



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# STUDIUM Vlivu směsné ochranné atmosféry při laserovém svařování austenitických korozivzdorných ocelí

STUDYING THE EFFECT OF MIXED SHIELDING GAS DURING LASER WELDING OF  
AUSTENITIC STAINLESS STEELS

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. et Bc. Markéta Žemlová

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

BRNO 2016

# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Studentka: **Bc. et Bc. Markéta Žemlová**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Strojírenská technologie  
Vedoucí práce: **doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.**  
Akademický rok: 2015/16

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:

## **Studium vlivu směsné ochranné atmosféry při laserovém svařování austenitických korozivzdorných ocelí**

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

Provést srovnání vlivu speciální směsné ochranné atmosféry vzhledem ke standardní argonové na laserový svar jak z hlediska procesních parametrů, tak z hlediska strukturních a mechanických vlastností svaru v austenitické korozivzdorné oceli

### **Cíle diplomové práce:**

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

### **Seznam 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

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

LASGON H2, produktová informace Linde

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

-----  
prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

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

## **ABSTRAKT**

ŽEMLOVÁ Markéta: Studium vlivu směsné ochranné atmosféry při laserovém svařování austenitických korozivzdorných ocelí

---

Diplomová práce se zabývá problematikou laserového svařování v ochranných atmosférách. Na základě teoretických znalostí, uvedených v práci, byl proveden svařovací experiment 10 vzorků z oceli X5CrNi18-10 ve dvou různých ochranných atmosférách. Proudění ochranných atmosfér bylo zobrazeno pomocí šlírové metody. Na vzorcích svařených spojů byly provedeny mechanické zkoušky (zkouška tahová a zkouška tvrdosti). Svarové spoje byly zhodnoceny metalograficky a struktura byla potvrzena měřením na feritometru.

Klíčová slova: Ocel X5CrNi18-10, svařování laserem, směsná ochranná atmosféra, argon, šlírová metoda

## **ABSTRACT**

ŽEMLOVÁ Markéta: Studying the effect of mixed shielding gas during laser welding of austenitic stainless steels

---

The diploma thesis deals with problems of laser welding in shielding gases. On the basis of theoretical knowledge in this thesis, was made welding an experiment of 10 samples of steel X5CrNi18-10 in two different shielding gases. Flow of shielding gases has been shown by schlieren method. On the samples of welding joints have been made mechanical tests (tensile test and hardness test). Welded joints were metallography evaluated and structure of them was confirmed by measurements on ferrite meter.

Keywords: steel X5CrNi18-10 , laser welding, mixed shielding gas, argon, schlieren photography

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ŽEMLOVÁ, Markéta. *Studium vlivu směsné ochranné atmosféry při laserovém svařování austenitických korozivzdorných ocelí*. Brno, 2016. 55s, 9 příloh, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí diplomové práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D..

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Studium vlivu směsné ochranné atmosféry při laserovém svařování austenitických korozivzdorných ocelí** vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

20.5.2016

Datum

---

Bc. Markéta Žemlová

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěla poděkovat doc. RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D. za vedení mé diplomové práce a za pomoc při shánění materiálu a plynu.

Dále bych chtěla poděkovat panu Janu Pavelkovi, za pomoc se Šlírovou zkouškou. Ing. Petru Horníkovi za ovládání robota při svařovacím experimentu a za pomoc s přípravou metalografické zkoušky, ing. Kamilovi Podanému, Ph.D. za pomoc s tahovou zkouškou, ing. Václavu Kaňovi, Ph.D. za jeho pomoc při přebroušení vzorků a leptání vzorků a ing. Pavlovi Šohajovi, Ph.D. za pomoc a rady při určování struktury materiálu.

# OBSAH

Zadání

Abstrakt

Prohlášení

Poděkování

Obsah

Úvod .....	8
1 Průmyslové lasery .....	9
1.1 Druhy průmyslových laserů.....	9
1.2 Interakce laserového záření s kovy.....	11
1.3 Použití průmyslových laserů .....	13
2 Svařování laserem .....	17
2.1 Geometrie svaru.....	18
2.2 Svařovací parametry a jejich vliv na kvalitu svaru.....	19
2.3 Typy laserových spojů.....	23
2.4 Modifikace metody laserového svařování .....	24
2.5 Svarové vady u laserového svařování.....	25
2.6 Svařitelnost materiálu .....	26
2.7 Zkoušky svarových spojů .....	27
3 Ochranné atmosféry a jejich vlivy na svary .....	31
3.1 Druhy ochranných plynů .....	31
3.1.1 Argon – Ar .....	32
3.1.2 Helium - He .....	32
3.1.3 Vodík - H.....	33
3.1.4 Směsi plynů .....	33
3.2 Šlířová zobrazovací metoda.....	33
4 Austenitické oceli .....	35
4.1 Vlastnosti austenitických korozivzdorných ocelí .....	35
4.2 Nestabilizované austenitické oceli.....	36
4.3 Stabilizované austenitické oceli.....	36
4.4 Koroze .....	36
4.5 Průmyslové použití .....	37
5 Praktická část.....	38
5.1 Příprava svařovacího experimentu .....	38
5.1.1 Směs plynů ArMix .....	38
5.2 Svařovací experiment .....	39
5.3 Příprava vzorků pro zkoušky .....	41
5.4 Metalografie svarů - makrostruktura .....	43
5.5 Zkouška tvrdosti .....	46
5.6 Metalografie svarů – mikrostruktura .....	47
5.7 Zkouška na feritometru.....	47
5.8 Tahová zkouška .....	48
5.9 Šlířová zobrazovací metoda.....	51
6 Technicko ekonomická hodnocení .....	52
7 Závěry.....	53
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých symbolů a zkratk	
Seznam obrázků	
Seznam tabulek	
Seznam příloh	



## ÚVOD [19] [50]

První laser byl CO<sub>2</sub> laser a byl vynalezen v roce 1965, jako nástroj ke svařování a řezání se začal používat v 80. letech minulého století. Od té doby se laserové technologie svařování stále vyvíjí. Tento vývojový trend technologií je hnán kupředu, zejména díky automobilovému průmyslu, jenž klade velký důraz na co nejefektivnější výrobu při dodržení požadované kvality. V minulosti došlo díky automobilovému průmyslu k přechodu z CO<sub>2</sub> laserů k výkonnějším pevnolátkovým a vláknovým laserům.

Nyní se vývoj stále ubírá cestou zvyšování výkonu za dodržení požadované kvality. Tedy vyvíjení stále výkonnějších laserů a také vyvíjení optimalizace svařovacího procesu. Do svařovacího procesu neodmyslitelně patří ochranné atmosféry. Právě ochranné atmosféry slouží k vylepšování svařovacích podmínek a metalurgie svarového spoje. Některé firmy se specializují na vývoj ochranných atmosfér přímo pro určitý typ laseru a druh materiálu.

Tato diplomová práce se zabývá právě problematikou srovnání dvou druhů ochranných atmosfér. Ochranné atmosféry argonu v porovnání s ochranou směsí nazvanou ArMix, u laserového svařování austenitické korozivzdorné oceli X5CrNi18-10 pomocí pevnolátkového vláknového laseru.



Obr. 1 Ukázky laserového svařování [23][24][77]

# 1 PRŮMYSLOVÉ LASERY [44] [54] [77]

Lasery se dají využívat v různých oblastech, od medicíny až po vysoce výkonové lasery určené zejména pro průmyslové aplikace. Průmyslové lasery se liší od ostatních energetických zdrojů vysokou hustotou výkonu na dopadové ploše, obvykle se hodnoty pohybují  $10^4$  až  $10^9 \text{ W.cm}^{-2}$ , v maximu až  $10^{13} \text{ W.cm}^{-2}$ . Tento výkon lze přesně dávkovat a reprodukovat. Dalšími odlišnostmi od ostatních energetických zdrojů jsou: schopnost fokusace (zaostření) paprsku na velmi malou plošku (o průměru až  $10 \mu\text{m}$ ), monochromaticnost, vysoká koherence a malá divergence paprsku.

Laserem se chápe svazek fotonů, jenž nelze ovlivnit magnetickým či elektrickým polem. Díky elektromagnetické neaktivitě se dají svařovat magnetické materiály a svazek pronikne i do úzkých mezer a spár. Svazek se šíří v průzračném prostředí beze ztrát.

Průmyslové lasery mají rovněž řadu výhod, mezi něž patří:

- jejich adaptabilnost (lasery nepotřebují měnit nástroje),
- čistý provoz (bez provozních kapalin a bez odpadu),
- bez přímého opotřebení (laser je nekontaktní),
- tichý provoz (pod hladinou slyšitelnosti),
- možnost dělení paprsku na více pracovišť,
- vysoká přesnost,
- malá tepelně ovlivněná oblast,
- možnost procesy automatizovat i robotizovat,
- snadné odsávání.

Ovšem průmyslové lasery mají i své nevýhody, např.:

- vysoké pořizovací náklady,
- obsluha laserů musí být kvalifikovaná,
- musí se dbát na bezpečnostní opatření,
- jsou velmi energeticky náročné.

## 1.1 Druhy průmyslových laserů [17] [22] [31] [33] [44] [53] [77]

Laserové zdroje jsou velmi různorodé, dělí se podle aktivního prostředí, vlnových délek, které vyzařují, typů buzení aktivního prostředí a typů pracovního provozu a režimu. V průmyslové praxi jsou lasery nejčastěji děleny podle již zmíněného aktivního prostředí na pevnolátkové, kapalinové, plynové, polovodičové a plazmatické.

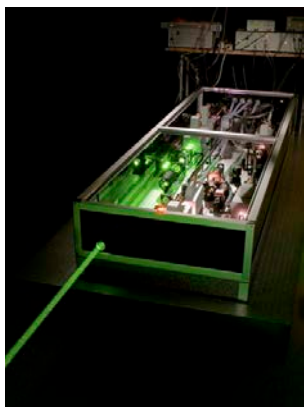
*Plynový CO<sub>2</sub> laser* (na obr. 2) - dosahuje běžných výkonů od 0,5 do 20 kW, maximální výkony plynového CO<sub>2</sub> laseru dosahují až 200 kW.<sup>[77]</sup> Pracovní vlnová délka těchto laserů je  $10,6 \mu\text{m}$ , v oblasti infračerveného záření. Z této vlastnosti vychází určitá specifikace těchto laserů a tou je nutnost použití speciální optiky, jelikož sklem infračervené záření neprochází. S plynovými lasery lze pracovat v kontinuálním i



Obr. 2 CO<sub>2</sub> vývojová odtavná trubice [17]

pulzním provozu a jejich účinnost se pohybuje mezi 10 a 20 %.<sup>[44]</sup> Nevýhoda plynových laserů spočívá ve vysokém BPP (beam parameter product), tedy ve větším rozměru stopy svazku. Využití nachází plynové CO<sub>2</sub> lasery ve svařování, gravírování, laserovém dělení i u povrchového kalení.

*Nd-YAG laser*, viz obr. 3, a jejich modifikace se vyvinuly jako lasery s vyšší účinností. Tyto lasery pracují v kontinuálním i pulzním provozu na vlnové délce  $1,06 \mu\text{m}$ . Účinnost Nd-YAG laserů lze zvýšit buzením diodami z 2–3 % na 30 % a při použití deskového typu tohoto



laseru až na účinnost 32 %. Výkony Nd-YAG laserů se pohybují od 5 do 16 kW. Nd-YAG lasery diskového typu mají kompaktnější konstrukci. Aplikace těchto laserů je laserové mikronavařování, gravírování, vrtání či strukturování.

*Polovodičové lasery* pracují o výkonech do 10 kW s pracovní vlnovou délkou 1  $\mu\text{m}$ . Dosahují účinnosti 40 %, v laboratorních podmínkách pak i 47 %. Polovodičové lasery jsou pevnolátkové, u nichž buzení nastává průchodem elektrického proudu a lze z nich vytvořit laserový stack. Jsou mechanicky robustní a pracují pouze v kontinuálním provozu. Nevýhodou je vysoké BPP, jelikož nejmenší průměr stopy laserového svazku u kruhu je 1,5 mm.<sup>[22]</sup>

**Obr. 3 NdYAG laser [55]** Jejich přednosti spočívají ve vysoké efektivitě a kompaktní struktuře. Použití polovodičových laserů se uplatní u svařování, zejména u svařování tenkých plechů. Dále při tepelném zpracování a povlakování.

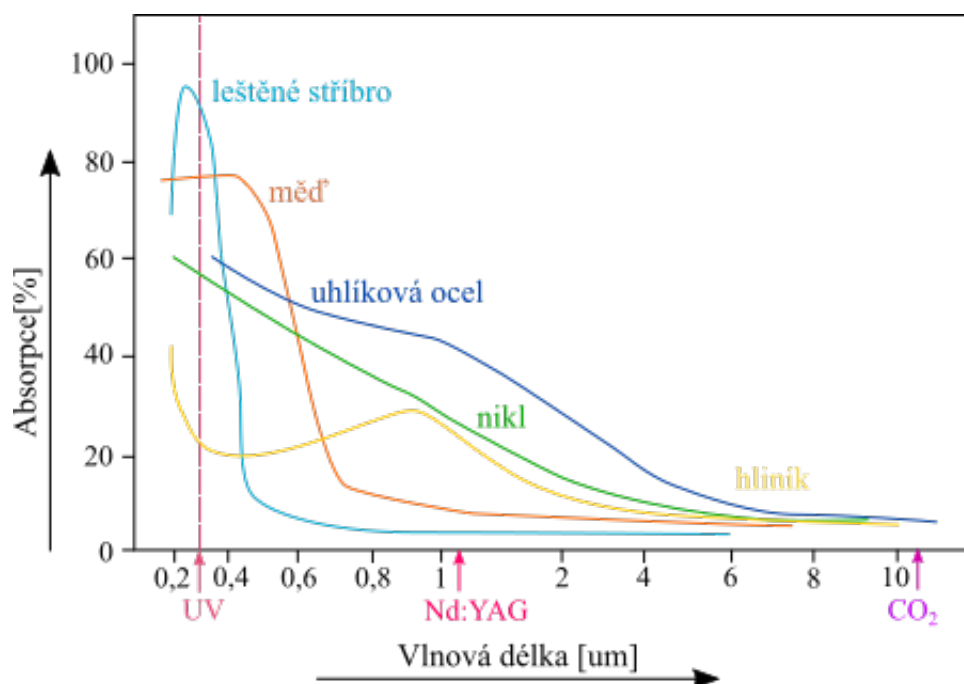
*Vláčkové lasery* jsou buzeny LED diodami, což zajišťuje vysoce kvalitní a stabilní mód. Pracují v pulzním i kontinuálním provozu na pracovní vlnové délce 1,07  $\mu\text{m}$ . Mají jednoduchou konstrukci, díky níž se mohou skládat do různých modulárních uspořádání. V těchto uspořádáních pak dosahují výkonů od 1 do 100 kW. K jejich výhodám oproti ostatním laserům patří nízké BPP (velká fokusace svazku) a účinnost dosahující až 48 %.

**Tabulka 1 – Srovnání typů laserů [33][53].**

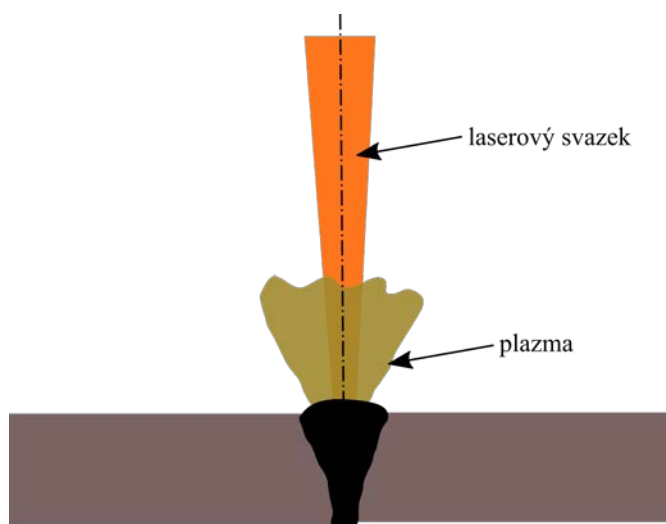
Laser	Vláčkový	Diodový NdYAG	CO <sub>2</sub>	Diskový NdYAG
Vlnová délka	1,07 $\mu\text{m}$	1,06 $\mu\text{m}$	10,6 $\mu\text{m}$	1,03 $\mu\text{m}$
Účinnost	48 %	6 %	10 %	35 %
Výstupní výkon	$\leq 100$ kW	$\leq 6$ kW	$\leq 20$ kW	$\leq 16$ kW
Divergence svazku - BPP	< 2,5 mrad/mm	25 mrad/mm	6 mrad/mm	8 mrad/mm
Životnost diod	> 100 000 hod	15 000 hod	nepoužívá diody	15 000 hod
Typ chlazení	voda/vzduch	voda	voda	voda
Potřebná plocha při P = 4 kW	< 1 m <sup>2</sup>	6 m <sup>2</sup>	7 m <sup>2</sup>	> 4 m <sup>2</sup>
Hodinové provozní náklady	26,85 EUR	48,30 EUR	30,58 EUR	44,64 EUR

## 1.2 Interakce laserového záření s kovy [22] [44] [53] [77]

Fotony laserového svazku nereagují přímo s povrchem kovu, ale s valenčními elektrony a krystalovou mřížkou. Při kontaktu s krystalovou mřížkou nastávají 3 interakce. Fotony se od této mřížky odráží, prochází mřížkou nebo jsou mřížkou absorbováni, čímž dochází k ohřevu krystalové mřížky kovu. Hodnota absorpce závisí na materiálových vlastnostech a vlnové délce záření, jak lze vidět v tabulce 2 a na obrázku 4. Z obrázku 4 je patrné, že kovy s dobrou vodivostí mají nižší koeficient absorpce, což vyplývá z interakce laserové záření s mřížkou. Absorpce je závislá na stavu povrchu, což dokazuje tabulka 3. Absorpci ovlivňuje i teplota, jež je závislá na hodnotě intenzity laserového paprsku. Při překročení kritické intenzity hodnota absorpce kovu náhle vzroste, viz obr. 6. Absorpci může ovlivnit i úhel dopadu paprsku na povrch kovu. V případě vysoké odrazivosti povrchu lze zvýšit absorpci jeho zdrsňením, nanesením na povrch látky s vyšším koeficientem absorpce, dále mořením ( $\text{KNO}_3$  či  $\text{CaF}_2$ ), laserovým předehřevem či u kovů užitím laseru s kratší vlnovou délkou.



Obr. 5 Graf závislosti absorpce na vlnové délce [34]



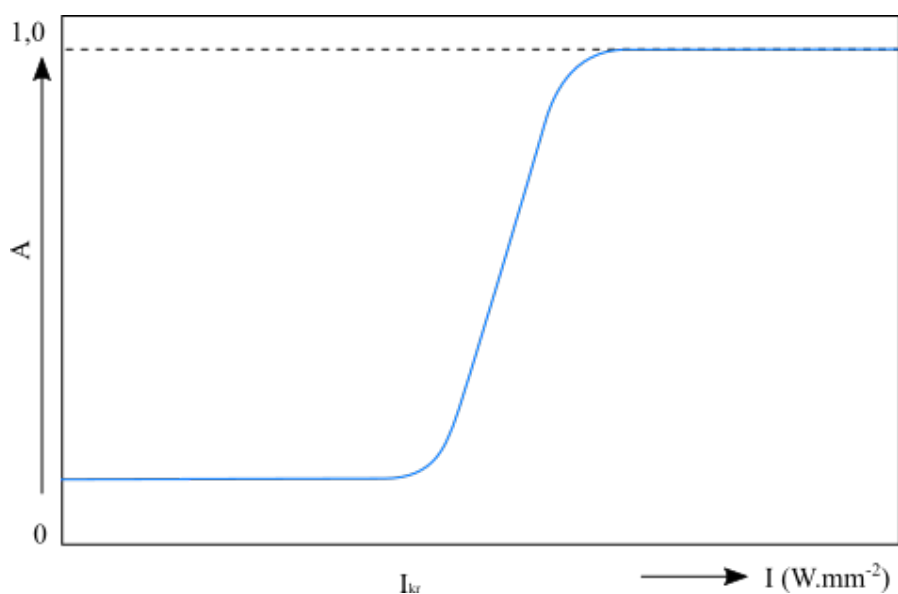
Obr. 4 Plazmový oblak tvořený parami kovu a ochranným plynem [22]

Tabulka 2 – Absorpce různých materiálů [22].

Materiál	Absorpce laseru [%]	
	NdYAG $\lambda=1,06\mu\text{m}$	CO <sub>2</sub> $\lambda=10,6\mu\text{m}$
Hliník	25	3
Měď	9	2
Železo	35	6
Molybden	41	5
Níkl	28	3
Křemík	72	72
Wolfram	31	4
Zinek	50	2
Papír	25	95
Sklo	5	94



Vzrůstá-li dále po natavení povrchu kovu teplota, dochází u kovu k odpařování některých komponentů (kontaminací, uhlovodíků, vlhkosti, nečistoty z kovu – oxidy, sulfidy). Tyto páry se díky vysoké teplotě laserového svazku mění na plazma, které následně ovlivňuje interakci laserového paprsku s kovem. Nad povrchem kovu může dojít až ke vzniku monolitické vrstvy, tzv. plazmového oblaku, viz obr. 5. Plazmový oblak zabraňuje přímé interakci laserového paprsku s kovem a sám s paprskem reaguje. Interakce paprsku s plazmovým oblakem spočívá v ohřevu oblaku. Může dojít až k explozi a rázové vlně. Tato vlna se využívá např. u tepelného zpracování kovů ke zpevnění materiálu nebo u vrtání a děrování může rázová vlna vytlačit roztavený kov z otvorů či řezů. U laserového svařování či řezání je tento jev nežádoucí, a proto se volí hustota laserového svazku, která nezpůsobuje vznik par anebo se zamezuje vzniku plazmového oblaku prouděním inertního plynu, jenž cirkuluje v laserové hlavě. Jako inertní plyn se do výkonu laseru 5 kW používá pro potlačení plazmy zejména argon, hélium nebo různé jejich směsi. V případě, že napomáhají vzniku plazmového oblaku, lze použít i dusík nebo oxid uhličitý. Pro větší výkony laserů se používá helium, protože je menší pravděpodobnost rozpadu molekul plynu na plazma působením laserového paprsku. Rychlost plynu by měla být taková, aby potlačovala plazmový oblak, ale zároveň aby neovlivňovala roztavený svarový kov. Pokud je třeba chránit svarový kov před působením okolní atmosféry, připojí se ke svařovacímu procesu i plyn ochranný.



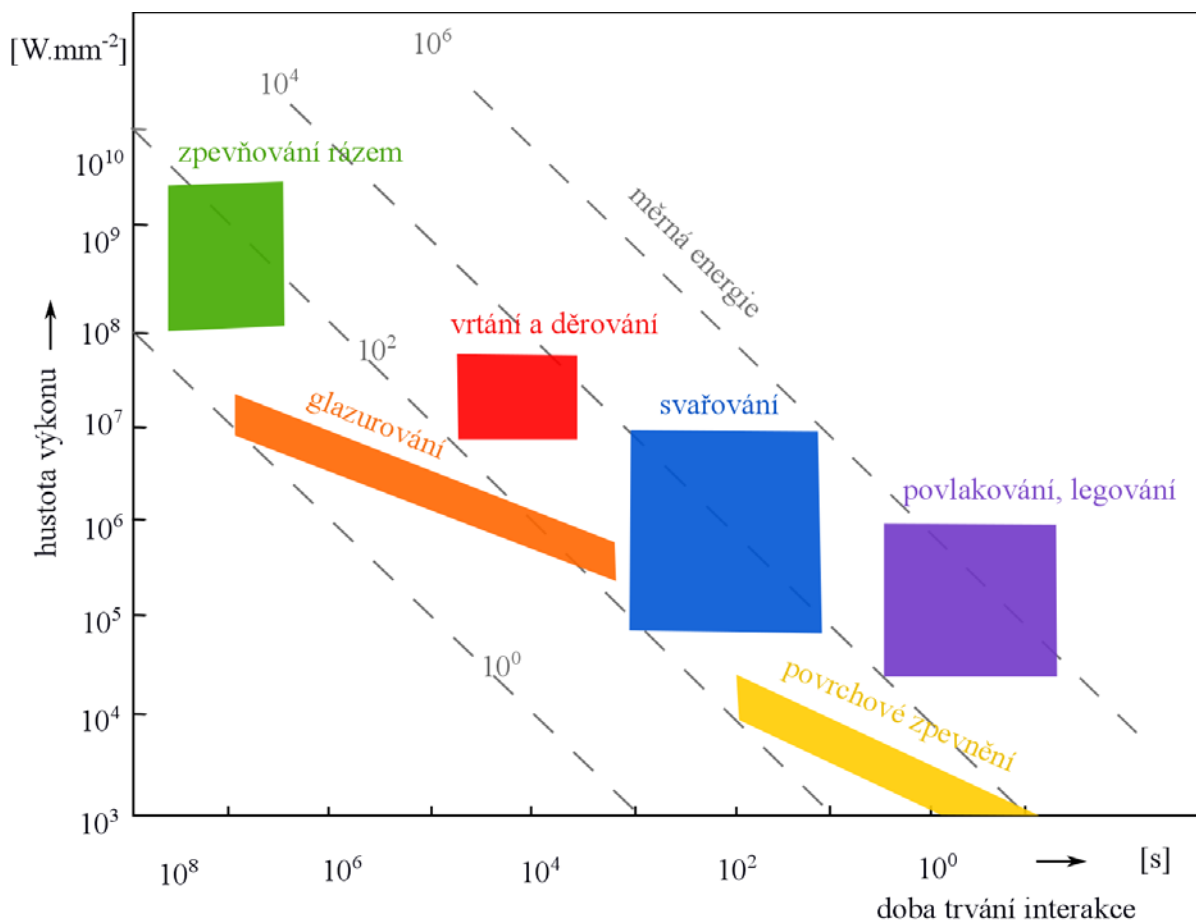
Obr. 6 Graf absorpce leštěného povrchu mědi jako funkce intenzity dopadajícího záření [18]

Tabulka 3 – Vliv stavu povrchu na hodnotu absorpce u oceli 35NCD16 [73].

Stav povrchu	Průměrná drsnost povrchu Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Absorpce laseru [%]		
		CO <sub>2</sub> $\lambda=10,6 \mu\text{m}$	CO <sub>2</sub> $\lambda=5,3 - 5,6 \mu\text{m}$	NdYAG $\lambda=1,06 \mu\text{m}$
Leštěný	0,02	5,15 - 5,25	8,55 - 8,70	29,75 - 30,00
Broušený	0,21	7,45 - 7,55	12,85 - 12,95	38,90 - 40,10
Broušený	0,28	7,70 - 7,80	13,10 - 13,20	40,20 - 41,40
Válcovaný	0,87	5,95 - 6,05	10,15 - 10,35	33,80 - 34,20
Válcovaný	1,10	6,35 - 6,45	10,85 - 11,00	34,10 - 34,40
Válcovaný	2,05	8,10 - 8,25	13,50 - 13,70	41,80 - 42,50
Válcovaný	2,93	11,60 - 12,10	19,85 - 20,60	52,80 - 53,20
Válcovaný	3,35	12,55 - 12,65	21,35 - 21,50	51,40 - 51,70
Pískovaný	1,65	33,85 - 34,30	42,40 - 42,80	68,20 - 68,40

### 1.3 Použití průmyslových laserů [3][4][20][22][25][34][37][38][39][40][41][44][46][51][52][57][60][70][77][79][80]

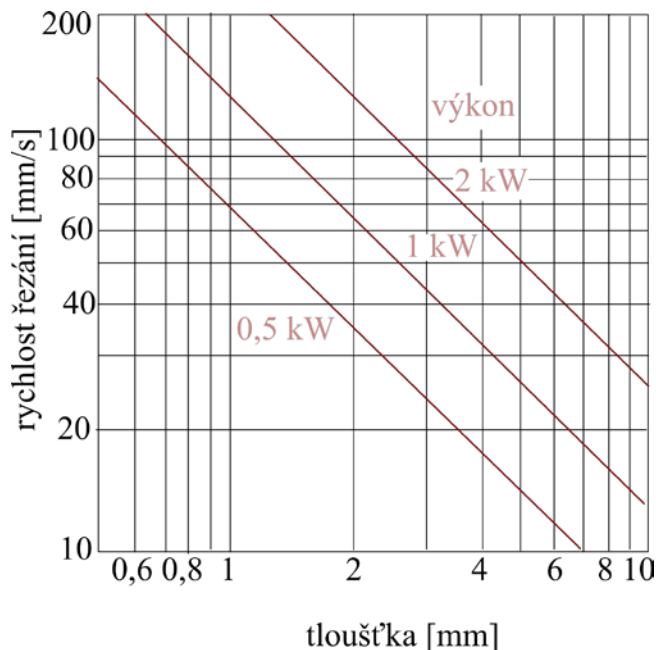
Průmyslové lasery se používají v mnohých aplikacích. Důležitou aplikací je laserové svařování, kterému se věnuje následující kapitola a kterou jsem při řešení své práce používala. Nejrozšířenější průmyslovou aplikací laserového svazku je pak laserové řezání.<sup>[21]</sup> Dalšími laserovými aplikacemi jsou metody děrování, zpevnění rázem, navařování, natavování, povrchové zušlechťování, gravírování, pájení.



Obr. 7 Graf charakteristické využití laserových technologií [22][44]

Laserovým řezáním lze dělit téměř všechny technické materiály. Díky vysoké koncentraci energie nezávisí na tepelných, fyzikálních či chemických vlastnostech daného materiálu. Fokuseovaný laserový svazek dopadá na povrch materiálu, kde ohřívá kov na jeho teplotu varu. Kov, jenž se neevaporuje, zůstává roztaven a je vyfukován ze spáry pomocí stlačeného pracovního plynu, který proudí z trysky okolo fokusovaného laserového svazku. Tryska je nad povrchem plechu ve vzdálenosti nejvýše 1 mm. Podle pracovních plynů se řezání laserem rozděluje do několika metod: na sublimační řezání, tavné řezání a oxidační řezání. Velikost řezné mezery u laserového řezání může být až 0,05 mm s přesností řezu 0,05 až 0,1 mm na jeden metr délky řezu. Řezné hrany jsou hladké (drsnot cca Ra 1,6)<sup>[77]</sup> a tepelně ovlivněná oblast řezem je velmi úzká (0,05 až 0,2 mm)<sup>[20]</sup>. Řezné rychlosti se pohybují v metrech až desítkách metrů za minutu. Svazkem fotonů lze řezat v rovině i v prostoru, tzv. 3D laserové řezání. Díky snadné regulaci svazku je kvalita řezu stejná v celé délce řezu.

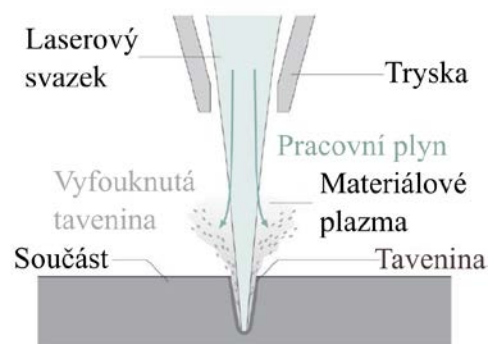
Při *sublimačním řezání* laserový pulzní paprsek rozehřívá materiál na teplotu varu a řezaný materiál se intenzivně odpařuje. Páry z materiálu unikají v časech mezi jednotlivými pulzy nebo jsou ze spáry vyfukovány slabým proudem inertního plynu. Inertními plyny používanými pro sublimační řezání jsou dusík, argon a helium.<sup>[34]</sup> Sublimační řezání se využívá zejména při dělení tenkých plechů či při řezání a vrtání minerálů.



Obr. 8 Graf závislost rychlosti řezání na penetraci [22]

pohybujícím se v rozmezí 0,3 až 0,5 MPa. Při oxidačním řezání vzniká exotermická reakce kyslíku s řezaným materiálem. Použitím kyslíku se zvyšuje rychlost řezání a zvětšuje se penetrace, viz obr. 3. Laserového svazku se u tohoto druhu řezání využívá pouze k ohřevu na zápalnou teplotu kovu a na udržení této teploty při samotném procesu. Oxidační řezání se používá k dělení nelegovaných či středně legovaných ocelí. U těchto ocelí při oxidačním dělení vzniká pouze tenká vrstva oxidů, kdežto u jiných kovů způsobuje oxidační řezání oxidaci řezných hran.

Při procesu vrtání či děrování laserem (na obrázku 9) se laserový svazek používá v pulzním režimu krátkých pulzů v řádu milisekund. Během jednoho pulzu se materiál taví a odpařuje, tím zvětšuje svůj objem a v otvoru vznikne vysoký tlak. Tento tlak vypudí ven ze spáry zbytky roztaveného materiálu. Vrtané díry dosahují minimálních průměrů 0,1 mm, nejmenší průměr lze dosáhnout NdYAG laserem 0,025 mm.<sup>[20]</sup> Hloubka vrtaných děr může být až 50 mm. Díry nemusí být pouze kruhové, mohou mít různé tvary. Výhodou laserového vrtání je hloubení děr s malými průměry v těžko přístupných místech. Vrtáním lze vrtat do kovů, plastů, textilií, dřeva, skla a keramiky, přičemž se tato metoda používá pro výrobu filtrů, vstřikovacích trysek, lopatek proudových motorů a kamenů do hodin.



Obr. 9 Vrtání laserem [80]

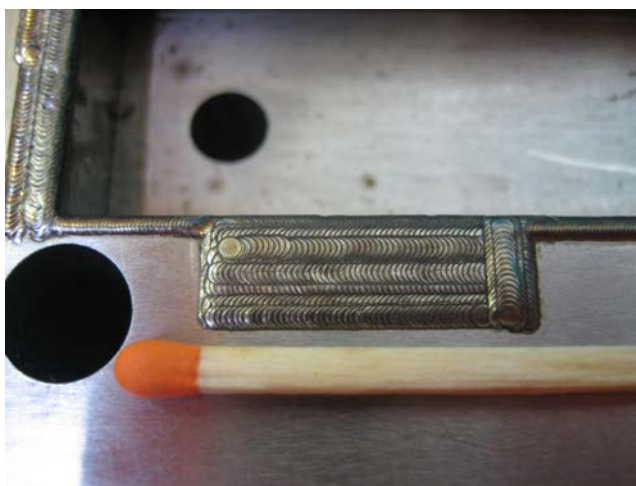
Laserové zpevňování rázem (tzv. laser peening) funguje na principu laserové šokové vlny a zpevňuje jen povrch materiálu. Vznik laserového záření zajišťují vysoce výkonné lasery s krátkou dobou trvání pulzu, které vysílají impuls přes vodu na zpevňovaný povrch oblepený tmavou páskou. Páska záření pohltí, dochází k explozi, která vytvoří na povrchu materiálu rázovou vlnu, jež dokáže deformovat materiál do hloubky v řádu milimetrů. Následně se tento proces několikrát opakuje. Výhody laserového zpevňování rázem spočívají především v tom, že zpevnění dosahuje větší hloubky v materiálu než kuličkování, přičemž největší zpevnění je na povrchu a se zvyšující se hloubkou klesá lineárně. Nevýhodami jsou vysoké pořizovací náklady a časová náročnost přípravy. Přípravou je myšleno oblepování páskou a ochranné

U tavného řezání se používá převážně kontinuální řezný režim. Povrch řezaného materiálu je svazkem fotonů ohříván na teplotu tavení a roztavený kov je vyfoukáván ze spáry proudem inertního plynu - dusíku. Tlak inertního plynu se pohybuje mezi 1 až 1,5 MPa. Takto vysoký tlak se používá kvůli překonání odporu povrchového napětí taveniny v celé hloubce řezu. Tavným laserovým řezáním lze dělit nejen kovy, jako jsou např. vysokolegované oceli, měď, hliník, nikl, jejich slitiny, ale i nekovové materiály, mezi něž patří: keramika, sklo, plexisklo, dřevo.

Oxidační řezání se od tavného řezání liší použitým pracovním plynem – kyslíkem s nižším tlakem -

lakování. Tato metoda nalézá využití např. v teplé sekci motorů nebo i tam, kde hrozí chvilková přetížení z důvodu nárazu.

*Navařování laserem* spočívá v nanášení prášku do místa, které ohříváme laserovým paprskem. Podle obsahu základního materiálu se dělí na 3 stupně: laserové slévání, laserové glazování a laserové plátování, viz obrázek 11. Navařování laserem má výhody v malé tepelně ovlivněné oblasti, ve vysoké trvanlivosti návarů bez defektů a trhlin, v různorodosti materiálů používaných na návary (kovy, polymery, keramika), v možnosti použití metody na špatně dostupná místa a vnitřní otvory. Tvary návarů mohou být velmi malé i tvarově složité, viz obr. 10. Mezi nevýhody patří nutnost strojního vedení, jež je náročné na přípravu i investice.



Obr. 10 Porovnání laserového návaru se sirkou [46]



Obr. 11 Stupně navařování laserem [54]

Metoda *laserového navařování* spočívá v použití defokusovaného laserového paprsku k ohřevu povrchu na teplotu tavení. Na povrchu vzniká mikrokrystalická anebo amorfní struktura, jež je odolná vůči korozi. Tuto metodu lze využít k legování, plátování či nauhličení povrchu. Při nauhličení se povrch před natavením natře slabou vrstvou grafitu, prášku, či se na něj přiloží tenká grafitová fólie. Pro plátování a legování povrchu se natírá povrch tenkou vrstvou požadovaného složení, překryje fólií či je sycen práškem, jenž je po celou dobu aplikace konstantně přiváděn na povrch. Problém této metody spočívá v ohraničeném prostoru rozostřeného paprsku, tedy že na hranicích laserových stop nemusí být nanesené vrstvy dostatečně kompaktní. Proto se při aplikaci laseru užívá systému zrcadel, která zajišťují rovnoměrné ovlivnění povrchu.

Pro *laserové povrchové zušlechťování – kalení* se používá rozostřený laserový paprsek. Principem je rychlé nahřátí velmi tenké povrchové vrstvy pod teplotu tavení, přičemž vzniká v materiálu austenit, jenž se velmi rychle zakalí odvodem tepla do zbytku materiálu a vytvoří jemnozrnnou martenzitickou strukturu. Hloubka zakalení sahá do 2,5 mm hloubky.<sup>[46]</sup> Výhodami laserového kalení jsou nízké teplotní deformace, neustálé řízení procesní teploty, vysoká procesní rychlost a efektivita, vysoká reprodukovatelnost a žádná či minimální potřeba následného zpracování. Laserové kalení se využívá u střížných a ohýbacích nástrojů, lopatek parních a plynových turbín, ložiskových pouzder, kuličkových šroubů, ozubených kol atd.



*Gravírování* či *popisování laserem* je proces z laserové mikrotechnologie, u něhož dochází k ovlivnění povrchové vrstvy odpařováním do hloubky 1 mm.<sup>[41]</sup> V případě barevného gravírování dochází k oxidaci a tepelnému ovlivnění. Při popisování probíhá děj na jeden průchod laseru, u gravírování je zapotřebí více průchodů. Metodu lze použít na různé povrchy: kovy, plast, sklo aj.

Pojmem *intravolumární glyptika* se rozumí hloubkové (trojrozměrné) dekorování skla. Laserový svazek je fokusován do různých hloubek v materiálu, kde dochází k odpařování skloviny a jejímu povrchovému praskání. Na těchto trhlinách dochází k rozptylům světla, čímž dochází k zářivému vzhledu dekorace.

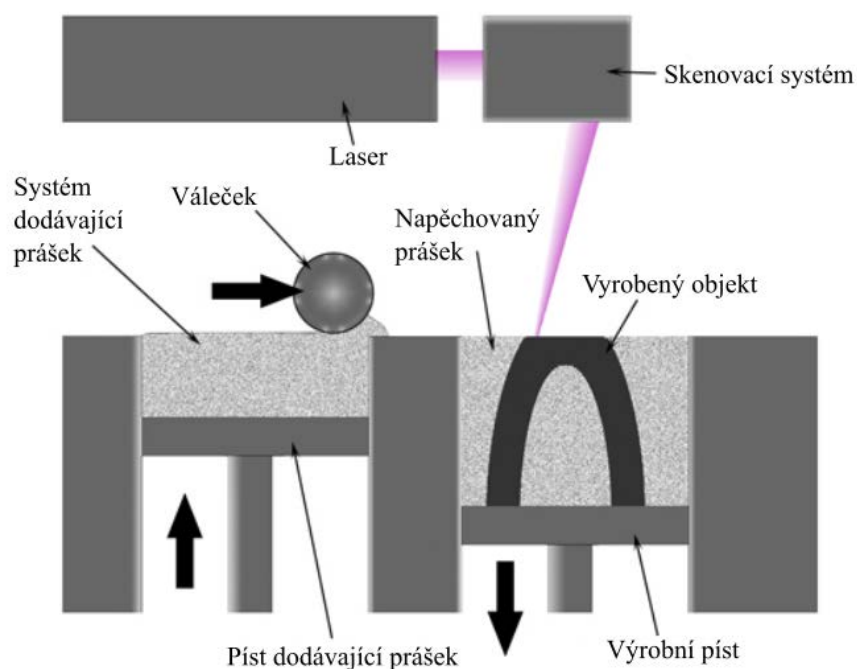
U *laserového pájení* se laserový paprsek používá na rozehtívání tvrdých pájek. Výhodou laserového pájení je vysoká rychlost procesu a velký překryv mezery při vytvoření pohledového spoje. Tato metoda se používá u méně namáhaných spojů.



Obr. 12 Intravolumární glyptika [4]

Laserové záření se využívá i při aditivní výrobě metodou *3D tisku*. Trojrozměrný tisk obecně je nanášení vrstvy materiálu po jednotlivých tenkých vrstvách. Tiskovými materiály mohou být papíry, termoplasty, kov i sklo. Ve 3D tisku je několik různých metod, avšak laserový svazek využívají pouze metody Selektivního laserového slinování (SLS), Přímého laserového spékání kovů (DMLS) a Laserového tavení (SLM).

Princip tisku těchto metod je znázorněn na obrázku 13. Přičemž vlevo se nachází pístem dodávaný prášek. Tento prášek je po rovnoměrných vrstvách, jež zajišťuje váleček, nanášen do tiskové komory, kde na něj shora působí laserové záření. Podle intenzity záření se dodávaný prášek spéká (SLS a DMLS) či taví (SLM).

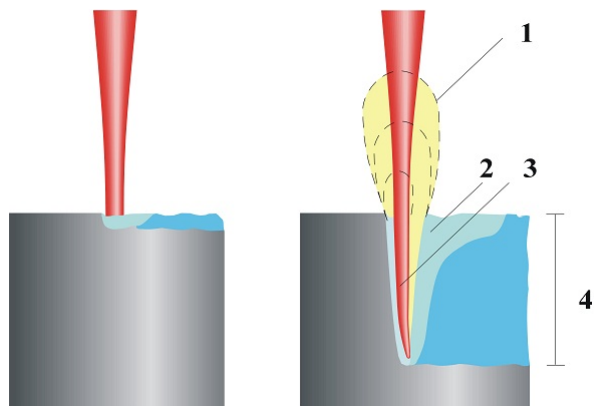


Obr. 13 Princip 3D tisku [25]

## 2 SVAŘOVÁNÍ LASEREM [1] [22] [44] [51]

V předchozí kapitole jsme se seznámili s principem laseru z hlediska interakce s kovem, řezání, navařování a dalších aplikací. Svazek lze tedy používat ve dvou pracovních režimech: kondukčním a penetračním.

*Kondukční režim* pracuje na principu vysokého teplotního gradientu mezi povrchem a jádrem kovu, který dosahuje rozdílu až  $10^6 \text{ K}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Díky povrchovému napětí řídí vysoký gradient rozdílu termo-kapilární tok s rychlostí  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Konvekce od laserového zdroje řídí tvar roztaveného kovu, poměr hloubky k šířce a povrchové zápalý (tj. výstupky na povrchu svaru). Díky konvekci se tavenina promíchává a ovlivňuje se tak její složení, ale také tímto způsobem může docházet k vadám, jako jsou: póry, neprůvary a různé šířky přetavení.



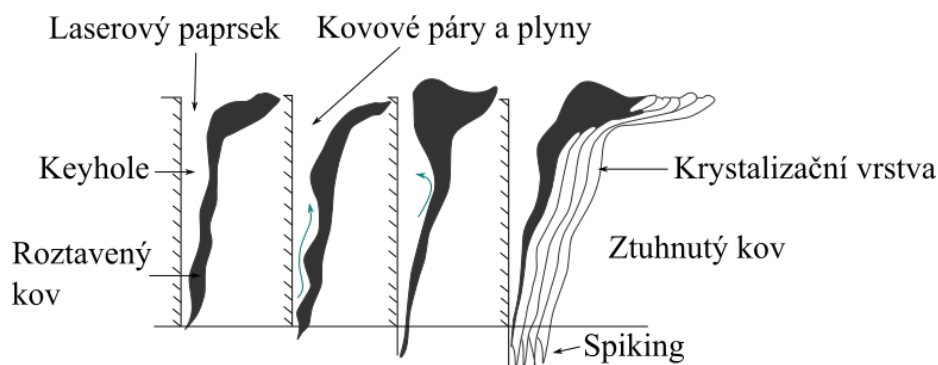
1 - plazmový oblak, 2 – roztavený materiál,  
3 – keyhole, 4 – hloubka svaru

Obr. 14 Penetrační a kondukční režim [74]

*Keyhole* je vyplněn směsí par a plynů roztaveného kovu, které napomáhají k jejímu udržení. Výhoda keyhole spočívá ve zvýšení absorpce kovu díky mnohonásobným odrazům od stěn kanálku. Tavenina vznikající v kanálku je tlačena vysokým tlakem par kovu na stěny kanálku a při pohybu laserového svazku je pomocí dynamické rovnováhy přesouvána do zadní části. V zadní části se roztavený kov hromadí a tvoří tu stěnu z taveniny, která má díky gravitaci snahu kanál zaplavovat a vytvářet dutiny, jak lze vidět na obrázku 15.

V *penetračním režimu* se laserový paprsek chová obdobně jako elektronový paprsek při svařování svazkem elektronů a to díky vysoké energetické hustotě fokusovaného svazku. Při koncentraci vysoké hustoty svazku dochází v místě fokusace k varu. Kov se okamžitě odpařuje a vzniká paroplynový kanálek mírně kuželovitého tvaru, tzv. keyhole. Při svařování laserovým paprskem se tedy používá penetrační režim, u něhož vzniká keyhole. Srovnání penetračního a kondukčního režimu je na obrázku 14.

*Keyhole* je vyplněn směsí par a plynů



Obr. 15 Schéma mechanismu tvorby svarového spoje [44]

Při svařování dochází k vysoké rychlosti teplotních změn působících na keyhole, které se projevují periodickým zvlněním taveniny ve svarovém kovu. Laserové svařování má strmý teplotní cyklus s velkými rychlostmi ohřevu  $2 \text{ až } 3 \text{ 000 } ^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$  a rychlostmi ochlazení  $300 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$  i většími.

Svařování laserem má řadu výhod, mezi něž patří:

- vysoká svařovací rychlost,
- vysoká flexibilita a adaptibilita procesu,
- automatizovaný bezkontaktní proces,
- čistý provoz,
- vysoká přesnost,
- snadné odsávání zplodin z oblasti svaru,
- tichý provoz laseru, hluboko pod hranicí hluku konvenčních technologií,
- možnost heterogenních svarů,
- svařování tloušťky od několika mikrometrů až po 15 mm,
- možnosti dělení svazku na více pracovních míst díky soustavě zrcadel a hranolů,
- možnost úpravy ohniskové vzdálenosti až na 1,6 m,
- průvarové svary s vysokou štíhlostí,
- vysoká kvalita svarových spojů,
- minimální či žádná následná zpracování,
- malé vnesené teplo a sním i související malé deformace,
- svařování bez přídavného materiálu.

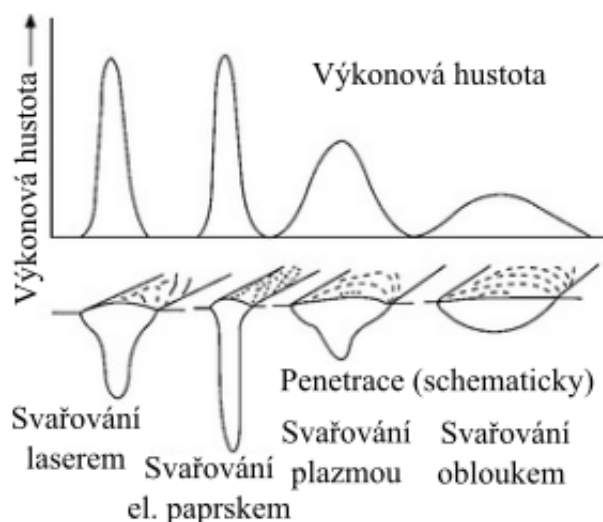
Laserové svařování má i své nevýhody. Jelikož se jedná o robotizovaný proces, tak nevýhody jsou vysoká pořizovací cena zařízení, složité přípravkování a nároky na přesnost sesazení.

## 2.1 Geometrie svaru [1] [44] [47] [55]

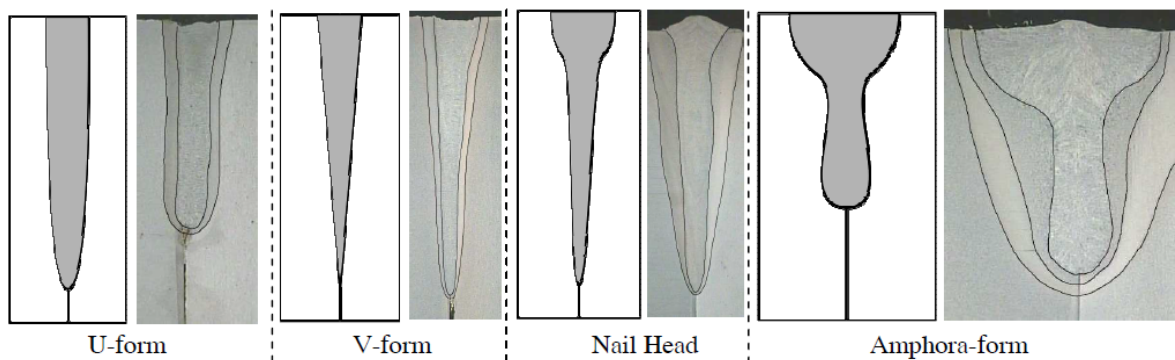
Laserové svařování má díky své hustotě výkonu, ve srovnání s jinými svařovacími metodami, svůj specifický tvar, viz obrázek 16.

Tvar geometrie svaru závisí na režimu svařování a na použitých technologických parametrech (na velikosti a kvalitě laserového svazku, rychlosti svařování, použitím pracovním plynu a na poloze ohniska). Typický tvar laserového svaru má poměr hloubky ku šířce větší než jedna. Svar lze rozdělit na 2 části – spodní úzkou a horní rozšířenou část.

Spodní část svaru závisí na vytvoření keyhole a zadává hloubku provaření. Horní část způsobuje povrchové natavení kovu vlivem kondukce. Podle [47] lze určit čtyři základní tvary laserového spoje: tvar U, tvar V, špendlíková hlava a amfora. Náhledy těchto svarů jsou na obrázku 17.



Obr. 16 Porovnání tvaru laserového svaru s jinými svařovacími metodami [33]



Obr. 17 Základní tvary laserových svařových spojů [47]

## 2.2 Svařovací parametry a jejich vliv na kvalitu svaru [14] [22] [31] [33] [44] [47] [51] [75]

Svařování laserem je možné ve dvou provozech - kontinuálním a pulzním. Pro optimální svar za kontinuálního provozu laseru jsou důležité určité parametry:

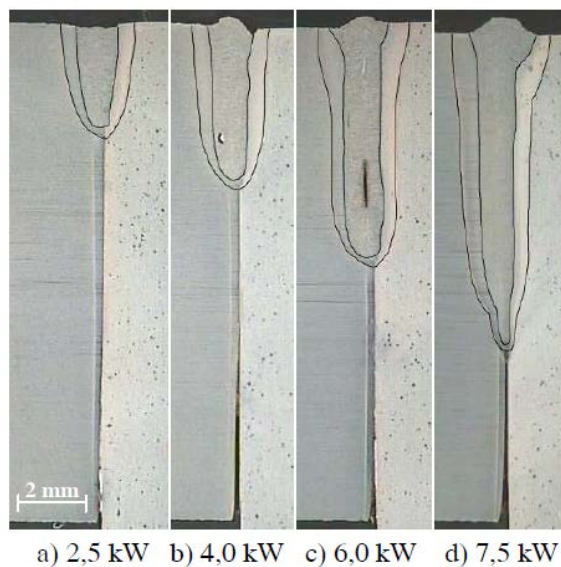
- výkon laserového svazku  $P$  [W],
- rychlost svařování  $v$  [mm/s],
- parametry fokusačního systému,
- typ svařového spoje, tolerancí a materiálu,
- ochranný plyn a další.

Výkonem laserového svazku [W] je chápána míra záření fokusačního systému a jedná se zejména o teplotní parametr. Zvýšení výkonu ovlivňuje hloubku penetrace i šířku svaru, přičemž hloubka roste rychleji než šířka, viz obrázek 18.

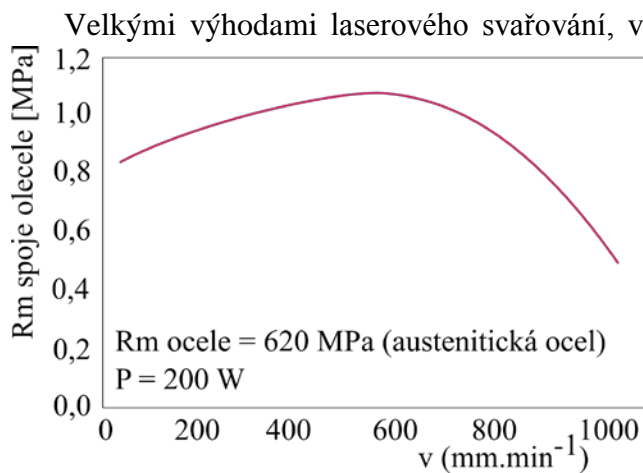
Rozdílnou veličinou je *hustota výkonu* [ $W/m^2$ ], která je určena výkonem dopadajícím na plochu o určitém průměru do místa interakce.

*Rychlost svařování* [mm/s] je dráha, kterou urazí svařovací svazek, vztažená k jednotce času. Svařovací rychlost je důležitý parametr při svařování, jenž ovlivňuje teplotní rozložení v materiálu, geometrii, strukturu, vlastnosti a chemické složení v tepelně ovlivněné oblasti.

S rostoucí svařovací rychlostí klesá hloubka penetrace, viz obrázek 20. S rostoucí rychlostí se snižuje i šířka svaru, avšak minimální šířka je daná průměrem keyhole. Při pomalých rychlostech (10 až 30 mm/s) je šířka svaru větší, jelikož u těchto rychlostí se výkon svazku spotřebovává na natavování kovu díky kondukcí tepla. Při kondukcí je teplo ze svarů odváděno pomaleji a ve svaru dochází k poklesu tvrdosti. Tvrdost ale závisí i na tloušťce stěny tím, že silnější materiály rychleji odvádí teplo ze svaru a svařky jsou díky tomu tvrdší, v porovnání s tenkými plechy. Podle obrázku 19 má svařovací rychlost vliv i na pevnost svaru.

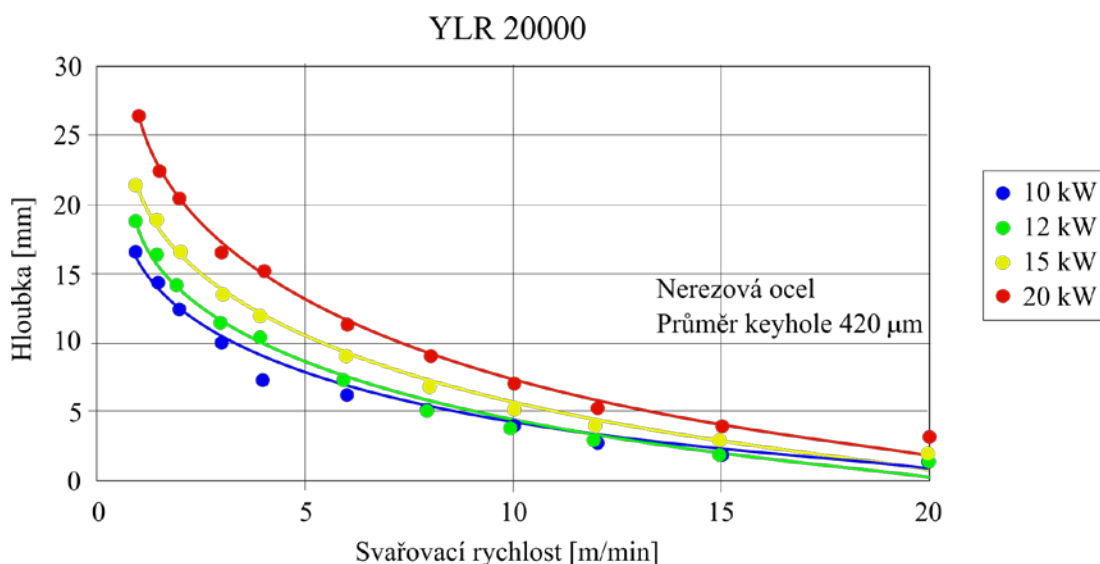


Obr. 18 Hloubka a šířka svaru roste spolu s výkonem: Výkon od 2,5 do 7,5 kW, svařovací rychlost 2 m/min, pozice ohniska 0 mm [47]



Velkými výhodami laserového svařování, ve srovnání s jinými svařovacími metodami, jsou vysoké svařovací rychlosti, až do 20 m/min (což je asi 333 mm/s), vyšší rychlosti jsou spojeny se vznikem vad. Vyšší rychlost znamená menší vnesené teplo, menší tepelně ovlivněnou oblast, vyšší rychlost ochlazování, což způsobuje změnu struktury, minimální zbytková pnutí, minimální hrubnutí zrn (díky jemnozrné struktuře mají svary vyšší únavovou životnost i vrubovou pevnost) a minimální deformace svařenců. Nevýhodou vyšších rychlostí je vyšší tvrdost svarů.

Obr. 19 Graf vlivu rychlosti svařování na pevnost [44]



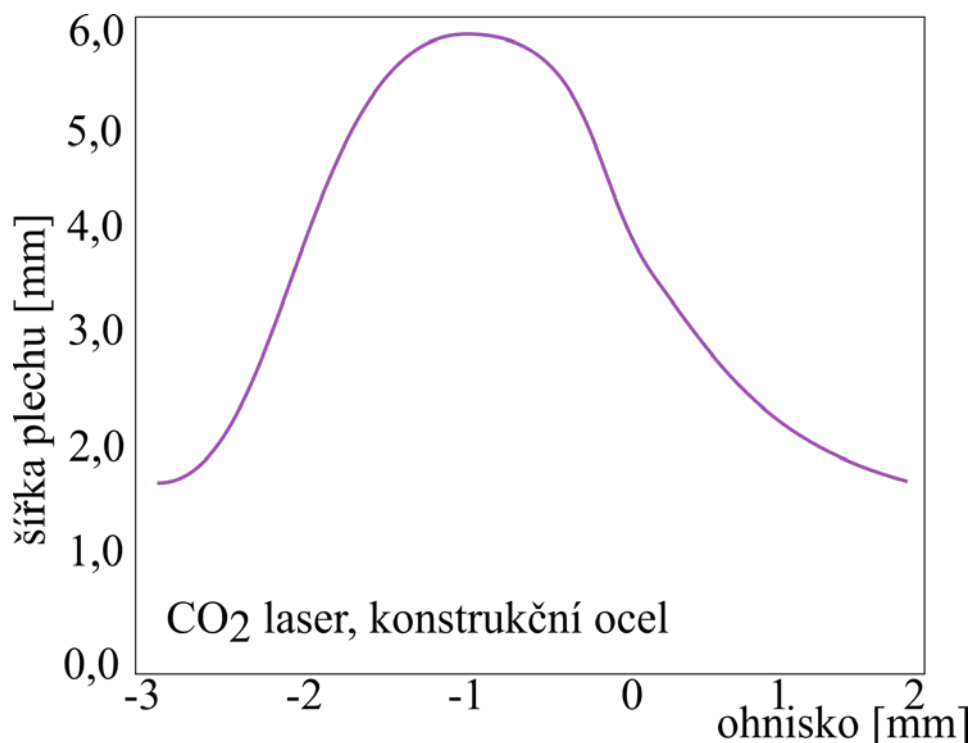
Obr. 20 Graf vlivu svařovací rychlosti na hloubku svaru [31]

Mezi parametry fokusačního systému patří průměr zaostřeného svazku, poloha ohniska, divergence svazku, mód, polarizace a vlnová délka, přičemž polarizace je jev, kdy elektrická složka světla kmitá pouze v jednom směru a vlnová délka je dána druhem laseru, viz kapitola 1.

Průměr zaostřeného svazku má také vliv na geometrii svaru. Optimální průměr svazku bývá v rozsahu 0,5 až 1 mm a definován jako poměr výšky k šířce větší než 1. Při menším průměru je dodaná energie tak vysoká, že se kov začne intenzivně přehřívat a svar se formuje s velkým množstvím defektů. Větší průměr naopak způsobuje zmenšení hloubky penetrace a zvětšení šířky, režim ohřevu přechází do kondukce a snižuje se efektivita procesu.

Průměr laserového svazku závisí na poloze ohniska, jak je znázorněno na obrázku 21. U tenkých plechů na poloze ohniska nezáleží, u plechů silnějších může mít poloha ohniska význam zásadní. Když leží ohnisko nad svařovaným povrchem, zmenšuje se hloubka závaru, svar má tvar U a hlava svaru je mírně propadlá. Leží-li ohnisko pod svařovaným povrchem, hloubka provaření roste a svar má tvar V. Tyto jevy lze pozorovat na obrázku 22. Maximální hloubky penetrace se dosáhne umístěním ohniska těsně pod povrch.<sup>[44]</sup>

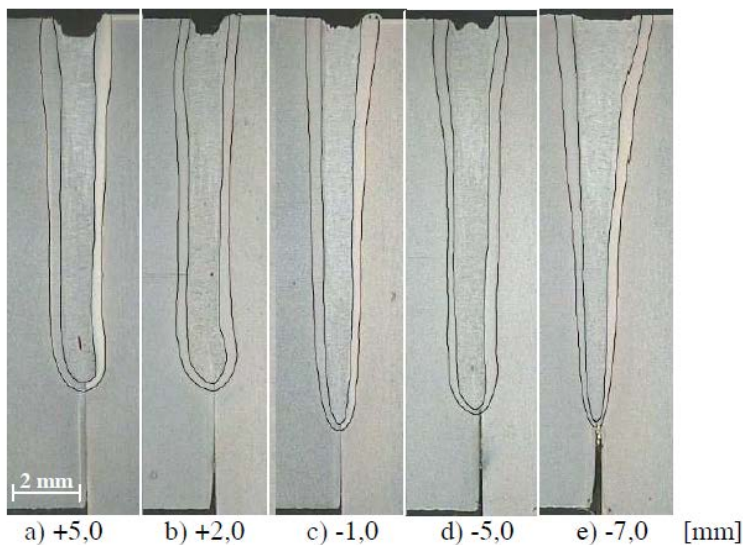




Obr. 21 Graf hloubky penetrace závisící na poloze ohniska [44]

*Divergenci* se rozumí rozbíhavost svazku po opuštění vodícího vlákna, která se vzdáleností roste. Kvalitní paprsek se vyznačuje rovnoběžností s homogenním rozložením energie na velkou vzdálenost. Nízká kvalita paprsku značí rozptyl svazku, citlivost na nastavení ohniska, čímž může dojít k poklesu maximální hloubky protavení a u silnějších tloušťek ke změně příčného průřezu.

*Mód* charakterizuje rozložení energie v průřezu laserového svazku. Na obrázku 23 jsou znázorněny tři různé hustoty rozložení laserového svazku při stejných hodnotách svařovacích rychlostí a stejných hodnotách výkonu. Na obrázku 23 vlevo je znázorněn vícenásobný prstencový mód. Rozložení hustoty je tedy mimo střed s postranními hroty. Tento mód má plytký a široký závar a není vhodný ke svařování. Maximum hustoty v ose svazku je znázorněno na obrázku 23 uprostřed. Tento mód má již hlubší závar, ale má malý poměr hloubky penetrace k šířce, takže je srovnatelný s ostatními obloukovými metodami, jelikož se zde neprojeví vliv laserového svazku. Na obrázku 23 vpravo je znázorněno Gaussovské rozložení svazku s hlubší penetrací i užší šířkou svaru. Minimální tepelně ovlivněná oblast a deformace jsou

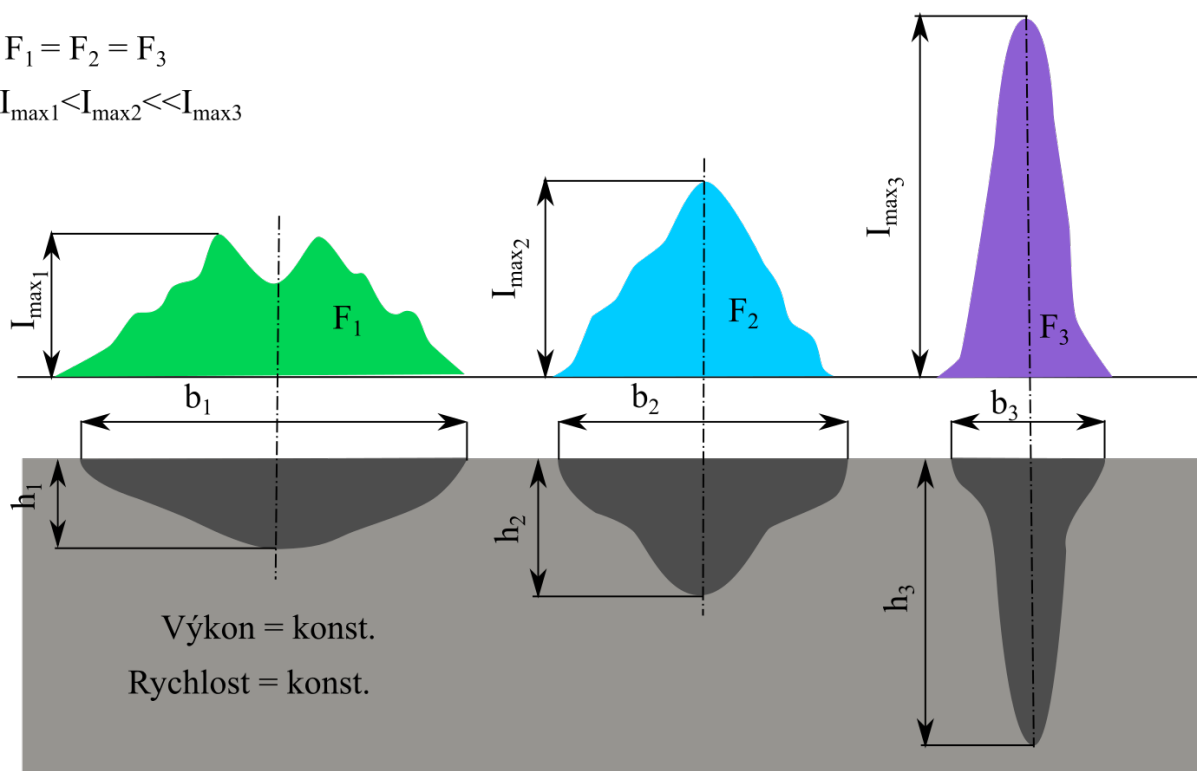


Obr. 22 Vliv polohy ohniska, Svařovací rychlost 4 m/min, výkon 15 kW, pozice ohniska +5 až -7 mm [43]

charakteristickými znaky laserového svařování. Pro svařování je nejdůležitější konstantní a symetrický průběh rozložení svazku, jelikož toto rozložení vytváří rovnoměrný průvar. Nesymetrie mohou způsobovat neprůvary a studené spoje.

$$F_1 = F_2 = F_3$$

$$I_{\max 1} < I_{\max 2} \ll I_{\max 3}$$



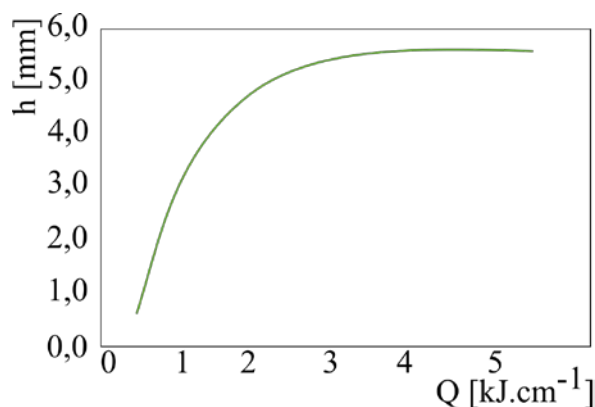
**Obr. 23** Různé tvary hustoty laserového svazku [44]

U všech typů svařování se posuzuje specifické vnesené teplo. Jedná se o energii dodanou na jednotku délky a závisející na dodaném výkonu a svařovací rychlosti, viz vzorec 2.1.

$$Q = \frac{P \cdot \eta}{v}, \quad (2.1)$$

kde je  $Q$  [ $\text{J} \cdot \text{mm}^{-1}$ ] vnesené teplo,  
 $P$  [W] výkon,  
 $\eta$  [-] účinnost,  
 $v$  [ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ] svařovací rychlost.

Hodnota specifického vneseného tepla má vliv na hloubku penetrace, jak lze vidět na obrázku 24. Pro nízké hodnoty, cca do  $0,5 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$  je hloubka penetrace minimální, nad touto hodnotou však hloubka penetrace rychle roste. V porovnání s jinými svařovacími metodami je vnesené teplo nízké, viz tabulka 4. Vnesené teplo ovlivňuje rovněž deformace, jelikož nízké vnesené teplo znamená nízké deformace a zbytková napětí.



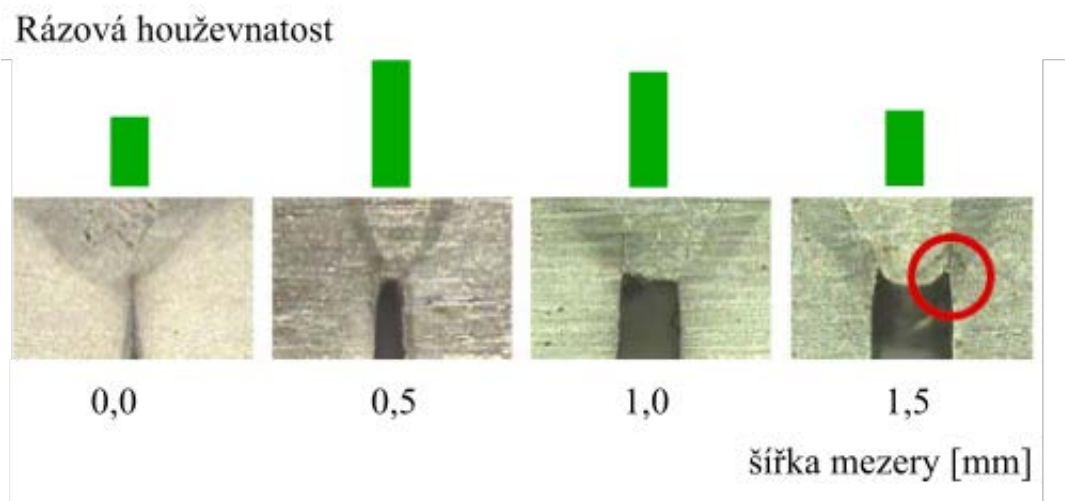
**Obr. 24** Graf vlivu specifického vneseného tepla na hodnotu penetrace [44]

Dalšími pomocnými faktory, které mohou ovlivnit tvar svarového spoje, jsou ochranné plyny, jimiž se zabývá kapitola 3, velikost svařovací mezery, oscilace ohniska a třeba i zvýšení absorpce, více o absorpci v kapitole 1.

Velikost svařovací mezery a její přesnost je důležitý parametr, zvláště u menších průměrů svazku. Šířka mezery závisí na průměru paprsku, u průměru 0,6 mm je maximální mezera 0,3 mm, u průměru 1,2 mm je mezera 0,5 mm.<sup>[75]</sup> Srovnání velikostí mezer lze vidět na obrázku 26. Lze z něj i vyčíst, že u větších mezer dochází ke vzniku vrubů, jenž mohou vést k trhlinám v tepelně ovlivněné oblasti. Zvýšením velikosti svařovací mezery můžeme zvyšovat absorpci, ale pouze do určité míry a u vyšších tloušťek na úkor propadlé hlavy svaru.

**Tabulka 4 Srovnání specifického vneseného tepla u různých svařovacích metod při svařování vysokopevnostní oceli tloušťky 1 mm [59].**

Svařovací metoda	Hodnota vneseného tepla
Laser	15 J·cm <sup>-1</sup>
TIG	60 J·cm <sup>-1</sup>
MAG	85 J·cm <sup>-1</sup>

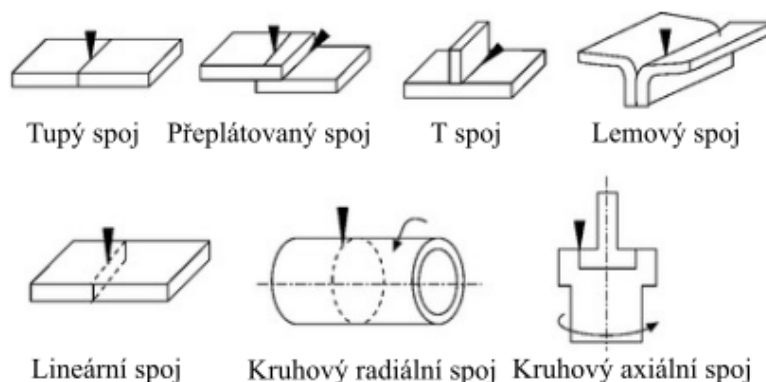


**Obr. 25 Srovnání velikostí mezer [31]**

Je-li potřeba zvýšit efektivitu přetavení, lze u kontinuálního laseru využít *oscilace ohniska*. Principem je zvýšení pohybu rychlosti čela tavení a vypařování v přední části keyhole. Tím roste hloubka průniku svazku do materiálu a zvyšuje se i absorpce. Pro oscilaci ohniska se používají zařízení s frekvencí 0 až 150 Hz s amplitudou 0 až 5 mm.<sup>[44]</sup>

### 2.3 Typy laserových spojů [22] [31] [33] [77]

Laserové svařování umožňuje různé druhy svarových spojů (tupé, koutové, rohové, přeplátované), jednotlivé druhy lze vidět na obrázku 27. Výhoda svarů natupo spočívá v rovnoměrném ohřevu obou svařovaných dílů. U přeplátovaných svarů je kladen důraz na dobrý dotyk mezi oběma pláty kovu, protože do spodního je teplo přiváděnou převážně kondukcí.



**Obr. 26 Druhy laserových svarů [31]**

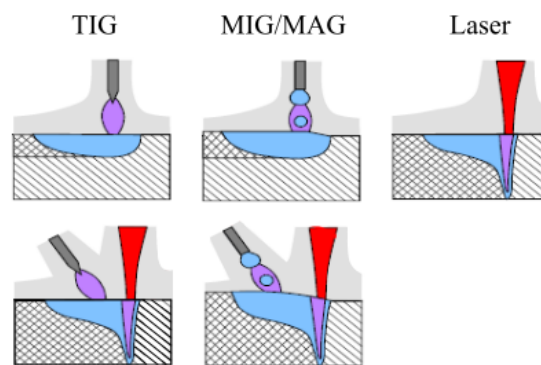


## 2.4 Modifikace metody laserového svařování [31] [35] [51] [75] [81]

Modifikace laserového svařování se vesměs zabývají problematikou absence přídavného materiálu a následným snížením přesnosti na sesazení svarových ploch. Poslední modifikací je tzv. Remote welding, které se zabývá svařováním na dálku.

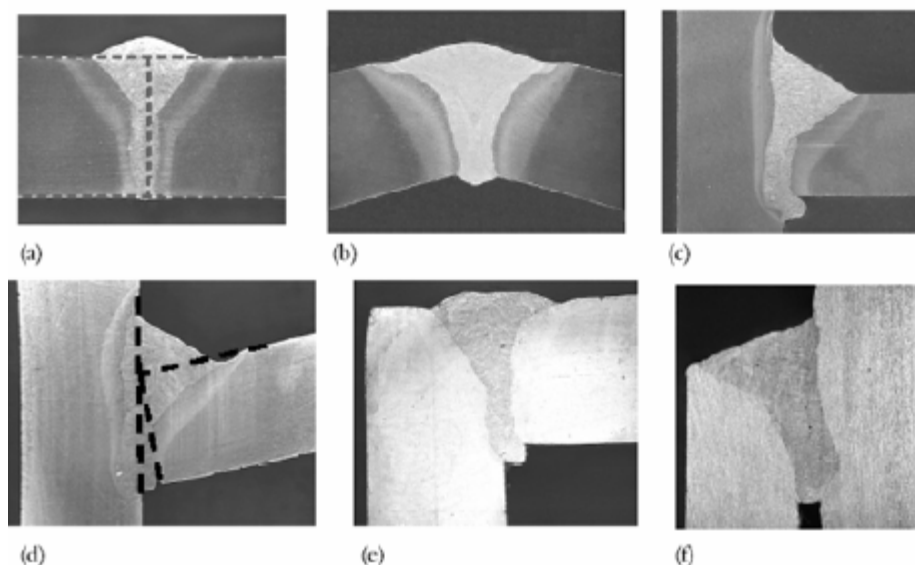
Přidáním *přídavného materiálu* do laserového svařování můžeme ovlivnit řadu mechanicko-technologických vlastností, jako pevnost, tažnost, houževnatost, korozní odolnost a odolnost vůči opotřebení. Přídavný materiál snižuje požadavky na přesnost přípravy, zaplňuje geometrii úkosů do tvaru V a zajišťuje převýšení svaru na začátku i konci délky svaru. Přídavný materiál může být buď studený či horký drát a jeho použití se řídí senzorickým systémem, díky němuž je kontrolován proces, kvalita svaru, polohování a sledování svazku.

*Hybridní svařování* je kombinací dvou svařovacích metod, obvykle laserového svařování a metody svařování obloukového (př. TIG, MIG/MAG, plazma), viz obrázek 28. V jejich kombinaci laserový paprsek zajišťuje rychlé, hluboké a kvalitní svařování kořene bez přídavného materiálu zatímco oblouková metoda dodává materiál v podobě přivedeného drátu. Ve srovnání s běžnými obloukovými metodami svařování je metoda laser-hybrid produktivnější až o 40%. Další výhody spočívají v lepší stabilitě procesu, hlubší penetraci, vyšší rychlosti svařování, ve snížení spotřeby přídavného materiálu, snížení deformací a snížení nároků na přípravu svarových spojů větších tlouštěk. Výhody oproti samotnému laseru jsou ve snížení požadavků na přesné umístění a na společné toleranci.



Hybrid: laser a TIG    Hybrid: laser a MIG/MAG

Obr. 27 Schéma porovnání svařovacích metod a metody Laser hybrid [31]



Obr. 28 Ukázky svarových spojů laser-hybrid [31]

Kombinace laseru s MAGem snižuje riziko vrubů a také nedostatky laserového svařování a tím snižuje i odolnost proti únavě. Metoda je vhodná pro tupé a koutové spoje a je používána hlavně pro svařování plechů od 10 mm a silnějších. Lepší penetrace je výhodou snížení počtu průchodů a zároveň je potřeba menší příprava než u samotného MIG/MAG svařování. Snížený tepelný příkon produkuje nižší zbytková napětí a zkreslení.

Metoda laser-hybrid se používá ke svařování karoserií v automobilovém průmyslu, ke stavbě lodí, v oblasti letecké techniky.

*Remote welding* je laserová svařovací metoda, jejíž princip spočívá ve svařování na velkou vzdálenost, v řádu decimetrů. U této metody je kvalitní svazek řízen robotem a na místa svaru je dopravován pomocí zrcadel. Vyznačuje se velkou svařovací rychlostí a minimem prodlev při změnách polohy svazku.

Remote welding se používá u tenkých plechů, například při svařování karoserií v automobilovém průmyslu.

## 2.5 Svarové vady u laserového svařování [11] [31] [32] [49] [51] [59]

U laserového svařování, stejně jako u ostatních svařovacích metod, může docházet k různým vadám ve svarovém kovu či v tepelně ovlivněné oblasti. Svarové vady mají za následek zhoršení mechanických vlastností a může dojít až k závažnému poškození celé součásti. Detekce vad je někdy velmi obtížná, a proto je dobré vadám předcházet. Podle zdroje [32] můžeme laserové svarové vady dělit do 3 skupin: geometrické a vzhledové vady, vnitřní a neviditelné vady a vady jakosti. Podle české normy se vady řadí do šesti skupin a to na trhliny, dutiny, pevné vměstky, studené spoje a neprůvary a jiné vady.

Mezi geometrické a vzhledové vady se řadí deformace, špatný vzhled, vruby, propady a propaly líce svaru.

*Deformace* (napětí) se ve svaru tvoří velkým tepelným vlivem či špatným upnutím svařovaných dílů. Deformaci lze předejít vysokou rychlostí svařování s hlubokou penetrací a využitím tuhého přípravku.

*Špatný vzhled svaru* se vyznačuje špinavým či hrubým povrchem, který vyžaduje následné opracování. Tvoří se kvůli nevhodným svařovacím podmínkám a lze jej odstranit snížením svařovací hustoty či zvýšením průtoku ochranného plynu, jenž by odstraňoval odpařované částice.

*Propady* mohou vznikat u tenkých plechů vlivem nadměrné energie, pro nápravu stačí optimalizovat svařovací podmínky, např. spodním ohřevem. U silnějších plechů se propady tvoří v důsledku nadměrného rozstříku při malém množství nataveného materiálu. Předejít těmto jevům lze vyhýbáním se nízkoenergetickým a soustředným stavům či optimalizací laserového pulzního svařování.

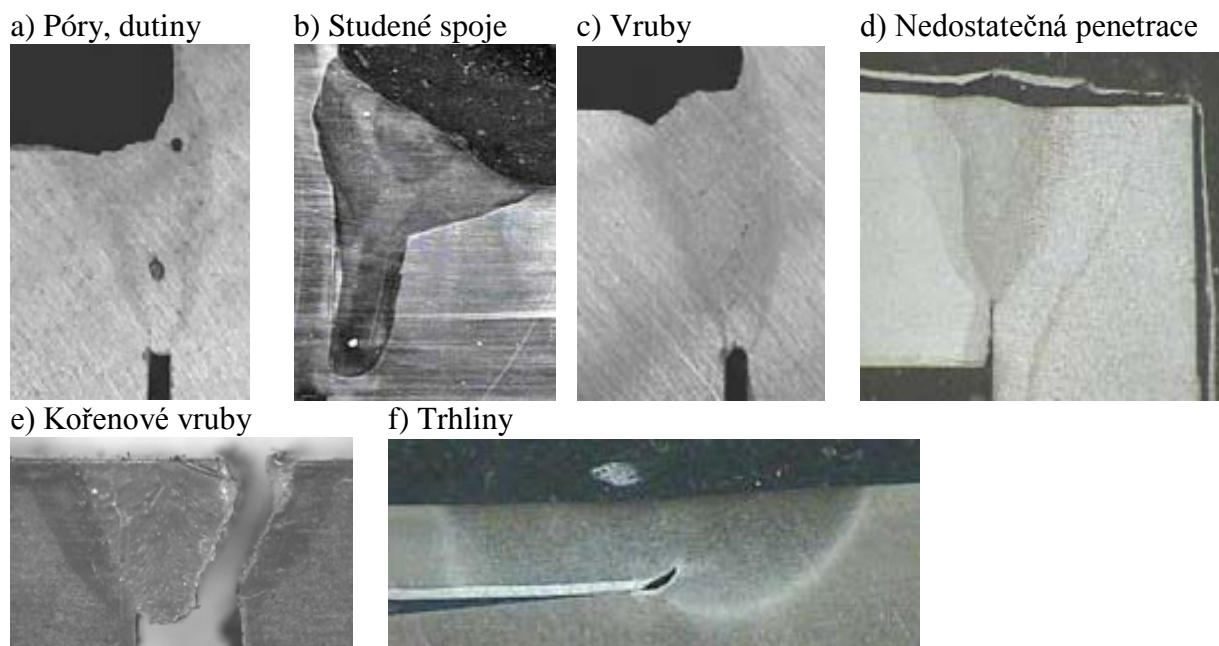
*Vruby*, viz obrázek 29c a 29e, vznikají díky pomalé rychlosti svařování při vysokém tepelném příkonu nebo díky vlastnostem svarového kovu. Omezit vruby lze řádnými svařovacími podmínkami, např. vhodným plynem.

Vnitřní vady svarových spojů nejsou vidět a někdy se obtížně zjišťují. Patří mezi ně trhliny, pórovitost, nedostatečná natavení a nedostatečná penetrace, bobtnání, vměstky, ztráta legujících prvků odpařením, makrosegregace a mikrosegregace.

*Trhlin*, viz obrázek 29f, se tvoří hned několik druhů. Trhliny horké vznikají ve svarovém kovu, studené v tepelně ovlivněné oblasti, likvační trhliny a tuhající trhliny. Příčinou trhlín bývá vysoká rychlost deformace a nízký bod tání a segregace. Prevencí vzniku trhlín je správný výběr svarových a obecných kovů vhodných ke slitinovému mísení, vyhýbání se vysoké svařovací rychlosti, prevence rychle se šířících deformací či optimalizace pulzního svařovacího procesu.

*Pórovitost*, viz obrázek 29a, tedy plynové bublinky, kanálky, póry a dírky, se mohou do svaru dostat například při nedostatečném či příliš velkém proudění pomocného plynu nebo z vlhkosti v ochranném plynu. Předejít pórovitosti lze odstraněním zdrojů kyslíku a vodíku, vytvoření stabilní keyhole, správným výběrem ochranného plynu a jeho průtokem.<sup>[49]</sup>

*Bobtnání* je vada způsobená přehřátím, tedy vysokým svařovacím výkonem. U laserového svařování se bobtnání dá řešit vysokou přilnavostí (bez mezery při přeplátování), vysokou svařovací rychlostí nebo použitím pulzního svařovacího režimu.



Obr. 29 Svarové vady [31]

*Nedostatečná penetrace*, viz obrázek 29d, vzniká kvůli vysoké odrazivosti povrchu a účinku plazmatu. Nedostatečné penetraci se dá předejít řádnými podmínkami pro hlubokou penetraci a zabránění vyosení.

Vměstkům (oxidy apod.) se vyvarovat leštěným povrchem a vhodnými stínícími podmínkami.

K *poklesu legujících prvků* ve svaru dochází odpařováním díky nízkým teplotám taveniny a také těkavým prvkům. Prevencí vůči odpařování legujících prvků je vysokorychlostní svařování s hlubokou penetrací či pulzní režim svařování s vysokou penetrací.

*Makrosegregace* u svarů nastává při neúplném promísení dvou rozdílných materiálů. Promísit oba materiály ve svarové lázni lze kmitáním či pulzací paprsku.

*Mikrosegregace* u svarů nastává kvůli prvkům s nízkými distribučními koeficienty. Mikrosegreci se lze vyvarovat svařováním vysokou rychlostí s nízkým tepelným příkonem a po svaření lze zamezit tepelným zpracováním.

Vady jakosti jsou chemické a mechanické. Chemickým vadám, jako jsou korozní trhliny či koroze na hranicích zrn v důsledku precipitátů, lze předejít svařováním s nízkým tepelným ovlivněním, tedy hlubokým průvarem, či úlevou a relaxací zbytkových pnutí. Mechanickým vadám, mezi něž patří křehnutí, stárnutí a snižování korozní pevnosti se lze vyvarovat vysokou rychlostí, velkou penetrací, svařovacími podmínkami pro prevenci vad a optimálním tepelným zpracováním.

Podle české normy <sup>[11]</sup> se vady řadí do šesti skupin a to na trhliny, dutiny, pevné vměstky, studené spoje a neprůvary a jiné vady.

## 2.6 Svařitelnost materiálu [31] [77]

Laserem lze svařovat různé druhy materiálů, viz tabulka 5. Typickými materiály svařovanými v praxi podle [31] jsou měkká ocel, vysokopevnostní ocel, korozivzdorná ocel, hliníkové slitiny, slitiny pro elektrotechniku (měď, mosaz) a polymery.

Tabulka 5 Svařitelnost materiálů [77].

	Al	Ag	Au	Cu	Pd	Ni	Pt	Fe	Be	Ti	Cr	Mo	Te	W
Al	Velmi dobrá													
Ag	Dobrá	Dobrá												
Au	Dobrá	Velmi dobrá	Velmi dobrá											
Cu	Dobrá	Dobrá	Velmi dobrá	Velmi dobrá										
Pd		Velmi dobrá	Velmi dobrá	Velmi dobrá										
Ni	Dobrá		Velmi dobrá	Velmi dobrá	Velmi dobrá	Velmi dobrá								
Pt		Dobrá	Velmi dobrá	Velmi dobrá	Velmi dobrá	Velmi dobrá	Velmi dobrá							
Fe			Dobrá	Dobrá	Dostatečná	Dostatečná	Dostatečná	Velmi dobrá						
Be			Dobrá	Dobrá	Dobrá	Dobrá	Dobrá	Dobrá						
Ti	Dobrá	Dobrá	Dobrá	Dobrá	Dobrá	Dobrá	Dobrá	Dobrá		Velmi dobrá				
Cr			Dobrá		Dostatečná	Dostatečná	Velmi dobrá	Velmi dobrá		Dostatečná				
Mo						Dobrá	Velmi dobrá	Dostatečná		Velmi dobrá	Velmi dobrá			
Te					Dostatečná	Dostatečná	Dobrá	Dobrá		Velmi dobrá		Velmi dobrá	Velmi dobrá	
W					Dobrá	Dobrá	Dostatečná	Dobrá		Dobrá	Velmi dobrá	Velmi dobrá	Velmi dobrá	Velmi dobrá

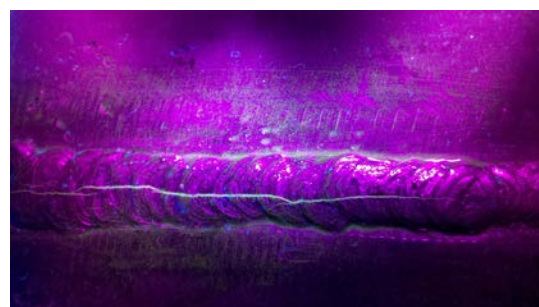
Velmi dobrá  
 Dobrá  
 Dostatečná

## 2.7 Zkoušky svarových spojů [7] [28] [61] [62] [63] [75] [82]

Zkoušky svarů se používají ke zjišťování mechanických vlastností, jakosti, celistvosti a provozní odolnosti spojů. Zkoušky se provádí po svařování a jsou destruktivní a nedestruktivní. Mezi nedestruktivní zkoušky patří vizuální kontrola, kapilární zkouška, magnetická zkouška, zkouška prozářením a zkouška ultrazvukem.

*Vizuální kontrola* je zraková prohlídka povrchu a provádí se dle příslušné normy (ČSN EN ISO 17637 Nedestruktivní zkoušení svarů – Vizuální kontrola tavných svarů). Vizuální kontrolou se zjišťují trhliny, neprovařený kořen, krápníky, zápaly, nadměrná převýšení, hubené svary a další.

Díky *kapilární zkoušce* můžeme zjistit trhliny a studené spoje. Při kapilární zkoušce se nanese na povrch svaru indikační kapalina (petrolej, barevná či fluorescenční kapalina), která zateče do spár. Přebytky indikační kapaliny se otřou a na povrch se nanese detekční látka (plavená křída, rychleschnoucí suspenze). Indikační kapalina ze spár díky své vztlakovosti vyleze na povrch a na detekční látce působí velmi kontrastně, viz obrázek 30. Celý proces kapilární zkoušky se odehrává podle normy (ČSN EN ISO 3452 Nedestruktivní zkoušení – kapilární zkouška).

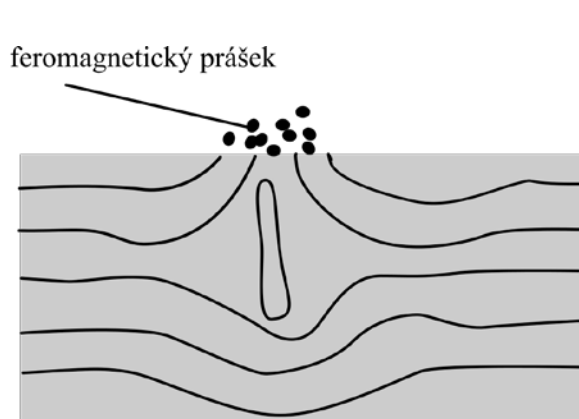


Obr. 30 Kapilární zkouška [83]

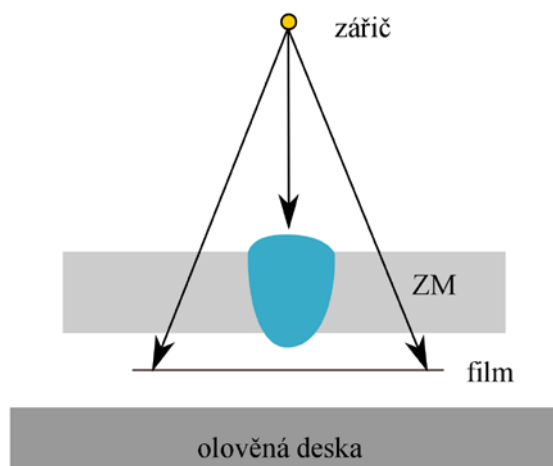
*Magnetická zkouška* se používá k zjišťování povrchových a podpovrchových vad na základě změny magnetického toku, tudíž se může používat pouze u feromagnetických materiálů. Princip zkoušky je posypání povrchu feromagnetickým práškem a jeho následným rozptylem díky magnetickému poli. V místech shluku prášku jsou povrchové či podpovrchové vady, což lze vidět na obrázku 26. Zkouška se provádí podle normy (ČSN EN ISO 17638 Nedestruktivní zkoušení svarů – zkoušení magnetickou metodou práškovou).

*Zkouškou prozářením* se odhalují vnitřní vady v materiálu (bublíny, struskovité vměstky). Zkoušené těleso se prozařuje zářičem vydávajícím rentgenové či gama paprsky. Tyto paprsky prochází s ubývající intenzitou materiálem a po průchodu ozařují fotografický film, tzv. radiogram, tento jev je schematicky zobrazen na obrázku 27. Vnitřní vady materiálu se na něm zobrazují zčernáním a podle typu, velikosti a četnosti se přiřadí kvalifikace stupně

svaru. Zkoušení se provádí podle normy (ČSN EN ISO 17636 Nedestruktivní zkoušení svarů – Radiografické zkoušení).



**Obr. 33 Magnetická zkouška [7]**

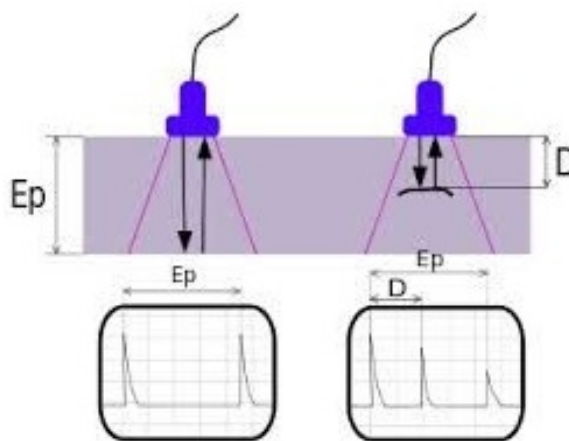


**Obr. 32 Zkouška prozářením [7]**

Zkouška ultrazvukem slouží pro zjišťování vnitřních vad a jejich polohy, provádí se podle normy (ČSN EN ISO 17640 Nedestruktivní zkoušení svarů – Zkoušení ultrazvukem – Techniky, třídy zkoušení a hodnocení). Principem zkoušky je šíření ultrazvukové vlny materiálem, jež se na rozhraní materiálu odrazí. Ultrazvuková vlna se pohybuje při frekvencích 1 až 10 MHz. Celá aparatura se skládá z vysílací sondy, přijímací sondy a defektoskopu. Nález vady můžeme pozorovat na obrázku 33 vpravo, kde první pík označuje počáteční echo, druhý pík označuje odraz echa od vady a třetí pík koncové echo.

Destruktivní zkoušky se liší od nedestruktivních zkoušek zničením zkušební tělesa a to zejména porušením svarového spoje. Do destruktivních zkoušek patří příčná zkouška tahem, zkouška ohybem, zkouška rázem v ohybu, zkouška rozlomením, zkouška tvrdosti, zkoušky makrostruktury a mikrostruktury a zkoušky únavové pevnosti.

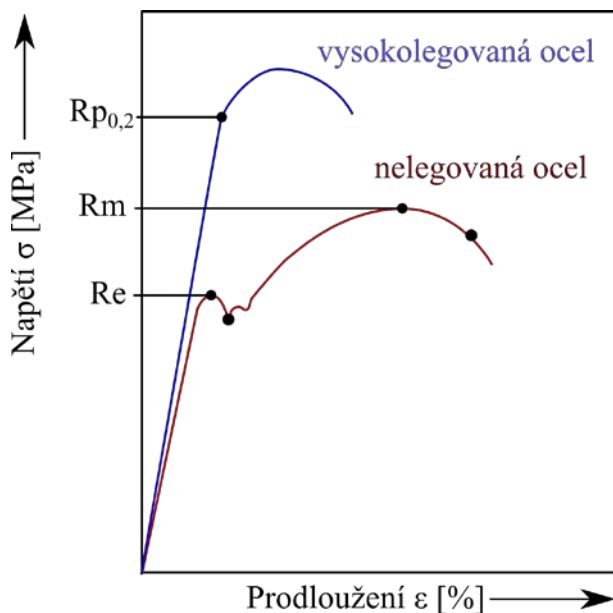
Příčná zkouška tahem se používá pro vyhodnocení mechanických vlastností svarů, zejména meze pevnosti  $R_m$ , meze kluzu  $R_e$  a tažnosti  $A$ , podle příslušné normy (ČSN EN ISO 4136 Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Příčná zkouška tahem). Příčná zkouška tahem spočívá v odebrání ploché či válcové tyče v kolmém směru na osu svarového spoje a její následné přetržení na trhacím stroji. Průběh zkoušky je zaznamenáván do pracovního diagramu, viz obrázek 34. Tyto diagramy jsou charakteristické pro každý druh oceli. U materiálu, kde není výrazná mez kluzu, se stanovuje smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$ .



**Obr. 31 Zkouška ultrazvukem [56]**

Zkouškou ohybem neboli zkouškou lámavosti se zjišťují deformační (plastické) vlastnosti svarových spojů, podle normy (ČSN EN ISO 5173 Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Zkoušky ohybem). Principem zkoušky je ohýbání zkušební tyče dokud se neobjeví trhлина o velikosti 5 mm nebo dokud není dosaženo určitého úhlu, viz obrázek 36. Tyče se zkouší ze strany kořene svaru i ze strany líce.

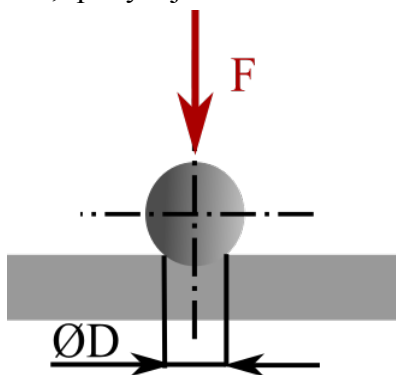




Obr. 34 Pracovní diagram tahové zkoušky [7]

polovina ze strany kořene svaru. Celá zkouška se provádí podle normy (ČSN EN ISO 9017 Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Zkouška rozlomením).

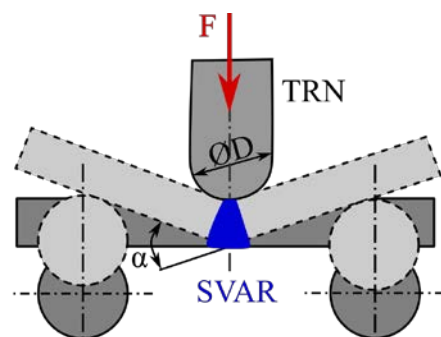
Při zkouškách makrostruktury a mikrostruktury se zkoumá a kontroluje struktura svaru v kolmém řezu. Vzorky na tyto zkoušky se nejdříve vyříznou, obrousí, vyleští a následně se jejich povrch naleptá, osvítlí a pozoruje při různém zvětšení. Vše se provádí dle normy (ČSN EN ISO 17639 Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů). Zkoušky makrostruktury se hodnotí pouhým okem či při několikanásobném zvětšení. Zkoumají se vady typu studených spojů, vměstky, spojení jednotlivých housenek a rozsah tepelně ovlivněné oblasti. U zkoušky mikrostruktury je zvětšení větší, pohybuje se od stonásobného po tisícnásobné zvětšení, a vzorky se již zkoumají pod mikroskopy. U mikrostruktury se zkoumají jednotlivá zrna materiálu, jejich hranice, strukturní složky materiálu svaru ve svarovém kovu i v tepelně ovlivněné oblasti.



Obr. 35 Zkouška dle Brinella [7]

Pomocí zkoušky rázem v ohybu se určuje vrubová houževnatost svarových spojů. Provedení se řídí normou (ČSN EN ISO 9016 Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Zkouška rázem v ohybu – Umístění zkušebních tyčí, orientace vrubu a zkoušení). Jedná se o přeražení zkušební tyče s vrubem jedním rázem kyvadlového kladiva. Podle vykonané práce kladiva na tyči se následně určí hodnoty vrubové houževnatosti.

Zkouškou rozlomením se zjišťují vnitřní vady koutových i tupých svarů u EN zkoušek. Při těchto zkouškách se svarový spoj kontroluje v celé délce tak, že se svar po svaření rozdělí na více zkušebních těles. Tato tělesa se opatří vruby, aby lom vznikl právě ve svarovém kovu. Polovina těles se láme ze strany líce svaru a druhá



Obr. 36 Zkouška lámavosti [7]

Zkoušky tvrdosti se používají k určení tvrdosti materiálu. Nejpoužívanější zkoušky tvrdosti jsou zkoušky podle Brinella, Rockwella a Vickerse.

Podle Brinella (HB) se do kovově čistého povrchu materiálu vtlačuje silou  $F$  ocelová kulička o určitém průměru (0,625; 1,25; 2,5; 5; 10 mm), jak je vidět na obrázku 36. Ve zkoušeném materiálu vznikne otisk, jehož průměr se změří. Tvrdost se následně vyhodnotí odečtením z tabulek či výpočtem ze zatěžovací síly  $F$  a povrchu otisku  $S$ . Zkouška podle Brinella se používá pouze pro měkké a heterogenní materiály, jako jsou neželezné kovy, šedé litiny aj.

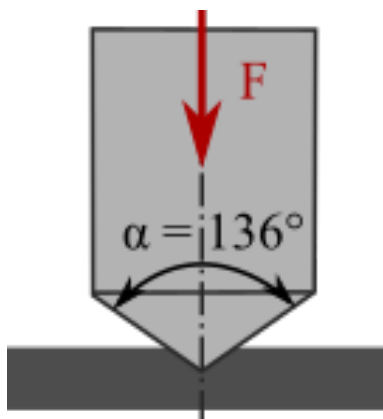
Podle Vickerse (HV) se do kovově čistého povrchu materiálu vtláče čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem stěn  $136^\circ$ . V povrchové vrstvě vznikne otisk, u něhož se měří jeho úhlopříčky, viz obrázek 37. Ze zatěžovací síly  $F$  a z aritmetického průměru změřených úhlopříček se podle vztahu 2.2 vypočítá tvrdost HV. Zkouškou podle Vickerse se dají měřit kovy od nejměkčích až po nejtvrďší kalené oceli.

$$HV = 0,189 \frac{F}{a^2}, \quad (2.2)$$

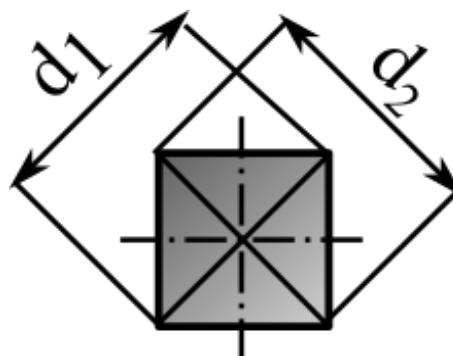
kde je HV [HV] tvrdost podle Vickerse,

$F$  [N] zatěžující síla,

$a$  [mm] průměrná hodnota úhlopříčky.



Obr. 38 Diamantový jehlan [7]



Obr. 37 Vickers měření úhlopříček [7]

Podle Rockwella (HRA, HRB, HRC) se do kovově čistého povrchu materiálu vtláče silou  $F$  diamantový kužel či kalená ocelová kulička. Otisk vzniklý v materiálu se měří přímo na stupnici přístroje, kde se odečte hodnota odpovídající dané tvrdosti. Ocelová kulička (HRB) je používán pro měkké materiály a pro materiály tvrdé je používán diamantový kužel (HRC).

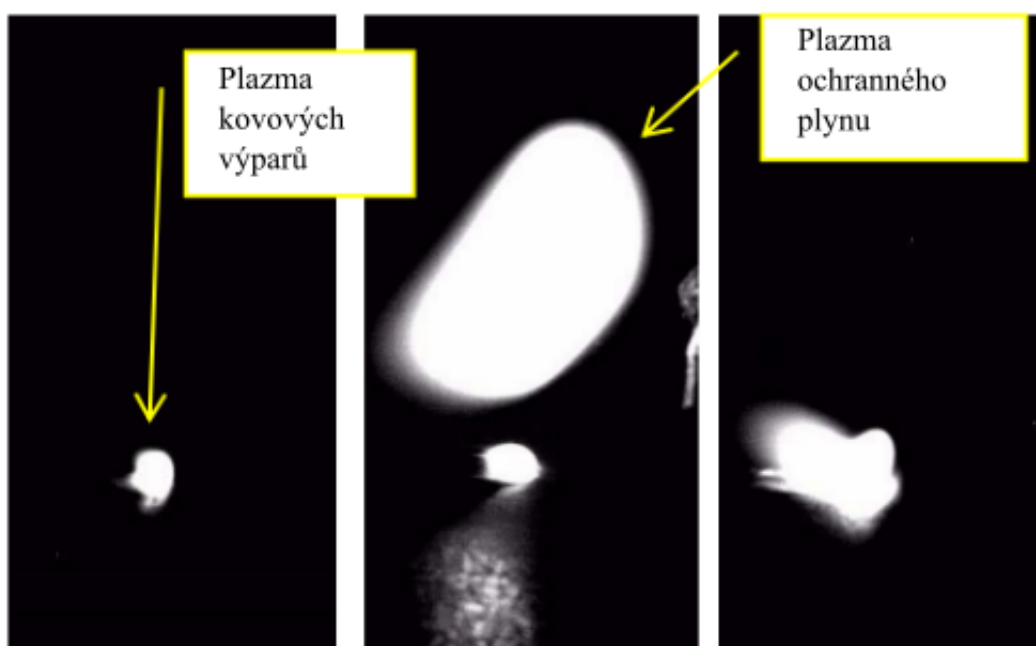
### 3 OCHRANNÉ ATMOSFÉRY A JEJICH VLIVY NA SVARY<sup>[7][44][49][69]</sup>

Ochranné atmosféry u laserového svařování působí na řadu faktorů. Chrání roztavený kov před účinky okolní atmosféry, zejména před plynným kyslíkem. Odfukují plazmový oblak tvořící se v keyhole a nad ní z oblasti působení laserového svazku, čímž snižují nepříznivý vliv oblaku plazmatu na svar, viz obrázek 39. Potlačují oxidaci kovu a vznik vnitřních defektů (tvorba pórů, bublin atd.) a působí na hydrodynamické procesy v oblasti keyhole.

Jako ochranná atmosféra se používají zejména netečné čisté inertní plyny anebo jejich směsi. U ochranných plynů jsou důležitými parametry druh plynu, umístění trysky a průtok plynu.

*Průtok plynu* je třeba zvolit optimální. Nedostatečný průtok plynu nezabezpečuje kvalitní ochranu svarové lázně před okolní atmosférou. Nadbytečný průtok pak může znamenat zbytečné ekonomické ztráty.

Zvýšení průtoku přídatného plynu může znamenat i zvýšení hloubky svaru, avšak pouze do určité míry, další zvětšování průtoku způsobuje pórovitost.



Obr. 39 Tvorba plazmatu – ochranná atmosféra He (vlevo), Ar (uprostřed), N<sub>2</sub> (vpravo) [66]

*Umístění trysky* je dvojího druhu. Koaxiální tryska, u níž padá plyn dolů a zaplavuje svarovou lázeň a boční tryska, která působí pozitivněji pro odfuk plazmatu.

#### 3.1 Druhy ochranných plynů [7] [10] [28] [44] [64] [66] [69]

Existuje celá řada ochranných plynů určených pro laserové svařování. Používají se inertní plyny argon, helium, jejich směsi a směsi s dalšími plyny jako dusík, vodík, kyslík či oxid uhličitý. Záleží na druhu svařovaného materiálu.

Prospěšnými plyny pro austenitické korozivzdorné oceli jsou helium, argon, vodík. Nepříznivý vliv na kvalitu svarů mají kyslík a dusík.

*Kyslík* ve svaru ovlivňuje korozivzdornost. U korozivzdorných ocelí na sebe kyslík váže chrom z tuhého roztoku a vytváří na povrchu oxidickou vrstvu, jež má vysoký obsah chromu. Kvůli snížení obsahu chromu v tuhém roztoku se snižuje korozivzdornost ve svarech. Oxidy chromu z povrchu se odstraňují mořením či mechanicky. Chránit svar vůči kyslíku lze použitím vhodného ochranného plynu s obsahem kyslíku nižším než 25 ppm.

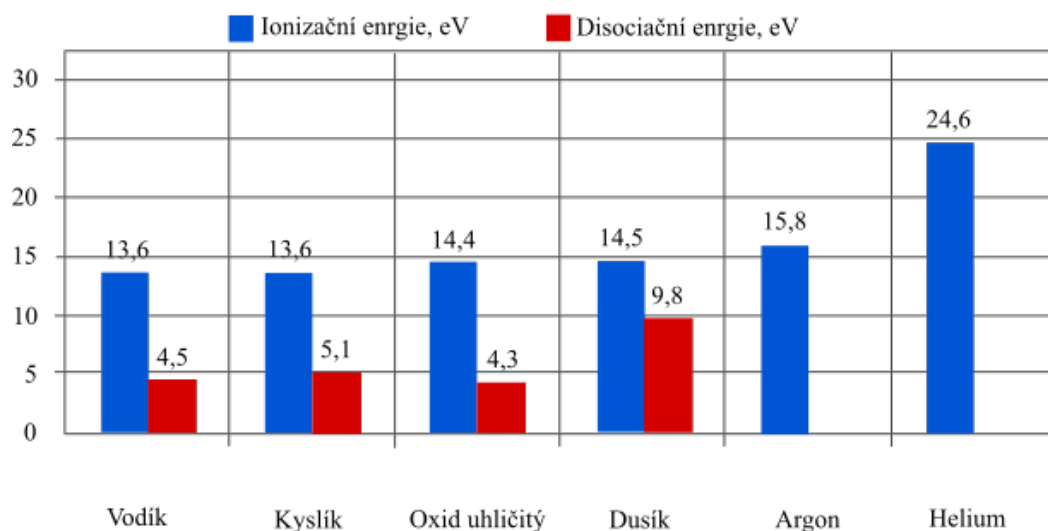


Dusík způsobuje u austenitických ocelí pórovitost. Snižuje obsah feritu v austenitu a způsobuje tak náchylnost k trhlinám za horka. Předějit trhlinám za horka lze snížením obsahu dusíku v ochranném plynu pod 5 %.

Ochrannými plyny lze ovlivňovat svařovací parametry. Díky nim lze zamezit či alespoň zmenšit odpařování mimo osu laserového svazku. U ochranných plynů rovněž závisí na ionizačním potenciálu. Vyšší hodnota ionizačního potenciálu znamená menší náchylnost ke vzniku plynového plazmatu, viz obr. 39. Ionizační potenciály jednotlivých plynů jsou znázorněny v grafu na obrázku 40. Plyny s vyšším ionizačním potenciálem a tepelnou vodivostí mají největší hodnoty efektivnosti přetavení. Díky vhodné volbě ochranného plynu lze zvýšit i průvar materiálu<sup>[44]</sup>. Chování plynů ovlivňuje také měrná hmotnost. Měrné hmotnosti jednotlivých plynů jsou uvedeny v tabulce 6.

Tabulka 6 Přehled ochranných plynů [10].

Plyn	Měrná hmotnost při 0 °C a tlaku 10 <sup>5</sup> Pa [kg·m <sup>-3</sup> ]
Argon	1,759
Helium	0,1762
Vodík	0,08895
Dusík	1,234
Kyslík	1,409
Oxid uhličitý	1,951
Vzduch	1,275



Obr. 40 Graf ionizační a disociační energie plynů [67]

### 3.1.1 Argon – Ar [7][42][43][66][67][69]

Argon je inertní jednoatomový plyn s vysokou měrnou hmotností, viz tabulka 6, takže přisvařování klesá směrem dolů a zalévá svarovou lázeň. Argon má malou tepelnou vodivost a nízkou ionizační energii, díky níž se vytváří plyný plazmový oblak, jenž lze vidět na obrázku 39.

V praxi se používá plyn o čistotě 99,995 % (Argon 4.5) a vyšší. Zbytek procent tvoří nečistoty jako kyslík, dusík, vodík či vlhkost. Průtok plynu se pohybuje od 0,13 do 0,33 l·s<sup>-1</sup>. Laserové svařování za pomoci argonu zamezuje zkřehnutí svaru a také vzniku trhlin. Využití argonu je vhodné při svařování Nd:YAG lasery a pro reaktivní materiály.

### 3.1.2 Helium - He [7] [42] [43] [44] [64] [66] [67] [69]

Helium je stejně jako argon inertní jednoatomový plyn. Helium má nízkou měrnou hmotnost, oproti argonu je jeho měrná hmotnost asi desetinná a je tedy výrazně lehčí než vzduch, jak je možné vidět v tabulce 6. Po opuštění plynové trysky míří vzhůru a šíří se všemi

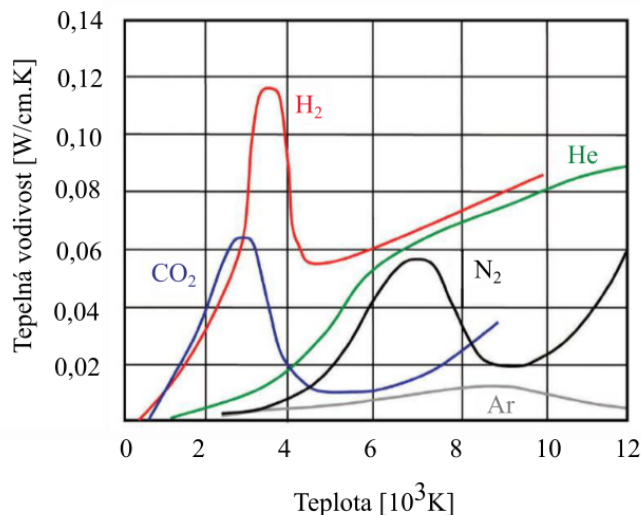
směry. Kvůli nízké měrné hmotnosti helium nedostatečně chrání svarovou lázeň, a proto je potřeba vyšších průtoků plynu, jež se pohybují od 0,5 do 0,583 l·s<sup>-1</sup>.

Do praktického využití je plyn dodáván s minimální čistotou 99,993 % (Helium 4.3). Mezi nečistoty v heliu patří další vzácné plyny. Zároveň se vyznačuje vysokou tepelnou vodivostí za vyšších teplot, viz obrázek 41, čímž poskytuje svarům vynikající kvalitu svaru s hlubokým průvarem a vysokou rychlostí svařování. Velká výhoda použití helia spočívá v jeho vysokém ionizačním potenciálu, který brání vzniku plazmatu.

### 3.1.3 Vodík - H [5] [16] [67] [69]

Vodík je dvouatomový redukční plyn. Svou redukční schopností chrání svary vůči kyslíku a tedy i před vznikem oxidů ve svarech a na jejich povrchu. Vodík dodává svarům nízkou viskozitu svarové lázně. Je nejlehčí z plynů a má podobné účinky jako helium při použití nižšího obsahu (vyšší výkon, hlubší průvar).<sup>[16]</sup> Oproti heliu má však nižší ionizační potenciál.

Vodík je škodlivý u martenzitických a feriticko-martenzitických ocelí kvůli vzniku trhlin, avšak u vysokolegovaných Cr-Ni ocelí je vznik trhlin potlačen vyšší rozpustností vodíku v austenitu.



Obr. 41 Graf tepelné vodivosti ochranných plynů [67]

### 3.1.4 Směsi plynů [45] [49] [69]

Směsi plynů tvoří samostatnou kapitolu ochranných plynů. U směsných plynů se využívá výhod všech plynů. Lze je rozdělit na směsi dvou složkové (argon s příměsí helia, vodíku či jiných prvků) a na směsi více složkové.

*Směs argonu s heliem*, přičemž množství helia v argonu se pohybuje od 30 do 70 %, má z hlediska svařování několik výhod. Se stoupajícím množstvím obsahu helia ve směsi roste svařovací výkon. Pro směs argonu s heliem se používá malý, respektive žádný předehřev. Směs brání vzniku pórů a studených spojů. Průvar a svařovací rychlost se řídí poměrem argonu vůči heliu pravidlem, že čím je tlustší materiál, tím je vyšší i podíl helia ve směsi. Směs argonu s heliem se používá zejména na svařování Cr-Ni ocelí a niklových slitin a je vhodná pro všechny polohy a tloušťky plechů.

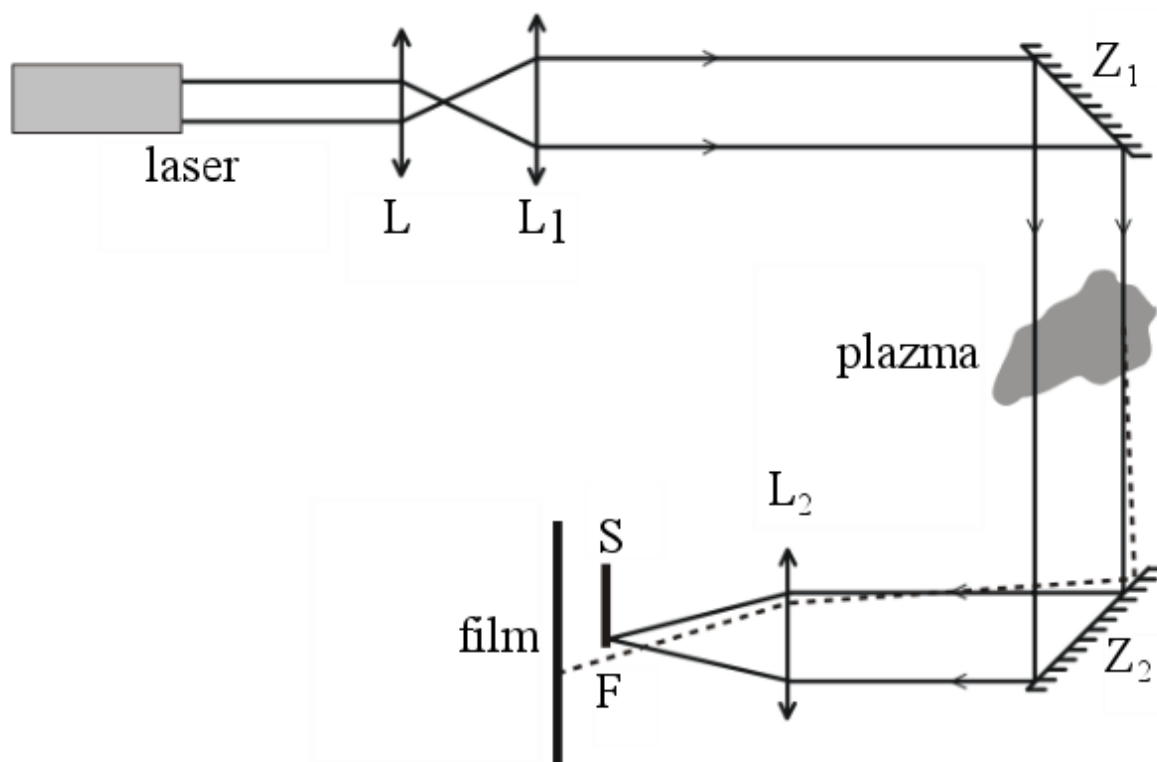
*Směs argonu s vodíkem* se ve svařování používá k ochraně svarové lázně před oxidací, zlepšuje průvar a předchází vzniku pórovitosti.

## 3.2 Šlířová zobrazovací metoda [13] [36] [71]

Šlířová metoda je foto-optická metoda zobrazení proudění plynů v pozorované oblasti. Výhodou této metody je nízká cena při vysoké citlivosti. Omezení šlířové metody plynou z velikosti zobrazovaného pole. Zobrazování je možné pouze za předpokladu, že v zorném poli jsou přechody či hranice hustot. Tyto hranice či přechody vedou k vychýlení dráhy světelných paprsků procházejících v těsné blízkosti nebo prostřednictvím přechodových gradientů.

Zkouška spočívá v osvětlení pozorovaného prostoru zdrojem nerozbíhavého světla (laser, dioda) tak, že dojde k vychýlení paprsku od původního směru. Neodražené paprsky jsou odstíněny neprůhledným břitem S v ohnisku F a odražené paprsky dopadají na stínítko či film.

Děj je znázorněn na obrázku 42. Výsledkem zkoušky je fotografie, na níž nelze vidět samotný plyn. Fotografie však zachycuje příčné přechody a hranice plynu.



Obr. 42 Princip šlirové zobrazovací metody [36]

## 4 AUSTENITICKÉ OCELI [6] [7] [22] [41] [45] [75]

Austenitické oceli patří do skupiny vysoce legovaných korozivzdorných ocelí, jelikož obsahují více než 24 % legur. Korozivzdorné oceli se vyrábí kvůli zlepšení korozních, žárupevných a žáruvzdorných vlastností, zvýšení odolnosti vůči opotřebení, zlepšení vlastností za nízkých teplot a k dosažení určitých elektrických či magnetických vlastností. Mezi další přednosti korozivzdorných ocelí patří krásný vzhled, vysoký poměr pevnosti vůči hmotnosti, snadné čištění a sterilizace. Přehled srovnání druhů korozivzdorných ocelí z hlediska fyzikálních vlastností je v tabulce 7.

Tabulka 7 Srovnání jednotlivých druhů korozivzdorných ocelí s uhlíkovou ocelí[41].

Vlastnosti	Austenitická Cr-Ni ocel	Feritická Cr ocel	Martenzitická ocel	Precipitačně zpevněná ocel	Uhlíková ocel
Měrná hmotnost materiálu [kg/m <sup>3</sup> ]	7,8-8,0	7,8	7,8	7,8	7,8
Modul pružnosti v tahu [GPa]	193-200	200	200	200	200
Tepelná vodivost při 100 °C [W/mK]	18,7 - 22,8	24,4 - 26,3	28,7	21,8 - 23	60
Oblast tavení [°C]	1400 - 1450	1480 - 1530	1480 - 1530	1400 - 1440	1538

Korozivzdornost těchto ocelí zajišťuje jejich složení, jež zahrnuje méně než 0,1 % uhlíku a austenitotvorných prvků, které v rovnovážném diagramu rozšiřují oblast  $\gamma$ , a jimiž jsou chrom (16 až 22 %), nikl (8 až 40 %), molybden (0 až 5 %) a další prvky jako dusík, titan, niob, měď či křemík. Významným legujícím prvkem u austenitických ocelí je chrom, jelikož zajišťuje dobrou korozní odolnost. Do skupiny austenitických ocelí tedy patří chrom-manganové, chrom-nikl-manganové a chrom-niklové oceli.

Austenitické oceli lze rozdělit do tří skupin: stabilizované, nestabilizované a s nízkým obsahem intersticiální fáze.

### 4.1 Vlastnosti austenitických korozivzdorných ocelí [6][12][21][22][44][48][72]

Austenitické oceli mají austenitickou monofázovou strukturu bez polymorfni přeměny za pokojových, vysokých (max. 850 až 1100 °C)<sup>[12]</sup> i kryogenních teplot (pod bodem mrazu). Mají plošně středěnou kubickou mřížku, díky níž jsou nemagnetické, avšak zbytkový ferit (3 až 10 %) v těchto ocelích může vytvářet slabý magnetismus.

Austenitické oceli mají lepší korozní odolnost, velkou vrubovou houževnatost při nízkých kryogenních teplotách (až 240 J·cm<sup>2</sup> při -196 °C)<sup>[21]</sup>, o polovinu větší tepelnou roztažnost a o 30 % menší tepelnou vodivost ve srovnání s feritickými či uhlíkovými oceli.

Austenitické oceli jsou velmi tvárné, mají vysokou tažnost (45 až 65 %)<sup>[21]</sup>, vysokou pevnost a rovněž vysokou mez kluzu, viz tabulka 8 s příklady ocelí. Značné zpevnění se projevuje u austenitických ocelí tvářených za studena, protože při deformaci za studena vzniká martenzitická struktura. Tato struktura je však nevhodná pro použití při kryogenních teplotách.

**Tabulka 8 Příklady austenitických ocelí – oceli byly vyžháný na měkko (1010–1120 °C) a tvářené či zpevněné za studena[72].**

Typ oceli	Nominální složení	Mez kluzu [MPa]	Pevnost v tahu [MPa]	Tažnost [%]	Tvrdość podle Brinella [N/mm <sup>2</sup> ]	Vrubová houževnatost při 20 °C [J]
X10CrNi18-8	max.0,15C 16 - 19,5Cr 6,0-9,5Ni	275 - 1035	760 - 1275	60	165	135
X5CrNi18-10	max. 0,07C 18 - 20Cr 8 - 12Ni	240 - 1035	585 - 1240	55	150 až 330	135
X5CrNiMo17-12-2	max. 0,08C 16 - 18Cr 10 - 14Ni 2,0-3,0Mo	240 - 860	585 - 1035	55	150 až 300	120
X6CrNiTi18-10	max. 0,08C 17 - 19Cr 9 - 12Ni Ti = min.5xC	240 - 860	600 - 1035	55	150	120

#### 4.2 Nestabilizované austenitické oceli [6] [22]

Přibližné složení nestabilizovaných austenitických ocelí je 0,1 % uhlíku, 18 % chrómu a 8 % niklu. U těchto ocelí dochází v rozmezí teplot 480 až 800 °C (při svařování se dosahuje teploty v TOO i 650 °C) ke vzniku karbidu chrómu Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> na hranicích zrn. Při svařování může být tento jev nepříznivý, jelikož ochuzuje matici o chróm a způsobuje tak mezikrystalickou korozi. Odstranit vzniklé karbidy lze rozpouštěcím žháním na 1100 °C a následným rychlým ochlazením.

#### 4.3 Stabilizované austenitické oceli [6] [22]

Stabilizace austenitických korozivzdorných ocelí spočívá ve stabilizaci atomů chrómu v matici. Stabilizace může být provedena dvojím způsobem, první spočívá v použití nízkého obsahu uhlíku a druhý ve stabilizaci pomocí legur.

Stabilizace použitím nízkouhlíkové austenitické oceli, s maximálním obsahem uhlíku 0,02 až 0,03 %, spočívá v předpokladu, že čím menší procento uhlíku v matici bude, tím méně chrómu se může z matrice vyvázat a tuhý roztok nedosáhne pod kritickou hranici 12 %. U těchto ocelí je však nákladná výroba.

Ke stabilizaci pomocí legur se používají prvky s větší afinitou k uhlíku než chróm, tedy zejména titan a niob, v nižší míře pak vanad, zirkon a tantal. Tyto prvky tvoří karbidy, karbonitridy či nitridy již za vyšších teplot než probíhá tvorba karbidů chrómu a na tvorbu Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> již nezůstane dostatek uhlíku. Avšak dlouhodobé zatížení svarů teplotami nad 350 °C může způsobit rozpuštění karbidu titanu a opětovnou precipitaci Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>. Tento jev způsobuje tzv. nožovou korozi.

#### 4.4 Koroze [6] [21] [22] [44]

Koroze je chemická či elektrochemická reakce na povrchu kovu či slitiny, kdy kov přechází do okysličeného stavu. Austenitické oceli mají lepší korozní odolnost vůči celkové korozi, čemuž napomáhají chróm, měď, křemík a nikl.

Přesto však jsou austenitické oceli náchylné na určité druhy koroze a těmi jsou mezikrystalická koroze, korozní praskání pod napětím, bodová (štěrbinová) koroze a mikrobiologická koroze.

*Mezikrystalická koroze* se vyskytuje u nestabilizovaných ocelí ve svarovém kovu i v tepelně ovlivněné oblasti při ohřevu teploty na 450 až 850 °C. Při ohřevu na tyto teploty se na hranicích zrn začne z austenitu vylučovat uhlík, který se sebe váže chróm a tvoří nestabilní karbidy chrómu  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ . Pokud klesne obsah chrómu v matici pod hranici 12 %, tak materiál ztrácí svoji schopnost odolávat mezikrystalické korozi.

Potlačení vzniku mezikrystalické koroze lze dosáhnout použitím nestabilizovaných ocelí s velmi nízkým obsahem uhlíku (max. 0,03 %), rychlým ochlazením svarových spojů a zachováním austenitické struktury, rozpouštěcím žháním při teplotě 1050 až 1100 °C. Použitím stabilizovaných ocelí (titanem či niobem), jež brání vzniku nestabilních karbidů.

Specifickou mezikrystalickou korozi je tzv. *nožová koroze*, jež vzniká mezi základním materiálem a svarovým kovem a vzhledově připomíná zářez nožem. Její vznik je podmíněn ohřevem materiálu při svařování nad teplotu 1300 °C. U nožové koroze dochází k nerovnoměrnému rozpouštění karbidů titanu a niobu a následnému vzniku karbidů chrómu.

*Korozní praskání pod napětím* vzniká při zvýšeném mechanickém napětí ve specifických korozních prostředích (např. zvýšená koncentrace chlóru a chloridů ve vodě, sody, halogenových prvků, F, B, I, horká voda s přebytkem kyslíkových iontů). Korozní praskání se projevuje vznikem rozvětvených trhlin. Korozní praskání lze omezit přidáním fosforu, arzenu, antimonu či cínu.

Zvýšení odolnosti austenitických ocelí proti koroznímu praskání lze vyžháním svarových spojů na snížení hladiny napětí při 900 °C, volbou ocelí s vyšším obsahem niklu (anebo jiným chemickým složením s menší náchylností na praskání) nebo odstraněním chloridů, kyslíku a dalších prvků z prostředí.

*Bodová koroze* se projevuje ve šterbinách a u necelistvostí svarových spojů vlivem vměstků. Proti bodové korozi lze ocel chránit legujícími prvky jako molybdenem, křemíkem či dusíkem.

*Mikrobiologická koroze* je způsobena porušením pasivační vrstvy oxidů během procesu svařování. Okolí svaru lze znovu chránit nanesením pasivační vrstvy, např. kyseliny fosforečné.

#### **4.5 Průmyslové použití [15] [21] [65]**

Austenitické oceli mají, díky své velmi dobré korozní odolnosti, různá využití, záleží především na jejich chemickém složení. Nejrozšířenější oceli jsou oceli s označením X5CrNi18-10 (oceli s 0,08 % uhlíku, 18 % chrómu a 10 % niklu). Použití těchto ocelí je v potravinářském, chemickém, farmaceutickém průmyslu (na potrubní systémy, nástroje, nádoby, přístroje atd.), kvůli dobré chemické odolnosti a snadné sterilitě. Ale využití nachází i ve stavebnictví a architektuře.

Oceli se zvýšenou odolností proti oxidaci, díky většímu obsahu chrómu a niklu (např. X15CrNiSi201, X12CrNi2521), nachází využití v těžařském a hutním průmyslu, třeba na spalovacích pecích.

Průmyslové využití ocelí s odolností proti mezikrystalické korozi, např. X6CrNiTi1811 nebo X6CrNiMoTi1712, spočívá v jejich použitelnosti v extrémních teplotních podmínkách, které představují (např. spalovací části motorů či přehříváče par).



## 5 PRAKTICKÁ ČÁST [2]

V rámci praktické části bylo provedeno 10 svařovacích experimentů s ocelovými vzorky z nerezové oceli X5CrNi18-10 (složení viz tabulka 9) tloušťek od 1 do 5 mm dodanými po dohodě s firmou AQUAdem s.r.o. a tyto vzorky byly následně použity pro vybrané zkoušky popsané v kapitole 2.7. Byla rovněž provedena šlířová zobrazovací metoda pro porovnání proudění použitých plynů.

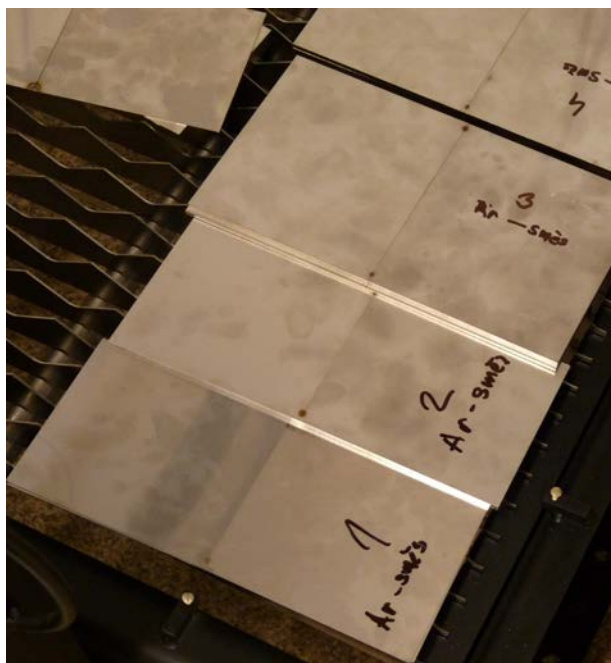
Tabulka 9 Chemické složení oceli X5CrNi18-10 (1.4301 či 17 240) [2] [65]

Prvek	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N
Obsah v %	≤ 0,07	≤ 1,0	≤ 2,0	≤ 0,045	≤ 0,015	17,0 – 19,5	8,0 – 0,5	≤ 0,11

### 5.1 Příprava svařovacího experimentu

Samotný svařovací experiment předcházela jeho příprava, tedy příprava vzorků a příprava pracovních plynů. Ocelové vzorky tvořily vždy dva plechy. Plechy s tloušťkou 1 a 2 mm měly rozměry 280x120 mm a plechy s tloušťkou 3, 4 a 5 mm měly rozměry 280x160mm. Tyto plechy byly k sobě bodově zafixovány laserem s mezerou 0,1 mm, jak je vidět na obrázku 43. Bodové svaření spočívalo ve dvou bodech, vždy cca 5 mm od okraje. Bodová fixace vzorků se provádí pro zajištění správné geometrie svaru.

Důležitá část přípravy spočívala v přípravě pracovních plynů, tedy Argonu s čistotou 4.6 a namíchání směsi ArMix.



#### 5.1.1 Směs plynů ArMix [10] [26] [45]

Směs ArMix je směs argonu, helia a vodíku, přičemž přesné složení je uvedeno v tabulce 10. Tato směs byla vytvořena právě pro laserové svařování austenitických korozivzdorných ocelí pevnolátkovými lasery, zvláště pro prostorové svařování a to díky optimalizované měrné hmotnosti.

Vyvážením hustot jednotlivých procesních plynů se dosahuje téměř stejné měrné hmotnosti ( $1,223 \text{ kg/m}^3$ ), jakou má okolní vzduch ( $1,275 \text{ kg/m}^3$ )<sup>[10]</sup>, přičemž vysokou měrnou hmotnost argonu vyrovnávají nízké hustoty vodíku a helia. Lahev s plynem ArMix je na obrázku 44.

Vodík ve směsi pohlcuje energii z plazmy a následně ji dodává do svařovacího procesu. Díky této dobré tepelné vodivosti zlepšuje svařovací rychlost, tvar svarů a snižuje se i množství porů ve svarech. Vodík na sebe váže kyslík z okolní atmosféry před její reakcí se svarovou lázní, což způsobuje svařování bez oxidů.

Helium je ve směsi důležité pro odfuk zplodin a odvod tepla, díky své vysoké teplené vodivosti



Obr. 43 Láhev s plynem ArMix

v rozmezí teploty místnosti a teploty varu či tání daného kovu. Rovněž helium ve směsi plní funkci vyvážení měrné hmotnosti směsného plynu a zároveň je jeho obsah příliš malý, aby tvořil plazmový oblak u CO<sub>2</sub> laserů. Plyny helium i vodík ve směsi ovlivňují viskozitu svařové lázně.

Výhody směsi spočívají v redukci oxidace svarů, při stejných parametrech k vyšší penetraci, k optimalizaci svařovacího procesu, k vyšší stabilizaci procesu, k redukci tvorby pórů, zjednodušení obnovy ztrát energie během svařovacího procesu a u austenitických ocelí snižuje deformaci a praskání.

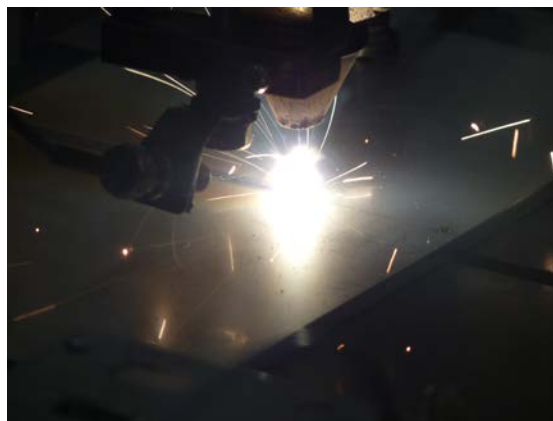
**Tabulka 10**  
**Složení směsi**  
**ArMix.[26]**

Ar	69 %
He	26 %
H	5 %

## 5.2 Svařovací experiment

Vzorky z nerezové oceli X5CrNi18-10 o různých tloušťkách za působení dvou různých plynů se svařovaly pomocí vláknového pevnolátkového ytterbiového laseru s maximálním výkonem 2 kW od firmy IPG photonics. Manipulace s laserovou hlavou byla zajištěna pomocí robotického ramene od firmy ABB.

Bodově svařené vzorky byly upnuty na svařovací stůl a následně svařeny, viz obrázek 45. Nastavení svařovacího procesu je na obrázku 46. Prvních 5 vzorků se svařovalo v ochranné atmosféře Argonu a druhých 5 vzorků v ochranné atmosféře směsi ArMix. Tlak plynu byl 0,2 Bar (20 kPa) a průtok plynu 18 l/min. Svařovalo se vždy za stejných svařovacích podmínek a tyto svařovací podmínky jsou uvedeny v tabulce 11. V tabulce 11 jsou rovněž uvedeny hodnoty specifického vneseného tepla spočítaného podle vztahu (2.1).



**Obr. 45 Průběh svařování**

Z vypočtených hodnot vneseného tepla, uvedených v tabulce 11 je potvrzené, že hodnota specifického vneseného tepla je vůči ostatním svařovacím metodám velmi malá, viz tabulka 3.

U laserového svařování keyhole kmitá, tedy kmitavě se mění její průměr. Při svařovacím experimentu dosahovala keyhole průměrů, jež jsou uvedeny v tabulce 12 a v přílohách 3 a 4. Z tabulky 12 je rovněž patrné, že směs ArMix u vyšších tloušťek plechů má nižší průměrnou hodnotu průměru keyhole.

**Tabulka 11 Svařovací parametry a výpočty specifického vneseného tepla.**

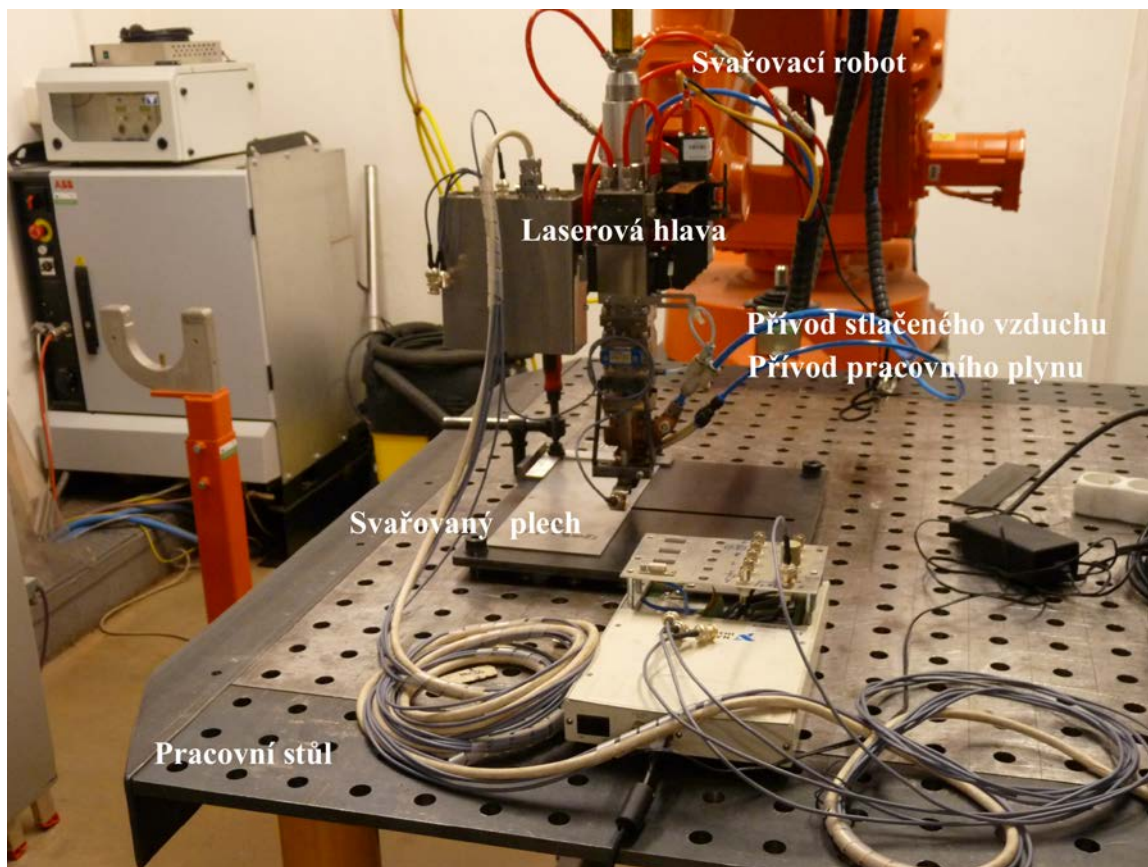
Tloušťka plechu t [mm]	Výkon P [W]	Svařovací rychlost v [mm.s <sup>-1</sup> ]	Ohnisko F <sub>o</sub> [mm]	Svařovací mezera z [mm]	Účinnost η [-]	Specifické vnesené teplo Q [J.mm <sup>-1</sup> ]
1	800	30	0	0.1	0,68	18,1
2	1 200	30	0	0.1	0,72	28,8
3	1 600	20	+1	0.1	0,77	61,6
4	1 800	10	+1	0.1	0,81	145,8
5	2 000	10	+1	0.1	0,85	170,0

Po svaření plechů se vyhodnocovaly povrchy svarů ze stran kořene svarů i ze stran líců svarů. Na obrázcích 47 až 49 je srovnání líců plechů o tloušťkách 3 až 5 mm. Na těchto obrázcích lze vidět, že při svařování v ochranné směsi argonu se na povrchu svaru tvoří více oxidů než při svařování v ochranné směsi ArMix.



**Tabulka 12 Průměrné hodnoty průměrů keyhole, všechny hodnoty jsou v mm.**

Tloušťka plechu t		1	2	3	4	5
Ochranná atmosféra	Argon	0,428	0,514	0,615	0,668	0,693
	ArMix	0,421	0,530	0,615	0,657	0,676

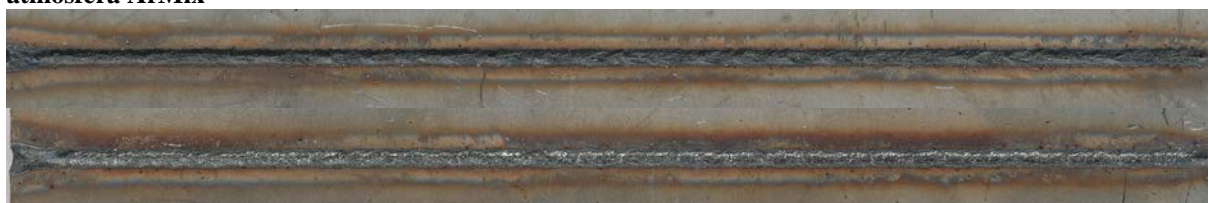


**Obr. 46 Nastavení laseru při svařováním**

Na obrázcích 47 až 49 je rovněž vidět, že svary svařené ve směsné ochranné atmosféře ArMix mají rovnoměrnější závar.



**Obr. 47 - Líce svarů tloušťky 3 mm – nahoře ochranná atmosféra argonu, dole směsná ochranná atmosféra ArMix**

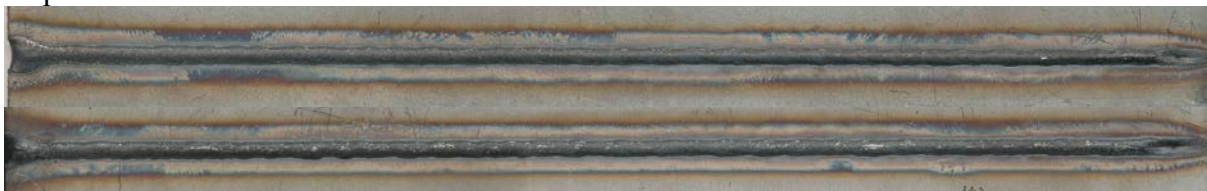


**Obr. 48 - Líce svarů tloušťky 4 mm – nahoře ochranná atmosféra argonu, dole směsná ochranná atmosféra ArMix**

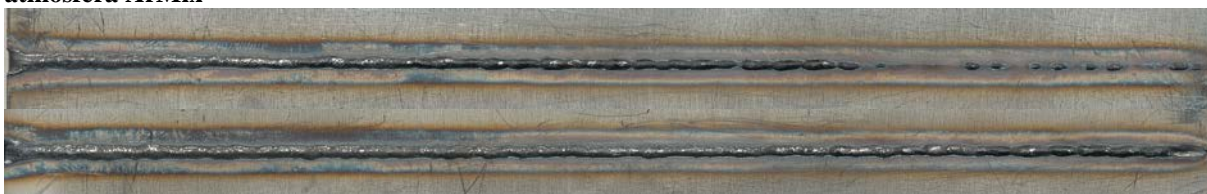


**Obr. 49 - Lice svarů tloušťky 5 mm – nahoře ochranná atmosféra argonu, dole směsná ochranná atmosféra ArMix**

Na obrázcích 50 až 51 jsou nafoceny kořeny svarů tlouštěk plechů 4 a 5 mm. U svaru tloušťky 4 mm má směsná ochranná atmosféra vystouplejší kořen než ochranná atmosféra argonu. A u tloušťky 5 mm lze na obrázku 50 ke konci svaru v ochranné atmosféře argonu vidět neprůvar. Proto lze říci, že směsná ochranná atmosféra ArMix má pozitivní vliv na průvar svaru.



**Obr. 50 - Kořeny svarů tloušťky 4 mm – nahoře ochranná atmosféra argonu, dole směsná ochranná atmosféra ArMix**



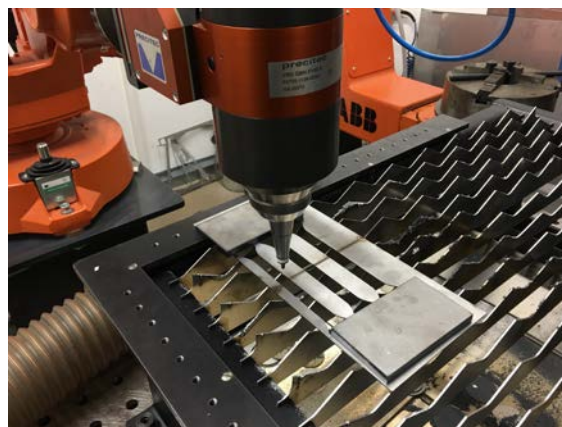
**Obr. 51 – Kořeny svarů tloušťky 5 mm – nahoře ochranná atmosféra argonu, dole směsná ochranná atmosféra ArMix**

### 5.3 Příprava vzorků pro zkoušky

Pro praktickou část diplomové práce byly zvoleny zkoušky: tahová zkouška, zkouška makrostruktury, u vzorků tloušťky 3 až 5 mm i zkoušky mikrostruktury a zkouška mikrotvrlosti.

Ze svařených plechových vzorků byly vyřezány vzorky přesných rozměrů odpovídajících normě ČSN EN ISO 4136. Destrutivní zkoušky svarů kovových materiálů – Příčná zkouška tahem a vzorky pro metalografické hodnocení svarů, viz obrázek 52. U tlouštěk 1 a 2 mm byly tyto vzorky vyřezány pomocí laserového paprsku a tloušťky 3, 4 a 5 byly řezány vodním paprskem ve spolupráci s firmou AQUAdem.

Po vyřezání zkušebních těles pro tahovou zkoušku byly laserem vyříznuty vzorky na metalografii svarů, viz obrázek 53, a následně seříznuty na metalografické pile Mikron 110. Na metalografické pile byl rovněž proveden zářez do vzorků svařovaných pod ochrannou atmosférou směsi ArMix.



**Obr. 52 Vyřezávání zkušebních těles pro tahovou zkoušku**



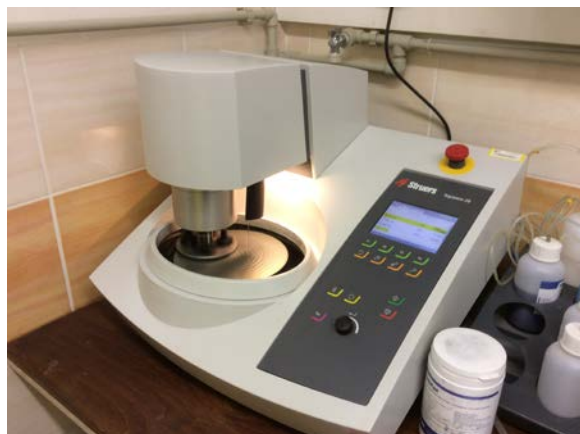
**Obr. 53 Zbytek svařeného vzorku po vyřezání tahových vzorků a vzorků pro metalografii**



Následně byly vzorky, vždy stejné šířky, zalaty do pecek pomocí přístroje Citopress-1 od firmy Struers, viz obrázek 53. Vzorky byly upevněny do držáků MultiClips, aby při lisování nezměnily polohu. Následně byly dány na plošku poprášenou přípravkem AntiStick, jenž zajišťuje nepřilnavost povrchu, a zasypány dvěma 10 ml odměrkami směsi MultiFast. Následně se spustil proces lisování vzorku, jenž trval 3,5 minuty, při působení tlaku 250 barů za teploty 180 °C.



**Obr. 55 přístroj na zalévání vzorků Citopress-1**



**Obr. 54 Brousící stroj Tegramin-20**

Po vylisování metalografických pecek byly vzorky broušeny pomocí přístroje Tegramin-20, viz obrázek 55, kde byly zbroušeny nejprve brusným kotoučem Piano 120 s vodou vždy o 0,5 až 0,6 mm, následně vodou s brusným kotoučem o drsnosti 220, vodou s brusným kotoučem o drsnosti 500, poté brousící kapalinou DiaDuo-2 s drsností 9  $\mu\text{m}$  a koncové broušení za pomoci kapaliny DiaDuo-2 s drsností 3  $\mu\text{m}$ . Mezi jednotlivými brousícími drsnostmi byly vzorky vždy důkladně omyty vodou.

Po vybroušení vzorků byly vzorky leptány leptadlem s pracovním názvem 2-2-1, jež se používá právě pro Cr-Ni austenitické oceli. Nejprve bylo namíchané leptadlo z 2 ml kyseliny fluorovodíkové, 1 ml kyseliny dusičné a 2 ml glycerinu. Následně byly vzorky dány do namíchaného leptadla, kde byly leptány po dobu 6 minut, jak lze vidět na obrázku 56. Po naleptání byly vzorky důkladně omyty vodou. Po omytí vodou následoval oplach lihem a rychlé vysušení horkovzdušnou pistolí. Takto upravené vzorky byly připraveny na metalografickou zkoušku a následnou zkoušku mikrotvrdosti, viz obrázek 57.



**Obr. 57 Leptání vzorků v leptadle 2-2-1**

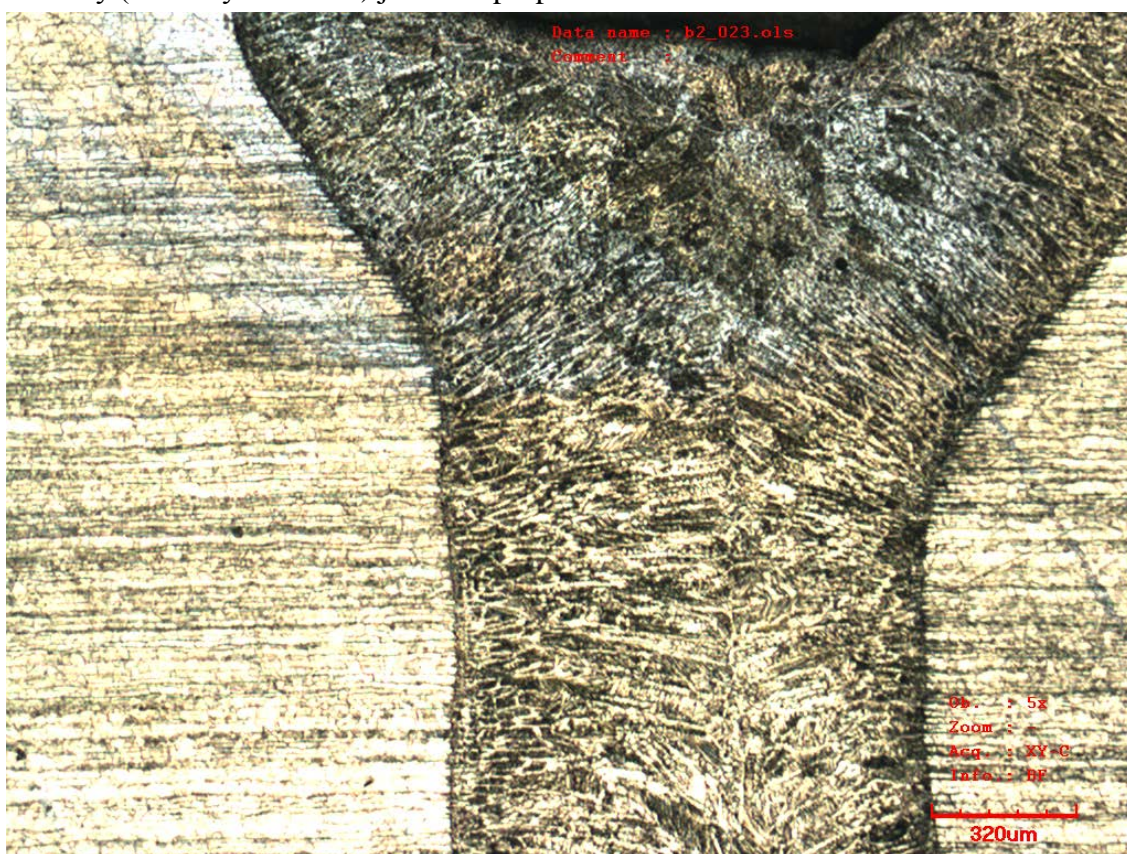


**Obr. 56 Hotové metalografické výbrusy**

## 5.4 Metalografie svarů - makrostruktura

Po zhotovení metalografických výbrusů byly vzorky hodnoceny. Rozdíly tlouštěk 1 a 2 mm mezi ochrannými atmosférami nejsou patrné, proto další zkoušení je věnováno zejména vzorkům tlouštěk 4 a 5 mm. Těmto tloušťkám byly nafoceny obrázky makrostruktury a rozhraní. Makrostruktura tloušťky 4 mm v ochranné atmosféře argonu je na obrázku 58, v ochranné směsi ArMix pak na obrázku 59. Fotky makrostruktury plechu tloušťky 5 mm jsou v příloze 5 a celkový přehled makrostruktur jednotlivých vzorků je v tabulce 13.

Na snímcích ochranné atmosféry argonu lze vidět typický tvar laserového svaru s rozšířenou horní částí svaru. U tloušťky 4 mm lze vidět na obrázku 58 propad líce svaru. Svary svařené ve směsné ochranné atmosféře mají lepší geometrii, rovnoměrnější tvar svaru a oba svary (tloušťky 4 i 5 mm) jsou bez propadu.

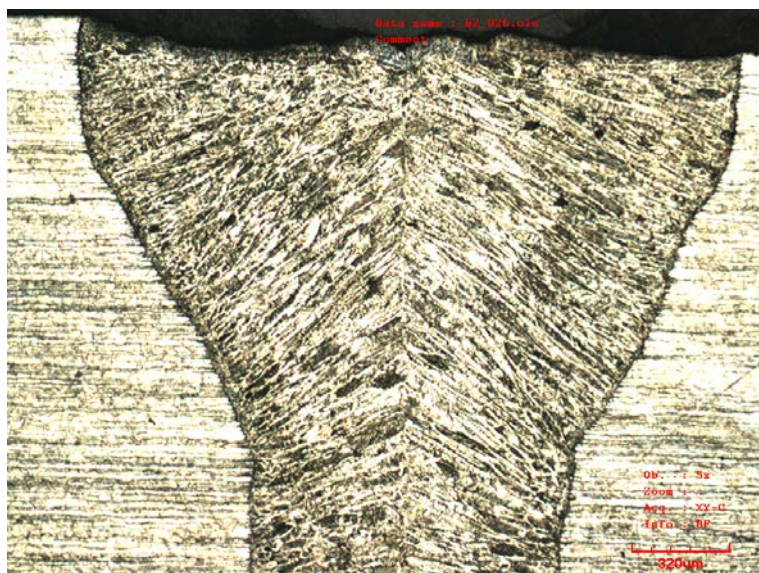


**Obr. 58** Makrostruktura svaru vzorku tloušťky plechu 4 mm v ochranné atmosféře argonu

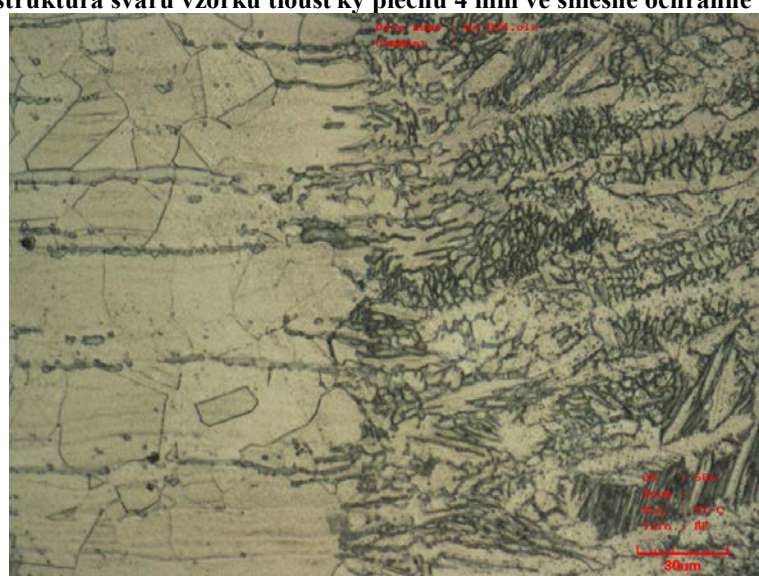
Rozhraní svarového kovu a základního materiálu, jelikož tepelně ovlivněná oblast se u austenitických nerezových ocelí téměř nevyskytuje, jsou nafoceny na obrázcích 60 v ochranné atmosféře argonu a 61 v ochranné směsi ArMix u plechů s tloušťkou 4 mm. Fotky vzorků s tloušťkou plechu 5 mm jsou v příloze 6.

Na snímcích rozhraní lze vidět válcovanou sktrukturu v oblasti základního materiálu a strukturu svarového kovu. Dále jsou zde vidět černá místa, jež mohou být buď intermetalické fáze, karbidy nebo delta ferit, jež se objevuje v austenitických ocelích.

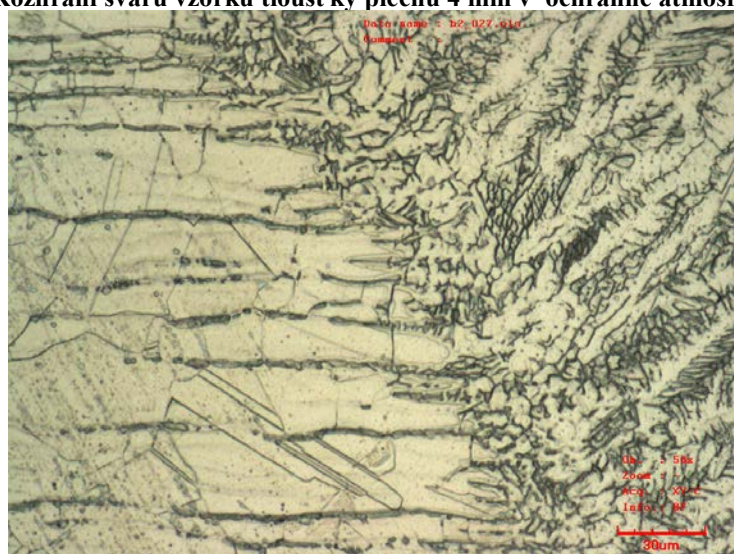




Obr. 59 Makrostruktura svaru vzorku tloušťky plechu 4 mm ve směsné ochranné atmosféře ArMix



Obr. 60 Rozhraní svaru vzorku tloušťky plechu 4 mm v ochranné atmosféře ArMix



Obr. 61 Rozhraní svaru vzorku tloušťky plechu 4 mm ve směsné ochranné atmosféře ArMix



Tabulka 13 Srovnání makrostruktury všech experimentů

Ochranná atmosféra argonu	Směsná ochranná atmosféra ArMix	Tloušťka
		1 mm
		2 mm
		3 mm
		4 mm
		5 mm

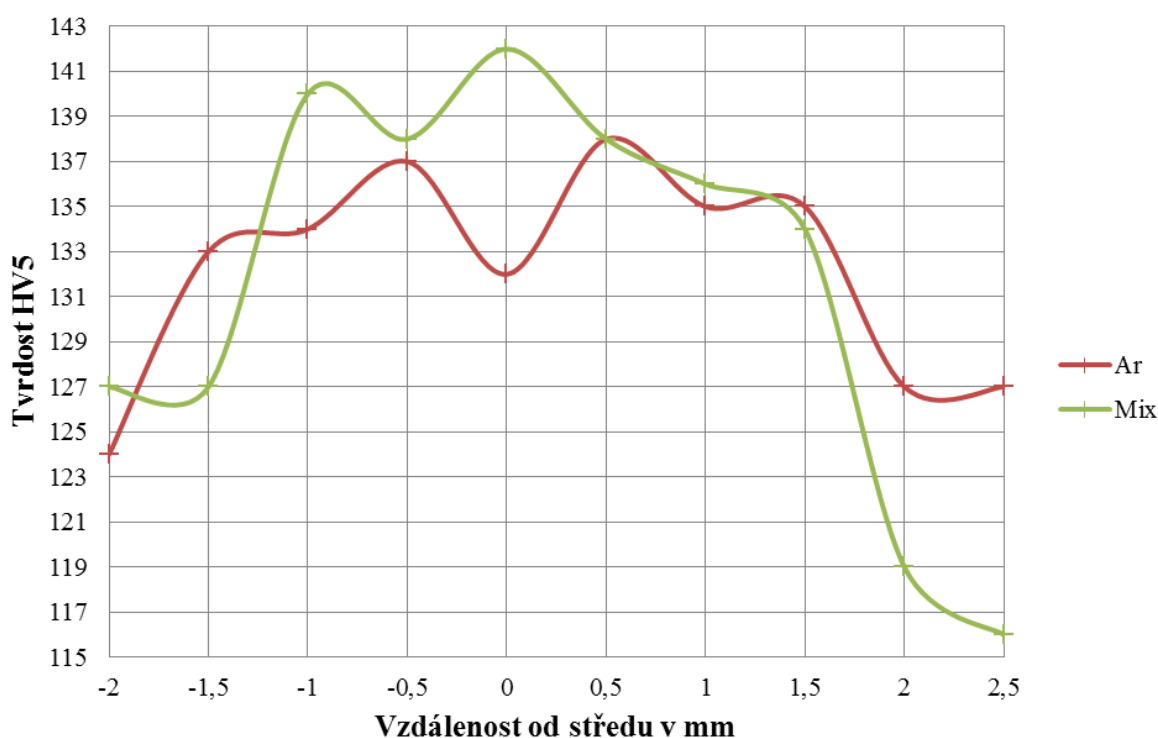


## 5.5 Zkouška tvrdosti

Zkouška tvrdosti byla provedena na PC pracovišti s kamerou a tvrdoměrem Zwick 3213 při pokojové teplotě a zatížení HV5. Na tomto pracovišti se nachází i PC vybavený programem na vyhodnocování tvrdosti podle Vickerse. Díky tomuto programu nemusí být počítán aritmetický průměr úhlopříček a následné vyhledávání v tabulkách, jelikož program sám vyhodnotí příslušnou tvrdost.

Zkouška probíhala ve vložení metalografického vzorku do čelistí, nastavení místa vtisku pomocí kamery. Následné zatížení, jež spočívalo v dosednutí špičky hrotu na povrch vzorku a poté setrvání po dobu 12 až 15 sekund. Po odlehčení byly díky přenosu obrazu z kamery odměřeny úhlopříčky na PC a program sám vyhodnotil tvrdost HV5.

Průběh tvrdosti vzorků o tloušťce 5 mm je zobrazen v grafu na obrázku 62. Grafy tvrdosti dalších tlouštěk jsou uvedeny v příloze 9.



**Obr. 62 Graf průběhu tvrdosti výbrusu z tloušťky 5 mm**

Vzorky svařované směsnou ochrannou atmosférou dosahují v průběhu vyšších tvrdostí HV5 než u svarů svařovaných v čistém argonu. Rozdíly tvrdostí se pohybují mezi 6 a 15 HV5 u tloušťky 1 mm, u tloušťky 2 mm od 4 do 10 HV5 a u tloušťky 4 od 0 do 7 HV5, přičemž všechny hodnoty směsné atmosféry jsou stejné nebo vyšší než hodnoty čistého argonu. Vyšší hodnoty tvrdosti u směsi poukazují na zvýšené teplotní ovlivnění. Pro snížení tohoto tepelného ovlivnění bude zapotřebí pro směsnou ochrannou atmosféru upravit svařovací podmínky.

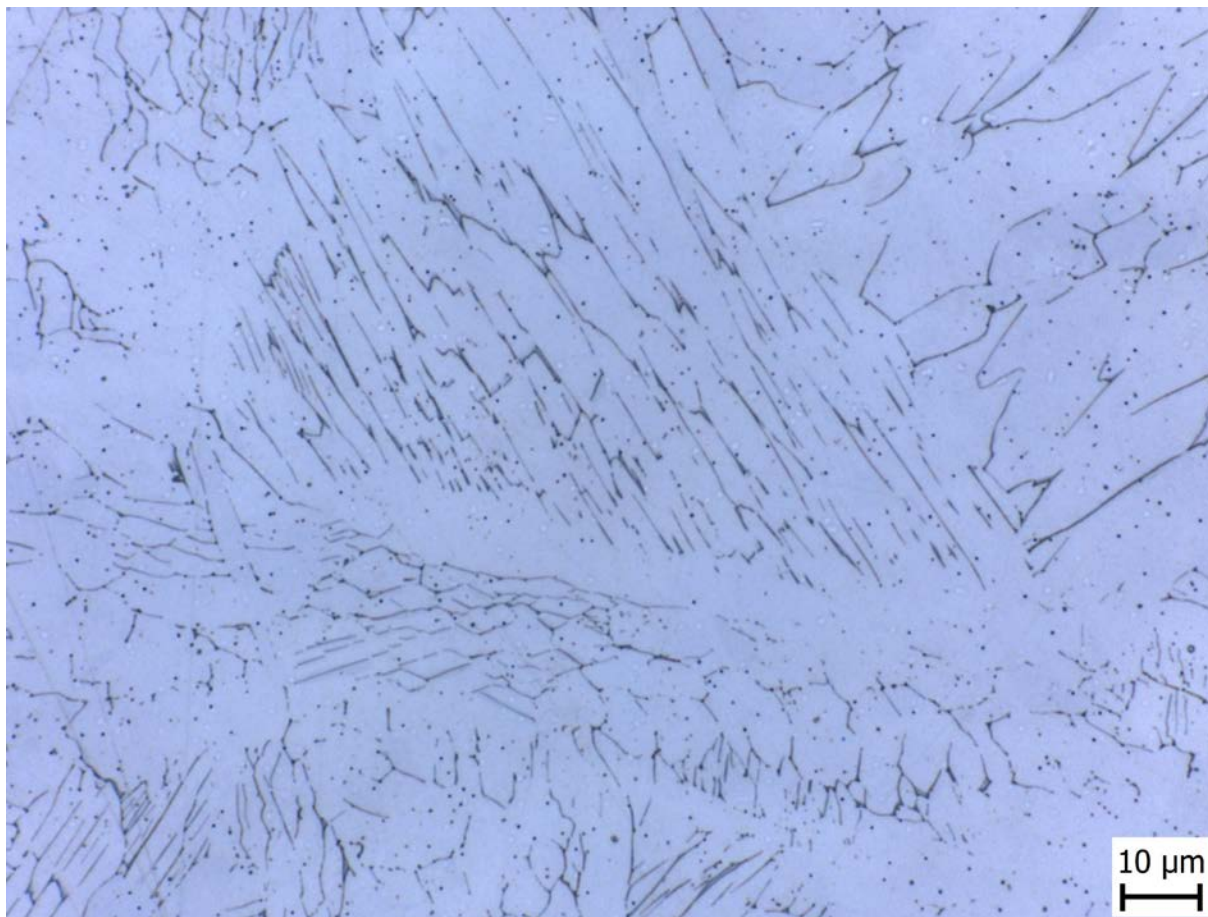
U tloušťky svaru 3 mm jsou hodnoty svaru a svarového rozhraní u směsné atmosféry vyšší než u zbytku základního materiálu, což dokazuje jistou tvrdost v materiálu. U svaru tloušťky 5 mm a směsné ochranné atmosféry jedna hodnota základního materiálu převyšuje hodnoty tvrdosti na rozhraní, tudíž se dá usuzovat, že materiál je nehomogenní.

Výsledky měření tvrdosti by se daly shrnout, že při svařování ve směsné ochranné atmosféře dochází k vyššímu tepelnému ovlivnění vůči ochranné atmosféře argonu (viz tloušťky 1, 2 a 4 mm). Rovněž lze říci, že materiál podléhá jisté nehomogenitě, jelikož u svarů tlouštěk 1, 3 a 5 mm je základní materiál tvrdší než svarový kov.

## 5.6 Metalografie svarů – mikrostruktura

Po změření tvrdosti na metalografických vzorcích byly vzorky 4 a 5 mm znovu přebroušeny a naleptány na mikrostrukturu leptadlem Vilella (kyselina dusičná 16,7 ml, kyselina chlorovodíková 33,3 ml, glycerin 33,3 ml a peroxid vodíku 16,7 ml) vhodným k leptání ocelí legovaných chromem či niklem, na niklové slitiny a na austenitické nerezky.

Zkoumáním mikrostruktury základního materiálu bylo podezření ve svarovém kovu spíše na delta ferit než intermetalické fáze, jelikož intermetalické fáze mají spíše přerušované, kdežto tvar fáze je nepřerušovaný jedná se zřejmě o delta ferit.



**Obr. 63 Mikrostruktura svarového kovu svařovaného v argonu tloušťky 4 mm**

Na snímku mikrostruktury svarového kovu, viz obrázek 63 a příloha 100, jsou vidět karbidy chromu v podobě drobných černých kuliček a fázi delta feritu mezi hranicemi austenitické fáze. Tvrzení ohledně delta feritu bylo následně ověřeno měřením na feritometru.

## 5.7 Zkouška na feritometru [2] [76]

Měření probíhalo pomocí feritometru od firmy Fischer, viz obrázek 64. Tento feritometr měří pouze feromagnetické fáze na povrchu materiálu, tedy ferit, delta ferit a martenzit. V případě austenitických ocelí je feritometrem měřen delta ferit. Změřené hodnoty z feritometru jsou uvedeny v tabulce 14.

Z výsledných hodnot měření vyplývá, že základní materiál je vždy z hlediska delta feritu stejný, až na zřejmou chybu měření 3,70 v hodnotách základního materiálu tloušťky 4 mm. A rovněž je patrné, že materiál tloušťky 5 mm má vyšší obsah delta feritu než materiál tloušťky 4 mm, což poukazuje na vyšší obsah uhlíku.

**Tabulka 14 Změřené hodnoty na feritometru**

TLoušťka	4 mm				5 mm			
Ochranná atmosféra	Argon		ArMix		Argon		ArMix	
Měřená oblast	ZM	SK	ZM	SK	ZM	SK	ZM	SK
Naměřené hodnoty [%]	0,74	3,40	0,46	2,50	2,10	2,20	1,40	2,30
	0,90	3,50	0,62	2,70	1,50	3,40	1,70	3,30
	0,74	3,30	0,74	2,30	1,30	4,00	2,60	3,30
	0,92	2,80	0,34	2,70	2,40	3,30	1,50	3,50
	0,46	3,00	0,70	3,10	1,50	3,20	1,60	3,50
	0,59	3,10	3,70	2,50	1,60	3,40	1,50	2,40
	0,75	2,70	1,00	2,60	1,50	3,80	1,20	2,50
	1,20	3,70	0,40	2,60	1,10	3,30	1,70	3,00
	0,74	3,50	0,57	3,10	1,60	3,40	1,50	4,50
	0,58	3,90	0,50	2,40	1,50	3,70	1,40	2,90
Výsledné hodnoty [%]	0,76	3,28	0,91	2,65	1,61	3,36	1,61	3,13
Směrodatné odchylky hodnot [%]	± 0,20	± 0,40	± 1,01	± 0,26	± 0,38	± 0,49	± 0,37	± 0,67

Obsah delta feritu v základním materiálu oceli tloušťky 5 mm je 1,61 %. Obsah uhlíku v delta feritu je maximálně 0,1 hm.%.<sup>[76]</sup> Jednoduchým vynásobením předchozích hodnot získáme hodnotu 0,161 % uhlíku, přičemž maximální obsah uhlíku v oceli X5CrNi18-10 je 0,07%.<sup>[2]</sup> U plechů tloušťky 5 mm nebylo dodrženo předepsané procento uhlíku. U tloušťky 4 mm je obsah uhlíku 0,076 %, při výpočtu z hodnoty delta feritu základního materiálu, což je mírně vyšší, ale hraniční hodnota.



**Obr. 64 Měření delta feritu na feritometru**

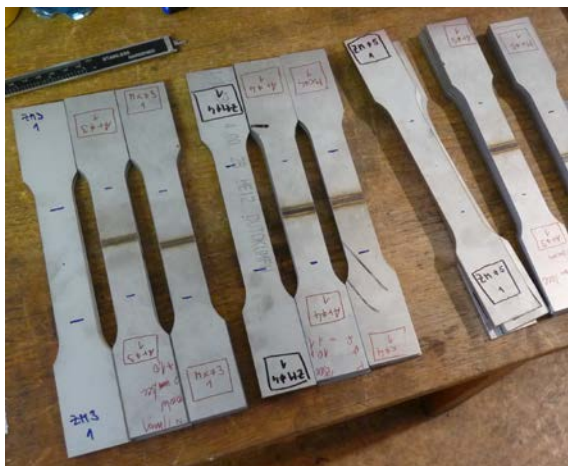
Výsledné hodnoty feritometru prokázaly, že mezidendritické prostory ve svarovém kovu jsou vyplněny fází delta feritu. Také lze z výsledných hodnot vyčíst, že hodnoty delta feritu ve svarovém kovu jsou nižší u směsné ochranné atmosféry.

## 5.8 Tahová zkouška

Tahová zkouška byla provedena za pokojové teploty na stroji ZD40, více informací o tomto stroji je v příloze 1. Rychlost zatěžování byla 10 MPa/s.

Zkouška začala označením všech zkušebních těles mírou  $L_0$ , která měla hodnotu 80 mm, jak lze vidět na obrázku 65. Po zakreslení pomocných čar byl vzorek vložen do čelistí a byla spuštěna zátěž. Vzorek byl zatěžován až do jeho přetržení, viz obrázek 66. Následně byl vyjmut z čelistí a byla změřena jeho délka  $L$ . Nejprve se trhaly vzorky základního materiálu, následně vzorky svařované v čistém argonu a nakonec vzorky svařované v ochranné směsi plynů ArMix. Zkoušelo se vždy po třech vzorcích od každé tloušťky (od 1 po 5 mm). Z tahové zkoušky byly získány tahové diagramy, viz obrázek 67. Hodnoty získané z tahové

zkoušky, jako tažnost, pevnosti, aj. jsou uvedeny v příloze 7, spolu s dalšími tahovými diagramy. Tahové diagramy v příloze 7 mají v lineární oblasti Hookova zákona nelineární „skoky“, jež byly způsobeny prokluzem vzorku v čelistech lisu. Na tahovém diagramu na obrázku 65 jsou tyto „skoky“ vyhlazeny.



Obr. 65 Zakreslení délky  $L_0 = 80$  mm



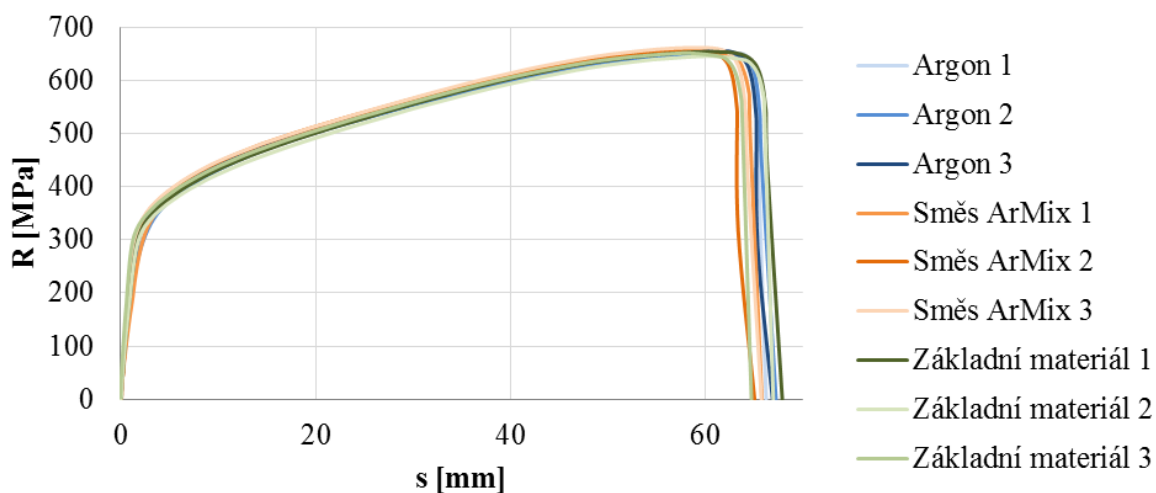
Obr. 66 Přetržení vzorku 1 tloušťky 5 mm

Z naměřených hodnot tahové zkoušky vychází, že meze kluzu i pevnosti jsou nižší u základního materiálu než u svařovaných vzorků. Tento jev mohl být způsoben příčným vyřezáním vzorků základního materiálu a plechů na svaření anebo anizotropií plechu při válcování. Vzorky tlouštěk 1 a 2 mm jsou pevnější při svařování v čistém argonu. Pevnostní hodnoty svařovaných vzorků tlouštěk 3 a 4 mm jsou rovnoměrné (tzn., nachází se v rozptylu 5 MPa). U tloušťky plechu 5 mm jsou pevnější svary svařované ve směsné ochranné atmosféře, jak lze vidět srovnáním hodnot mezi pevnosti i smluvních mezí v kluzu.

U svařovaných plechů došlo k poklesu tažnosti u průměrných hodnot o 2-3%, u směsné atmosféry tloušťky 1 mm dokonce o necelých 6%. Tažnosti svařování v argonu a ve směsné ochranné atmosféře se u tlouštěk 1 až 4 mm liší jen nepatrně, s největším rozdílem 5%. U tloušťky 5 mm je to obdobné, až na hodnotu  $A_{80} = 21,25$  %, která je poloviční vůči všem ostatním hodnotám.

Pokles tažnosti u svařených vzorků byl způsoben svarem a mírným ohřevem materiálu při svařování. Tažnost u těchto vzorků je vyrovnaná u obou ochranných atmosfér.

### Tahový diagram tloušťky 3 mm



Obr. 67 Diagram tahové zkoušky tlouštěk 3 mm



Při tahové zkoušce byly všechny tři vzorky svařené v čistém argonu a dva ze tří vzorků svařovaných ve směsné atmosféře přetrženy na rozhraní svarového kovu a základního materiálu, jak lze vidět na makrosnímčích lomové plochy – obrázcích 68 a 69. Při následném zkoumání lomových ploch byla u obou plynů objevena nadměrná pórovitost svarů ve spodní části. Pórovitost ve spodní části svarového kovu značí vznik humpingu, tedy rozkmitání keyhole v důsledku pomalého svařování. Dalším pozorovaným jevem na lomových plochách jsou lomy pod úhly 45°. Důvodem přetržení vzorků je iniciace lomu v oblasti rozhraní a následné dolomení pod úhly 45°.



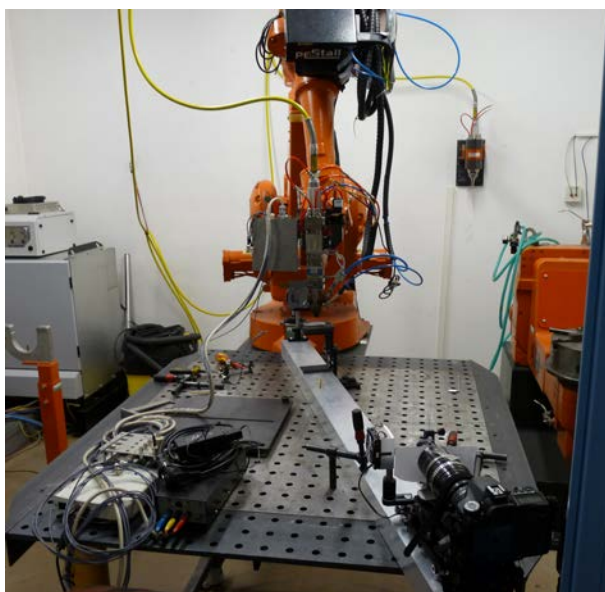
**Obr. 68** Makrosnímek lomové plochy vzorku číslo 2 svařovaného v ochranné atmosféře argonu



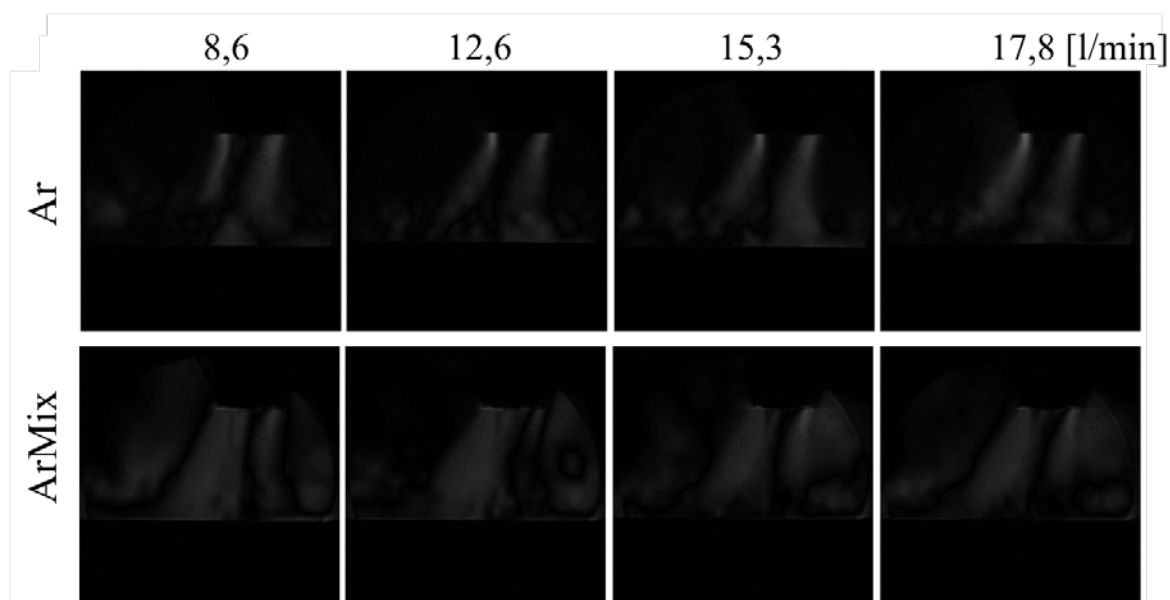
**Obr. 69** Makrosnímek lomové plochy vzorku číslo 3 svařovaného ve směsné ochranné atmosféře

## 5.9 Šlířová zobrazovací metoda

Při svařovacím experimentu byla provedena šlířová zobrazovací metoda. Její reálné nastavení při pořizování snímků je na obrázku 70. Na obrázku 71 je zobrazeno srovnání argonu a směsi ArMix při různých průtocích plynů. Na snímcích argonu lze vidět, jak argon klesá dolů, při svařování vodorovném shora tedy zalévá svar. Při nižších rychlostech zalévá svarovou lázeň, při vyšších (17,8 l/min) však je rychlost proudění příliš velká. Na snímcích směsi ArMix lze vidět, že plyn má stejnou měrnou hmotnost jako okolní vzduch a tedy neklesá ani nestoupá, při všech svařovacích polohách tak rovnoměrně zalévá svarovou lázeň. Při nižších i vyšších zobrazených průtocích plynu nejsou vidět turbulence, které by mohly způsobovat porozitu svarové lázně.



Obr. 70 Nastavení šlířové zobrazovací metody



Obr. 71 – Šlířová zobrazovací metoda



## 6 TECHNICKO EKONOMICKÁ HODNOCENÍ [27] [30]

V této diplomové práci je posuzován plyn ArMix ve srovnání s Argonem o čistotě 4.6. Ekonomická stránka použití plynu je hodnocena z hlediska hodinové sazby laseru, který zahrnuje odpisy laserového pracoviště, spotřebovanou elektrickou energii, pracovní plyn, stlačený vzduch na ochranu optiky, mzdu obsluhy laseru, spotřební díly, servis a údržbu stroje, režie a zisk.

Odpisy laserového pracoviště jsou počítány z pořizovací ceny laseru 15 000 000 Kč. Při odpisech stanovených na 5 let a provozu 50 týdnů v roce, 5 dní v týdnu na 3 směny vychází cena odpisu na 500 Kč/hod.

Elektrická energie dodaná laserovému pracovišti je 40 kWh. S cenou 2,50 Kč/kWh stojí elektrická energie 100 Kč/hod.

Při zjištěných cenách od firmy SIAD vychází cena za 1 m<sup>3</sup> argonu o čistotě 4.6 na 150 Kč/m<sup>3</sup>.<sup>[27]</sup> Cena směsné atmosféry argonu, helia a vodíku o obdobných čistotách je 400 Kč/m<sup>3</sup>.<sup>[27]</sup> Při průtoku plynu 18 litrů za minutu, jenž byl použit při experimentech, jsou ceny čistého argonu 162 Kč/hod a směsi ArMix 432 Kč/hod.

Cena stlačeného vzduchu je 0,5 Kč/m<sup>3</sup> a při hodinové spotřebě 25 m<sup>3</sup>/hod je cena 12,5 Kč/hod. Náklady na mzdu obsluhy laseru jsou 180 Kč/hod hrubé mzdy, což společně s 34% odvody na zdravotní a sociální pojištění, činí 242 Kč/hod.<sup>[30]</sup>

Do nákladů na hodinovou sazbu stroje je nutno připočítat spotřební díly v hodnotě 50 000 Kč/rok (8 Kč/hod) a servis laserového pracoviště v hodnotě 120 000 Kč/rok (20 Kč/hod). Celkové srovnání hodinových sazeb laseru s čistým argonem a směsí plynů ArMix je uvedeno v tabulce 15.

**Tabulka 15 Srovnání hodinových sazeb laseru - hodnoty uvedeny v Kč/hod**

Druh plynu	Argon	ArMix
Odpisy	500	500
Elektrická energie	100	100
Plyn	162	432
Stlačený vzduch	13	13
Hodinové náklady na obsluhu	242	242
Spotřební díly	8	8
Servis	20	20
Celkové náklady	1045	1315
Režijní náklady 100 %	1045	1315
Zisk 10 %	209	263
Celkové hodinové sazby	2299	2893

Celková hodinová sazba laseru při použití argonu podle tabulky vychází o 594 Kč/hod levněji než hodinová sazba s použitím směsné ochranné atmosféry. Avšak směsná ochranná atmosféra má prokazatelně lepší povrchy svarů (bez oxidů) a lepší provaření materiálů.

## 7 ZÁVĚRY

Teoretická část zabývající se průmyslovými lasery, vyjmenovává hlavní výhody a nevýhody laserů. Lasery jsou zde rozděleny podle aktivního budícího prostředí a následně vzájemně srovnány různými hledisky. Dále teoretická část popisuje tři možné interakce povrchu kovu s laserovým zářením. Následně se teoretická část zabývá použitím laserů k průmyslovým účelům, dokud je plynule navázáno použitím průmyslových laserů ve svařování.

Kapitola o svařování laserem rozebírá výhody a nevýhody svařování laserem, typickou geometrií laserových svarů, typy laserových spojů, svařovací parametry jako jsou výkon, svařovací rychlost, parametry fokusační soustavy, hodnota specifického vneseného tepla a svařovací mezera. Dále se teoretická část zabývá modifikacemi laserového svařování a to přidáváním přídatného materiálu, hybridním svařováním a metodou remote welding. Laserové svary mají svoje vady, jež jsou rozebrány. S těmito vadami souvisí také svařitelnost materiálů a zkoušky svarových spojů.

Další teoretická část je věnována druhům ochranných plynů a jejich směsí. Dále je v této teoretické části popsána šlírová zobrazovací metoda.

Teoretickou část uzavírá kapitola o svařovaném materiálu, v níž jsou rozděleny a srovnány korozivzdorné oceli, rozebrány vlastnosti, srovnány druhy austenitických ocelí. Jsou zde rozebrány rozdíly mezi stabilizovanými a nestabilizovanými austenitickými oceli. Následně se teoretická část zabývá druhy koroze u austenitických ocelí a průmyslovým použitím těchto ocelí.

V praktické části bylo provedeno 10 svařovacích experimentů z nerezové oceli X5CrNi18-10 tlouštěk od 1 do 5 mm v ochranné atmosféře argonu a následně ve směsné ochranné atmosféře ArMix. Po svaření byly na svařených spojkách parné rozdíly mezi argonem a směsnou atmosférou. Svary svařené směsnou atmosférou obsahovaly méně oxidů, měly rovnoměrnější závar a projevil se zde pozitivní vliv na průvar svarového spoje.

V průběhu svařovacích experimentů bylo zkoumáno proudění ochranných atmosfér pomocí šlírové zobrazovací metody. Na snímcích lze vidět, jak argon klesá dolů a zalévá tak svarovou lázeň. Na snímcích směsné ochranné atmosféry lze vidět, že směs plynů má stejnou měrnou hmotnost jako okolní vzduch a tudíž ani nestoupá a ani neklesá. Směsná ochranná atmosféra je vhodná zejména při prostorovém laserovém svařování.

Po svaření byly ze svařených plechů vyřezány, laserovým svazkem či vodním paprskem, vzorky pro tahovou zkoušku a vzorky pro metalografii. Následně byly vzorky, spolu se vzorky základního materiálu, přetrženy při tahové zkoušce. Kde bylo zjištěno, že vzorky základního materiálu mají nižší meze kluzu i pevnosti, což bylo zřejmě způsobeno tím, že vzorky na tahovou zkoušku byly vyřezány kolmo ke vzorkům určeným ke svaření. Dále bylo zjištěno, že vzorky tlouštěk 1 a 2 mm jsou pevnější při svařování v čistém argonu, tloušťky 3 a 4 mm jsou rovnoměrné a u tlouštěk 5 mm jsou pevnější svary svařované směsnou ochrannou atmosférou. U svařovaných vzorků došlo k celkovému poklesu tažnosti o 2-3 %, tento pokles byl způsoben svarem. Tahová zkouška poukázala na nadměrnou pórovitost u tlouštěk 5 mm, jež byla způsobena tzv. humpingem, rozkmitáním keyhole v důsledku pomalé svařovací rychlosti. Díky vzorkům přetrženým ve svarech byla objevena slabá místa na rozhraní svarového kovu a základního materiálu.

Vzorky pro metalografii byly zalaty do metalografických pecek. Na těchto vzorcích byla na vzorcích provedena zkouška tvrdosti. Z výsledků měření tvrdosti vyplývá, že při svařování ve směsné ochranné atmosféře dochází k vyššímu tepelnému ovlivnění vůči ochranné atmosféře argonu (viz tloušťky 1, 2 a 4 mm). Rovněž měření tvrdosti prokázalo, že materiál podléhá jistě nehomogenitě, jelikož u svarů tlouštěk 1, 3 a 5 mm je základní materiál tvrdší než svarový kov.

Následně bylo na metalografických vzorcích provedeno hodnocení makrostruktury i mikrostruktury. Makrostruktura ukázala u směsné ochranné atmosféry lepší geometrii svaru, rovnoměrnější tvar svaru a svary bez propadů. Na snímcích mikrostruktury lze vidět svarový kov, jenž je složen z austenitických dendritů, karbidů chromu v podobě drobných černých kuliček a fázi delta feritu mezi hranicemi austenitické fáze.

Tvrzení o delta feritu bylo následně potvrzeno měřením na feritometru, jež prokázal, že mezidendritické prostory ve svarovém kovu jsou vyplněny fází delta feritu. A také poukázal na fakt, že plech o tloušťce 5 mm má vyšší procento uhlíku (0,161 %), což přesahuje složení oceli X5CrNi18-10 (s maximální hodnotou uhlíku 0,07 %). Z výsledků měření na feritometru vyplývá pozitivní vliv směsné ochranné atmosféry na nižší tvorbu delta feritu.

Během technicko ekonomického hodnocení bylo vypočteno, že při průtoku plynu 18 litrů za minutu vychází použití argonu o 594 Kč/hod levněji. Avšak směsná ochranná atmosféra má prokazatelně lepší povrchy svarů (bez oxidů) a lepší provaření materiálů.

Budoucí zkoumání by se mohlo ubírat směrem hledání optimálních svařovacích podmínek směsné ochranné atmosféry, aby se zabránilo tepelnému ovlivnění materiálu od laseru a tím i vyšší tvrdosti.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [8] [9]

1. (ed.). *Handbook of laser welding technologies*. 1st pub. Editor Seiji Katayama. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013. Woodhead Publishing series in electronic and optical materials. ISBN 978-0-85709-264-9.
2. 1.4301. Führend in Werkstoffen und Qualität [online]. 2001 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.m-woite.de/en/materials/14301.shtml>
3. 3D tisk kovů. *Stránky o 3d tisku* [online]. 2015 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <http://cz.wiki3dmodels.info/dodavky/3d-tisk-kovu/>
4. About us. *Glass laser* [online]. Zelezny Brod [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: <http://www.glass-laser.com/glass-laser-eu/1-About-us-and-photo-gallery>
5. AIRLIQUIDE. *Ochranné plyny pro svařování: Metody a využití*. Praha, 2014. Dostupné také z: <http://www.airliquide.cz/file/otherelement/pj/f5/1f/b8/f2/ochrann%C3%A9%20plyny7262854077324275481.pdf>
6. AMBROŽ, Oldřich. *Teorie svařování*. Praha, 1990.
7. BALEJ, Zdeněk, Vladimír KUDĚLKA a Jan OPLETAL. Učebnice pro základní kurz svařování ZK 141 8: obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu vysokolegovaných austenitických ocelí : (TIG, WIG, GTAW). 3. aktualizované vydání. Ostrava: ZEROSS - svářečské nakladatelství, 2013. Svařování (ZEROSS). ISBN 978-80-85771-03-9.
8. CITACE PRO. *Vysoké učení technické v Brně* [online]. 2012 [cit. 2016-02-23]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/>
9. Citace ústního sdělení. *Ptejte se knihovny* [online]. 2014 [cit. 2016-02-23]. Dostupné z: <http://www.ptejteseknihovny.cz/dotazy/citace-ustniho-sdeleni>
10. ČMELÍK, Milan, Lubor MACHONSKÝ a Zdislav ŠÍMA. Fyzikální tabulky. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2001. ISBN 80-7083-515-X.
11. ČSN EN ISO 6520-1. Svařování a příbuzné procesy - Klasifikace geometrických vad kovových materiálů. Část 1, Tavné svařování. Praha: Český normalizační institut, 2008.
12. DASHÖFER. *Svařování kovů v praxi: Austenitické vysokolegované žáruvzdorné oceli* [online]. 2011 [cit. 2016]. ISSN 1805-2835. Dostupné z: [http://www.dashofer.cz/download/pdf/svk/svk\\_ukazka1.pdf](http://www.dashofer.cz/download/pdf/svk/svk_ukazka1.pdf)
13. DAVIDHAZY, Andrew. Schlieren photography principles. ROCHESTER INSTITUTE OF TECHNOLOGY. *RIT* [online]. [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: <https://people.rit.edu/andpph/text-schlieren.html>
14. Divergence laserového svazku. *Condition Monitoring & Maintenance Systems* [online]. 2010 [cit. 2016-03-07]. Dostupné z: <http://www.cmms.cz/ustavovani-a-vyvaovani/92-divergence-laseroveho-paprsku-.html?lang=>
15. Druhy nerezové oceli a příklady jejího užití. FASTENERS CZ, A.S. *Fasteners: Spojovací materiál* [online]. 2015 [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: <http://www.fasteners-cz.cz/druhy-nerezove-oceli-priklady-jejeho-uziti>
16. GEIPL, H. Ochranné plyny na obloukové zvaranie a na krytie koreňa. *Zváranie-Svařování*. 1992, **41**(1), 13-18.
17. Grab CAD community. *RECI CO2 Laser tube* [online]. 2016 [cit. 2016-03-09]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/reci-co2-laser-tube-1>
18. HERZIGER, G. Werkstoffbearbeitung mit Laserstrahlung. *Feinwerktechnik & Messtechnik*. 1983, (4).

19. Historie svařování. *Svarinfo* [online]. 2006 [cit. 2016-01-30]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocclanku=2006061401>
20. HLAVATÝ, Ivo. *Teorie a technologie svařování (The Theory and Technology of Welding) - první multimediální publikace o svařování*. [online]. VŠB – TU Ostrava, 2009 [cit. 2016-02-22]. ISBN 978-80-248-2414-7. Dostupné z: <http://fs1.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/indexs.htm>
21. Hlavní skupiny nerezových ocelí. TERAPOL SPOL. S R.O. *Terapol: nerez ocel* [online]. Chomutov [cit. 2016-03-31]. Dostupné z: <http://www.terapol.cz/clanek/no-vap-hlavni-skupiny>
22. HRIVŇÁK, Ivan. *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*. 1. vyd. V Bratislave: Slovenská technická univerzita, 2009, 486 s. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-3167-6.
23. Industrial laser: solution for manufacturing. *Body-in-white diode laser brazingv* [online]. 2011 [cit. 2016-03-09]. Dostupné z: <http://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-26/issue-5/features/body-in-white-diode-laser-brazing.html>
24. *Industrial Laser: Technology throughout the world* [online]. 2014 [cit. 2016-03-09]. Dostupné z: <http://www.eslaser.com/en/laser-applications/>
25. Informace o technologiích 3D tisku. *Easycnc* [online]. 2010 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <http://www.easycnc.cz/inpage/informace-o-technologiich-3d-tisku/>
26. Ing. Petr Halla - ústní sdělení (svařovací technolog firmy SIAD Czech. s.r.o, U Sýpky 417, 664 61 Rajhradice) dne 1.března 2016.
27. Ing. Petr Halla - ústní sdělení (svařovací technolog firmy SIAD Czech. s.r.o, U Sýpky 417, 664 61 Rajhradice) dne 25. dubna 2016.
28. Ionization Potentials for Common VOCs. *E Instruments International* [online]. 2016 [cit. 2016-03-27]. Dostupné z: <http://www.e-inst.com/voc-pid-technology/ionization-potentials>
29. JAREŠ, Vojtěch. *Základní zkoušky kovů a jejich teorie*. 1. vyd. Praha: Academia, 1966.
30. KANDLEROVÁ, Bc. Kateřina. Odvody sociálního a zdravotního pojištění ze mzdy. *Portál.POHODA* [online]. 2015 [cit. 2016-05-07]. Dostupné z: <http://portal.pohoda.cz/dane-ucetnictvi-mzdy/mzdy-a-prace/odvody-zamestnavatele-na-socialnim-a-zdravotnim-po/>
31. KAPLAN, Alexander. *Laser welding: as selected advanced processing technique*. Luleå University of Technology, 2014.
32. KATAYAMA, S. Defect formation mechanisms and preventive procedures in laser welding-12. *Handbook of laser welding technologies*. 2013, s. 332-373. DOI: 10.1533/9780857098771.2.332. ISBN 978-0-85709-264-9.
33. KATAYAMA, S. Introduction: fundamentals of laser welding-1. *Handbook of laser welding technologies*. 2013, s. 3-16. DOI: 10.1533/9780857098771.1.3. ISBN 978-0-85709-264-9.
34. KOŘÁN, Pavel. *Průmyslové lasery (5) - Laserové řezání. Průmyslové spektrum* [online]. 2012 [cit. 2016-02-22]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-5-laserove-rezani.html>
35. KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie svařování*. Brno. Dostupné také z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory\\_soubory/technologie\\_svarovani\\_\\_5te\\_etv\\_etv-k\\_kubicek.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/technologie_svarovani__5te_etv_etv-k_kubicek.pdf)
36. KULHÁNEK, Petr. *Úvod do teorie plazmatu*. Vyd. 1. Praha: AGA, 2011. ISBN 978-80-904582-2-2. Dostupné také z: <http://www.aldebaran.cz/studium/tpla.pdf>

37. Laser peening process. LPS Technologies [online]. 2014 [cit. 2016-02-23]. Dostupné z: <http://www.lps technologies.com/laser-peening-process.php>
38. Laser Peening. Curtiss-wright [online]. 2015 [cit. 2016-02-23]. Dostupné z: <http://cwst.com/laser-peening/overview/>
39. Laser Shock Peening. Lambda: Technologies group [online]. 2012 [cit. 2016-02-23]. Dostupné z: <http://www.lambdatechs.com/laser-shock-peening.html>
40. Laserové kalení. *Laser Therm* [online]. 2016 [cit. 2016-02-23]. Dostupné z: <http://www.lasertherm.cz/sluzby/laserove-kaleni/>
41. Laserové kalení. VÚTS Liberec [online]. 2013 [cit. 2016-02-23]. Dostupné z: <http://www.vuts.cz/laserove-kaleni-1.html>
42. Laserové svařování - posouzení vlivu ochranného plynu. KAŠPAR, Jan a Stanislav NĚMEČEK. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2016 [cit. 2016-03-27]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-svarovani-posouzeni-vlivu-ochranneho-plynu.html>
43. Laserové svařování. *Air products* [online]. 2016 [cit. 2016-03-27]. Dostupné z: <http://www.airproducts.cz/industries/Construction/construction-Metal-Fabrication/product-list/laser-welding-construction-metal-fabrication.aspx?itemId=FCCE0EF4C54D44A19148B2E389F79BE6>
44. Laserové technologie. 1. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej technickej univerzity, 2000, 122 s. Edícia monografií. ISBN 80-227-1425-9.
45. LINDE. LASGON H2 - ideal zum Laserchweißen von Edelstählen. Pullach, 2012.
46. *Lintech: Lasery podle aplikace* [online]. 2011 [cit. 2016-02-23]. Dostupné z: <http://www.lintech.cz/lasery-podle-aplikace>
47. MARKMANN, Christoph. *Introduction: fundamentals of laser welding*. Lulea, 2010. Diplomová práce. Lulea University of Technology.
48. Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-857-7185-3.
49. MESSER TECHNOGAS S.R.O. *Průručka trojí úspory*. Praha, 2015.
50. MORAVEC, Jaromír. *Teorie svařování a pájení II: speciální metody svařování*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009, 150 s. ISBN 978-80-7372-439-9.
51. MRŇA, LIBOR. Speciální technologie ve svařování. (přednáška) Brno: VUT v BRNĚ, 14.10.2015
52. MRŇA, LIBOR. Speciální technologie ve svařování. (přednáška) Brno: VUT v BRNĚ, 21.10.2015
53. MRŇA, LIBOR. Speciální technologie ve svařování. (přednáška) Brno: VUT v BRNĚ, 7.10.2015
54. MRŇA, Libor. Využití metod signálové frekvenční analýzy pro sledování a řízení laserového svařovacího procesu: The use of signal frequency analysis methods to monitor and control the laser welding process : zkrácená verze habilitační práce. Brno: VUT IUM, 2014, 25 s. ISBN 978-80-214-4843-8.
55. Nd:YAG laser / pulsed / green / compensation. *Direct industry* [online]. 2016 [cit. 2016-03-09]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/continuum/product-27505-592231.html>
56. Nedestruktivní zkoušení N D T. VANĚK WELDING S.R.O. *Vaněk Welding s.r.o.* [online]. 2014 [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: <http://www.vanek-welding-s-r-o.cz/ndt-zkousky-skoleni-korozni-technolog/>



57. Nekonvenční metody obrábění – 5. díl. KEREČANINOVÁ, Zuzana a Jaroslav ŘASA. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008 [cit. 2016-02-23]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-5-dil.html>
58. NĚMEČEK, Stanislav. Laserové technologie. *Česká technologická platforma: Strojírenství o.s.* [online]. 2013 [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://www.ctps.cz/cs/uvodni-stranka/soubor-laserove-technologie/84/>
59. Nové materiály, technologie a zařízení pro svařování: .. ročník odborného semináře : sborník přednášek .. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 1997. ISBN 978-80-248-2473-4.
60. Ochrana činných ploch nástroje laserem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2013 [cit. 2016-02-23]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/ochrana-cinnych-ploch-nastroje-laserem.html>
61. PÍŠEK, František. *Nauka o materiálu II*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1959.
62. PLUHAŘ, Jaroslav a Josef KORITTA. *Strojírenské materiály*. 2., přeprac. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1977.
63. PLUHAŘ, Jaroslav. *Nauka o materiálech: celostátní vysokoškolská učebnice pro skupinu studijních oborů Strojírenství a ostatní kovodělná výroba*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989.
64. Properties of Gases. *ESAB* [online]. 2016 [cit. 2016-03-28]. Dostupné z: [http://www.esabna.com/euweb/mig\\_handbook/592mig4\\_2.htm](http://www.esabna.com/euweb/mig_handbook/592mig4_2.htm)
65. Převody materiálů DIN - ČSN - W.Nr. OCTOPUSTOOLS S. R. O. *Octopus Tools* [online]. 2008 [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: [http://www.octopustools.com/normy\\_materialu.php](http://www.octopustools.com/normy_materialu.php)
66. ROUBÍČEK, Martin. Laserové svařování. *Air Liquide* [online]. Praha, 2016 [cit. 2016-03-27]. Dostupné z: <http://www.airliquide.cz/file/otherelement/pj/laserove-svarovani49120.pdf>
67. SARMA, Diganta. Improving GMAW Efficiency through Shielding Gases. *Welding journal* [online]. 2014, **93**(12), 40 - 46 [cit. 2016-03-28]. ISSN 0043-2296. Dostupné z: [https://app.aws.org/wj/2014/WJ\\_2014\\_12/index.html#/42/](https://app.aws.org/wj/2014/WJ_2014_12/index.html#/42/)
68. SATHIYA, P., Mahendra KUMAR MISHRA, R. SOUNDARARAJAN a B. SHANMUGARAJAN. Shielding gas effect on weld characteristics in arc-augmented laser welding process of super austenitic stainless steel. *Optics and Laser Technology* [online]. 2012 [cit. 2016-03-07]. DOI: 10.1016/j.optlastec.2012.07.035. ISSN 00303992. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0030399212003507>
69. SEJČ, Pavol. *Ochranné plyny vo zvaraní*. 1. vyd. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2002. Edícia monografií. ISBN 80-227-1720-7.
70. SERIÁL NA TÉMA LASERY - LASEROVÉ ŘEZÁNÍ (LASER CUTTING). *Lasery a optika* [online]. 2011 [cit. 2016-04-22]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery--laserove-rezani-laser-cutting-129>
71. Schlieren system. NASA. *NASA* [online]. 2014, 5.5.2015 [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tunvschlrn.html>
72. SCHORNAGEL, Ir. A.J. Technické informace - korozi vzdorné oceli. HEYMAN. *HEYMAN: acces and fastening solutions* [online]. Brno [cit. 2016-03-31]. Dostupné z: [https://www.heyman.cz/media/useruploads/files/cz/technische\\_angaben/korozi-vzdorne-oceli.pdf?f=1](https://www.heyman.cz/media/useruploads/files/cz/technische_angaben/korozi-vzdorne-oceli.pdf?f=1)

73. STERN, G. Absorptivity od CW CO<sub>2</sub>, CO and YAG laser beams by different metallic alloys. Erlangen: ELCAT 90, 1990.
74. SVAŘOVÁNÍ LASEREM – poslední trendy. KOŘÁN, Pavel. *IStrojirenství* [online]. [cit. 2016-03-12]. Dostupné z: <http://www.istrojirenstvi.cz/materialy/precist.php?navez=svarovani-laserem-posledni-trendy&id=20>
75. Svařování laserovým paprskem. In: *Využití laserů v průmyslu*. Plzeň: MATEX MP, 2013, s. 7.
76. ŠEBESTOVÁ, Hana a Petr SCHOVÁNEK. *Krystalizace ocelí a litin*. Olomouc, 2012. Dostupné také z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/znm1-p-2.pdf>
77. Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001, 394 s. Svařování. ISBN 80-857-7181-0.
78. The top 5 benefits of Laser welding. *SPI Lasers* [online]. 2015 [cit. 2016-03-09]. Dostupné z: <http://www.spilasers.com/application-welding/the-top-5-benefits-of-laser-welding/>
79. VALÁŠEK, PETR. Kuličkové šrouby Kuřim, a.s., Blanenská 1277/37, Kuřim, 11.11.2015
80. Vrtání. *Trumpf* [online]. 2016 [cit. 2016-03-09]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/laserove-rezani/vrtani.html>
81. WEMAN, Klas. *Welding processes handbook*. 2nd ed. Oxford: Woodhead Publishing, 2012. ISBN 978-0-85709-510-7.
82. ZEDNÍK, Vladimír. *Zkoušení kovů: pomocná kniha pro vysoké školy báňské*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1957.
83. Zkoušky nedestruktivní defektoskopie. *Evropská databanka* [online]. 2016 [cit. 2016-04-02]. Dostupné z: <http://nabidky.edb.cz/Nabidka-43208-Zkousky-nedestruktivni-defektoskopie>
84. ZOU, Ying, Rintaro UEJI a Hidetoshi FUJII. Effect of oxygen on weld shape and crystallographic orientation of duplex stainless steel weld using advanced A-TIG (AA-TIG) welding method. *Materials Characterization* [online]. 2014, **91**, 42-49 [cit. 2016-03-07]. DOI: 10.1016/j.matchar.2014.02.006. ISSN 10445803. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S1044580314000606>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

<b>Symbol</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Popis</b>
A	[%]	Absorpce
A <sub>80</sub>	[%]	Tažnost
BPP	[mrad/mm]	Divergence svazku
D	[mm]	Průměr
E	[GPa]	Modul pružnosti v tahu
F	[N]	Síla vlačující těleso do povrchu materiálu
F <sub>o</sub>	[mm]	Vzdálenost ohniska
HB	[N/mm <sup>2</sup> ]	Tvrdost materiálu podle Brinella
I	[W/mm <sup>2</sup> ]	Hustota výkonu
KV	[J]	Vrubová houževnatost
P	[W]	Výkon laserového svazku
Q	[J·mm <sup>-1</sup> ]	Vnesené teplo
Ra	[μm]	Drsnost
Re	[MPa]	Mez kluzu
Rm	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
R <sub>p0,2</sub>	[MPa]	Smluvní mez kluzu při protažení o 0,2%
T	[°C]/[K]	Teplota
T <sub>tav</sub>	[°C]	Teplotní oblast tavení
a	[%]	Průměrná hodnota úhlopříčky
d <sub>1</sub>	[mm]	Délka úhlopříčky
d <sub>2</sub>	[mm]	Délka úhlopříčky
t	[mm]	Šířka plechu
v	[mm/s]	Svařovací rychlost
z	[mm]	Šířka svařovací mezery
η	[-]	Účinnost
λ	[μm]	Vlnová délka
λ <sub>T</sub>	[W/mK]	Tepelná vodivost
ρ	[kg/m <sup>3</sup> ]	Měrná hmotnost materiálu

<b>Zkratka</b>	<b>-</b>	<b>Popis</b>
BPP		Beam parameter product
SK		Svarový kov
ZM		Základní materiál

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Ukázky laserového svařování [23][24][77] .....	8
Obr. 2 CO <sub>2</sub> vývojová odtavná trubice [17].....	9
Obr. 3 NdYAG laser [55] .....	10
Obr. 4 Plazmový oblak tvořený parami kovu a ochranným plynem [22] .....	11
Obr. 5 Graf závislosti absorpce na vlnové délce [34] .....	11
Obr. 6 Graf absorpce leštěného povrchu mědi jako funkce intenzity dopadajícího záření [18]12	
Obr. 7 Graf charakteristické využití laserových technologií [22][44] .....	13
Obr. 8 Graf závislost rychlosti řezání na penetraci [22].....	14
Obr. 9 Vrtání laserem [80] .....	14
Obr. 10 Porovnání laserového návaru se sirkou [46] .....	15
Obr. 11 Stupně navařování laserem [54].....	15
Obr. 12 Intravolumární glyptika [4] .....	16
Obr. 13 Princip 3D tisku [25].....	16
Obr. 14 Penetrační a kondukční režim [74] .....	17
Obr. 15 Schéma mechanismu tvorby svarového spoje [44].....	17
Obr. 16 Porovnání tvaru laserového svaru s jinými svařovacími metodami [33].....	18
Obr. 17 Základní tvary laserových svarových spojů [47] .....	19
Obr. 18 Hloubka a říška svaru roste spolu s výkonem: Výkon od 2,5 do 7,5 kW, svařovací rychlost 2 m/min, pozice ohniska 0 mm [47].....	19
Obr. 19 Graf vlivu rychlosti svařování na pevnost [44].....	20
Obr. 20 Graf vlivu svařovací rychlosti na hloubku svaru [31].....	20
Obr. 21 Graf hloubky penetrace závislé na poloze ohniska [44] .....	21
Obr. 22 Vliv polohy ohniska, Svařovací rychlost 4 m/min, výkon 15 kW, pozice ohniska +5 až -7 mm [43] .....	21
Obr. 23 Různé tvary hustoty laserového svazku [44] .....	22
Obr. 24 Graf vlivu specifického vneseného tepla na hodnotu penetrace [44] .....	22
Obr. 25 Srovnání velikostí mezer [31] .....	23
Obr. 26 Druhy laserových svarů [31].....	23
Obr. 27 Schéma porovnání svařovacích metod a metody Laser hybrid [31].....	24
Obr. 28 Ukázky svarových spojů laser-hybrid [31] .....	24
Obr. 29 Svarové vady [31] .....	26
Obr. 30 Kapilární zkouška [83].....	27
Obr. 31 Zkouška ultrazvukem [56] .....	28
Obr. 32 Zkouška prozářením [7] .....	28
Obr. 33 Magnetická zkouška [7] .....	28
Obr. 34 Pracovní diagram tahové zkoušky [7].....	29
Obr. 35 Zkouška dle Brinella [7].....	29
Obr. 36 Zkouška lámavosti [7].....	29
Obr. 37 Vickers měření úhlopříček [7] .....	30
Obr. 38 Diamantový jehlan [7].....	30
Obr. 39 Tvorba plazmatu – ochranná atmosféra He (vlevo), Ar (uprostřed), N <sub>2</sub> (vpravo) [66]31	
Obr. 40 Graf ionizační a disociační energie plynů [67] .....	32
Obr. 41 Graf tepelné vodivosti ochranných plynů [67] .....	33
Obr. 42 Princip šlívové zobrazovací metody [36] .....	34
Obr. 44 Láhev s plynem ArMix .....	38
Obr. 43 Bodově svařené plechy .....	38
Obr. 45 Průběh svařování .....	39
Obr. 46 Nastavení laseru při svařování .....	40

Obr. 47 - Líce svarů tloušťky 3 mm – nahoře ochranná atmosféra argonu, dole směsná ochranná atmosféra ArMix .....	40
Obr. 48 - Líce svarů tloušťky 4 mm – nahoře ochranná atmosféra argonu, dole směsná ochranná atmosféra ArMix .....	40
Obr. 49 - Líce svarů tloušťky 5 mm – nahoře ochranná atmosféra argonu, dole směsná ochranná atmosféra ArMix .....	41
Obr. 50 - Kořeny svarů tloušťky 4 mm – nahoře ochranná atmosféra argonu, dole směsná ochranná atmosféra ArMix.....	41
Obr. 51 – Kořeny svarů tloušťky 5 mm – nahoře ochranná atmosféra argonu, dole směsná ochranná atmosféra ArMix.....	41
Obr. 52 Vyřezávání zkušebních těles pro tahovou zkoušku .....	41
Obr. 53 Zbytek svařeného vzorku po vyřezání tahových vzorků a vzorků pro metalografii...	41
Obr. 54 Broušící stroj Tegramin-20 .....	42
Obr. 55 přístroj na zalévání vzorků Citopress-1.....	42
Obr. 57 Hotové metalografické výbrusy .....	42
Obr. 56 Leptání vzorků v leptadle 2-2-1 .....	42
Obr. 58 Makrostruktura svaru vzorku tloušťky plechu 4 mm v ochranné atmosféře argonu ..	43
Obr. 59 Makrostruktura svaru vzorku tloušťky plechu 4 mm ve směsné ochranné atmosféře ArMix .....	44
Obr. 60 Rozhraní svaru vzorku tloušťky plechu 4 mm v ochranné atmosféře ArMix.....	44
Obr. 61 Rozhraní svaru vzorku tloušťky plechu 4 mm ve směsné ochranné atmosféře ArMix	44
Obr. 62 Graf průběhu tvrdosti výbrusu z tloušťky 5 mm.....	46
Obr. 63 Mikrostruktura svařového kovu svařovaného v argonu tloušťky 4 mm.....	47
Obr. 64 Měření delta feritu na feritometru .....	48
Obr. 65 Zakreslení délky $L_0 = 80$ mm.....	49
Obr. 66 Přetržení vzorku 1 tloušťky 5 mm .....	49
Obr. 67 Diagram tahové zkoušky tlouštěk 3 mm.....	49
Obr. 68 Makrosnímek lomové plochy vzorku číslo 2 svařovaného v ochranné atmosféře argonu .....	50
Obr. 69 Makrosnímek lomové plochy vzorku číslo 3 svařovaného ve směsné ochranné atmosféře .....	50
Obr. 70 Nastavení šlírové zobrazovací metody .....	51
Obr. 71 – Šlírová zobrazovací metoda .....	51

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – Srovnání typů laserů [33][53].	10
Tabulka 2 – Absorpce různých materiálů [22].	11
Tabulka 3 – Vliv stavu povrchu na hodnotu absorpce u oceli 35NCD16 [73].	12
Tabulka 4 Srovnání specifického vneseného tepla u různých svařovacích metod při svařování vysokopevnostní oceli tloušťky 1 mm [59].	23
Tabulka 5 Svařitelnost materiálů [77].	27
Tabulka 6 Přehled ochranných plynů [10].	32
Tabulka 7 Srovnání jednotlivých druhů korozivzdorných ocelí s uhlíkovou ocelí[41].	35
Tabulka 8 Příklady austenitických ocelí – oceli byly vyžehány na měkko (1010–1120 °C) a tvářené či zpevněné za studena[72].	36
Tabulka 9 Chemické složení oceli X5CrNi18-10 (1.4301 či 17 240) [2] [65]	38
Tabulka 10 Složení směsi ArMix.[26]	39
Tabulka 11 Svařovací parametry a výpočty specifického vneseného tepla.	39
Tabulka 12 Průměrné hodnoty průměrů keyhole, všechny hodnoty jsou v mm.	40
Tabulka 13 Srovnání makrostruktury všech experimentů.	45
Tabulka 14 Změřené hodnoty na feritometru.	48
Tabulka 15 Srovnání hodinových sazeb laseru - hodnoty uvedeny v Kč/hod	52



## SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 – Hydraulický zkušební stroj ZD40 /400kN/
- Příloha 2 – Pohyb keyhole při svařování v ochranné atmosféře argonu
- Příloha 3 - Pohyb keyhole při svařování v ochranné atmosféře argonu
- Příloha 4 – Makrostrukturní svařů tloušťky 5 mm - nahoře argon, dole směs ArMix
- Příloha 5 – Mikrostrukturní svařů tloušťky 5 mm - nahoře argon, dole směs ArMix
- Příloha 6 – Hodnoty z tahové zkoušky
- Příloha 7 – Grafy tahové zkoušky 1/5
- Příloha 8 – Grafy tvrdostí 1/2
- Příloha 9 – Mikrotvrdosti svařového kovu 1/2

## Příloha 1 – Hydraulický zkušební stroj ZD40 /400kN/

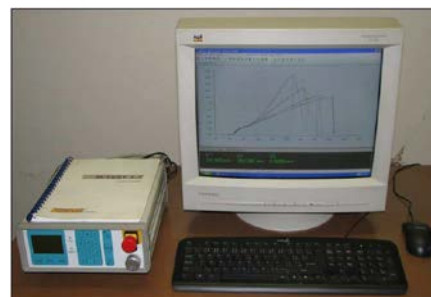
Stroj umožňuje provádět tahové, tlakové a ohybové zkoušky materiálů do 400 kN s řízením rychlosti zatěžování a programovým zpracováním zkoušek. Je vybaven vestavěným inkrementálním délkovým snímačem polohy příčnicku s rozlišením 0,01 mm a snímačem síly s řídicí jednotkou EDC 60.

Řídicí jednotka EDC 60 je vysoce precizní elektronické zařízení speciálně konstruované pro řízení servo-hydraulických zkušebních strojů. Je vyráběna speciálně pro aplikace řízení zkušebních strojů a využívají ji přední evropští výrobci universálních zkušebních strojů. Jednotka je opatřena programem pro zkoušky kovů s možností provádět zkoušky bez PC u jednoduchých aplikací bez použití průtahoměru.

Technické parametry:

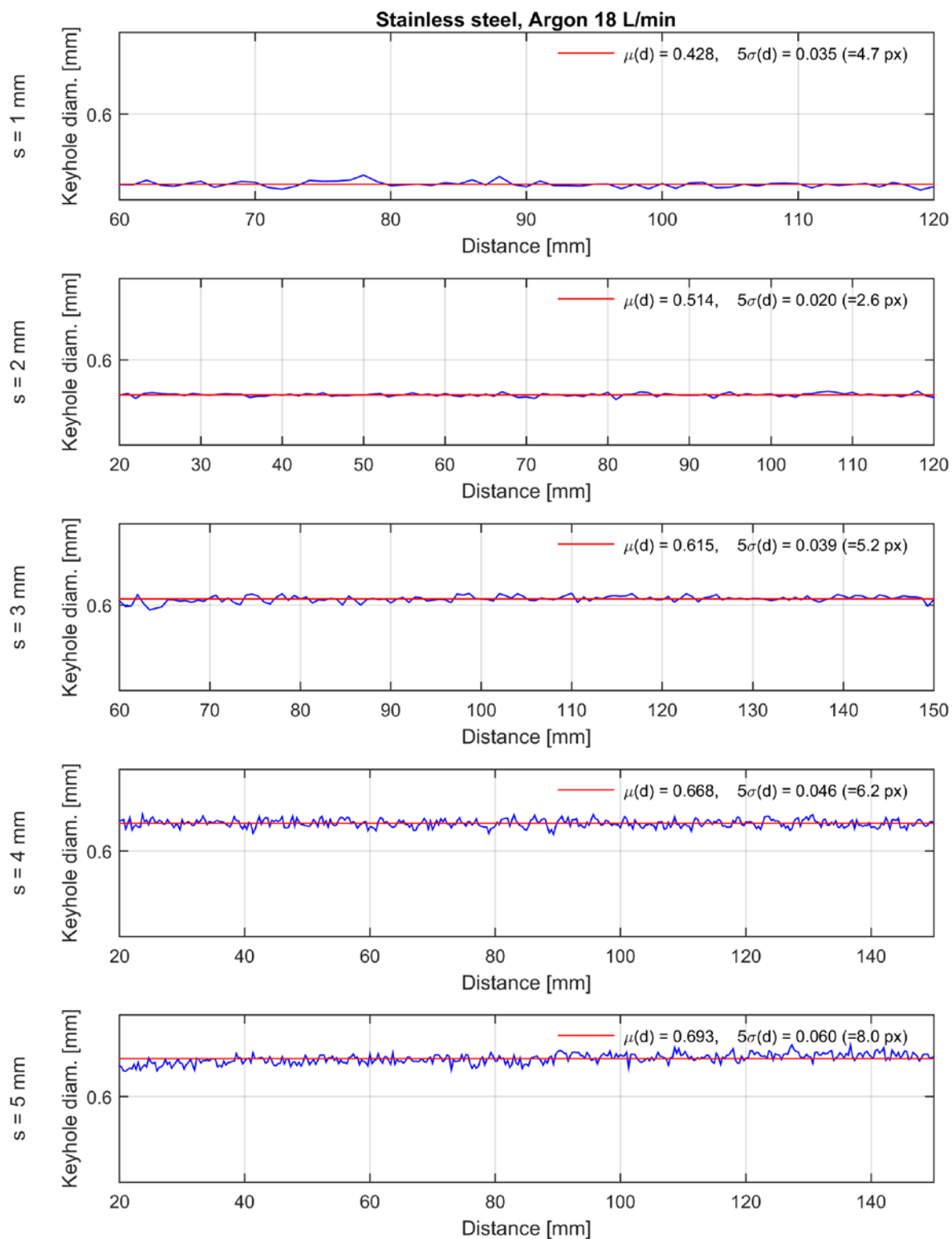
- Výrobce: HBM /SRN/
- Měřicí rozsah: 8 ÷ 400 kN
- Chyba měření síly: 1/100 jmenovitého rozsahu síly, tj.  $\pm 1$  % odpovídá třídě přesnosti 1
- Měřicí rozsah měření dráhy: 0 ÷ 280 mm
- Chyba měření dráhy:  $\pm 0,01$  mm
- sériové rozhraní RS 232 pro komunikaci s nadřazeným PC
- COM1 pro PC s FIFO s maximální rychlostí 115 KB
- inkrementální vstup pro napojení snímače dráhy

Počítač je vybaven programem M-TEST v.1.7 pro tahovou, tlakovou a ohybovou zkoušku kovových materiálů dle EN 10001-2 s vyhodnocením výsledků, grafickým zpracováním.

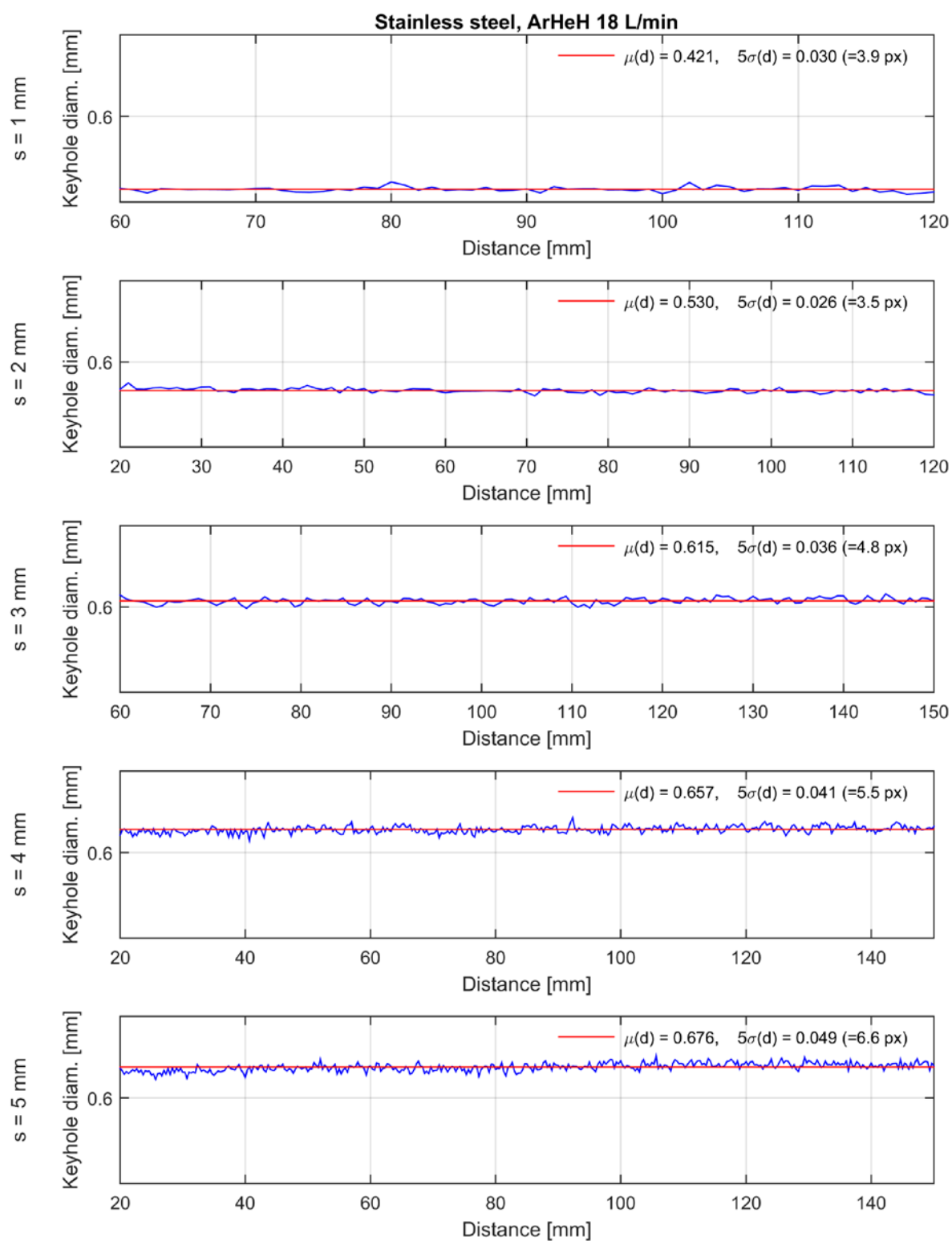


Řídicí jednotka EDC 60

Příloha 2 – Pohyb keyhole při svařování v ochranné atmosféře argonu

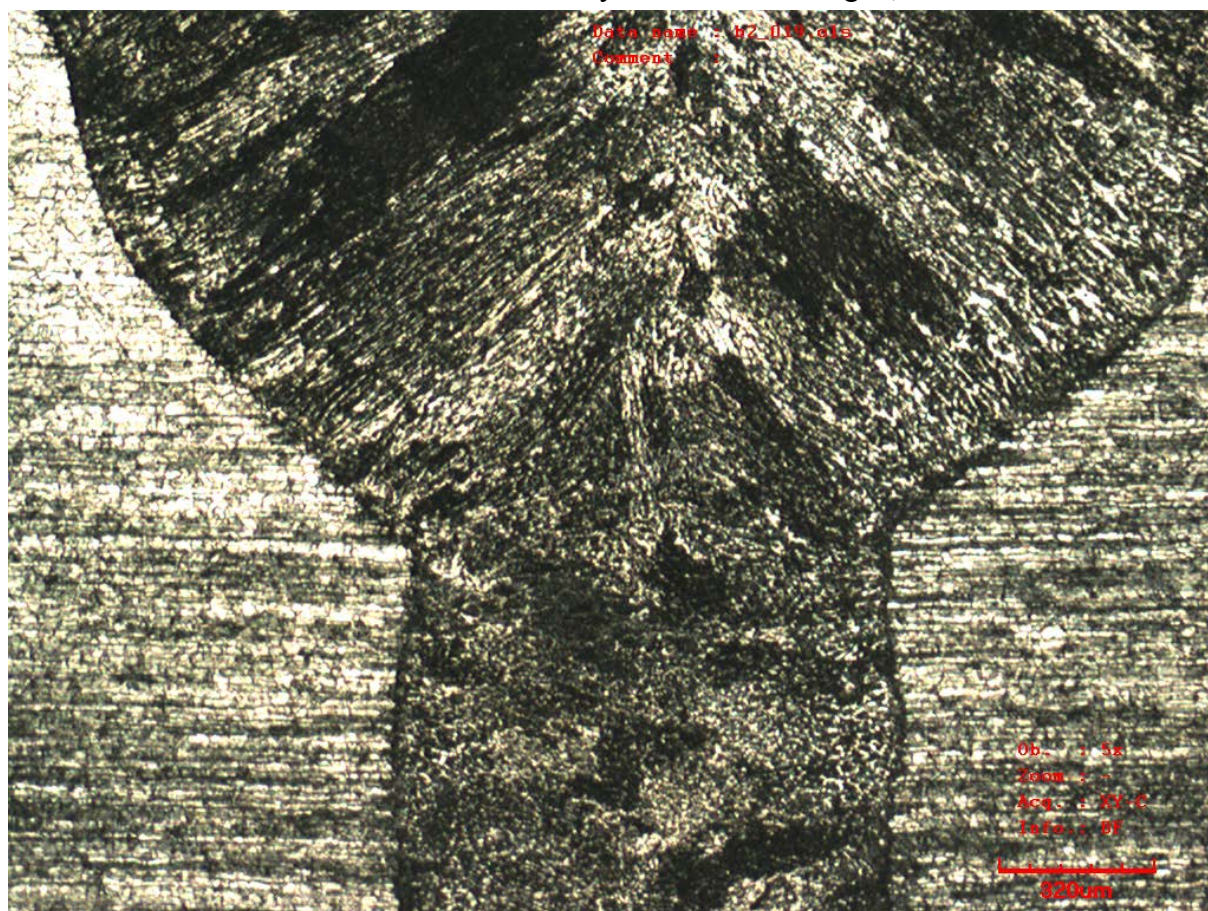


### Příloha 3 - Pohyb keyhole při svařování v ochranné atmosféře argonu



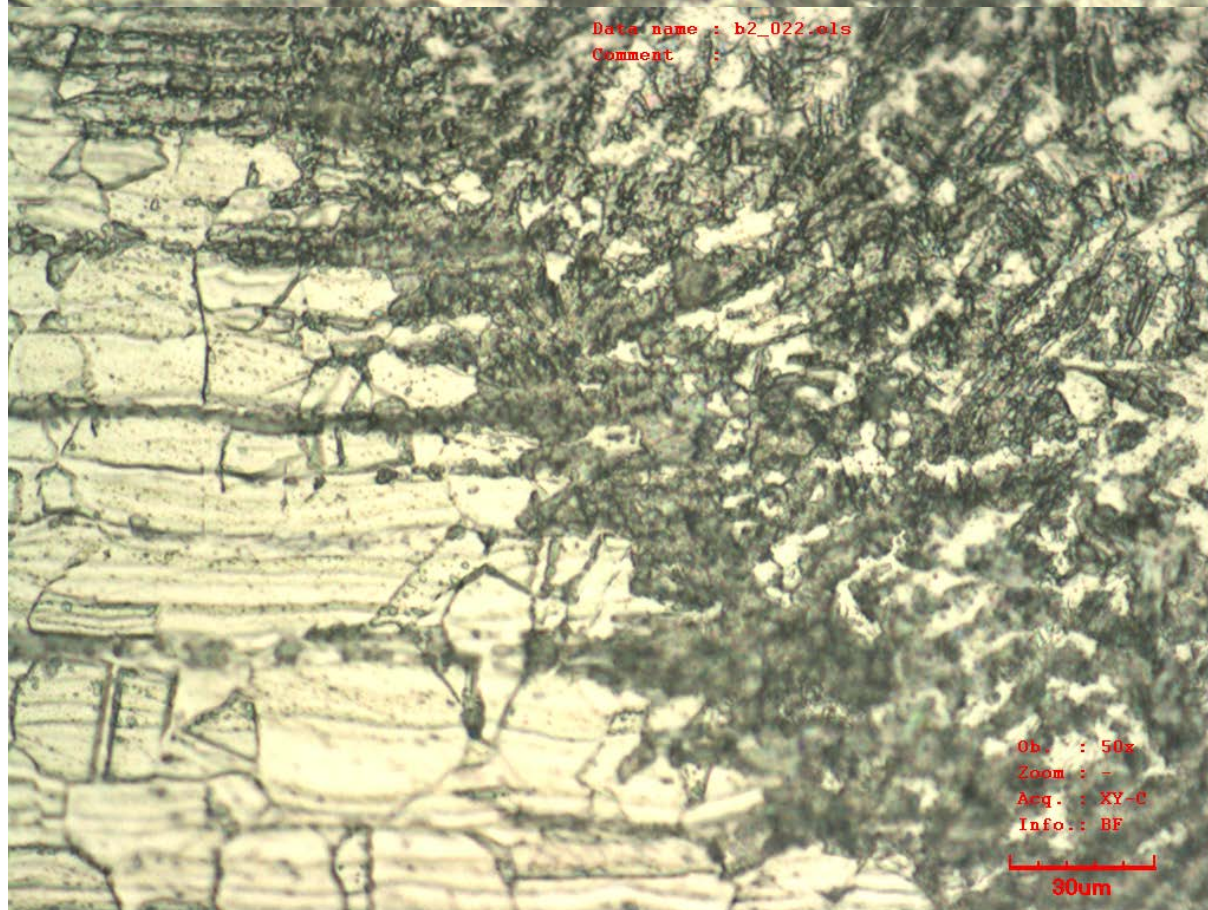
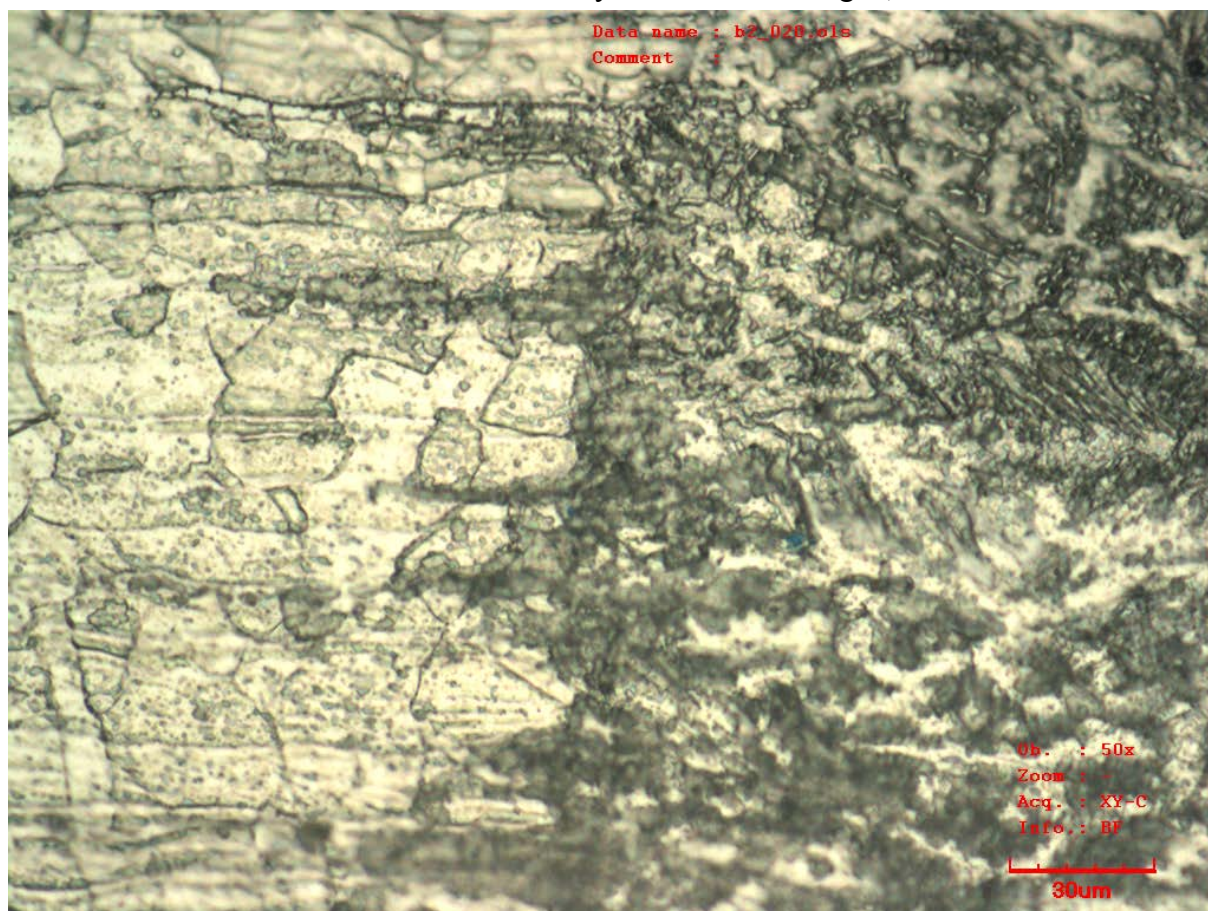


Příloha 4 – Makrostruktura svarů tloušťky 5 mm - nahoře argon, dole směs ArMix





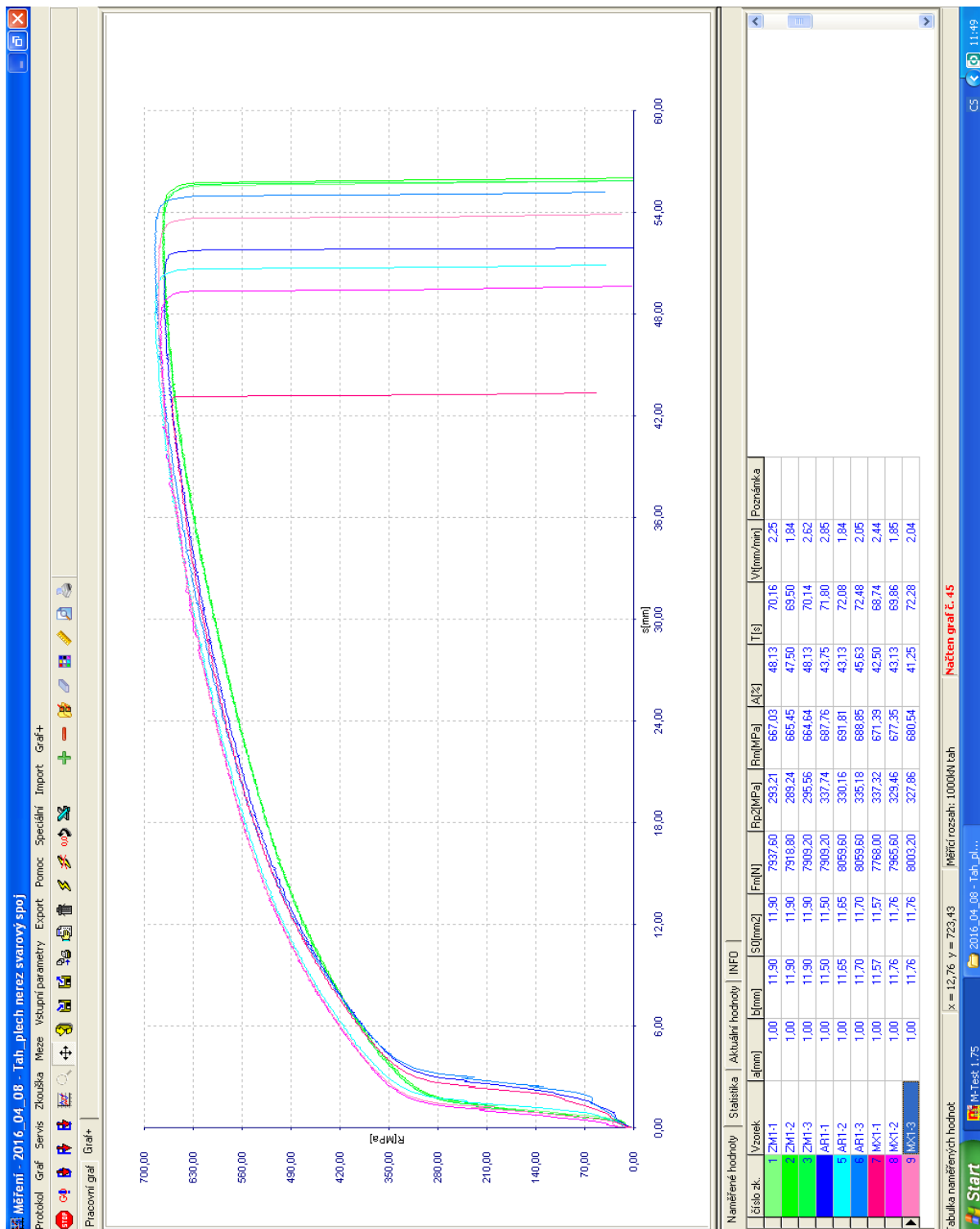
Příloha 5 – Mikrostruktura svarů tloušťky 5 mm - nahoře argon, dole směs ArMix

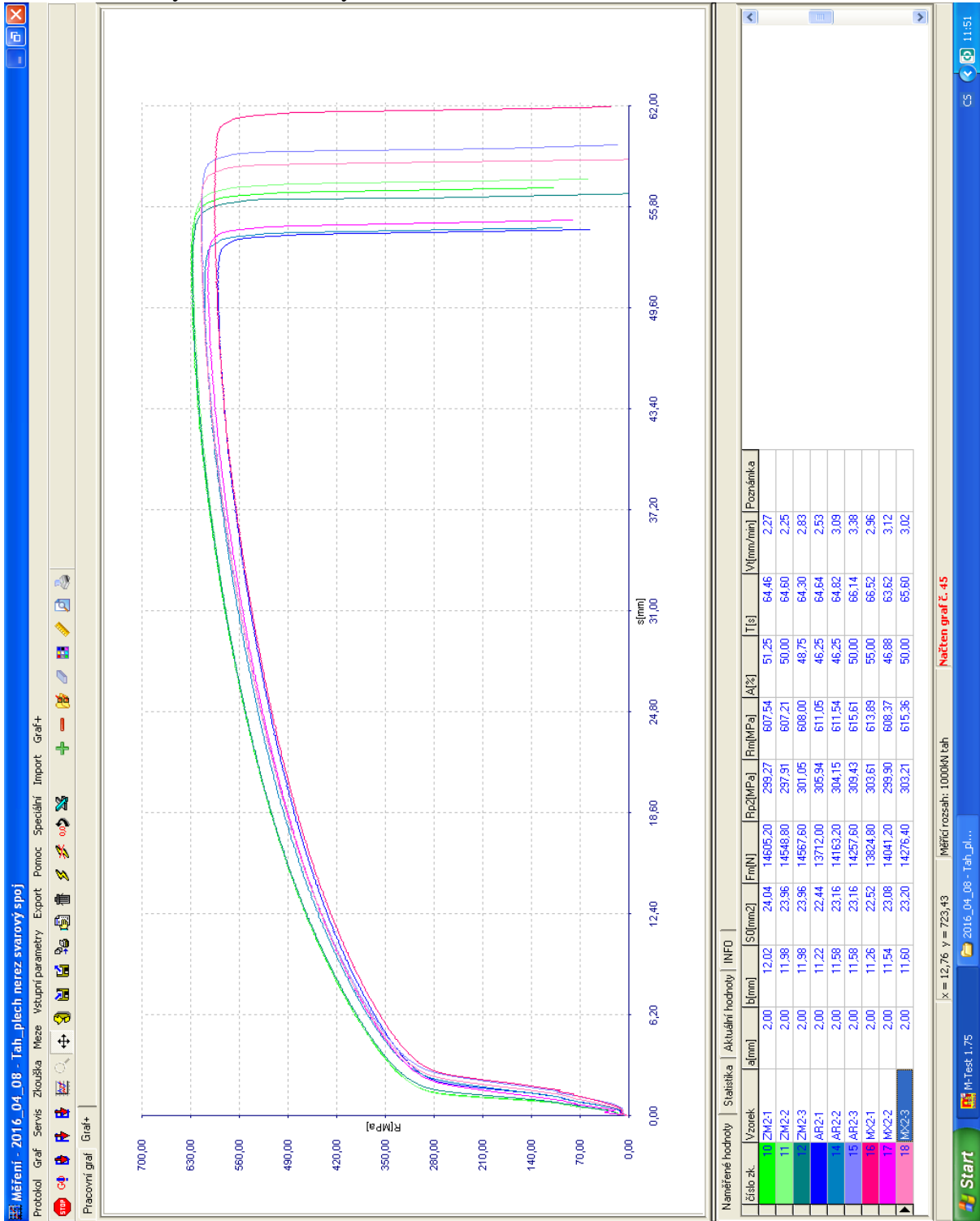


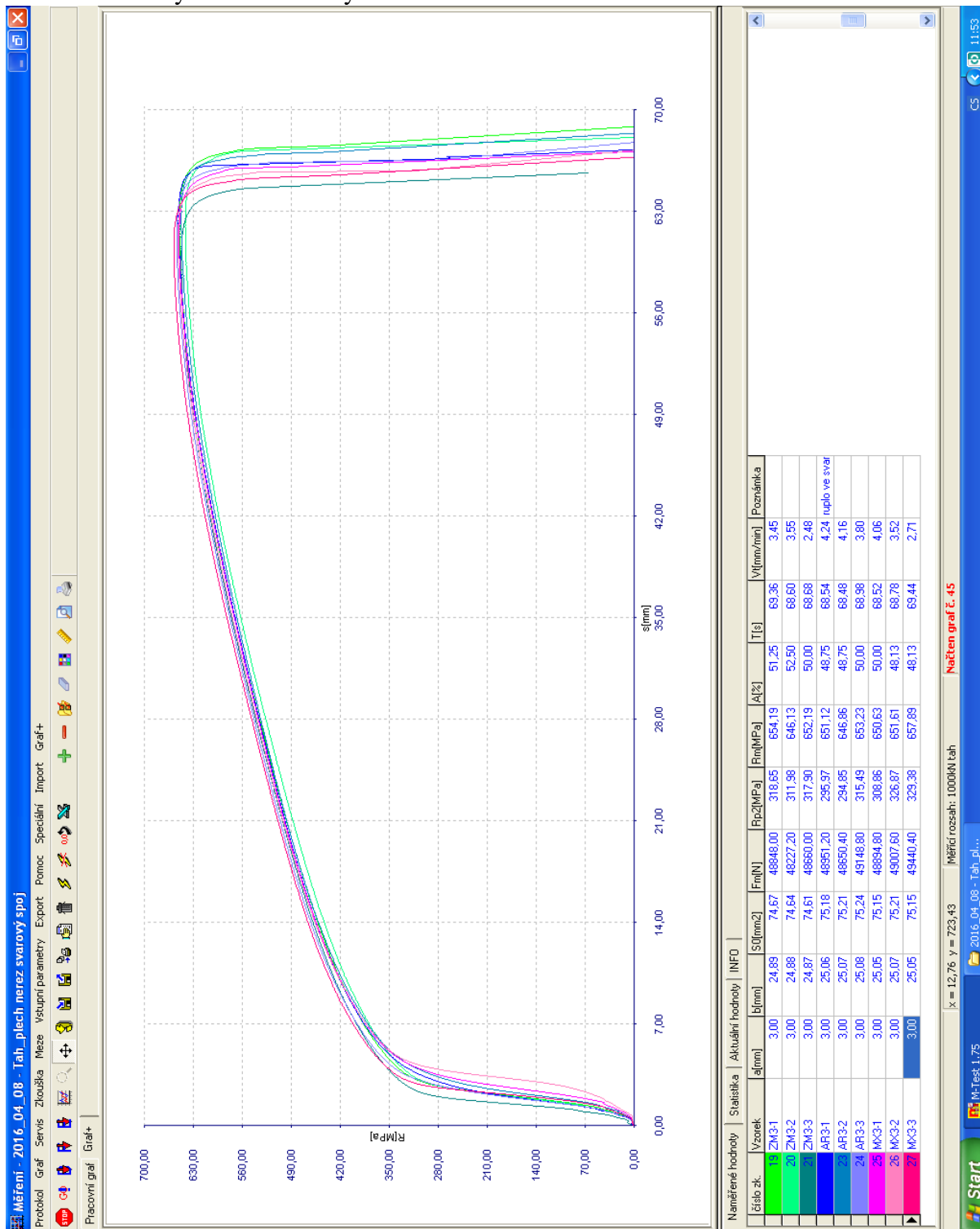


Příloha 6 – Hodnoty z tahové zkoušky

Vzorek	a[mm]	b[mm]	S0[mm <sup>2</sup> ]	Fm[N]	Rp <sub>0,2</sub> [MPa]	Rm[MPa]	A <sub>80</sub> [%]	Poznámka
ZM1-1	1	11,9	11,9	7937,6	293,2101	667,0252	48,125	
ZM1-2	1	11,9	11,9	7918,8	289,2437	665,4454	47,5	
ZM1-3	1	11,9	11,9	7909,2	295,563	664,6387	48,125	
AR1-1	1	11,5	11,5	7909,2	337,7391	687,7565	43,75	
AR1-2	1	11,65	11,65	8059,6	330,1631	691,8112	43,125	
AR1-3	1	11,7	11,7	8059,6	335,1795	688,8547	45,625	
MX1-1	1	11,57	11,57	7768	337,3207	671,3915	42,5	
MX1-2	1	11,76	11,76	7965,6	329,4558	677,3469	43,125	
MX1-3	1	11,76	11,76	8003,2	327,8571	680,5442	41,25	
ZM2-1	2	12,02	24,04	14605,2	299,2679	607,5374	51,25	
ZM2-2	2	11,98	23,96	14548,8	297,9132	607,212	50	
ZM2-3	2	11,98	23,96	14567,6	301,0518	607,9967	48,75	
AR2-1	2	11,22	22,44	13712	305,9358	611,0517	46,25	
AR2-2	2	11,58	23,16	14163,2	304,1451	611,5371	46,25	
AR2-3	2	11,58	23,16	14257,6	309,43	615,6131	50	
MX2-1	2	11,26	22,52	13824,8	303,6057	613,8899	55	
MX2-2	2	11,54	23,08	14041,2	299,896	608,3709	46,875	
MX2-3	2	11,6	23,2	14276,4	303,2069	615,3621	50	
ZM3-1	3	24,89	74,67	48848	318,6501	654,1851	51,25	
ZM3-2	3	24,88	74,64	48227,2	311,9775	646,1308	52,5	
ZM3-3	3	24,87	74,61	48660	317,8984	652,1914	50	
AR3-1	3	25,06	75,18	48951,2	295,9723	651,12	48,75	ruplo ve svaru
AR3-2	3	25,07	75,21	48650,4	294,8544	646,8608	48,75	
AR3-3	3	25,08	75,24	49148,8	315,4864	653,227	50	
MX3-1	3	25,05	75,15	48894,8	308,8596	650,6294	50	
MX3-2	3	25,07	75,21	49007,6	326,8661	651,6102	48,125	
MX3-3	3	25,05	75,15	49440,4	329,3839	657,8895	48,125	
ZM4-1	4	24,89	99,56	60989,2	303,7887	612,5874	56,875	
ZM4-2	4	24,92	99,68	60547,2	301,0674	607,4157	53,75	
ZM4-3	4	24,85	99,4	60754,4	296,2374	611,2112	56,25	
AR4-1	4	25,08	100,32	61280,8	294,0829	610,8533	53,75	
AR4-2	4	25,03	100,12	61572,4	295,1418	614,986	52,5	
AR4-3	4	25,07	100,28	61685,2	298,0455	615,1296	52,5	
MX4-1	4	25,05	100,2	61168	247,6926	610,4591	51,25	
MX4-2	4	25,07	100,28	61412,4	306,0191	612,4092	56,25	
MX4-3	4	24,98	99,92	61337,2	306,9336	613,8631	50	
ZM5-1	5	24,89	124,45	81416,4	357,8979	654,2097	55	
ZM5-2	5	24,88	124,4	80635,6	360,3119	648,1962	55,625	
ZM5-3	5	24,87	124,35	81463,2	338,8243	655,1122	56,25	
AR5-1	5	25,05	125,25	81529,2	312,0639	650,9318	47,5	ruplo ve svaru
AR5-2	5	25,08	125,4	82056	314,2392	654,3541	50	ruplo ve svaru
AR5-3	5	25,05	125,25	75388	283,4555	601,9002	21,25	ruplo ve svaru
MX5-1	5	25,04	125,2	80711,2	322,7796	644,6582	47,5	
MX5-2	5	25,06	125,3	81802	357,1237	652,8491	43,75	ruplo ve svaru
MX5-3	5	25,02	125,1	81679,6	336,4924	652,9145	45	ruplo ve svaru





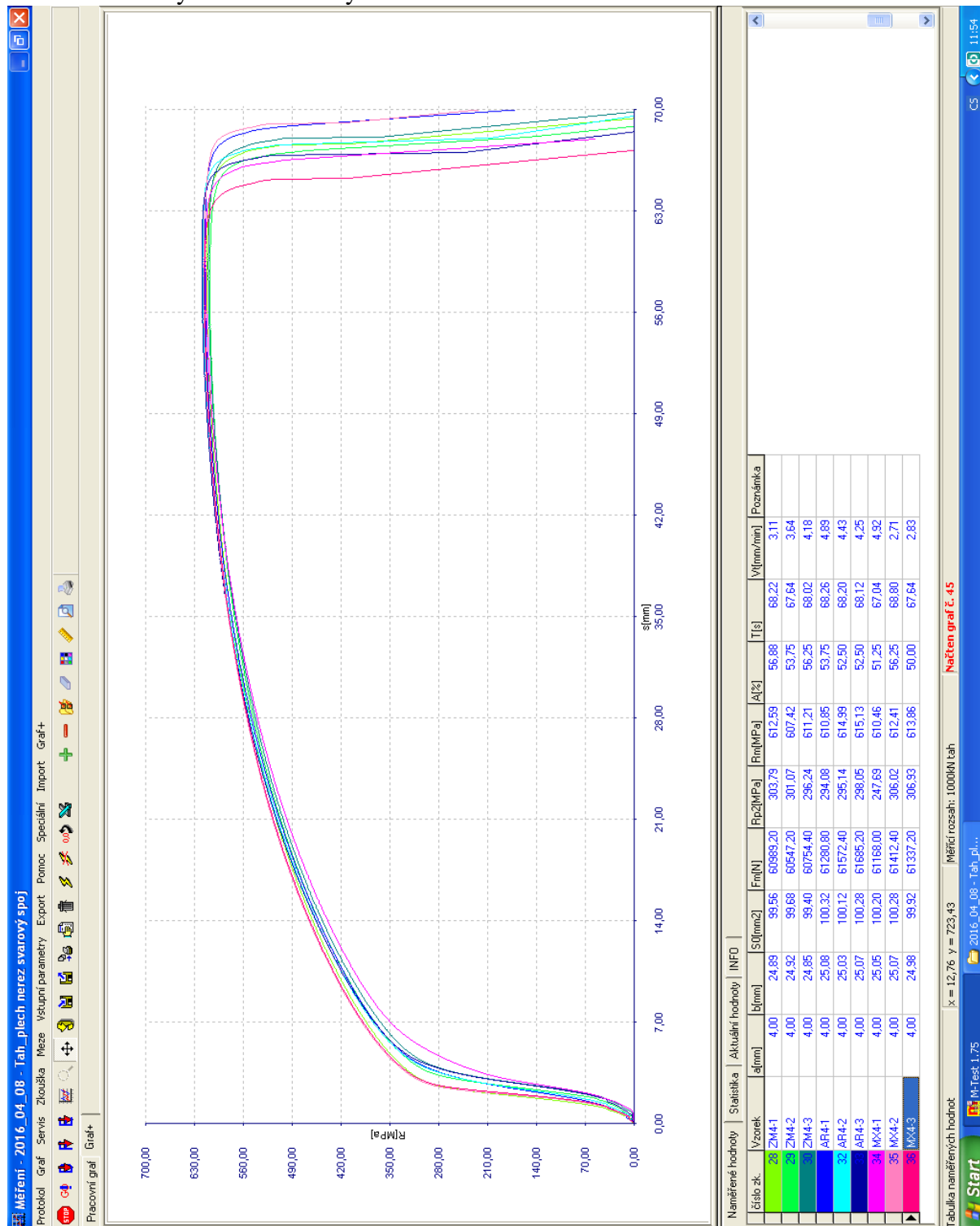


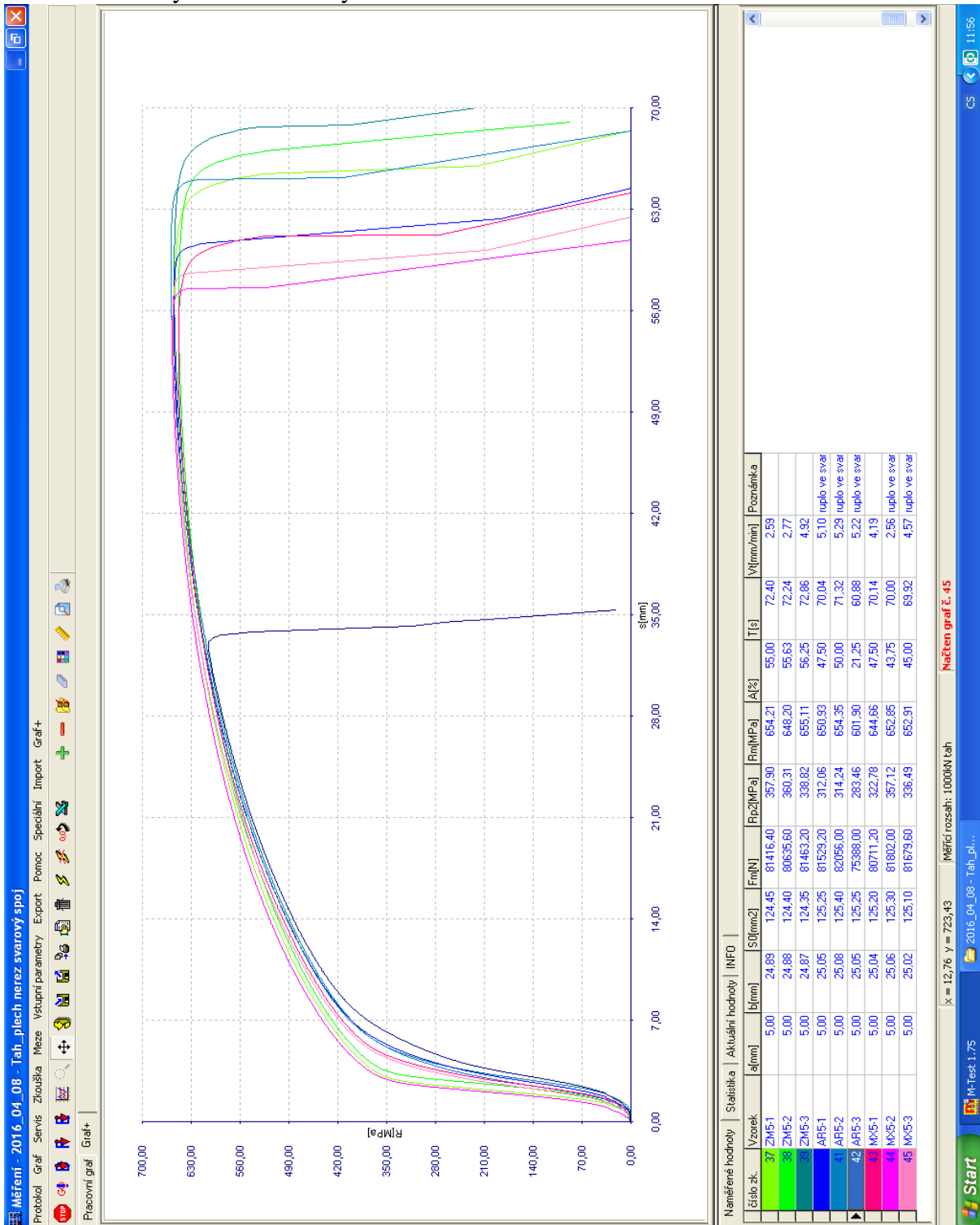
Natíten graf č. 45

Měřící rozsah: 1000kN tah

x = 12,76 y = 723,43







Načten graf č. 45

Měřicí rozsah: 1000kN tah

x = 12,76 y = 723,43

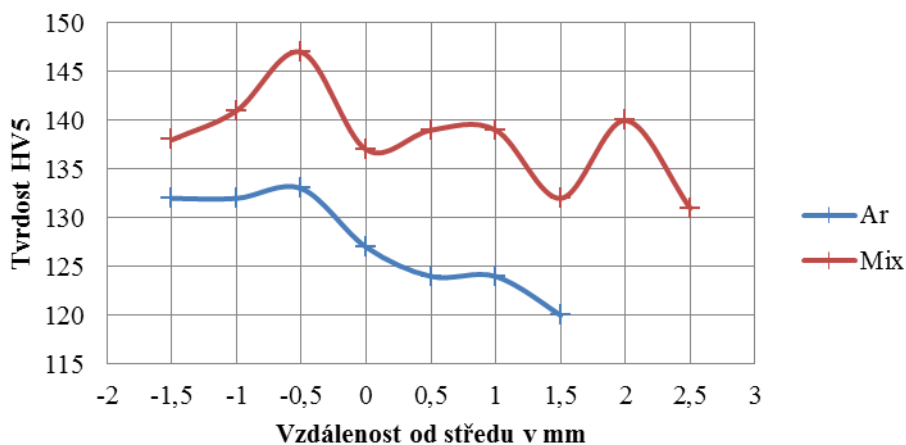
W-Test 1.75

2016\_04\_08 - Tah\_je...

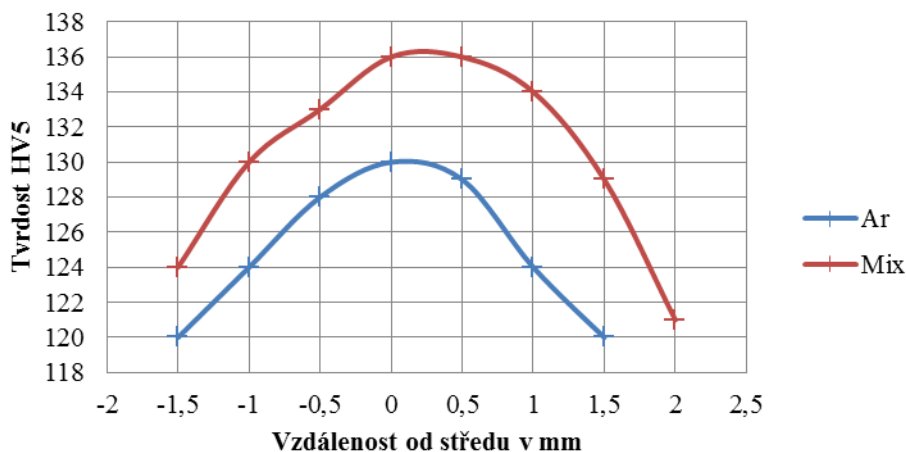
Start

CS 11:56

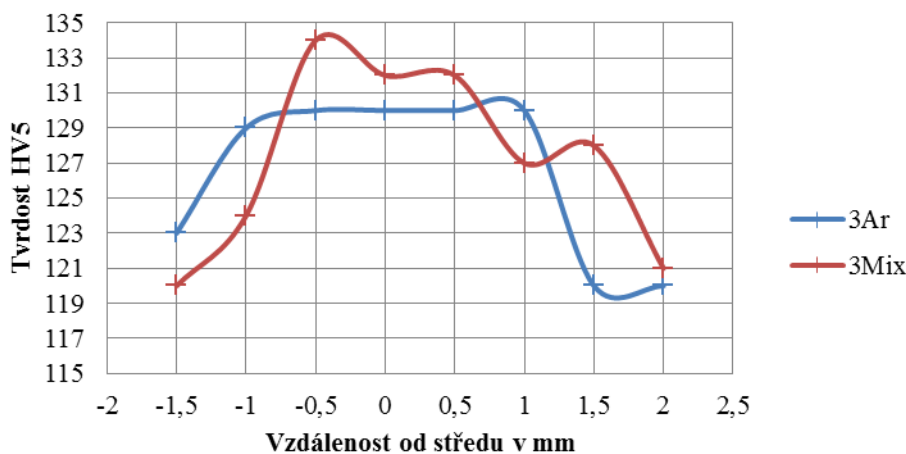
### Tvrdość floušťky 1 mm

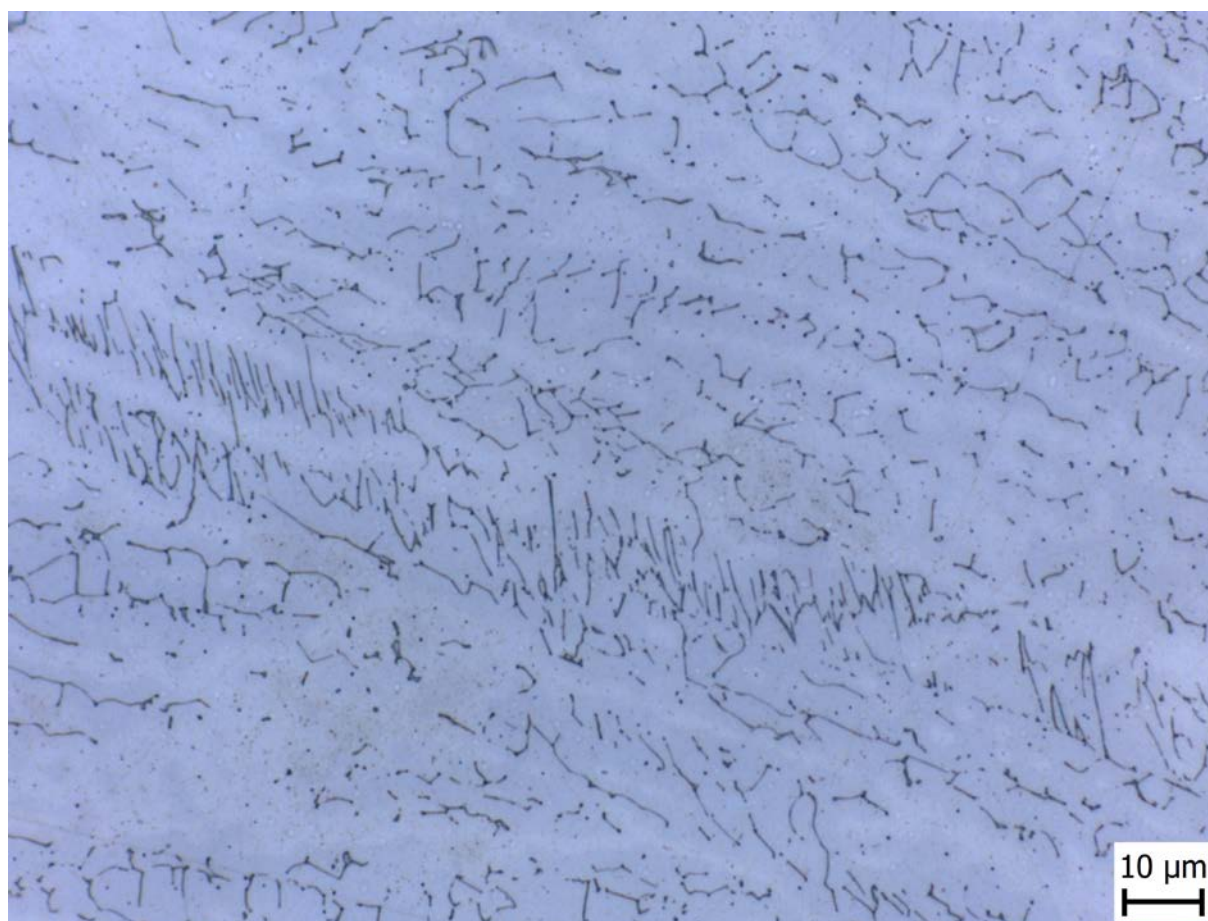
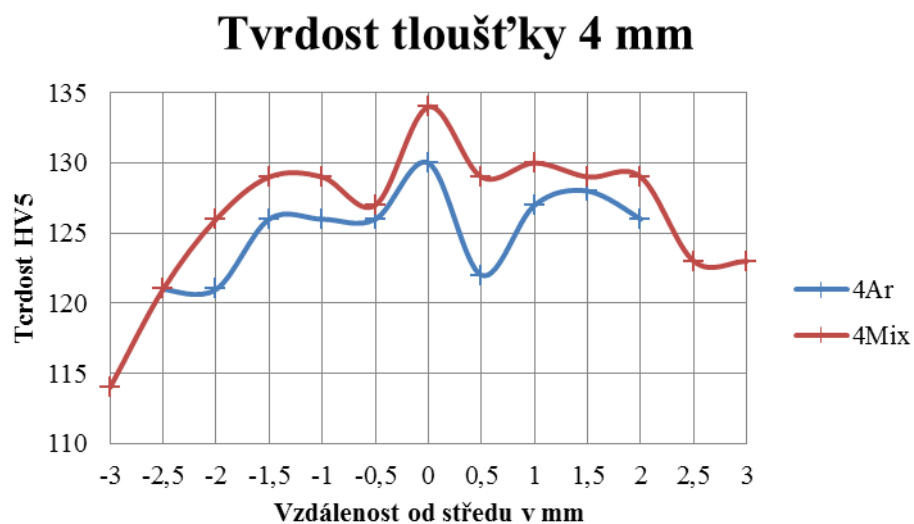


### Tvrdość floušťky 2 mm

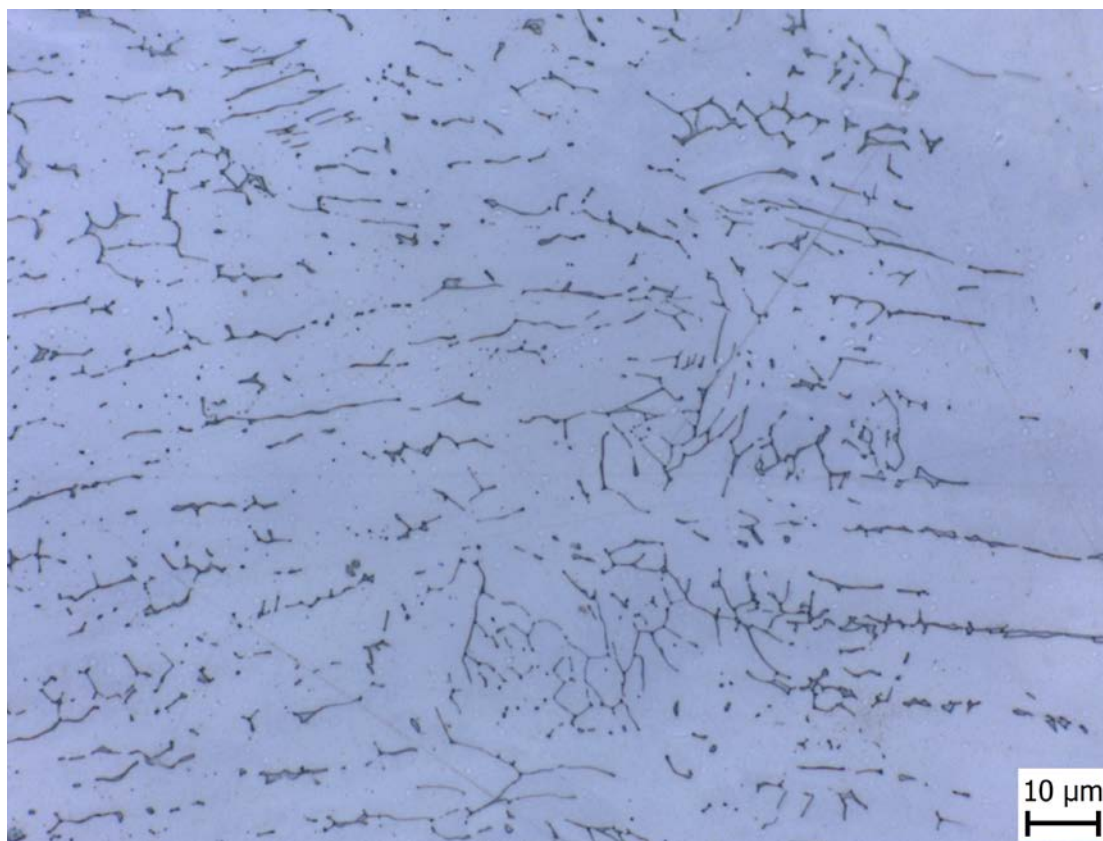


### Tvrdość floušťky 3 mm

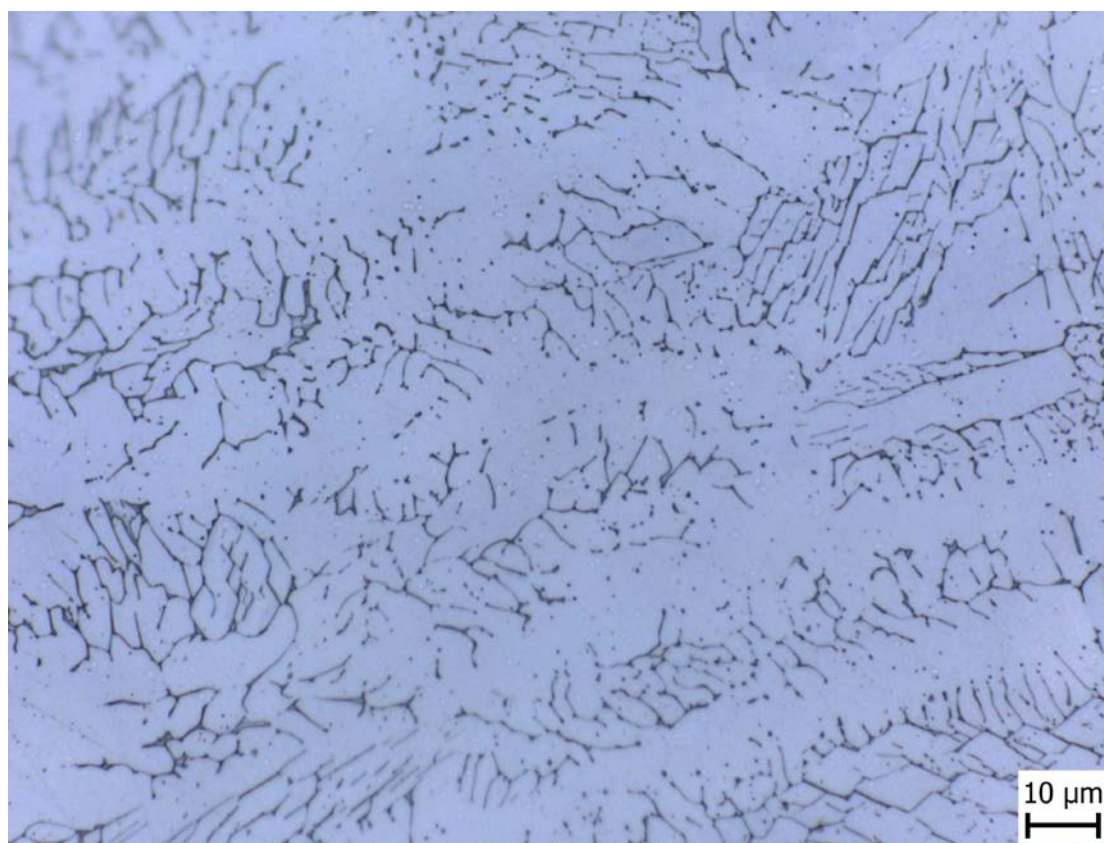




Tloušťka 5 mm – ochranná atmosféra Ar



Tloušťka 5 mm – ochranná atmosféra ArMix



Tloušťka 4 mm – ochranná atmosféra ArMix



