



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 OCHRANNÉ ATMOSFÉRY NA KVALITU SVARU A PARAMETRY LASEROVÉHO SVAŘOVÁNÍ

STUDY OF THE EFFECT SHIELDING GAS ON THE QUALITY OF WELD AND PARAMETERS OF LASER WELDING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Libor Procházka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Bc. Libor Procházka
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce:	doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
Akademický rok:	2016/17

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 ochranné atmosféry na kvalitu svaru a parametry laserového svařování

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Provést srovnání vlivu ochranné atmosféry z Ar a směsi Ar+H₂ na laserový svar jak z hlediska procesních parametrů, tak z hlediska strukturních a mechanických vlastností svaru dílu z korozivzdorné oceli.

Cíle diplomové práce:

Osvojit si technologii 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.

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

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

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Předmětem šetření této diplomové práce je problematika použití technologie laserového svařování v ochranných atmosférách. Na základě literární rešerše uvedené v teoretické části práce byly provedeny dva experimenty. Došlo k svařování plechů z materiálů X5CrNi18-10 i X2CrNiMo17-13-2, ve třech různých ochranných atmosférách. Ze svařených dílců byly vyhotoveny vzorky pro zkoušky tahovou, tvrdosti, makrostruktury a mikrostruktury. Ty byly následně analyzovány. Výstupem je potom zhodnocení vlivu ochranné atmosféry na kvalitu svarového spoje a optimální procesní parametry.

Klíčová slova

ochranná atmosféra, laser, svařování, korozivzdorná ocel, Šlířová metoda

ABSTRACT

The subject of this diploma thesis is the use of laser welding technology in protective atmospheres. Based on the literary research presented in the theoretical part of the thesis, two experiments were made. Welding of materials X5CrNi18-10 and X2CrNiMo17-13-2. Welded sheets were performed in three different protective atmospheres. Samples were made from the welded sheets for measuring tensile strength, hardness, macrostructure and microstructure. These samples were analyzed. The output of the analysis is the evaluation of the impact that the protective atmosphere have on the quality of the welded joint and optimal process parameters.

Key words

protective atmosphere, laser, welding, stainless steel, Schlieren photography

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PROCHÁZKA, Libor. *Studium vlivu ochranné atmosféry na kvalitu svaru a parametry laserového svařování*. Brno 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 81 s. 6 příloh. Vedoucí práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Studium vlivu ochranné atmosféry na kvalitu svaru a parametry laserového svařování** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Libor Procházka

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu doc. RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D. za vstřícnost, cenné rady a připomínky, které mi v průběhu vypracovávání diplomové práce poskytoval. Dále bych rád poděkoval pánům doc. Ing. Ladislavu Daňkovi, CSc. a Ing. Jaroslavu Kubíčkovvi za odborné konzultace, pánům Ing. Kamilu Podanému, Ph.D., Ing. Petru Horníkovi, Janu Pavelkovi, Vojtěchu Řiháčkovi a zaměstnancům ACO Industries za provedení tahové zkoušky, svařovacích experimentů, pomoci při tvorbě zkušebních vzorků, provedení zkoušek Šlírové a tvrdosti. V neposlední řadě děkuji svojí rodině za vytvoření zázemí a harmonického prostředí k tvorbě. Bez výše zmíněných by tato práce jen stěží mohla vzniknout.

OBSAH

ABSTRAKT	3
PROHLÁŠENÍ	4
PODĚKOVÁNÍ	5
OBSAH	6
ÚVOD	9
1 PRŮMYSLOVÉ LASERY	10
1.1 Historie laseru	11
1.2 Princip laseru	11
1.3 Typy laserů	13
1.3.1 Typy laserů v průmyslu	14
1.3.1.1 Pevnolátkové lasery	14
1.3.1.2 Plynové lasery	18
2 PRŮMYSLOVÉ VYUŽITÍ LASERŮ V TECHNOLOGIÍCH	19
2.1 Vrtání laserem	19
2.2 Navařování laserem	20
2.3 Kalení laserem	20
2.4 Značení laserem	21
2.5 Řezání laserem	21
2.5.1 Sublimační řezání	22
2.5.2 Tavné řezání	22
2.5.3 Oxidační řezání	22
2.6 Svařování laserem	23
2.6.1 Princip a režimy svařování	23
2.6.2 Parametry svařování	25
2.6.2.1 Výkon laserového parsku	25
2.6.2.2 Rychlost svařování	25
2.6.2.3 Parametry fokusačního systému	26
2.6.3 Typy svarových spojů	26
2.6.4 Příprava dílců pro svařování	27
3 VLIV MATERIÁLU NA LASEROVÝ SVAR	28
3.1 Svařitelnost materiálů	29
3.1.1 Vliv chemického složení ocelí na jejich svařitelnost	29
3.2 Korozivzdorné oceli	30
4 OCHRANNÁ ATMOSFÉRA	31
4.1 Tvorba plazmatu	31

4.2	Vliv na mechanické vlastnosti.....	32
4.3	Krycí/stínící efekt	32
4.4	Používané plyny	33
4.5	Šlírová zobrazovací metoda.....	34
5	VYHODNOCENÍ SVAROVÝCH SPOJŮ	35
5.1	Možné defekty	35
5.2	Kontrola svarových spojů.....	37
5.2.1	Nedestruktivní zkoušky	37
5.2.2	Destruktivní zkoušky	37
5.2.2.1	Příčná tahová zkouška	38
5.2.2.2	Zkouška tvrdosti podle Vickerse.....	39
5.2.2.3	Zkouška makrostruktury a mikrostruktury.....	39
6	PRAKTICKÁ ČÁST	41
6.1	Charakteristika materiálů.....	41
6.1.1	Materiál 1.4301	42
6.1.2	Materiál 1.4404.....	43
6.2	Charakteristika ochranných atmosfér	43
6.2.1	Argon (Ar 4.6)	43
6.2.2	Argon-vodík (98 Ar + 2 H ₂ , 93 Ar + 7 H ₂ (obj. %))	44
6.3	Experiment I	44
6.3.1	Ustavení svařovaných dílců.....	45
6.3.2	Vlastní proces svařování.....	46
6.3.3	Šlírová zobrazovací metoda.....	47
6.3.4	Příčná tahová zkouška	48
6.3.4.1	Materiál vzorků 1.4301	49
6.3.4.2	Materiál vzorků 1.4404	51
6.3.5	Analýza makrostruktury a mikrostruktury	52
6.3.5.1	Příprava zkušebních vzorků	52
6.3.5.2	Posouzení makrostruktury	53
6.3.5.3	Rozbor mikrostruktury	54
6.3.6	Měření tvrdosti	57
6.4	Experiment II.....	60
6.4.1	Příčná tahová zkouška	62
6.4.1.1	Materiál vzorků 1.4301	62
6.4.1.2	Materiál vzorků 1.4404	63
6.4.2	Analýza makrostruktury a mikrostruktury	64
6.4.2.1	Posouzení makrostruktury.....	64

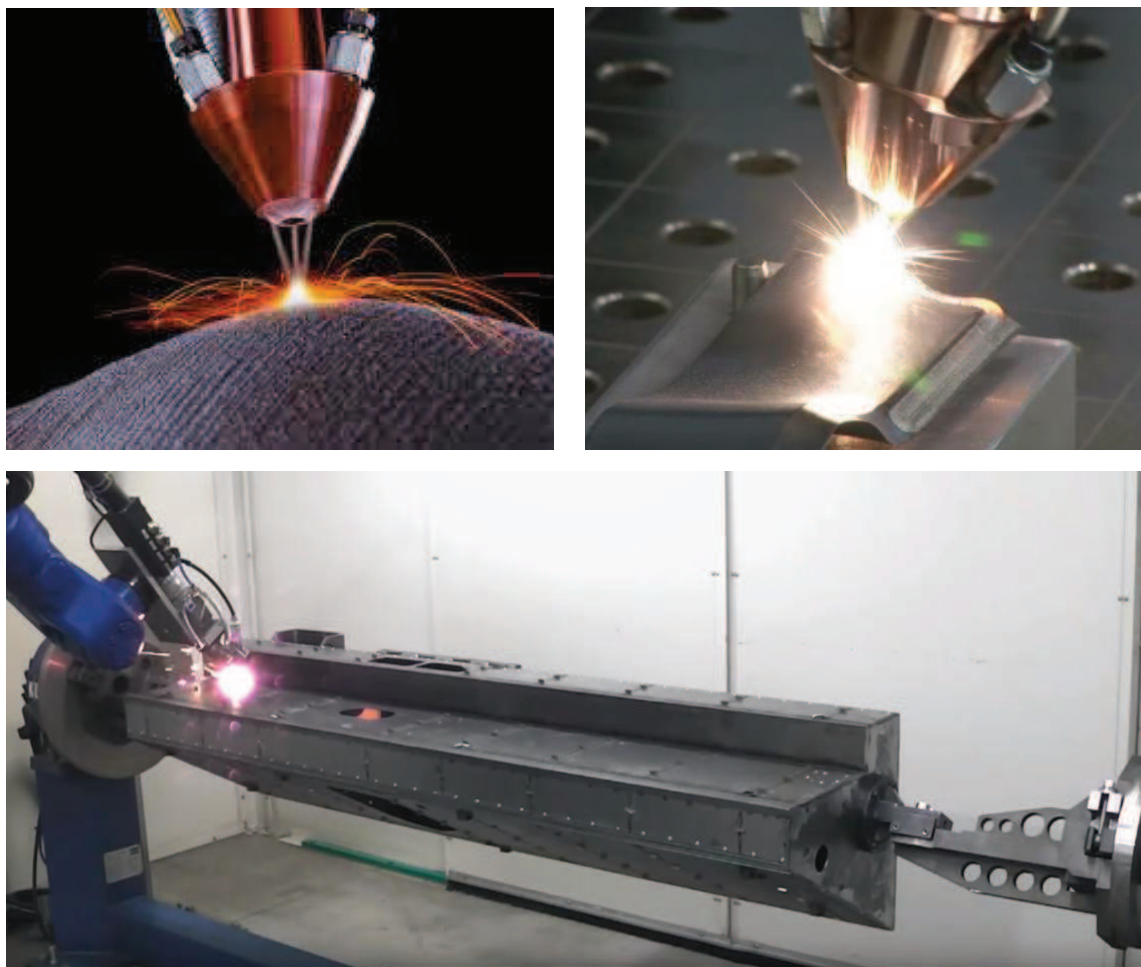
6.4.2.2 Rozbor mikrostruktury	66
6.4.3 Měření tvrdosti	69
7 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	71
ZÁVĚRY	73
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	74
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	79
SEZNAM PŘÍLOH	81

ÚVOD

Podle odhadů dle [5] dochází v České republice vlivem koroze každoročně k finančním ztrátám 12 až 15 miliard korun. Ve výrobě kovových konstrukcí se tak čím dál častěji uplatňují korozivzdorné oceli, pro jejichž spojování se využívají technologie svařování.

Metoda svařování laserem je moderní technologií vytvoření nerozebíratelného těsného spojení dvou, nebo více součástí. Je s výhodou automatizována pro možnost dosažení kvalitních svarů, i při ověřené rychlosti svařování 10 metrů za minutu [3], malé tepelně ovlivněné oblasti a veliké hloubce závaru. Nejpoužívanějšími svařovacími lasery jsou plynové CO₂, pevnolátkové Nd:YAG a vláknové [3, 6].

V praktické části Diplomové práce byly postupně svařeny pomocí vláknového a diodového laseru vzorky plechů z korozivzdorných ocelí 1.4301/1.4307 (X5CrNi18-10) a 1.4404 (X2CrNiMo17-13-2). K dosažení požadovaného vzhledu, geometrie a mechanických vlastností svaru je důležitá správná volba procesního plynu, díky které může být zajištěna i vyšší produktivita svařování. Byl zkoumán vliv tří ochranných atmosfér, lišících se vzájemně obsahem vodíku na jakost výsledného svaru. Stroje firmy ACO Industries a Ústavu přístrojové techniky akademie věd České republiky se kromě jiného liší přívodem použitých ochranných plynů, argonu a dvou směsí argonu s vodíkem.



Obr. 1 Příklady průmyslového využití laseru [21, 22, 34].

1 PRŮMYSLOVÉ LASERY

Přestože je laser často považován pouze za světelný zdroj, je také formou energie a jako takový může být zaostřením laserového paprsku užitečným zdrojem tepla. Interakce vyzářených fotonů paprsku laseru s látkou se začalo využívat již ve druhé polovině šedesátých let. Lasery tak nalézají široký rozsah uplatnění a jsou využívány v medicíně, optice, mikroelektronice, měřicí technice, nebo také vysoce výkonovými laserovými zdroji v průmyslu [3, 7, 8, 9].

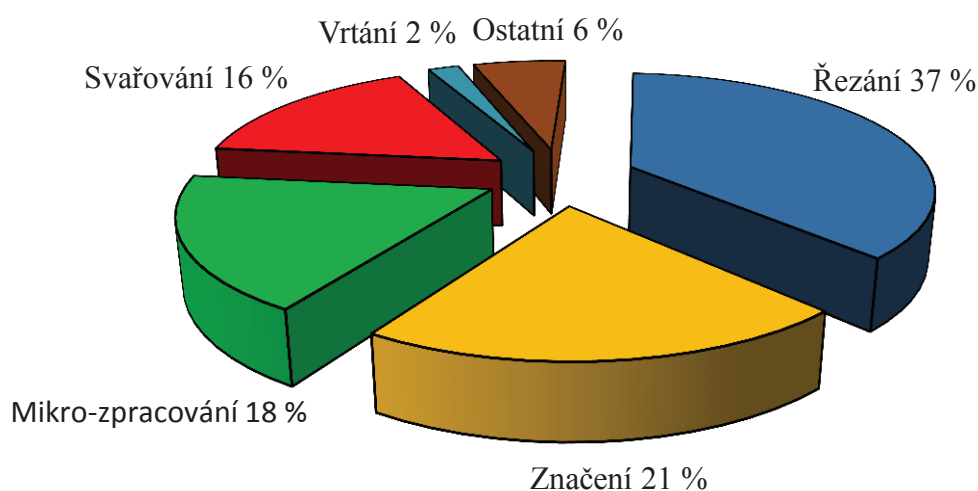
Mezi základní výhody průmyslových laserů patří:

- možnost automatizace procesu,
- adaptabilita (změna technologie nevyžaduje změnu nástroje),
- nedochází k opotřebování nástroje,
- čistý provoz (bez dýmu a hluku),
- možnost dělit laser do více svazků (jeden stroj umožňuje práci na více stanovištích zároveň),
- schopnost paprsku být fokusován do určitého bodu o určité ploše,
- vysoká pracovní rychlost,
- nízký tepelný vstup → malá tepelně ovlivněná oblast.

Nevýhody spojené s využíváním průmyslových laserů:

- vysoká pořizovací cena,
- nutnost kvalifikované obsluhy,
- bezpečnostní opatření,
- velká energetická náročnost.

Během posledních dvou desetiletí se změnil smysl vnímání průmyslových laserů. Ty se staly z „exotické novinky“ základem mnohých výrobních technologií, kterými jsou například řezání, svařování, značení, kalení nebo navařování. Percentuální uplatnění jednotlivých aplikací laseru v průmyslu jsou vyjádřena grafem na obrázku 1.1 [3, 10].



Obr. 1.1 Podíl jednotlivých výrobních technologií na produkci průmyslovými lasery v roce 2000 [1].

1.1 Historie laseru

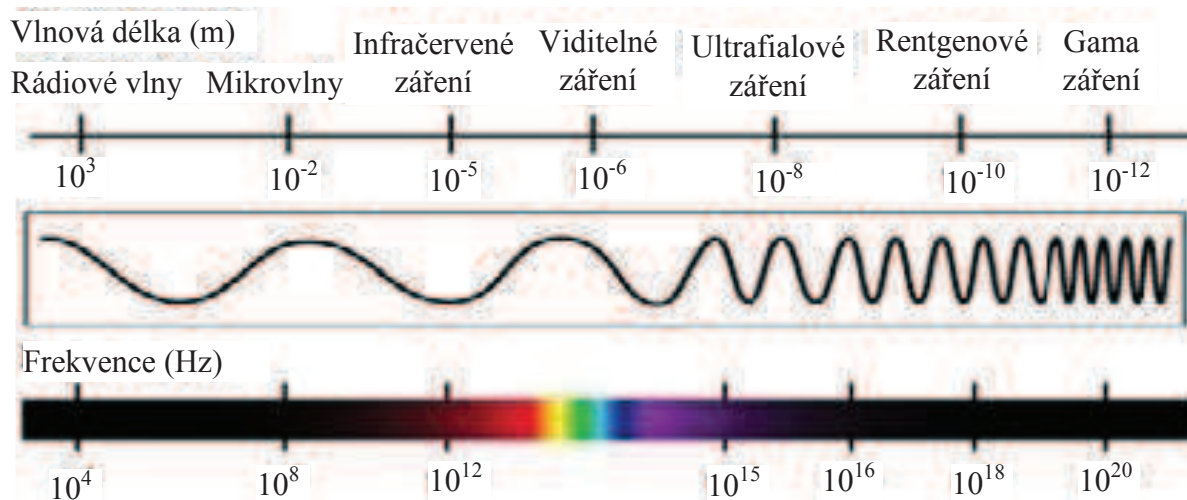
Slovo LASER je akronymem anglického Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, tedy zesílení světla stimulovanou emisí záření. [7]. V roce 1916 německý fyzik Albert Einstein ve své publikaci "Emise a absorpce světla podle kvantové teorie" předpokládá na základě termodynamických a statistických úvah možnost stimulované emise. Einstein tak ukázal, že atomy mohou vyzařovat světlo jak samovolně, tak i za jistých podmínek vynuceně [1, 3, 7, 9].

V roce 1960 byl americkým fyzikem Theodorem Haroldem Maimanem sestroyen první optický maser (dnes laser). Aktivní prostředí bylo tvořeno krystalem rubínu, jehož atomy byly buzeny krátkými záblesky výbojky v laserový paprsek s vlnovou délkou 694,3 nanometru. V následujících letech docházelo k objevům jednotlivých typů laserů, které známe dnes. Těm je věnována kap. 1.3 Typy průmyslových laserů. Lišily se vlnovou délkou vyzářeného paprsku, konstrukcí, výkonem, efektivitou, způsobem buzení, životností a dalšími parametry [1, 3, 9, 23].

1.2 Princip laseru

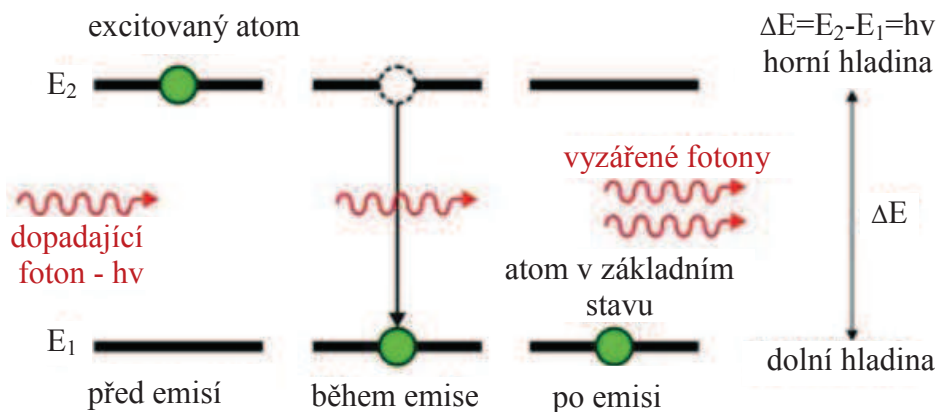
V Diplomové práci je uvedena řada odborných termínů a zákonitostí, nezbytných pro popis a zkoumání dějů, ke kterým během procesu svařování laserem v ochranné atmosféře dochází. Proto experimentální části předchází teoretická, jejímž hlavním cílem je tyto vysvětlit. Byla tedy zařazena i tato kapitola, pojednávající o základních částech a principech fungování laserů.

Laser i jakékoliv světlo je ve své fyzikální podstatě elektromagnetické vlnění, o určité vlnové délce, resp. frekvenci. Je tvořeno proudem fotonů, elementárních částic pohybujících se rychlostí světla s nulovou klidovou hmotností. Vlnová délka spojitého spektra barev viditelných lidským okem se pohybuje v rozmezí 0,35–0,75 mikrometru, avšak elektromagnetické vlnění se nemusí nacházet pouze v tomto intervalu, viz obrázek 1.2. LASER je akronymem anglického Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (zesílení světla stimulovanou emisí záření) [1, 2, 7, 18].



Obr. 1.2 Elektromagnetické spektrum [25].

Generování záření může probíhat relaxačními srážkami částic, a spontánní, nebo stimulovanou emisí. Právě ve stimulované emisí je podstata vzniku energie laserového paprsku (viz obr. 1.3). Záření stimulovanou emisí je lavinový efekt, při kterém foton dopadající na excitovaný atom způsobí jeho přechod z energeticky vyšší hladiny na nižší a zároveň emituje další foton. Tento proces se opakuje tak dlouho, dokud nejsou všechny atomy prostředí interagujícího s fotony v základním stavu. Děj může probíhat za předpokladu, že prostředí má vždy snahu se nacházet ve stavu s co nejnižší energií, tj. ve stavu energeticky nejvýhodnějším, stavu termodynamické rovnováhy [1, 18, 24].

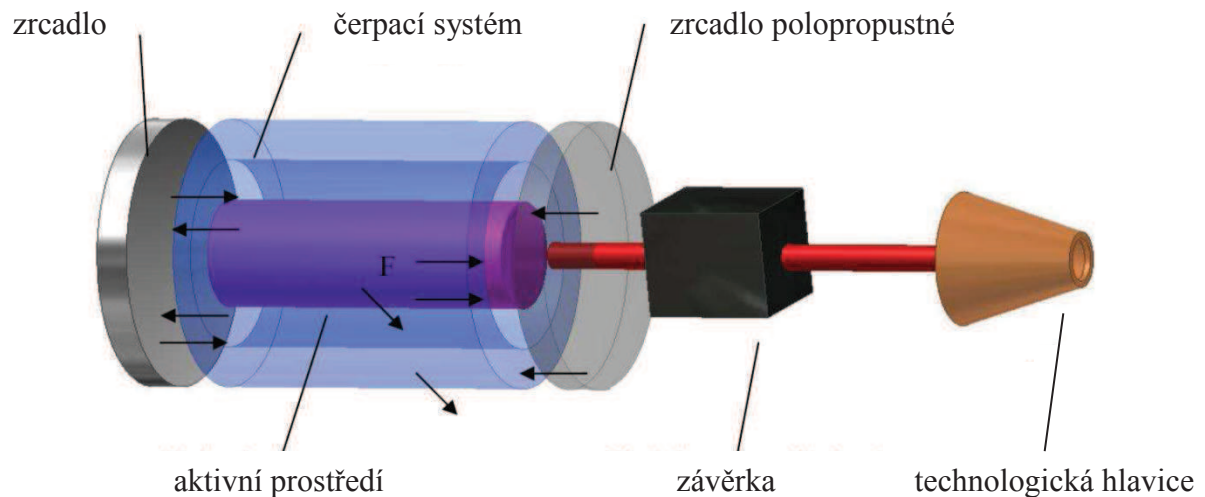


Obr. 1.3 Průběh stimulované emise atomu [18].

Široké praktické uplatnění laserového paprsku v průmyslu je dáno jeho výhodnými vlastnostmi. Laserové záření je monochromatické, tzn. vlnové délky (barvy) paprsku jsou totožné. Fotony laserového svazku postupují ve fázi stejným směrem, jsou tedy vzájemně koherentní. Užitečnou vlastností laserového paprsku je také vysoká směrovost, nebo-li nízká rozbíhavost. Vysoká koherence a nízká rozbíhavost laserového svazku umožňují jeho fokusaci (soustředění) na velmi malý průměr, a tím dosažení vysoké hustoty výkonu laserového záření [7]. (Dle [6] až 10^8 W/cm^2) [1, 6, 7].

Hlavní části průmyslových laserů potřebné pro generování laserového paprsku (obr. 1.4):

- aktivní prostředí = prostředí tvořené kapalinou, plynem, pevnou látkou, nebo diodou, dochází zde nejprve k excitaci atomů prostředí a následně procesem stimulované emise ke generování fotonů laserového záření,
- optický rezonátor = je tvořen dvěma zrcadly, jedno je nepropustné a druhé částečně propustné, to propustí fotony laserového svazku, pokud mají dostatečnou energii, zrcadla mohou být tvarem vypuklá (konvexní), nebo vydutá (konkávní),
- čerpací systém = jeho smyslem je předat energii částicím aktivního prostředí, tím vybudit jeho atomy do excitovaného stavu a umožnit tak proces stimulované emise,
- závěrka (expander) = je zařízení tvořeno systémem čoček a clon, optimalizuje průměr a kvalitu výstupního svazku, snižuje zejména jeho divergenci,
- technologická hlavice = směřuje laserový paprsek k místu určení,
- chladicí zařízení = je nutné u všech výkonových laserů vzhledem k velkým tepelným ztrátám generovaným zejména v expanderu a během buzení aktivního prostředí [1, 28].



Obr. 1.4 Základní schéma funkčních částí laseru [35].

1.3 Typy laserů

Od sestavení prvního generátoru stimulovaného záření uběhlo již více, než 60 let a za tu dobu doznaly tyto zařízení značného rozvoje. Podařilo se vyřešit mnohé těžkosti, které bránily jejich využití v průmyslu. Vývoj přinesl velké množství různých typů laserů s navzájem odlišnými vlastnostmi, které je předurčují k praktickému využití [1]. Laserové zdroje lze rozdělit z více hledisek:

- dle charakteru aktivního prostředí
 - pevnolátkové,
 - polovodičové,
 - kapalinové,
 - plynové,
 - plazmové,
- dle druhu energie použité k buzení
 - optické,
 - elektrické,
 - chemické,
- dle doby trvání pulzu
 - dlouhé pulzy,
 - krátké pulzy,
 - velmi krátké pulzy (pikosekundové, femtosekundové),
- dle energetických hladin při kvantovém přechodu
 - molekulární,
 - elektronové,
 - jaderné,
- dle časového režimu provozu
 - kontinuální (nepřetržitý),
 - kvazikontinuální,
 - pulsní,
- dle oblasti vlnových délek
 - infračervené,
 - oblast viditelného světla,
 - ultrafialové,
 - rentgenové [1, 7, 9].

1.3.1 Typy laserů v průmyslu

V roce 1960 došlo k prvním využitím laserů v průmyslové praxi, a to pro technologickou operaci vyvrtávání. Od té doby prošel laser dlouhým vývojem a našel tak svoje uplatnění v mnoha výrobních technologiích (viz obr. 1.1). Ve spoustě případů je dnes dokonce jiným strojem nenahraditelný. Nejpoužívanější typy průmyslových laserů je možné vidět v tabulce níže, která reflektuje jejich základní parametry. Vzhledem k neustálému vývoji laserů a množství provedení jednotlivých typů je nutné brát uvedená data s rezervou [1, 3].

Tab. 1.1 Základní přehled průmyslových laserů [19].

Laser	Vlnová délka (nm)	Buzení	Účinnost (%)	Výkon (kW)	Životnost (h)
Nd: YAG	1064	LD lampy	7 3	6 0,6	10 000
Diskový	1070	LD	15	16	10 000
Vláknový	1070	LD	30	80	100 000
Diodový	808-980	El.	60	10	15 000

Buzení: LD - laserové diody, El. - elektricky (výboj, proud).

1.3.1.1 Pevnolátkové lasery

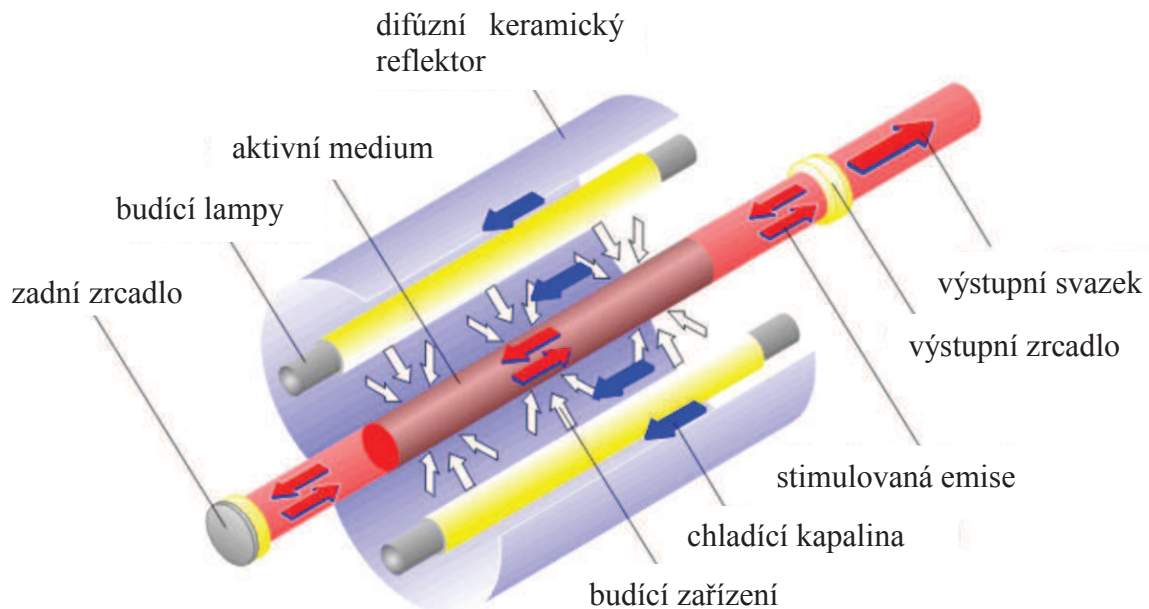
Aktivní prostředí pevnolátkových laserů je tvořeno maticí s příměsí aktivačních prvků. Právě matrice je základním materiálem, který určuje většinu technických vlastností daného krystalu. Na materiál matrice jsou tak kladeny vysoké požadavky, musí být průzračná pro budící i generované záření, opticky homogenní a uměle vyrobitelná [32]. Všechna aktivní prostředí pevnolátkových laserů jsou účinnými luminofory, tzn. mají schopnost absorbovat energii, aby ji následně vyzářili ve formě světla. Materiály vyhovující těmto požadavkům jsou krystaly, sklo a keramika [3, 32, 37].

Aktivátory jsou atomy nebo ionty umístěné v matici, zúčastňující se procesu generování optického záření. Nejčastěji jsou jimi přechodné kovy (Cr, Ni, Co) a lanthanoidy (Nd, Sm, Yb, ...). Tyto lasery mohou pracovat v různých režimech, za měnících se provozních podmínek, navíc jsou stabilní a mají malé nároky na údržbu [3, 32].

- Nd: YAG laser

Z typů uvedených v tab. 1.1 je Nd: YAG historicky nejstarším laserem používaným v průmyslové výrobě. Jeho popis je uveden v publikaci [32]. Aktivním materiálem Nd: YAG laseru je izotropní krystal Yttrium Aluminium Granátu (Y₃Al₅O₁₂) dopovaný aktivačními ionty neodymu (Nd³⁺). Yttrito-hlinitý granát je bezbarvý, opticky izotropní krystal kubické struktury. Díky vysoké tepelné vodivosti krystalu je aktivní prostředí účinně chlazeno a lze je tak použít pro práci v impulzním i kontinuálním režimu. Používají se Nd:YAG lasery buzené buď výbojkami (LPSS – Lamp Pumped Solid State, obr. 1.6), nebo laserovými diodami (DPSS – Diode Pumped Solid State). Pracovní vlnové délky svazků Nd:YAG laserů se nachází v blízkosti infračervené části spektra. Některé materiály, jako např. sklo jsou pro tyto vlnové délky průhledné a nemohou tak být zpracovány [19, 30, 32].

LPSS Nd:YAG lasery vyžadují aktivní chlazení, neboť v porovnání s DPSS mají výbojky o nižší efektivitě účinného ozařování krystalu aktivního prostředí a dochází tak k velikým tepelným ztrátám. Další nevýhodou je horší kvalita svazku a životnost výbojek, které se po zhruba 1000 h provozu musejí měnit. Konečně výhodou těchto laserů je vysoká energie v pulzu (až 100J/m·s), tyto stroje jsou proto využívány zejména v pulzním režimu [19, 30, 32].

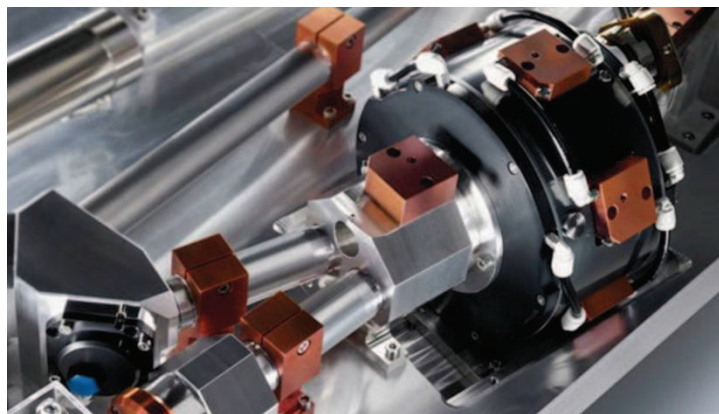


Obr. 1.5 Princip fungování LPSS Nd: YAG laseru [16].

Zdrojem čerpání DPSS Nd:YAG laserů je řada diodových laserů, napájených elektrickou energií. Z důvodu rozbíhavosti bývá často paprsek z budící diody veden na zadní část krystalu pomocí optického vlákna. Výhodou proti LPSS Nd:YAG laseru je tak průměrně více jak dvojnásobná účinnost. Kladnými vlastnostmi jsou dále stabilita paprsku, malé provozní náklady a možnost chodu v mnoha pracovních režimech [19, 30, 32].

- Diskový laser

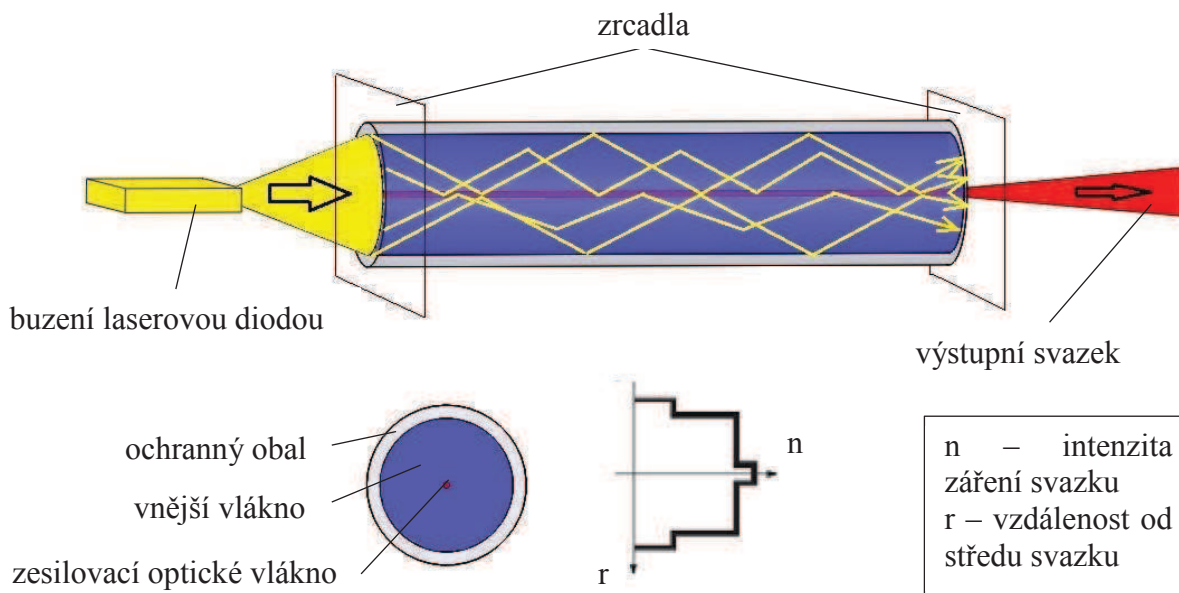
Jedná se o pevnolátkový laser, který funguje na principu Nd: YAG laseru. Rozdíl je ve tvaru aktivního prostředí. To je tvořeno tenkým diskem z Nd: YAG materiálu. Malá tloušťka a velká průřezová plocha disku spolu s efektivním chlazením umožňují lepší odvod tepla z aktivního prostředí. Díky tomu je generován paprsek lepší kvality, než při klasickém uspořádání Nd: YAG laseru, které je znázorněné na obrázku 1.5. Optický systém diskového laseru je znázorněn na obrázku 1.6. Výhodou je také možnost dosahovat vyšších výkonů (až 16 kW). Další základní vlastnosti diskového laseru jsou uvedeny v tab. 1.1. Často jsou používány pro výkonově náročnější operace svařování a řezání kovů [12, 19, 26, 30].



Obr. 1.6 Optický systém diskového laseru [19].

- Vláknový laser

Jedná se o technologicky nejmodernější typ pevnolátkového laseru [19], který se od ostatních této skupiny liší hlavně konstrukčním provedením aktivního prostředí. To je tvořeno ochranným obalem a v něm dvěma koaxiálně uloženými vlákny. Jádrem aktivního prostředí je ultra tenká skleněná tyčinka o délce několika metrů. Průměr tohoto zesilovacího vlákna se pohybuje mezi 10^{-3} až $2 \cdot 10^{-3}$ milimetru a závisí na typu použitého aktivátoru (nejčastěji ionty erbia, ytterbia, nebo thalia). Vysoce účinné čerpání je realizováno zářením laserových diod kolmo na průřez skleněného vlákna [26]. Vnější (budící) vlákno má oproti vnitřnímu rozdílné optické a materiálové vlastnosti, díky tomu dochází při čerpání k mnohonásobným odrazům (viz obr. 1.7) a atomy křemíkové matrice tak mohou být excitovány velmi efektivně. Na obou koncích vláken se pak nachází Braggova zrcadla [7, 12, 19, 26].



Obr. 1.7 Podstata fungování vláknových laserů [36].

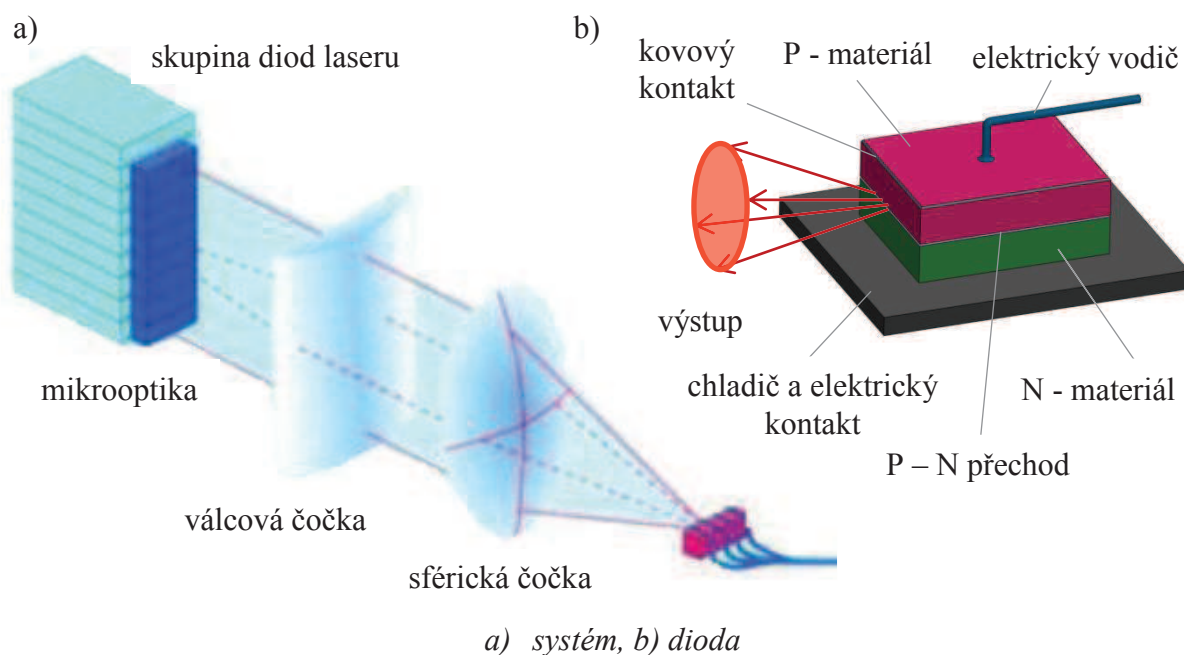
Výhodami jsou kvalita modu (tvaru laserového paprsku), dlouhá životnost a vysoká účinnost (okolo 30 %). Dále díky konstrukčnímu provedení aktivního prostředí není třeba vodního chlazení a v porovnání s ostatními průmyslovými lasery mají nejnižší provozní náklady. Výhodou může také být sestavitelnost výkonů více vláknových laserů, soustředěním

paprsků do společné výstupní čočky, ale za cenu snížení kvality svazku. V případě vysokých požadavků zákazníka na výkon laseru a kvalitu svazku (desítky kilowatů) nastává problém nejen s výrobou vlákna odpovídajících rozměrů, ale také s fyzikálními jevy (Ramanův rozptyl apod.), které znemožňují dosažení větších výkonů na každý metr délky [26, 36].

Pro průmyslové řezání a svařování materiálů na vláknových laserech je doporučeno rešerší [19] pracovat v kontinuálním režimu laseru, zatímco při mikro-obrábění, značení a gravírování je vhodný pulsní, či kvazikontinuální chod.

- Diodový (polovodičový) laser

Aktivní prostředí je tvořeno řadou silně elektricky dopovaných polovodičů, nazývaných také laserové diody, schéma takové diody je zachyceno obrázkem 1.8b. Součástí každého krystalu je PN přechod o ploše řádově 10^{-6} mm², ze kterého je emitováno záření ve viditelné červené a blízké infračervené oblasti, dosahující výkonů jednotek miliwattů [7]. Požadovaných výkonů diodových laserů pro jejich užitečnou aplikaci v průmyslu je dosaženo spřažením řady laserových diod do sloupců (obr. 1.8a) a bloků. Vlastností svazku vystupujícího z rezonátoru je velká rozbíhavost, která v ose kolmé k PN přechodu dosahuje divergence až 90° [7]. Z tohoto důvodu jsou stěny bloku osazeny válcovými mikročočkami, ze kterých vychází už rovnoběžné svazky [7, 26, 37].



Obr. 1.8 Optický systém polovodičového laseru [37, 7].

Kvalita výstupního svazku je ale i tak horší, než už ostatních průmyslových laserů. Hlavními výhodami diodových laserů jsou jejich kompaktnost, nízká hmotnost a především vysoká účinnost (parametry viz tab. 1.1). Polovodičové lasery jsou tedy používány zejména v aplikacích, kde není vyžadována fokusace laserového paprsku na velmi malou plochu. Většího průměru svazku bývá využíváno např. pro technologie povrchového tepelného zpracování, popis materiálů a některé aplikace svařování. Při sériovém svařování tvarově složitých dílů karoserií aut bývají s výhodou použity pro možnost umístění diod na rameno robota. Tím se eliminují problémy s vedením záření od zdroje k obrobku [7, 26, 37].

1.3.1.2 Plynové lasery

Jsou v průmyslové praxi stále velmi početně zastoupenou skupinou laserů. Aktivní prostředí se nachází v plynném stavu, ve formě atomů, iontů nebo molekul. K jejichž buzení dochází např. elektricky, opticky, či radio-frekvenčně. Mohou pracovat v kontinuálním, nebo pulsním režimu, s výkony od miliwattů (helium-neonové lasery), až po desítky kilowattů (CO₂ lasery) [30].

Zajímavým atributem plynových laserů je možný rozsah vlnových délek generovaného svazku. Pracují s výstupní frekvencí v rozmezí ultrafialového a infračerveného záření [3], což jim vzhledem k míře absorpce umožňuje velmi efektivně zpracovávat některé druhy materiálů. Tatož vlastnost může ale být v jiném případě oproti např. pevnolátkovému laseru i nevýhodou [3, 19].

- CO₂ laser

CO₂ lasery jsou v současné době průmyslem nejvyužívanějším typem plynových laserů. Mají aktivní prostředí tvořené směsí oxidu uhličitého (CO₂), dusíku (N₂) a helia (He). Literatura [26] udává jako obvyklý poměr složek směsného plynu 1:4:5. CO₂ laser pro svou funkci využívá vibračně-rotálních přechodů molekul aktivního prostředí. Velikosti výkonů dostupných CO₂ laserů jsou ovlivněny způsobem buzení, lasery čerpané radiofrekvenčními výboji (až 5 kW), nebo elektrickými výboji (až 20 kW) [19]. Výstupní svazek CO₂ laseru je emitován s energetickou účinností v rozmezí 10 až 30 %, s pro něj typickou vlnovou délkou 10,6 mikrometru. Takovéto záření je pohlcováno materiály běžně používanými pro výrobu opticky průchozích částí laserů (skla, apod.). Nelze tak použít vláknovou optiku, odrazové optické prvky tak mohou být tvořeny např. měděnými zrcadly [13]. Právě použití systému zrcadel pro dopravu laserového paprsku ke zpracovávanému materiálu způsobuje poměrně malou dynamiku procesu [13, 19, 26].

CO₂ lasery jsou s výhodou využívány pro značení, gravírování a řezání nekovových materiálů (plasty, skla, kůže, papír, apod.), u kterých nelze efektivně použít kvůli nízké absorpci záření ostatní lasery uvedené v kap. 1.3.1. Díky dosažitelným výkonům nachází svoje uplatnění také při svařování a řezání ocelových plechů, pro tyto účely jsou využívány výkonové lasery závislé na stálém přívodu aktivního CO₂ plynu a vodním chlazení [16, 19].

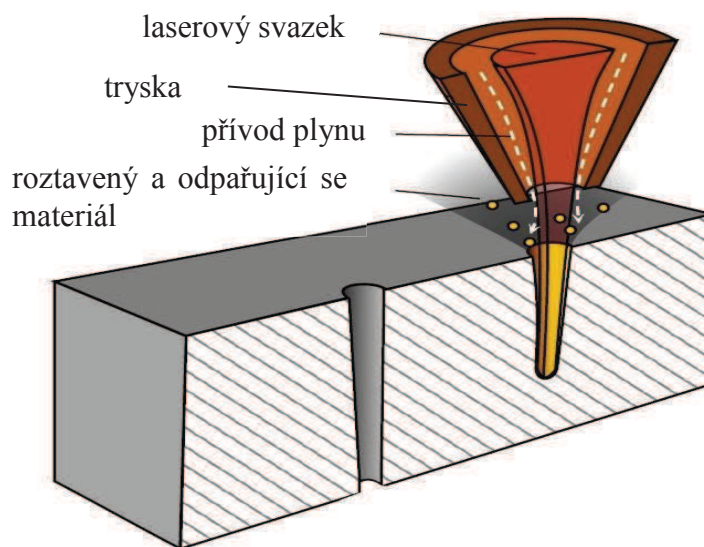
Nejmodernějším typem CO₂ laseru je deskový (slab) laser. Díky zásobníku, jehož kapacita vystačí až na rok provozu není třeba stálého vnějšího zdroje plynové směsi. K odvodu tepla dochází jeho rozptylem na vodou chlazených vysokofrekvenčních elektrodách [7, 38].

2 PRŮMYSLOVÉ VYUŽITÍ LASERŮ V TECHNOLOGIÍCH

Základním předpokladem pro uplatnění laserového svazku v průmyslové výrobě se stala jeho fokusovatelnost. Také ostatní vlastnosti, uvedené v kap. 1.2 jsou pro tento účel nezbytné. Ale právě schopnost laseru soustředit generované fotony pomocí optiky do konkrétního místa velmi malé plochy je důvodem vysoké plošné hustoty záření, která může dosahovat v pulsním režimu velikosti až 10^8 W/cm^2 [6]. Lasery jsou tak průmyslem využívány např. k vrtání, kalení, značení, řezání, svařování, nebo navařování [6, 7, 9].

2.1 Vrtání laserem

Princip vrtání laserem (viz obr. 2.1) spočívá v odpařování materiálu zpracovávaného polotovaru vlivem vysoké intenzity energie laserového paprsku. Materiál dosáhne působením laserového svazku teploty varu a následně dochází k jeho lokálnímu částečnému odpařování. Tím se vytvoří dutina s charakteristickým tvarem průřezu. Tento paroplynový kanál bývá v mezinárodní literatuře zpravidla nazýván výrazem „keyhole“ a od této kapitoly dále je tak označován i v této práci. Po dopadu fotonů laserového svazku do této dutiny dochází k jejich mnohonásobným odrazům, což vede k růstu absorpčního koeficientu materiálu a otvor se tak může dále prohlubovat [7, 9, 12].



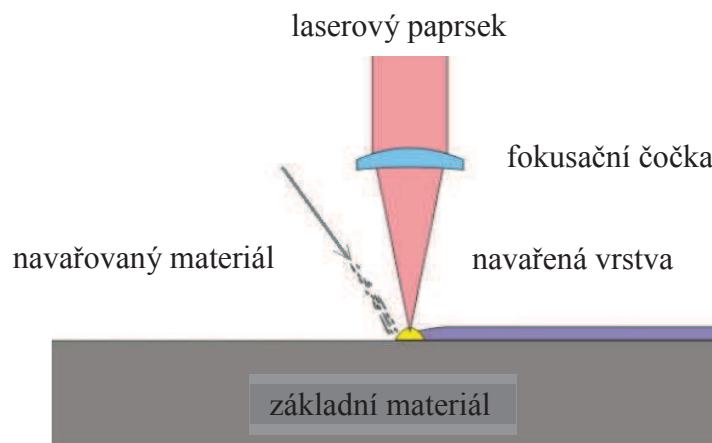
Obr. 2.1 Schematické znázornění vrtání laserem [39].

Pro technologickou operaci vrtání bývají použity lasery v pulsním režimu. U nich je možné za podmínek dostatečného výkonu stroje a malé tloušťky polotovaru dosáhnout požadovaný otvor jedním pulzem. Většinou jsou však z důvodu kvality vrtání používány definované řady pulzů. Veliká výhoda technologie vrtání laserem je možnost hloubit otvory i do jinak obtížně obrobitelných materiálů. Mimo kovové materiály tak lze vrtat i plasty, dřevo, keramiku nebo diamant [7, 9, 12].

2.2 Navařování laserem

Princip metody je založen na kladení tenkých vrstev přídavného materiálu požadovaných vlastností (tribologické, antikorozní, antikavitační) na základní materiál. Laserový paprsek dodá teplo potřebné k difuznímu prolnutí základního a přídavného materiálu. Přisun navařovaného materiálu pomocí drátu, pásky, nebo proudem prášku bývá směřován spolu s ochranným plynem do středu plošky fokusovaného laserového paprsku, princip navařování laserem je znázorněn obrázkem 2.2. Jinou možností je potom nanášení prášku do míst budoucího povlaku tmely, nebo plamenopráškovým stříkáním [1, 9].

Technologie navařování laserem je s výhodou používána pro možnost nanášení vrstev tloušťek od setin mm až do několika mm, s vysokou rovnoměrností a hladkostí naneseného povrchu, při minimální tepelně ovlivněné oblasti. Lze takto navařovat i velmi malé a tvarově složité vrstvy. Nevýhodami jsou potom nutnost strojního vedení, spolu s vysokými pořizovacími náklady stroje [1, 9].



Obr. 2.2 Princip navařování laserem [41].

Laserové navařování je využíváno například k opravám lisovacích a licích forem, ozubených kol, nebo k zvýšení mechanické a korozní odolnosti povrchů součástí. Tyto operace jsou prováděny na diodových, diskových, nebo vláknových laserech (viz kap. 1.3.1) [1].

2.3 Kalení laserem

Je způsobem tepelného zpracování, jehož smyslem je zvýšení mechanických vlastností (pevnost, tvrdost či odolnost proti opotřebení) povrchových vrstev kalených součástí. Ohřev základního materiálu na kalící teplotu je zajištěn paprskem laseru, rozostřeným použitou optikou, buď do obdélníkové, nebo kruhové ozařovací plochy. Při kalení je rychlost růstu teploty větší, než $1\,000\text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ [43]. Maximální teplota ohřevu závisí na obsahu uhlíku v materiálu a pohybuje se obvykle v rozmezí 900 až 1400 °C, kontrolovaná měřicími systémy [44]. Po dosažení kalící teploty dojde k pohybu laserové hlavy dále ve směru posuvu a následnému zakalení základního materiálu jeho prudkým samovolným ochlazením. Takto vzniká velmi tvrdá povrchová struktura obrobku, tzv. martenzit [9, 43, 44].

Tímto způsobem lze zpracovávat pouze kalitelné materiály, tzn. oceli a litiny s obsahem uhlíku větším, jak 0,22 %. Typické hloubky zakalení bývají od 0,1 do 1,5 milimetru, ale mohou dosahovat i více, než 2,5 milimetru. Výhodou laseru je možnost kalit malé, tvarově specifikované oblasti polotovarů, jako například funkční hrany forem a zuby ozubených kol [9, 43, 44].

2.4 Značení laserem

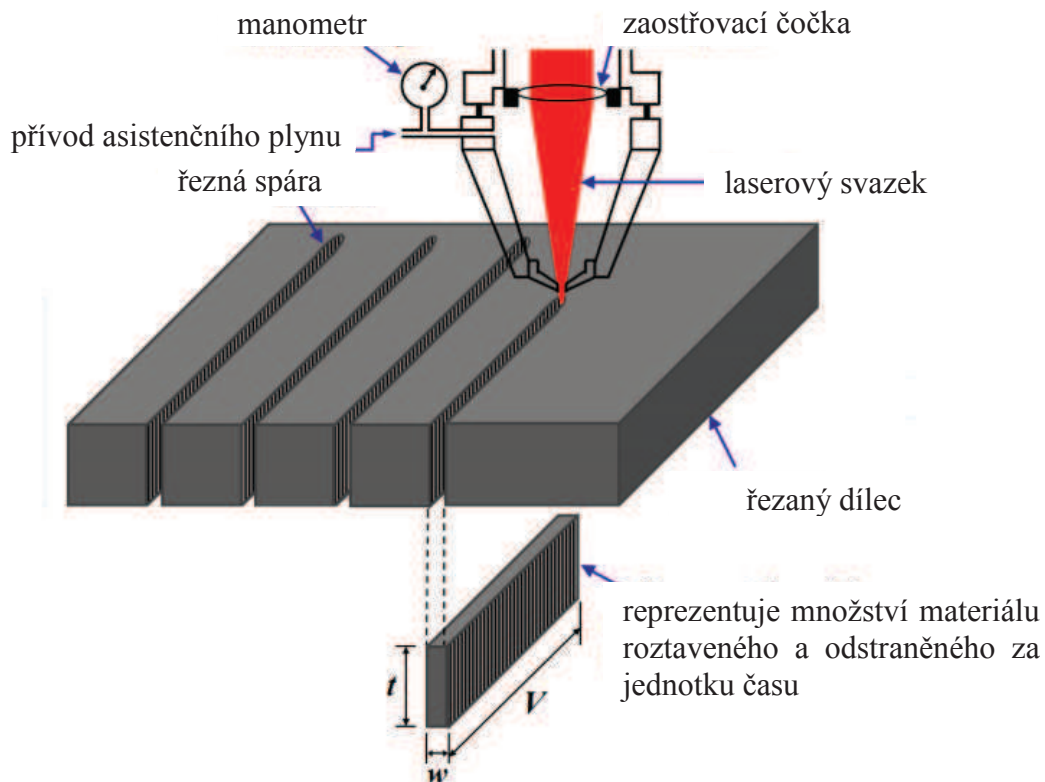
Jde o moderní technologii vytváření trvalého vizuálního motivu na povrchu značeného předmětu, která nachází svoje uplatnění ve všech oblastech průmyslu a výroby. Vlivem interakce laserového svazku s popisovaným materiálem je buď povrchová vrstva materiálu odpařena, nebo zakalena a na značené součásti tak vznikne grafická stopa. Přednosti laserového značení oproti jiným popisovacím technologiím jsou rychlost, nesmazatelnost, výrobní bezkontaktnost, možnost popisu i nerovných povrchů, detailnost, přesnost zpracování a popisová rychlost až 8 metrů za sekundu [45]. Příklady laserem označených součástí jsou na obrázku 2.3. Velikou výhodou je potom také možnost značení kovových i nekovových materiálů v závislosti na použitém druhu laseru. Plynové CO₂ lasery mají díky vlnové délce 10,6 mikrometru svoje uplatnění například při značení skleněných, dřevěných, kožených, či plastových materiálů. Pevnolátkové Nd:YAG a moderní vláknové lasery o výkonech 10 až 50 W jsou zase s výhodou využívány k popisu plastů, keramiky a veškerých kovových materiálů. Typickými příklady průmyslového značení výrobků jsou sériová čísla, 1D kódy, 2D kódy, loga, atd. Firma Lintech, zabývající se laserovými technologiemi a průmyslovým značením udává v [46] fakt, že vláknový popisovací laser má minimálně 12-ti násobně menší spotřebu energie než vývojově starší lampový laser [9, 45, 46].



Obr. 2.3 Praktické využití technologie značení laserem [47].

2.5 Řezání laserem

Řezání laserem je ve strojírenství jednou z dominantních výrobních technologií využívající výkonové lasery. Díky vysoké hustotě dopadové energie svazku je možné dělit všechny technické materiály bez ohledu na jejich tepelné, fyzikální a chemické vlastnosti. Při dopadu paprsku laseru na obrobek dojde vlivem absorpce fotonů materiálem k ohřevu kontaktního místa na teplotu varu a natavení úzké oblasti okolního materiálu. Řezací plyn je nezbytnou součástí řezacího procesu. Slouží k odstranění par kovů a taveniny z místa řezu. Bývá přiváděn pod vysokým tlakem úzkou tryskou, obklopující laserový svazek. Tryska pro řezací plyn je umístěna odděleně od trysky pro ochranný plyn ve vzdálenosti do jednoho milimetru od povrchu materiálu. Výhodami jsou vysoká přesnost a kvalita povrchu, při řezných rychlostech, které mohou dosahovat až desítek metrů za minutu, což činí proces velice produktivní. Při vytváření zahnuté trajektorie řezu, jako jsou například rohy, ostrá zaoblení, apod. je výhodou možnost snadného řízení výkonu laseru, čímž je dosažena stejná kvalita řezu na celé jeho ploše. Dalšími výhodami uvedenými v publikaci [48], jsou úzká řezná spára, nebo dosažitelná tloušťka řezu (viz obr. 2.4), která pro nerezové oceli činí 20 milimetrů. Plechy uhlíkových ocelí je potom možné řezat laserem až do tloušťky 30 milimetrů [7, 9, 13, 48, 49, 50].



Obr. 2.4 Schematické znázornění procesu řezání laserem [49].

Podle použitého řezného plynu lze rozdělit řezání laserem do tří základních skupin.

2.5.1 Sublimační řezání

Cílem je odpařování materiálu obrobku pokud možno bez jeho tavení. Stroj pracuje v pulsním režimu, páry materiálu tak mohou samovolně opouštět místo řezu i v intervalech mezi jednotlivými pulzy. Procesní plyny dusík, argon, či hélium chrání obrobek před oxidací, touto metodou jsou tak dosahovány kvalitní hrany řezů. Typickými příklady využití jsou řezání textilií, nebo plastových fólií [48].

2.5.2 Tavné řezání

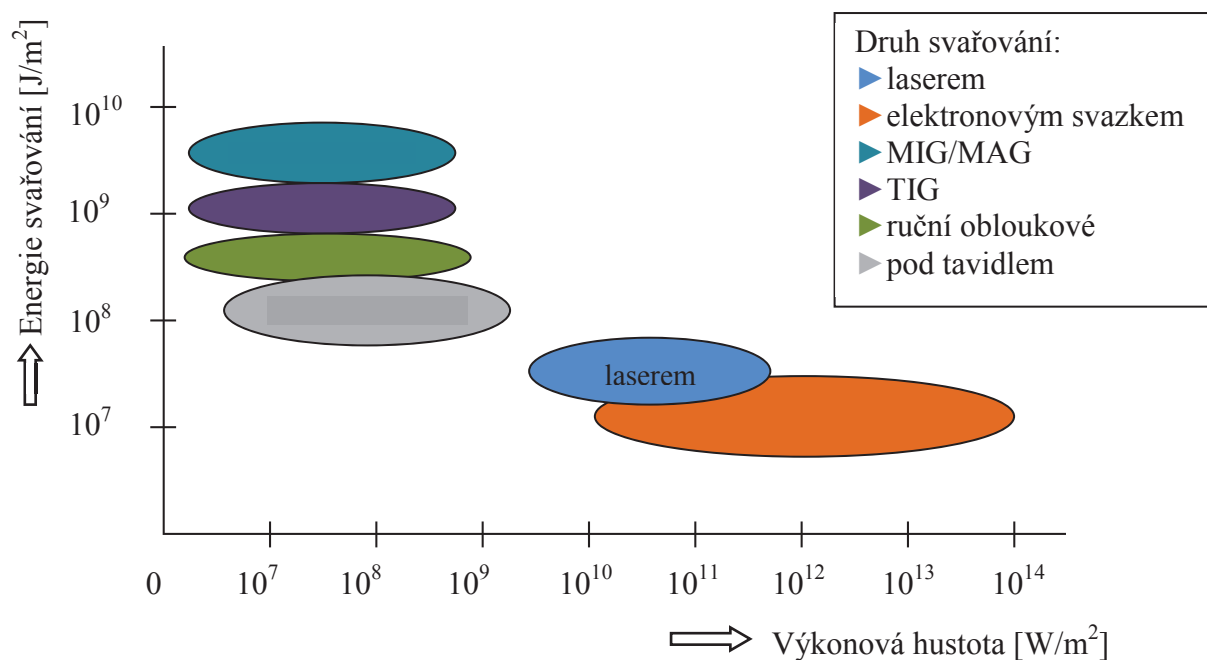
Charakteristickými znaky tavného řezání laserem jsou kontinuální provoz laserového paprsku, kovově lesklý povrch řezných ploch, nebo použití dusíku, jako pracovního neaktivního plynu. Ten je pod tlakem 1 až 1,5 MPa [48] vháněn do místa řezu. Používá se pro řezání vysokolegovaných ocelí, mědi, hliníku, ale také keramiky, plexiskla, dřeva, atd. [7, 9, 48].

2.5.3 Oxidační řezání

Rozdíl oproti tavnému řezání je hlavně v použitém pracovním plynu, kterým je kyslík o tlaku do 0,5 MPa. Po ohřevu materiálu obráběného dílce na zápalnou teplotu kovu dochází k exotermické reakci kyslíku s řezaným materiálem, výsledkem je řezná plocha s tenkou vrstvou oxidů. Řezná rychlost i tloušťka řezu je oproti tavnému způsobu výrazně vyšší. Používá se pro řezání nelegovaných až středně legovaných ocelí [48].

2.6 Svařování laserem

Laserové svařování se řadí mezi moderní tavné metody vytváření nerozebíratelných spojů. Z důvodu dosažitelných požadavků na minimální deformace, celistvost, mechanické a fyzikálně-metalurgické vlastnosti svarů patří svařování mezi velmi náročné a časté aplikace laserového paprsku. Svařování laserem tak postupně vytlačuje obloukové svařování. Aktuálně jsou pro účely svařování nejčastěji využívány vláknové, CO₂, diskové, nebo Nd-YAG lasery, které jsou podrobně rozepsány v rámci kapitoly 1.3.1. Vzhledem k vysoké pořizovací ceně laseru nachází tato technologie uplatnění převážně při sériových zakázkách. Možné aplikační využití je tedy je automobilový průmysl, výroba svařovaných profilů, hřídelí, trubek, ozubených kol, apod. [1, 4, 7, 12, 49].



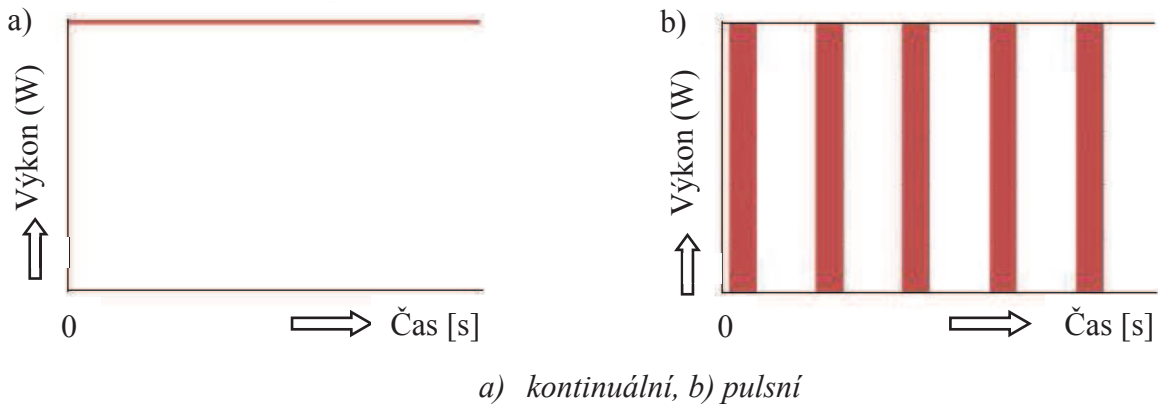
Obr. 2.5 Plošná hustota výkonu laserového svazku, publikované v roce 1999 [48].

2.6.1 Princip a režimy svařování

Zaměřením laserového svazku do malé plošky je zajištěna hustota výkonu, která je v porovnání s ostatními metodami svařování velmi vysoká (viz obr. 2.5). V místě budoucího svarového spoje tak dochází k rapidnímu ohřevu základního materiálu, jeho rychlému natavení, odpařování (závisí na použitém laseru), difúznímu spojení a následnému ochlazení. Výsledkem procesu je malá tepelně ovlivněná oblast a s tím související minimální deformace svaru. Výkonovými průmyslovými lasery lze i při svařovací rychlosti 10 metrů za minutu vyhotovit hluboké, úzké spoje, vysoké pevnosti a čistoty. Lze svařovat i materiály s výrazně rozdílnými teplotami tavení, svařitelnost různých materiálů je uvedena v tabulce 3.2.

Nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady laserového systému, které mohou negativně ovlivňovat cenu vyráběných součástí. Z tohoto důvodu je technologie využívána hlavně v sériové výrobě, a to převážně v automobilovém průmyslu, při výrobě svařovaných profilů, hřídelů, ozubených kol, nebo trubek [3, 6, 7, 12, 31, 48].

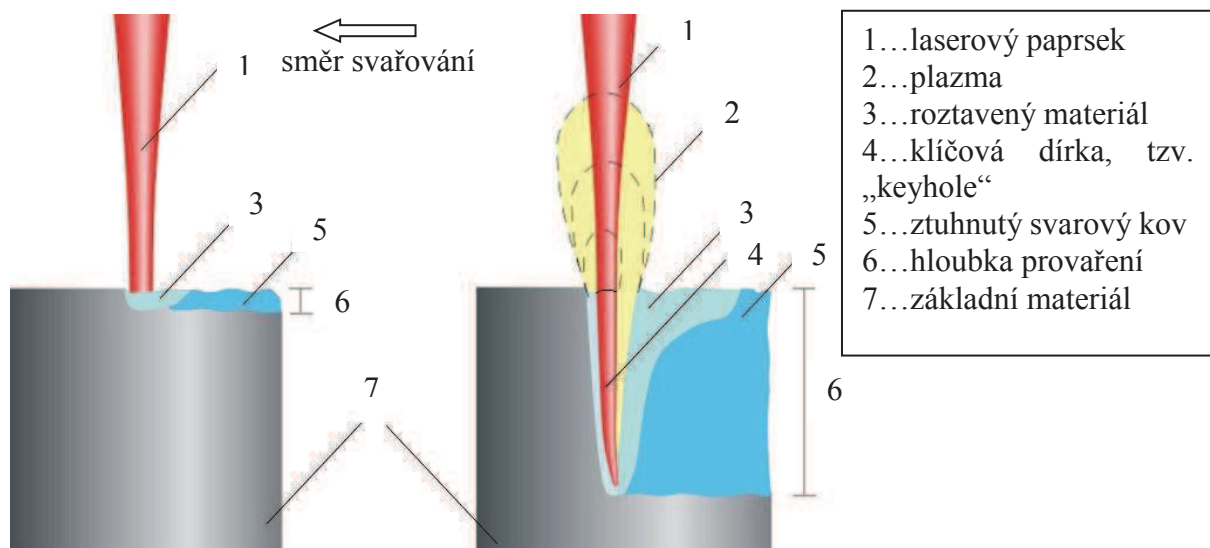
Vytvoření svarového spoje je z pohledu laserového paprsku možné dvěma způsoby. Kontinuálním pracovním režimem, který je s výhodou využíván při sériové výrobě je možné za ideálních podmínek produkovat spoje s neměnnými vlastnostmi v celé délce svaru. Vyznačuje se rovnoměrným průběhem energie dodávané do svařovacího procesu v čase (obr. 2.6a). Naproti tomu pulzní režim je typický svou opakovací frekvencí (obr. 2.6b), kdy mezi jednotlivými pulzy dochází k částečnému, nebo úplnému ztuhnutí svarové lázně. Výsledný spoj je pak tvořen mnoha překrývajícími se body. Tento režim bývá použit v malosériové, nebo kusové výrobě, pro spojování dílců menších tloušťek či obtížně svažitelných materiálů [3, 6, 7, 12, 31, 48].



Obr. 2.6 Režimy svařování [1].

Vzhledem ke tvaru průřezové plochy svaru, resp. k poměru jeho hloubky a šířky jsou rozlišovány kondukční a penetrační svařovací módy. Jejich schémata jsou znázorněna obrázkem 2.7.

Při kondukčním režimu svařování obvykle nepřesáhne plošná hustota výkonu v místě dopadu laserového svazku hodnotu, uváděnou publikací [3] jako 10^6 wattů na centimetr čtvereční. Rychlý odvod tepla z místa svařování do okolí zajistí během procesu minimální odpařování materiálu, ten je tak převážně taven. Tento mód, zobrazený na obrázku 2.7a má menšinové uplatnění a bývá používán při svařování fólií, či jiných tenkých materiálů. Výsledný svar je mělký a má v porovnání s penetračním módem širší tepelně ovlivněnou oblast [3, 6, 7, 12, 31, 48].



a) kondukční, b) hluboký penetrační

Obr. 2.7 Znárodnění svařovacích módů [31].

Penetrační režim, znázorněný na obr. 2.7b je dominantním svařovacím módem, typickým pro průmyslové vyhotovování větších sérií spojů kovových materiálů. Velikost výkonové hustoty v místě fokusovaného svazku se pohybuje v milionech wattů na centimetr čtvereční. Lokální rychlost ohřevu svařovaného dílce je tak vysoká, že se jeho materiál začne rovnou odpařovat, generuje se plazma a dochází k jeho hlubokému provařování. Vhodným nastavením svařovacích parametrů (výkon laseru, svařovací rychlost) dochází ke vzniku „keyhole“, česky klíčové dírky“. Tato dutina válcového tvaru je po obvodu pokryta vrstvou taveniny a naplněna horkými parami základního materiálu, které svým tlakem zabraňují jejímu uzavření. Při pohybu laserového paprsku po svařovaném povrchu dochází ke kvazistacionárnímu procesu, při kterém se tato dutina pohybuje stejnou rychlostí jako laserový paprsek [12]. Důležitým faktorem, ovlivňujícím výslednou kvalitu laserového svaru je ochranná atmosféra, které je věnována kapitola 4 [3, 6, 7, 12, 31, 48].

2.6.2 Parametry svařování

Parametry svařování jsou faktory podstatně ovlivňující kvalitu výsledného svaru. Tyto parametry podmiňují efektivnost využití laseru v technologických procesech. Jsou jimi zejména výkonové parametry, parametry fokusačního systému a pomocné parametry. Vlivy volby materiálu a jeho tloušťky na vybrané parametry svařování jsou uvedeny v tab. 2.1 [1].

2.6.2.1 Výkon laserového paprsku

Je základním teplotním parametrem kontinuálního režimu svařování. Vyjadřuje vliv laserového paprsku na materiál během svařovacího procesu. Výkonem je rozuměno záření zaměřené do fokusačního systému. Změnou stroje se může měnit i optimální hodnota výkonu potřebného pro stejnou aplikaci svařování [1].

2.6.2.2 Rychlost svařování

Rychlost svařování označuje dráhu, která je uražena zdrojem záření, při jeho interakci se svařovaným materiálem za jednotku času. Při neměnné hodnotě výkonu laseru je svařovací rychlostí charakterizována velikost vneseného tepla v daném místě spoje. Tímto parametrem jsou zásadně ovlivněny geometrie svaru, struktura, vlastnosti a chemické složení materiálu v tepelně ovlivněné oblasti. S klesající rychlostí svařování se téměř exponenciálně zvětšuje hloubka provaření [1, 3].

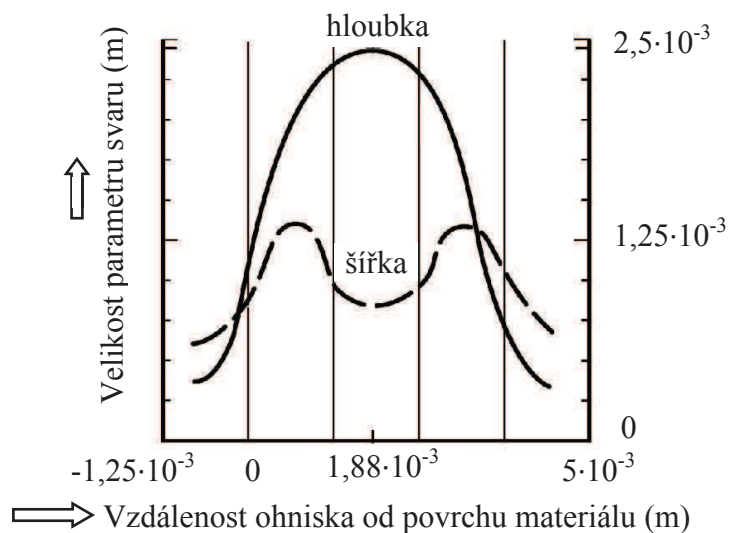
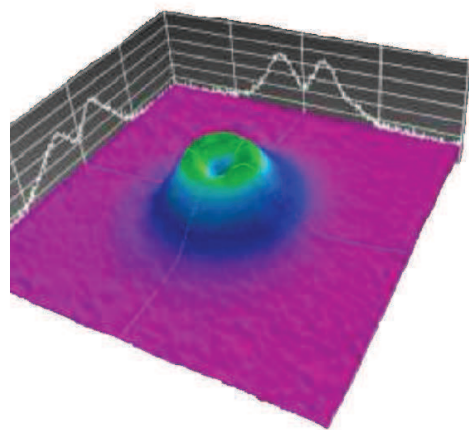
Tab. 2.1 Vliv materiálu, svařovací rychlosti a výkonu laseru na hloubku provaření, při použití CO₂ laseru v penetračním svařovacím režimu [3].

Materiál	Průvar (m)	Svařovací rychlost (m/s)	Výkon laseru (W)
Uhlíková ocel	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^3$
Uhlíková ocel	$6 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-1}$	$2,5 \cdot 10^4$
Korozivzdorná ocel (AISI 302)	$6 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$3,5 \cdot 10^3$
Korozivzdorná ocel (AISI 304)	$2 \cdot 10^{-2}$	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^4$
Titan	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$8,5 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^4$

2.6.2.3 Parametry fokusačního systému

Rozložení intenzity energie po průřezech laserového svazku je charakterizováno příslušným módem, který zobrazuje profil laserového svazku, měnící se v závislosti na typu optického rezonátoru a vzdálenosti fokusačního bodu od výstupní čočky. U průmyslových aplikací laserů, kde stěžejním požadavkem je přesnost výroby bývají často využívány módy „TEM₀₀“ (pro řezání a hluboké svary) a „TEM_{mn}“ (pro tupé svary, viz obr. 2.8). Zásadní vlastností módu laseru u většiny průmyslových aplikací je jeho dokonalá symetrie [1, 3, 27].

Výsledkem zmenšení průměru použitého svazku při konstantním výkonu laseru je nárůst hustoty dopadové energie. Podle zkušeností ale průměry vlákna pod 0,4 milimetru jsou citlivé na vznik vad díky vysoké intenzitě svařování a dynamickým účinkům plazmy [6]. Naopak laserové svazky fokusované na větší průměry (nad 1 milimetr) vyžadují pro zhotovení hlubších průvarů výkonný zdroj laseru a jsou tak ekonomicky nákladné. Důležitá je také poloha bodu fokusovaného svazku vůči svařovaným dílcům. Maximální poměr penetrace k šířce svaru bývá dosažen zaměřením laserového svazku těsně pod povrch materiálu, konkrétní hodnoty těchto parametrů pro uhlíkovou ocel znázorňuje graf na obrázku 2.9 [1, 3, 6].

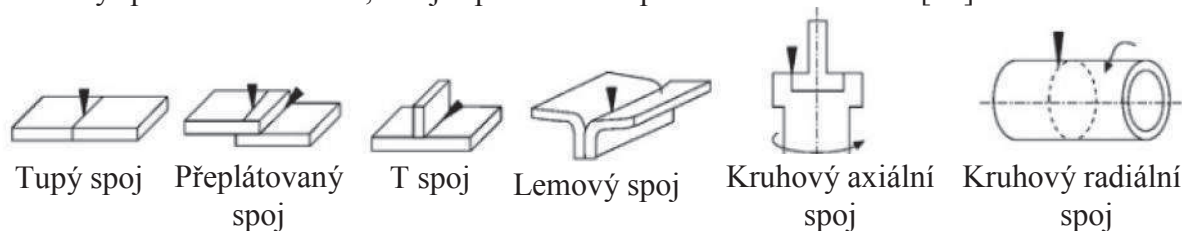


Obr. 2.8 Schéma módu TEM_{mn} [27].

Obr. 2.9 Efekt polohy ohniska na hloubku a šířku svarové housenky; materiál uhlíková ocel; výkon laseru 1,45 · 10³ W; svařovací rychlost 2 · 10⁻² m/s [3].

2.6.3 Typy svarových spojů

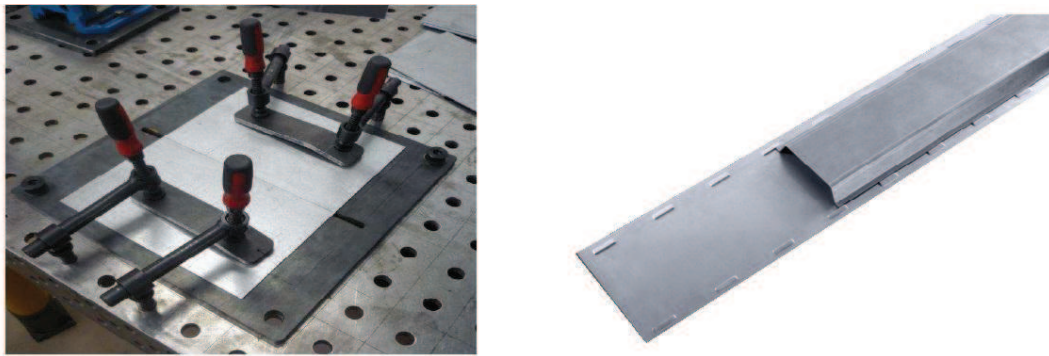
Technologie svařování laserem umožňuje díky pohyblivosti svařovací hlavy vytvářet podle potřeby různé druhy svarů (tupé, koutové, přeplátované, aj.), ty jsou schematicky znázorněny na obrázku 2.10. Při svařování tupého svaru je výhoda v rovnoměrném ohřevu obou spojovaných dílců. Svařování přeplátovaných materiálů umožňuje neprovaření celé tloušťky spodního materiálu, tím je spodní strana povrchově nedotčená [15].



Obr. 2.10 Druhy laserových svarů [15].

2.6.4 Příprava dílců pro svařování

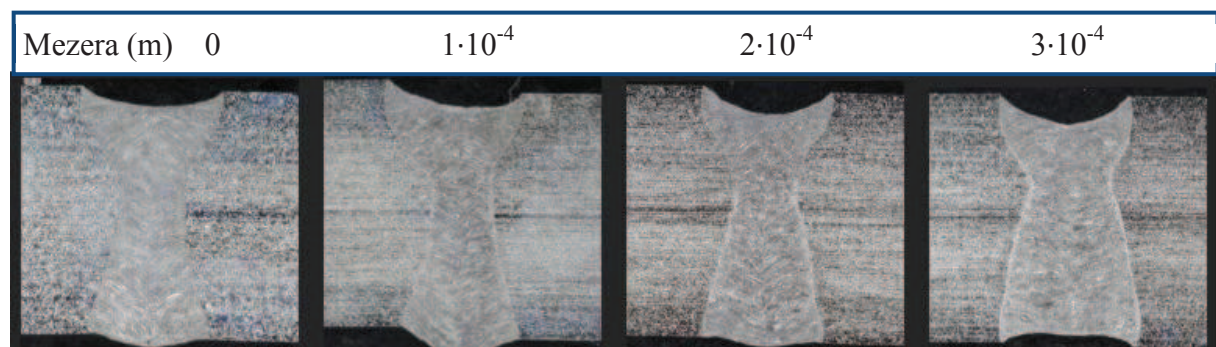
Pro laserové svařování je velmi důležitý návrh spoje, při jeho vhodném řešení mohou být svařeny díly s velmi nízkými rozměrovými tolerancemi. To je ale podmíněno tím, aby v přípravcích byly dílce přichyceny velmi přesně nebo aby spoje byly „samostavitelné“. Příklady možného sestavení částí jsou znázorněny na obrázku 2.11. U sousých kruhových svarů dílů s přesnými rozměrovými tolerancemi se doporučuje (podle EN 20286-2) lisované uložení odpovídající H7/r6 až H7/n6 [13]. Naopak sousé kruhové svary s vůlí je třeba slícovat a sestehovat [6, 11, 13, 28].



Obr. 2.11 Možné ustavení dílců pro svařování [28,20].

Jakost svaru je také ovlivněna stavem povrchu svařovaných materiálů v místě spoje. Ty mohou být pro přesné spoje připravovány strojním obráběním nebo řezáním. V případě znečištěných svařovacích ploch (oxidy, mastnotou, chladičem, barvou, apod.) by měly být očištěny. Pro tyto účely jsou v praxi využívány například mechanické čištění broušením nebo kartáčováním, ruční odmašťování rozpouštědlem, čištění v uzavřené odmašťovací jednotce nebo ultrazvukové lázni či moření v kyselině s oplachem a sušením. Základní předvýrobní nátěry a podobné vrstvy na ocelových plochách mohou být odstraněny rozostřeným laserovým svazkem pohybujícím se před svařováním v ose spoje rychlostí až 10 metrů za sekundu [13]. Výhodou je možnost svařování ploch laserem bez předem připravených úkosů.

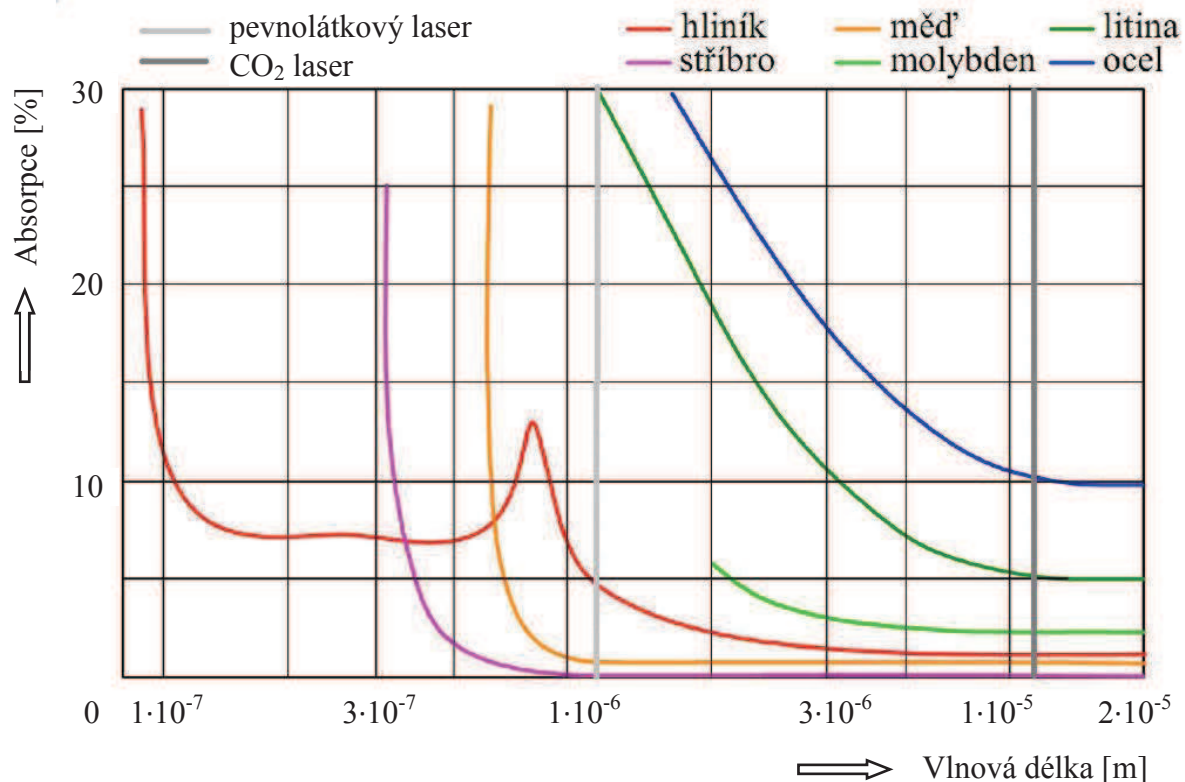
Mezera dílů sestavených pro svařování by neměla přesáhnout 25 % šířky svařovací stopy, která mívá při použití vysokovýkonových laserů velikost přibližně 1 mm. U větších hodnot odsazení je tendence propadávání se materiálu v hlavě svaru, které lze vidět na obrázku 2.12. S rostoucí tloušťkou svařovaných dílců se tento efekt ještě zintenzivňuje. V těchto případech bývá hlava svaru dopována přídatným materiálem drátu, nebo je možné použití plnicích kovových vložek. Za jinak neměnných podmínek lze také větší mezerou mezi svařovanými plochami zvětšovat do jisté míry hloubku provaření za cenu propadlé hlavy svaru [6, 13, 14].



Obr. 2.12 Vliv zvětšující se mezery mezi svařovanými plechy na výsledný svar; materiál X5CrNi18-10; tloušťka 3 milimetry [29].

3 VLIV MATERIÁLU NA LASEROVÝ SVAR

Chemické složení svařovaných dílců má spolu s ochrannou atmosférou (kap.4), svařovacím režimem (kap. 2.6.1) a procesními parametry (kap. 2.6.2) zásadní vliv na výslednou jakost a vlastnosti svaru. Volba svařovaných materiálů rozhoduje také o tom, zda vůbec může být spoj úspěšně vytvořen (tab. 3.2). Podmínkou je, aby energie laserového paprsku byla pohlcována pracovním kusem. Právě závislost míry absorpce záření na vlnové délce je pro různé materiály zachycena grafem na obrázku 3.1. Vzhledem k počtu typů a s tím související rozmanitostí pracovních vlnových délek laserů (kap. 1.3.1) je tak možné svařovat většinu kovových materiálů, neželezné kovy nebo plasty či keramické materiály [3, 9, 13].



Obr. 3.1 Závislost pohltivosti laserového záření různými materiály na vlnové délce, při teplotě 20 °C [9].

Na velikost pohltivosti má také vliv to, v jakém stavu se nachází plochy spojovaných dílců. Míra pohltivosti leštěných ploch je výrazně nižší oproti plochám neupraveným a zoxidovaným, viz tab. 3.1.

Tab. 3.1 Vliv stavu povrchu součástí v místě svaru na absorpční koeficient [9].

Koeficienty absorpce paprsku CO ₂ laseru					
Materiál	Al	Fe	Zr	Ti	Au
Leštěný povrch	0,034	0,05	0,083	0,094	0,01
Oxidovaný povrch (600 °C po dobu 2 hodin)	0,25-0,5	0,33-0,74	0,45-0,56	0,18-0,25	x

3.1 Svařitelnost materiálů

Svařitelnost materiálů laserem je ovlivněna především jejich chemickým složením, stavem a rozměry. Laserem je možné svařovat celou škálu kombinací materiálů, které jsou ostatními svařovacími technologiemi buď vůbec, nebo obtížně svařitelné. Mnoho ocelí nevhodných k tavnému svařování, nebo obtížně svařitelných lze laserem spojovat bez nutnosti přehřevu [13, 51].

3.1.1 Vliv chemického složení ocelí na jejich svařitelnost

Uhlík (C) je prvek přítomný ve všech ocelích, má zásadní vliv na jejich svařitelnost i mechanické vlastnosti. S rostoucím obsahem uhlíku se u ocelí zvyšuje tvrdost martenzitu, který vzniká v laserových svarech vlivem prudkých ochlazovacích rychlostí a současně se snižuje i kritická ochlazovací rychlost pro jeho dosažení. Vliv chemického složení na svařitelnost bývá u uhlíkových ocelí vyjádřen tzv. „uhlíkovým ekvivalentem (CE, resp. CET)“, s jehož rostoucí hodnotou klesá svařitelnost. Norma ČSN EN 1011-2 doporučuje užít pro výpočet uhlíkového ekvivalentu feritických ocelí vztahy (3.1) nebo (3.2) [51, 52].

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad [\%] \quad (3.1)$$

Vztah je určen zejména pro nelegované jemnozrnné a nízkolegované oceli, platí v rozsahu hodnot CE 0,30 až 0,70. Pokud nejsou kromě uhlíku a manganu známy obsahy ostatních prvků, připočítává se k zjištěné hodnotě CE konstanta 0,03, reprezentující vliv ostatních prvků. Rovnice není vhodná pro výpočet uhlíkového ekvivalentu oceli obsahující bór [51, 52].

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad [\%] \quad (3.2)$$

Pokud velikost CET přesáhne hodnotu 0,45 lze očekávat zvýšené riziko vzniku trhlin [51, 52].

Křemík (Si) zvyšuje pevnost feritu u nelegovaných uhlíkových ocelí. Horní hranice obsahu křemíku v oceli je 0,45 hm. %, naproti tomu při obsazích menších, jak 0,1 hm. % je ocel neuklidněná [51].

Mangan (Mn) do určitého obsahu zvyšuje mez kluzu i pevnosti, aniž by byla snížena plasticita materiálu. Působí v oceli jako dezoxidační prvek, spolu s křemíkem se tak používají k výrobě uklidněných ocelí. Nelegované uhlíkové oceli obsahují většinou do 1,7 hm. % manganu [51].

Fosfor (P) zvyšuje odolnost proti atmosférické korozi, mez kluzu i pevnosti. Přináší ale také nežádoucí účinky, jako snížení plasticity oceli či zkřehnutí za studena. Jeho obsah v materiálu proto nebývá větší, než 0,05 hm. % [51].

Síra (S) Vysoký obsah síry je jedním z hlavních důvodů vzniku lamelárních trhlin, proto se maximální obsah síry v nelegovaných ocelích doporučuje do 0,05 hm. % [51].

Dusík (N) je prvek, jehož maximální rozpustnost je při teplotě 1600 °C ve slitinách železa 0,04 hm. %. Přítomnost dusíku v uhlíkové oceli způsobuje rozšíření pole austenitu, zvyšuje mez kluzu, pevnosti a tvrdost. Současně ale také snižuje plastické vlastnosti materiálu. Nebezpečné je vylučování nitridů v blízkém okolí svaru, které může při nižších teplotách vést k úplnému porušení svařence [51].

Vodík (H) je při svařování slitin železa nežádoucí příměsí. Může být příčinou vzniku několika typů vad (viz kap. 5.1). Zdroji vodíku při laserovém svařování mohou být vlhkost svařovaných povrchů či přídavného materiálu, zbytky po povrchových úpravách, nebo vlhkost v ochranných plynech a další [51].

Měď (Cu) je prvek, jehož přítomnost v nelegovaných ocelích je způsobena jejich výrobou z ocelového šrotu s určitou příměsí Cu. V ocelích měď zpomaluje průběh atmosferické koroze vytvořením těsné oxidické vrstvy [51].

Nikl (Ni) je prvek dolegován do svarových kovů pro zlepšení jejich plastických vlastností, zejména při nízkých teplotách a pro zvýšení jejich prokalitelnosti [51].

Chrom (Cr), Molybden (Mo) a Vanad (V) jsou karbidotvorné prvky, které výrazně precipitačně zpevňují oceli i svarové kovy [51].

Tab. 3.2 Svařitelnost kovových materiálů laserovým paprskem [1].

	Al	Ag	Au	Cu	Pd	Ni	Pt	Fe	Be	Ti	Cr	Mo	Te	W
Al	V													
Ag	P	P												
Au	P	V	V											
Cu	P	P	V	V										
Pd		V	V	V										
Ni	P		V	V	V	V								
Pt		P	V	V	V	V	V							
Fe			P	P	D	D	D	V						
Be			P	P	P	P		P						
Ti	P	P	P	P	P	P	P			V				
Cr			P		D	D	V			D				
Mo						P	V			V	V			
Te					D	D	P	P		V		V		
W					P	P	D	P			V	V	V	V

V - velmi dobrá, D - dobrá, P - postačující svařitelnost

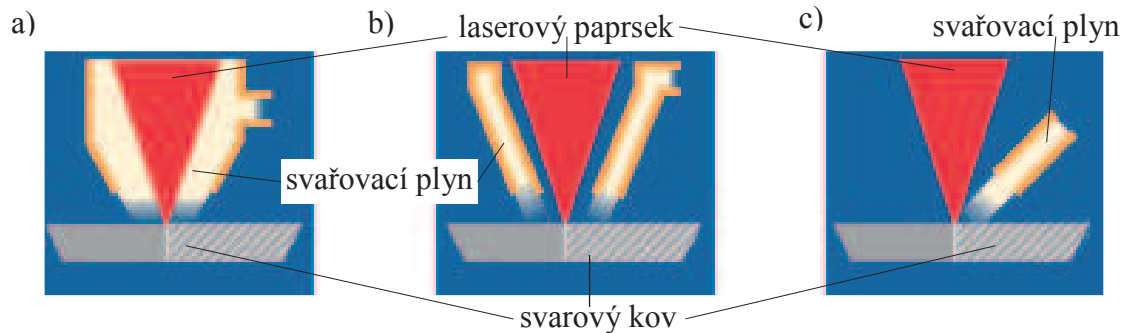
3.2 Korozi vzdorné oceli

Tyto materiály mohou díky schopnosti pasivace odolávat elektrochemické korozi v oxidačním prostředí. Pro korozi vzdorné oceli je charakteristický obsah chromu, vyšší než 11,5 hm. % a nízký obsah uhlíku, obvykle menší než 0,10 hm. %. Tato odolnost je možná díky na povrchu vytvořené pasivní vrstvě oxidů, bohatých na chrom. Dělí se do následujících skupin: austenitické, austeniticko-feritické duplexní, feritické a martenzitické korozi vzdorné oceli [1, 13, 53, 54].

Většina obvyklých druhů korozi vzdorných ocelí je snadno svařitelná laserovým svařováním, včetně austenitických, feritických, duplexních a precipitačně vytvrzených martenzitických korozi vzdorných ocelí [13]. Austenitické a duplexní materiály bývají legovány dusíkem, z toho vyplývající nebezpečí vzniku pórů se řeší odplyněním, a to tak, aby byl vyrovnán nepříznivý vliv ztráty dusíku na rovnováhu fází. Svařováním precipitačně vytvrzených martenzitických ocelí laserem dochází k poklesu jejich pevnosti v tahu [1, 13, 53, 54].

4 OCHRANNÁ ATMOSFÉRA

Volba ochranné atmosféry je parametrem, významně ovlivňujícím výslednou jakost svaru i efektivitu laserového svařovacího procesu. Ochranný plyn je obvykle dodáván tryskou obklopující laserový svazek, nasazenou na fokusačním zařízení (obr. 4.1a,b). Další možností je přísun plynu realizovat oddělenou trubičkou (obr. 4.1c) [10, 13, 55].



a) koaxiální tryskou, b) prstencovou tryskou, c) oddělenou trubičkou

Obr. 4.1 Používané přívody ochranných plynů při laserovém svařování [10].

V praxi běžně užívané trysky s koaxiálním přívodem plynu (obr. 4.1a) mívají výstupní průměr 6-20 milimetrů, přičemž jejich vzdálenost od povrchu obrobku bývá 5-8 milimetrů. Přísun plynu ze strany (obr. 4.1c) je zajištěn trubičkou s ústím o průměru 5-9 milimetrů, které bývá od povrchu spoje vzdáleno 2-8 milimetrů [10, 13, 55].

4.1 Tvorba plazmatu

Ochranný plyn zajišťuje mimo jiné rozehnání plazmatu, jehož částice vystupující nad svařenec, rozptylují laserový paprsek a snižují tak hloubku provaření (obr. 2.7b). Při určité hodnotě hustoty energie je také ochranná atmosféra nad povrchem materiálu ionizována, což má za následek vznik plazmatu ochranného plynu. Sklon k tvorbě plazmatu je určen atomovou či molekulovou hmotností plynu, jeho tepelnou vodivostí a ionizační energií [10, 55, 56].

Tab. 4.1 Chemické a fyzikální vlastnosti vybraných plynů [10].

Plyn	Molekulová hmotnost (Kg·mol ⁻¹)	Tepelná vodivost (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Ionizační energie (eV)	Relativní hustota vůči vzduchu (-)
Helium (He)	4·10 ⁻³	0,15363	24,6	0,14
Argon (Ar)	4·10 ⁻²	0,01732	15,8	1,38
Dusík (N ₂)	2,8·10 ⁻²	0,02550	15,6	0,96
Oxid uhličitý (CO ₂)	4,4·10 ⁻²	0,01615	13,8	1,52

Tendence k vytváření plasmu je charakterizována hmotností molekul použitého plynu, jeho tepelnou vodivostí, hustotou a ionizační energií. Se zmenšováním molekulové hmotnosti roste schopnost plynu kompenzovat náboje mezi ionty kovu a elektrony plazmy. Vyšší tepelná vodivost ochranného plynu zase zrychluje přenos tepla z plazmy do okolí. Ovšem nejdůležitějším faktorem je velikost ionizační energie plynu, tedy energie potřebné k odstranění elektronu z valenční vrstvy atomového obalu. Plyny s velikou ionizační energií

bývají s výhodou používány jako ochranné při svařování. Seskupování plazmatu nad obrobkem je největším problémem zejména při svařování výkonovými CO₂ lasery, kde vystřikující horké plazma dosahuje teplot desítek tisíc stupňů Celsia. K zabránění vzniku plazmatu ionizováním kovových výparů se využívá ochranný plyn helium [10, 55, 56].

4.2 Vliv na mechanické vlastnosti

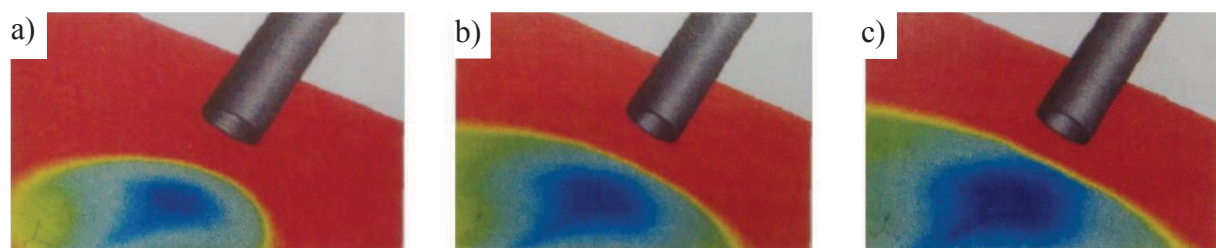
V mnohých případech je výhodné použití inertních plynů jako svařovacích, protože u nich nedochází k chemickým reakcím se svarovým kovem. Helium s argonem jsou příklady plně inertních plynů, neovlivňujících mikrostrukturu materiálu svaru. Druhou skupinou jsou reaktivní plyny, jako oxid uhličitý, nebo dusík. Ty se aktivně účastní svařování za vzniku oxidů, karbidů či nitridů, které se hromadí v pórech materiálu a mohou vést k nedostatečným mechanickým vlastnostem materiálu svaru. V mnohých případech tedy nejsou čistě reaktivní plyny vhodné a naopak při svařování korozivzdorných ocelí zvyšuje použití dusíku jako ochranného plynu korozivzdornost svarku [10].

4.3 Krycí/stínící efekt

Jedním z hlavních úkolů svařovacího plynu je ochrana roztaveného, či horkého kovu před vlivy okolní atmosféry. Vysoké svařovací rychlosti mohou způsobit, že svar při chladnutí nebude chráněn potřebnou dobu před oxidací. V těchto případech je vhodné rozšířit z trysky krytí protáhlým mrakem ochranného plynu za laserovým svazkem [10, 12, 13].

Hélium má daleko menší hustotu než vzduch. V porovnání s ostatními používanými svařovacími plyny, uvedenými v tabulce 4.1 opouští rychleji okolí svaru a má tak i menší krycí efekt. Proto pro správnou ochranu svaru je doporučeno dodávat hélium intenzivněji, a to buď vysokorychlostně (malé trysky, vysoký tlak), nebo z větších trysek pod nižším tlakem. Je třeba ale brát v úvahu možné narušení taveniny přímým proudem plynu. Argon má naopak vysokou hustotu a vytěsňuje tak vzduch z okolí svaru efektivněji. Užitím směsných plynů helium-argon jsou kombinovány výhody obou zmíněných, jako vyšší hustota argonu i vyšší ionizační potenciál hélia a je tak dosažena lepší ochrana svaru [10, 12, 13].

Během svařování je třeba u svarů s úplným provařením chránit kořen svaru. Oxidace může nežádoucím způsobem ovlivnit vlastnosti materiálů, oxidy mohou snížit povrchové napětí a způsobují, že je obtížné dosáhnout úplného provaření. Zařízení namontované na fokusační aparát však může zřídka zajistit ochranu kořene svaru [13].



a) 100% He [obj. %], b) 70% He 30% N₂ [obj. %], c) 40% He 60% N₂ [obj. %]

Obr. 4.2 Kontaminace svaru kyslíkem pro různé chemické složení ochranné atmosféry [12].

Modrá barva na obrázku 4.2 definuje oblast s nulovým obsahem kyslíku, zelená barva zónu s 10 obj. % kyslíku a nakonec červená barva charakterizuje 20% objemový výskyt kyslíku. Je tedy zřejmé, že se zmenšujícím se podílem helia roste oblast chráněná před vlivy vnějšího prostředí vzduchu.

4.4 Používané plyny

Plyny se vzájemně liší chemickou reaktivitou a fyzikálními vlastnostmi. Díky tomu jsou ty, uvedené v tabulce 4.1 a jejich směsi využívány jako asistenční plyny pro nejrůznější aplikace laserového svařování. Pro správnou volbu svařovacího plynu je možné využít tabulku 4.2, ovšem při vědomí faktorů, uvedených v kapitolách 4.1 až 4.3 [10, 12, 57].

Tab. 4.2 Vhodné ochranné plyny pro jednotlivé svařované materiály CO₂ lasery [12].

Materiál	Svařovací plyn	Poznámka	Formovací plyn
Běžné uhlíkaté oceli C-Mn oceli	He	Pro všechny výkony, koaxiální i boční tryska, vysoká kvalita svaru.	Ar
	Ar	Pro výkony do 3 kW, koaxiální i boční tryska.	
	Ar/30% He Ar/50% He	Koaxiální i boční tryska, vysoká kvalita svaru.	
	Ar/10% O ₂	Pro výkony do 5 kW, koaxiální tryska.	
	Ar/20% CO ₂	Pro výkony do 5 kW, boční tryska, citlivé na nastavení polohy trysky, akceptovatelná kvalita svaru pro nízkouhlíkaté oceli.	
	Lasgon®C (=He/Ar/CO ₂)	Pro výkony do 8 kW, boční tryska, vysoká kvalita svaru zvláště pro povlakované materiály.	
Austenitické superaustenitické korozivzdorné oceli	Ar/(6-10)% H ₂	Pro výkony do 5 kW, koaxiální i boční tryska, vysoká svařovací rychlost, lesklý povrch svaru.	Ar/H ₂ N ₂ /H ₂
	Ar	Pro výkony do 3 kW, koaxiální i boční tryska.	
	Ar/30% He Ar/50% He	Koaxiální i boční tryska.	
	He	Pro všechny výkony, koaxiální i boční tryska.	
	N ₂	Koaxiální i boční tryska, svar obsahuje nitridy.	
Feritické nerezové oceli	Ar	Pro výkony do 3 kW, koaxiální i boční tryska.	Ar
	Ar/30% He Ar/50% He	Koaxiální i boční tryska.	
	He	Pro všechny výkony, koaxiální i boční tryska.	

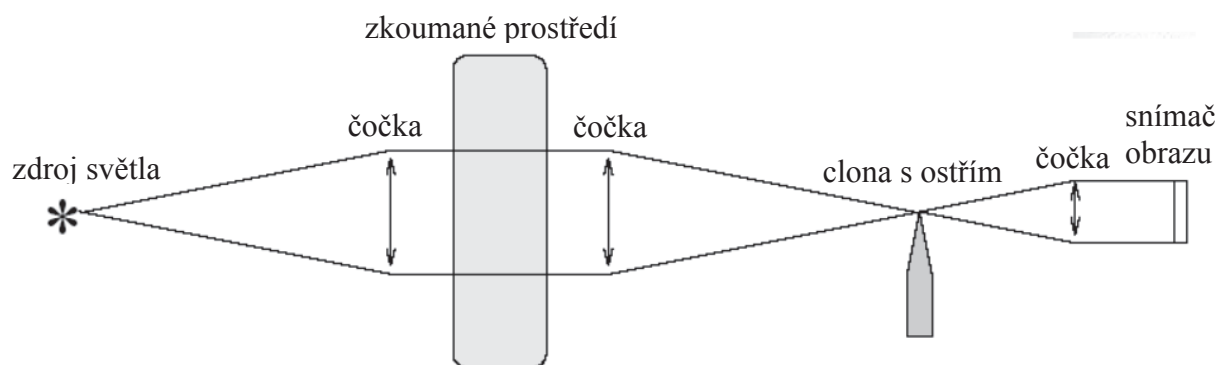
Materiál	Svařovací plyn	Poznámka	Formovací plyn
Hliník a jeho slitiny	Ar/30% He Ar/50% He He/30% Ar	Koaxiální i boční tryska, velká hloubka průvaru, dobrá kvalita svaru.	Ar He
	He	Pro všechny výkony, koaxiální i boční tryska.	
Austeniticko-feritické oceli (duplex)	N ₂	Koaxiální i boční tryska, svar obsahuje nitridy.	N ₂
	Ar/N ₂ směsi	Koaxiální i boční tryska.	
	He/N ₂ směsi	Pro všechny výkony, koaxiální i boční tryska.	

Volbu vhodné ochranné atmosféry pro laserové svařování materiálů Nd:YAG lasery je možné uskutečnit na základě doporučení tabulky v příloze 3.

4.5 Šlířová zobrazovací metoda

Šlířová zobrazovací metoda (německy Schlieren) slouží ke grafickému znázornění změny indexu lomu ve zkoumaném transparentním nehomogenním prostředí. Tato změna může být vyvolána například teplotním gradientem, prouděním, či ultrazvukovým vlněním. Princip zkoušky je založen na ozáření pozorovaného prostoru zdrojem nerozbíhavého světla (dioda, laser), jehož paprsky se vlivem nehomogenity zkoumaného prostředí lámou, jsou následně odráženy a částečně odstíněny neprůhledným břitem. Prošlé paprsky dopadají do objektivu snímací jednotky, kde vytváří žádaný obraz.

Metoda má svoje praktické uplatnění např. v balistice, aerodynamice, nebo při analýze šíření ultrazvukových vln, schéma zobrazování je zachyceno obrázkem 4.3. Proudění svařovacího plynu je zobrazováno tak, že v místech, kde se první derivace indexu lomu nachází v určitém rozmezí, vznikají souvislé oblasti popřípadě pruhy [69, 70].



Obr. 4.3 Princip funkce Šlířové zobrazovací metody [69].

5 VYHODNOCENÍ SVAROVÝCH SPOJŮ

Technologií svařování laserovým paprskem je v porovnání s ostatními klasickými svařovacími procesy, jako jsou MIG, MAG, nebo WIG dosahováno vyšší kvality procesu, při nižších tvarových deformacích. Nicméně pokud je zjištěna odchylka větší, než úchylka od vlastností předepsaných technickými normami, podmínkami či smluvním vzorkem, dochází ke vzniku nepřijatelného defektu (viz kap. 5.1). V kapitole 5.2 jsou potom uvedeny metody detekce těchto vad [58, 59].

5.1 Možné defekty

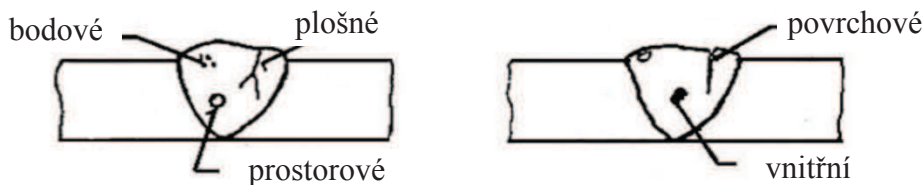
Při procesu laserového svařování může docházet ke vzniku řady imperfektností či defektů vlivem zvolených parametrů svařování. Vady ve svarech jsou nebezpečnými koncentratory napětí, které zásadně snižují velikost meze únavy materiálu svaru a za určitých podmínek mohou být i iniciátory křehkého lomu. Defekty se rozdělují podle jejich detekovatelnosti na:

- zjevné: jsou nedostatky odhalitelné zrakem, nebo pomocí pomůcek,
- skryté: jsou vady detekovatelné pomocí přístrojů, nebo zkouškami v laboratořích.

Dále se vady svarů dělí podle jejich akceptovatelnosti na:

- přípustné: jsou v tolerovaných mezích,
- nepřijatelné: neodpovídají příslušným rozměrovým požadavkům, mohou být opravitelné či neopravitelné [13, 51, 58].


Literatura [58] uvádí možné dělení vad ve svarech podle jejich tvaru (geometrie) a polohy, toto členění je schematicky znázorněno obrázkem 5.1.







Obr. 5.1 Vady ve svarech [58].




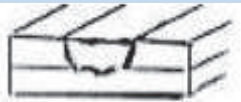


Bodovými defekty mohou být vady typu mikropórů či malé sférické vměstky. Nejtypičtějším plošným kazem svarů jsou trhliny (horké, studené, žíhací, lamelární nebo kráterové), potom neprůvary a studené spoje. Ve skupině prostorových defektů jsou především vady typu plynových dutin (pórů, bublin), vměstků (struskové, tavidlové, oxidické, kovové), staženiny (mezidendritické, kráterové), ale také zápaly, vruby, nedodržení rozměru (hubený kořen, převyšovaný svar, propadlý svar) a nepravidelný povrch svaru [13, 51, 58].


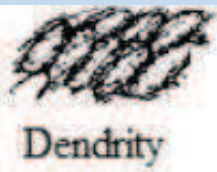
Tab. 5.1 Možné vady geometrického charakteru při laserovém svařování [60].

Druh	Grafické znázornění	(V) Příčiny vzniku (O) Preventivní opatření
Napjatost a úhlová deformace		(V) Velký teplotní účinek, nedokonalé upnutí dílců. (O) Vysoká svařovací rychlost či hloubka penetrace, využití tuhého upínacího přípravku.

Nevzhledný svar (špinavý, hrubý povrch)		(V) Nevhodné parametry svařování. (O) Nižší výkonová hustota svazku, odvádění odpařovaných částic z místa svaru.
Provaření (propálení)		(V) Tenký materiál, široká svarová housenka. (O) Optimalizace podmínek svařování (mírnější ohřev).
Převýšení		(V) Pomalá rychlost svařování a velké vnesené teplo, nízká viskozita materiálu v místě spoje. (O) Vhodné podmínky svařování (plyn, aj.).
Proláklý svar		(V) Nadměrná velikost výkonové hustoty záření a malá zóna natavení. (O) Optimalizace pulsního laserového svařování.

Tab. 5.2 Možné vady vnitřního charakteru při laserovém svařování [60].

Druh	Grafické znázornění	(V) Příčiny vzniku (O)Preventivní opatření
Trhliny tepelné, studené, krystalizační, kráterové		(V) Nízká teplota tání a segregace, velké pnutí/deformace. (O) Vhodný výběr legujících prvků, optimalizace pulsního laserového svařování, nižší svařovací rychlost.
Pórovitost (dutiny, průduchy)		(O) Eliminace přístupu kyslíku a vodíku, stabilní keyhole, volba ochranné atmosféry.
Nabobtnání přeplátovaného spoje		(V) Svařování plechů vysokým výkonem. (O) Optimalizace pulsního laserového svařování, eliminace mezery mezi přeplátovanými dílci.
Neprovařený kořen Nedostatečné prolnutí		(V) Vysoká odrazivost materiálu a účinky plazmatu. (O) pevné upnutí, vhodné podmínky pro hluboké penetrační svařování.
Vměstky (oxidy, atd.)		(O) Leštěný povrch dílců v místě spoje a jeho okolí, správné krycí podmínky.
Ztráta legur materiálu odpařením		(V) Těkavé složky a nízká teplota tavení. (O) Vysoká rychlost svařování, hluboké penetrační svařování, pulsní.

Makrosegregace		(V) Nedostatečné prolnutí různých materiálů. (O) Směšování v důsledku pulzace, či oscilace paprsku.
Mikrosegregace		(V) Prvky s nízkými koeficienty rozložení. (O) Zmenšit množství přivedeného tepla na jednotku délky svaru, tepelné zpracování po svařování.

Pro zamezení vzniku krystalizačních trhlin je nutné, aby spojované materiály obsahovaly minimální množství nečistot, jako jsou například síra a fosfor. Pro snížení rizika pórovitosti spoje by měly být svařované materiály dostatečně dobře odkysličeny například odplyněním, nebo použitím hliníku. Skutečné limitní hodnoty však závisí na tloušťce a rychlosti svařování. Svarové spoje dosahované laserovým svazkem mohou obsahovat oproti spojům obvykle zhotoveným obloukovým svařováním malé množství defektů charakteru krystalizačních trhlin, a to zejména v případech vysokoproduktivního svařování, pro nenáročné použití. Správnou kombinací chemického složení svařovaných materiálů (viz tab. 5.1) a řízením procesních parametrů lze vzniku krystalizačních trhlin úplně zabránit [13, 51, 58].

Tab. 5.3 Vhodné množství uhlíku, manganu a síry v ocelích, podmiňující možnost dosažení svarů bez krystalizačních trhlin [13].

C (hm. %)	0,06-0,11	0,11-0,15	0,15-0,18
Mn/S	> 22	> 40	> 60

5.2 Kontrola svarových spojů

Makroskopické vady lze na rozdíl od mikroskopických snáze detekovat běžnými technickými prostředky (vizuálně, ultrazvukem, apod.). Zkoušení svarových spojů je prováděno destruktivním, či nedestruktivním způsobem [61].

5.2.1 Nedestruktivní zkoušky

Jsou testovací metody, při nichž nedochází k porušení celistvosti materiálu zkoumaného vzorku. Vyjma přímé vizuální kontroly je u těchto zkoušek nutno počítat s nákladností, spojenou s pořízením přístrojů, jejich provozem, servisem a kalibrací, ale i soustavným školením obsluhy. Mezi nedestruktivní zkoušky se řadí vizuální kontrola, zkouška prozářením, zkouška ultrazvukem nebo zkoušky magnetická prášková a kapilární [61].

5.2.2 Destruktivní zkoušky

Použití destruktivních metod vede k porušení soudržnosti zkoumaných vzorků. Slouží při početných sériích výrobků, pro vhodné stanovení postupů svařování. Kvalita svaru má zásadní vliv na pevnost spoje, proto jsou metalografické a mechanické zkoušky velice důležité pro stanovení pevnostních limitů celé konstrukce. Používanými destruktivními metodami testování svarových spojů jsou zkoušky příčná tahová, tvrdosti, makro a mikro struktury, lámavosti, nebo rázem v ohybu [61].

5.2.2.1 Příčná tahová zkouška

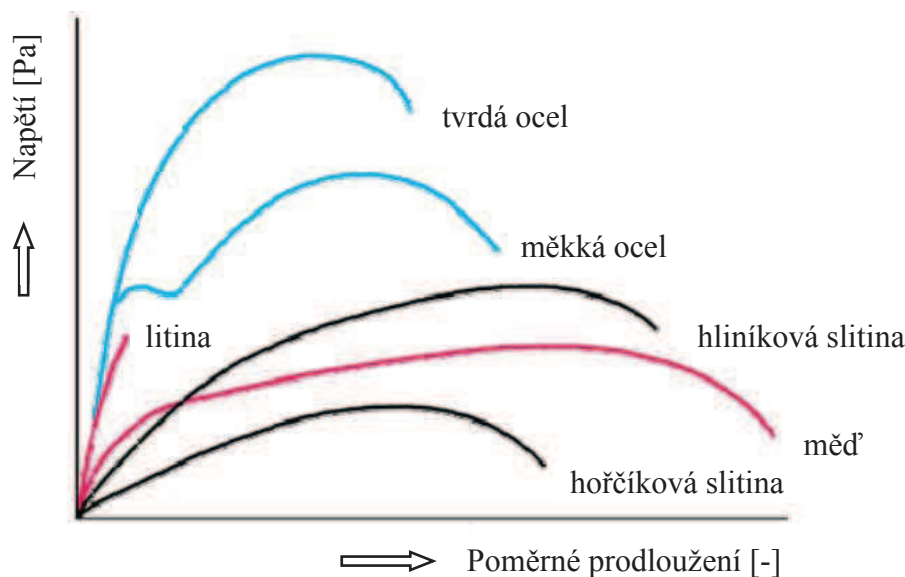
Podstatou této statické zkoušky prováděné na trhacím stroji je plynulé zatěžování zkušební vzorku, odebraného napříč svarovým spojem, až do jeho přetržení. Výstupem je potom tahový diagram (obr. 5.2), z něhož lze odečíst hodnotu maximální síly F_{\max} , meze pevnosti R_m (MPa) a meze kluzu R_e (MPa) materiálu vzorku. Tažnost A (obj. %) s kontrakcí Z (obj. %) jsou potom určeny ze vztahů 5.1, 5.2. Testování svarů probíhá za definovaných podmínek (teplota, rychlost deformace), zkoušení spojů kovových materiálů se řídí normou ČSN EN 895. U materiálů s nevýraznou mezí kluzu se zavádí smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ (MPa). Je to napětí, které na zkušební délce tyči vyvolá trvalé prodloužení 0,2 % původně měřené délky tyče [17, 28, 62].

$$A = \frac{L_u - L_o}{L_o} \cdot 100 [\%] \quad (5.1)$$

Tažnost je definována jako poměr prodloužení měřené délky tyče po přetržení L_u k výchozí změřené délce tyče L_o .

$$Z = \frac{S_o - S_u}{S_o} \cdot 100 [\%] \quad (5.2)$$

Kontrakce je vyjádření změny průřezu S_o před zkouškou a S_u po zkoušce.



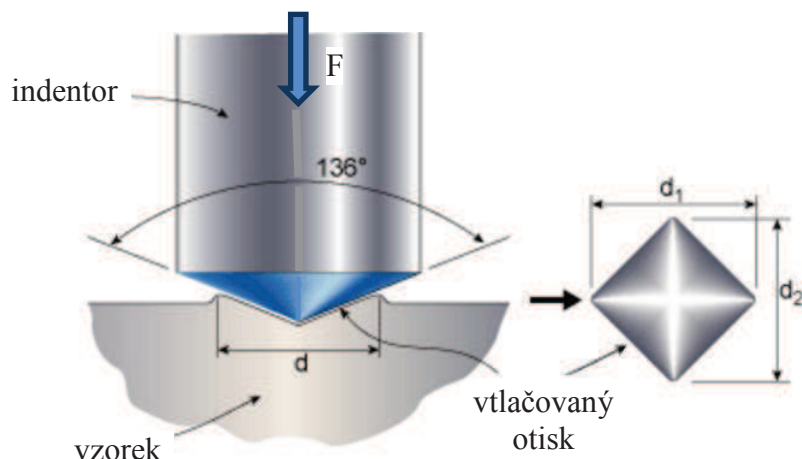
Obr. 5.2 Diagram tahové zkoušky pro různé druhy materiálů [64].

5.2.2.2 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Účelem této statické zkoušky je stanovení maximální tvrdosti základního materiálu a jednotlivých pásem svarového spoje. Princip zkoušky (obr. 5.3) je založen na vtlačování indentoru, kterým je diamantový čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem 136 stupňů, do vzorku testovaného materiálu po dobu 10 až 15 sekund [62, 65, 66].

$$HV = 0,189 \cdot \left(\frac{F}{d^2}\right) [-] \quad (5.3)$$

Následně se měří délka obou úhlopříček vzniklého vtisku a je stanovena jejich střední hodnota d v mikrometrech. Ta se spolu s velikostí vtlačovací síly F (bývá od 10 do 1000 Newtonů) dosadí do vztahu 5.3, výsledkem je tvrdost podle Vickerse HV. Metodu lze použít pro měření všech tvrdostí [65], je velmi přesná a minimálně závislá na zatížení. Při zatížení menším, jak 1 kilogram se hovoří o tzv. mikrotvrdosti, jejíž měření jsou předepsána normou ČSN EN 65 07-1 [62, 65, 66].



Obr. 5.3 Zkouška tvrdosti podle Vickerse [67].

5.2.2.3 Zkouška makrostruktury a mikrostruktury

- Makrostrukturní rozbor

Zkoumané vzorky jsou vyhodnocovány vizuálním pozorováním pouhým okem nebo optickými zařízeními do zobrazovaného zvětšení 30× (lupa, optický mikroskop). U svaru je takto hodnocen jeho tvar, způsob kladení svarových vrstev, odmíšení svarového kovu, tvar, šířka a charakter tepelně ovlivněné zóny, atd. [62, 63, 68].

Baumannův otisk je kvalitativní zkouškou, jejímž smyslem je stanovení charakteru vyloučení segregací síry, tj. sulfidických vměstků v oceli. Podstatou zkoušky je chemická reakce sulfidů manganu nebo železa s citlivou vrstvou fotografického bromostříbrného papíru v rovině výbrusu. Následuje vizuální vyhodnocení [68].

Makrolept je zkouška sloužící k určení charakteru makrostruktury výbrusu zkoumaného materiálu. Vybroušený povrch je naleptán činidlem (nejčastěji vodními roztoky kyseliny dusičné nebo persíranu amonného), čímž dojde k vyvolání makrostruktury. V případě oceli umožňuje zkouška studovat například její primární krystalizaci, příčiny porušení celistvosti materiálu, rozdělení různých prvků, resp. nečistot v oceli, stanovit hloubku nauhličených nebo oduhlíčených vrstev, posoudit jakost svarových spojů, apod [68].

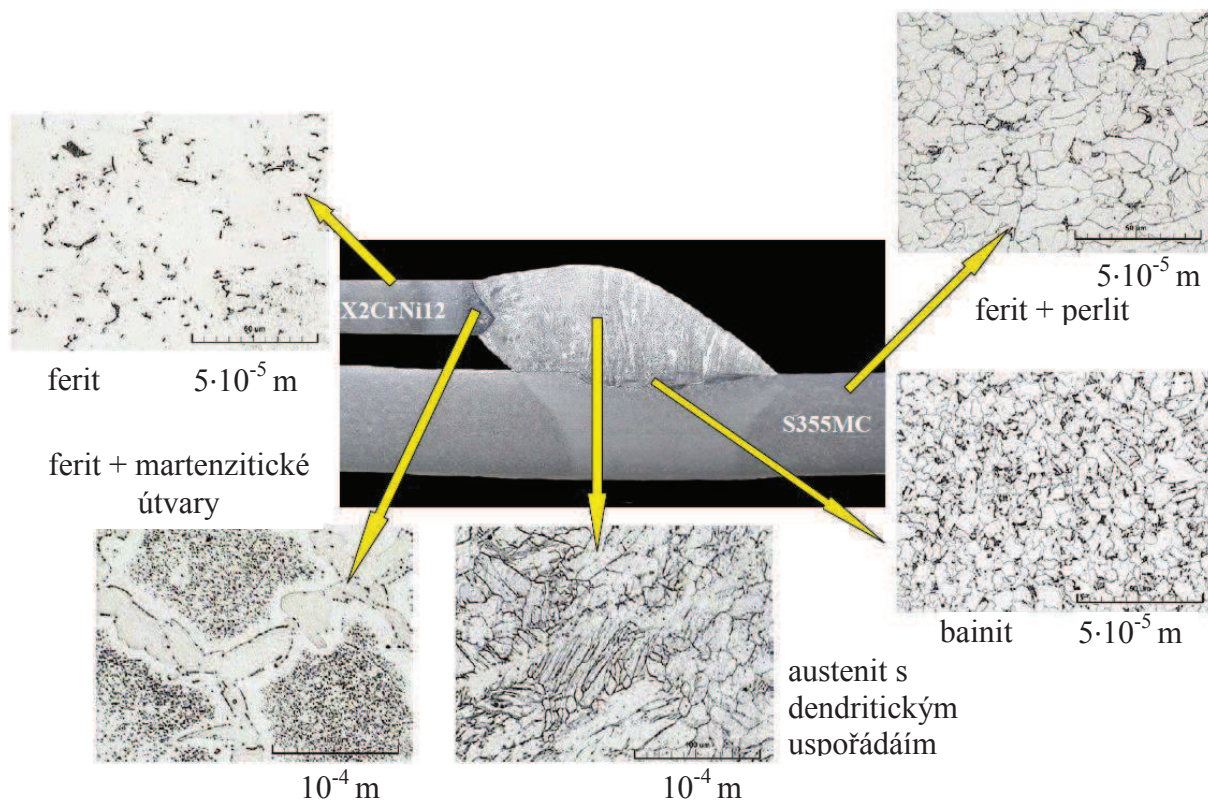
- Mikrostrukturní rozbor

Mikrostruktura kvalitativně zkoumaných svarů je vyhodnocována na naleptaných výbrusech vzorků (viz obr. 5.4), použitím optických mikroskopů při zvětšení 30× až 2000×. Již po vyleštění lze těmito mikroskopy na výbrusu metalografického vzorku pozorovat celou řadu užitečných vlastností, například o charakteru a způsobu rozložení nekovových vměstků v oceli, o způsobu vyloučení grafitu v litinách, nebo eventuální necelistvosti materiálu. Vlastní mikrostruktura materiálu je ale obvykle viditelná až po naleptání výbrusu svaru. Vhodnost použití leptacího činidla je dána účelem pozorování i zkoumaným materiálem. Pro nelegované i nízkolegované oceli a litiny bývá jako leptadlo použito Nital (1 až 4% roztok kyseliny dusičné v etylalkoholu), u vysokolegovaných Cr a CrNi ocelí se potom používají speciální leptadla. Výstupem zkoušky je znalost vzhledu mikrostruktury a rozložení základních strukturních fází (ferit, cementit, austenit, martenzit) či strukturních složek (perlit, bainit) [63, 68].

Plošný podíl strukturních fází (složek) je určován bodovou metodou. Při ní se využívají transparentní fólie s vyrytou mřížkou položenou na matnici světelného mikroskopu, nebo statistické integrátoři [68].

Obsah nekovových vměstků v ocelích je důležitým faktorem při posuzování typu, rozložení a velikosti jednotlivých vměstků. Tzv. „vměstkovitost“ je zjištěna porovnáním zorného pole mikroskopu s etalony náležitých norem (např. ČSN 420471, DIN 50602). [68]

Stanovení velikosti zrna se u svarových spojů provádí za účelem zjištění míry zhrubnutí pásem tepelně ovlivněné oblasti i svarového kovu. Velikost je zjištěna srovnáváním s etalony příslušných norem. U kalených a zušlechťených struktur mohou být k vyznačení hranic zrn používány oxidační postupy [68].



Obr. 5.4 Příklad mikrostruktury svaru a jeho okolí [63].

6 PRAKTICKÁ ČÁST

Náplní praktické části diplomové práce je uvedení experimentu, specifikace pro něj důležitých parametrů, samotné provedení experimentu a jeho následné vyhodnocení, zakončené závěrem.

Technologií laserového svařování byly z připravené sady 60 rozměrově stejných dílců plechů (délka i šířka 150 milimetrů, tloušťka 1,5 milimetru) vyhotoveny na dvou laserech, za podmínek definovaných v kapitolách 6.3 a 6.4 svařence, v celkovém počtu 30 kusů. Takto získané svary se tedy liší použitým strojem, ale i materiálem svařence, druhem a přívodem ochranné atmosféry svařovacího plynu. Následně byla testována kvalita jednotlivých spojů. Z vybraných svarů se odebraly vzorky pro zkoušky tahovou, tvrdostí, makro a mikro struktury. Byla také pomocí Šlírové zobrazovací metody provedena analýza proudění svařovacích plynů.

6.1 Charakteristika materiálů

Pro účely experimentu byly zvoleny vzorky vyrobené z materiálů 1.4301/1.4307, dále jen 1.4301 (ekvivalent dle ČSN 17 240) a 1.4404 (ekvivalent dle ČSN 17 349). Mechanické a chemické vlastnosti těchto ocelí, garantované výrobcem Yieh Corp. jsou uvedeny v tabulce 6.1, resp. 6.2.

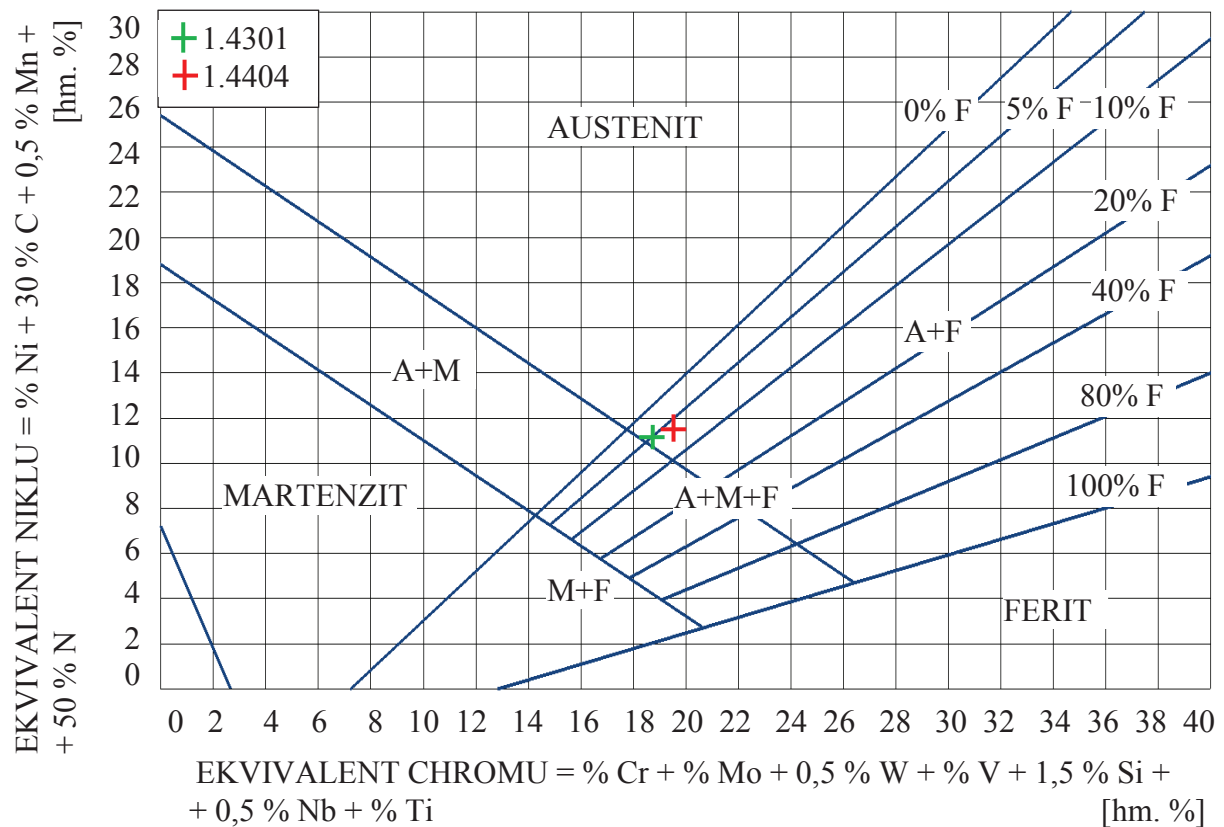
Tabulka 6.1 Mechanické vlastnosti vybraných materiálů [33, 40].

Materiál	Mez kluzu $R_{p0,2}$ (MPa)	Mez pevnosti R_m (Mpa)	Tažnost A_5 (obj.%)	Tvrdost HV (-)
1.4301	304	657	47	171
1.4404	276	596	54	151

Tabulka 6.2 Chemické vlastnosti vybraných materiálů [33, 40].

Materiál	C (hm.%)	Si (hm.%)	Mn (hm.%)	P (hm.%)	S (hm.%)	Ni (hm.%)	Cr (hm.%)	N (hm.%)	Mo (hm.%)
1.4301	0,020	0,41	1,31	0,039	0,003	8,02	18,16	0,035	0,10
1.4404	0,012	0,59	0,83	0,034	0,001	10,10	16,67	0,012	2,04

Upravený Schaefflerův diagram vyjadřuje závislost ekvivalentu niklu na ekvivalentu chromu dané vyskolegované oceli. Lze z něj vyčíst strukturní stavy v oceli, které jsou získány v závislosti na jejím chemickém složení po ochlazení z rozpouštěcí teploty (1050 °C) na teplotu 20 °C. Takový diagram je uveden na obrázku 6.1. Pro svařování nežádoucí strukturou je martenzitická, při její predikci pomocí Schaefflerova diagramu je nutné svařovaný předmět předehtřívát na teplotu kolem 150 °C. Tím dochází popouštěním martenzitu k zabránění vzniku jeho vysokouhlíkaté formy, která může být iniciátorem svarových trhlin za studena [68].



Obr. 6.1 Upravený Schaefflerův diagram [68].

6.1.1 Materiál 1.4301

Materiál označovaný dle ČSN EN zkráceně X5CrNi18-10 je chrom niklová korozivzdorná ocel, se strukturou tvořenou převážně austenitem. Materiál je dobře svařitelný bez nutnosti přídavného kovu. Tepelná úprava po svařování není nutná [75]. Nemagnetický, nekalitelný materiál, se sklonem ke zpevňování při tažení za studena, nebo třískovém obrábění nevhodnými reznými podmínkami. Odolnost proti korozi je garantována v prostředí běžného typu (voda, průmyslové a velkoměstské atmosféry, slabé kyseliny, či chloridy). Z toho vyplývá oblast použití například v průmyslu potravinářském, farmaceutickém, chemickém či papírenském [71, 75].

Ekvivalent niklu (U prvků jsou dosazovány jejich hmotnostní procenta v materiálu).

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

$$Ni_E = 8,02 + 30 \cdot 0,020 + 0,5 \cdot 1,31 + 50 \cdot 0,035$$

$$Ni_E = 11,025 \text{ hm. \%}$$

Ekvivalent chromu

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

$$Cr_E = 18,16 + 0,10 + 1,5 \cdot 0,41$$

$$Cr_E = 18,875 \text{ hm. \%}$$

Z Schaefflerova diagramu pro daný materiál vyplývá výsledná struktura tvořená austenitem a feritem. Podíl feritu ve svarovém kovou je přibližně 5 hm. %. Kvalitních svarů je tak možno dosáhnout i bez předehřevu.

6.1.2 Materiál 1.4404

Materiál označován dle ČSN EN zkráceně X2CrNiMo17-13-2 je korozivzdorná austenitická ocel. Oproti 1.4301 disponuje zvýšenou odolností vůči působení kyselin, má obdobnou kovatelnost a lepší řeznou obrobiteľnost, než 1.4401. Typické příklady jejího využití jsou v chemickém průmyslu výroba tlakových nádob, rozvodů potrubí nebo vybavení pro produkci a uskladnění kyselin [75].

Ekvivalent niklu (U prvků jsou dosazovány jejich hmotnostní procenta v materiálu).

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

$$Ni_E = 10,10 + 30 \cdot 0,012 + 0,5 \cdot 0,83 + 50 \cdot 0,012$$

$$Ni_E = 11,475 \text{ hm. \%}$$

Ekvivalent chromu

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

$$Cr_E = 16,67 + 2,04 + 1,5 \cdot 0,59$$

$$Cr_E = 19,595 \text{ hm. \%}$$

Z Schaefflerova diagramu pro daný materiál vyplývá výsledná struktura tvořená austenitem s příměsí 5-10 % hm. feritu. Jako u materiálu 1.4301 lze predikovat možnost dosažení kvalitního svaru bez trhlin za studena.

6.2 Charakteristika ochranných atmosfér

V rámci provedení obou svařovacích pokusů byly jako ochranná atmosféra postupně použity tři typy svařovacích plynů. Jednalo se o argon a dva typy směsi argon-vodík. Tyto poskytují krycí efekt (kap. 4.3) a regulují množství plazmy v okolí svaru (kap. 4.1).

6.2.1 Argon (Ar 4.6)

Argon je nehořlavý, nejedovatý plyn bez chuti, barvy či zápachu, v objemu vzduchu je obsažený v množství 0,934 %. V kapitole 4.1 jsou uvedeny fyzikální a chemické vlastnosti argonu. Může být použit jako ochranný plyn pro všechny postupy, které jsou narušovány již stopovým množstvím reaktivních plynů. V této roli se s ním lze setkat kromě svařování laserem, či plazmou například při svařování MIG (pro hliník, měď nebo nikl a jejich slitin), nebo WIG (TIG) (pro všechny svařitelné kovy), navíc plní roli plazmového plynu [42].



čistota Ar $\geq 99,996$ obj. %

příměsí H₂O $\leq 10 \text{ ml} \cdot \text{m}^{-3}$

O₂ $\leq 5 \text{ ml} \cdot \text{m}^{-3}$

CO₂ $\leq 1 \text{ ml} \cdot \text{m}^{-3}$

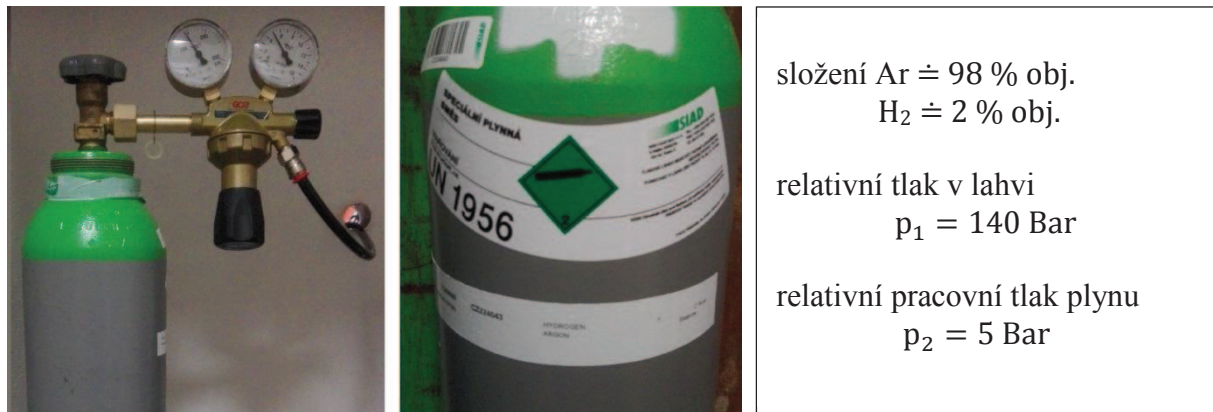
relativní tlak v lahvi $p_1 = 25 \text{ Bar}$

relativní pracovní tlak plynu
 $p_2 = 5 \text{ Bar}$

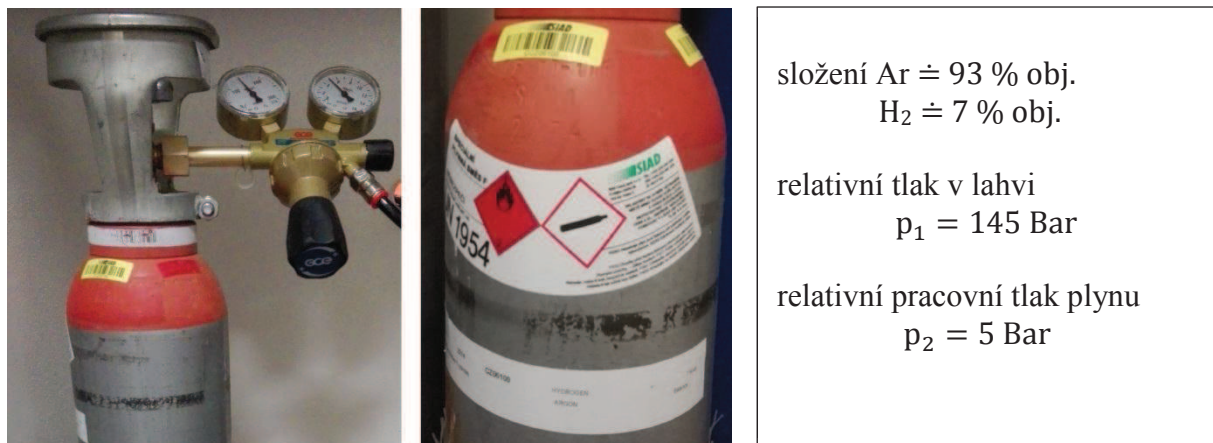
Obr. 6.2 V experimentu použitá tlaková láhev s argonem.

6.2.2 Argon-vodík (98 Ar + 2 H₂, 93 Ar + 7 H₂ (obj. %))

Směsi plynů Ar-H₂ jsou primárně určeny pro svařování CrNiMo ocelí (dobrá rozpustnost vodíku v austenitu) nebo niklových materiálů plazmou, či technologii WIG (TIG). S růstem koncentrace vodíku v plynové směsi se u svařování WIG (TIG) zvyšuje energie přenášená elektrickým obloukem, závar a rychlost svařování mohou růst. Nicméně bývají používány i při svařování laserem. Jejich unikátní vlastností je podobně jako u čistého argonu schopnost chránit kořen svaru během samotného svařování. Rozdíl oproti čistému argonu by měl být v lepším vzhledu výsledného svaru [72].



Obr. 6.3 V experimentu použitá tlaková láhev směsi argon-vodík.

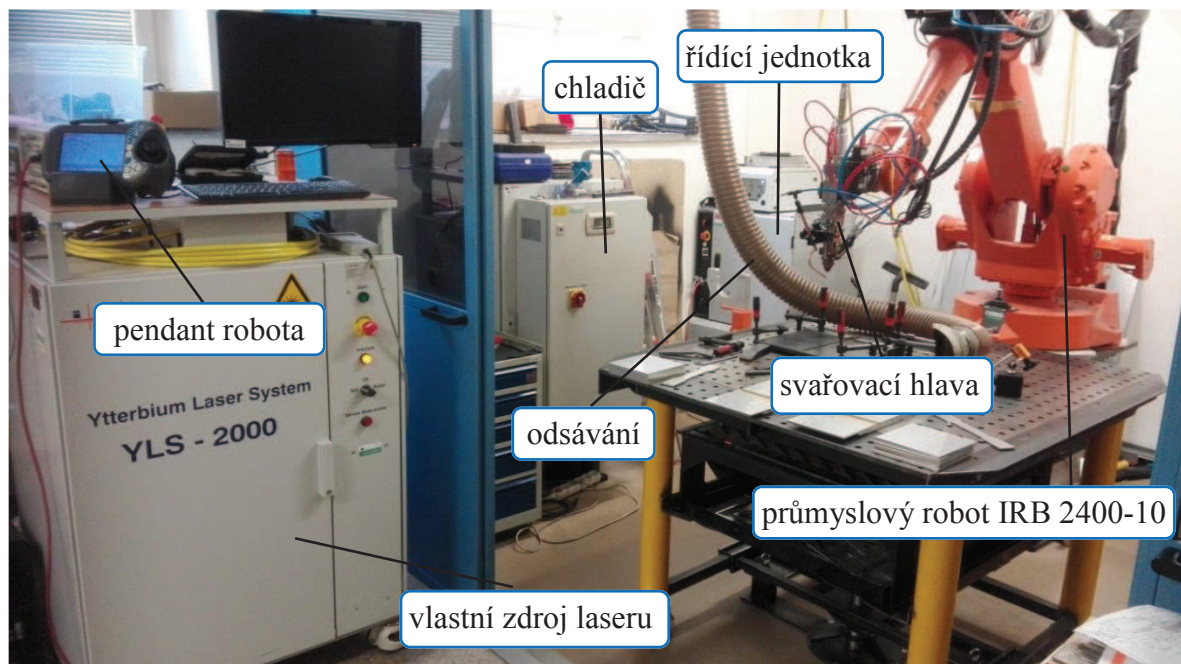


Obr. 6.4 V experimentu použitá druhá tlaková láhev směsi argon-vodík.

6.3 Experiment I

Vzorky dodané firmou ACO Industries byly vyřezány z tabulí plechů korozivzdorných ocelí (1.4301 a 1.4404) na rozměry 150×150 milimetrů, jejich tloušťka odpovídá síle tabulí uvedených výrobcem v atestech materiálů (přílohy 4 a 5), tj. 1,5 milimetru.

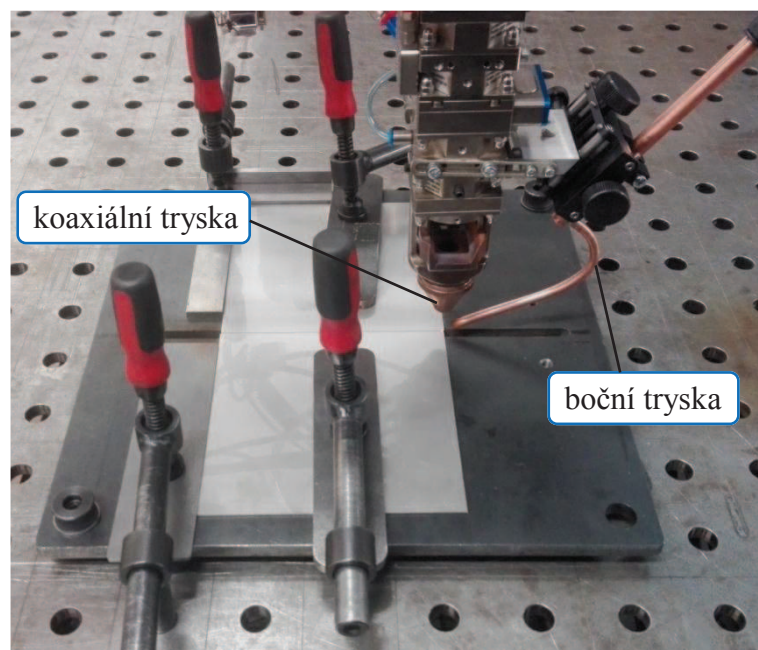
Experiment byl realizován na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky. Technologii laserového svařování ocelových plechů na tupo bylo pomocí vláknového ytterbiového laseru (viz obr. 6.5) na průmyslovém robotu IRB 2400-10 (obr. 6.5), osazeném svařovací hlavou (obr. 6.6) vyhotoveno ze 36 plechových dílců 18 svarků (tab. 6.3).



Obr. 6.5 Zařízení pracoviště laseru.

6.3.1 Ustavení svařovaných dílců

Pomocí upínek a kovových šablon došlo k vytvoření dorazů, sloužících pro přesné ustavení svařovaných dílců vůči pracovní desce stolu, s možností opakovatelnosti. Vždy dva plechové díly byly těsně sesazeny k sobě. Během svařování dochází k ohřevu materiálu v místě spoje, jeho následné chladnutí je doprovázeno zmenšováním objemu svarového kovu, což má za následek rozevírání mezery mezi sesazenými součástmi ve směru svařování. Tomuto jevu se zabránilo pevným uchycením dílců k pracovní desce stolu použitými upínkami a kovovými podložkami. Detail pracoviště, připraveného ke svařování je zachycen na obrázku 6.6.



Obr. 6.6 Ustavení dílců před vlastním svařováním.

Pro účel experimentu byla z měděné trubičky o vnitřním průměru 4 milimetry vyrobena tryska pro boční přívod ochranné atmosféry. Umístěním trysky na křížový posuv se dosáhlo jejího precizního napolohování vůči svaru pod úhlem 30 ° (viz obrázek 6.6).

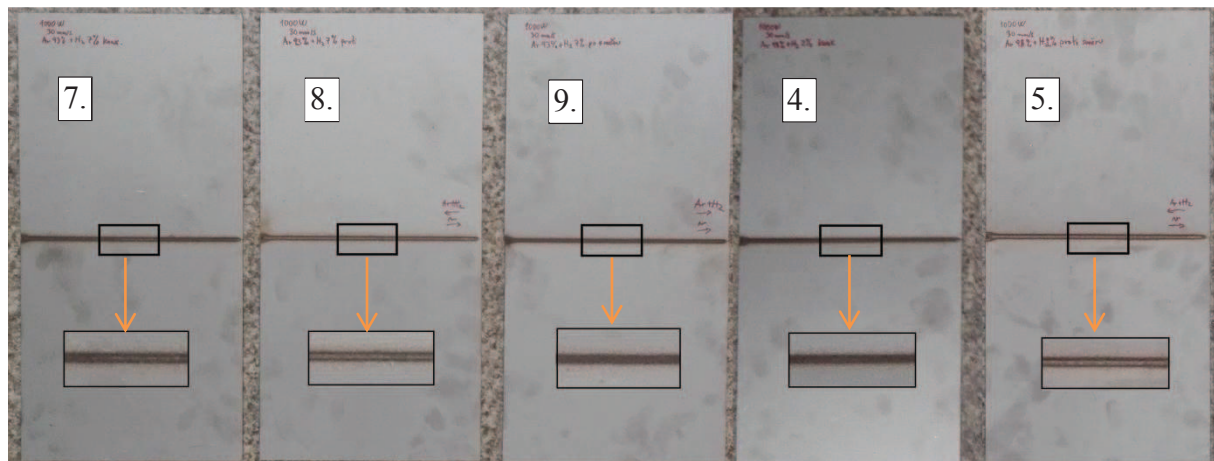
6.3.2 Vlastní proces svařování

Experiment byl proveden v penetračním svařovacím režimu, kontinuálním laserovým paprskem, s ohniskem fokusovaným 1 milimetr pod horní plochu svařovaných plechů na průměr 0,4 milimetru. Svařovací rychlost byla nastavena na hodnotu 30 milimetrů za sekundu, při výkonu laserového zdroje 1 kilowatt. Objemový průtok tryskou přiváděné ochranné atmosféry činil 18 litrů za minutu. Při spuštění přívodu svařovacího plynu je nutné počítat s prodlevou, během které je teprve reálně ochranný plyn dopraven do místa budoucího svarového spoje. Z důvodu stálé ochrany svaru během procesu svařování tak byl přívod plynu tryskou nastaven vždy s předstihem 0,5 sekundy před začátkem vlastního svařování a ukončen 0,5 vteřiny po něm. Proměnné parametry, charakterizující vznik jednotlivých spojů jsou uvedeny v tabulce 6.3.

Tabulka 6.3 Vybrané podmínky svařování.

Svar číslo	Spojované materiály	Ochranný plyn (≐obj.%)	Přívod ochranného plynu tryskou
1	1.4301 - 1.4301	100 Ar	koaxiální
2	1.4301 - 1.4301	100 Ar	boční, proti směru svařování
3	1.4301 - 1.4301	100 Ar	boční, ve směru svařování
4	1.4301 - 1.4301	98 Ar + 2 H ₂	koaxiální
5	1.4301 - 1.4301	98 Ar + 2 H ₂	boční, proti směru svařování
6	1.4301 - 1.4301	98 Ar + 2 H ₂	boční, ve směru svařování
7	1.4301 - 1.4301	93 Ar + 7 H ₂	koaxiální
8	1.4301 - 1.4301	93 Ar + 7 H ₂	boční, proti směru svařování
9	1.4301 - 1.4301	93 Ar + 7 H ₂	boční, ve směru svařování
10	1.4404 - 1.4404	100 Ar	koaxiální
11	1.4404 - 1.4404	100 Ar	boční, proti směru svařování
12	1.4404 - 1.4404	100 Ar	boční, ve směru svařování
13	1.4404 - 1.4404	98 Ar + 2 H ₂	koaxiální
14	1.4404 - 1.4404	98 Ar + 2 H ₂	boční, proti směru svařování
15	1.4404 - 1.4404	98 Ar + 2 H ₂	boční, ve směru svařování
16	1.4404 - 1.4404	93 Ar + 7 H ₂	koaxiální
17	1.4404 - 1.4404	93 Ar + 7 H ₂	boční, proti směru svařování
18	1.4404 - 1.4404	93 Ar + 7 H ₂	boční, ve směru svařování

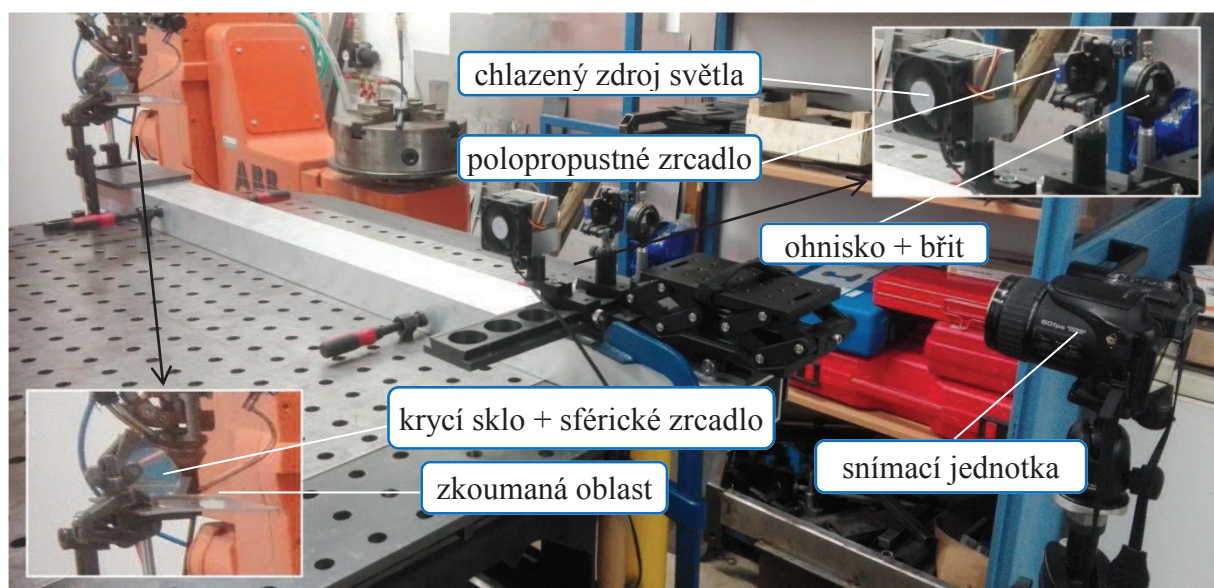
Svařování všech vzorků proběhlo úspěšně, s na první pohled totožnou jakostí svaru. Po lehkém očištění svarových ploch a detailnějším porovnáním vzhledu jednotlivých spojů je patrné, že svary vyrobené za přívodu ochranného plynu proti směru svařování se od ostatních liší. Povrchy těchto spojů jsou ve své střední části kovově lesklé (viz obr. 6.7), což značí efektivnější odvod odpařovaných částic základního materiálu z místa svaru. Příznivý vliv obsahu vodíku na „pohlednost“ povrchu svaru se za daných podmínek svařování nepotvrdil.



Obr. 6.7 Pohled na lící stranu svařů vybraných vzorků.

6.3.3 Šlírová zobrazovací metoda

K analýze proudění plynů ochranné atmosféry a jevů, k nimž během procesu svařování laserem dochází, se na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky využilo Šlírové zobrazovací metody (viz kapitola 4.5). Její nastavení je znázorněno na obrázku 6.8.



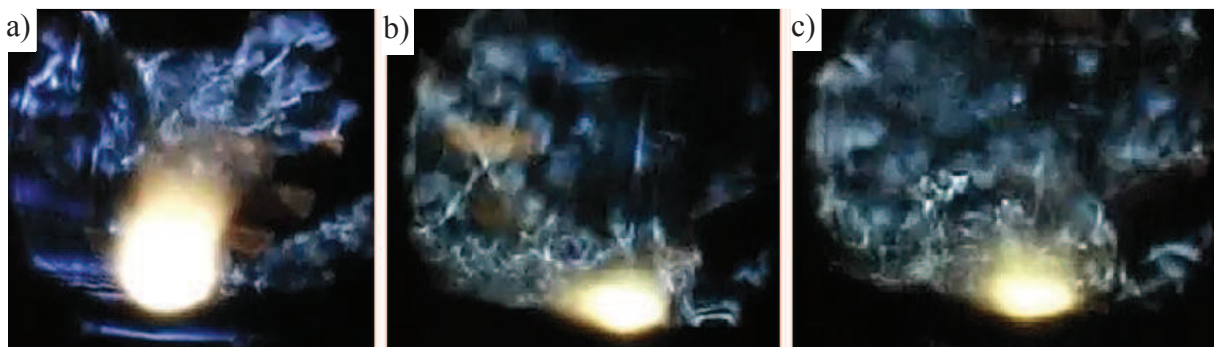
Obr. 6.8 Sestava pro měření Šlírovou zobrazovací metodou.

Chování ochranné atmosféry argonu (Ar 4,6) se zkoumalo bez svařování i během svařovacího procesu, pro přívody plynu koaxiální tryskou, boční tryskou proti a ve směru pohybu svařovací hlavy. Objemový průtok plynu činil 18 litrů za minutu, zdroj kontinuálního laserového paprsku pracoval s výkonem 1000 wattů a rychlost pohybu svařovací hlavy byla nastavena na 30 milimetrů za sekundu. Snímací jednotkou CASIO EX-F1 byly pořizeny video záznamy jednotlivých měření s frekvencí zápisu 600 snímků za sekundu. Z těchto se vybraly fotografie, uvedené obrázky 6,9 a 6.10.



*Přívod tryskou: a) koaxiální, b) boční, ve směru pohybu, c) boční, proti směru pohybu.
Obr. 6.9 Proudění argonu.*

Z pořizovaných záznamů na obrázku 6.9 lze vidět argon, rozptýlený do okolí místa přívodu (obr. 6.9a) nebo plyn „plíživého charakteru“, zdržující se těsně nad pracovní plochou (obr. 6.9b,c). Je tedy patrné, že přívod plynů ochranné atmosféry z boku je oproti koaxiálnímu provedení z pohledu krycího účinku efektivnější.

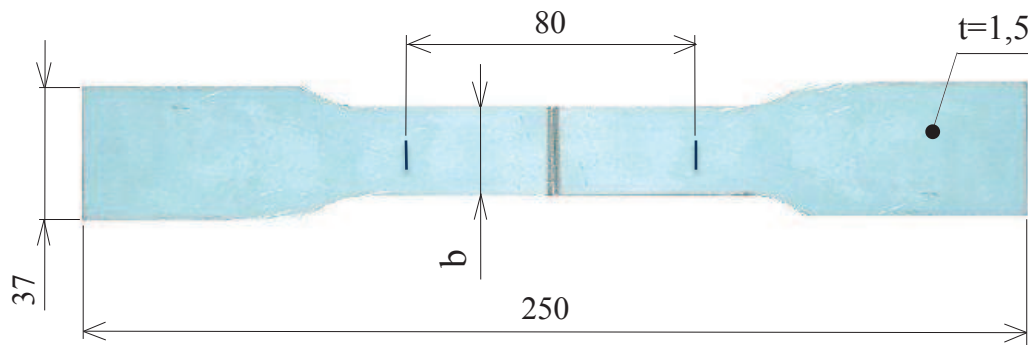


*Přívod tryskou: a) koaxiální, b) boční, ve směru svařování, c) boční, proti směru svařování
Obr. 6.10 Proudění plynů v ochranné atmosféře argonu během svařování.*

Vlastností Šlírové zobrazovací metody je obtížná vzájemná rozeznatelnost jednotlivých plynů, nebo jejich směsí (argon, vzduch, aj.), nicméně z fotografií na obrázku lze učinit závěry. Nejhůře se jeví možnost přívodu boční tryskou ve směru svařování (obr. 6.10b), kde je dobře kryta ještě nesvařovaná oblast materiálu, na úkor právě spojované části. Z hlediska kvality je pro svařování nejvhodnější použití přívodu ochranné atmosféry boční tryskou, proti směru pohybu svařovací hlavy (obr. 6.10c). Tento způsob krytí má podobně jako koaxiální přívod (obr. 6.10a) charakter turbulentního proudění, ale během samotného svařovacího procesu obklopuje vznikající spoj těsněji.

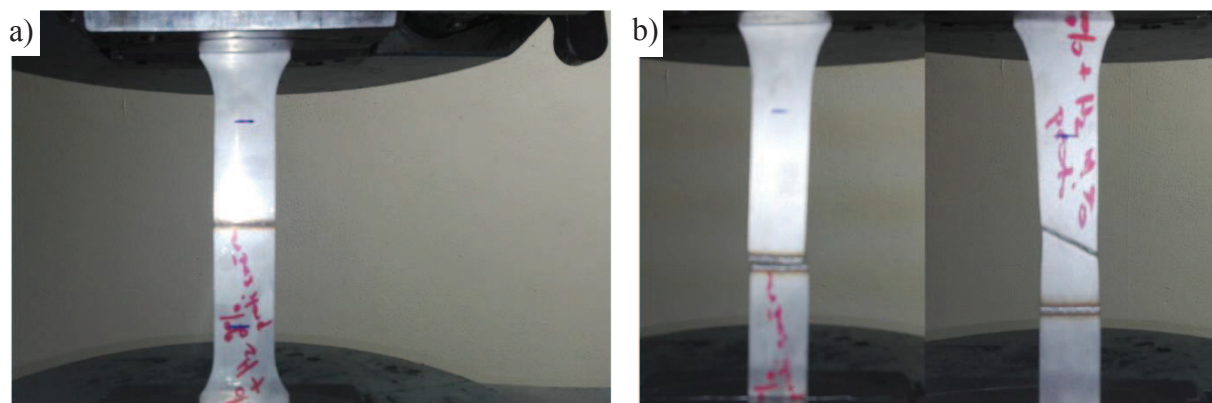
6.3.4 Příčná tahová zkouška

Příprava vzorků pro příčnou tahovou zkoušku, které je věnována kapitola 5.2.2.1 proběhla na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky. Laserem bylo k testování vyřezáno 24 vzorků tak, že se z každého vybraného svařence (všechny přívod ochranné atmosféry boční tryskou proti směru pohybu svařovací hlavy) vyrobily vždy 3 zkušební vzorky. Geometrie použitých zkušebních těles je dána obrázkem 6.11 a tabulkami 6.4, 6.5.



Obr. 6.11 Geometrie použitých zkušebních těles.

Zkouška byla provedena za pokojové teploty na hydraulickém zkušebním stroji ZD40. Rychlost zatěžování byla obsluhou stanovena na hodnotu 10^6 pascalů za sekundu. Naměřená data byla zaznamenána a zpracována na počítači programem M-TEST. Technické údaje zařízení jsou uvedeny v příloze 6. Na začátku každé zkoušky působila nárazově zvětšená tahová síla, a to z důvodu zaseknutí se čelistí zkušebního stroje do upínaných konců zkoušeného materiálu. Tímto došlo k nežádoucímu tvaru tahového diagramu v oblasti jeho počátku. Tyto části tedy byly odstraněny a nahrazeny lineárními závislostmi tahové síly na prodloužení jednotlivých vzorků (viz obr. 6.13 a 6.14).



a) během zkoušení, b) po zkoušce

Obr. 6.12 Upnutí zkušebních těles pomocí kleští trhacího stroje.

6.3.4.1 Materiál vzorků 1.4301

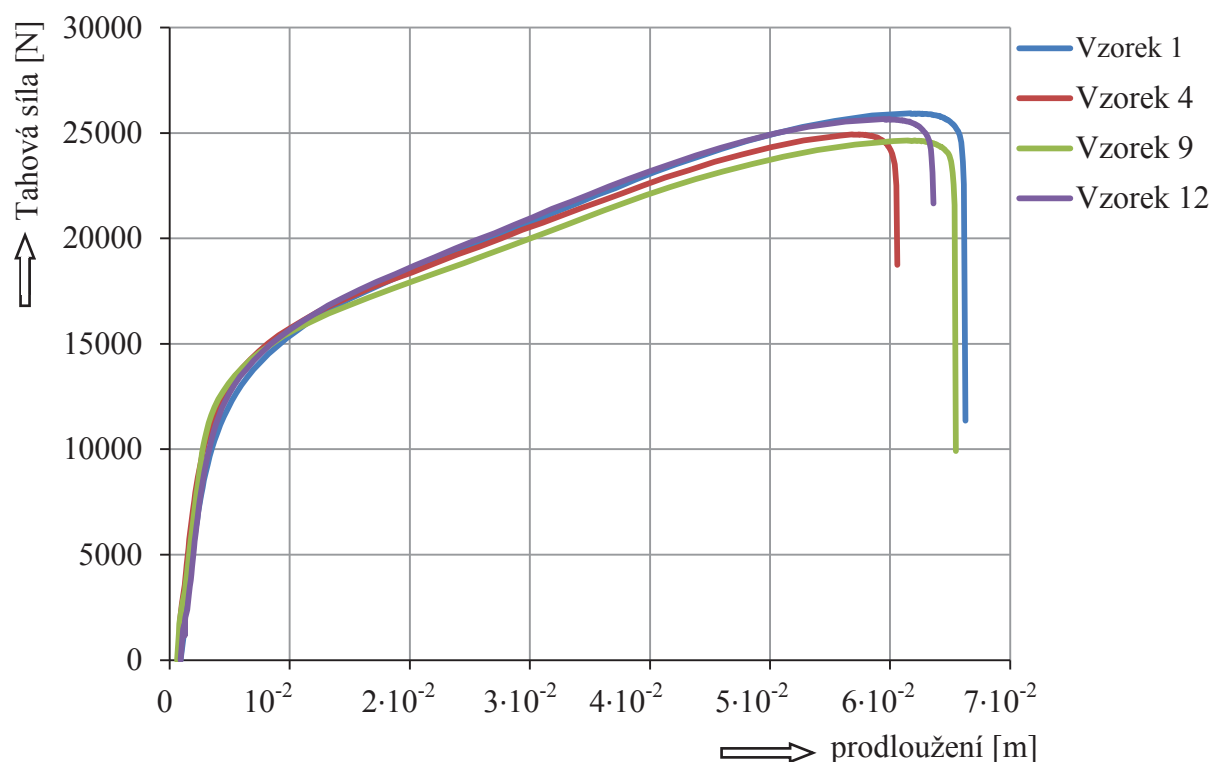
Tabulka 6.4 Naměřené hodnoty vzorků materiálu X5CrNi18-10.

Charakteristika vzorů	Vzorek číslo	b (mm)	S_0 (mm ²)	F_m (N)	$R_{p0,2}$ (MPa)	R_m (MPa)	A_5 (%)
Základní materiál	1	25,0	37,5	25928	287,89	691,40	47,50
	2	25,0	37,5	25655	275,36	684,14	45,00
	3	25,0	37,5	25608	286,14	682,88	46,25
Ar	4	25,0	37,5	24931	280,87	664,82	44,38
	5	24,9	37,4	24545	284,78	657,17	43,75
	6	24,9	37,4	24404	318,77	653,40	45,00

Charakteristika vzorů	Vzorek číslo	b (mm)	S ₀ (mm ²)	F _m (N)	R _{p0,2} (MPa)	R _m (MPa)	A ₅ (%)
98 Ar + 2 H ₂	7	24,8	37,20	24329	309,69	654,00	47,50
	8	24,9	37,35	24404	306,68	653,40	47,50
	9	24,9	37,35	24649	307,68	659,94	47,50
93 Ar + 7 H ₂	10	24,9	37,35	24564	310,46	657,67	43,75
	11	25,0	37,50	24075	307,96	642,01	41,25
	12	25,0	37,50	25655	284,38	684,14	41,88

b...šířka zkušební vzorku měřené oblasti, *S*₀...výchozí průřez zkušební tělesa, *F*_m...tahová síla, *R*_{p0,2}...smluvní mez kluzu, *R*_m...smluvní mez pevnosti, *A*₅...tažnost

Tloušťka plechu všech tabulkou uvedených zkušebních těles „a“ byla shodně 1,5 milimetru.



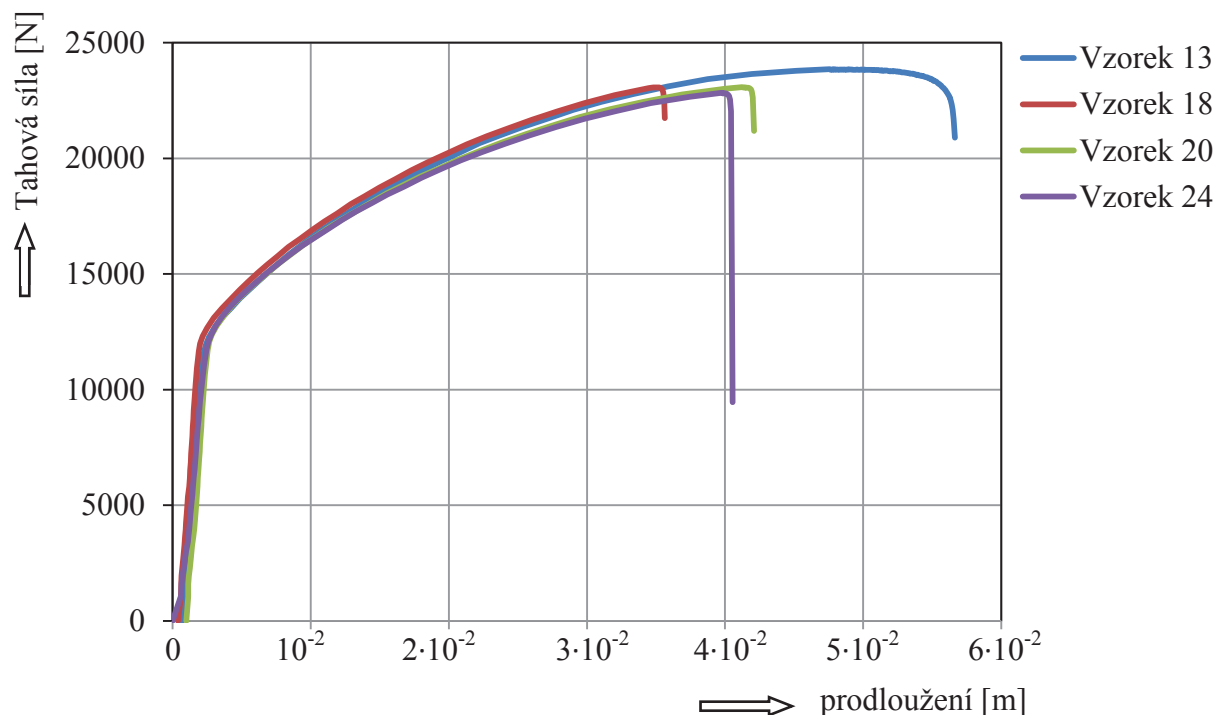
Obr. 6.13 Tahové diagramy vzorků vyrobených z materiálu 1.4301.

K porušení soudržnosti materiálu všech dvanácti zkušebních těles došlo po překročení smluvní meze kluzu mimo spoj. U svařených vzorků to vypovídá o vysoké kvalitě svaru. Naměřené hodnoty jsou pak vlastnostmi základního materiálu.

6.3.4.2 Materiál vzorků 1.4404

Tabulka 6.5 Naměřené hodnoty vzorků materiálu X2CrNiMo17-13-2.

Charakteristika vzorů	Vzorek číslo	b (mm)	S _o (mm ²)	F _m (N)	R _{p0,2} (MPa)	R _m (MPa)	A ₅ (%)
Základní materiál	13	25,0	37,5	23859	327,78	636,23	46,25
	14	25,0	37,5	23802	324,26	634,73	46,25
	15	25,0	37,5	23774	325,01	633,97	45,00
Ar	16	24,8	37,2	22806	332,69	613,05	25,00
	17	24,7	37,1	22730	331,50	613,51	25,00
	18	24,8	37,2	23069	335,47	620,13	24,38
98 Ar + 2 H ₂	19	24,8	37,2	22580	335,98	606,99	26,25
	20	24,9	37,4	23078	334,13	617,90	31,88
	21	24,6	36,9	22796	315,26	617,78	30,00
93 Ar + 7 H ₂	22	24,6	36,9	22505	333,35	609,89	28,13
	23	24,6	36,9	22194	330,05	601,47	27,50
	24	24,8	37,2	22824	333,19	613,56	30,00



Obr. 6.14 Tahové diagramy vzorků vyrobených z materiálu 1.4404.

Porušení soudržnosti všech devíti svařovaných vzorků nastalo v místě spoje, ovšem vzhledem k tomu, že u nich naměřené hodnoty smluvních mezí pevnosti byly řádově jen o tři procenta nižší oproti vzorkům nesvařeným, lze tyto svarové spoje pokládat za kvalitativní. U svařovaných zkušebních těles byl dále pozorován oproti vzorkům nesvařeným pokles tažnosti, v průměru o čtyřicet procent. Naměřené hodnoty jsou vlastnostmi svarového kovu. Vliv obsahu vodíku v ochranné atmosféře na mechanické vlastnosti svaru nebyl prokázán.

6.3.5 Analýza makrostruktury a mikrostruktury

Příprava vzorků a následné metalografické šetření struktur materiálů bylo provedeno na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky. Na stejných zkušebních vzorcích byly poté měřeny hodnoty tvrdosti podle Vickerse.

6.3.5.1 Příprava zkušebních vzorků

Nejprve došlo k vystřížení polotovarů pro přípravu zkušebních vzorků, a to hydraulickými nůžkami ze svarků, označených v tabulce 6.3 čísly 2,5,8,11,14 a 17. Jednotlivá pracoviště přípravy lze vidět na obrázku 6.15.



a) metalografická pila MTH MIKRON 110, b) lis Streuers CitoPress-1, c) metalografická leštička Struers Tegramin-20

Obr. 6.15 Použité přístrojové vybavení přípravy.

Těchto 6 polotovarů bylo postupně upnuto do svěráku metalografické pily (MTH MIKRON 110) a zkráceno. Zářezem do základního materiálu se označily vzorky vyrobené z korozivzdorné oceli ČSN EN 1.4404. Poté byly z důvodu lepší manipulace vzorky za tepla zalisovány do bakelitové pryskyřice (Multifast) na stroji Streuers CitoPress-1. Následně se vzorky za stálého chlazení vodou opakovaně brousily a leštily na stroji Struers Tegramin-20, a to hlavně z důvodu odstranění tepelně ovlivněné vrstvy vzniklé po dělení materiálu.

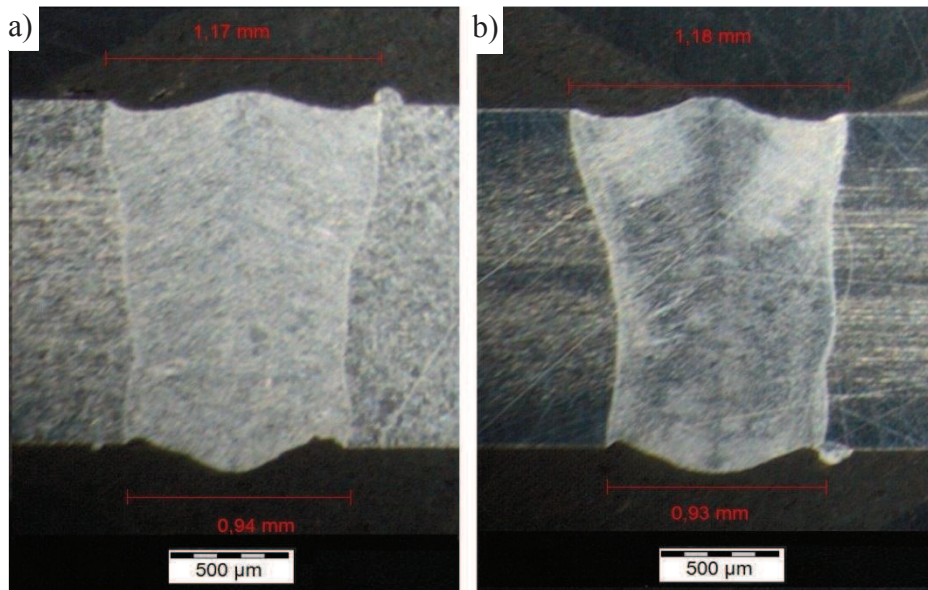


Obr. 6.16 Připravené vzorky pro metalografické a tvrdostní šetření.

Poté následovalo vyvolání struktury chemickým leptáním povrchů metalografických výbrusů v roztoku fluorovodíku (HF), kyseliny dusičné (HNO₃) a glycerolu (C₃H₈O₃), po dobu 1 minuty 30 sekund. Nakonec se vzorky opláchly ve vodě, vypraly v lihu a horkovzdušnou pistolí osušily, jejich finální podoba je zobrazena na obrázku 6.16.

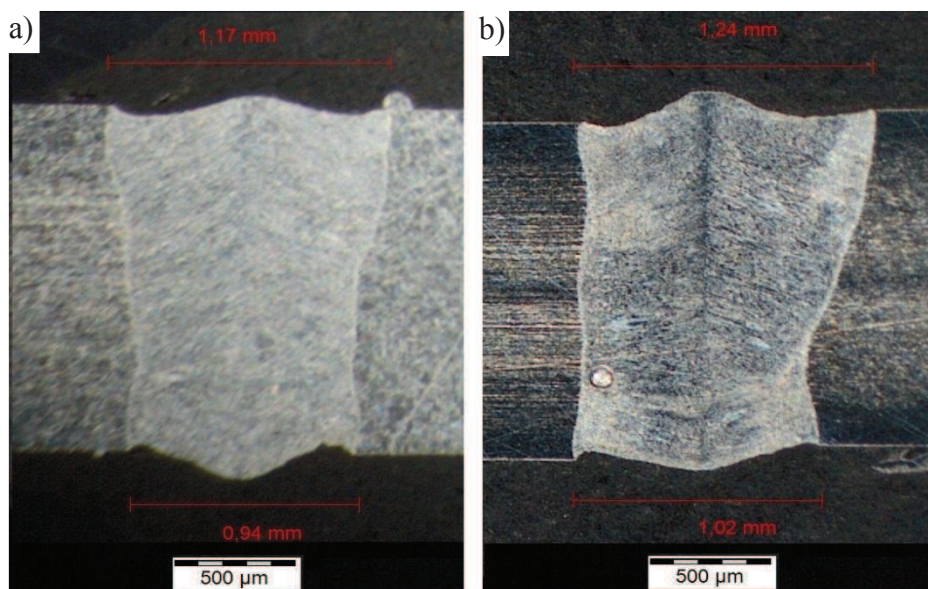
6.3.5.2 Posouzení makrostruktury

Na obrázcích 6.17 (2, 11), 6.18 (5, 17) a 6.19 (8, 14) jsou zachyceny snímky makrostruktury vzorků vybraných svarů, jejichž charakteristické podmínky vzniku se uvádí pod jednotlivými čísly v tabulce 6.3. Vybrané společné parametry: penetrační režim svařování, výkon svařování 1 kilowatt, rychlost svařování 30 milimetrů za sekundu, přívod ochranného plynu boční tryskou proti směru svařování, tloušťka svařovaných materiálů 1,5 milimetru.



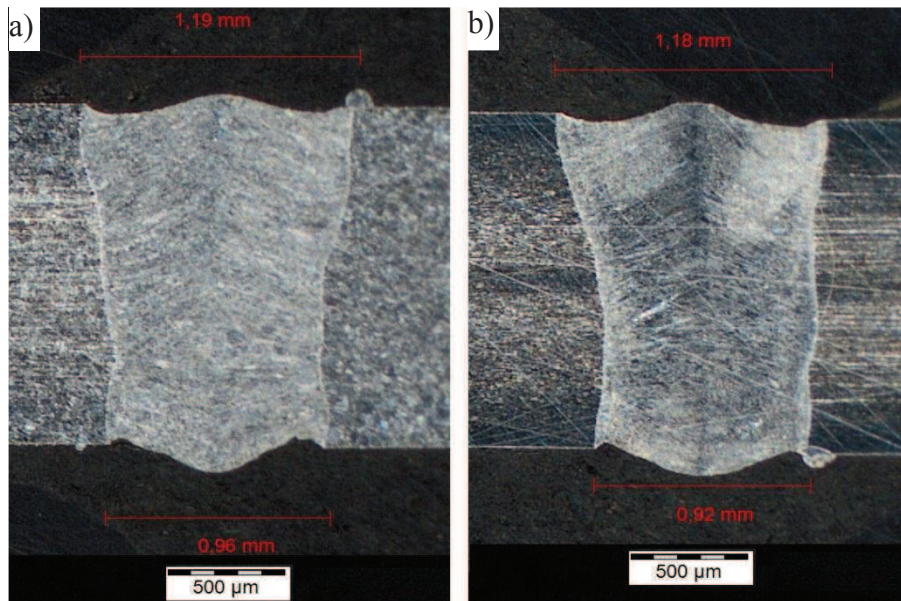
a) materiál 1.4301, b) materiál 1.4404

Obr. 6.17 Makrostruktury metalografických výbrusů svarů, ochranný plyn Ar.



a) materiál 1.4301, b) materiál 1.4404

Obr. 6.18 Makrostruktury metalografických výbrusů svarů, ochranný plyn směs 98 Ar + 2 H₂ (obj. %).



a) materiál 1.4301, b) materiál 1.4404

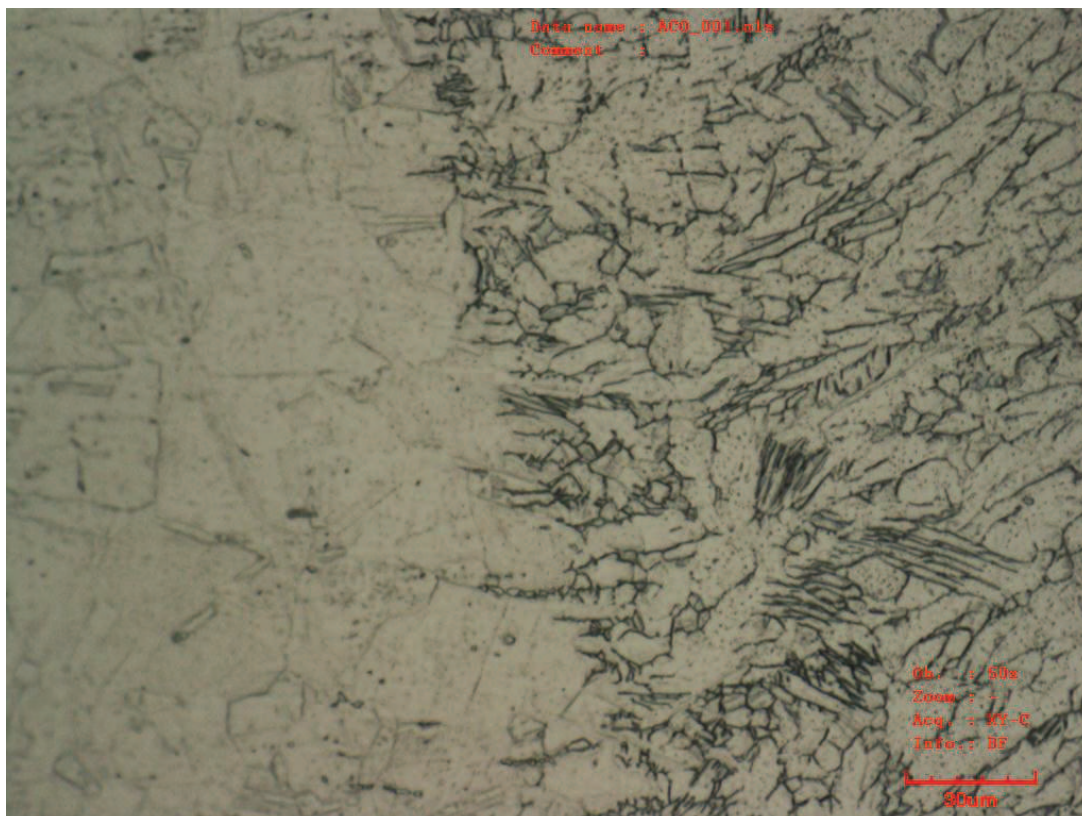
Obr. 6.19 Makrostruktury metalografických výbrusů svarů, ochranný plyn směs 93 Ar + 7 H₂ (obj. %).

Ze snímků je patrná, pro všechny zkoumané vzorky jen velmi malá, úzká tepelně ovlivněná oblast. To je dáno hlavně použitou technologií svařování, kdy laser díky své schopnosti být fokusován do velmi malé plošky vykazuje extrémně vysoký gradient teplot v ní a jejím okolí. V základním materiálu tak existuje jen velmi malý objem tepelně ovlivněného, nenataveného kovu. Dalším faktorem je chemické složení austenitických korozivzdorných ocelí. Každý z použitých materiálů by neměl obsahovat více, než 0,02 hmotnostních procent uhlíku, teplota překrystalizace je tak oproti většině ostatních materiálů vyšší a tím je jejich tepelně ovlivněná zóna menší. U výbrusů materiálu 1.4404 lze uprostřed svarů vidět tenké sloupce nízkotavitelných fází, které byly do této oblasti nahromaděny dendrity během tuhnutí svarové lázně. Při mechanickém namáhání těchto svarů je očekávané místo porušení soudržnosti materiálu právě v této oblasti (viz tahová zkouška kap. 6.3.4.2). Všechny svary jsou v kořeni provařené, nepropadené na své lící straně. Pro materiál 1.4301 jsou typické vynikající tvar a symetričnost svarů. Vliv rostoucího obsahu vodíku v ochranné atmosféře na zvětšování velikosti plochy svaru potvrzuje u materiálu 1.4404 obrázek 6.18b, ale následně vyvrací svar na obrázku 6.19b.

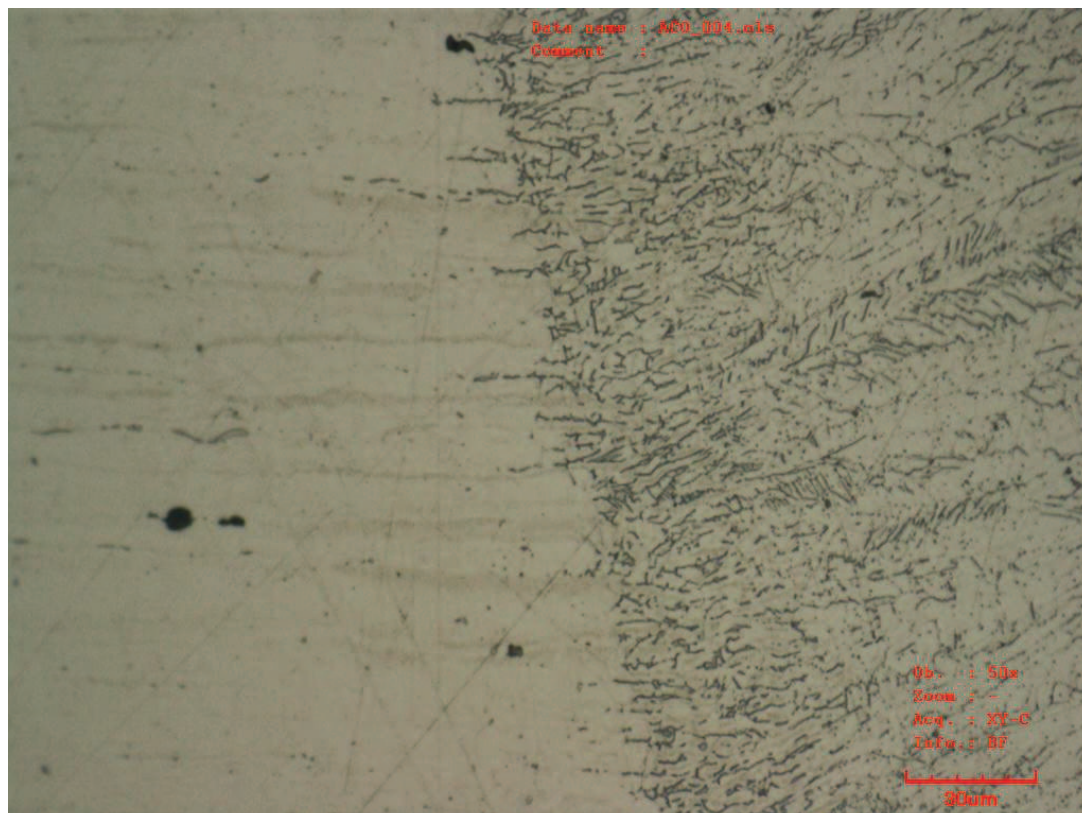
Ve výbrusu na obrázku 6.18b se ve svarovém kovu vyskytuje nejspíše plynová dutina, vzhledem k jejímu tvaru a velikosti se jedná o vadu přípustnou.

6.3.5.3 Rozbor mikrostruktury

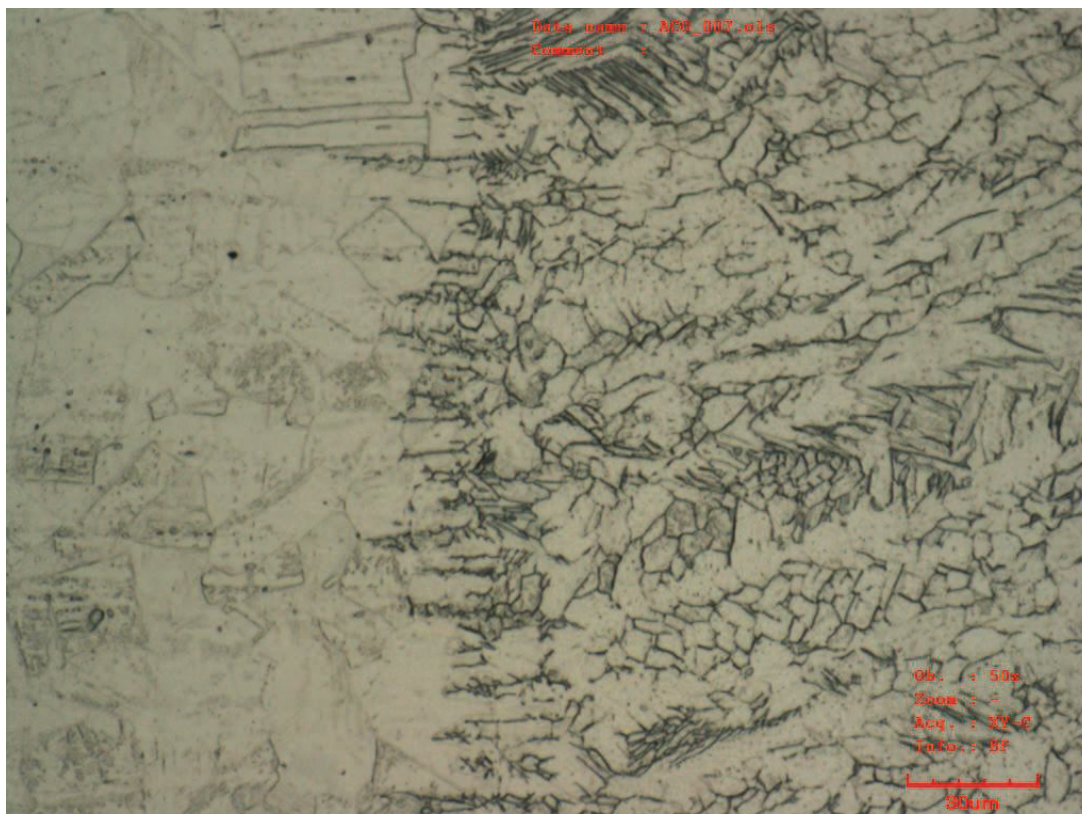
Snímky šetřených mikrostruktur svarových spojů byly pořízeny na konfokálním mikroskopu Olympus LEXT 3100. Protože u austenitických korozivzdorných ocelí tepelně ovlivněná oblast téměř neexistuje (viz kapitola 6.3.5.2), jsou na snímcích 6.20 až 6.23, při publikovaném zvětšení 600× viditelné primárně rozhraní základní materiál-svarový kov.



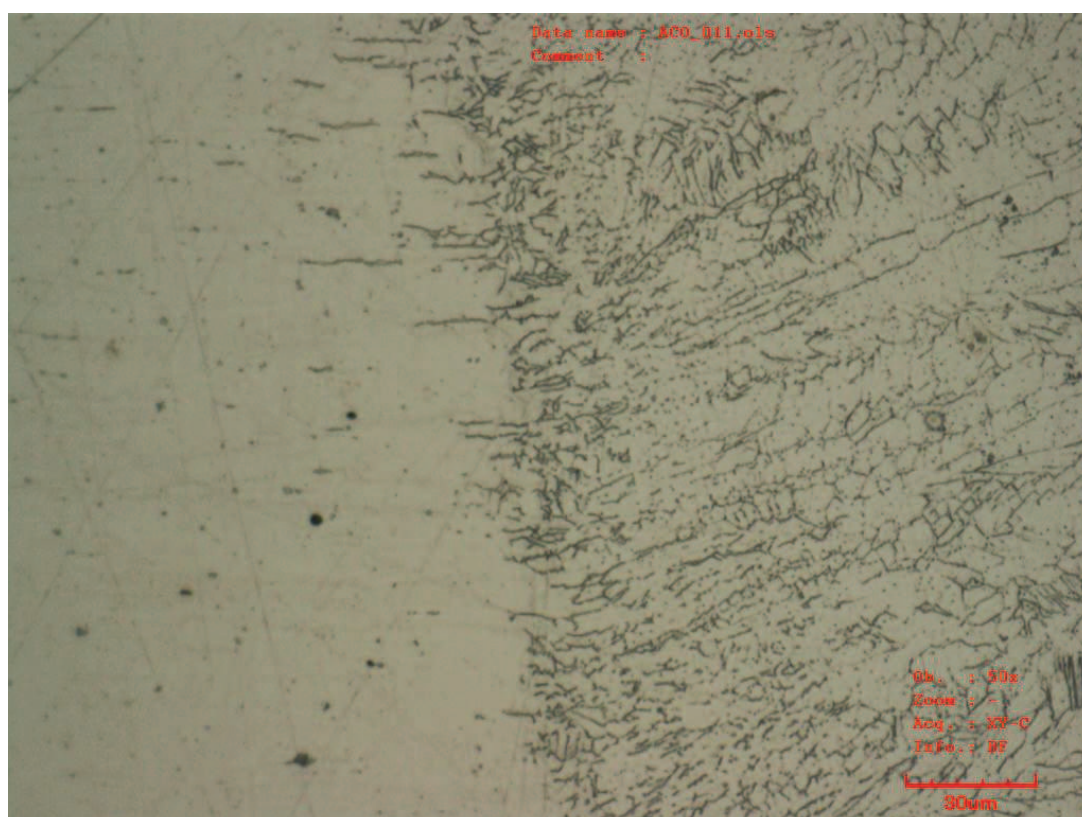
Obrázek 6.20 Mikrostruktura rozhraní, materiál 1.4301, ochranný plyn argon.



Obrázek 6.21 Mikrostruktura rozhraní, materiál 1.4404, ochranný plyn argon.



Obrázek 6.22 Mikrostruktura rozhraní, materiál 1.4301, ochranný plyn směs 93 Ar + 7 H₂ (hm. %).

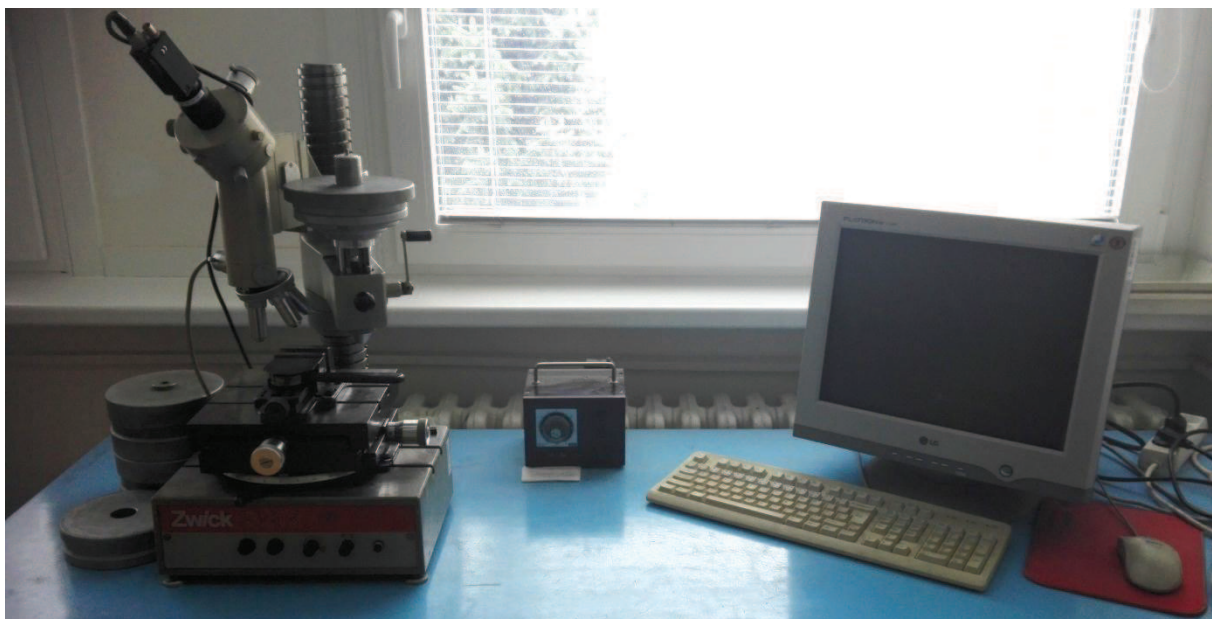


Obrázek 6.23 Mikrostruktura rozhraní, materiál 1.4404, ochranný plyn směs 93 Ar + 7 H₂ (hm. %).

Na pořízených snímcích mikrostruktury je viditelná austenitická struktura svarového kovu i přechodové oblasti s dendritickým uspořádáním. Tmavé plochy viditelné ve struktuře materiálů mohou být intermetalické fáze, karbidy nebo delta ferit, jehož obsah u každého ze svařovaných materiálů by měl být v rozmezí 5-10 hmotnostních procent (viz kapitola 6.1).

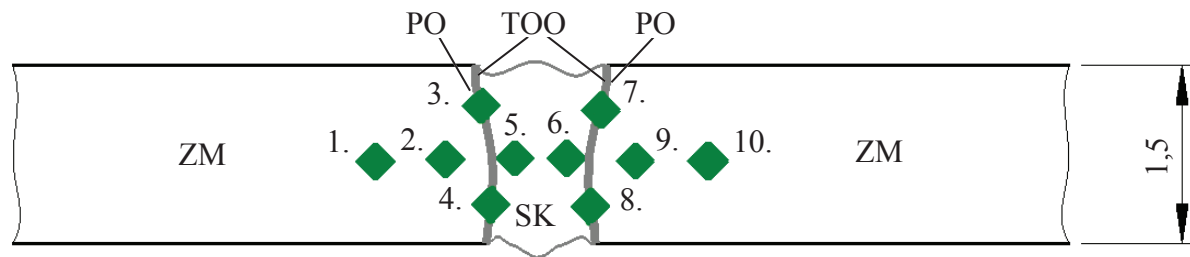
6.3.6 Měření tvrdosti

Na odboru technologie tváření kovů a plastů, Ústavu strojírenské technologie, FSI VUT v Brně se provedly na vzorcích po předchozích metalografických šetřeních zkoušky tvrdosti podle Vickerse. Použitým přístrojem byl tvrdoměr ZWICK 3212, z důvodu snímání obrazu vtisku opatřený CCD kamerou, propojenou se stolním počítačem. Konektivita těchto zařízení a vyhodnocení tvrdosti vzorků na počítači je zajištěna softwarem testXpert. Použitá velikost zatížení byla stanovena na 5 kilogramů, tzn. tvrdosti se měřily při HV 5. Doba působení zatěžovací síly činila 12 sekund.



Obr. 6.24 Pracoviště měření tvrdosti.

Na každém vzorku byly postupně na deseti místech určeny hodnoty tvrdosti HV (tabulka 6.6). Postup dílčích měření na každém ze šesti testovaných vzorků je dán schematicky obrázkem 6.25.



*PO...přechodová oblast, TOO...tepelně ovlivněná oblast, ZM...základní materiál,
SK...svarový kov*

Obr. 6.25 Postup vytváření vtisků tvrdoměrem ZWICK 3212.

Tabulka 6.6 Naměřené hodnoty tvrdostí zkoumaných vzorků.

Ochranná atmosféra (obj.%)	Tvrdost (HV)									
	Umístění vtisku									
	ZM		PO		SK		PO		ZM	
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
Ar	126	128	128	128	130	130	126	128	131	129
98 Ar + 2 H ₂	124	127	126	128	129	129	126	126	129	128
93 Ar + 7 H ₂	121	121	127	127	129	129	129	130	127	127
Ar	116	116	125	125	120	117	120	124	124	122
98 Ar + 2 H ₂	128	128	81*	126	121	121	127	127	130	124
93 Ar + 7 H ₂	125	125	123	123	120	120	123	124	126	123

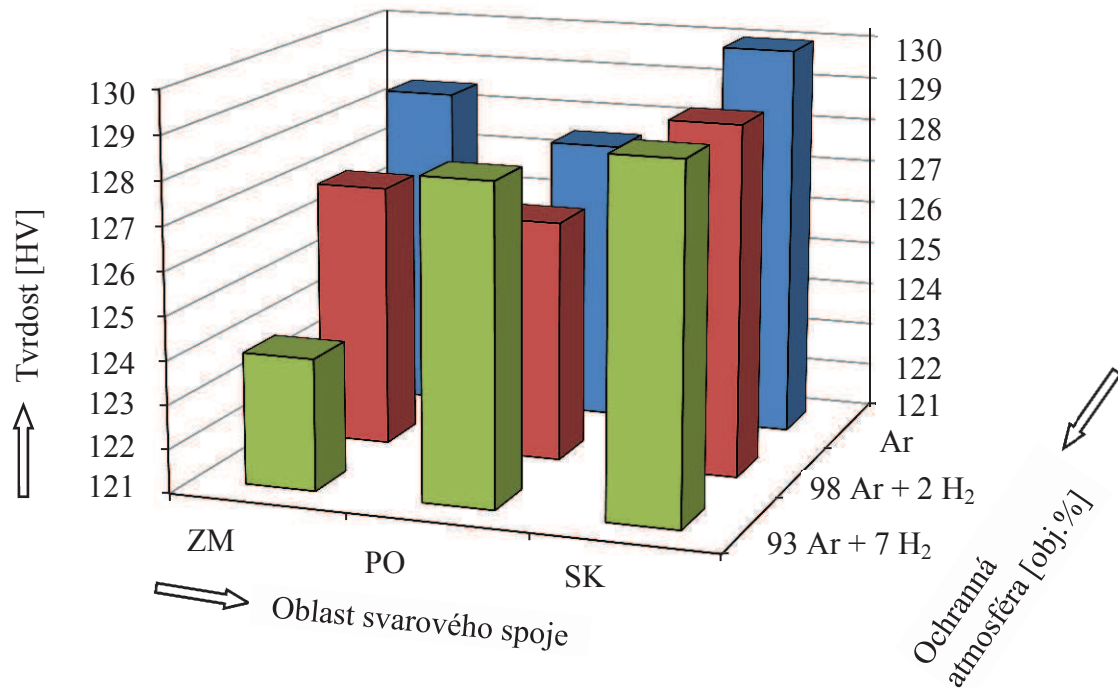
Materiály jednotlivých svarů:

1.4301-1.4301;
 1.4404-1.4404.

Z naměřených hodnot jsou patrné, na rozdíl od jiných druhů ocelí běžně svařovaných laserem jen nízké hodnoty tvrdosti HV. Maximální rozdíl v tvrdosti základního materiálu a svarového kovu u materiálu X5CrNi18-10 (1.4301) dosahuje při použití ochranné atmosféry se sedmi objemovými procenty vodíku hodnoty 8 HV 5, což je diference, jejíž negativní účinek na mechanické vlastnosti (tažnost, křehkost) je zanedbatelný. Nejtvrdší změřená struktura materiálu X2CrNiMo17-13-2 (1.4404) se potom nachází v základním materiálu a je o 9 HV 5 tvrdší, než svarový kov, to je dáno i velmi nízkým obsahem uhlíku (0,012 hm. %) v materiálu, během tuhnutí svarového kovu tak nedošlo k měřitelnému zvýšení jeho tvrdosti.

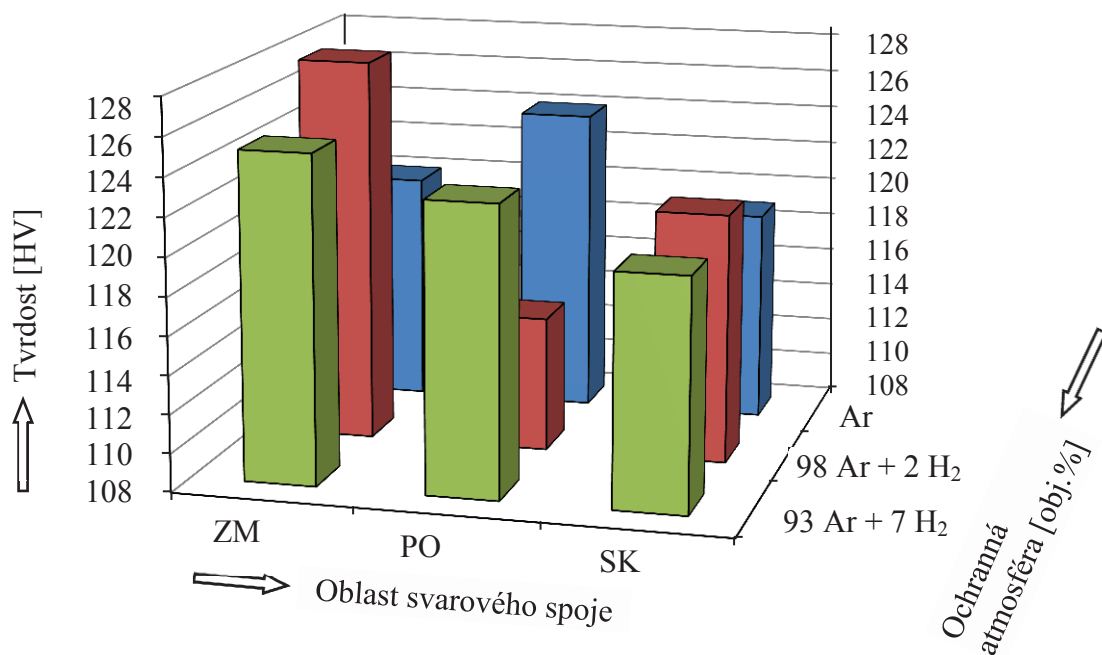
Anomálií byla naměřená tvrdost 81 HV 5, ta byla způsobena blízkostí vtisku a dutiny ve svaru (viz obrázek 6.18b), která se částečně deformovala a tím ovlivnila změřenou hodnotu tvrdosti materiálu.

Pro posouzení závislosti použitého ochranného plynu na tvrdost svarového spoje byly zkonstruovány grafy, uvedené obrázky 6.26 a 6.27.



Obr. 6.26 Střední hodnoty tvrdostí v jednotlivých oblastech svarových spojů, materiál 1.4301.

Analýzou naměřených hodnot tvrdostí u materiálu X5CrNi18-10 nebyla prokazatelně zjištěna závislost mezi použitou ochrannou atmosférou a tvrdostí svaru jelikož difference tvrdostí do velikosti 5 HV mohou být způsobeny například nehomogenitou svařovaného materiálu. Toto potvrzují i největší průměrné rozdíly tvrdostí v základním materiálu.



Obr. 6.27 Střední hodnoty tvrdostí v jednotlivých oblastech svarových spojů, materiál 1.4404.

V přechodové oblasti svaru korozivzdorné oceli X2CrNiMo17-13-2, vyhotoveného za přítomnosti ochranné atmosféry argonu se dvěma objemovými procenty vodíku byl zaznamenán statisticky významný pokles tvrdosti. Ten ale souvisí s dutinou v materiálu, specifikovanou výše, v kapitole 6.3.6.

6.4 Experiment II

Polotovary dodané firmou ACO Industries byly vyřezány z tabulí plechů korozivzdorných ocelí (1.4301 a 1.4404) na rozměry 150×150 milimetrů, jejich tloušťka odpovídá síle tabulí uvedených výrobcem v atestech materiálů (přílohy 4 a 5), tj. 1,5 milimetru.

Experiment byl realizován ve firmě ACO Industries. Technologií laserového svařování ocelových plechů na tupo bylo pomocí diodového laseru na průmyslovém robotu, osazeném svařovací hlavou vyhotoveno ze 24 plechových dílců 12 svarků. Vždy dva plechové díly byly těsně sesazeny a po stranách bodově přivařeny k sobě, tím se zajistila vzájemná poloha polotovarů pro následné laserové svařování, které je zachyceno na obrázku 6.28.



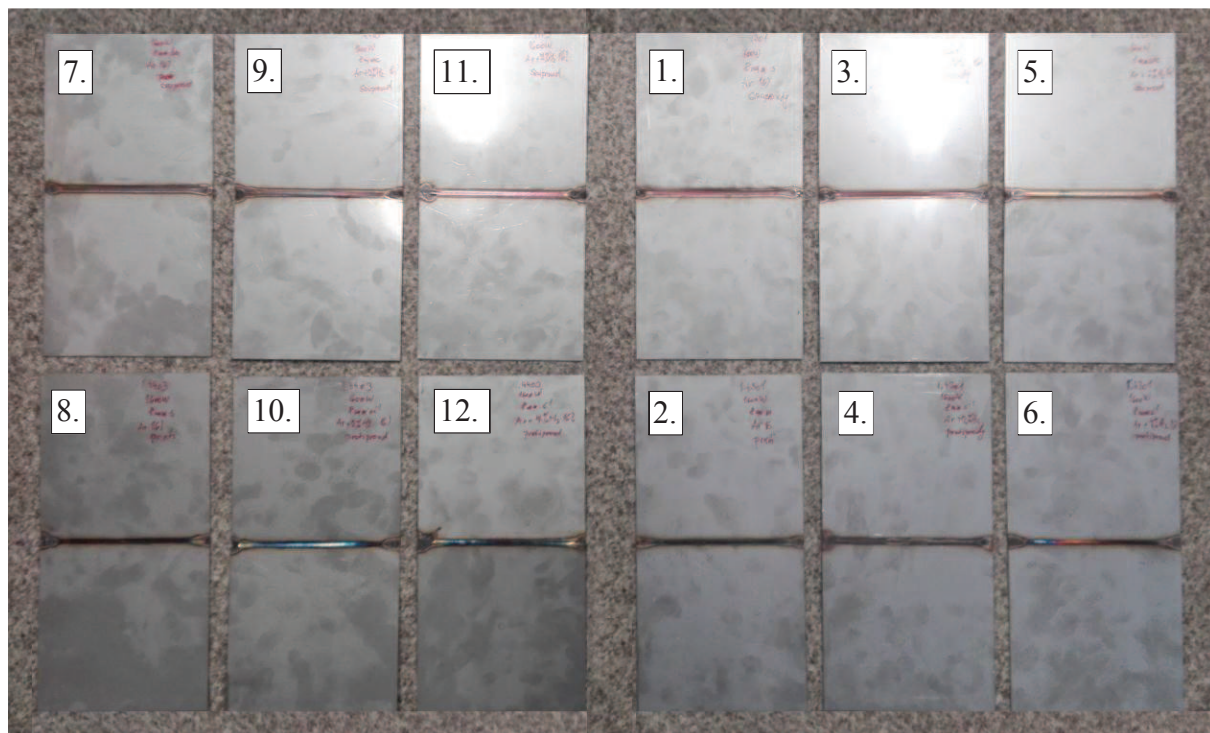
Obr. 6.28 Svařování dílců plechu v rámci experimentu II.

Experiment byl proveden v kondukčním režimu svařování (kap. 2.6.1), kontinuálním laserovým paprskem, s ohniskem o průměru 1,2 milimetru, fokusovaným 1,2 milimetru pod horní plochu svařovaných plechů. Průměrná rychlost svařování byla nastavena na 7 milimetrů za sekundu, při výkonu laserového zdroje 1,6 kilowattu. Pracovní plyn byl přiváděn v objemu 17 litrů za minutu boční tryskou o průměru 12 milimetrů. Proměnné parametry, charakterizující vznik jednotlivých spojů jsou uvedeny v tabulce 6.7.

Tabulka 6.7 Vybrané podmínky svařování.

Svar číslo	Spojované materiály	Ochranný plyn (\pm obj.%)	Přívod ochranného plynu tryskou
1	1.4301 - 1.4301	100 Ar	boční, ve směru svařování
2	1.4301 - 1.4301	100 Ar	boční, proti směru svařování
3	1.4301 - 1.4301	98 Ar + 2 H ₂	boční, ve směru svařování
4	1.4301 - 1.4301	98 Ar + 2 H ₂	boční, proti směru svařování
5	1.4301 - 1.4301	93 Ar + 7 H ₂	boční, ve směru svařování
6	1.4301 - 1.4301	93 Ar + 7 H ₂	boční, proti směru svařování
7	1.4404 - 1.4404	100 Ar	boční, ve směru svařování
8	1.4404 - 1.4404	100 Ar	boční, proti směru svařování
9	1.4404 - 1.4404	98 Ar + 2 H ₂	boční, ve směru svařování
10	1.4404 - 1.4404	98 Ar + 2 H ₂	boční, proti směru svařování
11	1.4404 - 1.4404	93 Ar + 7 H ₂	boční, ve směru svařování
12	1.4404 - 1.4404	93 Ar + 7 H ₂	boční, proti směru svařování

Svařování všech vzorků proběhlo úspěšně. Po lehkém očištění svarových ploch a detailnějším porovnání vzhledu jednotlivých spojů se jeví svary vyrobené za přívodu ochranného plynu ve směru svařování oproti protisměrnému přívodu jakostněji (viz obr. 6.29). Dále lze pozorovat u obou materiálů s růstem obsahu vodíku v použité ochranné atmosféře zesvětlování tzv. „náběhových barev“ na lící straně svarů.



Obr. 6.29 Pohled na lící stranu svarů vyhotovených vzorků.

6.4.1 Příčná tahová zkouška

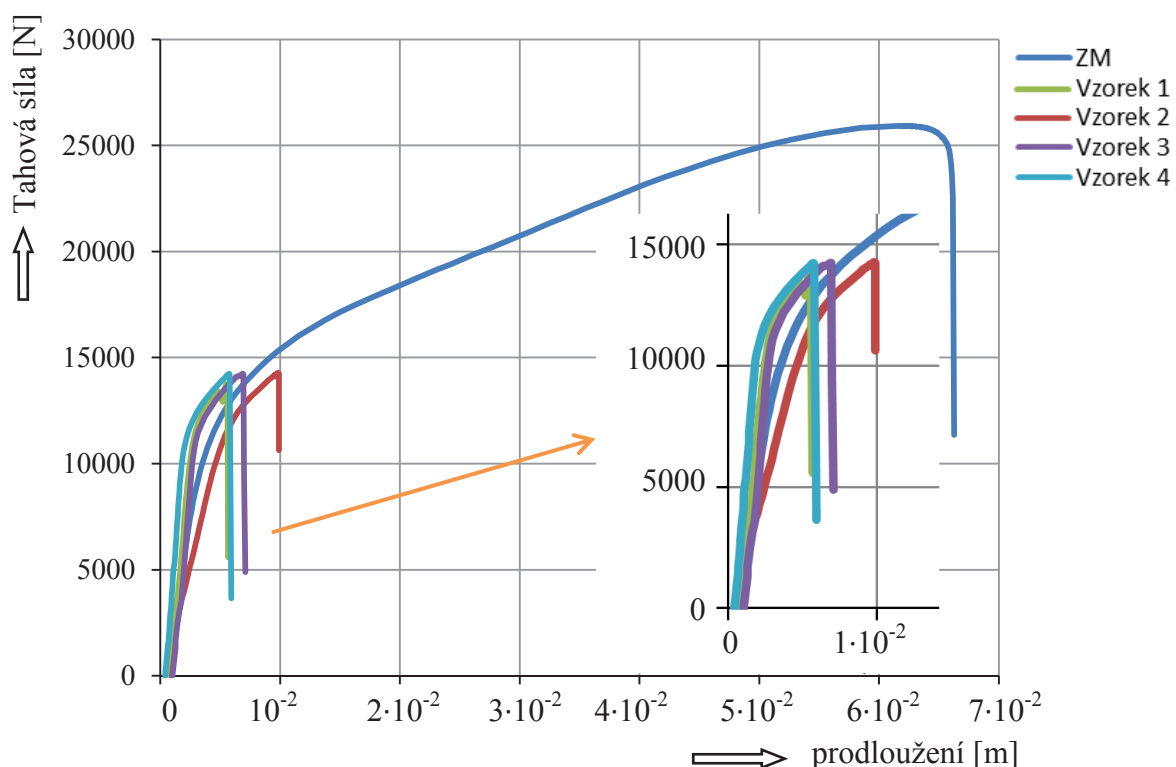
Vzorky pro příčnou tahovou zkoušku, které je věnována kapitola 5.2.2.1 byly připraveny na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky. Rostoucí tahovou silou bylo postupně zatěžováno šest vzorků, vyřezaných ze šesti vybraných svařenců. Geometrie použitých zkušebních těles je dána obrázkem 6.11 a tabulkami 6.8 a 6.9. Průběh zkoušení jednotlivých vzorků byl totožný, jako v experimentu I (viz kapitola 6.3.4, resp. příloha 6).

6.4.1.1 Materiál vzorků 1.4301

Tabulka 6.8 Naměřené hodnoty vzorků materiálu X5CrNi18-10.

Chrakteristika vzorů	Vzorek číslo	b (mm)	S ₀ (mm ²)	F _m (N)	R _{p0,2} (MPa)	R _m (MPa)	A ₅ (obj. %)
Ar	1.	24,80	37,20	13770	312,55	370,16	1,88
Ar	2.	24,70	37,05	14268	315,26	385,11	2,50
93 Ar + 7 H ₂	3.	24,80	37,20	14240	312,52	382,81	3,13
93 Ar + 7 H ₂	4.	24,90	37,35	14240	309,75	381,27	2,50

Prívod ochranné atmosféry: ve směru pohybu svařovací hlavy;
 proti směru pohybu svařovací hlavy.



Obr. 6.30 Tahové diagramy vzorků vyrobených z materiálu 1.4301.

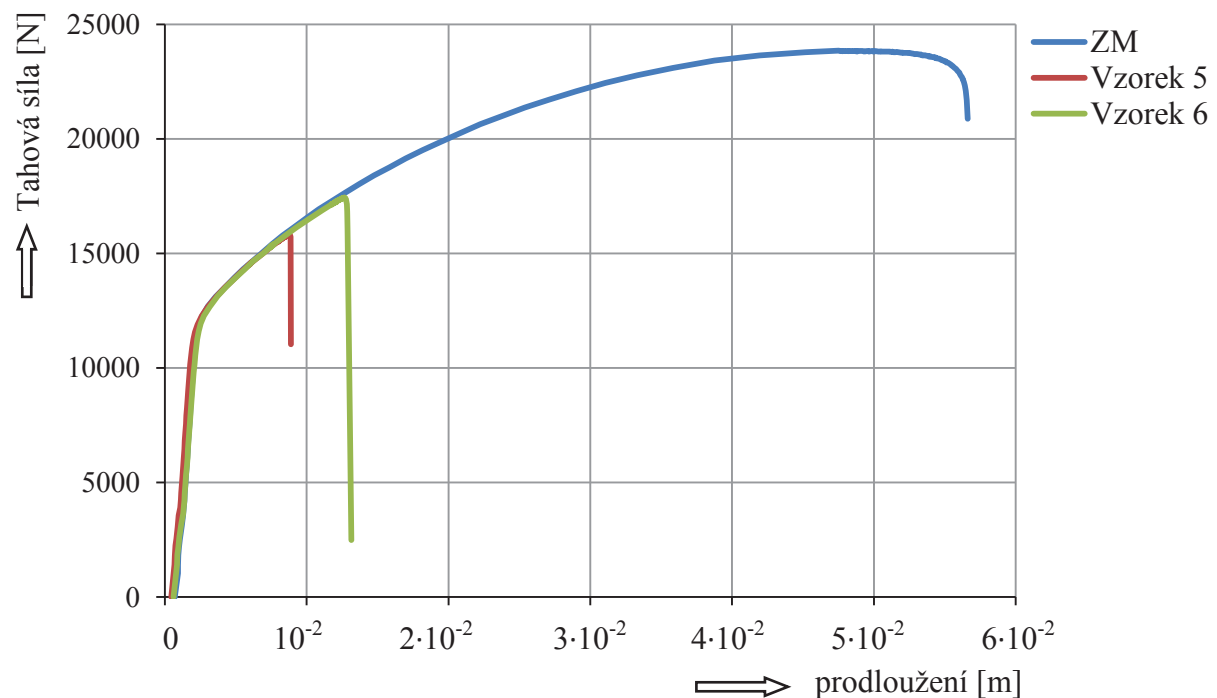
K přetržení všech čtyř svařovaných vzorků došlo záhy po překročení smluvní meze kluzu (nepatrná tažnost), a to ve svařovém spoji. Takto vyhotovené svary jsou tedy z hlediska pevnosti nekvalitní. Z tahové zkoušky vyplývá jako nejméně vhodná varianta svařování v ochranné atmosféře argonu, přiváděné boční tryskou ve směru svařování, kdy byla zjištěna pevnost 370,16 MPa. Rozpor vypočtených tažností jednotlivých vzorků s grafickým znázorněním závislosti tahové síly na jejich prodloužení mohl být způsoben při značení měřené délky zkušební tyče L_0 nebo měřením tohoto úseku po zkoušce L_u .

6.4.1.2 Materiál vzorků 1.4404

Tabulka 6.9 Naměřené hodnoty vzorků materiálu X2CrNiMo17-13-2.

Charakteristika vzorů	Vzorek číslo	b (mm)	S_0 (mm ²)	F_m (N)	$R_{p0,2}$ (MPa)	R_m (MPa)	A_5 (obj. %)
98 Ar + 2 H ₂	5.	24,90	37,35	15839	321,33	424,07	5,00
93 Ar + 7 H ₂	6.	24,90	37,35	17448	327,38	467,14	7,50

Prívod ochranné atmosféry: proti směru pohybu svařovací hlavy.



Obr. 6.31 Tahové diagramy vzorků vyrobených z materiálu 1.4404.

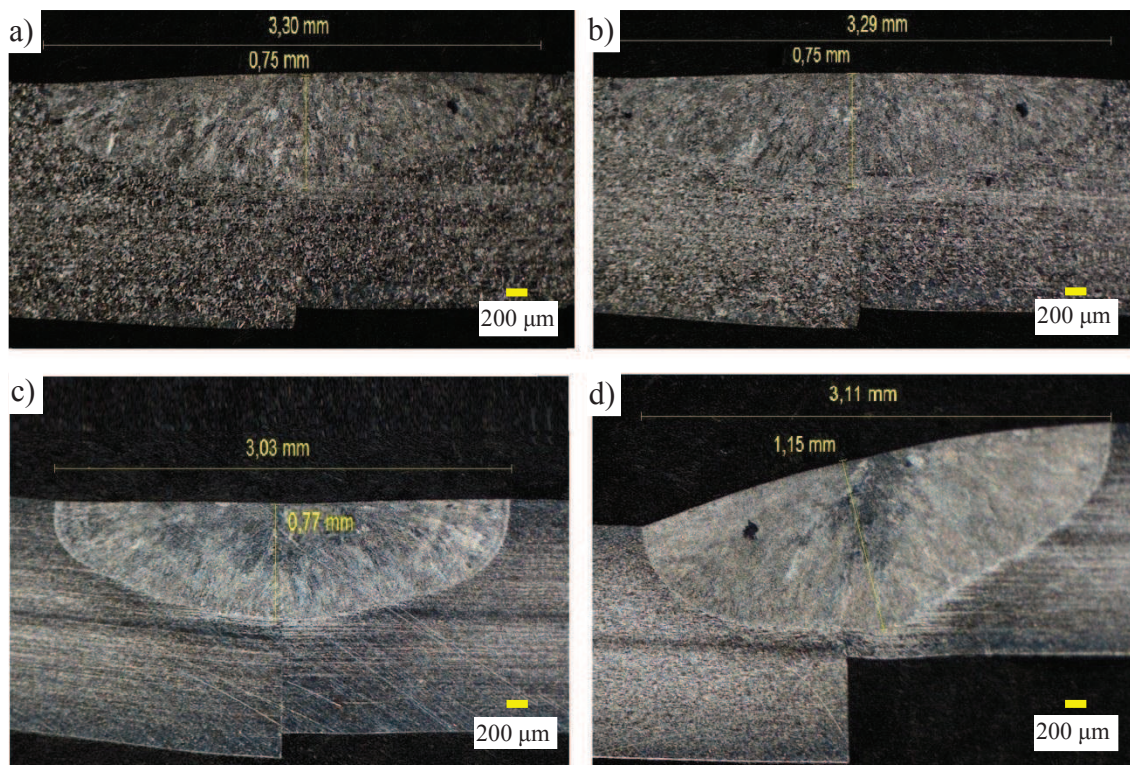
K porušení soudržnosti obou svařovaných vzorků došlo po překročení napětí hodnoty smluvní meze kluzu materiálu, ve svařovém spoji. Nejedná se tedy z pevnostního hlediska o kvalitně provedené svary. V případě směsné atmosféry se sedmi hmotnostními procenty vodíku byl proti čistému argonu zjištěn deseti procentní nárůst pevnosti svaru.

6.4.2 Analýza makrostruktury a mikrostruktury

Příprava vzorků a následné metalografické šetření struktur materiálů bylo provedeno na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky. Na stejných zkušebních vzorcích byly poté měřeny hodnoty tvrdosti podle Vickerse. Technologický postup přípravy metalografických výbrusů byl obdobný tomu, z Experimentu I (viz kapitola 6.3.5.1).

6.4.2.1 Posouzení makrostruktury

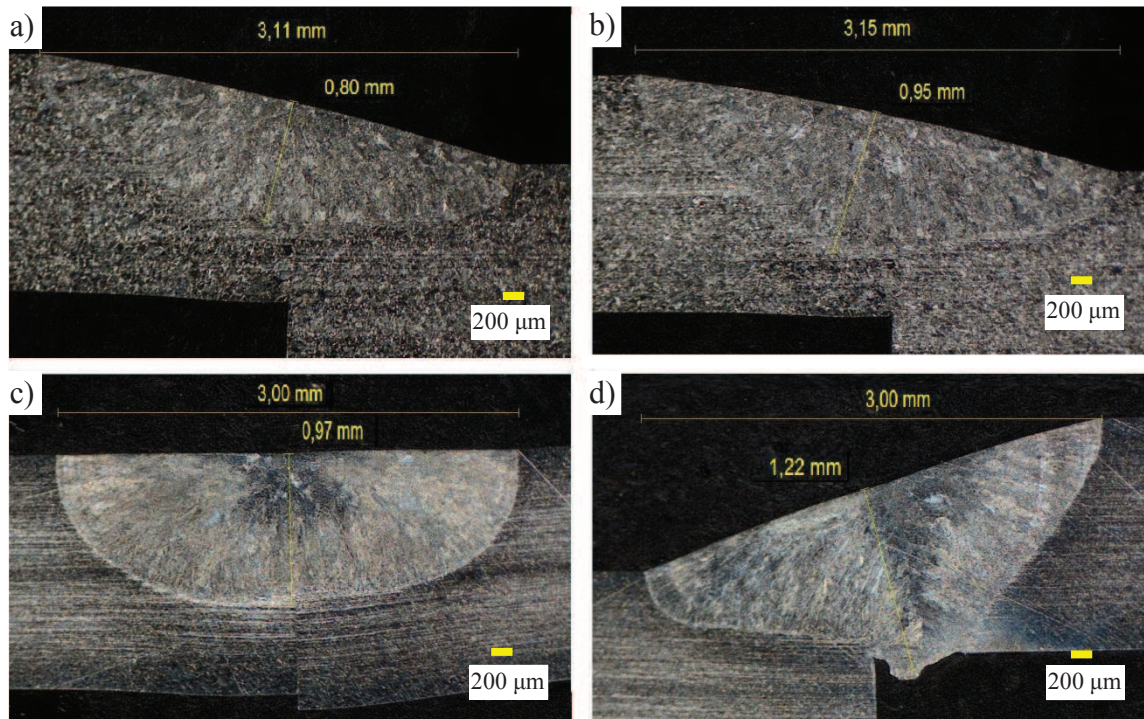
Na obrázcích 6.32 (1, 2, 7, 8), 6.33 (3, 4, 9, 10) a 6.34 (5, 6, 11, 12) jsou zachyceny snímky makrostruktury vzorků vybraných svarů, jejichž charakteristické podmínky vzniku se uvádí pod jednotlivými čísly v tabulce 6.7.



a), b) materiál 1.4301; c), d) materiál 1.4404

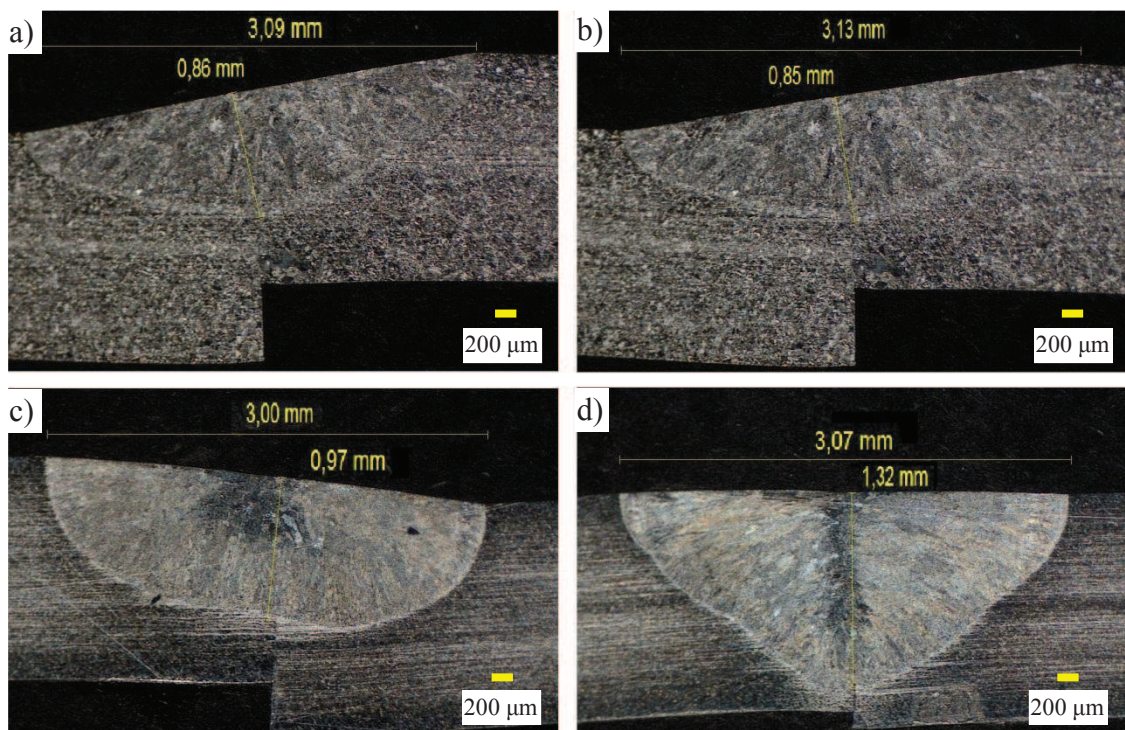
a), c) přívod plynu boční tryskou ve směru svařování; b), d) proti směru svařování

Obr. 6.32 Makrostruktury metalografických výbrusů svarů, ochranný plyn Ar.



a), b) materiál 1.4301; c), d) materiál 1.4404

a), c) přívod plynu boční tryskou ve směru svařování; b), d) proti směru svařování
 Obr. 6.33 Makrostruktury metalografických výbrusů svarů, ochranný plyn 98 Ar + 2 H₂ (obj. %).



a), b) materiál 1.4301; c), d) materiál 1.4404

a), c) přívod plynu boční tryskou ve směru svařování; b), d) proti směru svařování
 Obr. 6.34 Makrostruktury metalografických výbrusů svarů, ochranný plyn 93 Ar + 7 H₂ (obj. %).

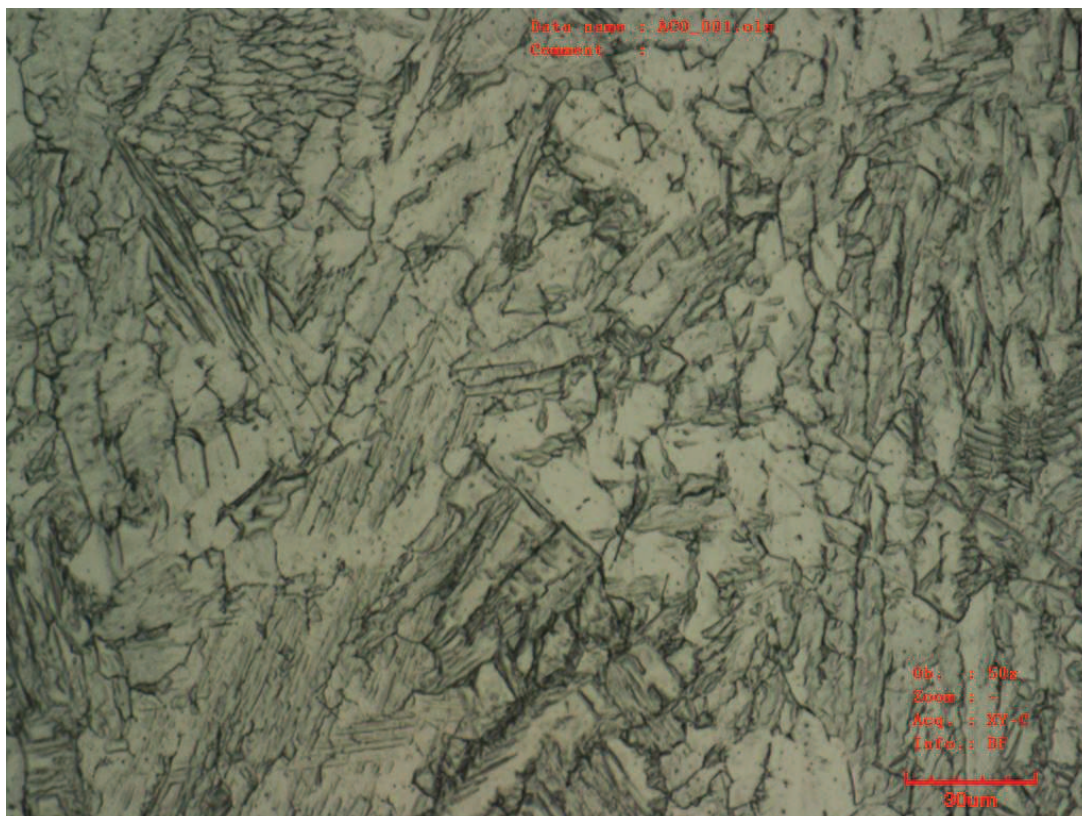
Vyhotovené svary se vyznačují šířkou, přesahující 3 milimetry a k ní poměrově malou hloubkou. To je způsobeno kondukčním režimem svařování, kdy laserovým paprskem, zaostřeným na plošku o průměru 1,2 milimetru nedošlo k vytvoření „klíčové dírky“ (obr. 2.7b) ve svařovaném materiálu, tedy ani k jeho hlubšímu provaření. Hustota energie byla oproti prvnímu experimentu přibližně 6 krát nižší. Vyjma svaru na obrázku 6.33d tak není žádný jiný provařený ve svém kořeni, všechny svary jsou na své lící straně nepropadené. Ze snímků je patrná, pro všechny zkoumané vzorky jen velmi malá, úzká tepelně ovlivněná oblast.

U výbrusů materiálu 1.4404 lze uprostřed svarů pozorovat oblasti nízkotavitelných fází, které sem byly nahromaděny dendrity během tuhnutí svarové lázně. Při mechanickém namáhání těchto svarů je očekávané místo porušení soudržnosti materiálu právě v těchto oblastech (viz tahová zkouška kap. 6.4.1).

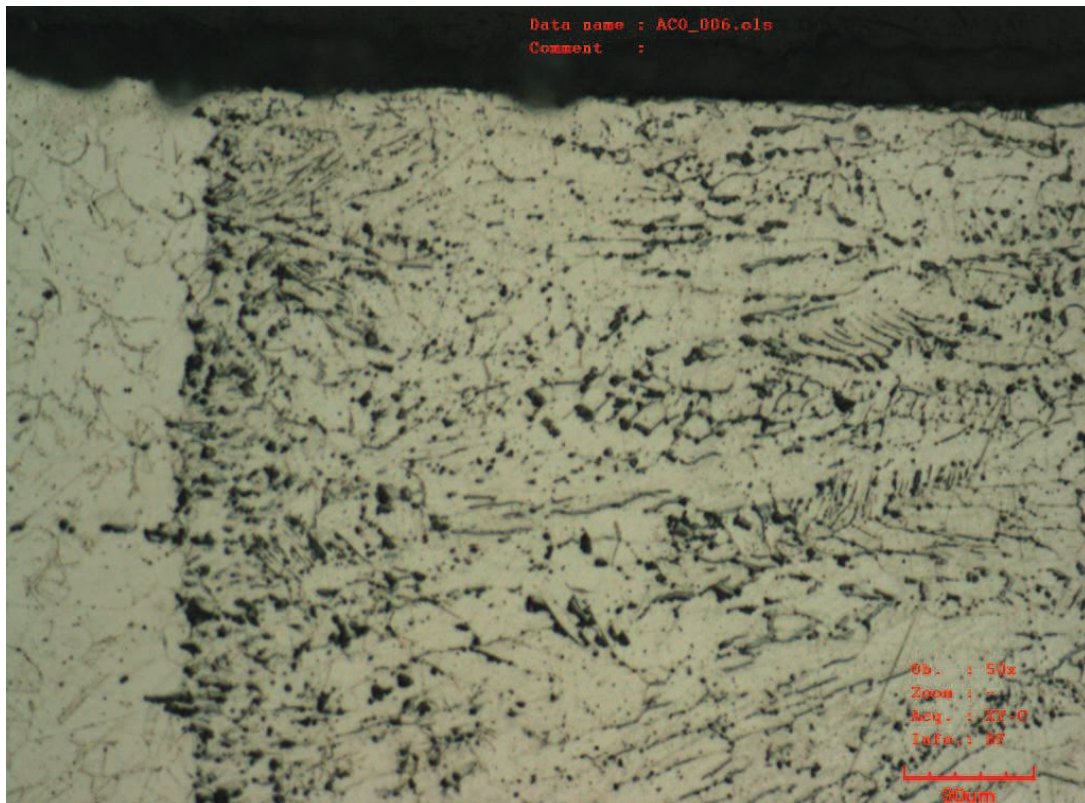
Ze snímků makrostruktury svarů byl nejzřetelnější trend růstu hloubky provaření, v důsledku zvětšování obsahu vodíku v ochranné atmosféře zjištěn u přívodu plynů proti směru pohybu svařovací hlavy. Konkrétně u materiálu 1.4404.

6.4.2.2 Rozbor mikrostruktury

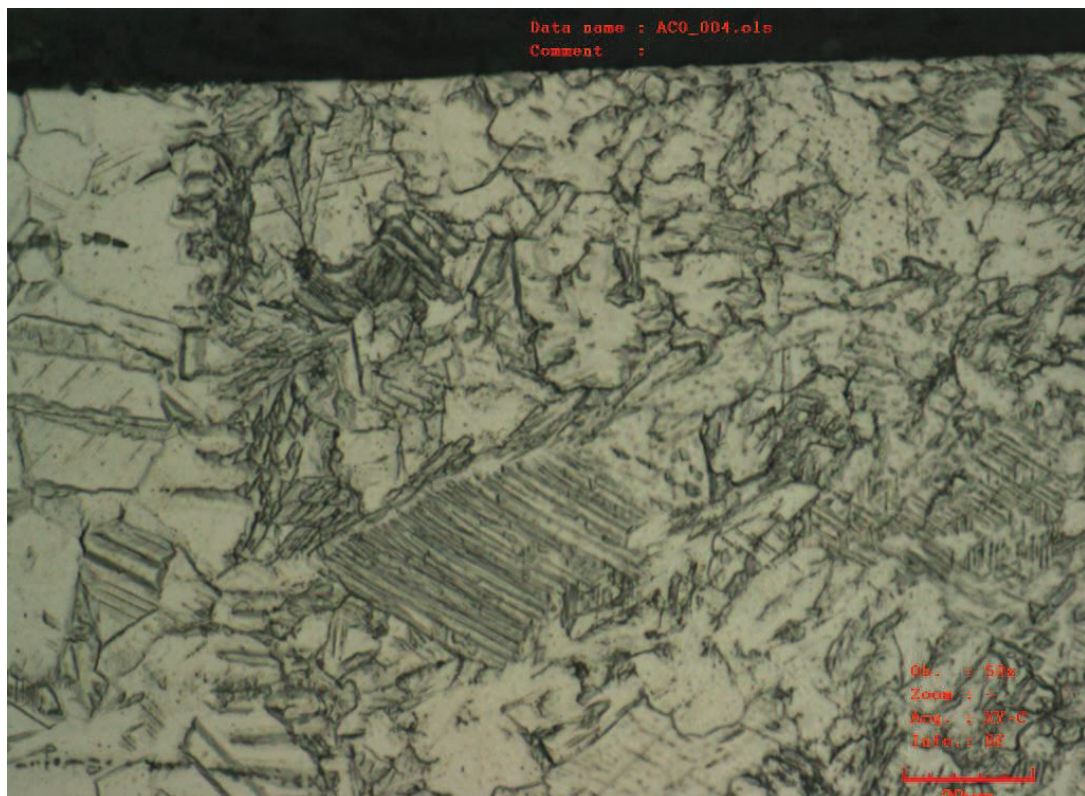
Snímky šetřených mikrostruktur svarových spojů byly pořízeny na konfokálním mikroskopu Olympus LEXT 3100. Protože u austenitických korozivzdorných ocelí tepelně ovlivněná oblast téměř neexistuje (viz kapitola 6.3.5.2), jsou na snímcích 6.20 až 6.2, při publikovaném zvětšení 600× viditelné primárně přechodové oblasti základní materiál-svarový kov.



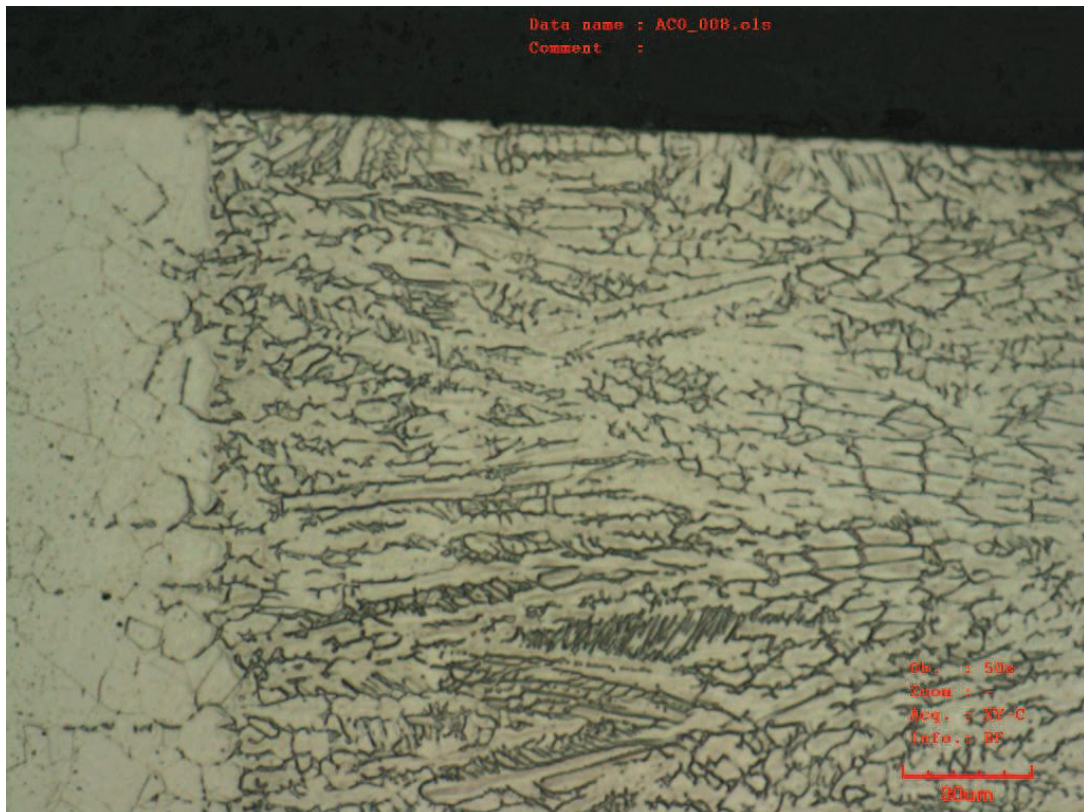
Obrázek 6.35 Mikrostruktura svarového kovu, materiál 1.4301, ochranný plyn argon, přívod boční tryskou proti směru pohybu svařovací hlavy.



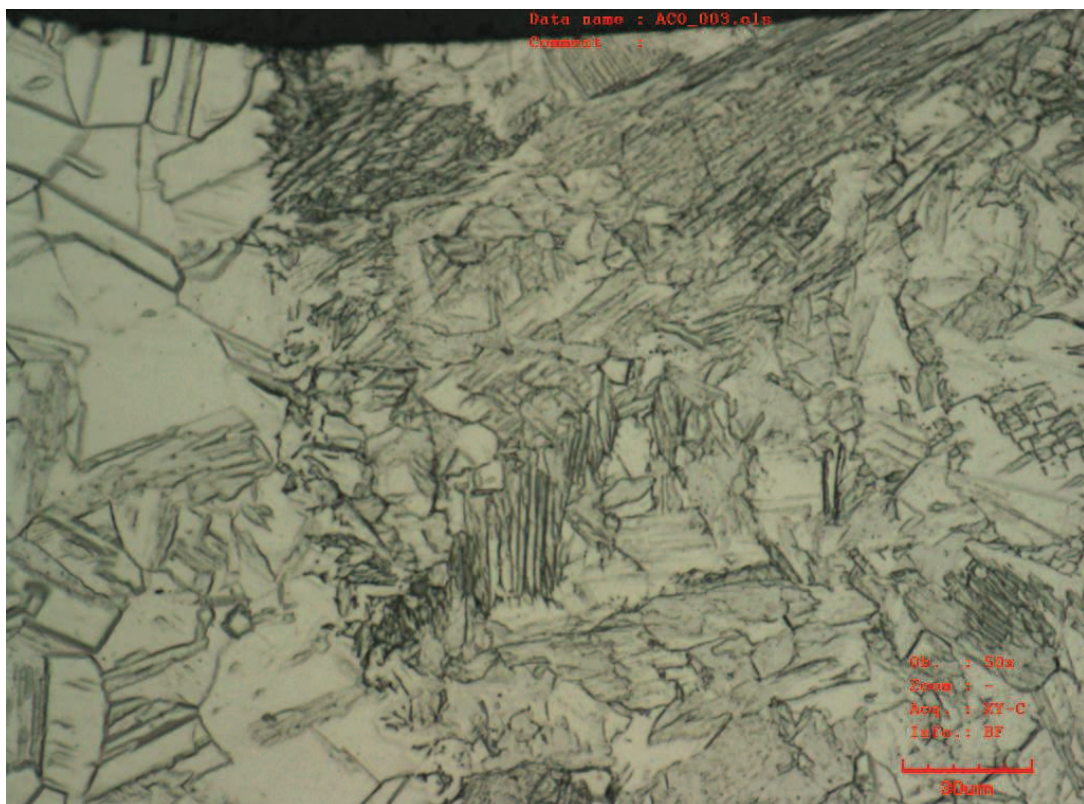
Obrázek 6.36 Mikrostruktura rozhraní, materiál 1.4404, ochranný plyn argon, přívod boční tryskou proti směru pohybu svařovací hlavy.



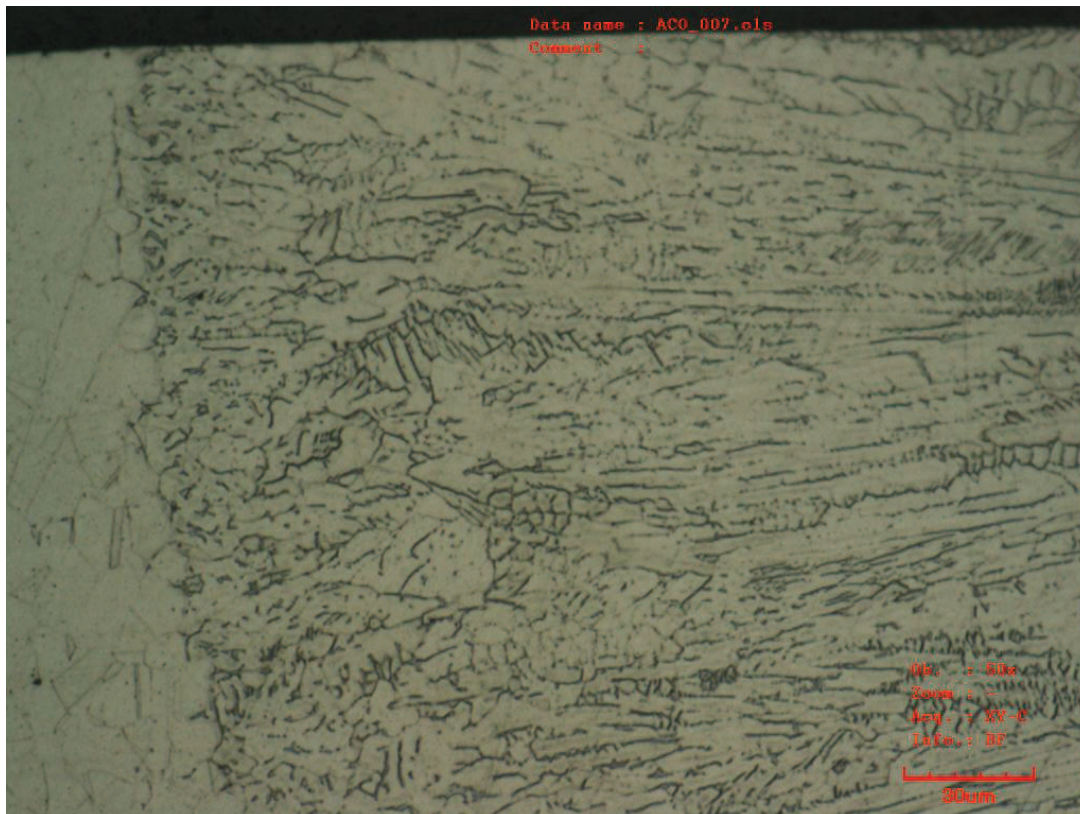
Obrázek 6.37 Mikrostruktura rozhraní, materiál 1.4301, ochranný plyn směs 93 Ar +7 H₂ (hm. %) přiváděna boční tryskou ve směru pohybu svařovací hlavy.



Obrázek 6.38 Mikrostruktura rozhraní, materiál 1.4404, ochranný plyn směs 93 Ar + 7 H₂ (hm. %), přívod boční tryskou ve směru pohybu svařovací hlavy.



Obrázek 6.39 Mikrostruktura rozhraní, materiál 1.4301, ochranný plyn směs 93 Ar + 7 H₂ (hm. %), přívod boční tryskou proti směru pohybu svařovací hlavy.

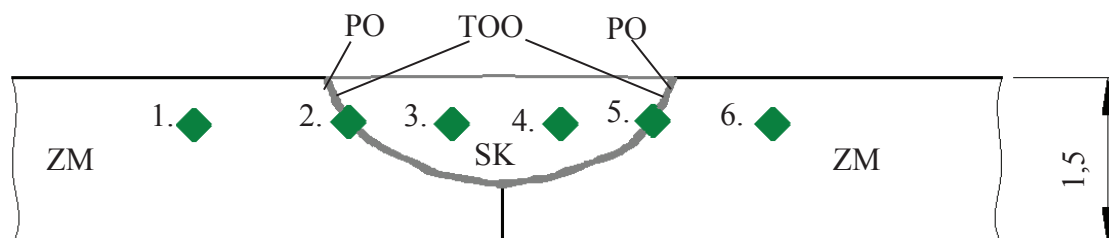


Obrázek 6.40 Mikrostruktura rozhraní, materiál 1.4404, ochranný plyn směs 93 Ar + 7 H₂ (hm. %), přívod boční tryskou proti směru pohybu svařovací hlavy.

Na pořízených snímcích je viditelná austenitická struktura svarového kovu i přechodové oblasti s dendritickým uspořádáním. Černá místa viditelná ve struktuře materiálů mohou být intermetalické fáze, karbidy nebo delta ferit, jehož obsah u každého ze svařovaných materiálů by měl být v rozmezí 5-10 hmotnostních procent (viz kapitola 6.1). U výbrusů materiálu 1.4301 byla leptáním jasně vyvolána válcovaná struktura v oblasti základního materiálu.

6.4.3 Měření tvrdosti

Na každém vzorku byly postupně na šesti místech určeny hodnoty tvrdosti HV 5 (tabulka 6.10). Postup dílčích měření na každém z dvanácti testovaných vzorků je dán schematicky obrázkem 6.41. Přístrojové vybavení a podmínky jednotlivých měření jsou totožné s těmi, použitými v experimentu I (kapitola 6.3.6).





PO...přechodová oblast, TOO...tepelně ovlivněná oblast, ZM...základní materiál,
SK...svarový kov

Obr. 6.41 Postup vytváření vtisků tvrdoměrem ZWICK 3212.

Tabulka 6.10 Naměřené hodnoty tvrdosti zkoumaných vzorků.

Ochranná atmosféra (obj.%)	Tvrdost (HV 5)											
	Materiál 1.4301						Materiál 1.4404					
	Umístění vtisku						Umístění vtisku					
	ZM	PO	SK		PO	ZM	ZM	PO	SK		PO	ZM
1.	2.	3.	4.	5.	6.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	
Ar	128	127	124	125	128	125	119	119	117	115	120	126
98 Ar + 2 H ₂	125	124	125	124	124	125	119	121	115	114	120	126
93 Ar + 7 H ₂	127	125	124	123	123	125	119	120	118	115	119	125
Ar	125	120	125	125	123	120	122	114	111	108	120	124
98 Ar + 2 H ₂	125	126	127	126	120	125	123	117	116	112	116	125
93 Ar + 7 H ₂	123	122	127	128	128	125	117	117	118	117	117	119

Materiály jednotlivých svarů:  přívod ochranné atmosféry ve směru svařování;
 přívod ochranné atmosféry proti směru svařování.

Maximální rozdíl v tvrdosti základního materiálu a svarového kovu byl u materiálu X5CrNi18-10 (1.4301) dosažen při použití ochranné atmosféry argonu se sedmi objemovými procenty, přiváděné boční tryskou proti směru pohybu svařovací hlavy a činí 5 HV 5. Jedná se o diferenci, jejíž negativní účinek na mechanické vlastnosti (tažnost, křehkost) je zanedbatelný. Nejtvrďší změřená struktura materiálu X2CrNiMo17-13-2 (1.4404) se potom nachází v základním materiálu a je o 16 HV 5 tvrdší, než svarový kov. To je způsobeno jednak velmi nízkým obsahem uhlíku v materiálu (0,012 hm. %), během tuhnutí svarového kovu tak nedošlo k měřitelnému zvýšení jeho tvrdosti, dále jako důsledek deformačního zpevnění základního materiálu při výrobě polotovarů plechů válcováním, ale hlavně indukčním režimem svařování. Na základě zkušeností z experimentu I lze i bez konstrukce porovnávacích grafů tvrdit, že nebyla nalezena prokazatelná závislost mezi tvrdostí svaru a použitými svařovacími plyny, resp. jejich přívody.

7 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

V diplomové práci jsou šetřeny účinky ochranných atmosfér argonu (čistota 4.6) a směsí argonu se dvěma nebo sedmi objemovými procenty vodíku na výslednou kvalitu svarů, zhotovených laserovým svazkem. Při podmínkách experimentu I je vypočtena hodinová sazba využití jednotlivých pracovních plynů.

Aktuální cena strojního vybavení pracoviště (laserový zdroj YLS-2000, chlazení, řídicí jednotka, průmyslový robot IRB 2400-10, svařovací hlava) činí včetně integrace systému 8 550 000 Kč. Hodinová sazba odpisů, stanovená na dobu 5 let je tak při provozu 50 týdnů v roce, 5 dní v týdnu na 3 směny 285 Kč·h⁻¹. Průměrné náklady na servis zařízení, rozpočítané z roční částky 50 000 Kč činí 8 Kč·h⁻¹ [73].

Při celkovém příkonu 5 KWh a ceně 2,5 Kč·KWh⁻¹ vychází cena energie provozu pracoviště na 12,5 Kč·h⁻¹ [73].

Plnění ochranné atmosféry do padesátilitrových lahví na relativní tlak 200 Bar je firmou SIAD vyčísleno pro všechny tři použité technické plyny, resp. jejich směsi shodně, na 1 600 Kč. Při spotřebě ochranné atmosféry 18 dm³·min⁻¹ provozu tak jsou výdaje za svařovací plyn 172 Kč·h⁻¹ [73].

Průměrná hrubá hodinová mzda kvalifikované obsluhy (180 Kč), spolu s 34% odvody sociálního a zdravotního pojištění činí 241 Kč [74].

Tabulka 7.1 Stanovení ceny provozní hodiny pracoviště laseru.

	Jednotková cena	Hodinová cena
Odpisy	8 550 000 Kč	285 Kč·h ⁻¹
Servisní činnost	50 000 Kč·rok ⁻¹	8 Kč·h ⁻¹
Elektrická energie	2,5 Kč·KWh ⁻¹	12,5 Kč·h ⁻¹
Láhev svařovacího plynu (směsi)	1 600 Kč	172 Kč·h ⁻¹
Mzda operátora	180 Kč·h ⁻¹	241 Kč·h ⁻¹
Součet		719 Kč·h ⁻¹
Režijní přírážka		100 %
Zisk		10 %
CELKOVÁ SAZBA		1582 Kč·h⁻¹

Ceny zjištěné v eurech převedeny na české koruny dle aktuálního kursu ČNB k 18. 5. 2017.

Cena hodinového provozu pracoviště je tedy pro všechny tři použité ochranné atmosféry shodně 1582 korun českých.

Náplní technického zhodnocení je objasnění specifik obou, v práci uvedených experimentů, včetně návrhů pro maximální efektivitu svařování, s důrazem na použité pracovní plyny. Svary vyhotovené spojením plechových dílců, vyrobených z austenitických korozivzdorných ocelí 1.4301 (X5CrNi18-10) nebo 1.4404 (X2CrNiMo17-13-2) v rámci prvního a druhého experimentu se od sebe významně liší.

Experiment I probíhal kontinuálním laserovým paprskem, pracujícím v penetračním režimu svařování. Provaření celé tloušťky materiálů, v plném rozsahu délky svaru se u všech spojovaných vzorků dosáhlo hlavně díky modernímu laserovému zdroji YLS-2000, jímž emitované záření mohlo být kvůli své vysoké směrovosti zaměřeno do plošky

o průměru 0,4 mm. Díky plošné hustotě výkonu, dosahující v ohnisku hodnoty $8\ 000\ \text{W}\cdot\text{mm}^{-2}$ tak byly vyhotoveny svary, jejichž příčné průřezy jsou charakterizovány tabulkou 7.2.

Tabulka 7.2 Vliv složení ochranné atmosféry na geometrii vybraných svarů z experimentu I.

Spojované materiály	Použitá ochranná atmosféra ($\hat{=}$ obj.%)					
	100Ar		98Ar + 2H ₂		93Ar + 7H ₂	
	z (mm)	w _r (mm)	z (mm)	w _r (mm)	z (mm)	w _r (mm)
1.4301 - 1.4301	1,5	0,94	1,5	0,94	1,5	0,96
1.4404 - 1.4404	1,5	0,93	1,5	1,02	1,5	0,92

z...hloubka závaru, w_r...šířka svaru v jeho kořeni

V tabulce šetřené svary jsou vyrobeny za přívodu pracovních plynů proti směru svařování.

Vzhledem k dosaženým rozměrům svarů je v případě svařování materiálu 1.4301 v ochranné atmosféře se sedmi objemovými procenty vodíku možné navýšení rychlosti svařování v řádu jednotek procent, a to při obdobné geometrii výsledného spoje, jako v případě využití čistého argonu. Produktivitu svařování materiálu 1.4404 je potom nejvhodnější zvyšovat v ochranné atmosféře se dvěma objemovými procenty vodíku.

Experiment II byl proveden kontinuálním laserovým svazkem, generovaným diodovým laserovým zdrojem. Typickou vlastností polovodičového laseru je citelná rozbíhavost výstupního svazku, která limituje jeho použitelnost, zejména u aplikací laserového svařování štíhlých, hlubokých spojů. Svazek byl fokusován do minimální možné oblasti, tedy plošky o průměru 1,2 mm. Dosažený indukční režim svařování je typický velkou stykovou plochou s okolní atmosférou, pro kvalitu vyrobených svarů tak je velmi důležitá volba přívodu a složení ochranné atmosféry. Zhotovené svary jsou definovány tabulkou 7.3.

Tabulka 7.3 Vliv složení ochranné atmosféry na geometrii svarů z experimentu II .

Spojované materiály	Použitá ochranná atmosféra ($\hat{=}$ obj.%)					
	100Ar		98Ar + 2H ₂		93Ar + 7H ₂	
	\Rightarrow	\Leftarrow	\Rightarrow	\Leftarrow	\Rightarrow	\Leftarrow
	z _r (mm)	z _r (mm)	z _r (mm)	z _r (mm)	z _r (mm)	z _r (mm)
1.4301 - 1.4301	0,75	0,75	0,80	0,95	0,86	0,85
1.4404 - 1.4404	0,77	1,15	0,97	1,22	0,97	1,32

z_r...hloubka závaru ve směru kořene svaru

Přívod pracovních plynů ve směru svařování \Rightarrow , proti směru svařování \Leftarrow .

Pokud pevnostní požadavky na výrobek vyžadují větší plochu příčného průřezu svaru, může být vyšší hloubky průvaru dosaženo přidáním výkonu laseru, nebo za cenu poklesu produktivity procesu snížením svařovací rychlosti, či oboustranným svařením součásti.

ZÁVĚRY

Diplomová práce se zabývá procesem průmyslového svařování laserovým paprskem, respektive šetřením vlivů vybraných ochranných atmosfér na kvalitu svaru a parametry laserového svařování. Teoretická část na úvod seznamuje s prací, poté vysvětluje fyzikální podstatu emitace laserového záření, popisuje základní části laserových zdrojů a blíže specifikuje jednotlivé typy laserů i jejich aplikačního využití v průmyslu. Podrobně je popsána technologie laserového svařování, vliv spojovaných materiálů a parametrů svařování, jakožto i ochranné atmosféry na kvalitu výsledného svaru. Následně je představena Šlírová metoda zobrazování proudění. V závěru teoretické části jsou potom uvedeny možné defekty a kontrola svarových spojů, vyhotovených laserovým svazkem.

Praktická část diplomové práce začíná uvedením a specifikací, v experimentech svařovaných materiálů austenitických korozivzdorných ocelí 1.4301/1.4307 (X5CrNi18-10) a 1.4404 (X2CrNiMo17-13-2). Následuje charakteristika použitých ochranných atmosfér argonu (o čistotě 4.6) a směsí argonu se dvěma a sedmi objemovými procenty vodíku.

Na základně provedení experimentu I byly učiněny tyto závěry:

- přívod ochranných plynů boční tryskou proti směru svařování je nejefektivnější z použitých variant krytí svarové lázně vůči vlivům vnější atmosféry, a to za dostatečné cirkulace pracovního plynu v okolí vznikajícího spoje, pro oba materiály je tak dosaženo nejmenšího množství oxidů a desublimovaného materiálu na povrchu svarového spoje,
- svařováním dílců z austenitické oceli X5CrNi18-10 došlo v ochranné atmosféře se sedmi objemovými procenty vodíku, oproti krytí argonem k rozšíření kořenové části svaru o dvě procenta, v případě materiálu X2CrNiMo17-13-2, svařovaném ve směsné atmosféře se dvěma objemovými procenty vodíku to bylo téměř o deset procent,
- u obou testovaných materiálů nebyla prokázána významná závislost vlivu obsahu vodíku v ochranné atmosféře na mechanické vlastnosti svarů.

Pro svary vyhotovené za podmínek experimentu II platí:

- z hlediska vzhledu lícních stran svarů se nejvyšší kvality u materiálů X5CrNi18-10 i X2CrNiMo17-13-2 dosáhlo přívodem směsné ochranné atmosféry se sedmi objemovými procenty vodíku, ve směru pohybu svařovací hlavy,
- nejhlubší průvar 1,32 milimetru byl zaznamenán u austenitické oceli X2CrNiMo17-13-2, vyrobený za přívodu ochranné atmosféry se sedmi objemovými procenty vodíku proti směru svařování, v případě materiálu X5CrNi18-10 se průvaru 0,95 milimetru dosáhlo tímž přívodem směsí argonu se dvěma objemovými procenty vodíku,
- na základě výsledků příčné tahové zkoušky je vhodné v případě očekávaného vystavení svařených součástí intenzivnímu namáhání, při stávajících podmínkách procesu volit materiál X2CrNiMo17-13-2, svařovaný ve směsné atmosféře se sedmi objemovými procenty vodíku, při jejím protisměrném přívodu bylo dosaženo nejmenšího poklesu meze pevnosti vůči základnímu materiálu, a to o 22 procent,
- nebyla zjištěna souvislost mezi tvrdostí průřezové plochy svaru a použitými svařovacími plyny, resp. jejich přívody.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. BENKO B., FODEREK P., KOSEČEK M., BIELAK R.I: Laserové technologie, 1.vyd., Bratislava, Vydavateľstvo STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9.
2. DULEY W.W.: Laser welding, New York 1999, A.Wiley-Interscience publication, ISBN 0-471-24679-4.
3. KANNATEY-ASIBU, E.: Principles of Materials Processing, John Wiley&Sons, Inc. Publication, 2009, ISBN 978-0-470-17798-3.
4. AMBROŽ O., KANDUS B., KUBÍČEK J.: Technologie svařování a zařízení, Ostrava, Zeross, 2001, 395 str. ISBN 80-85771-81-0.
5. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství. *PŘEDNÁŠKA: Koroze a stárnutí materiálů*. Brno, 24 s.
6. SVAŘOVÁNÍ LASEROVÝM PAPEREM. NĚMEČEK, Stanislav. *Využití laserů v průmyslu* [USB]. 18.-20.3. Plzeň: Matex Pm, 2013, s. 8-14 [cit. 2017-05-08].
7. LAPŠANSKÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi*. Olomouc: Moravská vysoká škola Olomouc, 2010. ISBN 978-80-87240-65-6.
8. MRŇA, Libor. *Využití metod signálové frekvenční analýzy pro sledování a řízení laserového svařovacího procesu*. Brno: VUTIUM, 2014. Vědecké spisy Vysokého učení technického v Brně. Habilitační a inaugurační spisy. ISBN 978-80-214-4843-8.
9. RAMBOUSEK, Zdeněk. *Laserové stanice: zdroje, technologie, konstrukce*. Liberec: VÚTS, 2015. ISBN 978-80-87184-61-5.
10. BERKMANN, Joachim a Mark FAERBER. *FACTS ABOUT: laser technology:laser welding* [USB]. Höllriegelskreuth: Linde Gas [cit. 2017-05-08].
11. LUKÁŠEK, Jaromír. *Laserové svařování* [online]. In: . aktualizováno: 10.5.2007 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://www.welding.cz/laser/svarovani.htm>
12. MRŇA, Libor. *Dynamika laserového svařování = Dynamics of laser welding*. Brno: VUT FSI, 2007, 106 s. Přílohy.
13. ČSN EN 1011-6. *Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů: Část 6: Laserové svařování*. 2006.
14. Použití laserů při spojování autokaroserií: *Laserové zpracování tenkých ocelových plechů* [online]. In: 3BO. 2003 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://dp.bajaja.net/06.html>
15. KAPLAN, Alexander. *Laser welding: as selected advanced processing technique*. Luleå University of Technology, 2014.
16. ROZSYPAL, Oldřich. *Posouzení vlastností heterogenních tupých svarů metodami svařování laserem a svazkem elektronů*. Brno, 2015. Diplomová práce: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Obor technologie svařování a povrchových úprav. 81 s, 4 přílohy. Vedoucí diplomové práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
17. ČSN EN 895. *Destruktivní zkoušky svarových spojů kovových materiálů: Příčná zkouška tahem*. 1997.

-
18. KOŘÁN, Pavel. LAO. *Seriál na téma lasery: Princip a dělení laseru* [online]. 19.02. 2013 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
 19. KOŘÁN, Pavel. LAO. *Seriál na téma lasery: Hlavní typy laserů v průmyslu* [online]. 19.02. 2013 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
 20. From flange to I-joint. In: *Laser Community* [online]. [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://www.laser-community.com/en/from-flange-to-i-joint/>
 21. RIYADI, Ahmed. Danger of laser welding. In: *World of work* [online]. 14.12, 2014 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: http://ahmedriyadijavansex.blogspot.cz/2014_09_01_archive.html
 22. TRUMPF laser welding: TruDiode - Laser deposition welding. In: *Youtube* [online]. 21.05.2015 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=t3ozd0Mk2Sw>
 23. Bright Idea: The First Lasers [online]. In: *AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS*. 2017 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://history.aip.org/exhibits/laser/sections/therace.html>
 24. REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. *Foton. Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/726-foton>
 25. Vlnová délka. In: *Fotona* [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://www.fotona.cz/cs/technologie/co-je-laser-a-jak-funguje/>
 26. ŠEBESTOVÁ, Hana. *Průmyslové lasery pro svařování* [online]. 2012 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/sebestova_prumyslove_la_sery_pro_svarovani.pdf
 27. MRŇA, Libor. *Základy laserové techniky: Tvar laserového paprsku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Obor technologie svařování a povrchových úprav., 2013, 22 s. Dostupné také z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__zaklady_laserove_techiky_2013__mrna.pdf
 28. BOGAR, Radek. *Svařování oceli USIBOR 1500 vláknovým Yb-YAG laserem*. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. 60s, 5 příloh. Vedoucí práce RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
 29. HOLUB, Matyáš. *Studium vlivu mezery na vlastnosti laserem provedeného tupého svaru*. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. 62s, 1 příloha. Vedoucí práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
 30. MM Průmyslové spektrum: *Průmyslové lasery* [online]. 2012, (9) [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-4-hlavni-typy-laseru-v-prumyslove-praxi.html>
 31. KOŘÁN, Pavel. *svařování LASEREM: Poslední trendy* [online]. In: *iSTROJIRENSTVÍ* [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://www.istrojirenstvi.cz/materialy/precist.php?navez=svarovani-laserem-posledni-trendy&id=20&rating=3>
-

-
32. VRBOVÁ, M, H JELÍNKOVÁ a P GAVRILOV. *Úvod do laserové techniky*. Praha, 1998, 228 s. ISBN 80-01-01108-9.
 33. YIEH UNITED STEEL CORP. *MILL TEST CERTIFICATE: DIN EN 10028-7: 1.4301/1.4307_C*. Kaohsiung City 82057, Taiwan, 2016.
 34. Laser Welding of Motion Unit. In: *Youtube* [online] . 05.03.2013 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=t3ozd0Mk2Sw>
 35. OSIČKA K., KALIVODA M. *Nekonvenční technologie obrábění: (vzdělávací a tréninkový modul)*. Brno, 2012. Dostupné z: <http://opus.fme.vutbr.cz>
 36. LEIDORF, Michal. *Srovnání svarů vytvořených CO2 laserem a vláknovým laserem*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 48 s. Vedoucí diplomové práce RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
 37. MM Průmyslové spektrum: *Lasery, laserové technologie a stroje s laserem* [online]. 2006, (7) [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-s-laserem.html>
 38. MM Průmyslové spektrum: *Slab, Innoslab, kotoučový, nebo vláknový laser?* [online]. 2007, (3) [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-s-laserem.html>
 39. IONIX. *LASER PROCESSING: Harness the light as your tool* [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://www.ionix.fi/en/technologies/laser-processing/laser-drilling/>
 40. YIEH UNITED STEEL CORP. *MILL TEST CERTIFICATE: DIN EN 10028-7: 1.4404(C)*. Kaohsiung City 82057, Taiwan, 2016.
 41. Navařování laserem. *Ústav strojírenské technologie* [online]. [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__navarovani_laserem__mrna.pdf
 42. Datový list: *Argon 4.6*. Linde Gas, 2016, 2 s. [cit. 2017-05-13].
 43. MM Průmyslové spektrum: *Kalení laserem* [online]. 2011, (7) [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/kaleni-laserem-urychluje-vyrobu-soucasti-a-nastroju.html>
 44. Kalení laserem [online]. *TRUMPF laser* [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/laser/
 45. Laserové značení a gravírování. *Lasery a optika* [online]. LAO [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aplikace-79/laserove-znaceni-89>
 46. Laserové popisování. *Laserová technologie* [online]. LINTECH [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://www.lintech.cz/laserove-popisovani>
 47. Machine Tool Laser Marking. *Industrial laser marking applications* [online]. LASERSTAR Technologies [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <https://www.laserstar.net/industries/industrial/marking-and-engraving/industrial-laser-system/>
 48. MORAVEC, Jaromír. *Teorie svařování a pájení II: speciální metody svařování*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009. ISBN 978-80-7372-439-9.
-

-
49. Fiber Lasers in Material Processing. WANDERA, Catherine. *Fiber laser* [online]. Uganda: Busitema University, 2016 [cit. 2017-05-13]. ISBN DOI: 10.5772/62014. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/fiber-laser/fiber-lasers-in-material-processing>
50. Přesné laserové řezání. *Zakázková výroba* [online]. LINTECH [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://www.lintech.cz/presne-laserove-rezani>
51. KOUKAL, Jaroslav, Drahomír SCHWARZ a Jiří HAJDÍK. *Materiály a jejich svařitelnost*. Ostrava: Český svářečský ústav, 2009. ISBN 978-80-248-2025-5.
52. ČSN EN 1011-2. *Svařování: Doporučení pro svařování kovových materiálů: Obloukové svařování feritických ocelí*. 2002.
53. PTÁČEK, Luděk, Jaroslav CIHLÁŘ, Eduard DORAZIL, Rudolf FORET, Bohumil PACAL, Josef STEIDL, Jaroslav ŠENBERGER a Jiří ŠVEJCAR. *Nauka o materiálu II*. Brno: CERM, 1999, 350 s. ISBN 80-7204-130-4.
54. CUNAT, Pierre-Jean. *Svařování korozivzdorných ocelí*. Lucembursko: Euro Inox, 2007 [cit. 2017-05-20]. ISBN 978-2-87997-177-3.
55. MM Průmyslové spektrum: *Posouzení vlivu ochranného plynu při laserovém svařování* [online]. 2014, (1) [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-svarovani-posouzeni-vlivu-ochranneho-plynu.html>
56. HLA VATÝ, Ivo. Teorie a technologie svařování: Laserové svařování [online]. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2011, str. 11-12 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/2-03--52.pdf>
57. Výběr ochranného plynu. *Svářecí technika* [online]. Schinkmann [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.schinkmann.cz/vyber-ochranneho-plynu>
58. Česká svářečská společnost ANB: *typy vad, příčiny jejich vzniku a hodnocení* [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384>
59. MM Průmyslové spektrum: *Kvalita laserových svarů* [online]. 2006, (4) [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/kvalita-laserovych-svaru.html>
60. KATAYAMA, S. *Handbook of Laser Welding Technologies*. Elsevier Science, 2013. ISBN 0857092642.
61. ŠTORKÁN, Zdeněk. Problematika hodnocení svarových spojů. *KONSTRUKCE* [online]. 2014 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/problematika-hodnoceni-svarovych-spoju/>
62. SCHWARZ, Drahomír. : *Hodnocení svarových spojů*. Ostrava: Český svářečský ústav, str. 8-9 [cit. 2017-05-22].
63. KOLAŘÍK, Ladislav. Vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie. *PŘEDNÁŠKA: Destruktivní a nedestruktivní zkoušky svarových spojů*. Praha, 53 s.
64. *Učíme se v prostoru: Výsledek zkoušky tahem* [online]. PATA, Vladimír. [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: http://uvp3d.cz/drtic/?page_id=2076
-

-
65. *Vše pro zkoušení materiálů: Zkouška tvrdosti podle Vickerse* [online]. Praha: HANYKO [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <https://www.hanyko-praha.cz/produkty/tvrdomery/co-je-tvrдост-a-jak-se-meri/zkouska-tvrдостi-podle-vickerse/>
66. *Měření tvrdosti: Tvrdost podle Vickerse* [online]. [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://www.merenitvrдостi.cz/tvrдост.html>
67. *Hardness testing: Vickers Hardness Test* [online]. [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/hardness-testing-part-1-074/>
68. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001, 292 s.: il.; 30 cm. ISBN 80-85771-85-3.
69. MRŇA, Libor a Jan PAVELKA, Ústav přístrojové techniky akademie věd České republiky, *PŘEDNÁŠKA: Využití Šlírové metody ve výkonových laserových technologiích*. Brno, 26 s.
70. BÁLEK, Rudolf a Lukáš KOBL.: *Princip šlírového zobrazení*. 4. Praha: Česká akustická společnost, 2006, 28 s. ISSN 1610-1928. Dostupné také z: <http://www.czakustika.cz/misc/aklisty/12-4.pdf>
71. *Nerezový hutní materiál: Ocel 1.4301* [online]. inox [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://www.inoxspol.cz/nerezova-ocel-14301.html>
72. *Svařovací technika: Plyny pro svařování a formování* [online]. In: Praha: Linde Gas, s. 2 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.vildman.eu/getattachment/20e56625-57a0-4343-a108-4fef7b3106a4/Plyny-pro-svarovani-a-formovani.aspx>
73. doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D. - ústní sdělení (vedoucí diplomové práce, Královopolská 147/62, 612 00 Brno-Královo Pole) [dne 2017-05-17].
74. BĚHOUNEK, Pavel. *Daňové zákony: v úplném znění k 1. 1. 2017 s přehledy změn*. Olomouc: ANAG, 2017, 343 s. ISBN 978-80-7554-060-7.
75. *Specifikace nerezových materiálů* [online]. In: Ústí nad Orlicí: ARMAT, s. Z2-Z5 [cit. 2017-05-23]. Dostupné z: <http://www.armat.cz/pdf/specifikace-nerezovych-oceli-chemicke-slozeni.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Jednotka	Popis
A	%	tažnost
b	mm	výchozí měřená šířka zkušební tyče
d	μm	střední hodnota úhlopříček vtisků
F	N	vlačovací síla
F_{max}	N	maximální zatěžující síla
$h\nu, \Delta E$	J	kvantum vyzářené energie
l_0	mm	výchozí měřená délka zkušební tyče
l_u	mm	měřená délka zkušební tyče v okamžiku přetržení
n	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	intenzita záření svazku
P	W	výkon laseru
r	mm	vzdálenost od středu svazku
Re	MPa	mez kluzu
Rm	MPa	mez pevnosti
$R_{p0,2}$	MPa	smluvní mez kluzu
S_0	mm^2	výchozí měřená plocha průřezu zkušební tyče
S_u	mm^2	měřená plocha průřezu zkušební tyče v okamžiku přetržení
v	$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	rychlost svařování
w, t, v	mm	reprezentují množství odebraného materiálu
w_r	mm	šířka svaru v jeho kořeni
Z	%	kontrakce
z	mm	hloubka závaru
z_r	mm	hloubka závaru ve směru kořene svaru
Zkratka		Popis
Ag		zlato
AISI		American Iron and Steel Institute – Americký institut pro železo a ocel
Al		hliník
Ar		argon
Au		zlato
Be		beryllium
$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$		glycerol
Co		kobalt
C		uhlík
CE, CET		uhlíkový ekvivalent
CO_2		oxid uhličitý
Cr		chrom
Cu		měď
ČNB		Česká národní banka
DPSS		Diode Pumped Solid State - diodou čerpané povolátkové prostředí
Fe		železo
H		vodík
HF		fluorovodík
hm.		hmotnostní
HNO_3		kyselina dusičná

HV	Hardness Vickers – tvrdost dle Vickerse
LPSS	Lamp Pumped Solid State - lampou čerpané pevnolátkové prostředí
MAG	Metal Activ Gas – metoda svařování tavnou elektrodou v ochranné atmosféře aktivního plynu
MIG	Metal Inert Gas – metoda svařování tavnou elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu
Mn	mangan
Mo	molybden
N	dusík
Nd	neodym
Ni	nikl
obj.	objemový
obr.	obrázek
P	fosfor
Pd	palladium
PO	přechodová oblast
Pt	platina
resp.	respektive
apod.	a podobně
tj.	to je
S	síra
Si	křemík
SK	svarový kov
Sm	samarium
Te	tellur
Ti	titan
TIG, WIG	Tungsten (Wolfram) Inert Gas – metoda svařování netavnou elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu
TOO	tepelně ovlivněná oblast
tzv.	takzvaně
V	vanad
W	wolfram
X2CrNiMo17-13-2	chrom niklová austenitická korozivzdorná ocel s příměsí molybdenu
X5CrNi18-10	chrom niklová austenitická korozivzdorná ocel
YAG	yttrito hlinitý granát
Yb	ytterbium
ZM	základní materiál

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Souhlas s použitím záznamů pořízených ve firmě ACO Industries
Příloha 2	Využitelnost laserového svařování v automobilním průmyslu
Příloha 3	Volba ochranné atmosféry při svařování pevnolátkovými Nd:YAG lasery
Příloha 4	Atest X5CrNi18-10 oceli
Příloha 5	Atest X2CrNiMo17-13-2 oceli
Příloha 6	Specifikace zařízení pro tahovou zkoušku