms) a nejpomaleji ztuhla u svaru OS4 (214 ms).

Po vyhodnocení vysokorychlostního záznamu byly svařené trubky rozřezány na jednotlivé vzorky, které se dále hodnotily pomocí rentgenogramu, mechanických zkoušek a metalografického pozorování.

Při hledání vnitřních vad pomocí rentgenových snímků byly jednotlivé vzorky zkoumány v negativním i pozitivním režimu pozorování. Na vzorcích z varianty OS1 nebyly nalezeny žádné vnitřní vady. Bylo zjevné, že kořeny svarů jsou dobře provařeny. Na vzorcích z varianty OS2 bylo vidět, že kořeny svaru u vzorků OS2-2 a OS2-3 nebyly provařeny vůbec. Vzorky OS2-1 a OS2-4 byly provařeny částečně a to se projevilo na jejich vyšší hodnotě meze pevnosti při tahové zkoušce. Na rentgenových snímcích vzorků z varianty OS3 byly opět viditelné neprovařené kořeny. U vzorku OS3-1 byl vidět pór a na vzorku OS3-3 byl vidět pór s trhlinou. Zmíněné vady byly přítomny vždy u stehů, které vznikly při výrobě trubek. Na rentgenových snímcích vzorků z varianty OS4 byly vzorky OS4-1 a OS4-2 zcela bez závad. Vzorek OS4-3 obsahoval ve svaru jeden velký pór a řadu malých pórů. Tyto vady se výrazně projevíly při statické zkoušce tahem. Na vzorku OS4-4 byla vidět vada, která vznikla v důsledku nerovnoměrného tuhnutí materiálu. Na rentgenogramu vzorků OS5 byly vidět neprovařené kořeny. Na vzorku OS5-3 byl objeven drobný pór.

Následovala příčná statická zkouška tahem svarových spojů. Byla vyhodnocována mez pevnosti svarového spoje a vizuálně kontrolovány vzniklé lomy. Nejvyšší mez pevnosti dosáhly vzorky ze série OS1. Průměrná hodnota byla 598 ± 4 MPa. Nepatrně nižších hodnot dosáhly vzorky ze sady OS4. Zde byla průměrná tvrdost 592 ± 5 MPa. To bylo způsobeno větším teplem, které bylo do materiálu vneseno. U vzorků ze sady OS2 se na hodnotě meze pevnosti negativně projevíly neprovařené kořeny svaru. Průměrná hodnota byla 577 ± 18 MPa. Vzorky ze sady OS3 a OS5 neměly kořeny svaru provařeny vůbec. Hodnoty meze pevnosti tak byly výrazně nižší. Konkrétně 331 MPa pro variantu OS3 a 276 ± 6 MPa pro

variantu OS5. U vzorků ze série OS1 a OS4 docházelo k přetržení v teplem ovlivněné oblasti kromě vzorku OS4-3, který se následkem vnitřní vady rozlomil uprostřed svaru. Vzorky ze sady OS2, OS3 a OS5 se lámaly v prostředku svaru.

U zkoušky třibodovým ohybem bylo zjišťováno maximální ohybové napětí a také se sledoval vznik případných trhlin při deformaci. Ohýbací trn tlačil na kořen svaru a simuloval tak vnitřní tlak v trubce. Při této zkoušce bylo zjištěno, že základní austenitický materiál je z hlediska ohybového zatěžování velmi tvárný. U žádného vzorku nebyly objeveny trhliny ani jiná porušení. Nejvyššího ohybového napětí dosáhl vzorek OS4 (694,5 MPa). Nejmenšího ohybového napětí pak dosáhl vzorek OS2 (601,6 MPa).

Dále byla provedena zkouška tvrdosti podle Vickerse. Ta proběhla pouze u vzorků OS1 a OS4. Jednotlivé vtisky měli mezi sebou rozestupy 0,3 mm kvůli vzájemnému ovlivnění. Vtisky procházely základním materiálem, TOO a samotným svarem. Byl zjišťován průběh tvrdosti při zatížení $HV_{0,1}$. V případě OS1 byl průběh tvrdostí všude přibližně stejný. Nejvyšší tvrdost byla naměřena v oblasti TOO a nejmenší v základním materiálu. Teplota v TOO byla nad A_{c3} , po rychlém ochlazení zde proběhla fázová transformace, která způsobila nárůst tvrdosti. Podle Schaefflerova diagramu bylo zjištěno, že ocel obsahuje malé množství feritu a fázová transformace byla možná. U vzorku OS4 nebyl nárůst tvrdosti v TOO tak výrazný jako u vzorku OS1 a celkově zde byla tvrdost nižší. To bylo pravděpodobně způsobeno celkově větším vneseným teplem do materiálu, který pomaleji chladl a nedošlo tak k fázové transformaci materiálu. Průměrná tvrdost u svaru OS1 měla hodnotu $254,7 \pm 15 HV_{0,1}$. U svaru OS4 byla průměrná tvrdost $209,1 \pm 15 HV_{0,1}$.

Dále bylo provedeno metalografické hodnocení vytvořených svarů. U svarů OS1 a OS4 byl zjištěn provařený kořen. Naopak tomu bylo svarů OS2, OS3 a OS5 nikoliv. Neprovařené kořeny u svarů OS3 a OS5 byly hodnoceny jako nepřijatelná chyba ve všech jakostech (B, C, D). U svaru OS2 byl neprovařený kořen vyhodnocen jako nepřijatelná chyba v jakosti B a C. V jakosti D byla vada přípustná. Na metalografických výbrusech šlo snadno určit šířku svarové housenky. Nejširší svarovou housenkou měl svar OS4 (6135 μm) a nejužší svarovou housenkou měl svar OS5 (2791 μm).

Lze konstatovat, že austenitické nerezové trubky 1.4307 jsou orbitálním svařováním metodou TIG snadno svařitelné. Správně nastavenými svařovacími parametry lze vytvořit kvalitní svary téměř bez vad. Vady se objevovaly pouze v místech, kde už byla před svařováním vada či jiná deformace (stehy, podélný svar z výroby). Výsledné svary byly z estetického hlediska v pořádku. Ve všech případech se vytvořil „penízkový“ svar. Ani v jednom případě nedošlo k rozstříku roztaveného kovu, bublání a jiným vadám.

Z výsledků experimentu lze tvrdit, že nejlepších vlastností dosáhl svar OS1. Měl perfektně provařený kořen a zároveň teplo vnesené do materiálu nebylo tak velké. Na rentgenogramu nebyly objeveny žádné vnitřní vady. Hodnota meze pevnosti v tahu byla nejvyšší a při zkoušce třibodovým ohybem nebyly objeveny žádné trhliny. Lze tedy konstatovat, že při orbitálním svařování trubek metodou TIG jsou optimální hodnoty svařovacího proudu 85 A pro horní proud a 27 A pro dolní proud.

10. Závěr

Cílem práce bylo pomocí vysokorychlostní kamery, laserového osvětlení a optického filtru vytvořit optimalizovaný postup zachycení vysokorychlostních jevů, které se při svařování uplatňují. Během svařovacího procesu dochází k natavování základního i přídatného materiálu. Vzniká svarová lázeň, která po ztuhnutí vytvoří svarový spoj. Tento proces je však nedokonalý.

Na základě analýzy vysokorychlostního záznamu byl pomocí změny svařovacích parametrů upraven svařovací proces tak, aby výsledný svarový spoj byl co možná nejkvalitnější a neobsahoval žádné nebo skoro žádné vady.

Následně byly zjištěné parametry svařovacího procesu ověřeny pomocí mechanických zkoušek, které zahrnovaly statickou zkoušku tahem, zkoušku tříbodovým ohybem a zkoušky tvrdosti. Dále byla hodnocena kvalita svarového spoje pomocí prozařovací rentgenové zkoušky a metalografie.

Ze všech těchto zkoušek bylo možné určit optimální svařovací podmínky pro daný materiál ve formě trubky na orbitální svářečce.

Lze konstatovat, že cíle diplomové práce byly naplněny a bylo dokázáno, že vysokorychlostního záznamu lze využít pro optimalizaci každého svařovacího procesu.

Použitá literatura

- [1] MEJZLIK, Tomáš. *Vysokorychlostní kamera v akci* [online]. [cit. 2017-11-25]. Dostupné z: <http://www.tvfreak.cz/vysokorychlostni-kamera-v-akci/3762>
- [2] KOMENDA, Jan. *Co je to vysokorychlostní kamera* [online]. [cit. 2017-11-25]. Dostupné z: <http://www.rucevzhuru.cz/tychlokamery/vysokorychlostni-kamera.html>
- [3] *Analýza obrazu – slovníček pojmů* [online]. [cit. 2017-11-26]. Dostupné z: <http://www.analyza-obrazu.cz/strojove-videni/slovnicek-pojmu/>
- [4] Photron Cameras [online]. [cit. 2018-01-25]. Dostupné z: <http://www.techimaging.com/photron>
- [5] Megapixel – *slovník pojmů* [online]. [cit. 2018-02-09]. Dostupné z: <https://www.megapixel.cz/slovník>
- [6] Proxis – *optické systémy a přístroje* [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <http://www.proxis.cz/vysokorychlostni-kamery>
- [7] PATA, Vladimír. *Vysokorychlostní kamerové systémy*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-7204-480-x.
- [8] Wikipedia – *halogenová žárovka* [online]. [cit. 2018-02-03]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Halogenova-zarovka>
- [9] JŮZA, Aleš. *Vliv svařování na lomovou houževnatost* [online]. [cit. 2018-01-25]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/vliv-svarovani-na-lomovou-houzevnatost/>
- [10] KUBÍČEK, Karel. *Technologie svařování* [online]. [cit. 2017-12-14]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/technologie_svarovani_kubicek.pdf
- [11] O ENERGETICE CZ – *Elektrický oblouk* [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/elektricky-oblouk/>
- [12] Airproducts – *Příručka svářeče CZ* [online]. [cit. 2017-11-29]. Dostupné z: http://www.airproducts.cz/~media/Files/PDF/industries/metals/CZ_Priruckasvarece-CZ
- [13] KOVAŘÍK, Rudolf a František ČERNÝ. *Technologie svařování*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-697-5.
- [14] Kolektiv autorů. *Technologie svařování a zařízení*. 1.vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. 395 s. ISBN 80-877-81-0
- [15] SVARINFO.CZ - *Wolframové elektrody pro TIG svařování* [online]. [cit. 2017-02-03]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2008011702>
- [16] KUNCIPÁL, Josef. *Teorie a technologie svařování, svařovací stroje a zařízení*. Plzeň: Ediční středisko VŠSE v Plzni, 1980.
- [17] KOUTNÝ, Jiří. *TIG svařování I - základní principy*. [online]. [cit. 2017-02-03]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=200801170>
- [18] Polysoude, *Trainer's guide – P6 CW*. [online]. [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <http://www.polysoude.com/orbital-and-automated-welding/orbital-tube-and-pipe-welding/>

- [19] ORBITEC – *Orbital Welding* [online]. [cit. 2017-11-02]. Dostupné z:
<http://orbitec-group.com/en/>
- [20] Orbitalum – *Orbitální svařování*; Katalog CZ [online]. [cit. 2017-11-02]. Dostupné z:
<http://www.orbitalum.de/Kataloge/>
- [21] Megapixel – *Objektivy a filtry* [online]. [cit. 2018-03-16]. Dostupné z:
<https://www.megapixel.cz/objektivy>
- [22] Nerezová ocel 1.430. *Inox* [online]. Praha: Inox, 2017 [cit. 2017-11-08]. Dostupné z:
<http://www.inoxspol.cz/nerezova-ocel-14307.html>
- [23] SKÁLOVÁ, Jana, Rudolf KOVAŘÍK a Vladimír BENEDIKT. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 4. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. ISBN 978-80-7043-417-8.
- [24] LUKÁŠEK, Ondřej. *Orbitální svařování oceli 316L*. Plzeň, 2018. Bakalářská práce (Bc.). Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, Katedra materiálů a strojírenské metalurgie, [cit. 2018-05-10]
- [25] Calcutta Electrodes – *Schaeffler diagram* [online]. [cit 2018-04-18]. Dostupné z:
http://www.calcuttaelectrodes.com/SCHAEFFLER_DIAGRAM.html

Seznam obrázků

Obr. 1 – vysokorychlostní kamera Olympus i-speed 2. [1].....	6
Obr. 2 – záznam z běžné kamery (30 fps). [4].....	6
Obr. 3 – záznam z vysokorychlostní kamery (240 fps).[4].....	6
Obr. 4 – snímek vysokorychlostního záznamu a) střely tříštící se o zeď, b) obloukového svařování tavící se elektrodou.[2,4].....	7
Obr. 5 – a) CCD snímač, b) hodnota intenzity v jednotlivých fotoreceptorech v obrazové matici. [2,3].....	8
Obr. 6 – proud fotonů procházející v kameře soustavou čoček a dopadající na obrazový snímač. [5].....	8
Obr. 7 – porovnání dynamického rozsahu lidského oka a obrazového senzoru. [5].....	10
Obr. 8 – vliv vzdálenosti na hloubku ostrosti. [5].....	10
Obr. 9 – velikost clony a její vliv na hloubky ostrosti. [5].....	11
Obr. 10 – záznam elektrického oblouku a) bez filtru, b) s filtrem. [4].....	13
Obr. 11 – teplem ovlivněná oblast – TOO. [9].....	14
Obr. 12 – řez elektrickým obloukem [11].....	15
Obr. 13 – elektrický oblouk mezi dvěma elektrodami. [11].....	15
Obr. 14 – správný sklon hořáku. [12].....	16
Obr. 15 – vliv velikosti svařovacího proudu na změnu velikosti průvaru. [14].....	16
Obr. 16 – vliv velikosti napětí na hloubku provaření a tvar svarové housenky. [14].....	17
Obr. 17 – vliv podélného a příčného způsobu broušení wolframové elektrody na elektrický oblouk. [15].....	17
Obr. 18 – příklady defektů svarů odshora zleva: kovový nebo nekovový vměstek, trhlina, rozstřík, nedostatečný průvar, zápal, bubliny / póry, studený spoj. [12].....	18
Obr. 19 – princip svařování metody TIG. [17].....	19
Obr. 20 – manuální a automatické dopravení přídavného materiálu do svarové lázně. [17].....	19
Obr. 21 – možnosti zapojení elektrického zdroje u metody TIG; a) DC – přímá polarita, b) DC – nepřímá polarita, c) AC. [17].....	20
Obr. 22 – průběh proudu při pulzním svařování a „penízkové svary“. [18].....	21
Obr. 23 – uzavřená svařovací orbitální hlava s el. zdrojem a řídicím PC [20].....	25
Obr. 24 – různé průměry uzavřených svařovacích orbitálních hlav. [20].....	25
Obr. 25 – pohyby, které může elektroda vykonávat u otevřené orbitální hlavy. [19].....	26
Obr. 26 – otevřená svařovací orbitální hlavice s přídavným drátem. [19].....	26
Obr. 27 – otevřená svařovací orbitální hlavice bez přídavného drátu. [19].....	26
Obr. 28 - znázorněný návrh experimentálního programu diplomové práce.....	27
Obr. 29 – vysokorychlostní kamera IDT – NX4 – S3. [18].....	28
Obr. 30 – objektiv Nikon AF-S NIKKOR 18-70mm, F3.5-4.5G ED. [21].....	28
Obr. 31 – pulzní laserové osvětlení CAVILUX HF. [6].....	29
Obr. 32 – halogenový reflektor 2x500 W. [8].....	29
Obr. 33 – orbitální svářečka Polysoude – programovatelný zdroj otevřená svařovací hlava / ovladač. [18].....	29
Obr. 34 – detail svařovací hubice s WLa elektrodou.....	30
Obr. 35 – nastavení parametrů na orbitální svářečce Polysoude, ze shora – průběh předfuku a dofuku ochranného plynu / velikost a doba působení horního a dolního proudu / průběh rotačního pohybu svařovací hlavy.[18].....	31

Obr. 36 – a) zaostření objektivu SIGMA s připevněným spektrálním filtrem, b) zaostření objektivu Nikon s připevněným spektrálním filtrem.....	32
Obr. 37 – ovládací program pulzního laserového osvětlení.....	34
Obr. 38 – a) vypnuté laserové osvětlení; b) zapnuté laserové osvětlení.....	34
Obr. 39 – a) vypnuté laserového osvětlení při svařování, b) zapnuté laserové osvětlení při svařování.....	35
Obr. 40 – rozmístění jednotlivých zařízení při experimentu.....	35
Obr. 41 – sestehovaná trubka.....	36
Obr. 42 – detail sestehované trubky.....	36
Obr. 43 – upnutí sestehované trubky ke svařovacímu stolu pomocí sklíčidel.....	36
Obr. 44 – improvizované ucpávky z Al folie a přívod formovacího plynu dovnitř svařované trubky.....	37
Obr. 45 – pracoviště, kde probíhal experimentu. [24].....	37
Obr. 46 – a) záznam ze svařování před úpravou, b) po úpravě v programu GIMP c) měřené parametry elektrického oblouku.....	38
Obr. 47 – upravené snímky svaru OS1, a) horní proud, b) dolní proud.....	40
Obr. 48 – svar OS1 a) vnější strana svaru b) vnitřní strana svaru.....	40
Obr. 49 – upravené snímky svaru OS2, a) horní proud, b) dolní proud.....	41
Obr. 50 – svar OS2 a) vnější strana svaru b) vnitřní strana svaru c) vnitřní strana svaru...	41
Obr. 51 – upravené snímky svaru OS3, a) horní proud, b) dolní proud.....	42
Obr. 52 – svar OS3 a) vnější strana svaru b) vnitřní strana svaru.....	42
Obr. 53 – upravené snímky svaru OS4, a) horní proud, b) dolní proud.....	43
Obr. 54 – svar OS4 a) vnější strana svaru b) vnitřní strana svaru.....	43
Obr. 55 – upravené snímky svaru OS5, a) horní proud, b) dolní proud.....	44
Obr. 56 – svar OS5 a) vnější strana svaru b) vnitřní strana svaru.....	44
Obr. 57 – upravené snímky svaru OS6, a) horní proud, b) dolní proud.....	45
Obr. 58 – propálený základní materiál u svaru OS6.....	45
Obr. 59 – upravené snímky svaru OS7, a) horní proud, b) dolní proud.....	46
Obr. 60 – propálený základní materiál u svaru OS7.....	46
Obr. 61 – ukázka různé šířky vyrobených vzorků na mechanické zkoušky, sada OS5.....	49
Obr. 62 – rentgenový snímek vzorků OS1, a) negativ, b) pozitiv.....	50
Obr. 63 – rentgenový snímek vzorků OS2, a) negativ, b) pozitiv.....	51
Obr. 64 – vizuální porovnání vzorků OS2-3 a OS2-4.....	51
Obr. 65 – rentgenový snímek vzorků OS3, a) negativ, b) pozitiv.....	52
Obr. 66 – detail svaru OS3-3.....	52
Obr. 67 – rentgenový snímek vzorků OS4, a) negativ, b) pozitiv.....	53
Obr. 68 – detail kořene svaru vzorku OS4-4.....	53
Obr. 69 – rentgenový snímek vzorků OS5, a) negativ, b) pozitiv.....	54
Obr. 70 – a) univerzální trhací stroj DMG, b) detail upnutí vzorku v čelistech stroje.....	55
Obr. 71 – vizuální porovnání přetržených vzorků OS1, a) vnější strana svaru, b) vnitřní strana svaru.....	56
Obr. 72 – porovnání přetržených vzorků OS2, a) vnější strana svaru, b) vnitřní strana svaru.....	57
Obr. 73 – porovnání přetržených vzorků OS3, a) vnější strana svaru, b) vnitřní strana svaru.....	57
Obr. 74 – porovnání přetržených vzorků OS4, a) vnější strana svaru, b) vnitřní strana svaru.....	58

Obr. 75 – porovnání přetržených vzorků OS5, a) vnější strana svaru, b) vnitřní strana svaru.....	58
Obr. 76 – a) univerzální trhací stroj Zwick/Roell Z005, b) uložení zkušební vzorku....	59
Obr. 77 – porovnání všech vzorků ze zkoušky ohybem, a) vnější strana trubky, b) vnitřní strana trubky.....	60
Obr. 78 – schéma zkoušky tvrdosti dle Vickerse [24].....	61
Obr. 79 – mikrotvrdoměr Struers Durascan [24].....	61
Obr. 80 – poloha a označení vtisků mikrotvrdoměru u svaru OS1. [24].....	62
Obr. 81 – makrostruktura svaru OS1, zvětšeno 25x. [24].....	65
Obr. 82 - hranice ztavení svarového spoje OS1, zvětšeno 100x. [24].....	65
Obr. 83 – osa svaru svarového spoje OS1, zvětšeno 100x. [24].....	65
Obr. 84 – makrostruktura svaru OS2, zvětšeno 25x. [24].....	66
Obr. 85 – hranice ztavení svarového spoje OS2, zvětšeno 100x. [24].....	66
Obr. 86 - osa svaru svarového spoje OS2, zvětšeno 100x. [24].....	66
Obr. 87 – makrostruktura svaru OS3, zvětšeno 25x. [24].....	67
Obr. 88 – hranice ztavení svarového spoje OS3, zvětšeno 100x. [24].....	67
Obr. 89 – osa svaru svarového spoje OS3, zvětšeno 100x. [24].....	67
Obr. 90 – makrostruktura svaru OS4, zvětšeno 25x. [24].....	68
Obr. 91 – hranice ztavení svarového spoje OS4, zvětšeno 100x. [24].....	68
Obr. 92 – osa svaru svarového spoje OS4, zvětšeno 100x. [24].....	68
Obr. 93 – makrostruktura svaru OS5, zvětšeno 25x. [24].....	69
Obr. 94 – hranice ztavení svarového spoje OS5, zvětšeno 100x. [24].....	69
Obr. 95 – osa svaru svarového spoje OS5, zvětšeno 100x. [24].....	69
Obr. 96 – hodnocení neprovařeného kořene svaru.....	70

Seznam grafů

Graf 1 – porovnání šířky elektrického oblouku – horní proud.....	47
Graf 2 – porovnání šířky elektrického oblouku – dolní proud.....	47
Graf 3 – porovnání úhlu elektrického oblouku – horní proud.....	47
Graf 4 – porovnání doby tuhnutí taveniny.....	48
Graf 5 – porovnání průměrné meze pevnosti v tahu.....	56
Graf 6 – porovnání průběhu ohybových napětí v závislosti na deformaci.....	60
Graf 7 – průběh tvrdosti u svaru OS1. [24].....	62
Graf 8 – průběh tvrdosti u svaru OS4. [24].....	63
Graf 9 – schaefflerův diagram pro ocel 1.4307. [25].....	64
Graf 10 – šířka svarové housenky.....	70

Seznam tabulek

Tab. 1 – kapacitní tabulka vysokorychlostní kamery TroubleShooter 1000. [1].....	12
Tab. 2 – doporučené parametry při svařování metodou TIG. [17].....	22
Tab. 3 – základní parametry kamery IDT – NX4 – S3. [18].....	27
Tab. 4 - chemické složení oceli 1.4307. [22].....	30
Tab. 5 – přehled použitých svařovacích proudů.....	38
Tab. 6 – svařovací parametry u OS1.....	39
Tab. 7 – naměřené hodnoty ze svaru OS1.....	39
Tab. 8 – svařovací parametry u OS2.....	41
Tab. 9 – naměřené hodnoty ze svaru OS2.....	41
Tab. 10 – svařovací parametry u OS3.....	42
Tab. 11 – naměřené hodnoty ze svaru OS3.....	42
Tab. 12 – svařovací parametry u OS4.....	43
Tab. 13 – naměřené hodnoty ze svaru OS4.....	43
Tab. 14 – svařovací parametry u OS5.....	44
Tab. 15 – naměřené hodnoty ze svaru OS5.....	44
Tab. 16 – svařovací parametry u OS6.....	45
Tab. 17 – naměřené hodnoty ze svaru OS6.....	45
Tab. 18 – svařovací parametry u OS7.....	47
Tab. 19 – naměřené hodnoty ze svaru OS7.....	47
Tab. 20 – šířka jednotlivých vzorků pro mechanické zkoušky.....	49
Tab. 21 – naměřené hodnoty meze pevnosti z trhacího stroje.....	55
Tab. 22 – maximální ohybová napětí.....	60

Seznam příloh

Protokol ze zkoušky tahem – OS1-2

Protokol ze zkoušky tahem – OS1-3

Protokol ze zkoušky tahem – OS1-4

Protokol ze zkoušky tahem – OS2-2

Protokol ze zkoušky tahem – OS2-3

Protokol ze zkoušky tahem – OS2-4

Protokol ze zkoušky tahem – OS3-1

Protokol ze zkoušky tahem – OS3-3

Protokol ze zkoušky tahem – OS3-4

Protokol ze zkoušky tahem – OS4-1

Protokol ze zkoušky tahem – OS4-2

Protokol ze zkoušky tahem – OS4-3

Protokol ze zkoušky tahem – OS5-1

Protokol ze zkoušky tahem – OS5-3

Protokol ze zkoušky tahem – OS5-4