



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# POROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ TUPÝCH SVARŮ SVAŘENÝCH LASEREM A PLAZMOU PRO AUSTENITICKOU A FERITICKOU KOROZIVZDORNOU OCEL

COMPARISON OF PROPERTIES OF BUTT JOINTS WELDED BY LASER AND PLASMA FOR AUSTENITIC  
AND FERRITIC STAINLESS STEEL

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Zajíc

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

BRNO 2018

# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Bc. Jiří Zajíc**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Strojírenská technologie  
Vedoucí práce: **doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.**  
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## **Porovnání vlastností tupých svarů svařených laserem a plazmou pro austenitickou a feritickou korozivzdornou ocel**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Provést srovnání laserem a plazmou provedených tupých svarů vytvořených pomocí laserového a plazmového svařování na korozivzdorné austenitické a feritické oceli. Zhodnotit geometrii svaru, mechanické vlastnosti a případné svarové vady.

### **Cíle diplomové práce:**

Osvojit si technologii laserového a plazmového svařování.  
Osvojit si metodiku návrhu a provedení experimentu.  
Osvojit si základy metalografického vyhodnocování svaru.  
Osvojit si metody mechanických zkoušek svarového spoje.

### **Seznam doporučené literatury:**

BENKO B., FODEREK P., KOSEČEK M., BIELAK R.I.: Laserové technológie, 1.vyd., Bratislava, Vydavateľstvo STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9.

DULEY W.W.: Laser welding, New York 1999, A.Wiley-Interscience publication, ISBN 0-471-24679-4.

KANNATEY-ASIBU, E.: Principles of Materials Processing, John Wiley&Sons, Inc. Publication, 2009, ISBN 978-0-470-17798-3.

AMBROŽ O., KANDUS B., KUBÍČEK J.: Technologie svařování a zařízení, Ostrava, Zeross, 2001, 395 str. ISBN 80-85771-81-0.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

ZAJÍC Jiří: Porovnání vlastností tupých svarů svařených laserem a plazmou pro austenitickou a feritickou korozivzdornou ocel.

---

Práce je zaměřena na vyhodnocení a porovnání svarů, vytvořených technologiemi svařování laserem a plazmou. Pro porovnání byly použity austenitická korozivzdorná ocel X5CrNi18-10 a feritická korozivzdorná ocel X6Cr17. Tyto materiály byly vybrány z důvodu svých rozdílných vlastností, kterých nabývají v důsledku působení vysokých teplot, spojeného se svařovacími procesy. V první části je práce zaměřena na popis svařovaných materiálů a technologií svařování laserem a plazmového svařování. V experimentální části se práce zabývá vyhodnocením vzorků svarů, které byly za tímto účelem vytvořeny. Vzorky jsou zkoumány z hlediska metalografie v podobě makrostruktury a mikrostruktury. Dále jsou zkoumány jejich mechanické vlastnosti tahové zkoušky a zkoušky mikrotvrdosti.

Klíčová slova: Svařování, laser, plazma, korozivzdorná ocel, keyhole

## **ABSTRACT**

ZAJÍC Jiří: Comparison of properties of butt joints welded by laser and plasma for austenitic and ferritic stainless steel.

---

The thesis is focused on evaluation and comparison of welds made by welding technologies using laser and plasma. For the purpose of comparing those technologies, were chosen austenitic stainless steel x5CrNi18-18 and ferritic stainless steel X6Cr17. These materials were chosen for their diversity in properties gained by high temperatures that go along with most welding processes. First part of the thesis is focused on description of welded materials and technologies of laser and plasma welding. In following experimental section, the thesis is focused on evaluation of welded samples, made for this purpose. Samples were examined for metallography, specifically macrostructure and microstructure. Followed by tensile test of mechanical properties and microhardness test.

Keywords: Welding, laser, plasma, stainless steel, keyhole

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ZAJÍC, Jiří. *Porovnání vlastností tupých svarů svařených laserem a plazmou pro austenitickou a feritickou korozivzdornou ocel*. Brno, 2018. 78 s, 3 přílohy, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 24.5.2018

.....

Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji panu doc. RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování mé diplomové práce a také své rodině za podporu po dobu celého mého studia. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Petru Horníkovi, paní Ing. Mgr. Haně Šebestové Ph.D., panu Ing. Kamilu Podanému Ph.D. a panu Vojtěchu Řiháčkovi za asistenci při vyhotovení a testování vzorků.

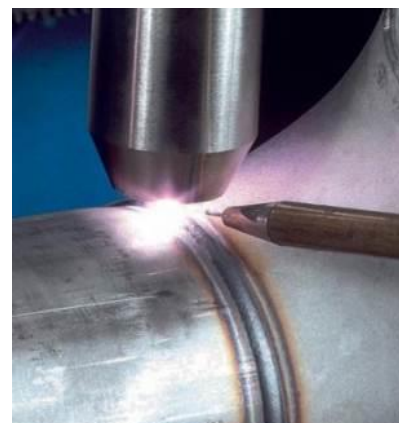
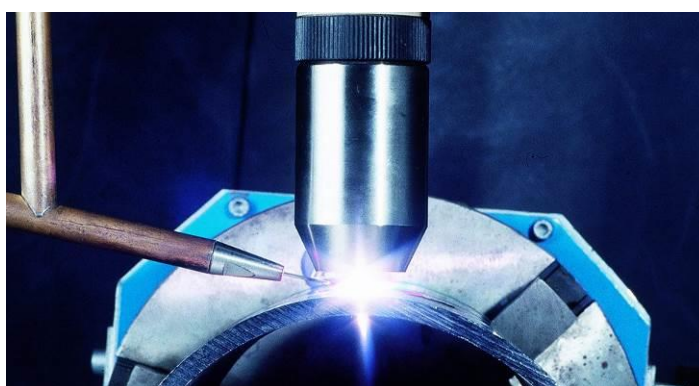
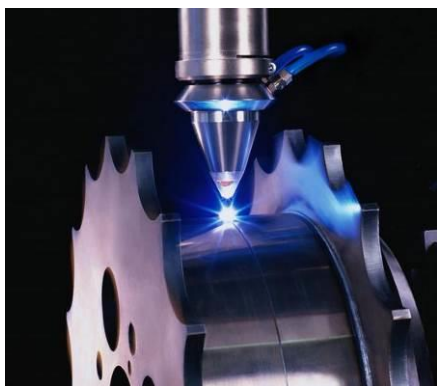
# OBSAH

Zadání	
Abstrakt	
Bibliografická citace	
Čestné prohlášení	
Poděkování	
Obsah	
<b>ÚVOD</b>	10
<b>1 ROZBOR ZADÁNÍ</b>	11
<b>1.1 Popis materiálů vzorků</b>	12
<b>2 TEORIE LASEROVÉHO A PLAZMOVÉHO SVAŘOVÁNÍ</b>	14
<b>2.1 Laserový paprsek</b>	15
2.1.1 Rozdělení laserů	15
2.1.2 Svařování laserem	19
2.1.3 Laserová svařovací hlava	21
<b>2.2 Plazma</b>	22
2.2.1 Plazmové plyny	23
2.2.2 Plazmové hořáky	24
2.2.3 Plazmové svařování	26
<b>2.3 Postupy vyhodnocení svarových spojů</b>	27
2.3.1 Makroskopická zkouška	27
2.3.2 Mikroskopická zkouška	27
2.3.3 Tahová zkouška	27
2.3.4 Ohybová zkouška	28
2.3.4 Zkouška mikrotvrdomosti	29
<b>3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b>	30
<b>3.1 Svařování laserem</b>	32
<b>3.2 Plazmové svařování</b>	33
<b>3.3 Metalografie</b>	34
3.3.1 Vyhodnocení makrostruktury	35
3.3.2 Vyhodnocení mikrostruktury	37
<b>3.4 Zkouška mikrotvrdomosti</b>	50
<b>3.5 Tahová zkouška</b>	53
<b>3.6 Zhodnocení výsledků zkoušek</b>	58
<b>4 TECHNICKO – EKONOMICKÉ HODNOCENÍ</b>	59
<b>5 ZÁVĚRY</b>	60
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých symbolů a zkratk	
Seznam obrázků	
Seznam tabulek	
Seznam příloh	



## ÚVOD

Celá oblast svařování zahrnuje jak velké spektrum technologií založených na nejrůznějších fyzikálních a chemických procesech, tak i širokou škálu materiálů, které je možné těmito technologiemi svařovat. Velmi významnou oblastí je svařování korozivzdorných ocelí z hlediska jejich širokého využití v oblastech chemického a potravinářského průmyslu, ale také v oblasti výroby domácích spotřebičů, automobilního průmyslu apod. Zejména v posledních jmenovaných odvětvích, ve kterých se setkáváme převážně s hromadnou výrobou dílů, je z hlediska konkurenceschopnosti daných společností, kladen důraz na snižování nákladů, na výrobu daných produktů, při zachování jejich kvality a požadovaných vlastností. Jedním z možných způsobů, jak náklady snížit je nahradit austenitickou korozivzdornou ocel korozivzdornou ocelí feritickou, která ve svém složení obsahuje výrazně menší množství austenitotvorného prvku niklu, který cenu dané oceli výrazně ovlivňuje. Tato záměna může mít především pro svařování konvenčními metodami velký dopad na výslednou kvalitu svarového spoje, jelikož u feritické oceli dojde během procesu k zhrubnutí zrna vlivem vysoké teploty, které vede ke zhoršení především pevnostních parametrů výsledných svarů. Tento jev je však možné eliminovat použitím technologií svařování s velkou koncentrací tepelného výkonu, jako jsou svařování laserem a plazmové svařování, jelikož při jejich použití přechází do základního materiálu výrazně menší množství tepla, což má za následek potlačení efektu hrubnutí zrna a degradace mechanických vlastností svarů. Tato práce je zaměřena na porovnání svarů vytvořených z austenitické a feritické korozivzdorné oceli za pomoci technologií laserového a plazmového svařování a následného vyhodnocení těchto svarů z pohledu makrostruktury, mikrostruktury, pevnostních parametrů a mikrotvrdosti.



## 1 ROZBOR ZADÁNÍ [1], [3], [4], [6], [7], [8], [9], [13]

Vytvoření svarových spojů lze v praxi docílit různými způsoby založenými na různých fyzikálních procesech. V největší míře se pro svařování využívá působení tlaku, tepla nebo jejich kombinace. Zástupci tlakového svařování jako např. svařování třením, odporové a difúzní svařování apod. jsou takovými metodami, které mají své velmi specifické vlastnosti, výhody a nevýhody. Díky tomu jsou v praxi využitelné jen v omezené míře pro určité druhy produktů. Zástupci tavného svařování se liší svojí větší univerzálností a díky tomu i svou lepší využitelností pro širší spektrum produktů.

Mezi nejrozšířenější metody svařování patří svařování obloukové a jeho podskupiny jako např. svařování obalenou elektrodou, svařování tavící se (MIG/MAG) nebo netavící se (TIG/WIG) elektrodou v ochranné atmosféře, případně pod tavidlem. Svařování metodou TIG viz obr. 1. Výhodou těchto metod je jejich univerzálnost, dobré možnosti automatizace, relativně nízká pořizovací cena a náklady na provoz, dále také nízké nároky na kvalifikovanost obsluhy. Nevýhodami těchto technologií jsou s výjimkou metody TIG nízká kvalita svarů s velkým rizikem vzniku vad, velké tepelné ovlivnění okolí místa svaru a v neposlední řadě nízká produktivita. Pro velkou část produktů, na které nejsou kladeny velké nároky z pohledu kvality pevnosti apod., jsou tyto nevýhody přijatelné s ohledem na výslednou cenu produktu. Existuje však významná skupina produktů, u kterých je nevyhnutelné dosahovat mnohem vyšších kvalit svarů i za cenu vyšších nákladů. Z tohoto důvodu jsou do praxe stále více implementovány méně konvenční technologie, které jsou schopné dosahovat kvalit svarů a jejich parametrů, které by jinými technologiemi byly jen velice obtížně dosažitelné. Mezi tyto technologie patří např. svařování za pomoci laseru, plazmatu nebo elektronového svazku. Tyto metody jsou velmi výhodné hlavně z hlediska využitelnosti pro různé materiály při dosažení vysoké kvality svaru, velké produktivity a možnosti svařovat velké tloušťky materiálu s minimálním množstvím vneseného tepla a díky tomu minimálním ovlivněním okolí svaru. Z pohledu metody elektronového svazku je však produktivita limitována potřebou dosažení vysokého stupně vakua v prostoru svařování.

Z hlediska aplikovatelnosti, produktivity a výsledné kvality jsou tedy metody využívající laser a plazma velmi výhodné. Jejich velkou výhodou je také velmi dobrá možnost využití v oblasti svařování korozivzdorných ocelí. Svařování těchto materiálů má s ohledem na vysoké procento přísad do základní slitiny železo-uhlík svá specifika. S ohledem na využití těchto technologií v praxi je nutné znát chování daných materiálů během a zejména po uskutečnění těchto procesů.

Z hlediska složení a jeho dopadu na výslednou materiálovou strukturu, můžeme rozdělit korozivzdorné oceli na austenitické, feritické, martenzitické a duplexní. Nejpoužívanějšími druhy v praxi jsou oceli austenitické a feritické. V případě svařování austenitických ocelí v materiálu nedochází k tak velkým změnám v okolí svaru vlivem působení teploty. V případě svařování feritické korozivzdorné oceli dochází vlivem působení vysokých teplot ke zhrubnutí zrna a tak i ke změně mechanických vlastností.



Obr. 1 Svařování metodou TIG/WIG [13]

## 1.1 Popis materiálu vzorků [10], [11], [12], [14],

Vzorky budou vyhotoveny ze dvou druhů ocelí, a to X5CrNi18-10 a X6Cr17. V obou případech se jedná o vysokolegované korozivzdorné oceli. Materiálové listy daných taveb byly vyhotoveny a dodány výrobcem, viz přílohy 1 a 2. Chemické složení a základní mechanické vlastnosti jsou zaneseny do tab. 1.

Tab. 1 Chemické složení a mechanické vlastnosti materiálů vzorků

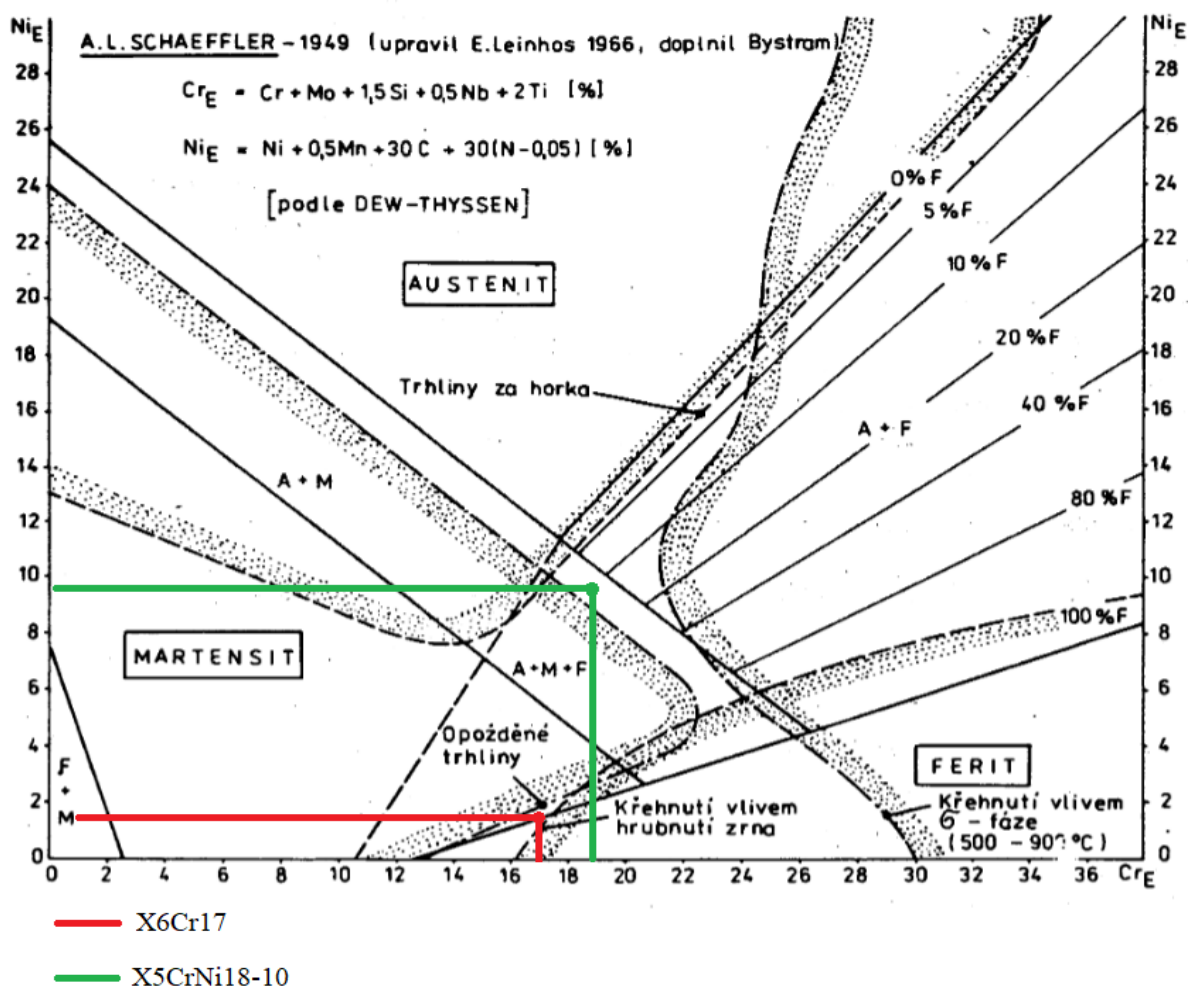
Ocel	Označení	Chemické složení [%]							
X5CrNi18-10	DIN 1.4303 ČSN 17240 AISI 304		C	Cr	Ni	P	S	Si	Mn
		Dle normy	≤ 0,07	17-19,5	8-10,5	≤ 0,045	≤ 0,03	≤ 1,0	≤ 2
		Materiál. list	0,032	18,2	8,2	0,029	0,001	0,42	1,54
		Mechanické vlastnosti							
			Rm [MPa]	Rp0,2 [MPa]	A50 [%]	KV [J]	Tvrdość HB	Struktura	
		Dle normy	520 - 720	210	45	100	215	Austenit	
Materiál. list	605	268	60		158				
X6Cr17	DIN 1.4016 ČSN 17040 AISI 430	Chemické složení [%]							
			C	Cr	Ni	P	S	Si	Mn
		Dle normy	≤ 0,06	16-18		≤ 0,045	≤ 0,03	≤ 1,0	≤ 1,0
		Materiál. list	0,043	16,09	0,21	0,032	0,004	0,39	0,51
		Mechanické vlastnosti							
			Rm [MPa]	Rp0,2 [MPa]	A50 [%]	KV [J]	Tvrdość HB	Struktura	
Dle normy	430-630	240	20	100	200	Ferit			
Materiál. list	478	326	32		151				

- X5CrNi18-10 – Jedná se o chrom niklovou austenitickou ocel. Tato ocel je odolná proti korozi běžného typu, jako je např. voda, slabé kyseliny, velkoměstské a průmyslové prostředí. Tuto ocel můžeme považovat za svařitelnou za předpokladu vhodného tepelného zpracování před a po svařování při svařování materiálů o vyšších tloušťkách. Mimo oblast svařování je tato ocel také vhodná ke stříhání, ohýbání, tažení a disponuje dobrou obrobiteľností a leštitelností. Hodnota tepelné vodivosti této oceli je 14,7 W/m·K.

Tato ocel vyhovuje svým složením pro použití v oblasti potravinářství a zpracování pitné vody. Mimo tyto obory je také vhodná pro širokou škálu využití v oblastech vyžadující korozivzdornost jako např. externí architektura apod. Maximální přípustná teplota pro její použití je 450°C.

- X6Cr17 – V tomto případě se jedná o chromovou feritickou ocel. Tato ocel disponuje dobrou korozní odolností vůči koroznímu prostředí běžného typu. Tato ocel je svařitelná ale náchylná ke snížení plastických vlastností v okolí svaru vlivem zhrubnutí zrna. Mimo svařování je tato ocel využívána v oblastech stříhání, ohýbání, hlubokého tažení. Je dobře obrobiteľná a velmi dobře leštitelná. Hodnota tepelné vodivosti této oceli je 18,84 W/m·K.

V praxi je tato ocel využívána zejména pro ploché, tenkostěnné výrobky určené do málo agresivního prostředí. V případě vystavení více agresivnímu prostředí jako např. velkoměsta nebo průmyslové oblasti, má tato ocel sklon k plošné korozi, která se projeví jako postupné žloutnutí jejího povrchu. Ocel je použitelná pro prostředí o teplotě do 300°C.



Obr. 2 Schaefflerův diagram [14]

Na obr. 2 je znázorněn Schaefflerův diagram. Tento diagram dává do souvislosti vliv austenitotvorných (Ni, Mn, C, N) a feritotvorných (Cr, Mo, Si, Nb, Ti) prvků za pomoci niklového a chromového ekvivalentu ( $Cr_E$  a  $Ni_E$ ). Na základě těchto dvou hodnot je možné z diagramu určit, jakou strukturou je materiál tvořen, případně jeho náchylnost k praskání a křehnutí vlivem svařování. Chromový ekvivalent je vypočítán pro obě oceli dle rovnice 1.1, niklový ekvivalent je vypočítán pro obě oceli dle rovnice 1.2. Ekvivalenty austenitické oceli jsou označeny indexem A, ekvivalenty feritické oceli indexem F. Vypočítané hodnoty byly zaneseny do Schaefflerova diagramu. Nalezené body na diagramu odpovídají předpokládaným strukturám a očekávanému křehnutí feritické oceli vlivem hrubnutí zrna.

$$Cr_E = Cr + Mo + 1,5 \cdot Si + 0,5 \cdot Nb + 2 \cdot Ti \quad (1.1)$$

$$Cr_{EA} = 18,2 + 0 + 1,5 \cdot 0,42 + 0,5 \cdot 0 + 2 \cdot 0 = 18,83 \% \quad (1.1)$$

$$Cr_{EF} = 16,09 + 0,1 + 1,5 \cdot 0,39 + 0,5 \cdot 0 + 2 \cdot 0 = 16,78\% \quad (1.1)$$

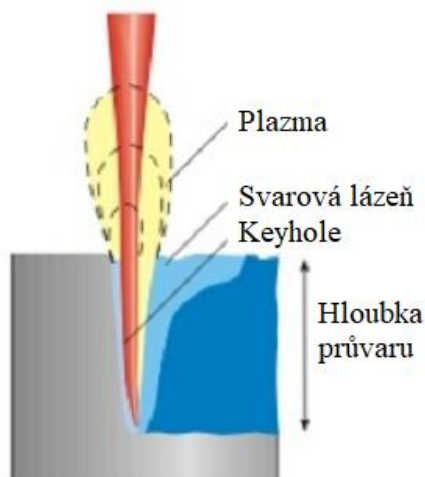
$$Ni_E = Ni + 0,5 \cdot Mn + 30 \cdot C + 30 \cdot (N - 0,05) \quad (1.2)$$

$$Ni_{EA} = 8,52 + 0,5 \cdot 1,54 + 30 \cdot 0,023 + 0 = 9,66 \% \quad (1.2)$$

$$Ni_{EF} = 0,21 + 0,5 \cdot 0,51 + 30 \cdot 0,043 + 0 = 1,76 \% \quad (1.2)$$

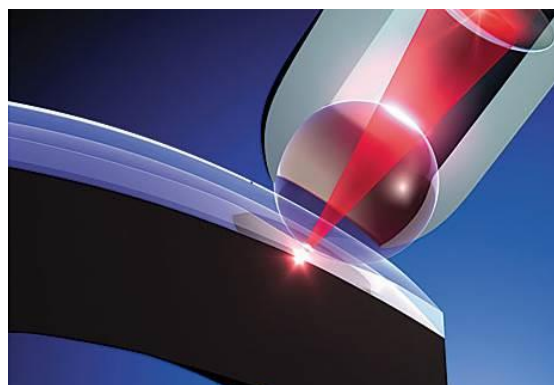
## 2. TEORIE LASEROVÉHO A PLAZMOVÉHO SVAŘOVÁNÍ [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [15], [16], [17],

Obě technologie spadají do kategorií svařování s vysokou koncentrací tepelného výkonu a vycházejí ze základů molekulové a částicové fyziky. Díky zmíněné vysoké koncentraci tepelného výkonu využívají obě technologie svařování pomocí tzv. keyhole, neboli svařování klíčovou dírkou. Viz obr. 3. Tento proces v praxi funguje tak, že paprsek, který iniciuje proces tavení materiálu má dostatečnou energii na to, aby nedocházelo pouze k tavení svarového kovu ale i k jeho částečnému vypařování až ionizaci. Tyto výpary při svém odchodu z místa svaru poté udržují svůj dynamický účinek v rovnováze s účinky povrchového napětí svarové lázně tak, aby nedocházelo k uzavírání hladiny svarového kovu v místě průchodu daného paprsku. Tento proces umožňuje svařování materiálů s velkou tloušťkou na jeden průchod svařovací aparatury.



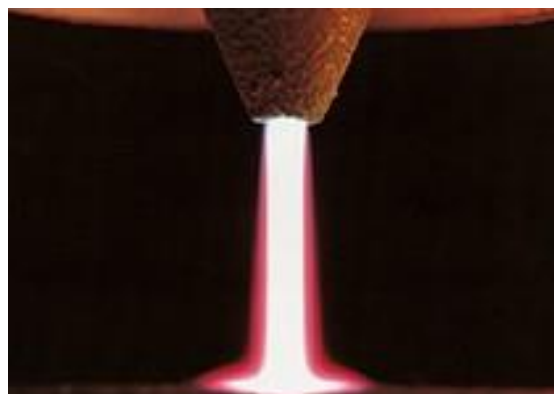
Obr. 3 Keyhole [15]

V případě laseru už samotný název napovídá princip jeho funkce. Z anglického názvu Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což v překladu znamená zesilování světla stimulovanou emisí záření. Laser tedy můžeme chápat jako zdroj vysoce koherentního elektromagnetického záření získaného pomocí stimulované emise záření aktivních částic. Oproti klasickým zdrojům světla se laserový paprsek vyznačuje rovnoběžným a synchronizovaným svazkem fotonů, úzkopásmovým spektrálním rozsahem, krátkou délkou pulzu a vysokou schopností zaostření do malé plochy, viz obr. 4.



Obr. 4 Zaostření laserového paprsku [16]

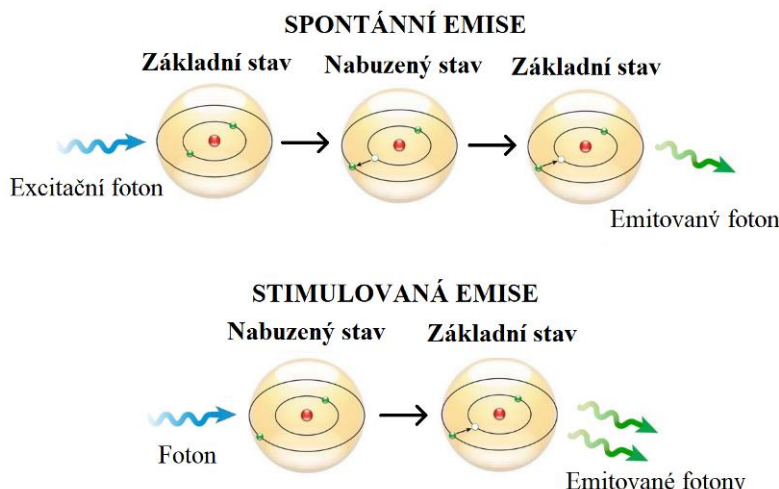
V případě plazmového svařování dosahujeme vysoké teploty potřebné pro svařování za pomoci disociace a ionizace plynů. Těchto stavů plynu se dosahuje za pomoci vysoké teploty, kterou zajišťuje elektrický oblouk hořící mezi elektrodou a základním materiálem, případně samotným hořákem. Díky průchodu plazmového plynu přes elektrický oblouk a jeho následné ionizaci můžeme dosáhnout velmi vysokých teplot, které mohou dosahovat i 30000K. Významným faktorem pro využití této technologie pro svařování je dynamický účinek ionizovaného plynu, který napomáhá tvorbě již zmiňované keyhole. Sloupec plazmy vycházející z hořáku je zobrazen na obr. 5.



Obr. 5 Plazmový svazek [17]

## 2.1 Laserový paprsek [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [18]

Jak je již zmíněno výše, technologie laseru je založena na principu stimulované emise. Všechny látky, bez ohledu na to zda jsou tvořeny atomy či molekulami, mají schopnost absorbovat dopadající energii ve formě kinetické energie dopadajících částic, záření, apod. Jelikož k těmto dějům dochází na úrovni kvantové fyziky, velikosti předávané energie nemohou být libovolné, ale jsou kvantovány. Díky tomu se atom nebo molekula může nacházet



Obr. 6 Stimulovaná emise [18]

v různých energetických stavech, čili hladinách. Po absorbování této energie se částice dostane do nabuzeného (excitovaného) stavu. Tento stav však běžně trvá jen velmi krátce a okamžitě dojde ke spontánní emisi přebytečné energie a částice se vrátí na svoji původní energetickou úroveň. Tento jev se nazývá spontánní emise. Viz obr. 6.

U částic některých látek existují tzv. zakázané hladiny. Pokud se částice látky dostane do takového stavu, není schopna absorbovanou energii okamžitě vyzářit, jako v případě spontánní emise. Aby k tomu došlo, musí být této částici předána další energie v podobě fotonu. Tato energie však musí být rovna rozdílu energií zakázané a základní energetické hladiny. Poté dojde vyzáření přebytečné energie v podobě fotonu. Tento foton má totožný směr energie a fázi jako foton, kterým byl vyvolán. Tento jev se nazývá stimulovaná emise, viz obr. 6.

### 2.1.1 Rozdělení laserů [1], [3], [4], [6], [7], [8], [9], [19], [20], [21], [22], [23]

Generátory laserového paprsku je možné rozdělit do skupin podle několika hledisek. Základní rozdělení dle těchto hledisek je znázorněno v tabulce 2.

Tab. 2 Rozdělení laserů

Dle typu aktivního prostředí:	Dle typu buzení:
• Plynové	• Optické
• Pevnolátkové	• Chemické
• Vláknové	• Elektronovým svazkem
• Polovodičové	• Elektrickým výbojem
• Chemické	• Rekombinací
• Excimerové	• Tepelnými změnami
• Barvivové	• Injekcí nosičů náboje
Dle vlnové délky paprsku:	Dle druhu výstupního svazku:
• Infračervené	• Kontinuální
• V oblasti viditelného světla	• Pulzní
• Ultrafialové	• S ultrakrátkými pulzy
• Rentgenové	

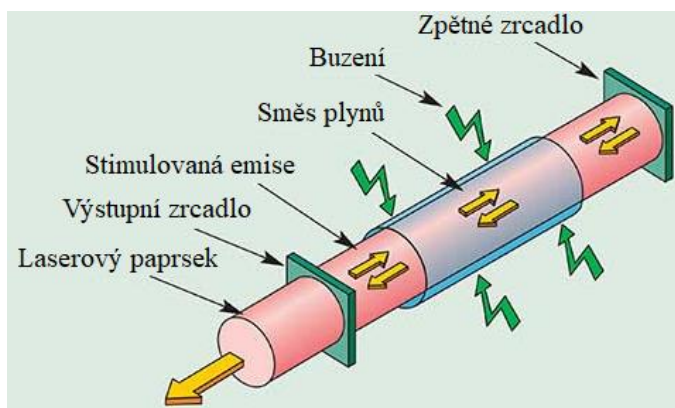
Z hlediska využití v praxi je nejvíce významné rozdělení z hlediska typu aktivního prostředí a pro svařování jsou poté nejvýznamnějšími takové lasery, které jsou schopné generovat kontinuální laserový paprsek.

- CO<sub>2</sub> Lasery – V celé oblasti strojírenství patří tato lasery v dnešní době mezi nejrozšířenější, hlavně v oblasti řezání, a to zejména díky velkému rozsahu výstupních výkonů. Jak je patrné z názvu, jedná se o plynové lasery. Složení výsledné směsi se však nesestává pouze z oxidu uhličitého, ale jako do aktivního plynu se používá příměs helia, jenž zajišťuje lepší odvod tepla a dusíku, který působí pozitivně na proces nabuzení. Pro správnou funkci je nezbytné, aby byly požitý plyny ve vysoké čistotě, tak aby nedocházelo ke snižování výkonu a kvality laserového paprsku.

Vlnová délka emitovaného světla je 10600nm, jedná se tedy o lasery pracující v oblasti infračerveného záření. Rozmezí energetické účinnosti se u tohoto typu laseru pohybuje v oblasti 5 – 25%. Jako zdroj energie pro čerpání aktivního prostředí na vyšší energetické hladiny zde figuruje vysokofrekvenční nebo stejnosměrný výboj, hořící v trubici obsahující aktivní plyn.

Směs plynů se nachází ve skleněné trubici mezi zrcadly optického rezonátoru při tlaku mezi 1 a 4kPa. Jelikož při procesu stimulované emise dochází k vývinu tepla, je tato trubice připojena k systému dalších trubíc, které zajišťují cirkulaci směsi plynů směrem do výměníku a zpět. Způsoby proudění směsi plynu skrz optický rezonátor jsou různé. Směs plynů může být do optického rezonátoru přiváděna ve směru paprsku laseru (axiálně) nebo ve směru kolmém na paprsek laseru (radiálně). Dále také může být plyn přiváděn vysokou nebo nízkou rychlostí. Na obr. 7 můžeme vidět konstrukci optického rezonátoru, která je ve svých hlavních bodech podobná jak pro podélná tak pro příčný tok plynu. Rozdílem je pouze směr přivádění směsi plynů.

- Podélný tok plynu – Jak již bylo zmíněno výše, v tomto případě je tok plynu rovnoběžný s normálami zrcadel neboli směrem samotného paprsku. Omezením této konfigurace je, že chlazení je realizováno pomocí stěn rezonátoru a díky směru proudění není příliš efektivní. Výsledkem je, že nesmí být generován paprsek s větším výkonem než 100W na metr délky rezonátoru. Z toho důvodu je pro zvýšení výkonu nutné použít dlouhé rezonátory. Kvalita laserového paprsku je velmi vysoká, ale s ohledem na nízké dosahované výkony není tato konfigurace v praxi příliš vhodná pro svařování.
- Příčný tok plynu – Díky přívodu plynu kolmo na osu rezonátoru, má tato konfigurace mnohem větší chladičí výkon a tím pádem můžeme dosahovat mnohem větších výkonů a to až do hranice 50kW. Kvalita laserového paprsku je však v porovnání s podélným tokem plynu nižší. Buzení se provádí pomocí stejnosměrného proudu a cirkulace plynu směrem tepelného výměníku je zajištěna za pomoci dmychadla. Tato metoda se dostává do oblastí výkonů, které již jsou vhodné pro aplikaci ve svařování.

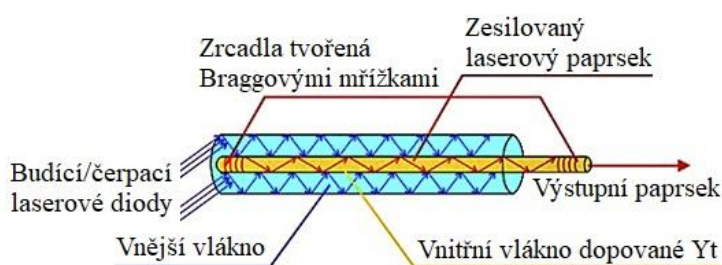


Obr. 7 Princip CO<sub>2</sub> laseru [19]

Velmi důležitým faktorem pro efektivní využití v praxi je životnost součástí zajišťující buzení aktivního prostředí. V případě výbojek se jedná o stovky, maximálně tisíce hodin v závislosti na jejich využití. V případě diod se jejich životnost v hodnotách přesahující 10000 hodin v případě provozu při nízkých výkonech. V případě buzení za pomoci diod se tedy pohybujeme v řádově vyšších hodnotách životnosti, lepší účinnosti a také vyšší kvalitou paprsku při velkých výkonech, což je ale vykoupeno mnohem vyšší pořizovací cenou zařízení.

- Yb:YAG laser – Tento laser je také označován jako diskový. V praxi to znamená, že jeho aktivní prostředí je tvořeno krystaly ve tvaru malých, úzkých disků. Pro zajištění chlazení jsou tyto krystaly připojeny k výměníku tepla. Tento typ chlazení je také výhodný z hlediska rovnoměrného chlazení disků po celém svém průřezu, což umožňuje dosahovat vyšších výkonů oproti Nd:YAG laseru při získání vyšší kvality paprsku. Nevýhodou těchto laserů je však nižší životnost v porovnání s Nd:YAG lasery.
- Vláknové lasery – Tyto lasery patří v dnešní době k nejmodernějším, jelikož je jejich technologie relativně mladá. Aktivní prostředí je dopováno ytterbiem a nachází se v dlouhém optickém vlákně. Vlnová délka generovaného paprsku se pohybuje v rozmezí 1055 až 1075nm. Tento druh laseru má ze všech typů laseru využívaných v průmyslu největší účinnost a to od 30% do 35%. Mezi největší výhody této technologie mimo, již zmiňované účinnosti, patří také minimální nároky na údržbu a velmi dlouhá životnost. Dále tyto lasery disponují vysokou kvalitou laserového paprsku, a jelikož negenerují velké množství tepla, je možné je chladit pouze vzduchem. Skládáním tzv. laserových modulů, ze kterých se tyto stroje skládají, je možné navyšovat jejich výkon až ho hodnoty 80kW, kdy jedno vlákno je schopno generovat paprsek o výkonu až 500W.

Jak je patrné z obr. 10, princip funkce spočívá v buzení aktivního prostředí dopovaného ytterbiem a nacházejícího se uvnitř vlákna za pomoci laserových diod, umístěných na jednom konci vlákna. Průchodem tohoto paprsku optickým vláknem a jeho mnohonásobným odražením od stěn, dojde k jeho zesílení. Pro správnou funkci optického vlákna jako rezonátoru zde jako zrcadla slouží tzv. Braggovy mřížky.



Obr. 10 Vláknový laser [22]

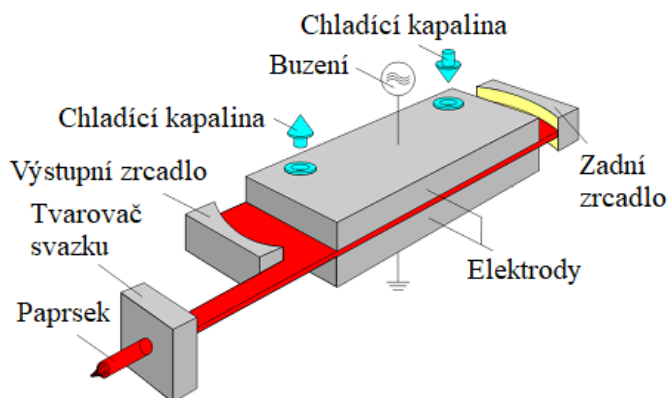
- Diodový laser – V tomto případě je aktivním prostředím polovodičová dioda, čerpaná elektricky. Výkon takových laserů se pohybuje v oblasti do 10kW. Vlnová délka generovaného paprsku se pohybuje v rozmezí od 808 do 980nm. Výhodou této technologie je vysoká účinnost a to až do hodnoty 60%, nevýhodou je však nízká kvalita generovaného paprsku. Životnost je spíše průměrná s hodnotou okolo 15000h. Na obr. 11 je vyobrazen diodový laser firmy Trumpf.



Obr. 11 Diodový laser [23]

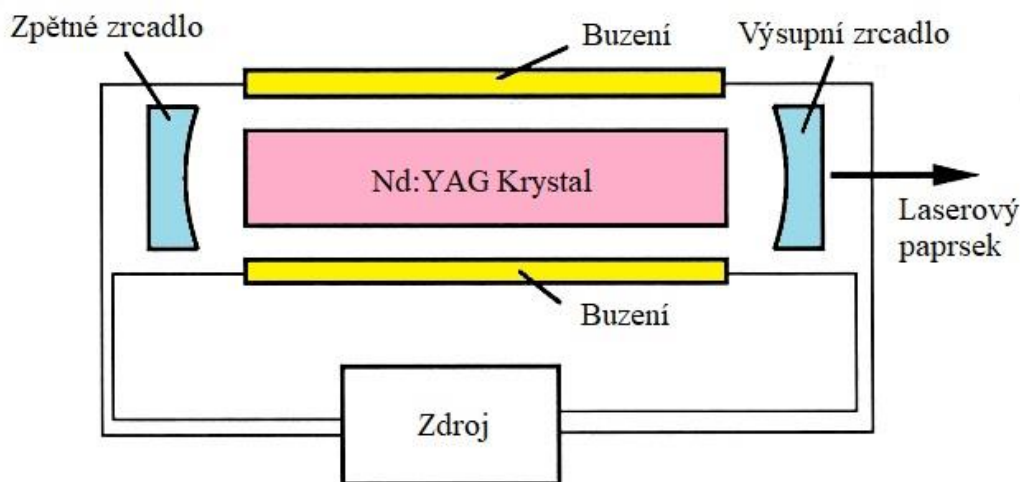


- Difuzně chlazený laser – Tento typ laserů je vybaven rezonátorem, u nějž proudí směs plynů mezi dvěma vodou chlazenými elektrodami. Viz obr. 8. Ty slouží nejen k buzení plynu ale také k chlazení prostředí rezonátoru. Buzení je prováděno napětím o vysoké frekvenci. Jelikož je tok plynu rezonátorem řízen pouze za pomoci rozdílu teplot, jedná se tedy



Obr. 8 Difuzně chlazený laser [20]

- relativně kompaktní zařízení, jelikož odpadá potřeba externího chlazení ve výměníku a tím pádem i celého chladicího okruhu. Touto metodou je možné dosahovat výkonů až 8kW při získání poměrně vysoké kvality plazmového paprsku. Nejnovější technologie v této oblasti v současné době využívají dutý rezonátor pro proudění chladicího média. Tyto lasery se vyznačují velkou spolehlivostí, dlouhou životností a nízkými provozními náklady.
- Pevnolátkový laser – Označován také jako YAG laser (Yttrium Aluminium Granat). Jeho aktivním prostředím tedy není plyn ale izotropní krystal daného materiálu. Tyto lasery jsou buzeny prostřednictvím světelné energie za pomoci výbojek nebo diod. Tento typ laseru pracuje při vlnové délce 1064nm při výstupním výkonu do 10kW a energetické účinnosti v rozmezí tří až sedmi procent v případě, že je krystal dopován neodymem, v případě dopování krystalu ytterbiem můžeme dosáhnout účinnosti až 15%.
  - Nd:YAG laser – V prostoru optického rezonátoru jsou umístěny tyče tvořící aktivní prostředí. Každá tyč je poté schopna generovat světelný výkon až 500W v případě buzení za pomoci výbojky a až 750W v případě buzení pomocí diod. Schéma optického rezonátoru je znázorněno na obr. 9.



Obr. 9 Princip Nd:YAG laseru [21]

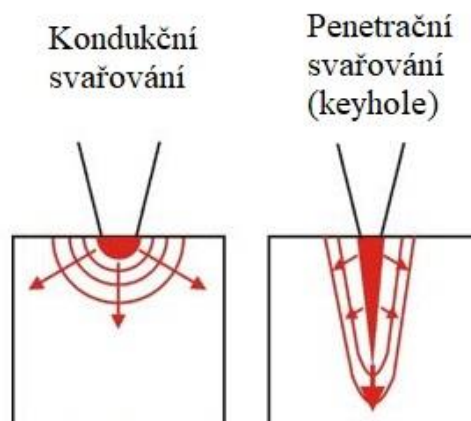
V případě tohoto typu laseru dochází ke generování velkého množství tepla, které negativně ovlivňuje kvalitu paprsku a ovlivňuje jeho výkon. Proto musí být kladen důraz na chlazení.

### 2.1.2 Svařování laserem [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [24], [25], [26]

Jak již bylo popsáno v kapitole 1, využití laseru pro svařování má své prokazatelné výhody. V praxi tento proces může probíhat několika způsoby. Svařování je možné provádět kontinuálně nebo pulzně, což znamená, že paprsek může do místa svaru dopadat nepřetržitě nebo přerušovaně a vytvářet svar bod po bodu. Z pohledu aplikace v praxi je však důležitější rozdělení metod na kondukční a penetrační, viz obr. 12.

- Kondukční svařování – Toto svařování probíhá při nižších výkonech laserového paprsku. Spočívá v tavení povrchu materiálu, za pomoci předání tepla paprsku do jeho povrchu, za pomoci absorpce a vedení. Tato metoda je použitelná pouze pro velmi malé hloubky průvaru. Z toho důvodu je aplikovatelná pouze pro tenké plechy, elektroniku, apod.
- Penetrační svařování – Probíhá při mnohem vyšších výkonech a větší fokusaci paprsku tak, aby bylo množství tepla přiváděném do místa svařování mnohem vyšší, než kolik je materiál schopen z tohoto místa odvést. V místě dopadu paprsku dochází vlivem velké plošné hustoty výkonu k vypařování materiálu. Postupně dochází k průchodu paprsku hlouběji do materiálu, ve kterém se začne tvořit kapilára. Působením výparů kovu, odcházejících z místa svařování hlouběji v materiálu, dochází k vytvoření rovnováhy mezi těmito plyny a povrchovým napětím nataveného materiálu, a to tak, že je udržován dostatečný otvor v tavenině pro průchod paprsku. Tím dojde k vytvoření klíčové díry, neboli keyhole. Viz obr. 3. K natavování stěn klíčové díry dochází tak, že laserový paprsek se uvnitř kapiláry mnohonásobně odráží a tím předává svou energii. Pozitivní vliv na tento proces má také fakt, že vlivem vysoké teploty dochází k ionizaci výparů vzniklých v procesu a jejich působení na natavovaný materiál. Díky tomuto efektu je možné svařovat mnohem hlubší průvary a tedy mnohem větší tloušťky materiálu na jeden průvar, což vede k mnohem větší efektivitě.

Dalším způsobem, jak je možné ovlivňovat průběh svařování, je vychylování paprsku laseru za pomoci počítačem řízených zrcadel, umístěných uvnitř speciální svařovací hlavy. Viz obr. 13. Díky této svařovací hlavě je možné paprskem velice rychle pohybovat bez nutnosti mechanického pohybu celého robotického ramene, což výrazně zvyšuje produktivitu. Tento proces se nazývá skenerové svařování. V současné době se v praktických aplikacích také rozšiřuje metoda nazývaná remote welding. Tato metoda je vhodná především pro velké série součástí z tenkých plechů a jedná se o metodu, která vychází z principů skenerového svařování, ale svařovací hlava je umístěna ve velké vzdálenosti od svařovaného dílu a to v řádu několika desítek centimetrů až metru, díky čemuž dosahuje velké rychlosti svařování na velké ploše a díky tomu i velké produktivity.



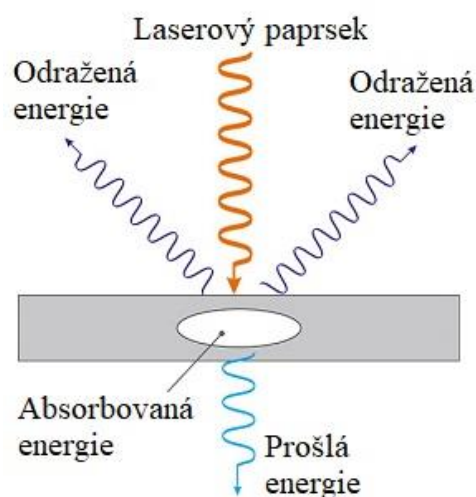
Obr. 12 Kondukční a penetrační svařování [24]



Obr. 13 Vychylování laserového paprsku [25]

Z hlediska využití možností této svařovací hlavy v oblasti rozšíření možností vytváření jednotlivých svarů, je významná metoda rozmítání neboli wobbling. Princip této metody spočívá ve složení výsledného pohybu paprsku v procesu svařování ze dvou pohybů, a to základního translačního pohybu kopírující požadovaný tvar svaru a pohybu ve tvaru kružnice, přímkou, osmičky apod. Tento pohyb paprsku umožňuje rozšiřování svaru a díky jeho promíchávání svarové lázně, je možné lépe kontrolovat výslednou mikrostrukturu svarového kovu. Nevýhodou je fakt, že do procesu vstupují další parametry a proto je proces náročnější na optimalizaci.

Energie plazmového paprsku je předávána svařovanému materiálu a měněna na teplo pomocí absorpce. Energie paprsku dopadajícího na materiál však není všechna převedena na energii tepelnou. Jak je patrné z obr. 14, část energie dopadající na materiál v podobě laseru je od jeho povrchu odražena, část energie prochází materiálem. V případě svařování kovů je však množství energie, která není odražena a ani není absorbována materiálem zcela minimální. Z pohledu svařování kovů, je množství absorbované energie největší u laserů s krátkou vlnovou délkou. V případě využití laseru pro zpracování nekovů jako např. sklo nebo pasty, je z hlediska absorpce energie naopak výhodnější využít lasery s delší vlnovou délkou. Mimo vlnové délky je množství absorbované energie materiálem závislé na barvě, vodivosti a drsnosti povrchu materiálu. V neposlední řadě také na samotné geometrické konfiguraci procesu svařování.



Obr. 14 Přeměny energie laserového paprsku [26]

Vlivem velké koncentrace tepelného výkonu dodávaného do místa svařování, dochází k ionizaci plynů, které se v okolí místa svařování nachází. Jedná se o plyny vzniklé vypařováním svařovaného materiálu, nebo o plyny záměrně do tohoto místa dodané za účelem zabránění přístupu vzdušného kyslíku ke svarové lázni a k ochraně optické mechaniky před rozstříkáním kovu. Tyto plyny se nazývají ochranné. Přítomnost ionizovaného plynu v místě dopadu laserového paprsku působí zejména u CO<sub>2</sub> laserů negativně, jelikož brání průchodu energie paprsku k svařovanému materiálu. V případě ionizace výparů svařovaného kovu se tento efekt neprojeví v tak významné míře jako v případě ionizace ochranného plynu, který poté způsobuje snižování hloubky průvaru, případně výrazný nepoměr mezi šířkou závaru v místě vstupu laserového paprsku a ve kořeni svaru.

Nejvýznamnější vliv pro kontrolu, případně odstranění tohoto efektu, má volba ochranného plynu. V praxi se využívají plyny argon, dusík, helium a oxid uhličitý. Rozhodujícím faktorem, na kterém závisí možná ionizace daného plynu, je množství energie, která je potřebná pro jeho ionizaci. V praxi to znamená, že čím větší množství energie je plyn schopen absorbovat, než dojde k jeho ionizaci, tím je jeho využití pro proces svařování výhodnější, jelikož můžeme dodávat do místa svařování více tepelného výkonu bez toho, aby k nežádoucí ionizaci došlo. Toto vede ke zvětšení možné hloubky průvaru, rychlosti svařování a obecně ke zvýšení produktivity a kvality svaru. V tabulce 3 je znázorněno množství potřebné energie pro ionizaci jednotlivých plynů a můžeme pozorovat,

Tab. 3 Ionizační energie ochranných plynů

Ochranný plyn	Ionizační energie [eV]	Molekulová hmotnost [g/mol]	Hustota Ve vztahu ke vzduchu = 1
Argon	15,8	40	1,38
Helium	24,6	4	0,14
Dusík	15,6	28	0,96
Oxid uhličitý	13,8	44	1,52

že nejvýhodnějším plynem pro použití v oblasti svařování laserem je helium. Tento plyn má však v porovnání s ostatními plyny velkou nevýhodu v podobě nízké hmotnosti, potažmo hustoty v porovnání se vzduchem, díky čemuž dochází k velmi rychlému odchodu tohoto plynu z místa svařování. Při jeho použití se tedy tento fakt projeví na velmi vysoké spotřebě. V souvislosti s vysokou cenou helia o požadované čistotě na trhu lze tedy považovat tuto nevýhodu za velmi významnou.

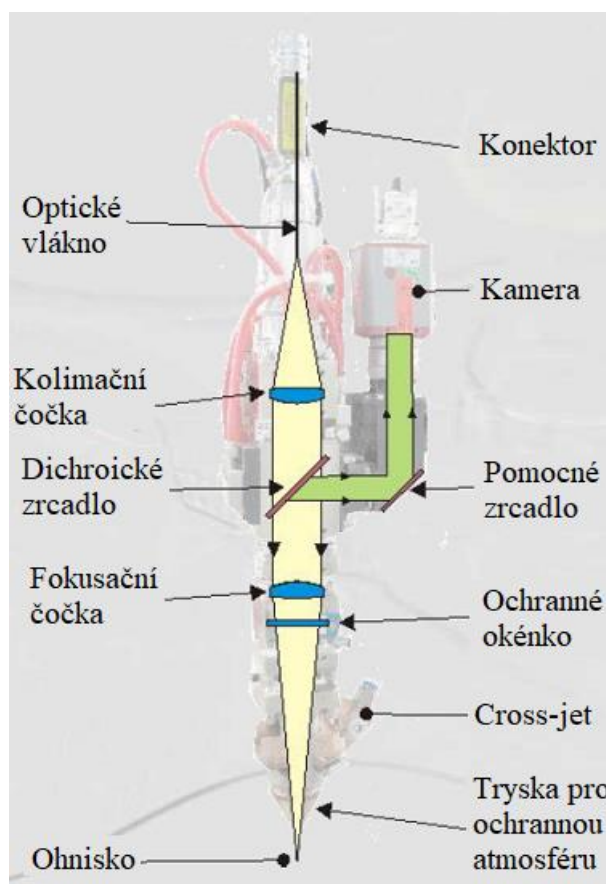
Helium spolu s argonem patří mezi inertní plyny, a tudíž nereagují se svarovým kovem. V případě dusíku a oxidu uhličitého se jedná o reaktivní plyny, které se svarovým kovem reagují za vzniku oxidů, karbidů, případně nitridů. Tyto reakce jsou ve většině případů nežádoucí, jelikož zhoršují mechanické vlastnosti svaru, existují však aplikace, u nichž je tento efekt žádoucí. Např. při použití dusíku jako ochranného plynu pro svařování korozivzdorných ocelí, dochází ke zlepšení korozivzdornosti a mikrostruktury svaru.

Jak je již popsáno výše, všechny plyny mají své výhody i nevýhody, proto se při použití v praxi pro dosažení optimálních výsledků z hlediska kvality, produktivity a v neposlední řadě také nákladů na provoz, volí použití těchto plynů ve formě jejich směsí. Nejčastěji se používají směsi helia s dusíkem nebo argonem. Pro každý konkrétní případ se volí vhodné složení ochranného plynu, které nejvíce závisí na požadovaném tepelném výkonu dodaném do místa svařování, který je úměrný poměrnému množství helia obsaženém v ochranném plynu tak, aby nedocházelo k jeho přílišné, nežádoucí ionizaci.

Pro správnou funkci ochranných plynů je nezbytná jejich vysoká čistota a to až přes hranici 99,99%. V opačném případě by mohlo docházet ke snižování výkonu laseru.

### 2.1.3 Laserová svařovací hlava [3], [4], [6], [7], [9], [27]

Pro vytvoření požadovaných svarů je nutné, aby byl do místa svařování přiváděn laserový paprsek na přesné, požadované místo, s přesně určenými parametry a zaostřený do požadovaného bodu. Ke splnění a regulaci těchto požadavků slouží laserová svařovací hlava. Schéma je zobrazeno na obr. 16. Laserový paprsek do hlavy přichází ze svého zdroje přes konektor pomocí optického vlákna, projde přes kolimační čočku, kde dojde k uspořádání drah jednotlivých fotonů tak, aby byly všechny rovnoběžné. Dále paprsek projde fokusační čočkou, ve které se dráhy fotonů upraví tak, aby všechny směřovaly do jednoho bodu – ohniska. Tento proces tedy slouží k zaostření neboli fokusaci paprsku. Čočky používané v laserových hlavách jsou zobrazeny na obr. 15. Za fokusační čočkou se nachází ochranné okénko. Jak je již z názvu patrné, toto okénko slouží k ochraně jemné mechaniky uvnitř svařovací hlavy vůči vnějším vlivům. Za ochranným okénkem se nachází tryska cross-jet, která také chrání vnitřní prostor svařovací hlavy a to zejména před produkty



Obr. 15 Laserová svařovací hlava [27]

samotného svařování jako výpary případně částičky roztaveného kovu, jejich odfouknutím z místa svařování. Tento efekt je také příznivý z hlediska odstraňování látek z místa svařování, tak aby nedocházelo k blokování průchodu laserového paprsku do místa svařování vlivem těchto látek. Pro ochranu svarové lázně, tak aby nedocházelo k její interakci se vzdušným kyslíkem a tím i k degradaci svarového spoje, je svařovací hlava vybavena tryskou, která do místa svařování přivádí ochranný plyn.

Některé typy svařovacích hlav jsou vybaveny kamerou, která umožňuje zobrazení místa svařování z přesně totožného bodu, z jakého dopadá laserový paprsek do daného místa. Tuto kameru můžeme tedy využít pro přesné nasměrování plazmového paprsku do požadovaného místa svařování. Obraz je do kamery promítán za pomoci dichroického zrcadla, umístěného mezi kolimační a fokusační čočkou. Toto zrcadlo je propustné pro laserový paprsek ale je schopné odrážet světlo přicházející z prostoru pro svařování mimo samotný prostor svařovací hlavy a odrážet ho přes pomocné zrcadlo do kamery umístěné poblíž svařovací hlavy.

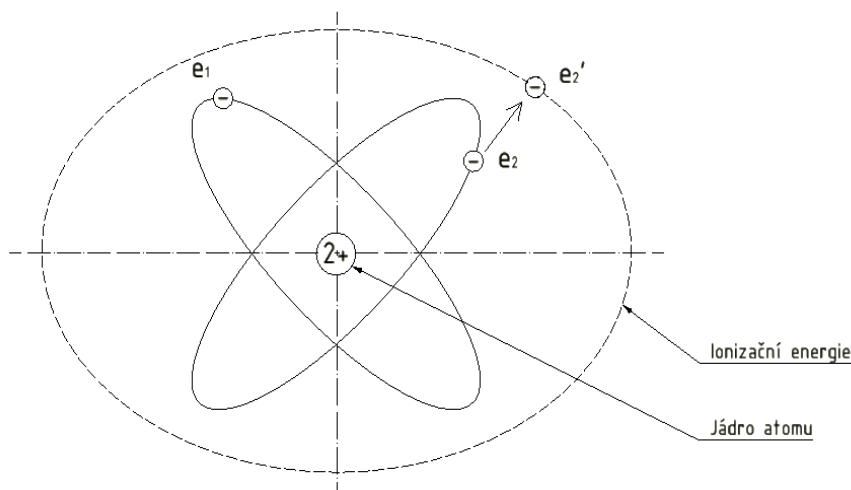
Svařovací hlavy využívané pro skenerové svařování, remote welding nebo svařování rozmítáním jsou navíc vybavené dvěma vychylovacími zrcadly, které umožňují, aby byly tyto procesy uskutečněny. Jejich bližší popis se nachází v kapitole 2.1.2.

## 2.2 Plazma [1], [28], [29], [30]

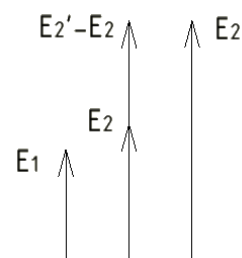
Generování plazmového svazku je založeno na zákonech molekulové a částicové fyziky, ze kterých vyplývá, že stav plynu je závislý na pohybu molekul a to tak, že s rostoucí teplotou roste rychlost pohybu částic. S rostoucí rychlostí pohybu částic roste také množství srážek mezi částicemi. Kinetická energie těchto srážek, v závislosti

na teplotě také roste. Podstatou vzniku plazmového svazku je tedy ohřátí plynu až do té míry, kdy hodnota kinetické energie při srážce dvou molekul překročí hranici velikosti vazební energie mezi atomy této molekuly, dojde k jejímu rozštěpení na atomy, tento proces se nazývá disociace. Např. pro molekuly vodíku se tato teplota pohybuje v rozmezí 2500 K až 6000 K. V případě, že se teplota i po disociaci molekuly zvyšuje, začne docházet k tzv. ionizaci plynu. Ionizací plynu vzniká plazma. Nárazovou prací při srážkách atomů začne docházet k vyrážení elektronů z oběžných jejich drah. Výsledkem je rozštěpení atomů na kladně nabitě ionty a volné elektrony.

Obr. č. 16 znázorňuje atom helia. Jádru znázorněné dvěma kladnými náboji ve středu obíhají dva elektrony  $e_1$  a  $e_2$ . Tyto elektrony obíhají jádro po z energetického hlediska stejných, relativně blízkých drahách. Na obr. č. 17 jsou tyto atomy znázorněny energiemi  $E_1$  a  $E_2$ .

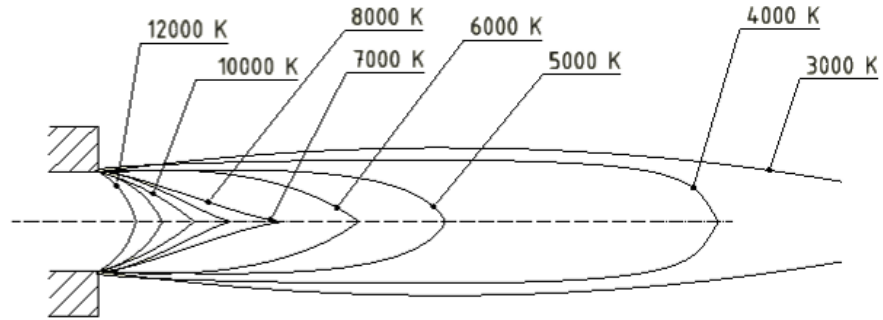


Obr. 2 Nabuzení neutrálního atomu [1]



Obr. 17 Energie ionizace atomu [1]

Atom je tedy neutrální. V případě, že je atomu dodána dostatečná energie z jeho okolí, např. srážkou s jiným atomem, poté dojde k přeskočení alepoň jednoho atomu na vyšší energetickou hladinu, která je v obr.



Obr. 18 Teplota plazmového paprsku [1]

17 znázorněna jako  $E_2'$ . Tento stav označujeme jako ionizovaný nabuzený stav. Ionizační energii tedy nazýváme energií potřebnou pro vyražení elektronu na vyšší energetickou hladinu, dle obr. 17 tedy roznil energii  $E_2'$  a  $E_2$ .

S rostoucí teplotou může dojít i k odtržení více elektronů z oběžných drah jednoho atomu a nastává zde vícenásobná ionizace. Procento volných elektronů, které se v daném plynu nachází je dáno parametrem nazývaným stupeň ionizace. Tento parametr je závislý na teplotě. Teploty potřebné pro disociaci, ionizaci, případně vícenásobnou ionizaci jsou rozdílné pro různé plyny.

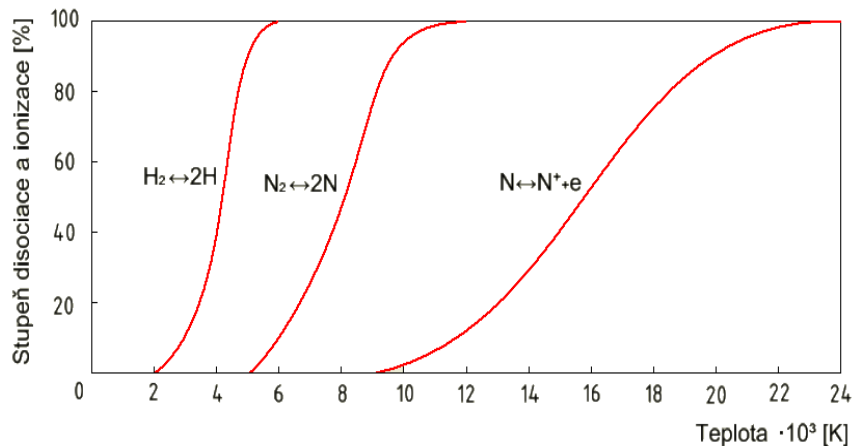
Teplota plazmového paprsku se může pohybovat v rozmezí od 5000 K do 30000 K. Typické rozložení průběhu teplot plazmového svazku je zobrazeno na obr. č. 18. V tomto případě se jedná o paprsek argonového plazmatu.

### 2.2.1 Plazmové plyny [1], [28], [29], [30]

Při využití plazmového svazku v praxi, je velmi důležité mít kontrolu nad jeho parametry, tak aby bylo možno dosáhnout vytvoření svarů v požadované kvalitě. Tyto parametry jsou teplota, výkon a výtoková rychlost svazku. Nejvýznamnějším činitelem pro kontrolu těchto parametrů je volba plazmového plynu.

V současné době jsou nejpoužívanějšími plazmovými plyny argon, helium, vodík a dusík. V menší míře se v praxi využívají vzduch a voda.

Obecně můžeme plazmové plyny rozdělit do dvou skupin na jednoatomové a dvouatomové. Mezi jednoatomové plyny patří inertní plyny, jako helium a argon. Jako dvouatomové označujeme ty, které se za normálních podmínek vyskytuje ve formě molekul, tedy vodík a dusík. Pro jednoatomové a dvouatomové plyny se proces vytvoření plazmy liší. Pro ionizaci dvouatomového plynu je nejdříve potřeba disociace, až poté je u disociovaných atomů možná ionizace. Pro každý plyn je také potřebná rozdílná energie k dosažení jeho ionizace, případně disociace. Z grafu závislosti stupně disociace a ionizace na teplotě na obr. 19 je patrné, že disociace dvouatomového plynu probíhá při mnohem menší teplotě než následná ionizace. A dále také že teplota pro disociaci a ionizaci různých plynů je



Obr. 19 Disociace a ionizace dvouatomových plynů [1]

také různá. Např. pro dosažení 90% ionizace vodíku je zapotřebí teplota přibližně 5000 K. Pro stejný stupeň ionizace u dusíku je zapotřebí teplota více než 8500 K.

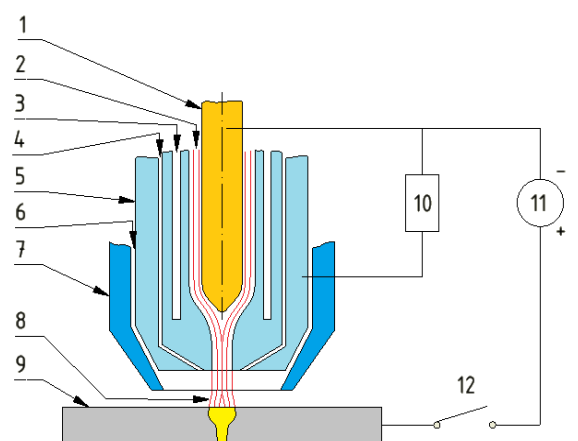
- Dusík – Disociace tohoto plynu začíná při teplotě 5000 K a stupně disociace 95% dosahuje při teplotě 9000 K. K dosažení 50% stupně ionizace je zapotřebí 15000 K, k 95% stupně ionizace potom 22000K. Při teplotě 7000 K obsahuje dusíkové plazma větší množství tepla vztaženého na jednotku hmoty, než obsahují ostatní plyny při totožné teplotě. Výsledkem je prodloužení plazmového svazku při zachování stejného příkonu dodávaného do procesu. Z hlediska praxe je důležité, aby v dusíku nebyla obsažena příměs kyslíku. Toto by vedlo k oxidaci elektrody a tvorbě toxických oxidů dusíku.
- Vodík – Teploty disociace vodíku se pohybují mezi 2000 K a 6000 K, v porovnání s dusíkem je k jeho disociaci potřeba menší energie. Disociovaný vodík dosahuje poté své plné ionizace za teploty 25000 K. Nejdůležitější vlastností vodíkového plazmatu v porovnání s ostatními plyny je jeho velká tepelná vodivost. Dále je pro tento plyn specifická potřeba velkého napětí oblouku a příkonu přivedeného do oblouku tak, aby došlo k disociaci a ionizaci. V porovnání s ostatními plyny je však teplota plazmového svazku nižší. Při použití v praxi je nutné, aby byl pracovní prostor zařízení dokonale utěsněný tak, aby nedocházelo ke kontaktu se vzdušným kyslíkem. V opačném případě by reakcí těchto dvou plynů docházelo k tvorbě výbušné směsi.
- Argon a helium – Jedná se o netečné jednoatomové plyny. K jejich ionizaci tedy není zapotřebí předchozí disociace. Teploty ionizace se pohybují v rozmezí 9000 K pro argon a až 22000 K pro helium. Výhodou těchto plynů oproti dvouatomovým je potřeba nižšího převodního napětí k dosažení ionizace. Snadněji se tedy ionizují. Dalšími výhodami jsou stabilita plazmového svazku, dosahování nejvyšších teplot v porovnání s ostatními plyny a inertní chování oblouku. Největší nevýhodou těchto plynů je jejich vysoká cena a tím pádem i provoz zařízení. Z tohoto důvodu a pro zlepšení vlastností při použití v praxi se proto používají ve směsi s vodíkem či dusíkem v různých poměrech.

## 2.2.2 Plazmové hořáky [1], [28], [29]

Tryska plazmového hořáku se skládá z wolframové elektrody, která je umístěna v uprostřed v jeho ose. Okolo elektrody proudí plazmový plyn. Samotná tryška musí být chlazená, a proto jsou její součástí chladicí kanály pro průchod chladicí vody. Dále je opatřena tryskami pro přívod fokusačního a ochranného plynu.

Plazmové hořáky se dělí podle místa hoření elektrického oblouku na hořáky se závislým a nezávislým plazmovým svazkem.

- Hořáky se závislým plazmovým svazkem – Elektrický oblouk potřebný pro iniciaci procesu hoří mezi wolframovou elektrodou, zapojenou jako katoda a základním materiálem zapojeným jako anoda. Viz obr. 20. Výhodou hořáku se



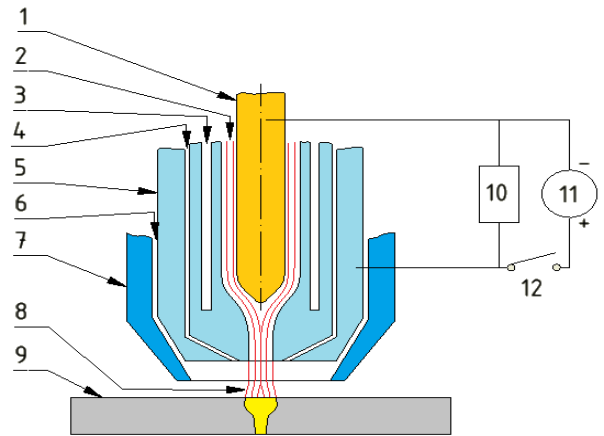
- |  |                                |
|--|--------------------------------|
| 1 – wolframová elektroda               | 8 – plazmový oblouk            |
| 2 – plazmový plyn                      | 9 – základní materiál          |
| 3 – vodní chlazení                     | 10 – zdroj vysoké frekvence vn |
| 4 – fokusační plyn                     | 11 – zdroj el. oblouku         |
| 5 – tryška hořáku                      | 12 – spínač                    |
| 6 – ochranný plyn                      |                                |
| 7 – hubice pro přívod ochranného plynu |                                |

Obr. 20 Plazmový hořák se závislým svazkem [1]

závislým plazmovým svazkem je fakt, že samotný hořák je málo tepelně namáhán. Díky tomu má hořák relativně velkou životnost. Uplatnění tohoto zapojení můžeme najít ve svařování, řezání a navařování elektricky vodivých materiálů.

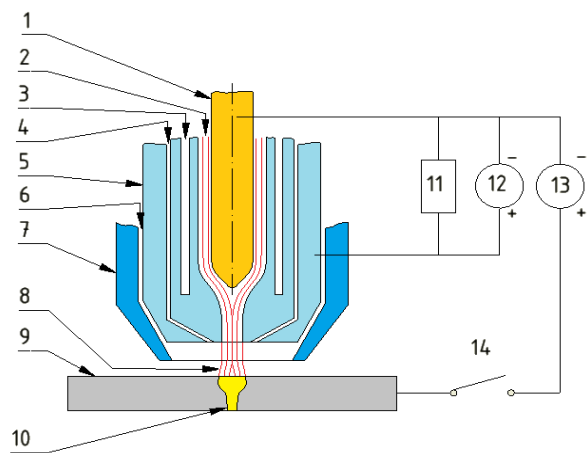
- Hořáky s nezávislým plazmovým svazkem – Elektrický oblouk hoří mezi wolframovou elektrodou zapojenou jako katoda a samotným tělem trysky zapojeným jako anoda. Viz obr. 21. Díky tomuto zapojení je oblouk zcela nezávislý na základním materiálu. Tato vlastnost je velice výhodná pro aplikaci této technologie při použití nevodivého zpracovávaného základního materiálu. V porovnání s hořákem se závislým plazmovým svazkem je hořák tepelně velmi namáhán a je potřeba jeho intenzivní chlazení. Za účelem prodloužení životnosti se pro toto zapojení v praxi jako plazmový plyn používají pouze inertní plyny helium a argon o vysoké čistotě. Navzdory těmto opatřením je ale v porovnání s použitím závislého svazku životnost trysek podstatně nižší.

- Hořáky s kombinovaným zapojením – Tento typ hořáků je kombinací předchozích dvou zapojení. Viz obr. 22. V praxi potom oblouk hořící za pomoci nezávislého zapojení funguje jako pomocný oblouk pro zapálení hlavního, závislého oblouku. V principu je zapálen pomocná oblouk



- |  |                                |
|--|--------------------------------|
| 1 – wolframová elektroda               | 8 – plazmový oblouk            |
| 2 – plazmový plyn                      | 9 – základní materiál          |
| 3 – vodní chlazení                     | 10 – zdroj vysoké frekvence vn |
| 4 – fokusační plyn                     | 11 – zdroj el. oblouku         |
| 5 – tryska hořáku                      | 12 – spínač                    |
| 6 – ochranný plyn                      |                                |
| 7 – hubice pro přívod ochranného plynu |                                |

Obr. 21 Plazmový hořák se nezávislým paprskem



- |  |                                  |
|--|----------------------------------|
| 1 – wolframová elektroda               | 9 – základní materiál            |
| 2 – plazmový plyn                      | 10 – svar                        |
| 3 – vodní chlazení                     | 11 – zdroj vysoké frekvence vn   |
| 4 – fokusační plyn                     | 12 – zdroj pomocného el. oblouku |
| 5 – tryska hořáku                      | 13 – zdroj hlavního el. oblouku  |
| 6 – ochranný plyn                      | 14 – Spínač                      |
| 7 – hubice pro přívod ochranného plynu |                                  |
| 8 – plazmový oblouk                    |                                  |

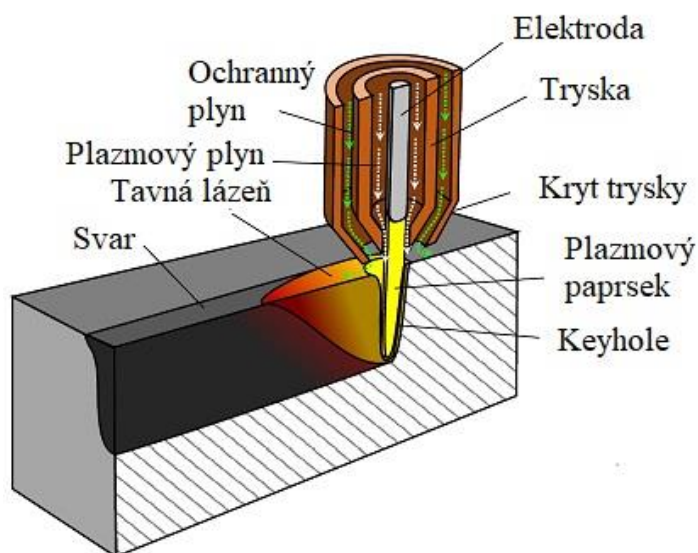
Obr. 22 Plazmový hořák se kombinovaným paprskem [1]



mezi wolframovou elektrodou a samotným hořákem, tento oblouk ionizuje plyn v okolí elektrody, který začne opouštět trysku a tím ionizovat i toto prostředí. Vytvoří tím podmínky pro snadné vytvoření oblouhu hlavního, závislého.

### 2.2.3 Plazmové svařování [1], [28], [29], [30], [31]

Metoda plazmového svařování spadá spolu se svařování laserem, svazkem elektronů apod. do kategorie svařování s vysokou koncentrací tepelného výkonu, což v praxi znamená, že je zde velké množství energie koncentrováno do velmi malého prostoru. Díky tomu se jedná o velmi výkonné svařování, s velmi malou tepelně ovlivněnou oblastí, díky minimálnímu natavení materiálu v okolí svaru a malým termickým zatížením. Další výhodou, stejně jako u ostatních metod svařování s vysokou koncentrací tepelného výkonu, je nízká závislost na chemických a fyzikálních vlastnostech



Obr. 23 Svařování plazmou [31]

svařovaného materiálu. To v praxi znamená, že je možné svařit materiály, které mají výrazně odlišné složení a vlastnosti. Dále tato technologie také umožňuje vytvářet typy svarů, jenž jsou konvenčními metodami jen velmi těžko dosažitelné.

Při svařování pomocí plazmového svazku je využívána metoda tzv. průchozích paprsku. Viz obr. 23. Tato metoda umožňuje vytvoření kvalitních svarů, provařených napříč celým průřezem. Metoda je používána pro svary typu I v rozmezí tloušťek 3 až 12 mm. Před svařováním je potřeba zajistit polohu svařovaných dílů tak, aby byly svými hranami těsně u sebe. Pro správné provedení svaru je důležité, aby byly parametry nastaveny tak, aby docházelo pouze k natavování materiálu při průchodu svazku štěrbinou a nikoli k vyfouknutí nataveného materiálu z místa svařování díky vlivu dynamických účinků plazmového svazku, neboli mezi silou povrchového napětí taveniny a silou dynamického účinku plazmatu musí být rovnováha. Během procesu svařování se v místě svaru tvoří tzv. klíčová dírka. V tomto místě je tavenina vytlačována z předního okraje svaru k jejímu zadnímu okraji. Vlivem povrchového napětí taveniny se po průchodu paprsku klíčová dírka uzavírá a vznikne svar.

V současné době se pro automatizované svařování často používá svařování Plazma-MIG neboli GMPA (Gas Metal Plasma Arc). Jedná se o kombinaci plazmového paprsku a technologie svařování odtavující se elektrodou v ochranné atmosféře. Principem metody je podávání drátu přídatného materiálu do prostoru plazmového svazku. Plazmový oblouk i oblouk hořící mezi přídatným a základním materiálem mají své vlastní oddělené zdroje. Vlivem proudu procházejícího přídatným drátem, tvořícím elektrický oblouk mezi přídatným a základním materiálem a jeho generováním magnetického pole, dochází k ovlivnění samotného plazmového svazku ve smyslu jeho koncentrace do mnohem menší plochy, což má za důsledek mnohem lepší koncentraci tepelného výkonu dodávaného do místa svaru.

Při svařování plazmovým svazkem je možné použít přídatné materiály ve formě prášku nebo drátu. V případě použití přídatného materiálu je důležité nastavení svařovacích parametrů, a to tak aby došlo k zániku plazmového svazku v tavné lázni a nedošlo k úplnému protavení skrz základní materiál.

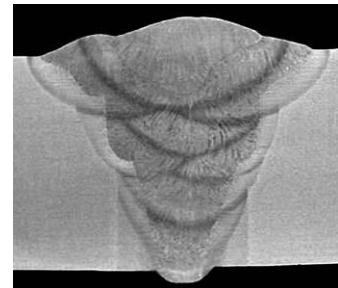
## 2.3 Postupy vyhodnocení svarových spojů [7], [9], [24]

Pro zhodnocení kvalitativních vlastností svarových spojů se v současnosti využívá široká škála zkoušek. Zkoušky mohou být nedestruktivní, např. prozařováním, ultrazvukem, magnetické, kapilární nebo destruktivní např. tahem, ohybem, rázem v ohybu, tvrdosti a v neposlední řadě také vyhodnocení makrostruktury a mikrostruktury.

Nedestruktivní zkoušky nacházejí své uplatnění především v oblasti odhalování vad a kontroly kvality ve výrobních provozech. Z hlediska zkoumání a porovnání mechanických a kvalitativních vlastností svarů, zhotovených více metodami svařování, jsou vhodnější zkoušky destruktivní. V rámci práce budou vyhodnoceny následující zkoušky.

### 2.3.1 Makroskopická zkouška [7], [9], [32]

Tato kontrola spočívá se vizuální kontrole příčného řezu zkušební vzorkem. Provádí se pouhým okem, případně za pomoci lupy nebo jiného zařízení umožňující ne příliš velké zvětšení. Předmětem zkoumání jsou svarový kov, tepelně ovlivněná oblast a základní materiál. Tato metoda je základem zkoumání svarového spoje, umožňuje odhalit svarové vady, tvar svaru, v případě vícevrstvého svařování, způsob kladení a spojení jednotlivých housenek. Dále také zředění svarového kovu a velikost tepelně ovlivněné oblasti. Na obr. 24 je makroskopický snímek řezu svarem.



Obr. 24 Řez svarem [32]

### 2.3.2 Mikroskopická zkouška [7], [9], [32], [33]

Jak je již z názvu patrné, provádí se za pomoci mikroskopu, na připravených vzorcích, orientovaných kolmo na osu svaru. Tato metoda slouží k pozorování jednotlivých zrn materiálu a jejich hranic, analýzu strukturních složek ve svaru a tepelně ovlivněné oblasti.

Vzorky musí projít složitým procesem přípravy od řezání a hrubé broušení, až po nejjemnější leštění a to tak aby došlo k co nejmenšímu tepelnému ovlivnění vzorku. Z toho důvodu musí všechny tyto procesy probíhat za intenzivního chlazení. Po těchto mechanických úpravách vzorků následuje leptání, které se provádí chemicky pomocí leptadla nebo elektrochemicky elektrolytickým leptáním, za účelem zvýraznění mikrostruktury svaru pro pozorování. Na obr. 25 je zobrazen mikroskopický pohled na strukturu austenitu.

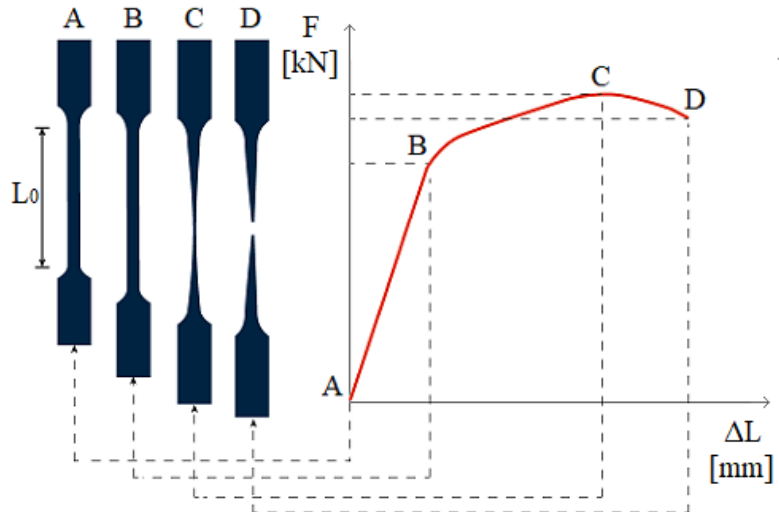


Obr. 25 Austenitická struktura [33]

### 2.3.3 Tahová zkouška [7], [9], [34]

Tato zkouška je nejrozšířenější statickou zkouškou mechanických vlastností svarů. Spočívá v upnutí zkušební vzorku do trhacího stroje a následné působení silou s cílem jeho přetržení. Výsledkem této zkoušky je diagram závislosti prodloužení tyče na zatěžující síle, případně závislosti smluvního napětí na poměrné deformaci. Z těchto diagramů je poté možné určit mez pevnosti, mez kluzu, smluvní mez kluzu, tažnost a kontrakci. V případě zkoušek svarů je také velká pozornost věnována místu porušení materiálu a to zda k němu došlo v místě svaru, tepelně ovlivněné oblasti nebo základním materiálu.

Vzorky pro tahovou zkoušku mohou být kruhového průřezu, nebo v případě zkoumání svarů zhotovených z plechů, obdélníkového průřezu. Jejich přesné rozměry jsou dány ČSN EN ISO 6892-1. Na obr. 26 je znázorněn průběh tahové zkoušky. Z počátečního stavu vzorku kdy je jeho původní délka  $L_0$  (bod A), se vlivem jednoosého silového působení vzorek elasticky deformuje až do meze úměrnosti (bod B). Mezi body B a C dochází k rovnoměrné plastické deformaci vzorku až do meze pevnosti (bod C). Za bodem C dochází k tvorbě krčku a jelikož tím dochází ke zmenšení průřezu, na který působí zatěžující síla, tato síla také klesá. V oblasti mezi body C a D tedy dochází k nerovnoměrné plastické deformaci až do bodu, kdy dojde k přetržení vzorku (bod D).



Obr. 26 Průběh tahové zkoušky [34]

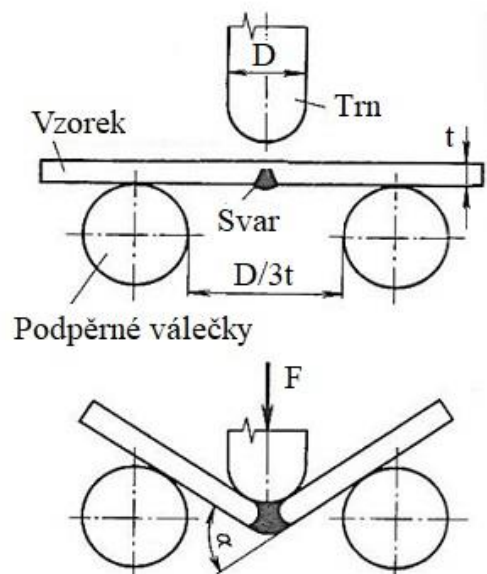
Při využití tahové zkoušky pro vyhodnocování pevnosti svarů, je kromě samotných pevnostních parametrů, velmi podstatné, v jakém místě vzorku došlo k jeho přetržení. Zda k přetržení došlo v základním, tepelně neovlivněném materiálu, tepelně ovlivněné oblasti nebo přímo v místě svaru. Pro lepší porovnatelnost se tahová zkouška provádí tak, že se kromě svařovaných vzorků z daného materiálu, podrobí zkoušce i vzorky, které jsou vyhotoveny z jednoho kusu a tedy neprošly procesem svařování.

Při využití tahové zkoušky pro vyhodnocování pevnosti svarů, je kromě samotných pevnostních parametrů, velmi podstatné, v jakém místě vzorku došlo k jeho přetržení. Zda k přetržení došlo v základním, tepelně neovlivněném materiálu, tepelně ovlivněné oblasti nebo přímo v místě svaru. Pro lepší porovnatelnost se tahová zkouška provádí tak, že se kromě svařovaných vzorků z daného materiálu, podrobí zkoušce i vzorky, které jsou vyhotoveny z jednoho kusu a tedy neprošly procesem svařování.

### 2.3.4 Ohybová zkouška [7], [9], [35]

Tato zkouška je další ze skupiny statických mechanických zkoušek. U ohybové zkoušky neboli zkoušky lámavosti je podstatou ohybové namáhání zkušební vzorku na ohyb tak, že je trnem působeno na vzorek ze strany kořene. Na protější straně vzorku je tedy horní vrstva svaru namáhána tahovým napětím až do hranice rozlomení svaru nebo předepsaného úhlu. Přesné parametry zkoušky jsou definovány normou ČSN EN ISO 5173. Průběh zkoušky je zobrazen na obr. 27.

Výsledek zkoušky je funkcí úhlu ohybu  $\alpha$ , poloměru ohybu  $D/2$  a tloušťky vzorku  $t$ . Hlavním sledovaným kritériem je schopnost materiálu dosáhnout požadovaného úhlu ohybu za daných podmínek bez vzniku větších vad v oblasti svaru. Ideálním výsledkem je poté dosažení úhlu  $180^\circ$  bez vzniku vad nebo porušení. Po provedení zkoušky je nutné zkontrolovat celý vzorek včetně bočních hran.



Obr. 27 Ohybová zkouška [35]

### 2.3.5 Zkouška mikrotvrdomosti [1], [7], [9],

Nejpoužívanější metodou vyhodnocení mikrotvrdomosti svaru je metoda dle Vickerse. Hlavním důvodem použití této metody za daným účelem je geometrie indentoru. Na rozdíl od jiných metod kde je plocha kontaktu s indentorem příliš velká pro efektivní vyhodnocení, tvar čtyřbokého jehlanu s vrcholovým úhlem  $\alpha=136^\circ$  je výhodný jelikož je možné umístit dostatečné množství vtisků do malé plochy tak, aby bylo možné efektivně vyhodnotit hodnoty mikrotvrdomosti po celém průřezu svaru. Geometrie indentoru je znázorněna na obr. 28.

V porovnání s běžným měřením tvrdosti se mikrotvrdomost liší silou, jakou je na indentor působeno. Běžná zatížení jsou dle normy ČSN 42 0374 v rozmezí 9,8 až 490 N. Pro mikrotvrdomost jsou hodnoty zatížení nižší, a to od desetin newtonu, do hranice 19,8 N.

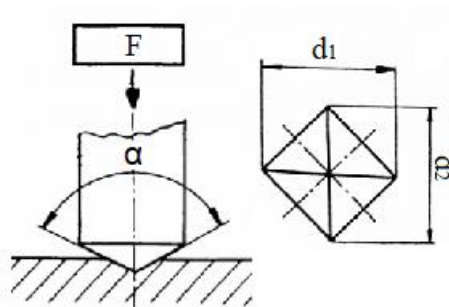
Indentor je vtlačován do povrchu vzorku, kdy síla a doba působení se určí na základě norem. Pro vyhodnocení se změří úhlopříčka vtisku, ze kterých se následně určí průměr. Na základě této hodnoty se ze vzorce 2.1 určí hodnota tvrdosti HV.

$$HV = 0,189 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (2.1)$$

Kde: F – Síla zatížení [N]

d – Úhlopříčka vtisku [mm]

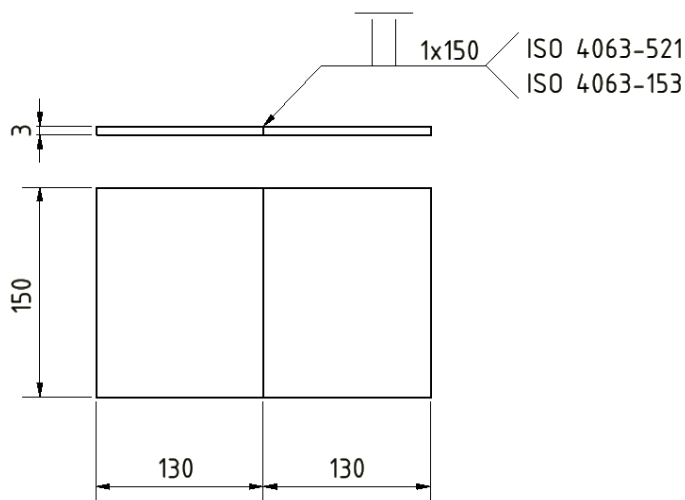
Pro vyhodnocování svarů se zpravidla používá série vtisků v různých místech svaru, tepelně ovlivněné oblasti a základním materiálu v jeho okolí. Z těchto hodnot se poté vyhodnocuje průběh změny tvrdosti v celém průřezu svaru.



Obr. 28 Zkouška tvrdosti dle Vickerse [36]

### 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část této práce spočívá ve vyhotovení šesti vzorků tupých svarů, geometrie viz obr. 29, z austenitické korozivzdorné oceli a šesti vzorků totožné geometrie z feritické korozivzdorné oceli. Polovina každé sady vzorků bude vyhotovena technologií svařování využívající vláknový laser, druhá polovina za pomoci technologie plazmového svařování. Pro každou technologii a daný materiál budou vyhotoveny tři vzorky. Každý z těchto tří vzorků bude svařen tak, aby došlo k jeho úplnému provaření až ke kořenu ale s různými parametry výkonu a rychlosti pohybu svařovací hlavy v případě laseru a s proměnnými parametry proudu a množství plazmového plynu v případě plazmového svařování. Označení a parametry svařování jednotlivých vzorků jsou znázorněny v tabulce 4.



Obr. 29 Svařovaný vzorek

Po svaření budou ze vzorů za pomoci laseru vyřezány požadované tvary pro následné vyhodnocení jejich mechanických a strukturních vlastností. Konkrétně budou vzorky podrobeny tahové zkoušce, zkoušce mikrotvrdomosti po celém průřezu svarů a vyhodnocení makrostruktury a mikrostruktury.

Po svaření budou ze vzorů za pomoci laseru vyřezány požadované tvary pro následné vyhodnocení jejich mechanických a strukturních vlastností. Konkrétně budou vzorky podrobeny tahové zkoušce, zkoušce mikrotvrdomosti po celém průřezu svarů a vyhodnocení makrostruktury a mikrostruktury.

Tab. 4 Přehled svařovaných vzorků

Technologie	Materiál	Označení	Výkon [W]	Rychlost [mm/s]
Laser	Austenit	LA1	1300	10
		LA2	1800	20
		LA3	2000	30
	Ferit	LF1	1300	10
		LF2	1800	20
		LF3	2000	30
Technologie	Materiál	Označení	Proud [A]	Množství plynu [l/h]
Plazma	Austenit	PA1	100	300
		PA2	110	300
		PA3	100	350
	Ferit	PF1	100	300
		PF2	110	300
		PF3	100	350

Pro posouzení vlivu parametrů svařování na výslednou podobu a vlastnosti svaru, je jedním z rozhodujících faktorů vnesené teplo. Obecně lze říci, že s rostoucí hodnotou vneseného tepla do svaru, roste i vliv procesu svařování na výslednou strukturu materiálu přímo ve svarovém kovu ale hlavně v jeho okolí. Tento efekt má významný vliv na mechanické vlastnosti součásti po svařování. Tento parametr je závislý na napětí a proudu

v případě svařování plazmou, potažmo výkonu při svařování laserem. V obou případech je vnesené teplo závislé na rychlosti svařování. Pro výpočet vneseného tepla při svařování plazmou byl použit vzorec 3.1. Výpočet vneseného tepla při svařování laserem byl tento vzorec upraven do podoby 3.2, na základě obecné znalosti, že výkon je roven součinu napětí a proudu. Následně byly vypočítány hodnoty vneseného tepla pro všechny svary dosažené danou technologií za daných parametrů. Jelikož do výpočtu nevstupuje hodnota průtokového množství plazmového plynu, pro svary PA1 a PA3 je postačující jeden výpočet. Pro výpočet svarů provedených za pomoci plazmového svařování byla použita hodnota tepelné účinnosti  $\eta = 0,65$ , která je obecně používána pro tuto technologii. V případě svařování laserem je standardně užívanou hodnotou tepelné účinnosti  $\eta = 0,65$  v případě, že svar provařen až ke kořenu a keyhole se tvoří v celé tloušťce materiálu. Na základě předchozích praktických experimentů bylo však zjištěno, že při svařování určitých tloušťek materiálu za určitých parametrů dochází k natavení materiálu v kořeni svaru, nicméně vlivem povrchového napětí tento roztavený kov zůstává v kořeni svaru a paprsek laseru tedy neprochází skrz celou tloušťku materiálu. Bylo ověřeno, že v tomto případě je přesnější použít hodnotu tepelné účinnosti, běžně používanou pro svary, kde paprsek materiálem neprochází  $\eta = 0,81$ .

Z vypočítaných hodnot je patrné, že hodnoty vneseného tepla jsou řádově nižší u svařování laserem a v případě svařování laserem hodnota vneseného tepla klesá se zvyšujícími se parametry výkonu a rychlosti. V případě svařování plazmou hodnota vneseného tepla roste s rostoucím proudem, jelikož rychlost svařování je konstantní. Obecně lze tedy říci, že nejlepší výsledky mechanických vlastností a ovlivnění struktury mohou být očekávány u vzorků LA3 a LF3.

$$Q_{SP} = \eta \cdot \frac{U \cdot I}{10^3 \cdot v_s} \text{ [kJ/mm]} \quad (3.1)$$

Kde:  $Q_{SP}$  – vnesené teplo při svařování plazmou [kJ/mm]  
 $\eta$  – tepelná účinnost [-]  
 $U$  – svařovací napětí [V]  
 $I$  – svařovací proud [A]  
 $v_s$  – rychlost posuvu hořáku [mm/s]

$$Q_{SL} = \eta \cdot \frac{P}{10^3 \cdot v_s} \text{ [kJ/mm]} \quad (3.2)$$

Kde:  $Q_{SL}$  – vnesené teplo při svařování laserem [kJ/mm]  
 $P$  – Výkon laseru [W]

$$Q_{SL1} = 0,81 \cdot \frac{1300}{10^3 \cdot 10} = 0,11 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (3.2)$$

$$Q_{SL2} = 0,81 \cdot \frac{1800}{10^3 \cdot 20} = 0,07 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (3.2)$$

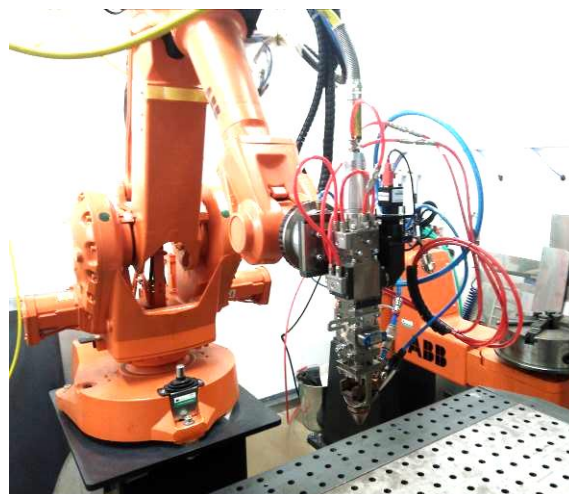
$$Q_{SL3} = 0,81 \cdot \frac{2000}{10^3 \cdot 30} = 0,05 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (3.2)$$

$$Q_{SP1.3} = 0,65 \cdot \frac{45 \cdot 100}{10^3 \cdot 2,7} = 1,08 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (3.1)$$

$$Q_{SP2} = 0,65 \cdot \frac{45 \cdot 110}{10^3 \cdot 2,7} = 1,19 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (3.1)$$

### 3.1 Svařování laserem

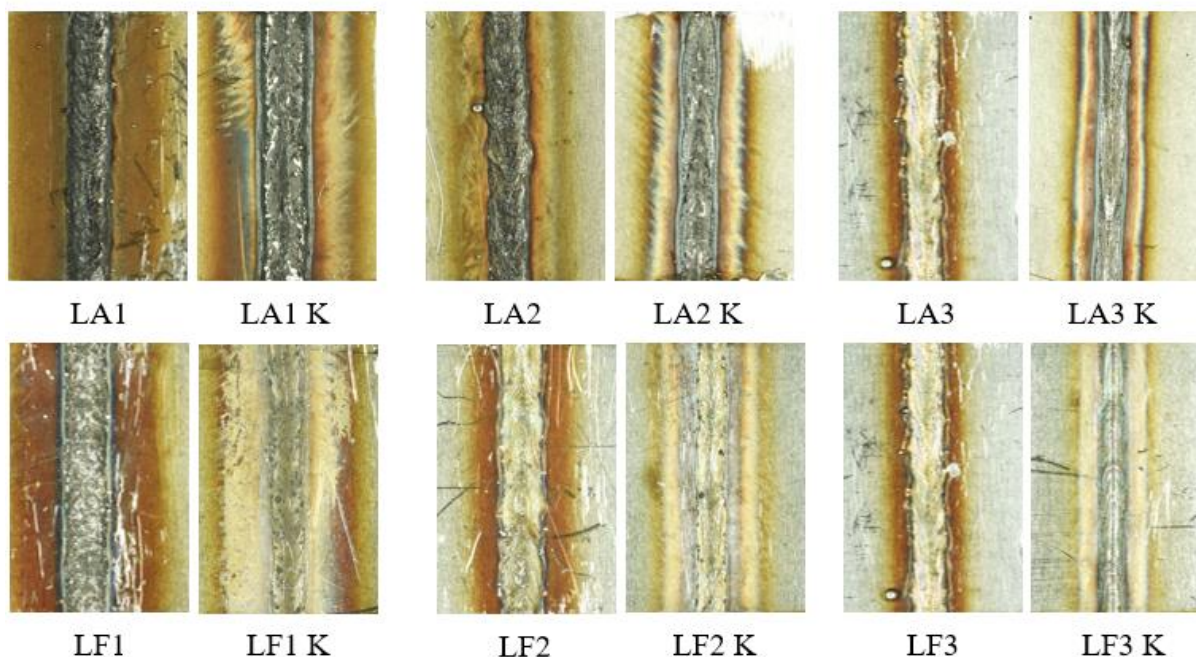
Svařování laserem bylo prováděno na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky. Pro svařování byl použit vláknový laser IPG LASER YLS-2000, od společnosti IPG Photonics o jmenovitém výkonu 2 kW, který umožňuje vytvářet svary do tloušťky 5 mm pro běžné oceli. Vlnová délka generovaného paprsku je 1070 nm až 1080 nm. Zdroj laserového paprsku je chlazen vzduchem a umístěn mimo a svařovací komoru. Do svařovací hlavy je paprsek přiváděn optickým kabelem. Tento laser je vhodný pro širokou škálu využití jako jsou svařování, řezání apod. Laboratoř ÚPT AVČR je vybavena klasickou svařovací hlavou, svařovací hlavou s možností vychylování paprsku a řezací hlavou. Svary byly provedeny klasickou svařovací hlavou Precitec YW30. Viz obr. 30. Svařovací hlava je umístěna na průmyslovém robotu IRB 2400 od firmy ABB. Jeho dosah je 1,55 m, maximální zatížení 12 kg a přesnost 0,03 mm až 0,07 mm.



Obr. 30 Laserová svařovací hlava Precitec YW30 na robotickém rameni IRB-2400

Před samotným svařováním byl vždy vytvořen na jedné straně styčné plochy svařovaných plechů bodový svar, tak, aby v průběhu svařování nedocházelo vlivem působení zdroje tepla k rozšiřování mezery mezi nimi. Pokud by v průběhu svařování došlo k oddálení plechů od sebe, laserový paprsek by přestal působit na materiál ve správné míře tak, aby bylo svařování provedeno správně.

Na obr. 31 jsou zobrazeny svary vytvořené laserem jak pro austenitickou, tak feritickou ocel. Svary jsou na první pohled bez vad a dobře provařené. Fotografie označené písmenem K značí fotografie kořene daného svaru.



Obr. 31 Svary vytvořené laserem

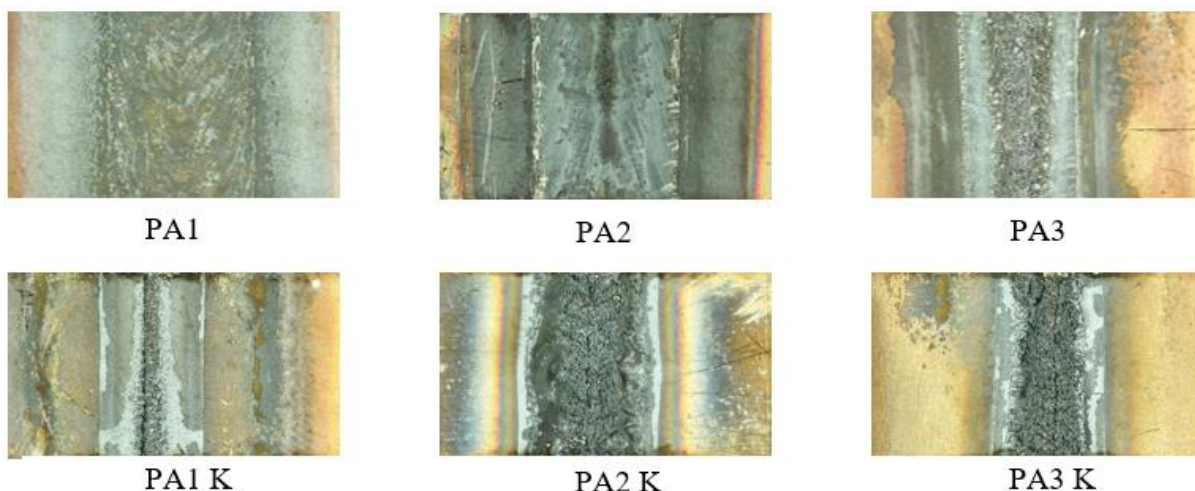
### 3.2 Plazmové svařování [37]

Plazmové svařování bylo provedeno ve společnosti IMI CCI Brno na plazmovém svařovacím automatu PPC 250 PTM od výrobce KSK Česká Třebová, viz obr. 32. Společnost se zabývá výrobou zakázkových tlakových ventilů určených do vysoce zátěžových provozů. Jelikož se tedy produkce společnosti skládá z většiny z dílů kruhových průřezů, konstrukce svařovacího automatu tomu také odpovídá. Jedná se o pětiosý svařovací automat, kde tři osy obsluhuje polohovací systém hořáku, a dvě osy jsou obsluhovány za pomoci polohovačů svařované součásti. Svařovací automat pracuje v režimu PTA (Plasma Transferred Arc), tedy elektrický oblouk hoří mezi elektrodou hořáku a samotným svařovaným materiálem. Celý proces svařování je řízen CNC systémem.



Obr. 32 Plazmový svařovací automat PPC 250 PTM [37]

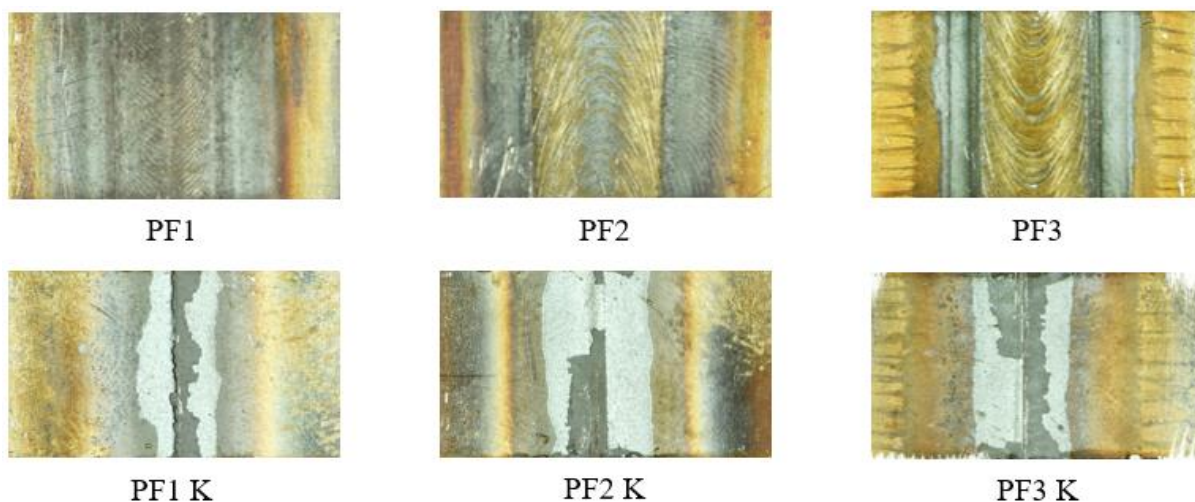
Pro samotné svařování byly polotovary pro vzorky fixovány do správné vzájemné pozice za pomoci malých bodových svarů vytvořených laserem, tak aby nedocházelo k jejich vzájemnému pohybu vlivem tepelné roztažnosti v průběhu svařování. Plazmovým plynem byl v tomto případě argon a svařování proběhlo za konstantního proudu 45 V a konstantní rychlostí 2,7 mm/s. Proměnnými parametry jsou proud a průtok plazmového plynu, viz tab. 4. Svarový kov byl chráněn na své horní hraně za pomoci argonu o průtoku 800 l/h, pro přívod plynu pro ochranu kořene svaru svařovací automat PPC 250 PTM není konstruován.



Obr. 33 Svary austenitické oceli

Na obr. 33 jsou zobrazeny detailní fotografie svarů materiálu 1.4301, fotografie označené písmenem K jsou fotografie kořene daného svaru. Můžeme pozorovat, že svar P1 je mírně neprovařen, zatímco u svarů PA2 a PA3 došlo k přenesení velké části materiálu z místa svaru, pravděpodobně vlivem vyšších parametrů při svařování, tedy vyššího proudu u svaru PA2 a vyššího průtoku plazmového plynu u svaru PA3.





Obr. 34 Svary feritické oceli

Na obr. 34 jsou zobrazeny detailní fotografie svarů materiálu 1.4016, fotografie označené písmenem K jsou fotografie kořene daného svaru. Na kořenech svarů je možné pozorovat tvary připomínající rozhraní. Tomuto problému se bude blíže věnovat kapitola makrostruktura a mikrostruktura.

### 3.3 Metalografie

Vzorky pro vyhodnocení metalografických zkoušek makrostruktury a mikrostruktury byly připraveny v metalografické laboratoři ÚPT AV ČR. Ze svarů byly nejdříve vyřezány malé výřezy za pomoci laseru. Tyto výřezy byly uřezány do požadovaného tvaru přesnou laboratorní pilou MTH Mikron 110. Následně byly takto připravené vzorky za horka zalisovány na automatickém elektrohydraulickém zalévacím lisu Citopress-1 do tvaru tablet o průměru 30 mm, viz obr. 35. Takto připravené vzorky byly následně broušeny a leštěny na metalografické leštičce Tegramin-20, viz obr. 36. Výrobce obou zařízení je firma Struers. Broušení probíhalo v několika stupních, pokaždé se snižující se zrnitostí brusného kotouče. Následné leštění probíhalo ve třech stupních za pomoci diamantových roztoků s velikostí částic 9  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$  a 1  $\mu\text{m}$ .

Po vybroušení a vyleštění proběhlo naleptání vzorku. Nejprve byly vzorky naleptány leptadlem Villela-Bain, což je směs kyselin chlorovodíkové a pikrové s etanolem. Toto naleptání se neprokázalo jako účinné. Z toho důvodu byly vzorky přebroušeny a přeštěny s následným využitím leptadla 2-2-1, což je směs kyseliny fluorovodíkové a dusičné s glycerinem.



Obr. 35 Automatický elektrohydraulický lis Struers Citopress-1

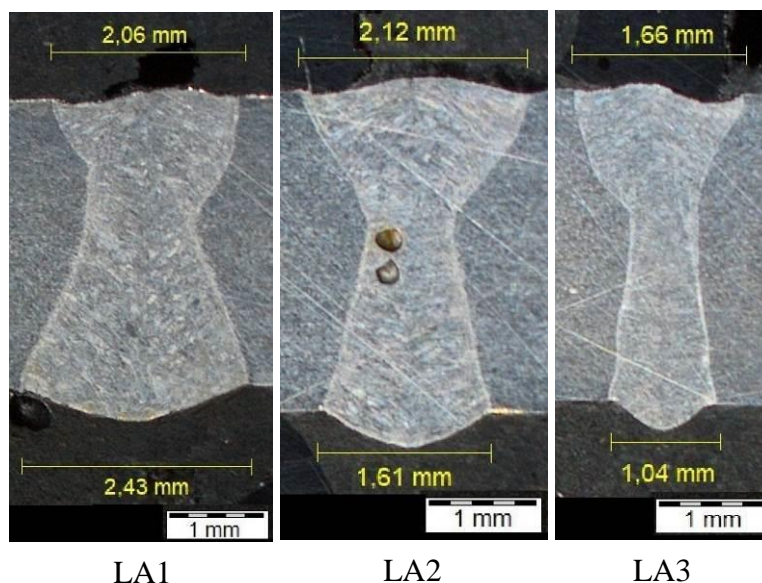


Obr. 36 Metalografická leštička Struers Tegramin-20

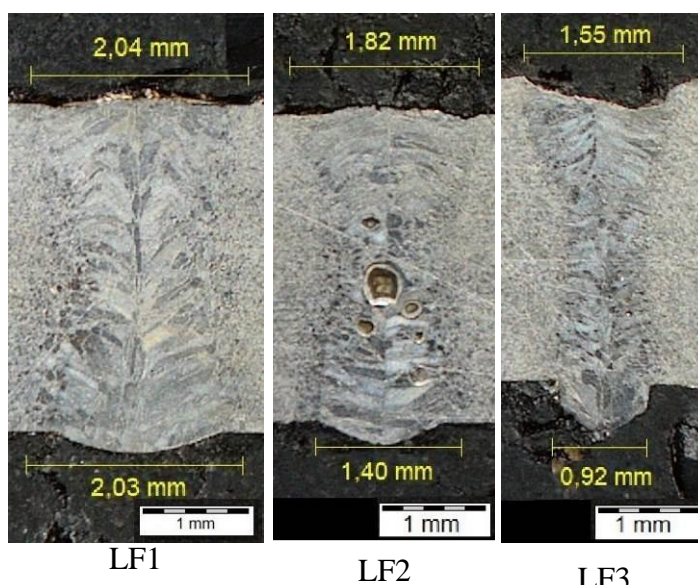
### 3.3.1 Vyhodnocení makrostruktury

Pro vyhodnocení makrostruktury byl použit mikroskop Olympus SZ61, který je součástí vybavení ÚPT AV ČR. Pro vyhodnocení byl použit software Stream Basic, také od společnosti Olympus. Na obr. 37 jsou makroskopické fotografie svarů austenitické oceli 1.4301 vytvořené pomocí technologie svařování laserem. U všech svarů je ostrá hranice mezi svarovým kovem a základním materiálem bez plynulého přechodu. Tepelně ovlivněná oblast není při tomto zvětšení pozorovatelná. U svarů, které byly provedeny při nižších hodnotách výkonu a rychlosti posuvu (LA1, LA2) můžeme pozorovat mírné zhrubnutí struktury. S rostoucím výkonem a rychlostí svařování se také zužuje šířka svaru jak v na návarové ploše, tak i v kořeni. Na vzorku LA2 se nachází vada v podobě dvou pórů.

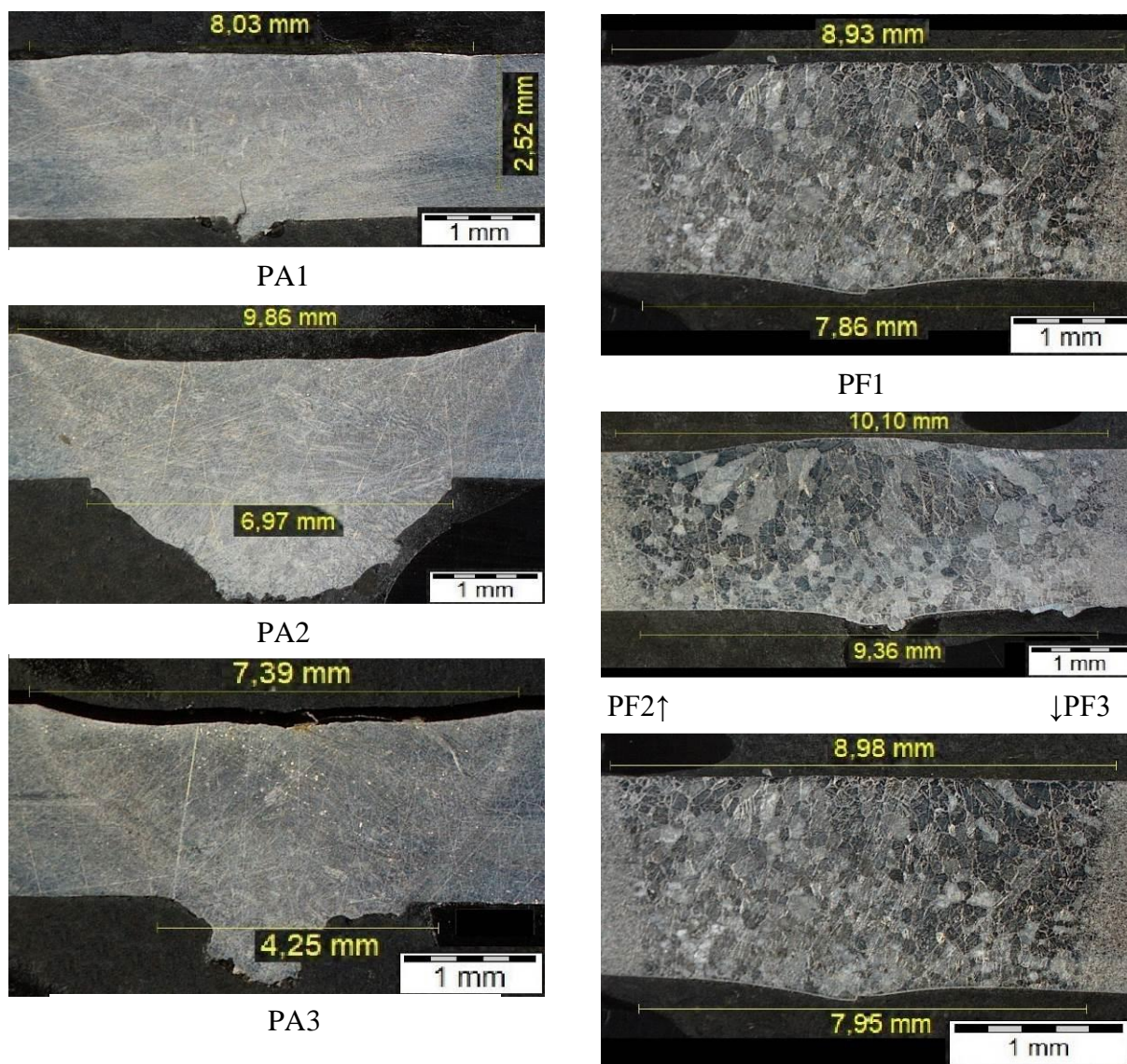
Na obr. 38 se nacházejí makroskopické fotografie svarů feritické oceli 1.4016 vytvořené pomocí svařování laserem. Na všech svarech se velmi významně projevilo zhrubnutí zrna po svařování. Na velmi hrubých zrnech svarového kovu je patrné velmi rychlé ochlazování svarového kovu při krystalizaci, což se projevilo jako jednotná orientace zrn ve směru teplotního gradientu, tedy do středu svaru. Tepelně ovlivněná oblast je velmi dobře pozorovatelná v podobě postupně se snižující velikosti zrna v závislosti na vzdálenosti od svaru až k jeho původní velikosti. Stejně jako u svarů austenitické oceli se svar s rostoucími parametry výkonu a rychlosti výrazně zužuje. U svaru LF3 vlivem těchto vysokých parametrů došlo k mírnému propadu návarové plochy svaru. U vzorku LF2 můžeme opět pozorovat vady svaru v podobě pórovitosti.



LA1 LA2 LA3  
Obr. 37 Makroskopické snímky svarů austenitické oceli vytvořených laserem



LF1 LF2 LF3  
Obr. 38 Makroskopické snímky svarů feritické oceli vytvořených laserem



Obr. 39 Makroskopické snímky svarů austenitické a feritické oceli vytvořených plazmou

Na obr. 39 jsou makroskopické fotografie svarů austenitické i feritické oceli vytvořených plazmovým svařováním. U svaru austenitické oceli PA1 je možné vidět, že nedošlo k celkovému průvaru materiálu ale k jeho provaření pouze do hloubky přibližně 2,5 mm. Naopak u svarů PA2 a PA3 došlo vlivem vyšších parametrů proudu a průtoku plynu k propadu plochy návaru a ve velké míře k přesunu materiálu směrem ke kořenu svaru. Toto může být přičteno pravděpodobně faktem, že austenitická ocel má menší tepelnou vodivost a tím pádem je teplo v prostoru svařování více kumulováno a do jisté míry k tomu přispěl i dynamický účinek plazmy. V okolí svarového kovu není patrná tepelně ovlivněná oblast.

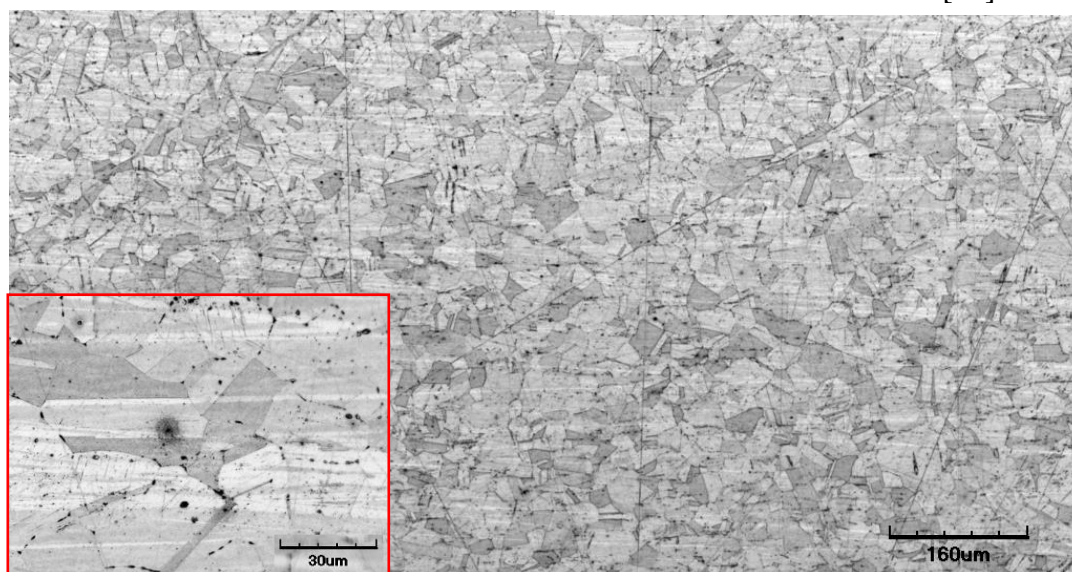
U svarů feritické oceli můžeme pozorovat velmi výrazné zhrubnutí zrna svarového kovu a dobře rozpoznatelnou tepelně ovlivněnou oblast s postupným snižováním velikosti zrna směrem od svarového kovu k základnímu materiálu. V kapitole 3.2 na obr. 34 byly u vzorků všech vzorků PF1, PF2 a PF3 pozorovatelná rozhraní mezi svařovanými plechy na kořeni svaru. Na základě makroskopických fotografií z obr. 39 je možné konstatovat, že svary jsou provedeny správně a rozhraní jsou pouze povrchová, způsobená pravděpodobně nepřesným ustavením svařovaných plechů před svařováním, případně nepřesným nastavením polohy hořáku při svařování. Nicméně v následující kapitole mikrostruktura, bude na základě mnohem detailnějších fotografií prokázáno, že se v případě svarů PF1 a PF3 o neprůvar skutečně jedná.

### 3.3.2 Vyhodnocení mikrostruktury [38]

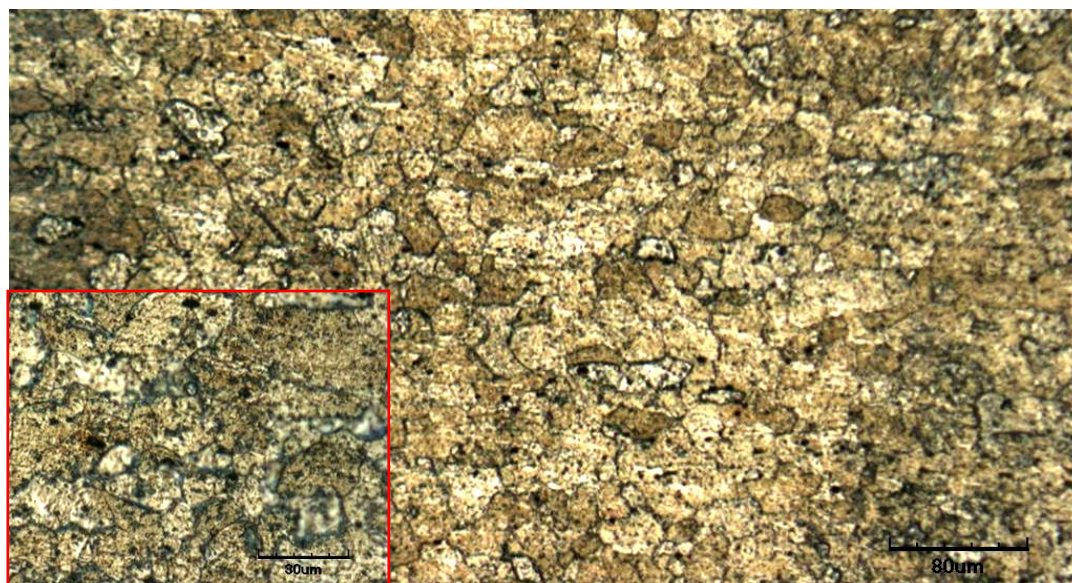
Vyhodnocení mikrostruktury proběhlo v metalografické laboratoři na ÚPT AV ČR. Pro vyhodnocení byl použit konfokální mikroskop Olympus LEXT OLS 3100. Viz obr. 40. Vzorčky byly pozorovány v rozmezí zvětšení od 120x, pro snímky zahrnující celé oblasti svaru jako např. tepelně ovlivněnou oblast, po 2400x, při kterém je možné pozorovat detailně jednotlivá zrna. Na obr. 41 a obr. 42 jsou snímky základních materiálů austenitu a feritu pro porovnání se strukturami svarů a jejich okolí.



Obr. 40 Mikroskop Olympus LEXT OLS 3100 [38]

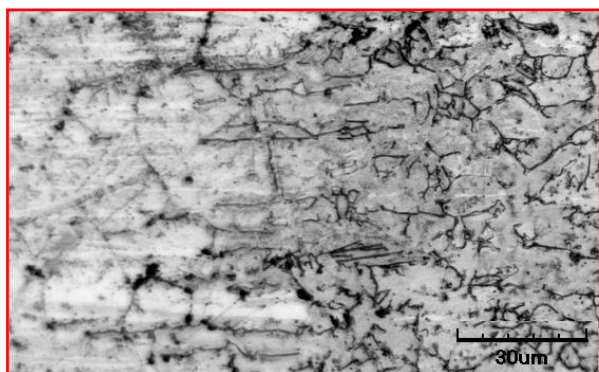


Obr. 41 Mikrostruktura základního materiálu austenitické oceli vč. detailu

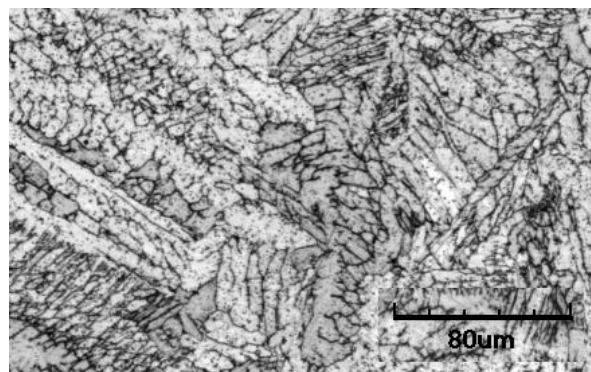


Obr. 42 Mikrostruktura základního materiálu feritické oceli vč. detailu

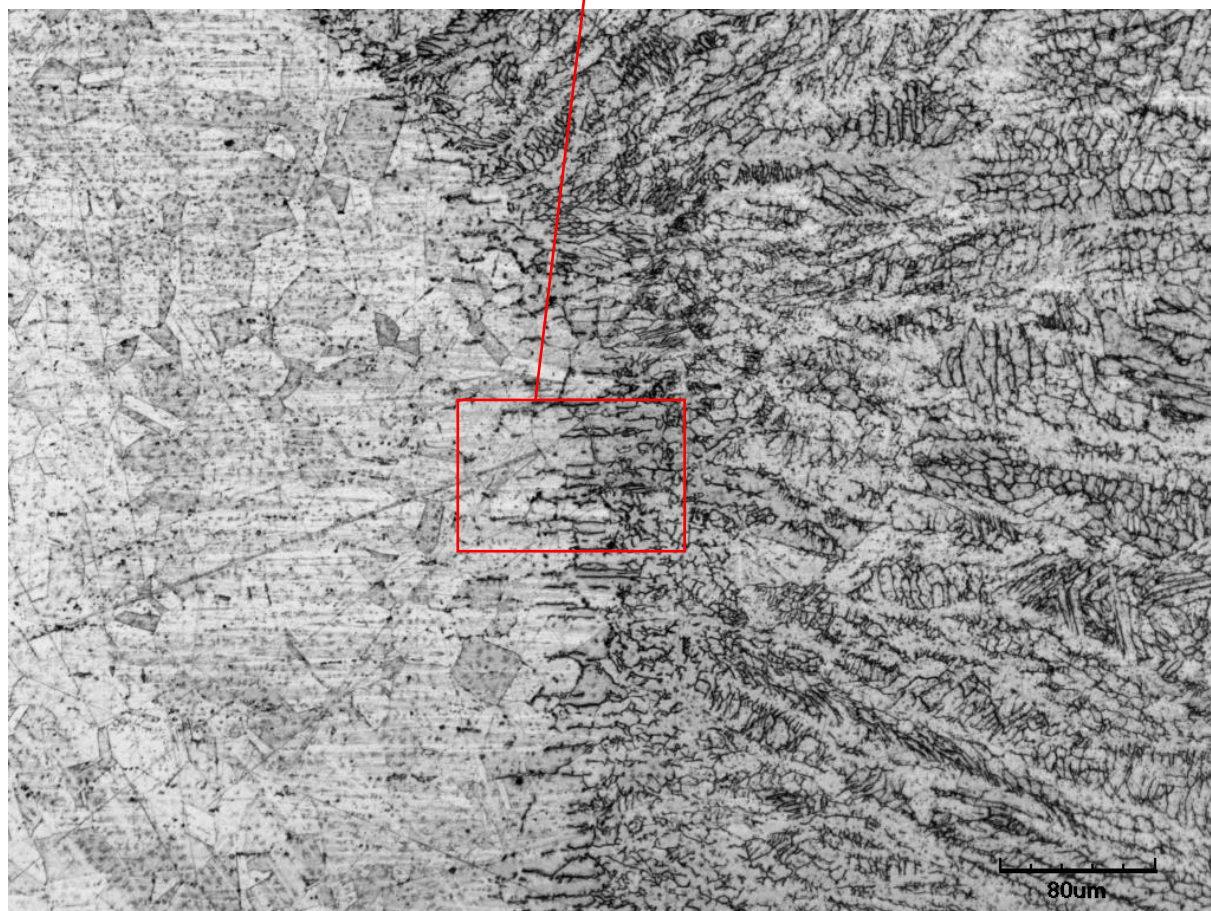
Na obr. 45 je celkový snímek rozhraní svarového kovu a základního materiálu svaru LA1, vytvořeného laserem z austenitické oceli, pořízený při zvětšení 600x. Tepelně ovlivněná oblast není viditelná ani při bližším zvětšení (1200x) na obr. 43, což je způsobeno nízkou tepelnou vodivostí materiálu. Na obr. 44 je snímek svarového kovu v jeho středu při zvětšení 600x. Zde můžeme pozorovat podlouhlá zrna s náznakem orientace směrem do osy svaru, což ukazuje na relativně velkou rychlost ochlazování svarového kovu. Zrna austenitu v základním materiálu se změnila z polyedrických na desková. Dendritická struktura mezi zrny ve svarovém kovu a na rozhraní svaru je pravděpodobně delta ferit.



Obr. 43 Detail rozhraní svarového kovu a základního materiálu vzorku LA1

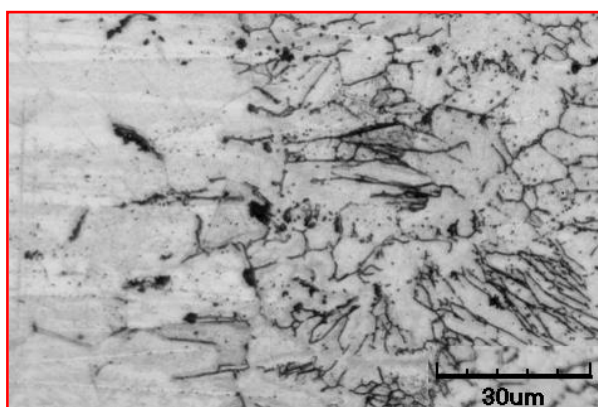


Obr. 44 Detail struktury svarového kovu vzorku LA1

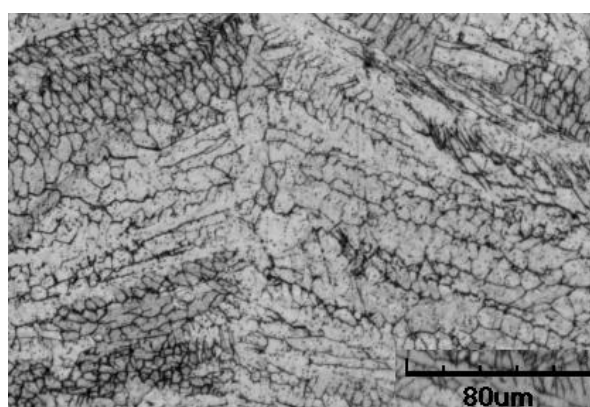


Obr. 45 Rozhraní svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti vzorku LA1

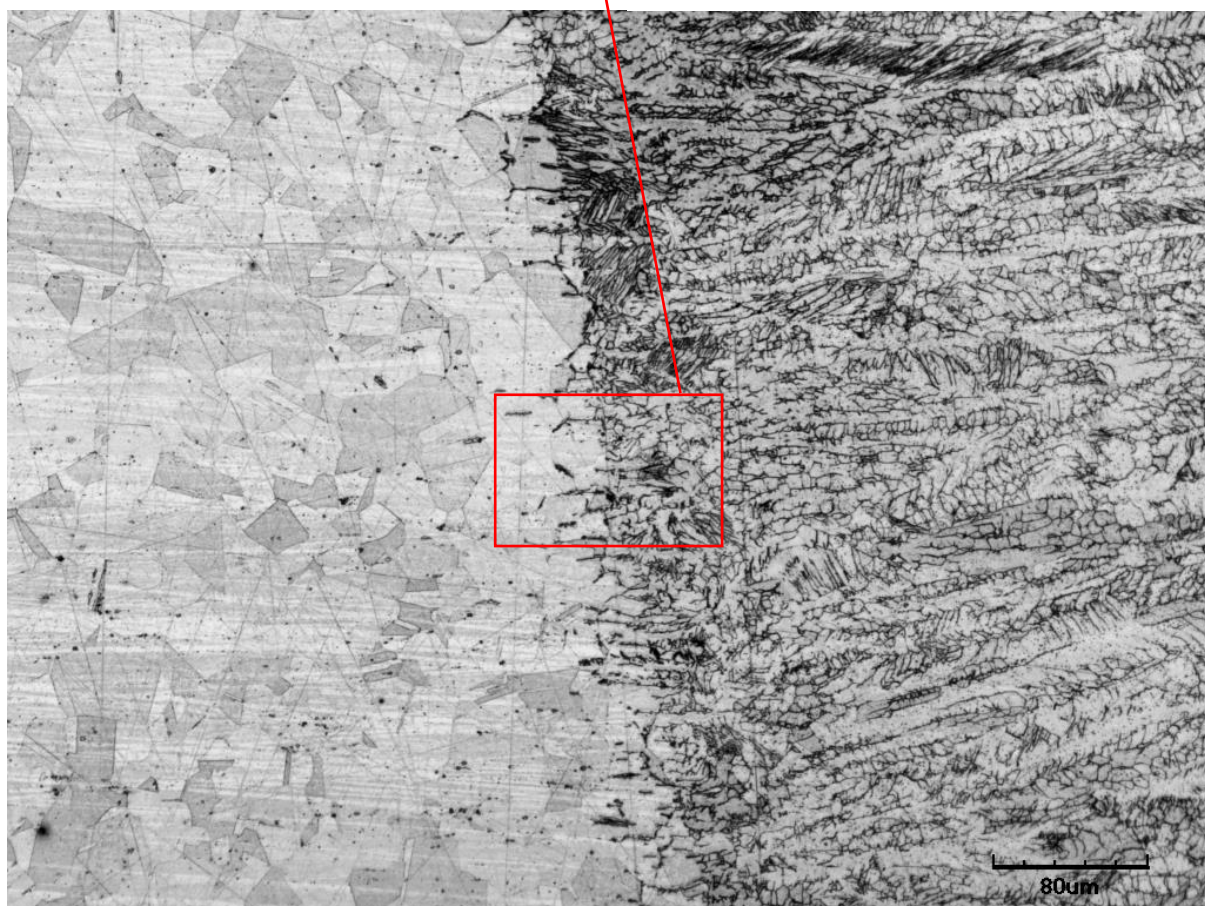
Na obr. 48 je celkový snímek rozhraní svarového kovu a základního materiálu svaru LA2, vytvořeného laserem z austenitické oceli, pořízený při zvětšení 600x. Tepelně ovlivněná oblast není viditelná ani při bližším zvětšení (1200x) na obr. 46. Na obr. 47 je snímek svarového kovu v jeho středu při zvětšení 600x. Zde můžeme pozorovat podlouhlá zrna s viditelnou orientací směrem do osy svaru, ve směru teplotního gradientu. Orientace je více zřetelná než u svaru LA1, hranice mezi základním materiálem a svarovým kovem je ostřejší. K čemuž došlo, jelikož byly pro svar LA2 použity vyšší parametry výkonu a rychlosti, hodnota vneseného tepla byla nižší, což vedlo k rychlejšímu ochlazování svarového kovu. Zrna austenitu v základním materiálu se změnila z polyedrických na desková. Dendritická struktura mezi zrny ve svarovém kovu a na rozhraní svaru je pravděpodobně delta ferit.



Obr. 46 Detail rozhraní svarového kovu a základního materiálu vzorku LA2

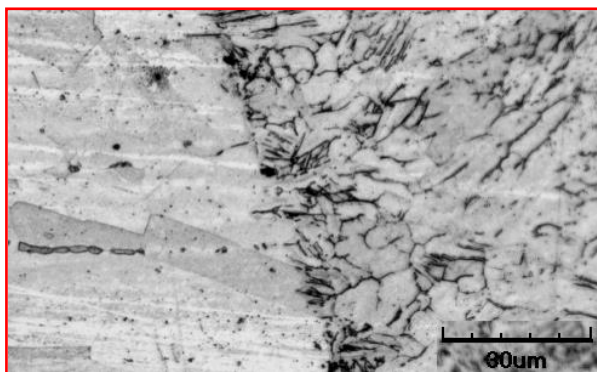


Obr. 47 Detail struktury svarového kovu vzorku LA2

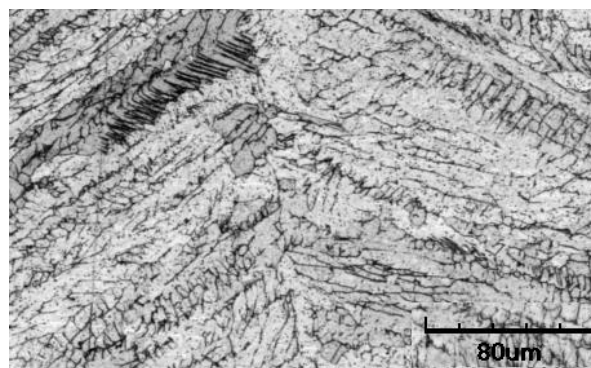


Obr. 48 Rozhraní svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti vzorku LA2

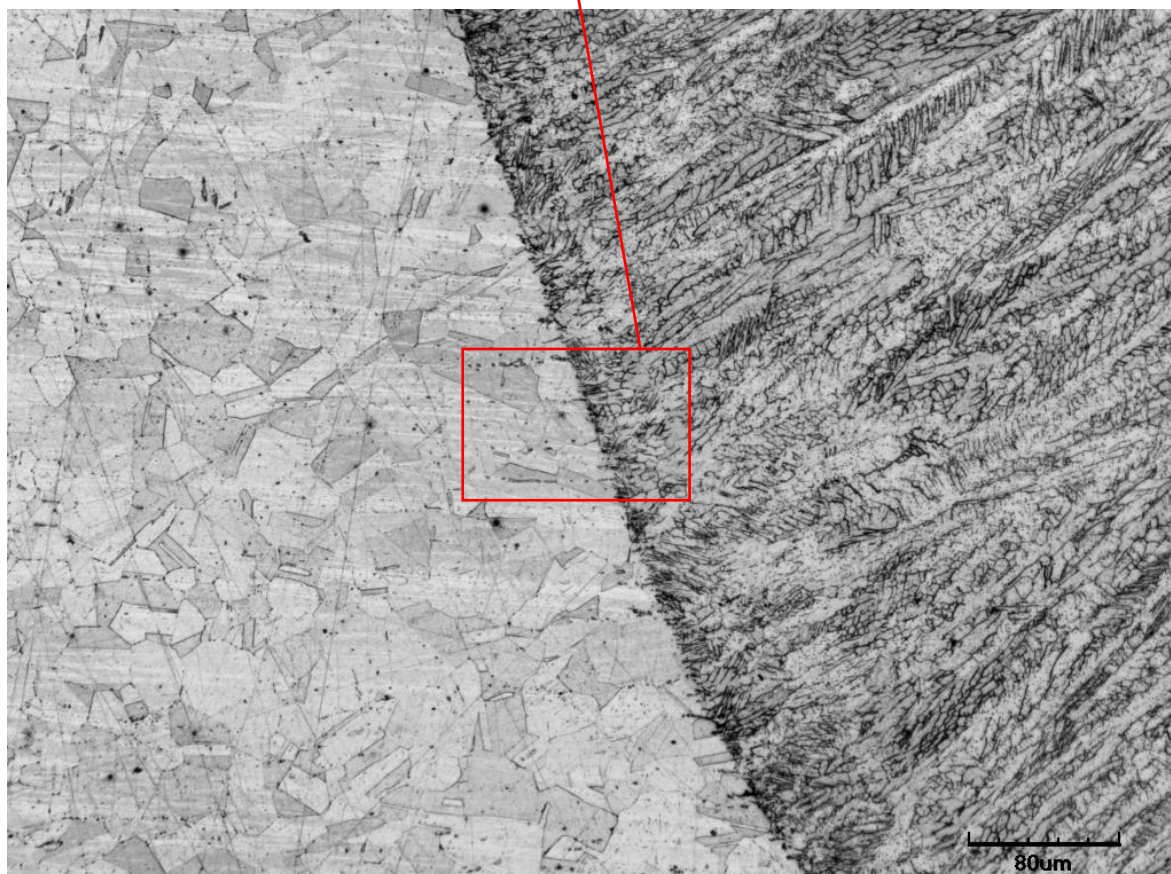
Na obr. 51 je celkový snímek rozhraní svarového kovu a základního materiálu svaru LA3, vytvořeného laserem z austenitické oceli, pořízený při zvětšení 600x. Tepelně ovlivněná oblast není viditelná ani při bližším zvětšení (1200x) na obr. 49. Na obr. 50 je snímek svarového kovu v jeho středu při zvětšení 600x. Zde můžeme pozorovat podlouhlá zrna s výraznou orientací směrem do osy svaru, ve směru teplotního gradientu. Orientace je více zřetelná než u svarů LA1 a LA2 a hranice mezi svarovým kovem a základním materiálem ve velmi ostrá. K čemuž došlo, jelikož byly pro svar LA3 použity nejvyšší parametry výkonu a rychlosti. Hodnota vneseného tepla je v případě tohoto svaru nejnižší ze všech, což se projevilo na již zmíněné struktuře a velmi ostré hranici mezi základním materiálem a svarovým kovem. Zrna austenitu v základním materiálu se změnila z polyedrických na desková. Dendritická struktura mezi zrnky ve svarovém kovu a na rozhraní svaru je pravděpodobně delta ferit.



Obr. 49 Detail rozhraní svarového kovu a základního materiálu vzorku LA3

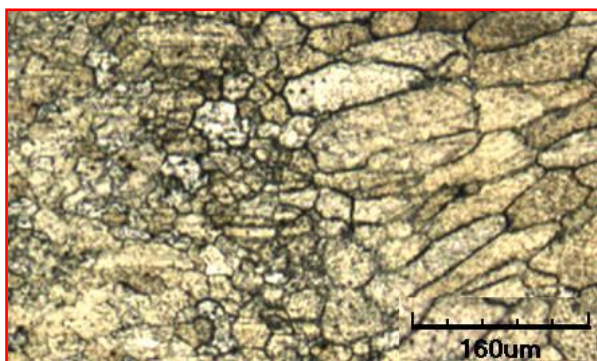


Obr. 50 Detail struktury svarového kovu vzorku LA3

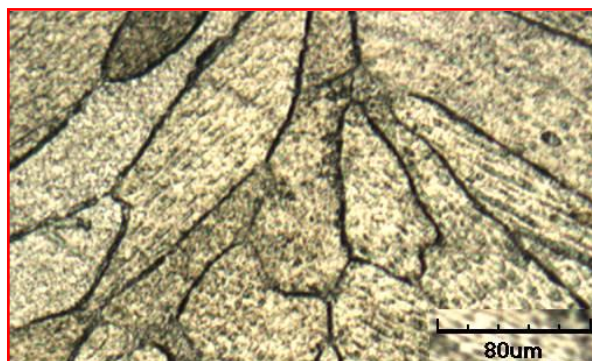


Obr. 51 Rozhraní svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti vzorku LA3

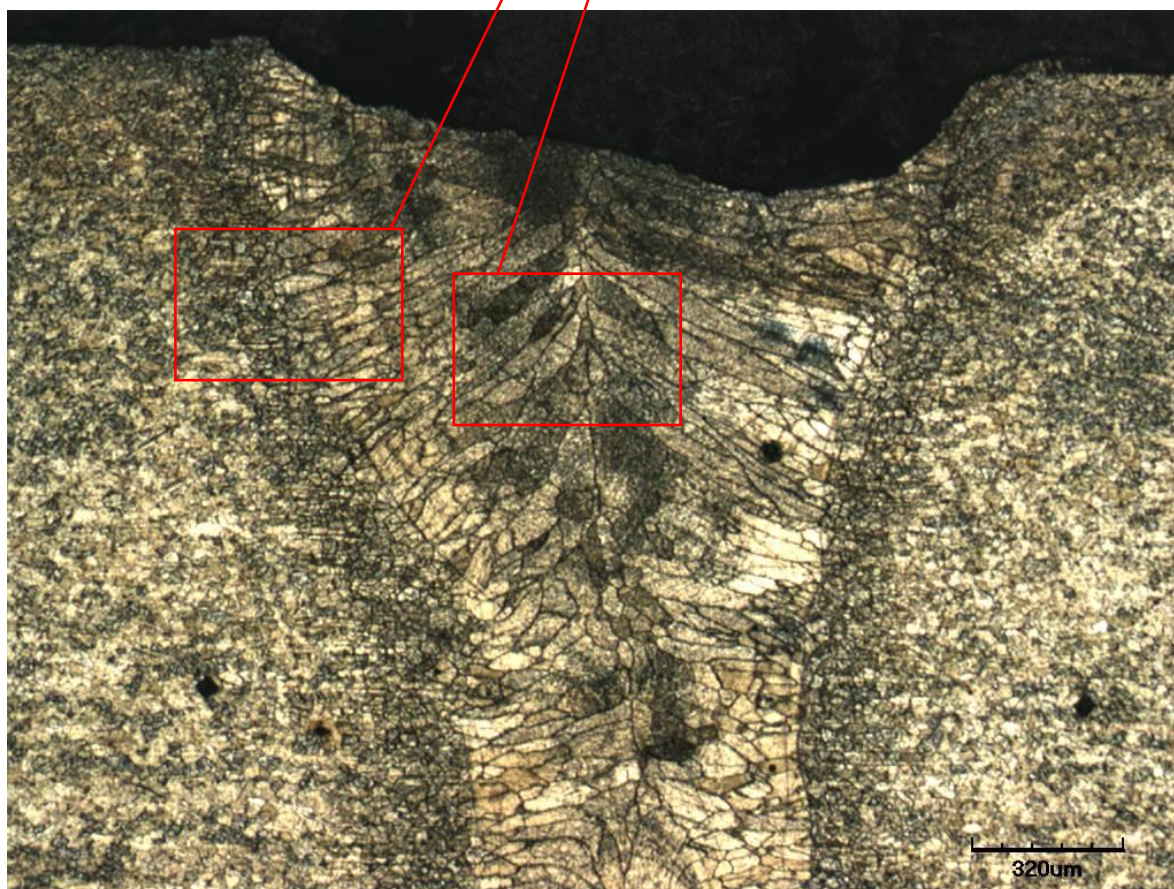
Na obr. 54 je celkový snímek svaru LF1, vytvořeného pomocí technologie svařování laserem z feritické oceli, pořízeného při zvětšení 120x. Na snímku můžeme pozorovat velmi výrazné zhrubnutí zrna ve svarovém kovu. Zrna jsou podlouhlá a orientovaná ve směru teplotního gradientu do středu svaru, naznačující vysokou rychlost ochlazování svarového kovu. Detailní snímek pořízený v ose svaru při zvětšení 600x je na obr. 53. V okolí svaru je výrazná tepelně ovlivněná oblast, jejíž detail při zvětšení 240x je na obr. 52. Na rozhraní svaru a tepelně ovlivněné oblasti není příliš výrazná hrubozrnná oblast. Jemnozrnná a přechodová oblast jsou zde dobře viditelné.



Obr. 52 Detail rozhraní svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti vzorku LF1



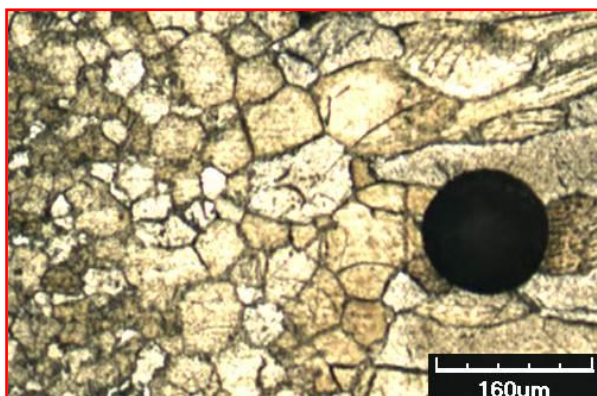
Obr. 53 Detail struktury svarového kovu vzorku LF1



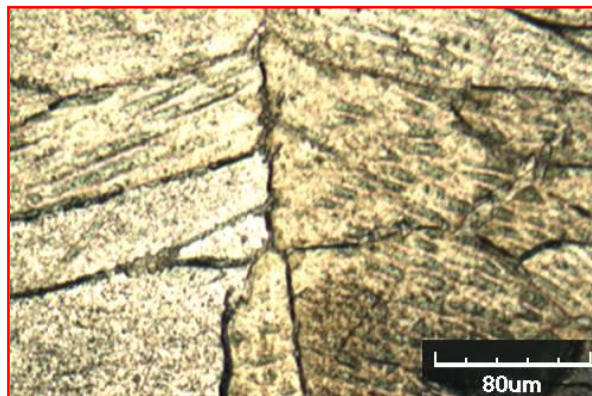
Obr. 54 Celkový snímek mikrostruktury vzorku LF1



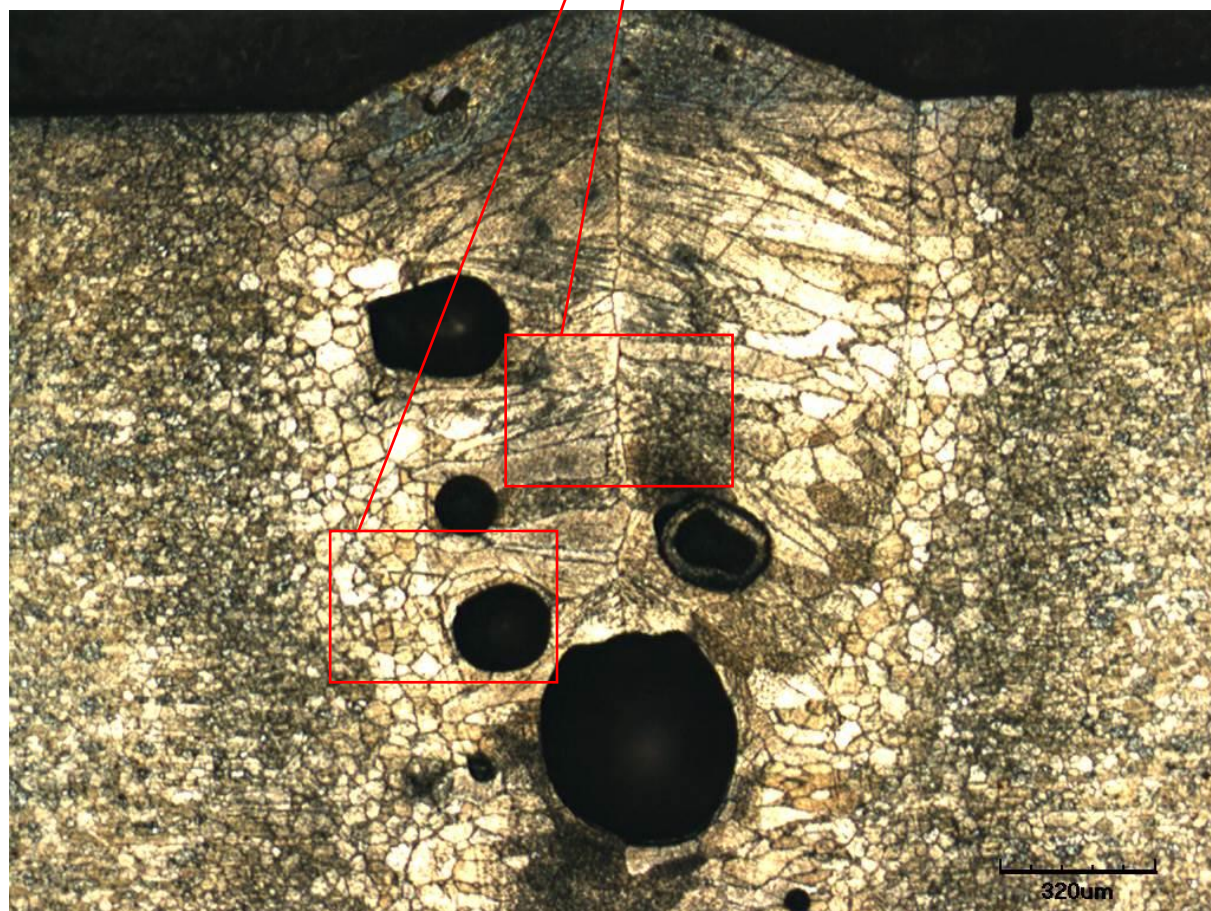
Na obr. 57 je celkový snímek svaru LF2, vytvořeného pomocí technologie svařování laserem z feritické oceli, pořízeného při zvětšení 120x. Na snímku můžeme pozorovat velmi výrazné zhrubnutí zrna ve svarovém kovu. Zrna jsou podlouhlá a orientovaná ve směru teplotního gradientu do středu svaru, naznačující vysokou rychlost ochlazování svarového kovu. Detailní snímek pořízený v ose svaru při zvětšení 600x je na obr. 56. V okolí svaru je výrazná tepelně ovlivněná oblast, jejíž detail při zvětšení 240x je na obr. 55. Na rozhraní svaru a tepelně ovlivněné oblasti jsou dobře viditelné hrubozrnná, jemnozrnná i přechodová oblast.



Obr. 55 Detail rozhraní svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti vzorku LF2

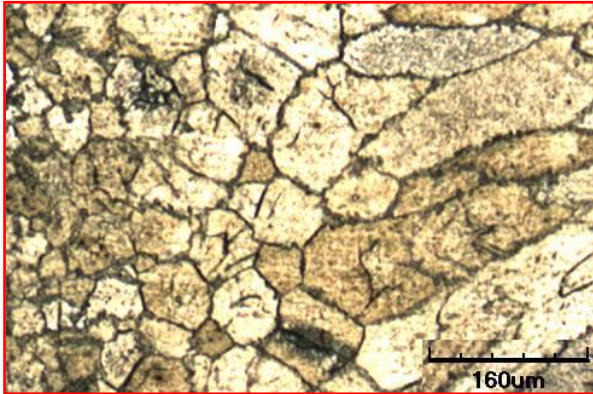


Obr. 56 Detail struktury svarového kovu vzorku LF2

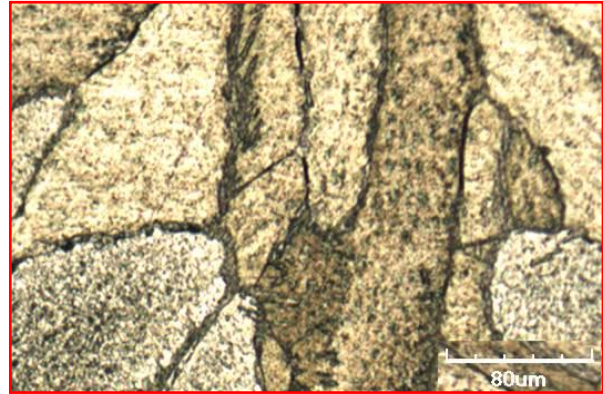


Obr. 57 Celkový snímek mikrostruktury vzorku LF2

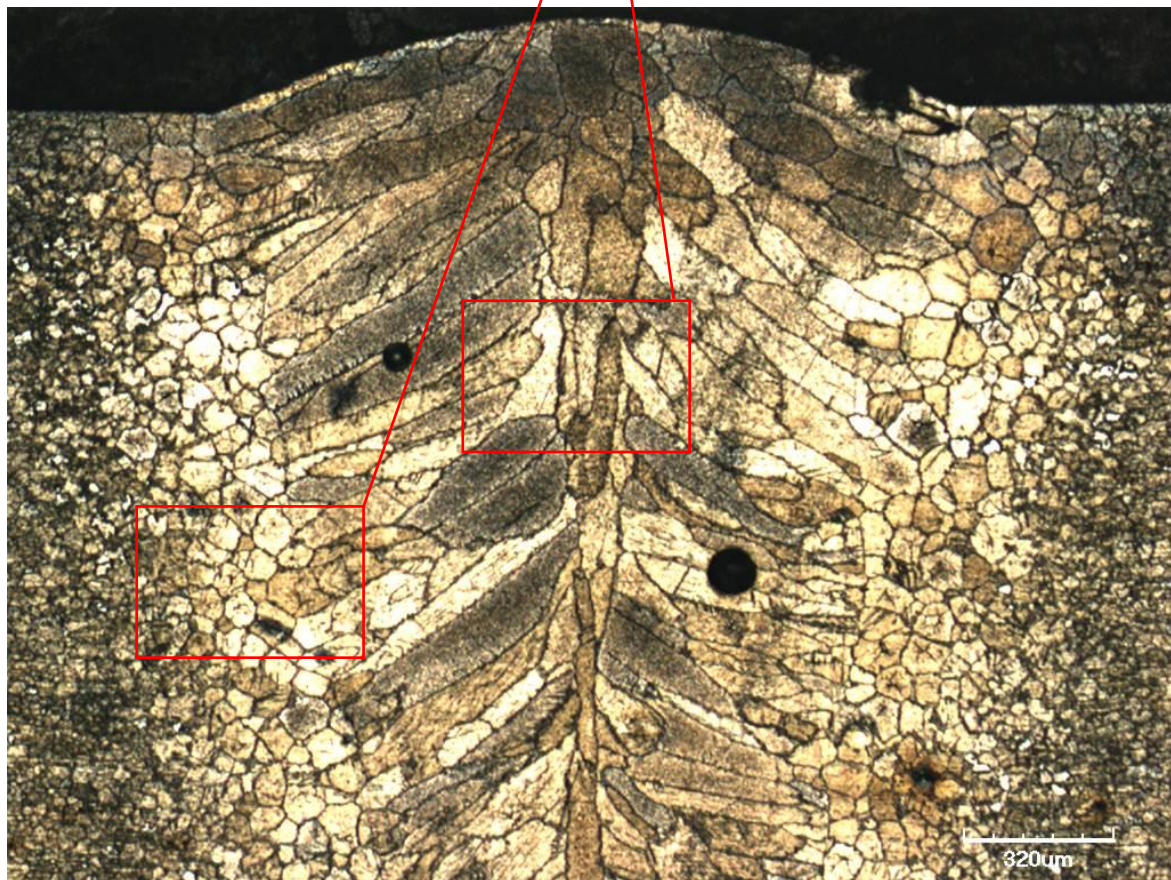
Na obr. 60 je celkový snímek svaru LF3, vytvořeného pomocí technologie svařování laserem z feritické oceli, pořízeného při zvětšení 120x. Na snímku můžeme pozorovat velmi výrazné zhrubnutí zrna ve svarovém kovu. Zrna jsou podlouhlá a orientovaná ve směru teplotního gradientu do středu svaru, naznačující vysokou rychlost ochlazování svarového kovu. Detailní snímek pořízený v ose svaru při zvětšení 600x je na obr. 59. V okolí svaru je výrazná tepelně ovlivněná oblast, jejíž detail při zvětšení 240x je na obr. 58. Na rozhraní svaru a tepelně ovlivněné oblasti jsou dobře viditelné hrubozrnná, jemnozrnná i přechodová oblast. V oblasti návarové plochy svaru se nacházejí zrna, která nemají protažený tvar jako zrna uvnitř svaru, což naznačuje nižší rychlost ochlazování v těchto místech.



Obr. 58 Detail rozhraní svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti vzorku LF3

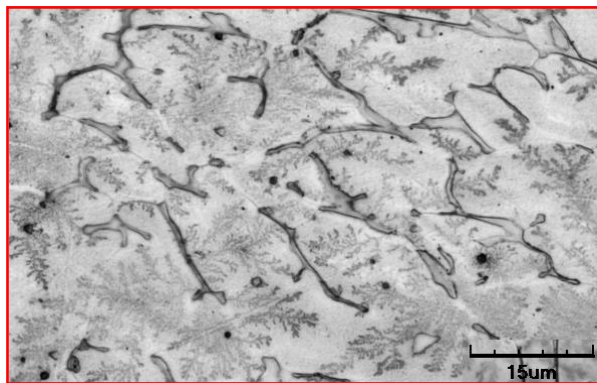


Obr. 59 Detail struktury svarového kovu vzorku LF3

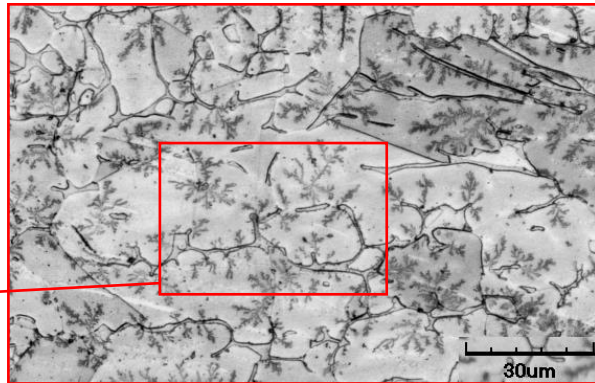


Obr. 60 Celkový snímek mikrostruktury vzorku LF3

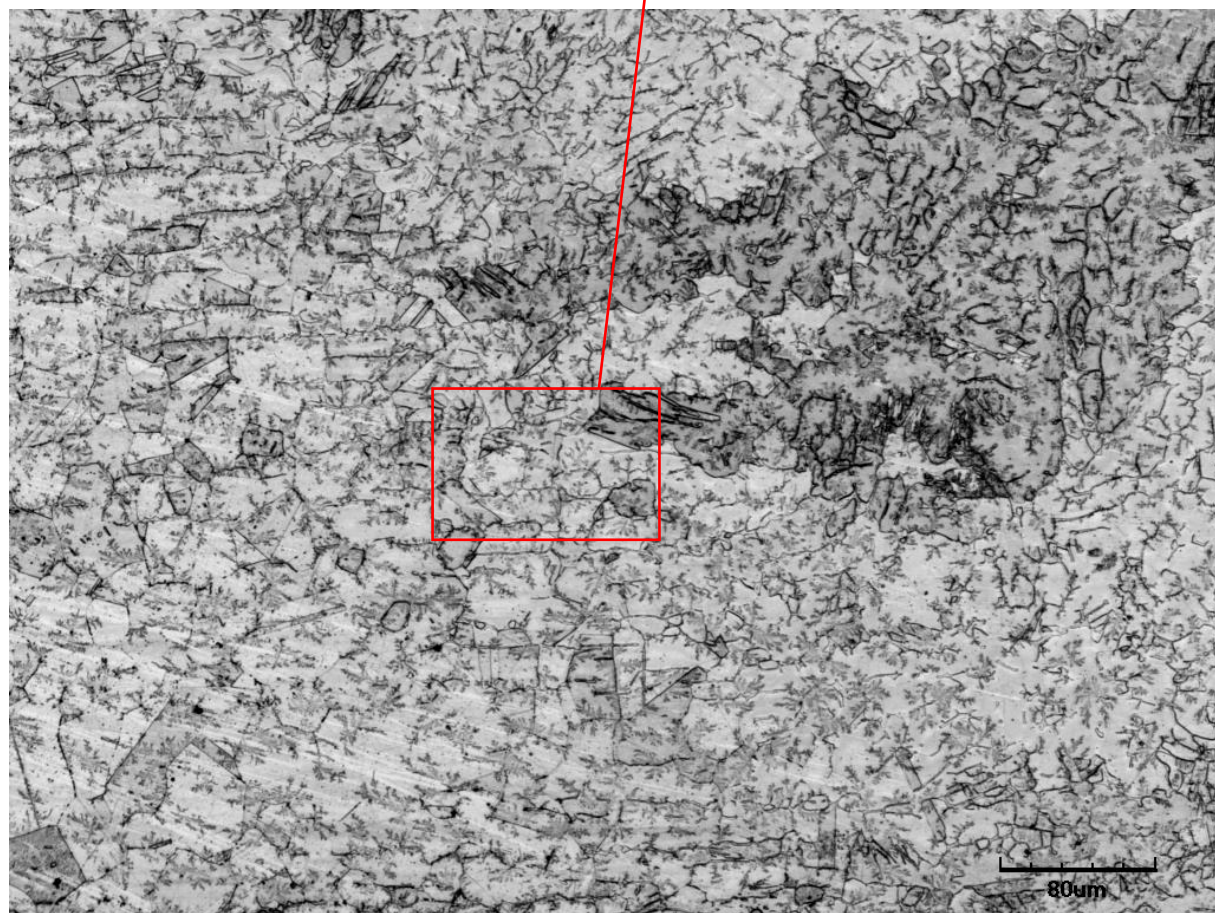
Na obr. 63 je celkový snímek svaru PA1, vytvořeného pomocí technologie svařování plazmou z austenitické oceli, pořízeného při zvětšení 600x. Na tomto obrázku je v levém dolním rohu viditelná přechodová oblast polyedrických zrn směrem ke svarovému kovu. Změna je pozvolná. Zrna viditelně nezměnila ve svarovém kovu svoji velikost oproti základnímu materiálu. Při bližších zvětšeních na obr. 62 1200x a obr. 61 2400x jsou dobře patrná dendritická struktura mezi zrna, tvořená s největší pravděpodobností delta feritem.



Obr. 61 Detail struktury svarového kovu vzorku PA1

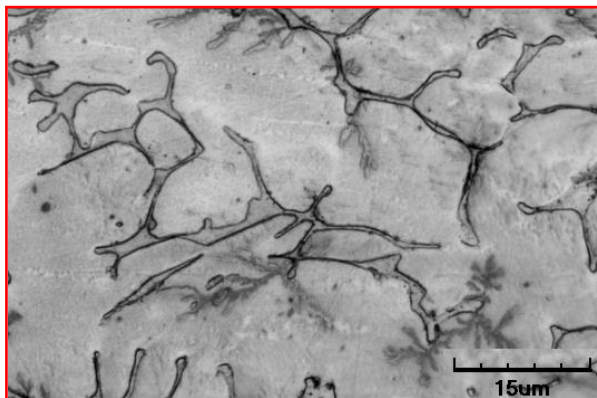


Obr. 62 Detail struktury svarového kovu vzorku PA1

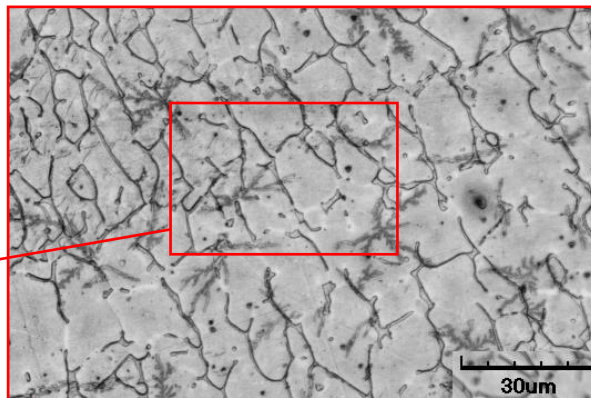


Obr. 63 Rozhraní svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti vzorku PA1

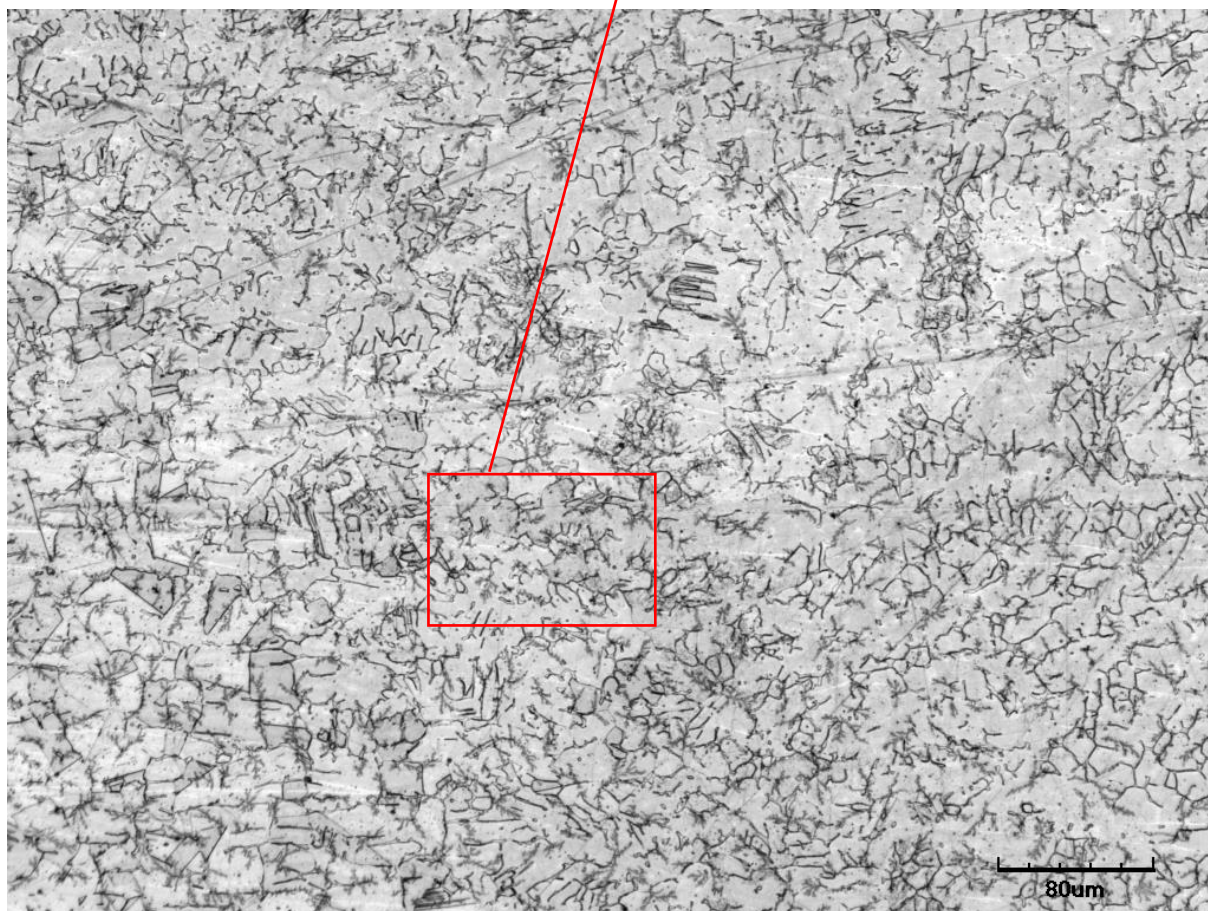
Na obr. 66 je celkový snímek svaru PA2, vytvořeného pomocí technologie svařování plazmou z austenitické oceli, pořízeného při zvětšení 600x. Na tomto obrázku je v levém dolním rohu viditelná přechodová oblast polyedrických zrn směrem ke svarovému kovu. Změna je pozvolná. Zrna viditelně nezměnila ve svarovém kovu svoji velikost oproti základnímu materiálu. Při bližších zvětšeních na obr. 65 1200x a obr. 64 2400x jsou dobře patrná dendritická struktura mezi zrna, tvořená s největší pravděpodobností delta feritem.



Obr. 64 Detail struktury svarového kovu vzorku PA2



Obr. 65 Detail struktury svarového kovu vzorku PA2

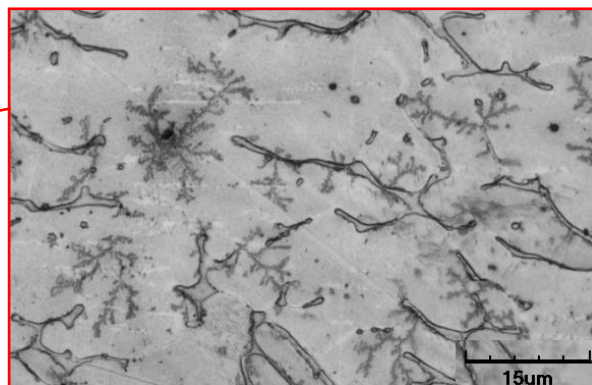


Obr. 66 Rozhraní svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti vzorku PA2

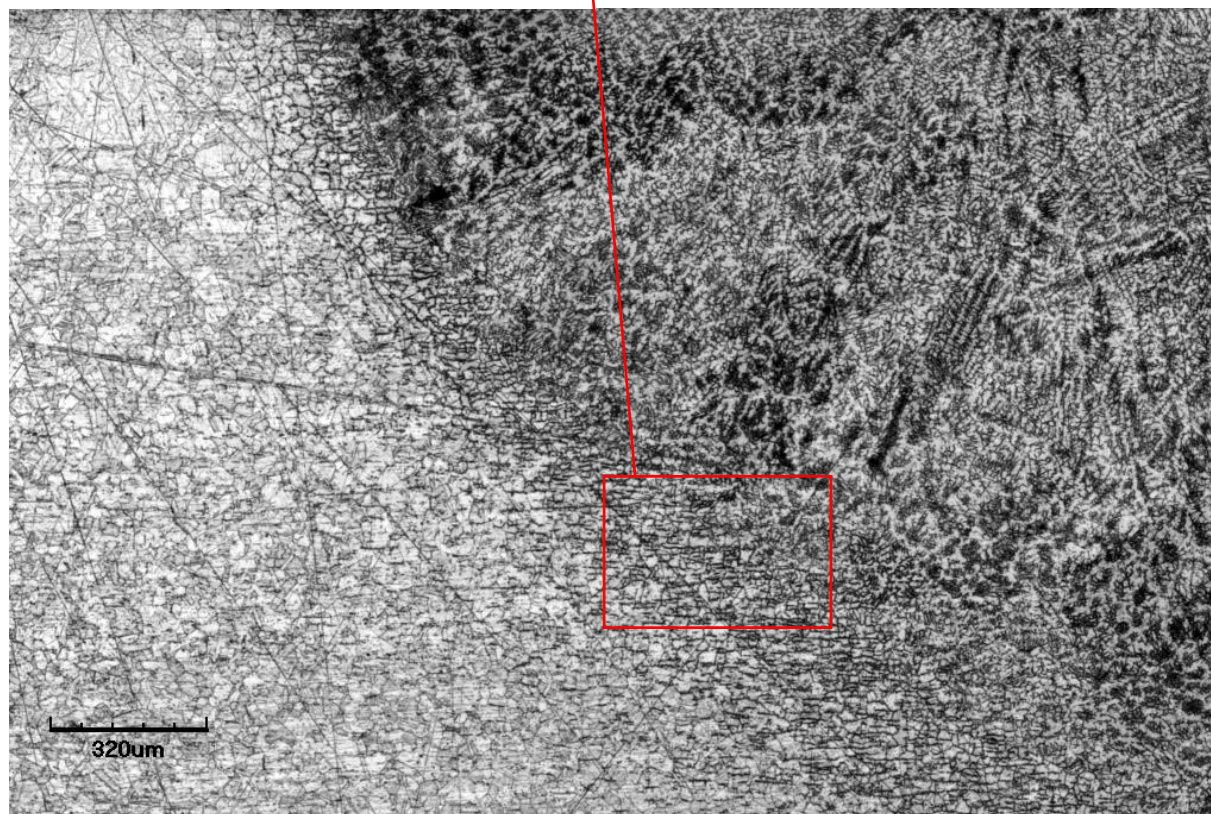
Na obr. 69 je celkový snímek svaru PA3, vytvořeného pomocí technologie svařování plazmou z austenitické oceli, pořízeného při zvětšení 240x. Na tomto obrázku je velmi dobře vidět oblast základního materiálu, přecházející do pozvolně do struktury svarového kovu. Zrna viditelně nezměnila ve svarovém kovu svoji velikost oproti základnímu materiálu. Při bližších zvětšeních na obr. 67 600x a obr. 68 2400x jsou dobře patrná dendritická struktura mezi zrny, tvořená s největší pravděpodobností delta feritem.



Obr. 67 Detail struktury svarového kovu vzorku PA3

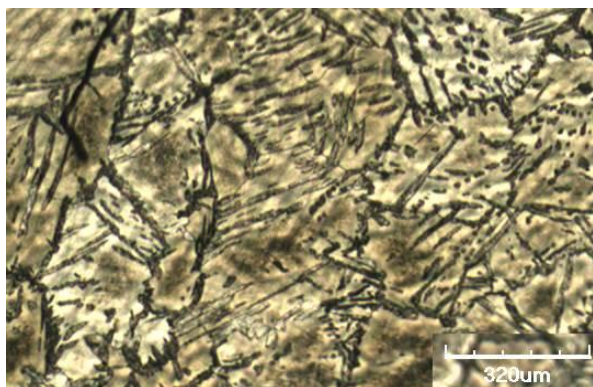


Obr. 68 Detail struktury svarového kovu vzorku PA3

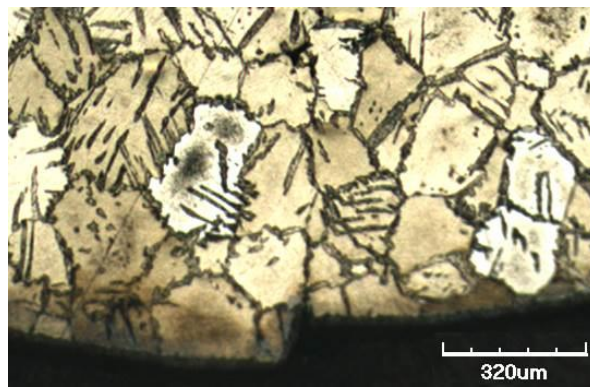


Obr. 69 Rozhraní svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti vzorku PA3

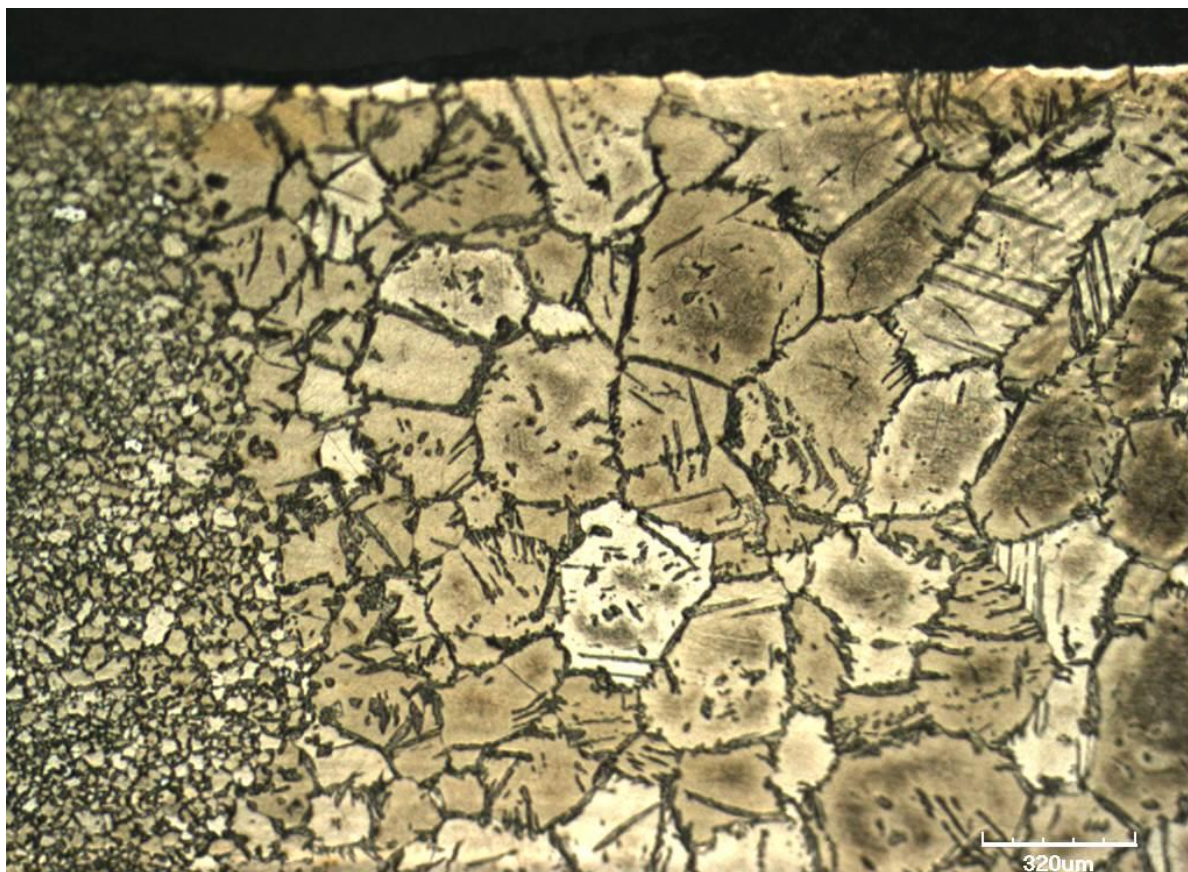
Na obr. 72 je celkový snímek svaru PF1, vytvořeného pomocí technologie svařování plazmou z feritické oceli, pořízeného při zvětšení 120x. Na tomto snímku je velmi dobře patrné zhrubnutí zrna ve svarovém kovu a v tepelně ovlivněné oblasti. Zrna mají pravidelný tvar, což naznačuje pomalejší chladnutí svarového kovu v porovnání se svary totožného materiálu vytvořenými laserem, což by vzhledem k řádově vyššímu množství vneseného tepla u této technologie očekáváno. Tepelně ovlivněná oblast v blízkosti svarového kovu je hrubozrnná a následně se směrem k základnímu materiálu mění v jemnozrnnou až přechodovou. Vzhledem k množství vneseného tepla do svaru lze u všech vzorků PA předpokládat, že tepelně ovlivněná oblast sahá až za hranice metalografických vzorků. Na zrnech svarového kovu a hrubozrnné tepelně ovlivněné oblasti jsou patrné náznaky Widmanstättenovy struktury. Viz obr. 70. Na obr. 71 je dobře patrný neprůvar až ke kořenu, diskutovaný v kapitolách 3.2 a 3.3.1.



Obr. 70 Detail struktury svarového kovu vzorku PF1

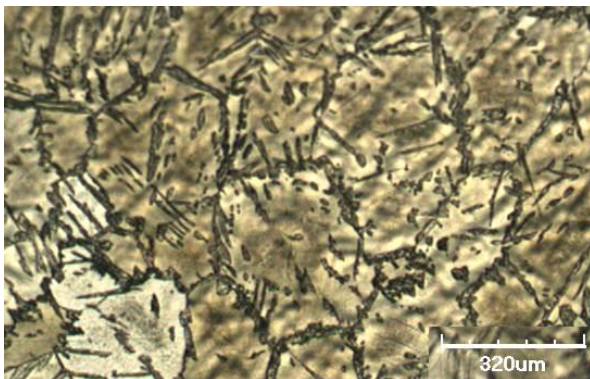


Obr. 71 Detail neprůvaru kořene svaru vzorku PF1

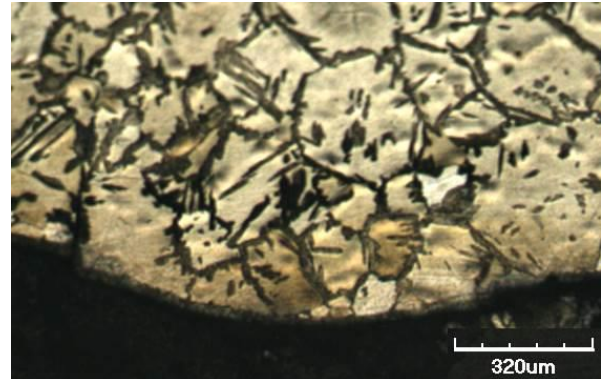


Obr. 72 Rozhraní svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti vzorku PF1

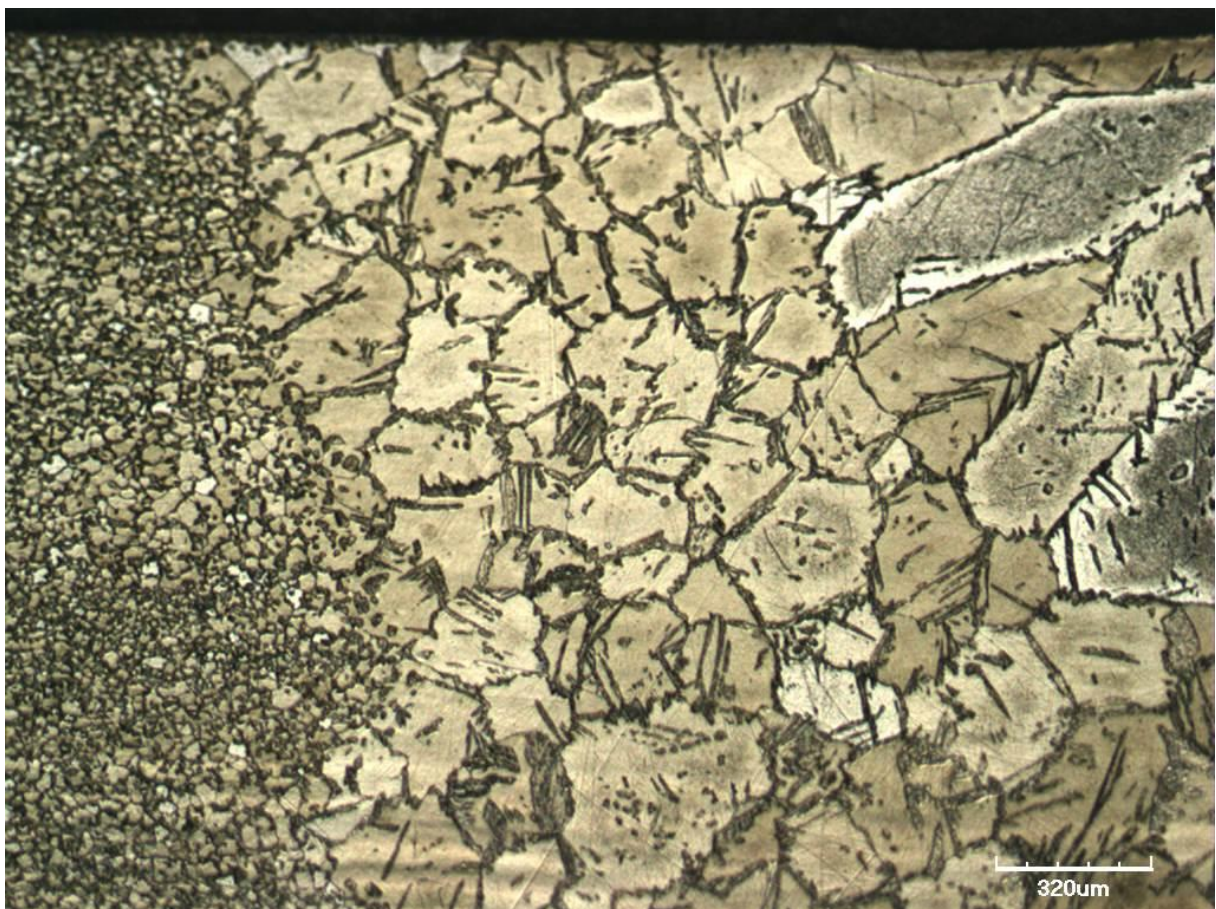
Na obr. 75 je celkový snímek svaru PF2, vytvořeného pomocí technologie svařování plazmou z feritické oceli, pořízeného při zvětšení 120x. Na tomto snímku je velmi dobře patrné zhrubnutí zrna ve svarovém kovu a v tepelně ovlivněné oblasti. Zrna mají, s výjimkou několika zrn, pravidelný tvar, což naznačuje pomalejší chladnutí svarového kovu v porovnání se svary totožného materiálu vytvořenými laserem, což by vzhledem k řádově vyššímu množství vneseného tepla u této technologie očekáváno. Tepelně ovlivněná oblast v blízkosti svarového kovu je hrubozrnná a následně se směrem k základnímu materiálu mění v jemnozrnnou až přechodovou. Na zrnech svarového kovu a hrubozrnné tepelně ovlivněné oblasti jsou patrné náznaky Widmanstättenovy struktury. Viz obr. 73. Na obr. 74 je detail kořene svaru vzorku PF2, bez viditelného neprůvaru.



Obr. 73 Detail struktury svarového kovu vzorku PF2

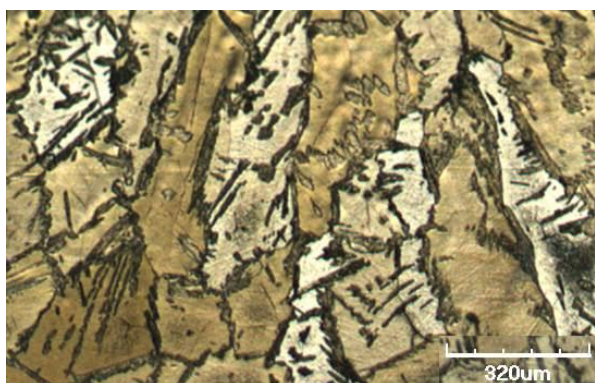


Obr. 74 Detail kořene svaru vzorku PF2



Obr. 75 Rozhraní svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti vzorku PF2

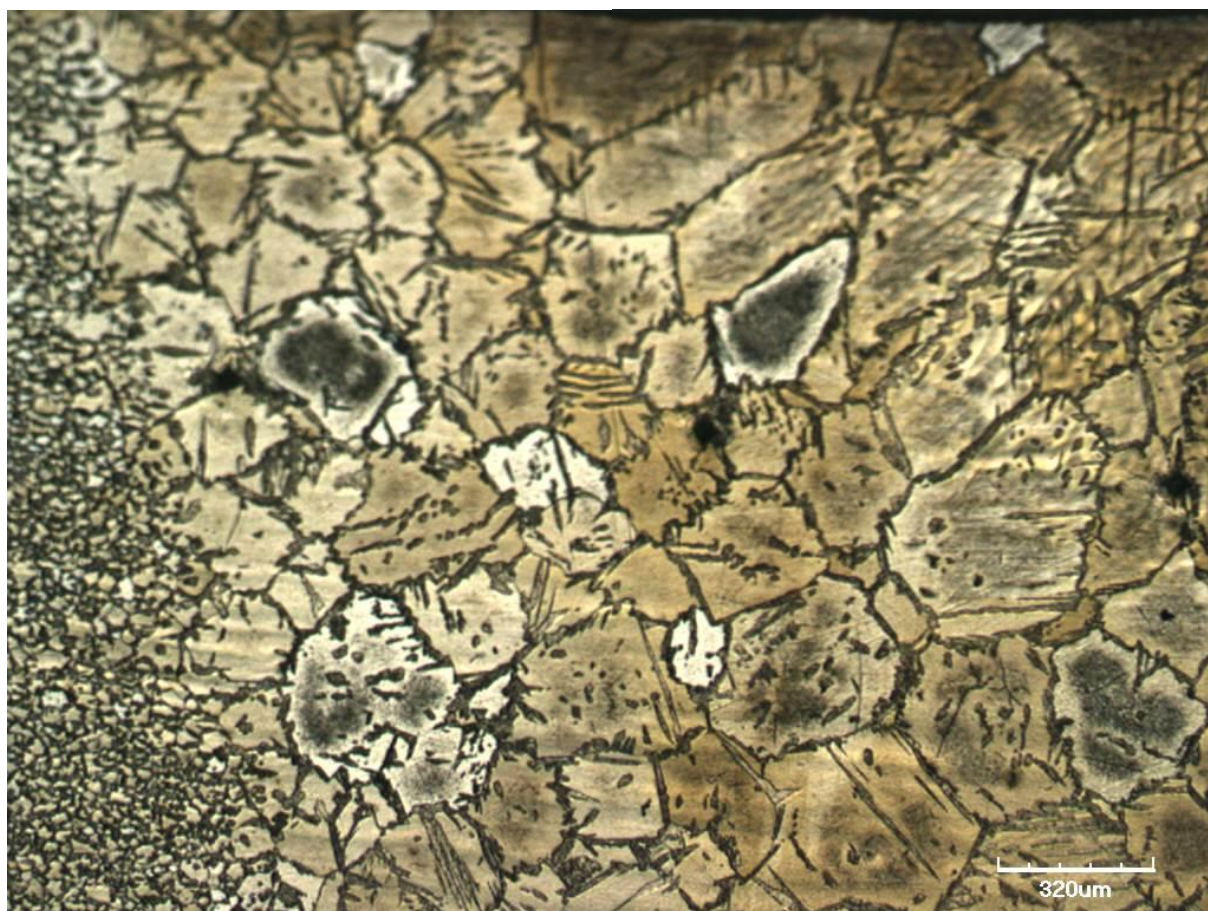
Na obr. 78 je celkový snímek svaru PF3, vytvořeného pomocí technologie svařování plazmou z feritické oceli, pořízeného při zvětšení 120x. Na tomto snímku je velmi dobře patrné zhrubnutí zrna ve svarovém kovu a v tepelně ovlivněné oblasti. Zrna mají pravidelný tvar, což naznačuje pomalejší chladnutí svarového kovu v porovnání se svary totožného materiálu vytvořenými laserem, což by vzhledem k řádově vyššímu množství vneseného tepla u této technologie očekáváno. Tepelně ovlivněná oblast v blízkosti svarového kovu je hrubozrnná a následně se směrem k základnímu materiálu mění v jemnozrnnou až přechodovou. Na zrnech svarového kovu a hrubozrnné tepelně ovlivněné oblasti jsou patrné náznaky Widmanstättény struktury. Viz obr. 76. Na obr. 77 je dobře patrný neprůvar až ke kořenu, diskutovaný v kapitolách 3.2 a 3.3.1.



Obr. 76 Detail struktury svarového kovu vzorku PF3



Obr. 77 Detail neprůvaru kořene svaru vzorku PF3



Obr. 78 Rozhraní svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti vzorku PF3



### 3.4 Zkouška mikrotvrdomosti

K posouzení mikrotvrdomosti vzorků dle ČSN EN ISO 6507-1 byl použit tvrdoměr Zwick 3212, který je součástí vybavení ÚST VUT Brno, viz obr 79. Tento tvrdoměr je určen k měření tvrdosti dle Brinella (průměr kuličky 1 mm), nebo dle Vickerse. Tvrdoměr může být využit pro posouzení tvrdosti pro širokou škálu materiálů od běžných konstrukčních ocelí až po velmi tvrdé materiály. Tvrdoměr je vybaven souřadnicovým stolem o rozměrech 200 x 200 mm a jeho maximální zkušební zatížení je 30 kg. Pro vyhodnocení naměřených dat je připojen k PC s programem testXpert společnosti Zwick.

Mikrotvrdomost vzorků byla vyhodnocována metodou dle Vickerse HV5, tedy zatížení indentoru bylo 5 kg. Pro správné provedení vtisku je tvrdoměr vybaven mechanismem pro zatěžování indentoru konstantní rychlostí, po kterém následovalo stlačení po dobu 12 s dle normy. Šířka mezi vtisky byla pro vzorky svařené laserem 0,5 mm a pro vzorky svařené plazmou 1 mm, z důvodu jejich několikanásobně větší šířky.

Na obr. 80 je fotografie vyhodnocení vzorku LA1 proložená grafem naměřených hodnot tvrdosti HV5. Hodnoty tvrdostí se pohybují v rozmezí 120 HV5 v základním materiálu a rostou až do hodnoty 131 HV5 uprostřed svaru.

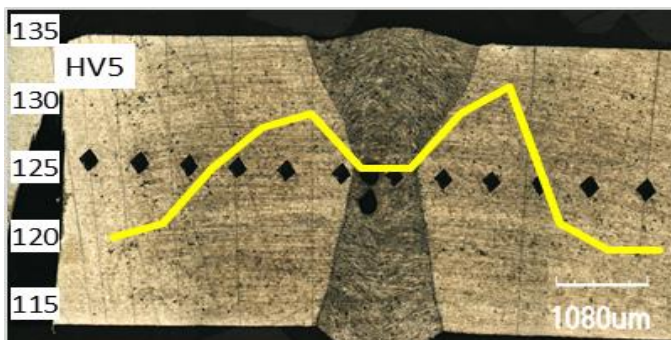
Na obr. 81 je fotografie vyhodnocení vzorku LA2 proložená grafem naměřených hodnot tvrdosti HV5. Podobně jako u vzorku LA1 se hodnoty tvrdosti základního materiálu pohybují v okolí hodnoty 120 HV5 a směrem ke svaru mírně rostou k hodnotám přes 130 HV5. U dvou vtisků provedených ve svarovém kovu a v jeho těsné blízkosti je možné pozorovat pokles hodnoty tvrdosti. K tomuto poklesu došlo v důsledku provedení těchto vpichů v těsné blízkosti vady ve svaru (póru), což vedlo k významnému ovlivnění měření tvrdosti v těchto místech.



Obr. 79 Tvrdoměr Zwick 2312



Obr. 80 Mikrotvrdomost vzorku LA1

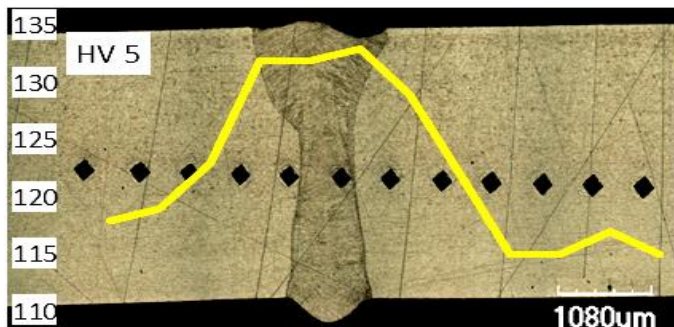


Obr. 81 Mikrotvrdomost vzorku LA2

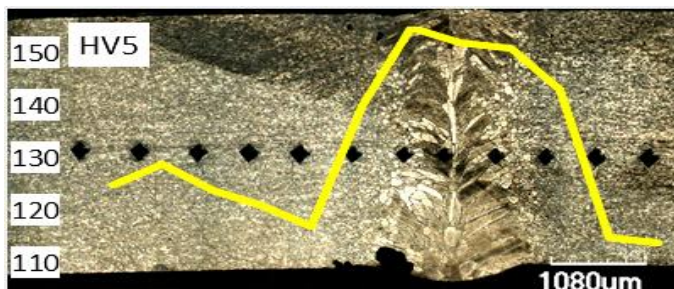
Na obr. 82 je fotografie vyhodnocení vzorku LA3 proložená grafem naměřených hodnot tvrdosti HV5. Mikrotvrdość základního materiálu byla naměřena přibližně stejná jako u předchozích dvou vzorků, tedy okolo 120 HV5. S klesající vzdáleností místa vtisku od svaru rostou hodnoty tvrdosti, přičemž nejvyšší hodnoty tvrdosti jsou ve svarovém kovu nebo v jeho blízkém okolí. Maximální hodnota tvrdosti byla naměřena ve svarovém kovu 133 HV5.

U všech třech svarů LA1, LA2 a LA3 se tvrdost ve svarovém kovu a jeho blízkém okolí mírně zvyšuje ale její maximální hodnota je u všech přibližně stejná, bez ohledu na proměnné parametry svařování. Zvýšené hodnoty tvrdosti nejen ve svarovém kovu ale i v jeho blízkém okolí mohou naznačovat jistou míru tepelného ovlivnění materiálu v okolí svaru.

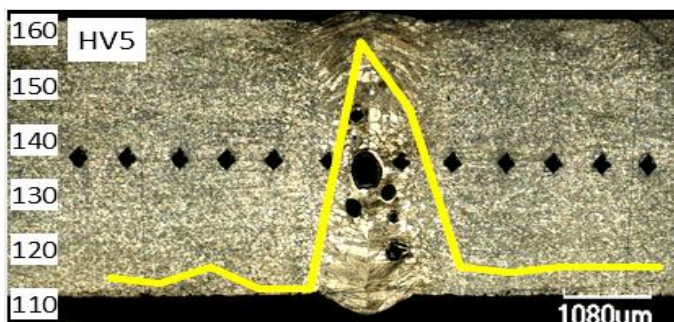
Na obr. 83 je fotografie vyhodnocení vzorku LF1 proložená grafem naměřených hodnot tvrdosti HV5. Hodnoty tvrdosti základního materiálu jsou mírně nižší než v případě austenitické oceli, což odpovídá normou daným požadavkům na tyto oceli. V porovnání se vzorky austenitické oceli však tvrdost výrazně roste v tepelně ovlivněné oblasti a svých maximálních hodnot nabývá ve svarovém kovu. U vzorku LF2 se opět nachází svarová vada (pór), která pravděpodobně ovlivnila měření tvrdosti v jejím blízkém okolí, viz obr. 84. Na základě naměřených hodnot lze pozorovat, že se zvyšujícími se parametry svařování mírně rostou i hodnoty tvrdosti ve svarovém kovu. U vzorku LF1 s nejnižšími parametry byla maximální naměřená hodnota 155 HV5, zatímco u vzorku LF3 s nejvyššími parametry svařování hodnota 162 HV5. Dále je možné pozorovat, že u vzorku LF1 s nejnižší rychlostí svařování při nejmenším výkonu, začínají hodnoty tvrdosti narůstat pozvolněji a ve větší vzdálenosti od svaru, než v případě vzorku LF3 s nejvyšší rychlostí při nejvyšším výkonu, kde jsou hodnoty konstantní a nízké, ve velké blízkosti svaru a pak velmi strmě narůstají, viz obr. 85.



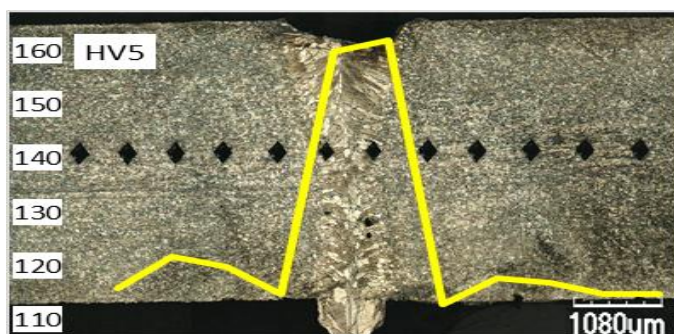
Obr. 82 Mikrotvrdość vzorku LA3



Obr. 83 Mikrotvrdość vzorku LF1



Obr. 84 Mikrotvrdość vzorku LF2



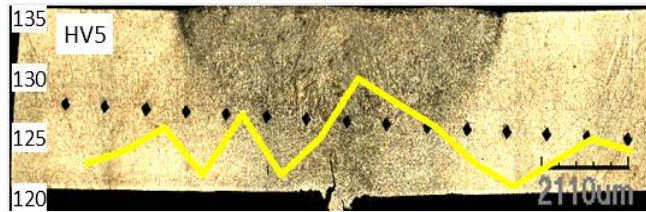
Obr. 85 Mikrotvrdość vzorku LF3

Na obr. 86 je fotografie vyhodnocení vzorku PA1 proložená grafem naměřených hodnot tvrdosti HV5. Tyto hodnoty mají přibližně rostoucí tendenci směrem od základního materiálu (122 HV5) ke středu svaru kde nabývají hodnot 130 HV5. Toto zvýšení tvrdosti je však možné považovat za relativně malé a kolísání hodnot v přechodové oblasti jedné strany svaru můžeme považovat za způsobené nepřesností měření.

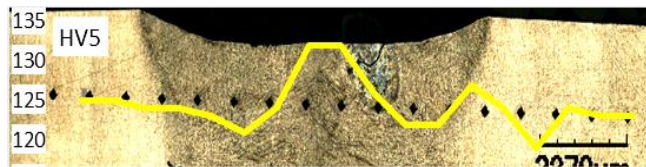
Na obr. 87 a 88 jsou fotografie vyhodnocení vzorku PA2 a PA3 proložené grafy naměřených hodnot tvrdosti HV5. Oba svary mají podobné vlastnosti jako svar PA1. Hodnoty tvrdosti se pohybují v rozmezí 120 – 134 HV5. U těchto svarů je možné pozorovat, že hodnoty tvrdosti mají konstantní, místy až lehce klesající průběh od základního materiálu až do svarového kovu. Až v místě osy svaru hodnoty tvrdosti mírně rostou.

Na obr. 89 je fotografie vyhodnocení vzorku PF1 proložená grafem naměřených hodnot tvrdosti HV5. Hodnota tvrdosti okrajových bodů je rovna přibližně 120 HV5. Je pravděpodobné, že z důvodu velmi široké tepelně ovlivněné oblasti a nedostatečného rozsahu měření, se tyto body nenacházejí v oblasti, která je tepelně zcela neovlivněna. V tepelně ovlivněné oblasti hodnota tvrdosti strmě roste a směrem k svarovému kovu si udržuje konstantní charakter s hodnotou tvrdosti přibližně 150 HV5. Konstantní průběh tvrdosti pokračuje při stejných hodnotách v celém průřezu svarového kovu.

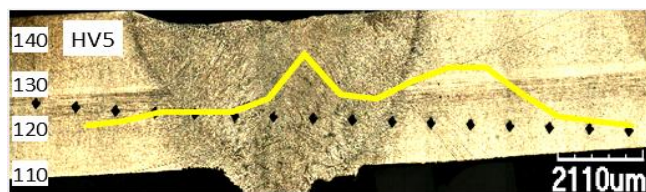
Na obr. 90 a 91 jsou fotografie vyhodnocení vzorku PF2 a PF3 proložené grafy naměřených hodnot tvrdosti HV5. Stejně jako u vzorku PF1, u těchto dvou není jistota, zdali okrajové vtisky nejsou součástí materiálu, který byl tepelně ovlivněn. Tyto hodnoty jsou přibližně 115 HV5. Nízké hodnoty tvrdosti okolo 110 HV5 na jedné straně vzorku PF3 jsou pravděpodobně způsobeny blízkostí vtisků ke značení metalografického vzorku, což výrazně ovlivnilo měření. Od okrajových vtisků směrem do středu svaru hodnoty tvrdosti strmě rostou a v tepelně ovlivněné oblasti dosahují svých maximálních hodnot přes 160 HV5. Za hranicí tepelně ovlivněné oblasti směrem ke svarovému kovu hodnoty tvrdosti mírně klesají k hranici 140 HV5.



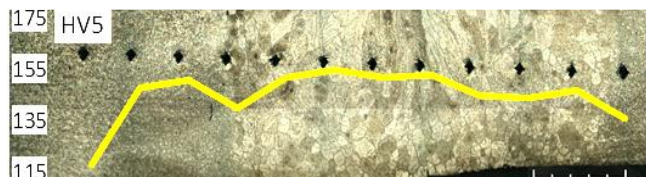
Obr. 86 Mikrotvrdot vzorku PA1



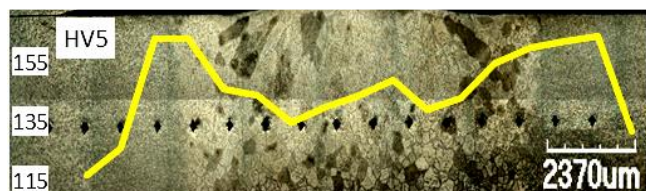
Obr. 87 Mikrotvrdot vzorku PA2



Obr. 88 Mikrotvrdot vzorku PA3



Obr. 89 Mikrotvrdot vzorku PF1



Obr. 90 Mikrotvrdot vzorku PF2



Obr. 91 Mikrotvrdot vzorku PF3

### 3.5 Tahová zkouška

Tato zkouška byla provedena na ústavu strojírenské technologie na hydraulickém zkušebním stroji ZDH40 se jmenovitou silou zatížení vzorku 400 kN. Viz obr. 92. Stroj disponuje řízenou rychlostí zatěžování a programovým zpracováním zkoušek. Tento stroj je vybaven vestavěným inkrementálním délkovým snímačem polohy s rozlišením 0,01 mm a dále také snímačem síly připojeném k řídicí jednotce EDC 60. Toto zařízení je konstruováno přímo pro aplikace řízení zkušebních strojů a je velmi přesné.



Technické parametry zkušebního stroje ZD40:

- Výrobce: HBM (SRN)
- Měřící rozsah:  $8 \div 400$  kN
- Chyba měření síly:  $1/100$  j.m, rozsahu síly
- Rozsah měření dráhy:  $0 \div 280$  mm
- Chyba měření dráhy:  $\pm 0,01$  mm,
- Inkrementální vstup pro napojení snímače dráhy
- Sériové rozhraní RS 232

Obr. 92 Hydraulický zkušební stroj ZD40

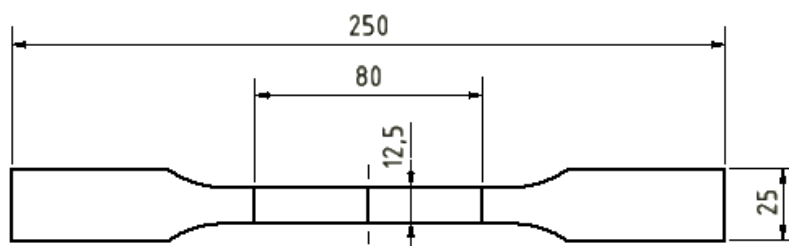


Obr. 93 Průběh tahové zkoušky

Vyhodnocení naměřených hodnot proběhlo na počítači vybaveném programem M-TEST 1.7. Tento program je určen pro zpracování dat s následnými výstupy v grafické podobě i v podobě souborů naměřených dat. Dále je tento software schopen na základě zadaných dat v podobě geometrie vzorku vyhodnotit mez pevnosti, mez kluzu a tažnost. V průběhu celého experimentu jsou také zaznamenávány hodnoty času, tedy délka trvání experimentu, maximální síla a přesná rychlost zatěžování. V případě zkoušek vzorků náležící této práci byla nastavena rychlost zatěžování vzorků na 10 MPa/s. Průběh tahové zkoušky je zobrazen na obr. 93.

Zkušební vzorky pro tahovou zkoušku byly připraveny za pomoci laserového řezání ze všech svařených vzorků. Z každého vzorku svařeného za pomoci laseru byly vyřezány tři zkušební vzorky pro tahovou zkoušku. Jelikož vzorků svařených plazmou se u většiny nepodařilo vytvořit svar dostatečně kvalitní po celé jeho délce, byl z každého připraven pouze jeden zkušební vzorek pro tahovou zkoušku, s výjimkou vzorku PF2, kde se podařilo vyhotovit dva zkušební vzorky pro tahovou zkoušku.

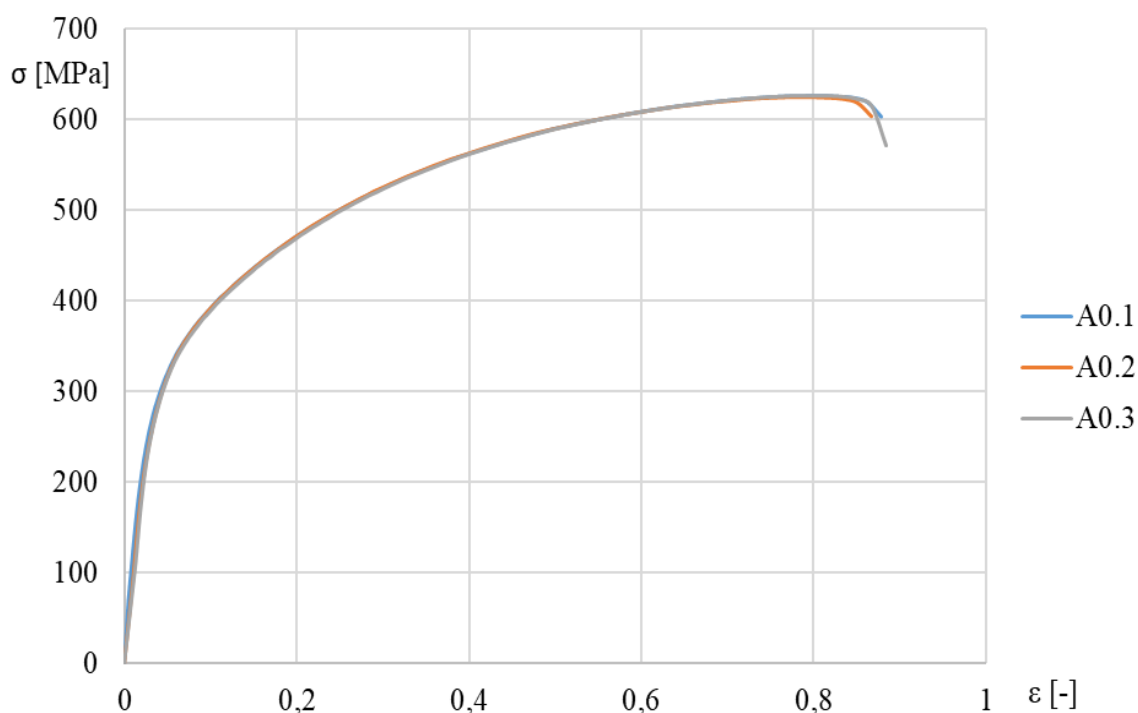
Celková délka vzorku je 250 mm, přičemž délka oblasti, na které byla vyhodnocováno prodloužení je 80 mm. Šířka této oblasti je 12,5 mm. Šířka ploch pro upínání je 25 mm. Tvar vzorku je znázorněn na obr. 94.



Obr. 94 Zkušební vzorek pro tahovou zkoušku

Pro porovnání zkoušek provedených na vzorcích se svary byly pro oba materiály provedeny i zkoušky na vzorcích vyřezaných z jednoho kusu materiálu bez svařování, z totožných tabulí plechu jako byly vytvořeny polotovary pro vzorky pro svařování.

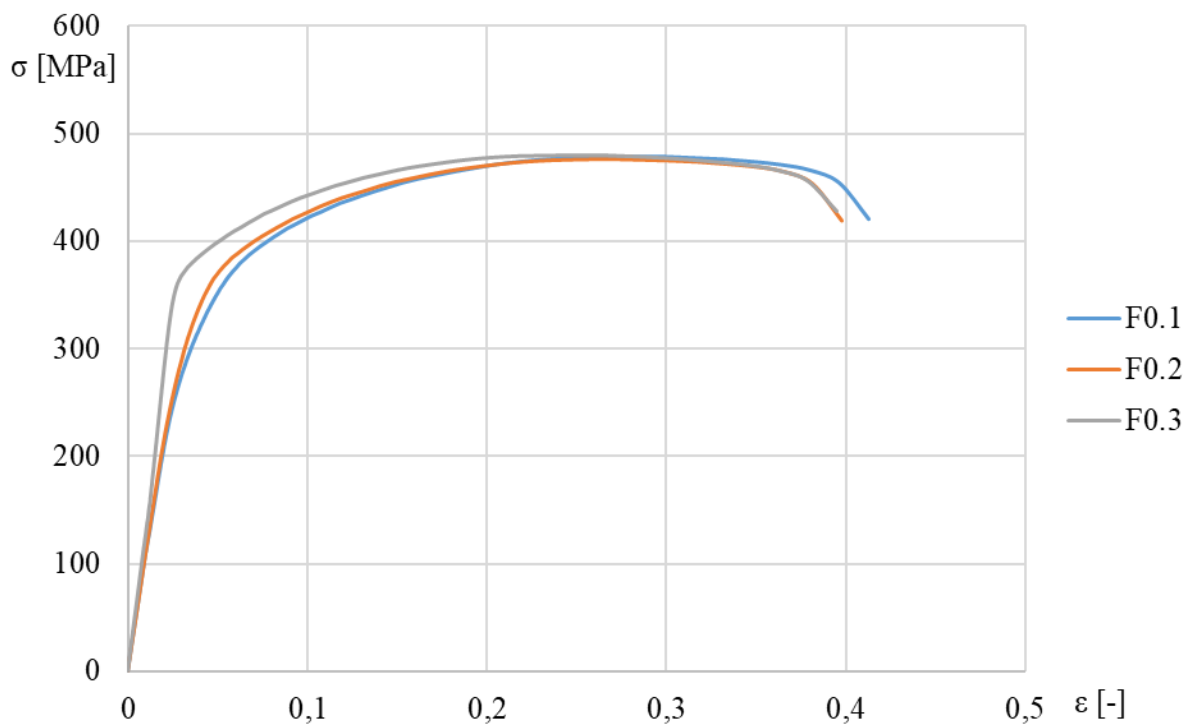
Na obr. 95 a obr. 97 jsou smluvní tahové diagramy porovnávacích vzorků pro obě oceli s označením A0 a F0. Pro obě oceli byly testovány tři vzorky. U vzorků vytvořených z austenitické oceli je možné pozorovat, že křivky jsou prakticky totožné. Změřené pevnostní parametry materiálu jako jsou mez pevnosti a kluzu odpovídají hodnotám stanovených normou i hodnotám deklarovaným dodavatelem materiálu v materiálovém listu. U feritické oceli je možné pozorovat, že pro jeden vzorek se křivka liší v oblasti meze kluzu. Tato výchylka je pravděpodobně způsobena faktem, že vzorky pro porovnávací tahové zkoušky materiálu byly vyrobeny s rozdílnými rozměry, konkrétně s dvojnásobnou šířkou zkušební oblasti, než vzorky se svary. Tyto vzorky měly tedy i širší část, za kterou byly upínány. Dále potom vlivem nedokonalého stavu čelistí trhacího stroje docházelo k nerovnoměrnému upevnění širších vzorků do čelistí, což vedlo k ovlivnění tahového napětí přidavným ohybem, který pravděpodobně ovlivnil výsledný tvar křivek tahového diagramu. Vzorek PF3 demonstrující tento problém je zobrazen na obr. 96. Na základě tvaru vzorků po testu, jejichž fotografie se nacházejí v příloze 3, lze předpokládat, že tímto faktorem byly ovlivněny všechny vzorky austenitické struktury a vzorky F0.1 a F0.2 feritické oceli. V příloze 3 jsou také snímky lomových ploch vzorků, u kterých došlo k porušení ve svaru nebo v tepelně ovlivněné oblasti.



Obr. 95 Smluvní tahový diagram porovnávacích vzorků austenitické oceli 1.4301

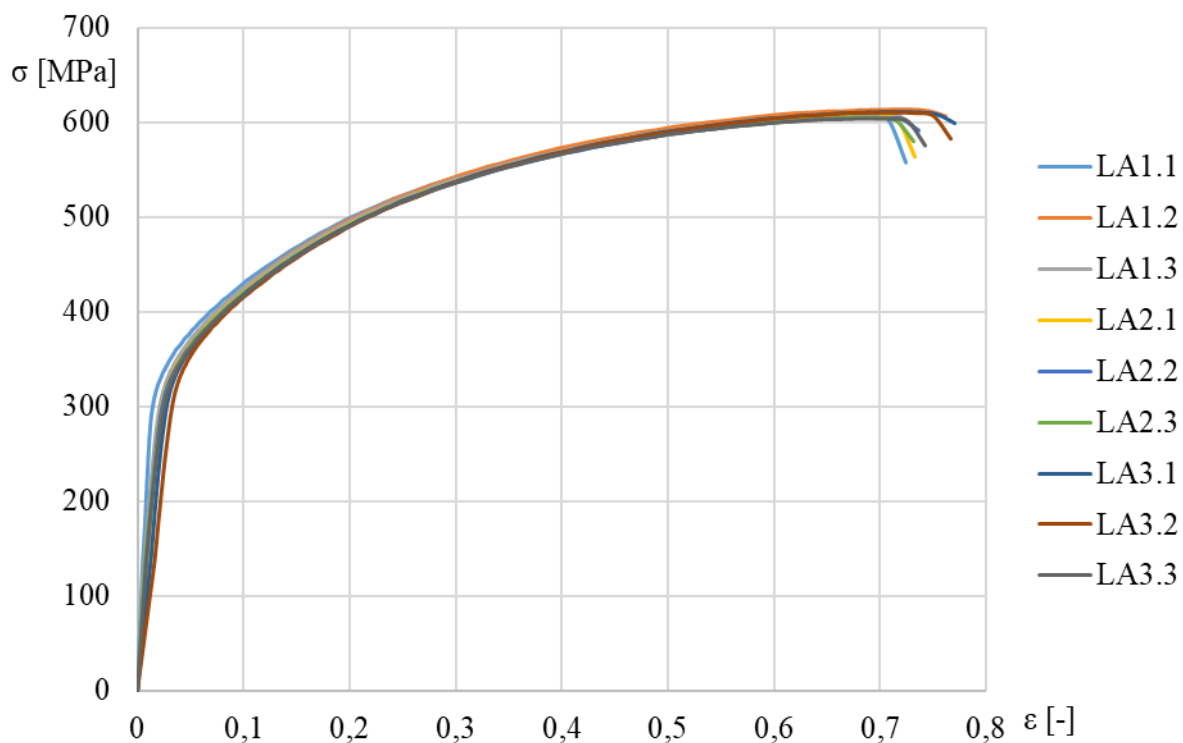


Obr. 96 Vzorek s místem porušení mimo zkoumanou oblast

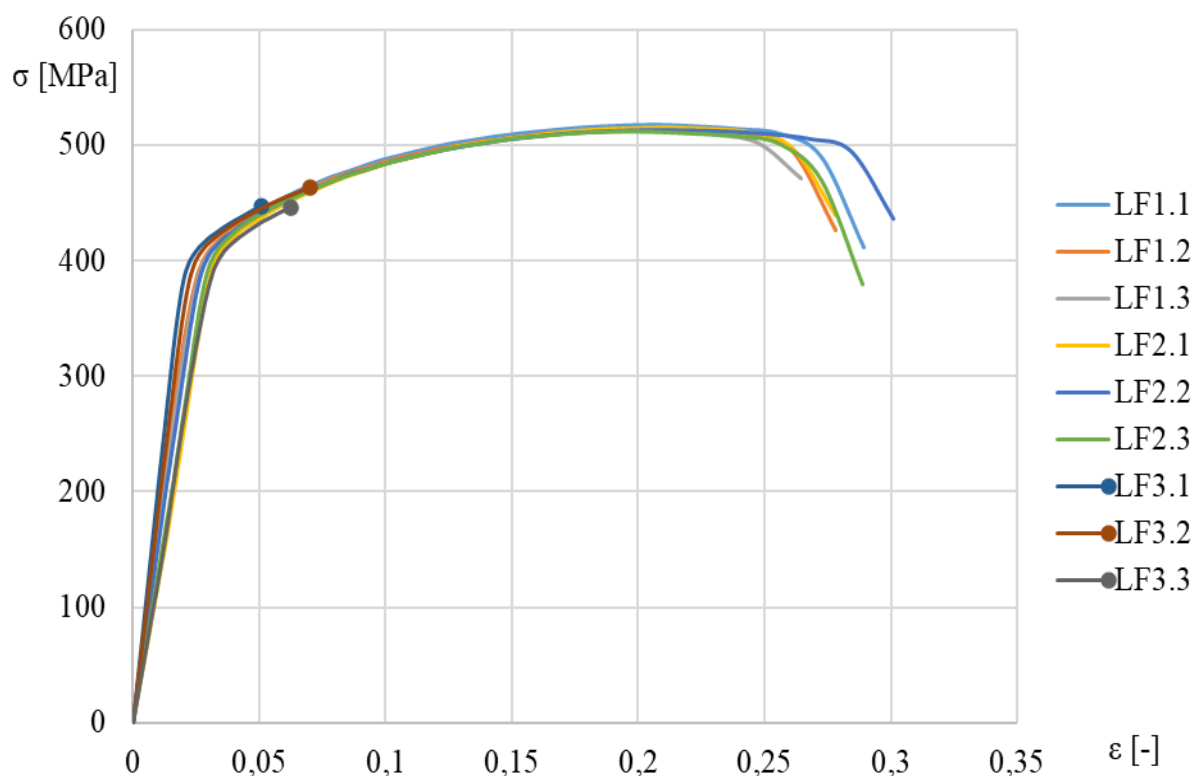


Obr. 97 Smluvní tahové diagramy porovnávacích vzorků feritické oceli 1.4016

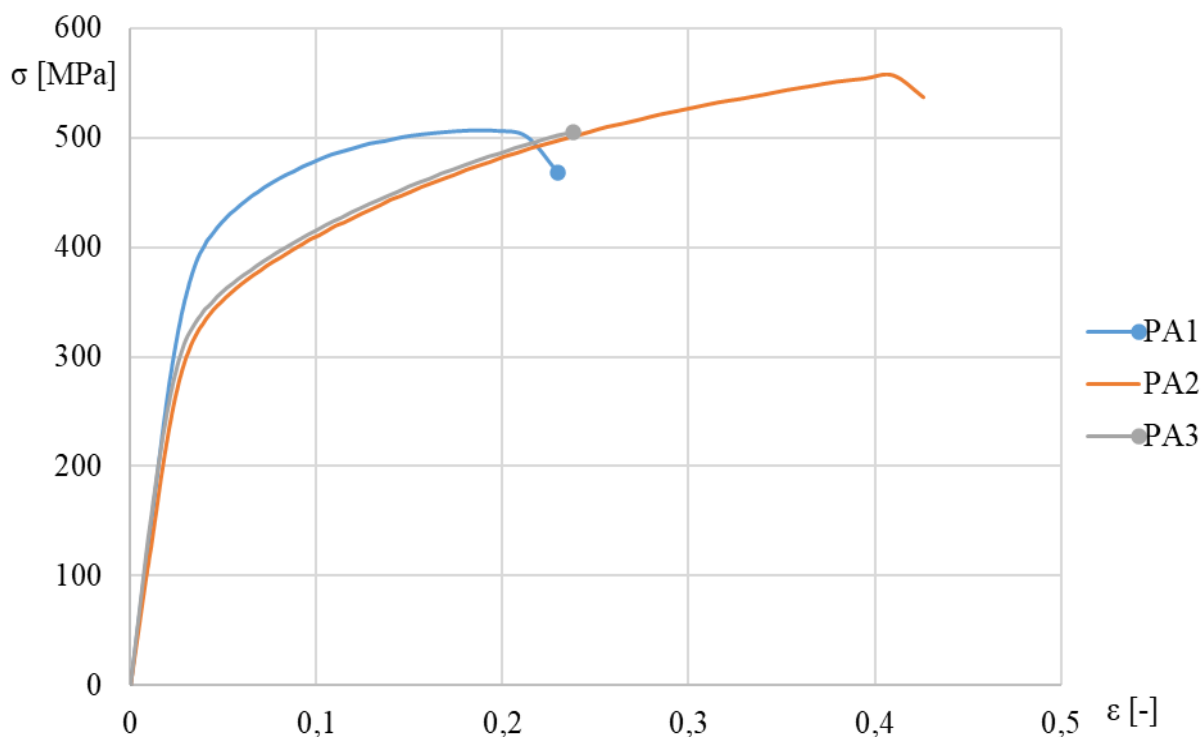
Na obr. 98 se nachází smluvní tahový diagram vzorků z austenitické oceli svařených laserem. Pro každý svar byly vytvořeny a testovány tři vzorky. U všech vzorků došlo k porušení v místě mimo svar i tepelně ovlivněnou oblast. Pevnostními parametry i tvarem křivky tyto diagramy odpovídají porovnávacím vzorkům



Obr. 98 Smluvní tahové diagramy vzorků austenitické oceli 1.4301 svařených laserem



Obr. 99 Smluvní tahové diagramy vzorků austenitické oceli 1.4016 svařených laserem



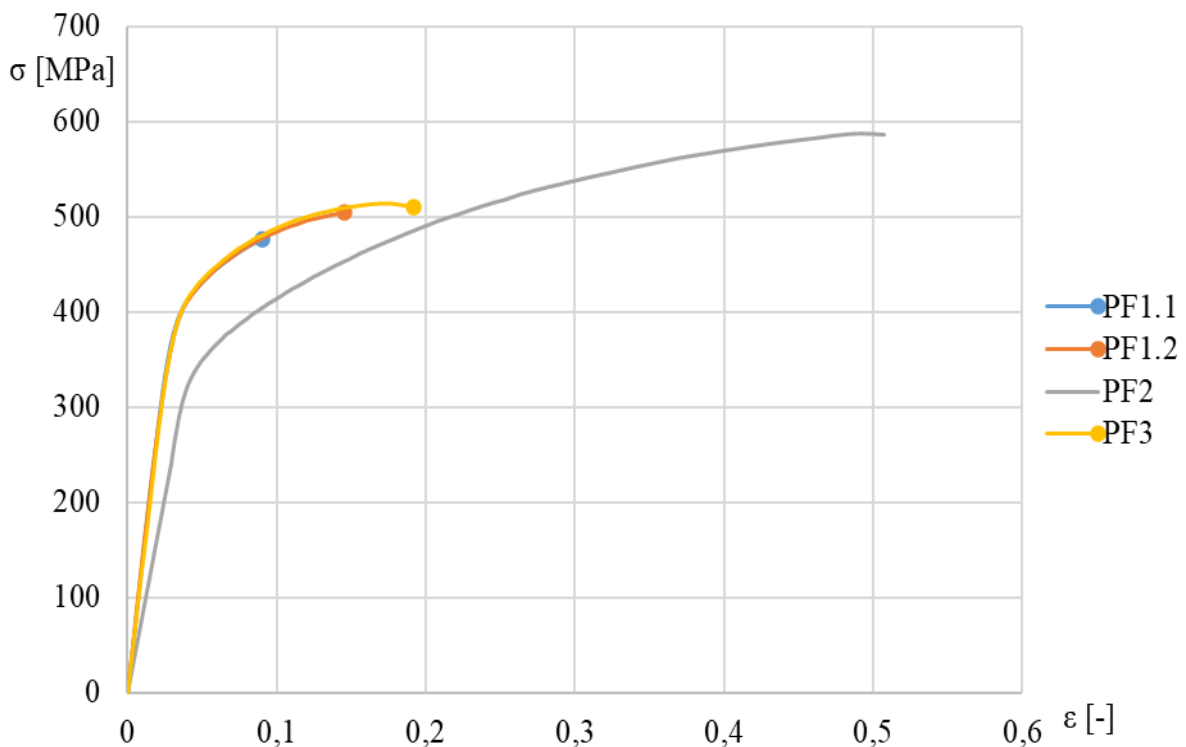
Obr. 100 Smluvní tahové diagramy vzorků austenitické oceli 1.4301 svařených laserem

Na obr. 99 je možné pozorovat smluvní tahové diagramy vzorků feritické oceli svařených laserem. Pro každý svar byly vytvořeny a vyhodnoceny tři vzorky. U svarů LF1 a LF2 došlo k porušení u všech vzorků mimo svar i tepelně ovlivněnou oblast.

Pevnostní parametry těchto vzorků neodpovídají pevnostním parametrům porovnávacích vzorků pro daný materiál. Toto je způsobeno faktem, že k porušení materiálu došlo u všech vzorků s výjimkou vzorků LF3, velice blízko okraji vyhodnocované oblasti vzorku, což vedlo ke skutečnosti, že část plastické deformace se odehrála mimo měřený úsek vzorku, což vedlo k výraznému ovlivnění vyhodnocovaných výsledků. U vzorku LF3 došlo k jeho porušení v místě svaru. K porušení došlo u všech třech vzorků přibližně při napětí 450 MPa.

Na obr. 100 se nachází smluvní tahové diagramy vzorků austenitické oceli svařovaných plazmou. U svaru PA1 došlo k porušení vzorku přímo ve svaru, což bylo pravděpodobně způsobeno neprůvarem svaru až ke kořenu. U vzorků PA2 a PA3 došlo k porušení v tepelně ovlivněné oblasti. V případě vzorků PA1 a PA3 došlo k porušení materiálu při napětí 500 MPa. V případě vzorku PA2 bylo dosaženo meze pevnosti přibližně 550 MPa.

Na obr. 101 se nachází smluvní tahové diagramy vzorků feritické oceli svařovaných plazmou. Pro svar PF1 byly vytvořeny dva vzorky, pro svary PF2 a PF3 po jednom vzorku. V případě svaru PF1 došlo k porušení obou vzorků nejspíše vlivem neprovaření svaru až ke kořenu. U obou vzorků došlo k porušení při hodnotě zatížení přibližně 500 MPa. V případě vzorků PF2 a PF3 došlo k porušení v oblasti základního materiálu. U vzorku PF2 došlo k jeho porušení na okraji vyhodnocované oblasti, v případě vzorku PF3 mimo tuto oblast. Což pravděpodobně vedlo k ovlivnění výsledků těchto měření. Naměřené meze pevnosti byly v případě vzorku PF2 přibližně 600 MPa, v případě vzorku PF3 500 MPa.



Obr. 101 Smluvní tahové diagramy vzorků austenitické oceli 1.4301 svařených laserem



### 3.6 Zhodnocení výsledků zkoušek

V případě vyhodnocení makrostruktury svarů svařených laserem bylo potvrzeno očekávání, že s rostoucími parametry vstupujícími do procesu svařování klesá šířka svaru. Dále bylo zjištěno, že svary feritické korozivzdorné oceli jsou obecně užší při daných parametrech, než vzorky feritické korozivzdorné oceli. V případě austenitické korozivzdorné oceli je však hranice mezi svarovým kovem a základním materiálem velmi úzká, zatímco v případě feritické oceli, se v blízkosti svarů nacházela široká tepelně ovlivněná oblast. U jednoho vzorku austenitické oceli a jednoho vzorku feritické oceli byly odhaleny vady svaru podobě pórovitosti.

Vyhodnocení makrostruktury svarů svařených plazmovým svařováním byly odhaleny u několika vzorků nedostatečně provařené kořeny svarů. U zbylých svarů byly v případě austenitické oceli pozorovány velké propady návarových ploch svarů a přesun velkého množství materiálu směrem ke kořeni a pod něj. Toto bylo pravděpodobně způsobeno nižší tepelnou vodivostí tohoto materiálu a dynamickým účinkem plazmatu. U vzorků feritické oceli bylo stejně jako u svařování laserem pozorováno velmi významné zhrubnutí zrna ve svarovém kovu postupně přecházející v dobře rozlišitelnou tepelně ovlivněnou oblast.

Při vyhodnocení mikrostruktury svarů vytvořených laserovým svařováním bylo u austenitické oceli pozorováno velmi ostré rozhraní mezi svarovým kovem a základním materiálem. Struktura základního materiálu se změnila z polyedrické do podoby podlouhlých zrn, orientovaných ve směru teplotního gradientu do středu svaru. Ve svarovém kovu byla také pozorována dendritická struktura, tvořená pravděpodobně delta feritem. V případě feritické oceli mají velká zrna podlouhlý tvar a jsou orientována ve směru teplotního gradientu směrem do středu svaru. U všech svarů je pozorovatelná hrubozrnná, jemnozrnná a přechodová tepelně ovlivněná oblast. V případě plazmového svařování byl u austenitické oceli pozorován pozvolnější přechod mezi základním materiálem a svarovým kovem. Stejně jako u laserových svarů byla ve svarovém kovu pozorována dendritická struktura, tvořená delta feritem.

Při vyhodnocení mikrotvrdosti bylo u austenitické oceli pozorováno jen velmi malé navýšení její hodnoty v blízkém okolí svaru a ve svarovém kovu. V případě feritické oceli byl u svarů vytvořených laserem pozorován vysoký nárůst tvrdosti v tepelně ovlivněné oblasti, dosahující svých nejvyšších hodnot ve svarovém kovu. V případě svarů feritické oceli vytvořených plazmovým svařováním byl také pozorován prudký nárůst tvrdosti v tepelně ovlivněné oblasti, který je však následován mírným poklesem tvrdosti ve svarovém kovu.

Při vyhodnocení pevnostních parametrů vzorků tahovou zkouškou došlo u všech vzorků austenitické oceli svařených laserem k porušení mimo svar nebo tepelně ovlivněnou oblast. V případě feritické oceli došlo u dvou svarů s nižšími parametry výkonu a rychlosti k porušení mimo svar nebo tepelně ovlivněnou oblast, v případě svaru zhotoveného s využitím nejvyššího výkonu při nejvyšší rychlosti svařování k porušení ve svaru.

V případě vyhodnocení svarů vytvořených plazmovým svařováním došlo u austenitické oceli k porušení vzorků v jednom případě ve svaru a ve dvou případech v tepelně ovlivněné oblasti. Je pravděpodobné, že k porušení vzorku ve svaru došlo vlivem jeho nedokonalého provaření až ke kořenu. V případě feritické oceli došlo ve dvou případech k porušení mimo svar nebo tepelně ovlivněnou oblast. V jednom případě k porušení ve svaru.

## 4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Srovnání technologií je provedeno z hlediska pořizovací ceny zařízení, nákladů na provoz zařízení, režii a pořizovací ceny svařovaných materiálů. Pořizovací cena vláknového laseru vhodného pro aplikace podobné rozměrům zkoušených vzorků včetně nutného příslušenství je přibližně 10 mil. Kč. Při předpokládané životnosti stroje 5 let a dvousměnném provozu při 250 pracovních dnech ročně, je tedy nutné počítat, mimo ostatní náklady, s náklady na pořízení stroje na hodinu provozu 500 Kč. Při pořizovací ceně plazmové svařovací stanice včetně nutného příslušenství je přibližně 2 mil. Kč. Při obdobném přepočtu jako u vláknového laseru je pořizovací cena vztahovaná na hodinu provozu stroje 100 Kč. Předpokládanými náklady na provoz stroje jako jsou plat operátora, energie, technické plyny apod. je v případě laseru 400 Kč/hod. V případě plazmového svařování je tato hodnota navýšena na 500 Kč/hod z důvodu předpokládané násobně vyšší spotřeby procesních plynů než v případě laseru. Režijní náklady jsou předpokládány na 100% nákladů provozních a hodinové sazby stroje dle odpisu. Výsledná hodinová sazba je poté v případě plazmového svařování 1200 Kč a v případě laseru je hodnota 1,5x vyšší, tedy 1800 Kč/hod. Tyto hodnoty jsou pouze orientační a jejich přehled je znázorněn v tab. 5.

Cena plechu o tloušťce 3 mm a rozměrech 1000x2000 mm je u feritické korozivzdorné oceli 3388 Kč a u feritické oceli 3836 Kč bez DPH. Cena austenitické oceli je tedy v tomto případě přibližně 1,13x vyšší než u feritické oceli.

Tab. 5 Náklady na hodinu provozu při svařování laserem a plazmovém svařování

Technologie	Pořizovací cena [Kč]	Hodinová sazba dle odpisu [Kč]	Provozní náklady [Kč]	Režie [Kč]	Hodinová sazba [Kč]
Laser	10 000 000	500	400	900	1800
Plazma	2 000 000	100	500	600	1200

Jak bylo v této práci dokázáno, pro určité aplikace je z hlediska pevnostních parametrů svarů možné nahradit austenitickou ocel feritickou, při zachování požadovaných vlastností, v případě použití vhodných technologií s vysokou koncentrací tepelného výkonu a malým množstvím vneseného tepla, jako je např. technologie svařování laserem.

Předpokladem pro rentabilitu procesu záměny austenitické oceli za feritickou při zavedení nových technologií tak, aby tato záměna byla možná, je dobrá optimalizace parametrů svařování a celého procesu. Je možné také předpokládat, že tato záměna bude ekonomicky výhodná pouze v případě aplikace ve velkosériové a hromadné výrobě, nikoli kusové výrobě.

## 5 ZÁVĚRY

Práce je zaměřena na porovnání technologií svařování laserem a plazmou pro svařování austenitické a feritické korozivzdorné oceli. Za tímto účelem byly oběma technologiemi vytvořeny čtyři sady vzorků, jedna pro každý materiál a technologii. Každý vzorek dané sady byl svařen s proměnnými parametry. V případě svařování laserem byly proměnnými parametry výkon laseru a rychlost svařování, v případě plazmového svařování se jednalo o parametry proudu a průtokového množství plazmového plynu.

Z hlediska mechanických a strukturních vlastností svařených vzorků bylo zjištěno, že nejvýhodnější technologií je svařování laserem, což je z největší části zapříčiněno řádově nižším množstvím vneseného tepla při využití této technologie. Z pohledu mechanických vlastností se při využití této technologie ukázaly i svary feritické oceli jako schopné odolávat mechanickému zatížení srovnatelnému se svary austenitické oceli, s výjimkou svaru, u kterého byly použity nejvyšší parametry svařovací rychlosti a výkonu. Z tohoto důvodu je nutné dbát dobré optimalizace svařovacího procesu při implementaci do praxe.

V případě plazmového svařování se prokázalo výrazně vyšší strukturní ovlivnění svařovaného materiálu, způsobené větším množstvím vneseného tepla, což se následně projevilo i na mechanických vlastnostech svarů. V tomto případě došlo k porušení vzorků ve svaru i u austenitické oceli, což bylo v jednom případě zapříčiněno neprůvarem a ve zbylých případech změnou geometrie průřezu vzorku vlivem velkého množství vneseného tepla. Svary feritické oceli v tomto případě obstály, s výjimkou svaru, kde došlo k nedokonalému provaření až ke kořenu.

Na základě těchto zjištění je možné konstatovat, že při využití technologií s vysokou koncentrací tepelného výkonu, jako svařování laserem, nebo plazmové svařování, je možné při využití vhodných svařovacích parametrů pro danou aplikaci, vytvářet svary konstrukcí z feritické korozivzdorné oceli, které jsou svou kvalitou a mechanickými vlastnostmi srovnatelné se svařovanými konstrukcemi vytvořenými z austenitické korozivzdorné oceli.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [39]

1. ZAJÍC, Jiří. *Využití plazmového oblouku v technické praxi* [online]. Brno, 2016 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z:  
[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=128069](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=128069)  
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.
2. DULEY, W. W. *Laser welding*. New York: Wiley, c1999. ISBN ISBN 0-471-24679-4.
3. BENKO B., FODEREK P., KOSEČEK M., BIELAK R.: *Laserové technológie*. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej technickej univerzity, 2000. Edícia monografií. ISBN isbn80-227-1425-9.
4. AMBROŽ O., KANDUS B., KUBÍČEK J.: *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-85771-81-0.
5. KANNATEY-ASIBU, E. *Principles of laser materials processing*. Hoboken, N.J.: Wiley, c2009. Wiley series on processing of engineering materials. ISBN 978-0-470-17798-3.
6. ZLESÁK, Jakub. *Trendy vývoje laserové technologie* [online]. Brno, 2008 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z:  
[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=6067](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=6067)  
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Karel Osička
7. ROZSYPAL, Oldřich, Bc. *Posouzení vlastností heterogenních tupých svarů metodami svařování laserem a svazkem elektronů* [online]. Brno, 2015 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z:  
[https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/40504/2015\\_DP\\_Rozsypal\\_Oldrich\\_133793\\_OPUS.pdf?sequence=-1&isAllowed=y](https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/40504/2015_DP_Rozsypal_Oldrich_133793_OPUS.pdf?sequence=-1&isAllowed=y)  
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
8. KŘIVAN, Miloš. *Laserové svařování ocelí* [online]. Brno, 2011 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z:  
[https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/17090/2011\\_BP\\_Krivan\\_Milos\\_115748.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/17090/2011_BP_Krivan_Milos_115748.pdf?sequence=1&isAllowed=y)  
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Jaroslav Kubíček.
9. BERKA, Roman, Bc. *Svařování otěruvzdorných ocelí laserovým svazkem* [online]. Brno, 2012 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z:  
[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=53472](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=53472)  
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

10. FÜRbacher, Ivan, Ivan FÜRbacher, Karel MACEK a Josef STEIDL. *Lexikon technických materiálů se zahraničními ekvivalenty: aktuální stav listopad - včetně 1. aktualizace* [online]. Praha: Verlag Dashöfer, 1998 [cit. 2018-05-20]. ISBN 80-86229-02-5.
11. *Nerezová ocel 1.4016* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://www.prodej-nerezu.cz/index.php?act=a&cat=4&art=17>
12. *Nerezová ocel 1.4301* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://www.prodej-nerezu.cz/index.php?act=a&cat=4&art=16>
13. *Tig welding* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: [https://www.google.cz/search?q=tig+welding&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjNssGukZTbAhVKKlAKHXa1DiQQ\\_AUICigB&biw=1536&bih=734#imgrc=seH5gN7-5p1xAM:](https://www.google.cz/search?q=tig+welding&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjNssGukZTbAhVKKlAKHXa1DiQQ_AUICigB&biw=1536&bih=734#imgrc=seH5gN7-5p1xAM:)
14. *Schaefflerův diagram* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: [https://www.google.cz/search?q=schaeffler%C5%AFv+diagram&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiEi9LxkZTbAhVGZFAKHW\\_pBBoQ\\_AUICigB&biw=1536&bih=734#imgrc=UI1JakxbBD5QgM:](https://www.google.cz/search?q=schaeffler%C5%AFv+diagram&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiEi9LxkZTbAhVGZFAKHW_pBBoQ_AUICigB&biw=1536&bih=734#imgrc=UI1JakxbBD5QgM:)
15. *Welding methods* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://www.vesindia.org/blog/laser-welding/laser-welding-methods.aspx>
16. *Laser welding plastic parts* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://www.assemblymag.com/articles/92655-laser-welding-plastic-parts>
17. *Plasma arc welding process* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://www.profusiononline.com/welding/plasma.htm>
18. *Lasers and stimulated emission* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://education.pasco.com/PhysicsNGSS/BookInd-808.html>
19. *Základní princip laseru a jejich dělení* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
20. *Laserové řezání (laser cutting)* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129>
21. *YAG laser machining of materials* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://www.aml.engineering.columbia.edu/ntm/level1/ch05/html/11c05s07.html>
22. *Princip vláknového fiber laseru* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://www.elektroprumysl.cz/technologicke-novinky/princip-vlaknoveho-fiber-laseru>

23. *Trumpf diode lasers* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: [https://www.trumpf.com/en\\_IN/products/lasers/diode-lasers/](https://www.trumpf.com/en_IN/products/lasers/diode-lasers/)
24. *Laser welding fundamentals* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://www.laserstoday.com/2016/07/laser-welding-fundamentals/>
25. *Scanners handle high-powered welding* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: [https://www.photonics.com/a18388/Scanners\\_Handle\\_High-Power\\_Welding](https://www.photonics.com/a18388/Scanners_Handle_High-Power_Welding)
26. *Bezpečnost laseru třídy 1 až 4* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/bezpecnost-laseru-tridy-1-az-4>
27. *Precitec group - Welding head YW30* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://www.precitec.de/en/products/joining-technology/processing-heads/yw30/#tab3>
28. KUNCIPÁL, Josef, Václav PILOUS a Jiří DUNOVSKÝ. *Nové technologie ve svařování*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1984.
29. MATEJKA, Dušan a Bernard BENKO. *Plazmové striekanie kovových a keramických práškov*. Bratislava: Alfa, 1988. Edícia strojárскеj literatúry (Alfa).
30. BEDNÁŘ, Šimon. *Využití plazmového oblouku v technické praxi*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2014.
31. *Plasma welding* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://www.ionix.fi/en/technologies/plasma-processing/plasma-welding/>
32. *Problematika hodnocení svarových spojů* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/problematika-hodnoceni-svarovych-spoju/>
33. *Proses pembuatan baja karbon* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://tsffarmasiunsoed2012.wordpress.com/2012/05/24/proses-pembuatan-baja-karbon/>
34. *Effect of Specimen Geometry on Tensile Testing Results* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://www.admet.com/effect-specimen-geometry-tensile-testing-results/>
35. *Kontrola a měření, technologické zkoušky* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/3113655/>
36. *Tvrдость (mikrotvrдость) - významná mechanická vlastnost materiálu* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/tvrdest-mikrotvrdest>

37. *PPC 250 PTM - plazmový navařovací automat* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://prosvareni.cz/cz-detail-2705-ppc-250-ptm-plazmovy-navarovaci-automat.html>
38. *Laserový konfokální řádkovací mikroskop* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/laserovy-konfokalni-radkovaci-mikroskop.html>
39. CITACE PRO. *Generátor citací* [online]. 2013 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A50	Tažnost	[%]
Cr <sub>E</sub>	Chromový ekvivalent	[%]
Cr <sub>EA</sub>	Chromový ekvivalent austenitické oceli	[%]
Cr <sub>EF</sub>	Chromový ekvivalent feritické oceli	[%]
d	Úhlopříčka vtisku jehlanu při měření tvrdosti dle Vickerse	[mm]
E <sub>1</sub>	Energie elektronu na základní energetické hladině	[eV]
E <sub>2</sub>	Energie elektronu na základní energetické hladině	[eV]
E <sub>2'</sub>	Energie elektronu na vyšší energetické hladině	[eV]
F	Síla	[N]
HB	Tvrдость dle Brinella	[HB]
HV5	Mikrotvrдость dle Vickerse při zatížení 5 kg	[HV5]
I	Proud	[A]
KV	Nárazová práce	[J]
Ni <sub>E</sub>	Niklový ekvivalent	[%]
Ni <sub>EA</sub>	Niklový ekvivalent austenitické oceli	[%]
Ni <sub>EF</sub>	Niklový ekvivalent feritické oceli	[%]
P	Výkon laseru	[W]
Q <sub>SL</sub>	Vnesené teplo při svařování laserem	[kJ·mm <sup>-1</sup> ]
Q <sub>SF</sub>	Vnesené teplo při svařování laserem	[kJ·mm <sup>-1</sup> ]
R <sub>m</sub>	Mez pevnosti	[MPa]
R <sub>p0,2</sub>	Smluvní mez kluzu	[MPa]
U	Napětí	[V]
v <sub>s</sub>	Rychlost svařování	[mm·s <sup>-1</sup> ]
ε	Poměrné prodloužení	[-]
η	Tepelná účinnost	[-]
σ	Smluvní napětí	[MPa]



## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Příkla Svařování metodou TIG/WIG [13] .....	11
Obr. 2 Schaefflerův diagram [14] .....	13
Obr. 3 Keyhole [15] .....	14
Obr. 4 Zaostrění laserového paprsku [16] .....	14
Obr. 5 Plazmový svazek [17] .....	14
Obr. 6 Stimulovaná emise [18] .....	15
Obr. 7 Princip CO <sub>2</sub> laseru [19] .....	16
Obr. 8 Difuzně chlazený laser [20] .....	17
Obr. 9 Princip Nd:YAG laseru [21] .....	17
Obr. 10 Vláknový laser [22] .....	18
Obr. 11 Diodový laser [23] .....	18
Obr. 12 Kondukční a penetrační svařování [24] .....	19
Obr. 13 Vychylování laserového paprsku [25] .....	19
Obr. 14 Přeměny energie laserového paprsku [26] .....	20
Obr. 15 Laserová svařovací hlava [27] .....	21
Obr. 16 Nabuzení neutrálního atomu [1] .....	22
Obr. 17 Energie ionizace atomu [1] .....	22
Obr. 18 Teplota plazmového paprsku [1] .....	23
Obr. 19 Disociace a ionizace dvouatomových plynů [1] .....	23
Obr. 20 Plazmový hořák se závislým svazkem [1] .....	24
Obr. 21 Plazmový hořák se nezávislým paprskem [1] .....	25
Obr. 22 Plazmový hořák se kombinovaným paprskem [1] .....	25
Obr. 23 Svařování plazmou [31] .....	26
Obr. 24 Řez svarem [32] .....	27
Obr. 25 Austenitická struktura [33] .....	27
Obr. 26 Průběh tahové zkoušky [34] .....	28
Obr. 27 Ohybová zkouška [35] .....	28
Obr. 28 Zkouška tvrdosti dle Vickerse [36] .....	29
Obr. 29 Svařovaný vzorek .....	30
Obr. 30 Laserová svařovací hlava Precitec YW30 na robotickém rameni IRB-2400 .....	32
Obr. 31 Svary vytvořené laserem .....	32
Obr. 32 Plazmový svařovací automat PPC 250 PTM [37] .....	33
Obr. 33 Svary austenitické oceli .....	33
Obr. 34 Svary feritické oceli .....	34
Obr. 35 Automatický elektrohydraulický lis Struers Citopress-1 .....	34
Obr. 36 Metalografická leštička Struers Tegramin-20 .....	34
Obr. 37 Makroskopické snímky svarů austenitické oceli vytvořených laserem .....	35
Obr. 38 Makroskopické snímky svarů feritické oceli vytvořených laserem .....	35
Obr. 39 Makroskopické snímky svarů austenitické a feritické oceli vytvořených plazmou .....	36
Obr. 40 Mikroskop Plympus LEXT OLS 3100 [38] .....	37
Obr. 41 Mikrostruktura základního materiálu austenitické oceli .....	37
Obr. 42 Mikrostruktura základního materiálu feritické oceli .....	37
Obr. 43 Detail rozhraní svarového kovu a základního materiálu vzorku LA1 .....	38
Obr. 44 Detail struktury svarového kovu vzorku LA1 .....	38
Obr. 45 Rozhraní svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti vzorku LA1 .....	38
Obr. 46 Detail rozhraní svarového kovu a základního materiálu vzorku LA2 .....	39
Obr. 47 Detail struktury svarového kovu vzorku LA2 .....	39
Obr. 48 Rozhraní svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti vzorku LA2 .....	39

Obr. 49 Detail rozhraní svarového kovu a základního materiálu vzorku LA3 .....	40
Obr. 50 Detail struktury svarového kovu vzorku LA3.....	40
Obr. 51 Rozhraní svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti vzorku LA3 .....	40
Obr. 52 Detail rozhraní svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti vzorku LF1.....	41
Obr. 53 Detail struktury svarového kovu vzorku LF1 .....	41
Obr. 54 Celkový snímek mikrostruktury vzorku LF1 .....	41
Obr. 55 Detail rozhraní svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti vzorku LF2.....	42
Obr. 56 Detail struktury svarového kovu vzorku LF2 .....	42
Obr. 57 Celkový snímek mikrostruktury vzorku LF2.....	42
Obr. 58 Detail rozhraní svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti vzorku LF3.....	43
Obr. 59 Detail struktury svarového kovu vzorku LF3 .....	43
Obr. 60 Celkový snímek mikrostruktury vzorku LF3.....	43
Obr. 61 Detail struktury svarového kovu vzorku PA1 .....	44
Obr. 62 Detail struktury svarového kovu vzorku PA1 .....	44
Obr. 63 Rozhraní svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti vzorku PA1.....	44
Obr. 64 Detail struktury svarového kovu vzorku PA2.....	45
Obr. 65 Detail struktury svarového kovu vzorku PA2.....	45
Obr. 66 Rozhraní svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti vzorku PA2.....	45
Obr. 67 Detail struktury svarového kovu vzorku PA3.....	46
Obr. 68 Detail struktury svarového kovu vzorku PA3.....	46
Obr. 69 Rozhraní svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti vzorku PA3.....	46
Obr. 70 Detail struktury svarového kovu vzorku PF1 .....	47
Obr. 71 Detail neprůvaru kořene svaru vzorku PF1 .....	47
Obr. 72 Rozhraní svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti vzorku PF1 .....	47
Obr. 73 Detail struktury svarového kovu vzorku PF2 .....	48
Obr. 74 Detail kořene svaru vzorku PF2.....	48
Obr. 75 Rozhraní svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti vzorku PF2 .....	48
Obr. 76 Detail struktury svarového kovu vzorku PF3 .....	49
Obr. 77 Detail neprůvaru kořene svaru vzorku PF3.....	49
Obr. 78 Rozhraní svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti vzorku PF3 .....	49
Obr. 79 Tvrdoměr Zwick 2312 .....	50
Obr. 80 Mikrotvrdost vzorku LA1 .....	50
Obr. 81 Mikrotvrdost vzorku LA2 .....	50
Obr. 82 Mikrotvrdost vzorku LA3 .....	51
Obr. 83 Mikrotvrdost vzorku LF1.....	51
Obr. 84 Mikrotvrdost vzorku LF2.....	51
Obr. 85 Mikrotvrdost vzorku LF3.....	51
Obr. 86 Mikrotvrdost vzorku PA1 .....	52
Obr. 87 Mikrotvrdost vzorku PA2 .....	52
Obr. 88 Mikrotvrdost vzorku PA3 .....	52
Obr. 89 Mikrotvrdost vzorku PF1 .....	52
Obr. 90 Mikrotvrdost vzorku PF2.....	52
Obr. 91 Mikrotvrdost vzorku PF3.....	52
Obr. 92 Hydraulický zkušební stroj ZD40.....	53
Obr. 93 Průběh tahové zkoušky .....	53
Obr. 94 Zkušební vzorek pro tahovou zkoušku .....	53
Obr. 95 Smluvní tahový diagram porovnávacích vzorků austenitické oceli 1.4301.....	54
Obr. 96 Vzorek s místem porušení mimo zkoumanou oblast .....	54
Obr. 97 Smluvní tahové diagramy porovnávacích vzorků feritické oceli 1.4016.....	55
Obr. 98 Smluvní tahové diagramy vzorků austenitické oceli 1.4301 svařených laserem.....	55

Obr. 99 Smluvní tahové diagramy vzorků austenitické oceli 1.4301 svařených laserem.....	56
Obr. 100 Smluvní tahové diagramy vzorků austenitické oceli 1.4301 svařených laserem.....	56
Obr. 101 Smluvní tahové diagramy vzorků austenitické oceli 1.4301 svařených laserem.....	57

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Chemické složení a mechanické vlastnosti materiálů vzorků.....	X
Tab. 2 Rozdělení laserů.....	X
Tab. 3 Ionizační energie ochranných plynů .....	X
Tab. 4 Přehled svařovaných vzorků .....	X
Tab. 5 Náklady na hodinu provozu při svařování laserem a plazmovém svařování.....	X

## **SEZNAM PŘÍLOH**

- Příloha 1 Materiálový list oceli 1.4301
- Příloha 2 Materiálový list oceli 1.4016
- Příloha 3 Snímky vzorků tahové zkoušky po testování

# Příloha č. 1 Materiálový list oceli 1.4301



## INSPECTION CERTIFICATE 3.1 DIN EN 10204 3.1

Certificate No. / Zeugnis Nr. / N° du certificat: **403532/001** 1 (01)  
Date / Datum / Date: **06.09.2017**

Delivery address, Empfänger, Lieu de livraison														
Requirements, Anforderungen, Exigences <b>EN 10088-4:2009 AD 2000 W2, W10 &amp; EN 10028-7:2016 ASTM A240/A240M ASME SA-240/SA-240M II A ED. 2015</b>		Our Order No. / Unser Auftrag Nr. / Notre commande n° <b>300445609</b>	Your order, Ihre Bestellung, Votre commande <b>87009066</b>											
Product, Erzeugnisform, Produit <b>COIL, STAINLESS STEEL</b>		Mark of Manufacturer / Zeichen des Lieferwerkes / Signe de producteur <b>outokumpu</b>	Process / Erhmelzungsart / Mode de fusion <b>AOD</b>	Inspector's stamp / Zeichen d. Sachverst. / Poicon de l'expert										
Grade, Werkstoff, Nuance <b>1.4307 1.4301 TYPE 304L</b>		Tolerances / Toleranzen, Tolérances <b>EN ISO 9445-2</b>												
Marking, Kennzeichnung, Marquage <b>1.4307 2B</b>		Marks, Versandzeichen, Marques												
Line Reihe / Ligne <b>1</b>	Item Position / Poste <b>9</b>	Charge-test No. / Schmelze-Probe Nr. / Coulée n° <b>65319 1</b>	Size, Abmessungen, Dimensions <b>3,0 X 1500 MM</b>	Quantity / Stückzahl / Nombre <b>5360</b>	Weight, Gewicht, Poids <b>KG</b>	Finish / Ausführung / Fini <b>EN/ASTM</b>								
Charge no. / Schmelze Nr. / Coulée n° <b>65319</b>		Chemical composition, Chemische Zusammensetzung, Composition chimiques												
		C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Ni %	N %	AL %				
		<b>0,023</b>	<b>0,42</b>	<b>1,54</b>	<b>0,029</b>	<b>&lt;.001</b>	<b>18,2</b>	<b>8,2</b>	<b>0,044</b>	<b>0,003</b>				
Line Reihe / Ligne <b>1</b>	Mechanical properties, Mechanische Eigenschaften, Caracteristiques mecaniques		Tensile test, Zugversuch, Essai de traction											
	Sample ID / Proben ID / Echantillon	Rp0.2 / MPa	Rp1.0 / MPa	Rm / MPa	A5 %	A50 %	%	Hardness / Härte, Duraté / HBW	ISO 6892-1:2009 A224 SAMPLES PERPENDICULAR TO THE ROLLING DIRECTION					
	<b>01</b>	<b>271</b>	<b>302</b>	<b>609</b>	<b>64</b>	<b>59</b>		<b>157</b>	APPROVED ACC. TO AD2000-W0 WITH VERIFICATION OF THE UNIFORMITY OVER THE STRIP LENGTH. CERTIFIED ACC. TO PED 2014/68/EU BY TÜV NORD REG. NO. 0045. DOPS ACC. TO CPR AVAILABLE ON THE WEB PAGE BY STEEL NUMBER					
	<b>02</b>	<b>264</b>	<b>295</b>	<b>601</b>	<b>63</b>	<b>60</b>		<b>159</b>						
Identify test, Verwechslungsprüfung, Controle d'identification Sizes, Abmessungen, Dimensions Surface, Oberfläche, Surface Test of intergran. corros. Prüfung auf interkrist. Korros., Test de corros. intercris. <b>EN ISO 3651-2 A: OK</b>		OK		OK		OK								
ASTM A240/A240M ASME SA-240/SA-240M II A ED. 2015 TYPE 304 EN 10088-2:2014/1.4307, 1.4301 HEAT TREATMENT 1060 C BEND TEST OK		We certify that the above mentioned products comply with the terms of the order contract. Wir bestätigen, dass die Lieferung den Vereinbarungen der Bestellannahme entspricht. Nous certifions que les produits énumérés ci-dessus sont conformes aux prescriptions de la commande.		This test certificate is made by controlled ADP-system and is valid without signature. Dieses Zeugnis wurde von einem überprüften Datenverarbeitungssystem erstellt und ist ohne Unterschrift gültig. Ce certificat a été établi par un système informatique contrôlé et est valide sans signature.										
		<b>Outokumpu Stainless Oy</b>												
		Authorized inspector / Werkssachverständiger / Inspecteur autorisé <b>SUSANNA SIUKONEN</b>		FI-95490 Tornio, Finland Tel. +358 16 4521, email certificate.tornio@outokumpu.com, www.outokumpu.com Domicile: Tornio, Finland Business Identity Code 0823315-9										

# Příloha č. 2 Materiálový list oceli 1.4016

Order ref.OVP 397 - Item 62287202 - Quantity 1456 kg - NIM Acciai Vender RD3622 - Heat - Product ID 5358061  
 Order n. 639678 - 28/07/2016



No.600, Xinglong St., Jiaying Vll., Gangshan Dist.,  
 Kaohsiung City 82057, Taiwan (R.O.C.)

## MILL TEST CERTIFICATE

Customer: ACCIAI VENDER SPA  
 Certificate: B16151A28 Date: MAY.30.2016  
 Customer: F00147 Product: COLD ROLLED STAINLESS STEEL SHEET IN COIL Page: 1/1  
 Order No.: DQ1506512  
 Specification/Steel Grade : DIN EN 10088-2 1.4016(C)  
 Surface Finish : No.2B

Product ID	Chemical Composition(%)											Tensile Test			Hardness Test		Bend Test
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N	Mo	Cu	0.2% Y.S.	1% Y.S.	T.S.	ELI(%)	HRB#	HV	
5358061	0.080	1.00	1.00	0.040	0.015		16.00				260	450	20				
	0.043	0.39	0.51	0.032	0.004	0.21	16.09	0.043	0.01	0.15	326	478	32	79	151		
Product ID	Heat No.	Dimension									Edge	QTY	Weight	Remarks			
5358061	V0273906	3.00 mm * 1000 mm * Coil									C	1	13.424 KG	I Test Method: 1.1 Heat Analysis: C.S.N by DIN EN ISO 8556:2002, EN 24935:1991, EN ISO 10720:2007, Others by CR10820:2004. 1.2 Tensile Test - EN 6892-1:2006 2 MECHANICAL PROPERTIES REFER TO TENSILE TEST, HARDNESS TEST. 3 ASTM A240/A480 AND ASME SA240/SA480 *VERIFICARE L'IDONEITÀ PER L'IMPEGNO NELLE COSTRUZIONI SECONDO REGOLAMENTO (UE) 305-2011 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO*			
											Subtotal		13.424 KG				

1. We hereby certify that material described herein has been manufactured and tested with satisfactory results  
 2. In accordance with the requirement of the above material specification.  
 3. YUSOO has established as QMS according to ISO 9001, which is certified by DNV CERT(reg.-no:0058-2002-AQ-RQC-RYA)  
 4. Inspection can only be reproduced in factory  
 5. The report can only be reproduced in factory  
 6. This certificate complies to 3.1/DIN EN 10204:2005  
 7. The tests including "Tensile Test", "Microanalyzer Attack" (I.K. TEST)  
 have been accredited by A2LA( TESTING CERT 40858.02).

Manager of Quality Control Department

*C.W. Chang*

ACCIAI VENDER SPA - CONFORM TO THE ORIGINAL

JA-A-91

**Příloha č. 3 Snímky vzorků tahové zkoušky po testování**



A0.1



A0.2



A0.3



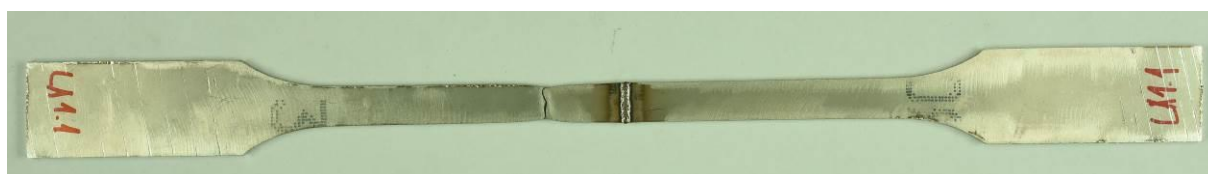
F0.1



F0.2



F0.3



LA1.1





LA1.2



LA1.3



LA2.1



LA2.2



LA2.3



LA3.1



LA3.2



LA3.3



LF1.1



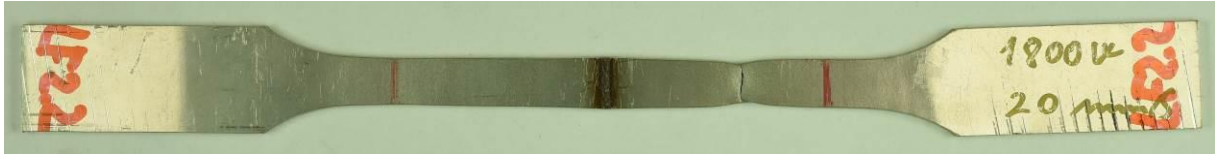
LF1.2



LF1.3



LF2.1



LF2.2



LF2.3



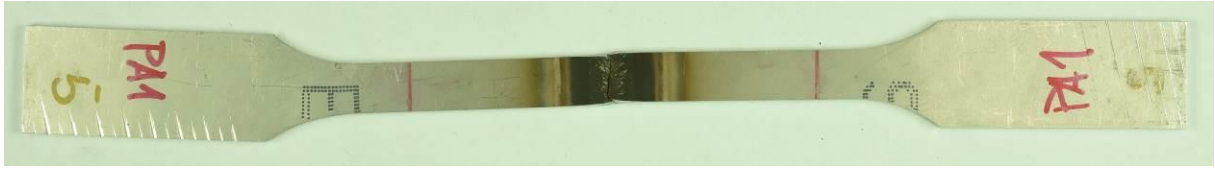
LF3.1



LF3.2



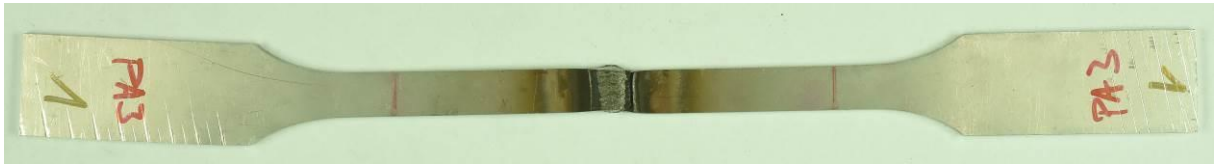
LF3.3



PA1



PA2



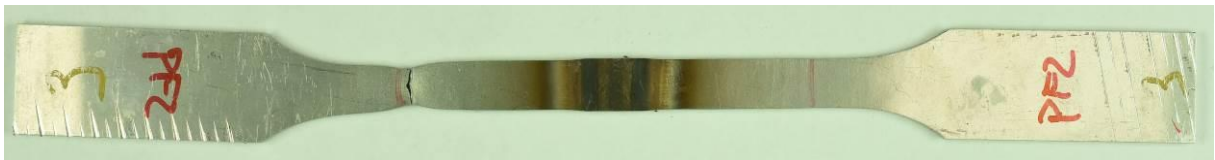
PA3



PF1.1



PF1.2



PF2



PF3



LF3.1



LF3.2



LF3.3



PA1



PA2



PA3



PF1.1



PF1.2