



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# VLIV OCHRANNÉ ATMOSFÉRY NA VLASTNOSTI SVARU PŘI KONDUKČNÍM LASEROVÉM SVAŘOVÁNÍ PLECHŮ Z KONSTRUKČNÍ UHLÍKOVÉ OCELI

INFLUENCE OF SHIELDING GAS ON WELD PROPERTIES OF CONDUCTIVE LASER WELDING OF SHEET  
FROM CARBON STEEL

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Marcel Kotrík

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

BRNO 2019

# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	<b>Bc. Marcel Kotřík</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	<b>doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2018/19

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:

## **Vliv ochranné atmosféry na vlastnosti svaru při indukčním laserovém svařování plechů z konstrukční uhlíkové oceli**

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

Provést analýzu vlivu různých typů ochranné atmosféry (směs Ar a CO<sub>2</sub>) na mechanické vlastnosti, svarové vady a vzhled laserem svařeného tupého spoje plechů konstrukční uhlíkové oceli různých tloušťek.

### **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 doporučené literatury:**

BENKO, Bernard, Peter FODREK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIELAK. Laserové technológie. 1. vyd. Bratislava: STU, 2000. ISBN 80-227-1425-9.

DULEY Walter W. Laser welding, New York 1999, A.Wiley-Interscience publication, ISBN 0-47-24679-4.

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

AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 1. vyd. Ostrava: Zeross, 2001, 395 s. ISBN 80-857-7181-0.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

---

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

## **ABSTRAKT**

KOTRÍK Marcel: Vliv ochranné atmosféry na vlastnosti svaru při indukčním laserovém svařování plechů z konstrukční uhlíkové ocel

---

V diplomovej práci sú analyzované na základe literárnej štúdie vplyvy troch ochranných atmosfér. Porovnával sa vplyv ochrannej atmosféry tvorenou čistým Ar, zmesou Ar s 3obj.%CO<sub>2</sub> a zmesou Ar s 18obj.%CO<sub>2</sub> na mechanické vlastnosti indukčne laserom zváraných tupých spojov plechov z konstrukčných oceli DC01 a S235JR o hrúbke 3mm a 2mm. Porovnávali sa pevnostné vlastnosti zvarov v ťahu, tvrdosť zvarov a tepelne ovplyvnenej oblasti pri nízkom zaťažení. Ďalej sa sledovalo a porovnávalo prúdenie plynov počas zvarového procesu šlirovou metódou a jeho účinky na vzhľad skúšobných zvarov. Na metalografických výbrusoch zvarov sa vyhodnocovali chyby a rozmery spojov.

Kľúčové slová: laserové zváranie, indukčný režim, ochranná atmosféra, šlirova metóda, tvrdosť podľa Vickersa

## **ABSTRACT**

KOTRÍK Marcel: Influence of shielding gas on weld properties of conductive laser welding of sheet from carbon steel

---

In the thesis are analysed influences of three shield gases, based on literary pursuit. Compared was influence of the gas consisting of pure Ar, mixture Ar with 3vol.% CO<sub>2</sub> and the mixture Ar with 18vol.% CO<sub>2</sub> on mechanical properties of conduction laser welded blunt welds made from structural steel DC01 and S235JR with thickness 3mm and 2mm. Compared were strength properties of the welds in tension, weld hardness and hardness of the heat affected area under the low stress. Further was observed and compared stream of the gases during welding process and its influences on the appearance of the trial welds. On the metallographical cuts of the welds were evaluated mistakes and dimensions of the welds.

Keywords: laser welding, conduction mode, shielding gas, schlieren method, Vickers hardness

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

KOTRÍK, Marcel. *Vliv ochranné atmosféry na vlastnosti svaru při indukčním laserovém svařování plechů z konstrukční uhlíkové oceli*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/113064>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Libor Mrňa.

## **ČESTNÉ PREHLÁSENIE**

Týmto prehlasujem, že predkladanú diplomovú prácu som vypracoval samostatne, s využitím uvedenej literatúry a podkladov, na základe konzultácií a pod vedením vedúceho diplomovej práce.

V Brne dňa 24. 5. 2019

.....  
Podpis

## **POĎAKOVANIE**

Týmto chcem poďakovať vedúcemu práce doc. RNDr. Liborovi Mrňovi, Ph.D. za vynikajúce vedenie. Ďalej chcem poďakovať firme ACO industries za umožnenie vyhotovenia zvarových vzoriek. Pánom Ing. Kamilovi Podanému, Ph.D., Ing. Petrovi Horníkovi a Vojtěchovi Řiháčkovi chcem poďakovať za pomoc pri jednotlivých skúškach experimentu. V neposlednom rade chcem poďakovať mojej priateľke MUDr. Kataríne Fedorovej a mojej rodine za vytrvalú podporu počas celého štúdia.

# OBSAH

Zadanie

Abstrakt

Bibliografická citácia

Čestné prehlásenie

PodĎakovanie

Obsah

ÚVOD.....	9
1 ROZBOR ZADANIA .....	10
1.1 Varianty riešenia .....	10
2 LASEROVÉ ZVÁRANIE .....	13
2.1 Vlastnosti laserového lúča.....	15
2.2 Fokusácia laserového zväzku .....	16
2.3 Absorpcia materiálu .....	18
2.4 Zváranie laserom .....	18
2.5 CO <sub>2</sub> laser .....	21
2.6 Nd:YAG laser.....	22
2.7 Diskový laser.....	24
2.8 Vláknový laser .....	24
2.9 Polovodičový laser .....	25
3 OCHRANNÉ PLYNY .....	27
3.1 Doprava ochranného plynu .....	29
3.2 Šlírová metóda .....	30
3.3 Vyhodnotenie zvarového spoja.....	32
4 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ .....	34
4.1 Charakteristika materiálov .....	37
4.2 Prúdenie ochranného plynu.....	39
4.3 Ťahová skúška .....	44
4.3.1 Namerané hodnoty .....	46
4.4 Analýza makroštruktúry.....	48
4.5 Skúška tvrdosti podľa Vickersa .....	53
5 Technicko-ekonomické zhodnotenie .....	58
6 ZÁVERY .....	59

Zoznam použitých zdrojov

Zoznam použitých symbolov a skratiek

Zoznam obrázkov

Zoznam tabuliek

Zoznam príloh

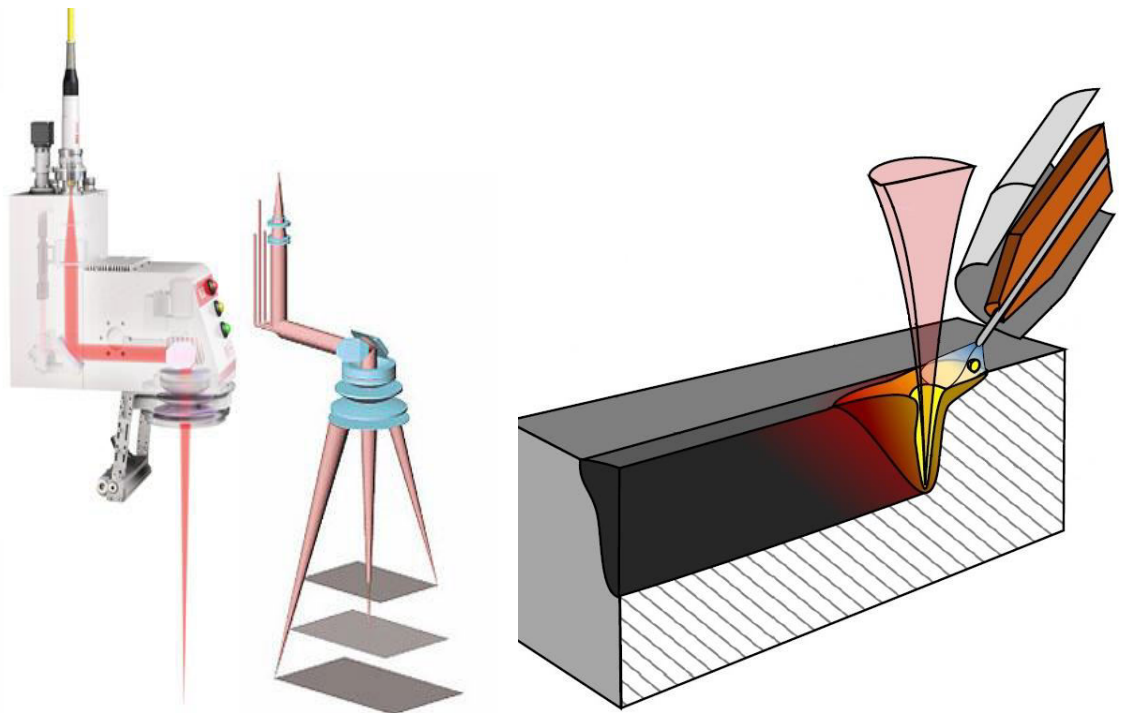


## ÚVOD [2]

V dnešnej dobe neustáleho hospodárskeho rastu a rozvoja vo všetkých odvetviach sa kladú čoraz vyššie požiadavky na kvalitu výrobkov a ich estetický vzhľad pri zachovaní či znížení nákladov na výrobu. Z toho to dôvodu pribúdajú nové technológie výroby a zdokonaľujú sa bežne používané. V neposlednom rade sa nekonvenčné, finančne náročnejšie technológie rozširujú do nových oblastí priemyslu aby mohli spĺňať náročné požiadavky.

Medzi tieto nové technológie nepochybne patrí technológia zvarovania pomocou laserového lúča. Táto technológia zvarovania má množstvo výhod, spĺňa náročné kritéria na kvalitu spojov a na automatizáciu výroby. Z toho to dôvodu je to veľmi progresívna technológia. Veľkou výhodou laseru je jeho variabilita. Zvaracie zariadenie okrem rôznych druhov zvarovania umožňuje navarovanie či povrchovú úpravu materiálu.

Čo sa týka zvarovania, laser sa kvôli úzkemu lúču a vysokej energetickej koncentrácii, výrazne odlišuje od konvenčných technológií a vyskytujú sa u neho rôzne špecifiká. Jednou z nich je aj chovanie sa ochranného plynu počas zvarového procesu a jeho vplyv na zvarový kov. Veľké množstvo materiálov v kombinácii s veľkým množstvom možných zmesných ochranných atmosfér nám poskytuje široké možnosti skúmania.



Obr. 1 Príklady progresívnych technológií zvarovania [1],[2]

# 1 ROZBOR ZADANIA

Práca je zameraná na vplyv rôznych typov ochrannej atmosféry pri kondukčnom laserovom zváraní tupých spojov z plechov o rôznych hrúbkach z konštrukčnej uhlíkovej ocele. Je potreba vyhodnotiť a preskúmať možné varianty, ktoré by sa dali využiť. Z tohto dôvodu sú v teoretickej časti popísané možné varianty zvaracích technológií pre zváranie tupých spojov, ich porovnanie z hľadiska automatizácie a efektivity.

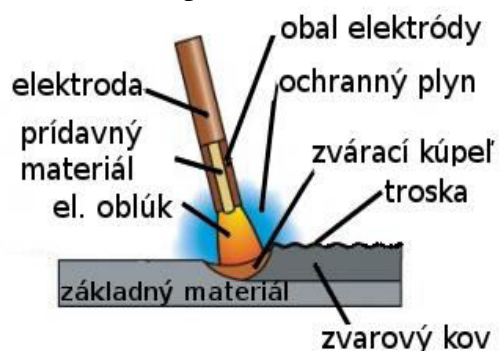
Ďalej je priblížená problematika laserového zvárania, rozdelenie a porovnanie jednotlivých typov laserových zariadení a ich zvaracie možnosti.

Ďalšia teoretická časť práce je zameraná na ochranu zvarového kovu. Možnosti sledovania prúdenia a správneho zabezpečenia ochrannej atmosféry v celej zvaranej oblasti. Možné varianty ochranných plynov a ich účinok na zvarový materiál. Experiment bol navrhnutý tak, aby bolo možné skúmať a vyhodnotiť vplyv rôznych typov ochranných atmosfér na mechanické vlastnosti, zvarové chyby a vzhľad kondukčne laserom zváraného tupého spoje plechov z konštrukčných uhlíkových oceli rôznych hrúbok.

## 1.1 Varianty riešenia [3],[4],[5],[6],[7],[8],[9]

Na zváranie plechov menších hrúbok z uhlíkových ocelí sa v dnešnej dobe využíva viacero metód zvárania. Hlavné rozdiely medzi týmito metódami, sú predovšetkým v produktivite (rýchlosti zvárania), možnosti automatizácie, kvalite zvarových spojov a akostí pohľadových plôch. Pri tavnom zváraní tupých spojov sa používajú prevažne metódy MMA (ručné oblúkové zváranie obalenou elektródou), MAG (oblúkové zváranie taviacou sa elektródou v aktívnom plyne), TIG (oblúkové zváranie netaviacou sa elektródou v inertnom plyne), a zváranie laserom.

Metóda MMA (Manual Metal Arc)- alebo ručné zváranie taviacou obalenou elektródou je jednou z najstarších metód ručného zvárania. Jedná sa o oblúkové zváranie, kde sa docieľuje roztavenie základného a prídavného materiálu horením oblúku (o teplote až 5000 °C) medzi nimi. Základná schéma tejto metódy je zobrazená na obrázku 2. V priebehu horenia oblúku sa postupne odtavuje obalená elektróda a kov odkvapkáva do zvarového kúpeľa. Tu sa premiešava so základným materiálom. Obal elektródy následne vytvorí na povrchu zvarového kúpeľa trosku, ktorá slúži ako ochrana zvarového spoja pred vonkajším prostredím, ktoré by spôsobilo oxidáciu. Trosku je potrebné po zváraní veľmi dôkladne odstrániť, predovšetkým ak je potrebné vytvárať ďalšiu zvarovú húsenicu alebo napájať zvar. Nedokonalým odstránením by došlo k zaliatiu časti trosky ďalšími vrstvami zvarového kovu, čo by viedlo k vytvoreniu neprípustných chýb vo zvarovom kove, tzv. vtrúseniny.



Obr. 2 Zváranie ručnou obaľovanou elektródou [3]

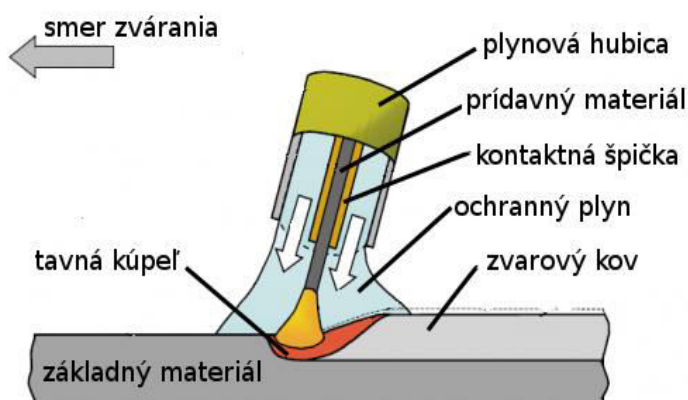
Výhodami MMA zvárania sú:

- možnosť zvärať vo všetkých polohách,
- tvorba ochrannej atmosféry z obalov elektród,
- jednoduché a ľahké zdroje pre zváranie (trafa a ivertory),
- zváranie rôznorodých materiálov (uhlíkové ocele, nehrdzavejúce ocele, liatiny, hliníkové liatiny apod.),
- nízke obstarávacie a prevádzkové náklady.

Nevýhody MMA zvarovania:

- nízka produktivita (častá výmena elektród),
- nutnosť skúsenej obsluhy,
- častý výskyt chýb (vtrúseniny, trhliny, studené spoje, póry atď.),
- nutnosť zaistiť, aby elektródy nenavlhli.

Metóda MAG/MIG – sú technológie poloautomatické alebo plne automatizované robotické centrá využívajúce oblúkové zvarovanie taviacej sa elektródy v atmosfére ochranného plynu. Základná schéma tejto metódy je zobrazená na obr. 3. Oblúk horí medzi prídavným a základným materiálom. Prídavný materiál sa volí rovnaký alebo podobný základnému kovu. Tým je zaistené, že zvarový kov bude mať vlastnosti, či už fyzikálne alebo chemické, čo najpodobnejšie so základným materiálom. Prídavný materiál je vo forme drôtu do zvarového spoja dopravovaný kladkovým systémom. Behom zvarovania je zvaracou hubicou vedený tiež ochranný plyn, ktorý má funkciu zamedzenia kontaktu okolnej atmosféry so zvaracím kúpeľom. MAG (Metal Active Gas) je vhodný pri zvarovaní ocelí a ako ochranný plyn je používaný  $\text{CO}_2$  alebo zmes  $\text{CO}_2 + \text{Ar}$ , ktorý zvyšuje povrchové napätie kúpeľa a zároveň ho nauhličuje. MIG (Metal Inert Gas) je vhodný pri zvarovaní ľahkých kovov a ako ochranný plyn sú používané inertné plyny Argónu, Héliu a ich zmesí. Pri tejto metóde má plyn iba ochrannú funkciu a vďaka inertnosti nedochádza k chemickým reakciám so zvarovým kovem.



Obr. 3 Metóda zvarovania MAG/MIG [8]

Výhodami MIG/MAG zvarovania je:

- automatickosť a produktivita,
- zvarový spoj bez trosky a s malým množstvom chýb (v porovnaní s MMA),
- zvarovanie v rôznych polohách,
- nenáročná obsluha,
- široká škála využitia od ocelí po ľahké kovy,
- možnosť veľkého prievaru (napr. 12mm bez úkosu)

Nevýhody MIG/MAG zvarovania:

- vyššie náklady na ochranné plyny, predovšetkým inertné,
- vyššie obstarávacie náklady zvaracieho stroja,
- vyššie nároky na údržbu,
- možnosť odfúknutia ochranného plynu pri nevhodnej ventilácii.

Metóda TIG/WIG (Tungsten Inert Gas/ Wolfram Inert Gas) – využíva netaviacu sa volfrámovú elektródu (teplota jeho tavenia je  $3422\text{ }^\circ\text{C}$ ) a ochranné atmosféry inertných plynov (Argónu, Héliu a ich zmesí). Pri tejto technológii je možné pristupovať k zvarovaniu dvoma spôsobmi. Buď sa natarvá základný materiál bez prídavného materiálu a dôjde k zvarovému spoju, ktorý má najlepšie možné vlastnosti, alebo je do zvarovej zmesi aplikovaný prídavný materiál vo forme drôtu (zobrazené na obr. 4). Táto metóda zvarovania môže byť manuálna (obsluha dodáva drôt ručne), mechanizovaná (obsluha pridáva drôt pomocou bovdenu, pričom riadi rýchlosť a množstvo podávania tlačidlom), alebo

automatizovaná, kedy je držanie horáku a pridávanie drôtu riadené automaticky. Pomocou tohto druhu zvarovania je možné zvarať najväčšiu škálu materiálov od ocelí, po neželezné kovy, vrátane niektorých kombinácií ako oceľ s meďou alebo bronz s niklovými zliatinami. Zváranie touto metódou je možné striedavým, jednosmerným, ale aj impulzným prúdom. Toto zaisťuje bohaté možnosti použitia.

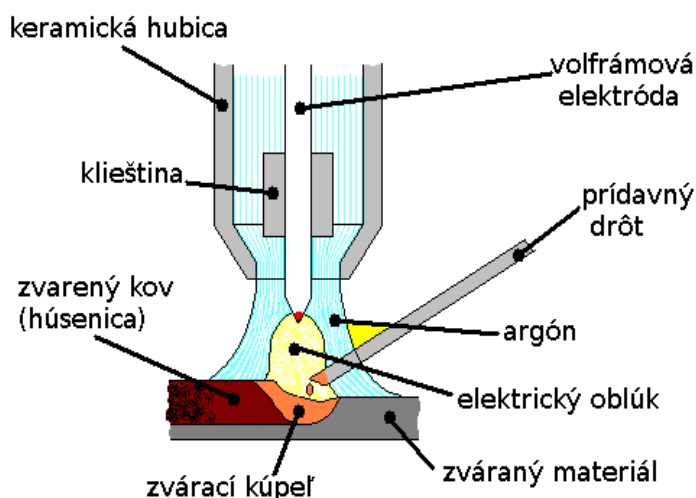
Výhody TIG/WIG:

- precízne a na pohľad pekné zvary,
- zváranie nehrdzavejúcich ocelí, horčíkových alebo titánových zliatin, zváranie rôznorodých materiálov,
- možnosť zvarovania bez prídavného materiálu,
- vysoká teplota oblúku s malou tepelne ovplyvnenou oblasťou,
- výborná ochrana spoja pred okolitou atmosférou.

Nevýhody TIG/WIG:

- vysoké obstarávacie a prevádzkové náklady,
- pomalá produktivita u ručného TIG/WIG
- pri zváraní uhlíkových ocelí nevhodná z ekonomického hľadiska a možnosti vzniku pórov.

Metóda laserového zvarovania však vďaka svojim najväčším prednostiam ako je efektivita, variabilita či kvalita zvarov spomedzi ostatných podstatne vyčnieva a aj pre túto skutočnosť sa stala progresívnou technológiou zvarovania. Nepochybne patrí k najvhodnejším technológiám pre zváranie konštrukčných uhlíkových ocelí. Preto sa jej bude podrobne venovať v ďalších kapitolách práce.



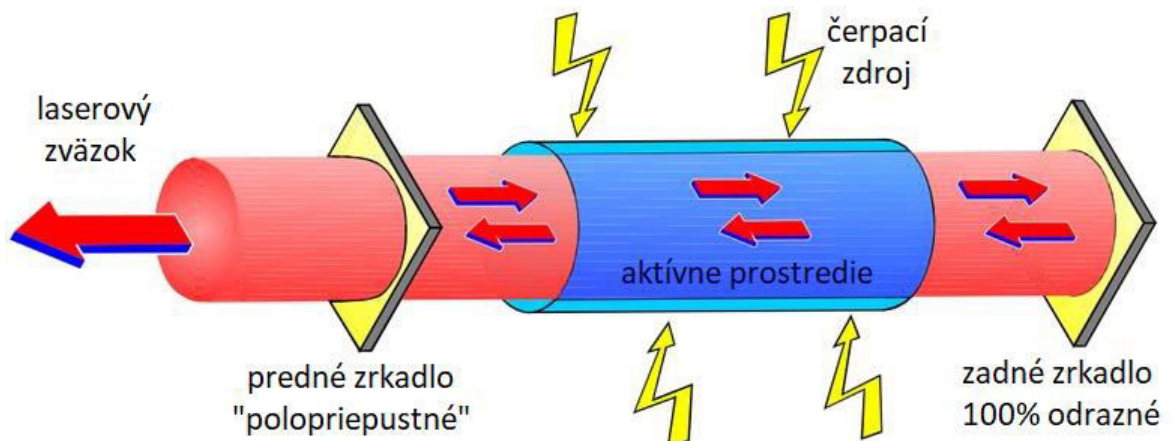
Obr. 4 Princíp zvarovania TIG s prídavným drôtom [9]

## 2 TEORETICKÁ ČASŤ- LASEROVÉ ZVÁRANIE[10],[11],[12]

Laser je kvantový generátor svetelných lúčov, ktorý produkuje elektromagnetické žiarenie vo forme monochromatického koherentného zväzu, o vysokej hustote energie. Princíp laseru popísal po prvýkrát Albert Einstein, na podstate zákonov kvantovej elektroniky, ktorej základy položili začiatkom minulého storočia Max Planck, Niels Bohr a Albert Einstein. Slovo laser je vytvorené ako skratka pôvodného anglického názvu tejto metódy: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

Využitie laseru pri spájaní materiálov je založené na skutočnosti, že energia, ktorú vydáva laser vo forme elektromagnetického žiarenia sa pri kontakte so zváraným materiálom mení na tepelnú energiu. Fotón dopadajúci na materiál predstavuje kvantum energie, ktorá priamo zvyšuje frekvenciu vibrácií v mriežke, čím dochádza k zvyšovaniu teploty. Tepelná energia teda vzniká iba vo veľmi malej kontaktnej oblasti a ďalej dochádza k jej šíreniu do objemu materiálu predovšetkým kondukciou. Mechanizmus ohrevu materiálu je teda úplne odlišný, ako pri klasických metódach zvárania, pri ktorých ohrev a tavenie materiálu zabezpečuje externý tepelný zdroj. Táto skutočnosť predstavuje veľkú výhodu laserového zvárania, predovšetkým u niektorých typov materiálov, ako napríklad u vysokolegovaných ocelí, hliníku, niklu a molybdénu. Stále väčšie využitie majú tieto metódy v automobilovom priemysle, kde sa využívajú na zváranie tenkých hliníkových materiálov.

Čerpací zdroj, aktívne prostredie a rezonátor tvoria tri základne časti laseru, vid' obr. 5.



Obr. 5 Princíp vzniku laserového lúča [12]

Čerpací zdroj laseru dodáva do systému potrebnú energiu. Využívajú sa tri základné typy čerpania:

- elektrický výboj
- optické čerpanie
- chemickou reakciou

Najčastejšie používaným typom je optické čerpanie, pri ktorom sú častice aktívnej látky excitované prostredníctvom absorpcie elektromagnetického žiarenia. K optickému čerpaniu je možné použiť iný laser, výbojku alebo laserovú diódu.

Čerpací zdroj je charakterizovaný výkonom, frekvenciou a veľkosťou zdroja. Minimálna hodnota výkonu čerpacieho zdroja sa nazýva prahová hodnota. Je to najnižšia hodnota výkonu čerpacieho zdroja, pri ktorej dôjde k inverzii populácie aktívnej látky. Frekvencia vyžarovania čerpacieho zdroja musí byť čo najviac podobná absorpčnej frekvencii aktívnej látky.

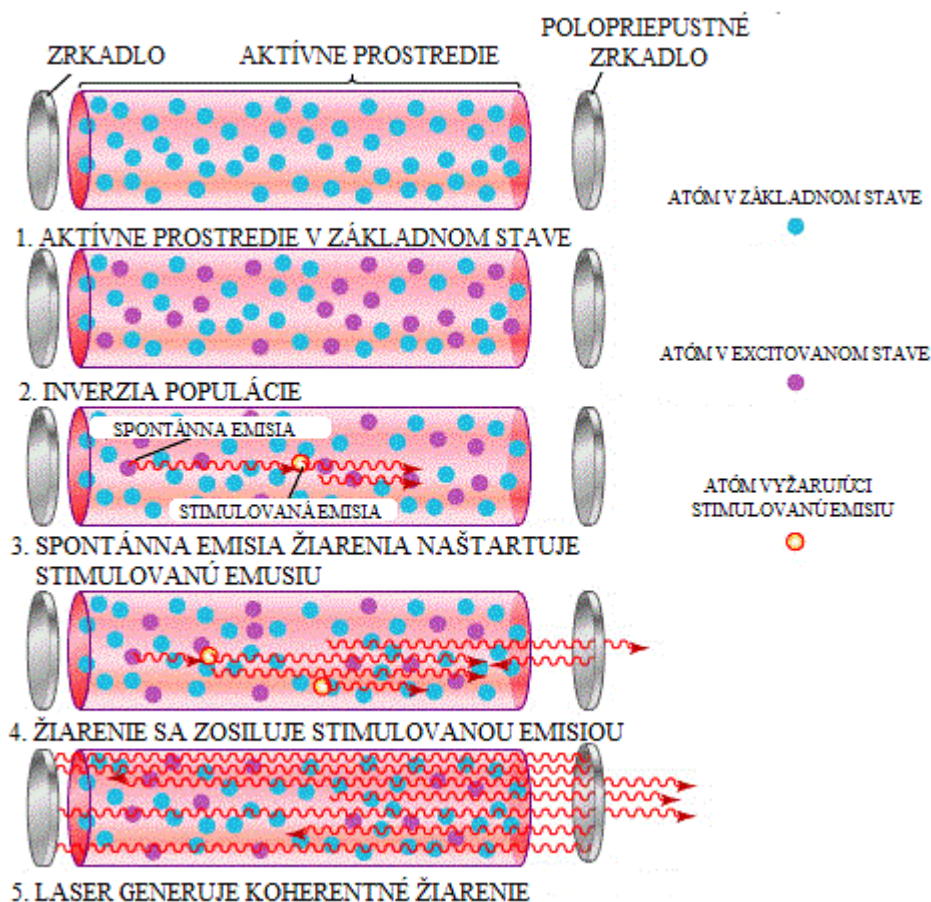
Aktívne prostredie môže byť tvorené pevnou, kvapalnou alebo plynnou látkou. V tomto prostredí dochádza k absorpcii (čerpaniu) energie z čerpacieho zdroja. Atómy alebo molekuly,



ktoré absorbujú energiu sa dostávajú do excitovaného stavu, ich elektróny sa dostávajú na vyššie energetické hladiny. Z týchto vyšších energeticky náročnejších hladín následne vplyvom vonkajšieho podnetu prechádzajú na nižšie hladiny, čo je sprevádzané uvoľnením energie vo forme fotónov. Podľa Bohrovej teórie elektrónového obalu častice prijímajú aj vyžarujú energiu vo forme kvánt, pri absorpcii fotónu prejde elektrón na vyššiu kvantovú dráhu, pri prechode na pôvodnú hladinu dochádza k vyžiareniu energie vo forme fotónu. Energia fotónov sa rovná rozdielu energetických hladín. Týmto javom sa zaoberá Planckova hypotéza, podľa ktorej je energia každého kvanta úmerná frekvencii elektromagnetického poľa. Vyžiarovanie energie vo forme fotónu pod vplyvom elektromagnetického poľa je nazývané stimulovaná emisia.

Rezonátor slúži na zefektívnenie celého procesu. Je tvorený dvoma zrkadlami od ktorých sa odrážajú fotóny a pohybujú sa pozdĺž osi rezonátora. Týmto je podporovaná emisia ďalších tzv. sekundárnych fotónov, ktoré majú rovnakú energiu ako pôvodný a sú s ním synchronizované, dochádza teda k reťazovej reakcii a k viacnásobnému zosilneniu žiarenia. Jedno zo zrkadiel rezonátora je polopriepustné, s odrazivosťou 80 – 90%. Toto zrkadlo prepúšťa časť žiarenia, po dosiahnutí kritického množstva fotónov.

Vďaka stimulovanej emisii má výstupné žiarenie rovnakú vlnovú dĺžku, rovnakú fázu kmitania a šíri sa paralelne jedným smerom. Celý proces je dobre znázornený na obr. 6.



Obr. 6 Znázornenie vzniku laserového lúča v rezonátore [12]

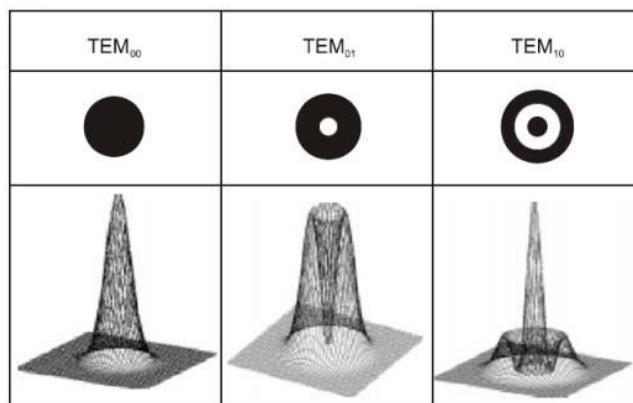
## 2.1 Vlastnosti laserového lúča [10],[13],[14],[15],[17]

Laserový lúč je monochromatický, teda žiary v úzkom rozmedzí vlnových dĺžok. Vyžarované elektromagnetické vlnenie sa vyznačuje konštantným fázovým rozdielom, čo má za následok, že lúč je časovo aj priestorovo koherentný. Vektor elektrického poľa v elektromagnetickej vlne je polarizovaný, čo má vplyv na reflexiu žiarenia.

Energia kontinuálneho laserového zväzku je charakterizovaná výkonom. Výkon je priamo úmerný intenzite žiarenia a veľkosti plochy prierehového rezu zväzkom. Energia laserového zväzku pracujúceho v pulznom režime je charakterizovaná energiou jedného pulzu  $E$  [J] a jeho dĺžkou  $T$  [ms]. Výkon zdroja ovplyvňuje hĺbku prieniku laserového zväzku do povrchu materiálu.

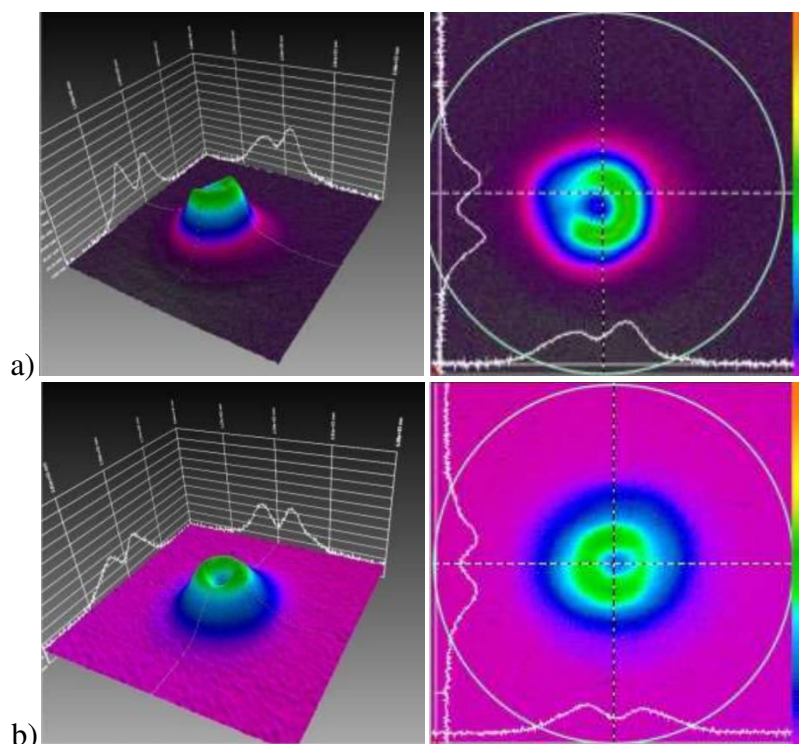
Rozloženie intenzity laseru a jeho rozbiehavosť predstavujú priestorové charakteristiky laserového zväzku a sú dané:

- usporiadaním zrkadiel rezonátora
- vlnovými vlastnosťami svetla
- vlastnosťami aktívneho prostredia
- priebehom zosilnenia aktívneho prostredia v prierehnom smere
- nehomogenitou aktívneho prostredia



Obr. 7 Rozloženie intenzity žiarenia [16]

Rozloženie intenzity môže mať rôzny charakter, v ideálnom móde  $TEM_{00}$  má rozloženie charakter Gausovej krivky, ktoré sa využíva na rezanie. Ďalším typom je  $TEM_{mn}$ , ktorý sa využíva na tupé zvary, znázornené sú na obr. 7. Dokonalá symetria módu je kľúčová pre veľa priemyslových aplikácií. Dnes existujú už moderné softvéry, ktorý môže vyobrazit' mód a nastaviť symetriu, vid' obr. 8.



Obr. 8 a) nesymetrický mód, b) nastavený symetrický mód [17]

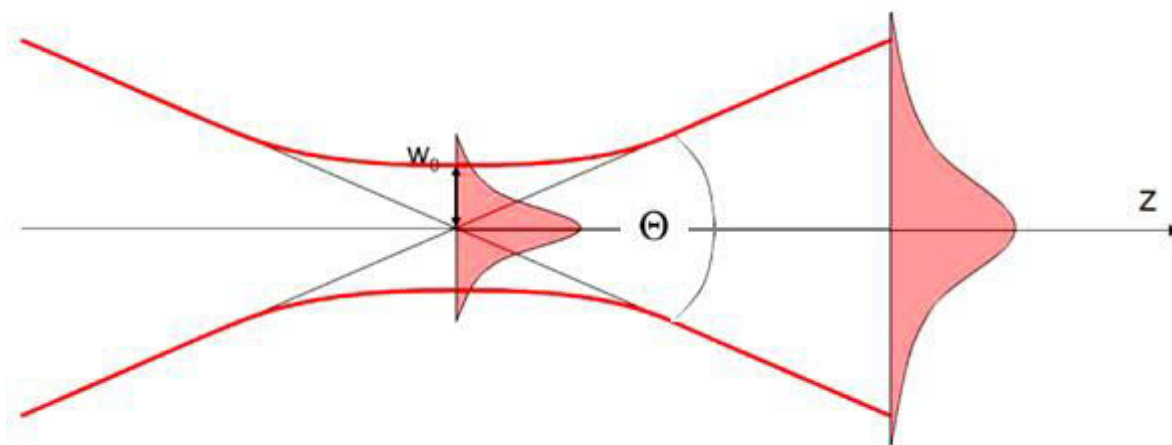
## 2.2 Fokusácia laserového zväzku [18],[19],[20],[21]

Jednou z hlavných výhod zvárania pomocou lasera je úzka, tepelne ovplyvnená oblasť. Na optimalizáciu tohto požiadavku je nutná fokusácia laserového zväzku. Fokusáciou nadobúda laserový lúč dostatočnú hustotu energie, potrebnú na dosiahnutie teploty tavenia daného materiálu. Najčastejšie používaným optickým materiálom sú parabolické zrkadlá alebo šošovky, vďaka ktorým je možno lúč nasmerovať do menšieho symetrickejšieho bodu. Lúč na rozdiel od elektrónového, nie je možné ovplyvniť elektromagnetickým ani statickým poľom. Pri Nd:YAG lasery je možné použiť šošovky z bežných silikátových materiálov avšak u CO2 lasery z dôvodu veľkej vlnovej dĺžky nie sú tieto materiály transparentné. Je potrebné používať šošovky z materiálov ako je selenid zinku alebo arsenid gália. Tie sa pre tieto vlnové dĺžky chovajú ako priehľadné.

Laserový lúč vychádzajúci z rezonátoru, ako bolo vyššie uvedené, má určité rozloženie intenzity a rozbiehavosť. Rozbiehavosť zväzku je charakterizovaná divergentným uhlom, ktorý najviac ovplyvňuje vlnová dĺžka zväzku. Na obr. 9. je znázornené šírenie zväzku z rezonátoru s Gaussovým rozložením intenzity. Uhol divergencie môžeme vypočítať za pomoci polomeru otvoru rezonátoru:

$$\theta = 2 \cdot M^2 \cdot \frac{\lambda}{\pi \cdot w_0} \quad [\text{mrad}] \quad (1)$$

kde:  $\theta$  - uhol divergencie [mrad]  
 $\lambda$  - vlnová dĺžka [mm]  
 $\pi$  - Ludolfovo číslo [-]  
 $M^2$  - faktor kvality zväzku [-]  
 $w_0$  - polomer otvoru rezonátora



Obr. 9 Šírenie Gausového zväzku z rezonátoru [20]

Kvalita zväzku je vyjadrovaná dvomi parametrami a to mierou možnosti fokusácie označovanou  $K$  a faktorom kvality zväzku  $M^2$ . Ich vzťah je:

$$K = \frac{1}{M^2} \quad [-] \quad (2)$$

Pre mód  $TEM_{00}$ , pri ktorom je rozloženie intenzity zväzku charakterizované Gaussovou krivkou sa faktor kvality a miera možnosti fokusácie rovnajú a nadobúdajú hodnoty 1 ( $M^2 = K = 1$ ). Reálne priemyselné lasery však ideálne rozdelenie nedosahujú a používajú aj módy vyšších radov. Preto sa parameter kvality  $K$  pohybuje v rozmedzí 0,5- 0,95.

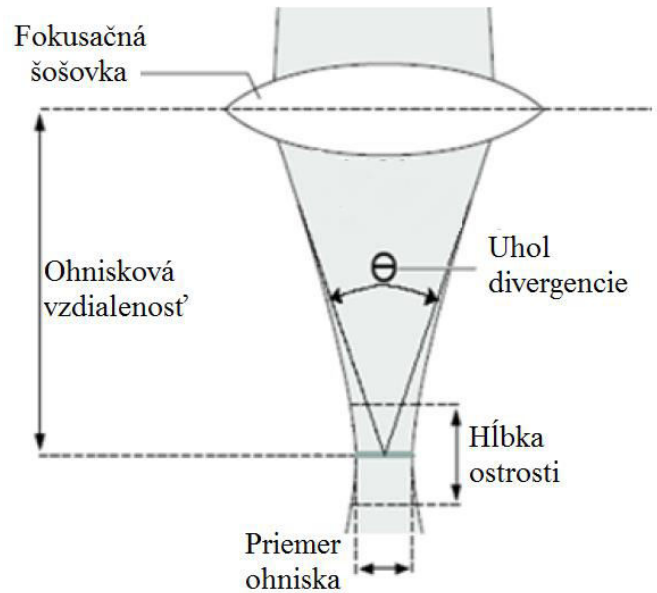
Divergencia nadobúda na význame so zvyšujúcou sa vzdialenosťou prenosu lúča. V tomto ohľade je veľkou výhodou používanie optického vlákna, kde nedochádza k tak veľkým



zmenám divergencie počas prenosu. Prenos laserového zväzku optickým vláknom sa však využíva prevažne u Nd:YAG laserov, CO<sub>2</sub> lasery majú príliš veľkú vlnovú dĺžku. Pre dosiahnutie malých divergencií musíme použiť vlákno s malým priemerom. Zo zvyšujúcim sa priemerom sa zväčšuje divergencia zväzku.

Následná fokusácia laserového lúča optikou do jedného bodu však nie je možná. V ohniskovej vzdialenosti vzniká mála plôška o určitom priemere. Lúč v okolí ohniskovej vzdialenosti vytvára oblasť nazývanú hĺbka ostrosti. Lúč má skoro v celej dĺžke rovnaký priemer ako plocha v ohnisku, vid' obr. 10.

Veľký vplyv na fokusáciu má práve vlnová dĺžka laserového lúča, ktorá výrazne ovplyvňuje divergenciu zväzku. Čím je divergencia väčšia, tým je fokusácia náročnejšia (vyššie požiadavky na optiku). Priemer ohniska je väčší s čím sa znižuje plošná hustota výkonu. Taktiež sa znižuje hĺbka ostrosti laserového lúča, ktorá je podstatná hlavne pri rezaní hrubých materiálov.



Obr. 10 Fokusácia zväzku [19]

Priemer ohniskovej plochy môžeme vypočítať z ohniskovej vzdialenosti a priemeru vstupného zväzku. Minimálny priemer zväzku v ohnisku pre mód TEM<sub>00</sub>:

$$D_{\text{foc}} = \frac{4 \cdot \lambda \cdot F_{\text{foc}}}{\pi \cdot D_0} = 2 \cdot \theta \cdot F_{\text{foc}} \quad [\text{mm}] \quad (3)$$

kde:  $F_{\text{foc}}$ - ohnisková vzdialenosť [mm]

$D_0$  – priemer vstupného zväzku [mm]

Minimálny priemer zväzku v ohnisku pre módy vyšších radov:

$$D_{\text{foc}} = \frac{4 \cdot \lambda \cdot F_{\text{foc}}}{\pi \cdot D_0 \cdot K} = \frac{4 \cdot \lambda \cdot F_{\text{foc}} \cdot M^2}{\pi \cdot D_0} = 4 \cdot \text{BPP} \cdot \frac{F_{\text{foc}}}{D_0} \quad [\text{mm}] \quad (4)$$

kde: BPP- parameter kvality [mm.mrad]

Kvalita výstupného fokusovaného zväzku je vyjadrovaná parametrom BPP (Beam Parameter Product). Tento parameter popisuje kvalitu kruhových symetrických zväzkov pevnolátkových laserov a je vyjadrený vzťahom:

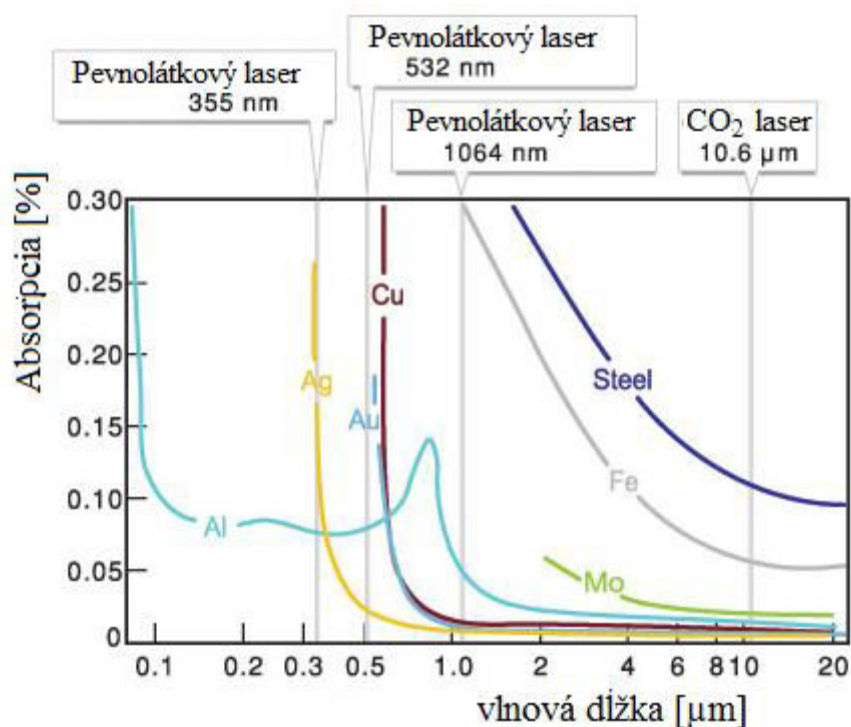
$$\text{BPP} = \frac{D_0 \cdot \theta}{4} = M^2 \cdot \frac{\lambda}{\pi} \quad [\text{mm.mrad}] \quad (5)$$

kde:  $w_0$  - polomer pásu zväzku v ohnisku [mm]

$\theta$  - uhol divergencie [mrad]

## 2.3 Absorpcia materiálu [14],[22]

Efektivita laserového zvárania je ovplyvňovaná taktiež absorpciou fotónov povrchom zváraného materiálu. Absorpcia určuje koľko tepelnej energie vznikne v danom materiály pri dopade laserového lúča o určitej intenzite. Kovové materiály sa vyznačujú tým, že ich reflexia pri vysokej teplote a vysokej výkonovej intenzite klesá, vďaka čomu dochádza k pohlteniu dopadajúceho žiarenia. Absorpcia je ovplyvňovaná taktiež drsnosťou, prítomnosťou oxidou alebo náterov na povrchu materiálu. Absorpcia je závislá od vlnovej dĺžky žiarenia, vid' obr.11. Z tohto dôvodu majú lasery rôzne oblasti využitia, niektoré sú už schopné meniť vlnovú dĺžku s čím sa zväčšuje ich uplatnenie v priemysle. Odrazivosť materiálov je uvedená v tabuľke 1.



Obr. 11 Závislosť absorpcie na vlnovej dĺžke [22]

Tab. 1 Odrazivosť materiálov [14]

Materiál	Odrazivosť [%]		
	0,7 μm	1,06 μm	10,6 μm
Hliník	87	93	97
Oceľ	58	63	93
Meď	82	91	98
Chróm	56	58	93
Nikel	68	75	95
Striebro	95	97	99

## 2.4 Zváranie laserom [23],[24],[25]

Podobne ako i iných metód zvárania, aj pri zváraní laserom hrá zvariteľnosť materiálov zásadnú rolu. Tabuľka 2 zobrazuje základné orientačné hodnoty, ktoré platia aj pre zliatiny týchto základných materiálov.

Tab. 2 Kombinácie zvariteľnosti jednotlivých materiálov za pomoci laseru [24]

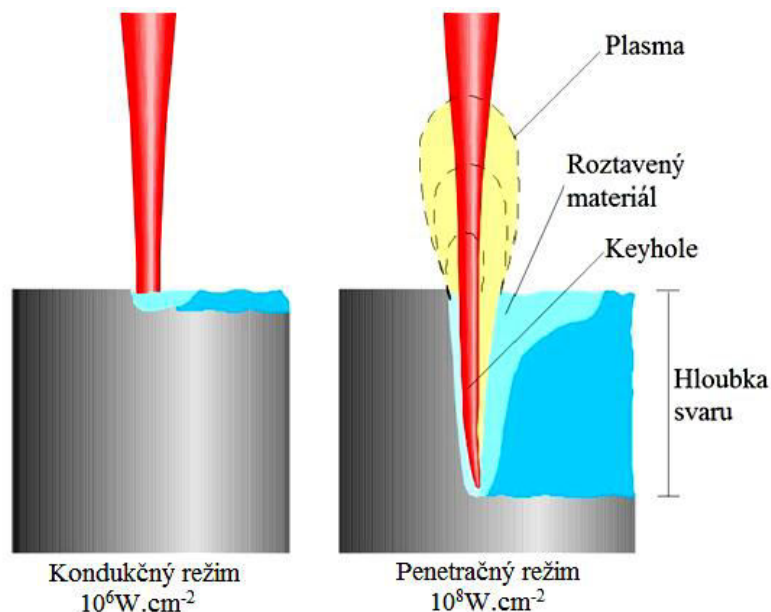
	Al	Ag	Au	Cu	Pd	Ni	Pt	Fe	Be	Ti	Cr	Mo	Te	W
Al	V													
Ag	U	U												
Au	U	V	V											
Cu	U	U	V	V										
Pd		V	V	V										
Ni	U		V	V	V	V								
Pt		U	V	V	V	V	V							
Fe			U	U	D	D	D	V						
Be			U	U	U	U		U						
Ti	U	U	U	U	U	U	U	U		V				
Cr			U		D	D	V	V		D				
Mo						U	V	D		V	V			
Te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

V - veľmi dobrá, D - dobrá, U – uspokojivá

Z dôvodu vysokej rýchlosti ochladzovania materiálu je nutné, aby obsah uhlíku v oceli nepresiahol 0,2%. Laser je s výhodou používaný napríklad u vysokolegovaných ocelí, niklu a molybdénu. Vďaka rýchlemu ohrevu je možné zvärať materiály z vysokou tepelnou vodivosťou ako meď, striebro a predovšetkým hliník, ako aj materiály s vysokou teplotou tavenia, ku ktorým patrí W, Mo, Ta, Zr alebo Ti.

Fokusačný bod je zameriavaný na povrch, alebo mierne pod povrch spracovávaného materiálu. Vplyvom vysokej hustoty a energie laserového zväzku dochádza ihneď k taveniu materiálu. Pri tavení sa niektoré zložky kovu odparujú, čím sa tvoria pary. Vďaka vysokej hustote energie v laserovom zväzku je oblasť kde vzniká tekutý zvarový kúpeľ veľmi malá a dochádza k rýchlemu prechodu tepla do objemu materiálu. Vďaka tejto skutočnosti sú teplom ovplyvnená oblasť a deformácie minimálne.

Zváranie pomocou laseru môže byť vykonávané dvoma principiálne odlišnými metódami. Jedná sa o kondukčný (nízkovýkonový) režim a penetračný (vysokovýkonový) režim, vid'. obr. 12.



Obr. 12 Metódy laserového zvárania [25]

V kondukčnom režime je použitý laserový lúč, ktorý má nízku hustotu energie. Hraničná hustota výkonu dosahuje hodnotu približne  $10^6 \text{W.cm}^{-2}$ . Pri jeho dopade na spájaný povrch dochádza iba k plytkému nataveniu povrchu. Vytvorené teplo je prostredníctvom kondukcie dostatočne rýchlo odvádzané do objemu materiálu. Teplota tavného kúpeľa nedosahuje vysoké hodnoty, je blízka teplote tavenia, vďaka čomu dochádza k minimálnej tvorbe pár. Výsledný zvar je plytký, má typický šošovkovitý tvar.

Pri vysokovýkonovom, penetračnom zváraní je použitý laserový lúč s vysokou hustotou výkonu, ktorý dosahuje  $10^8 \text{W.cm}^{-2}$ . Vzniká veľké množstvo tepla, ktoré nestíha byť odvádzané do objemu materiálu, dochádza k výraznému prehriatiu materiálu v oblasti zvaru a k jeho odpareniu. Týmto mechanizmom vzniká hlboký a úzky kráter, ktorý je nazývaný paroplynový kanál.

Pary sú vplyvom vysokej teploty ionizované a vytvárajú plazmu, ktorá cyklicky tryská vysokou rýchlosťou z miesta zvaru. Plazma fotónové žiarenie pohlcuje a tým znižuje účinnosť laserového zväzku. K odstraňovaniu plazmy sa najčastejšie používa bočná tryska s ochranným plynom Ar, Ar+CO<sub>2</sub>, He. Ďalším spôsobom ako je možné znížiť produkciu plazmy je zmena fokusačných parametrov. Cieľom je, zabrániť odparovaniu materiálu, kým nedôjde k dosiahnutiu teploty tavenia aj v podpovrchovej vrstve.

Pri pohľade zhora má paroplynový kanál tvar kľúčovej dierky, z čoho sa zaužíval anglický názov key-hole. Steny key-hole sú pokryté roztaveným materiálom. Energia laserového lúča sa v tomto priestore absorbuje prostredníctvom viacnásobných odrazov, dochádza teda k zväčšeniu absorpčnej plochy. Teplo je v tomto stave prenášané nielen kondukciou, ale aj konvekciou prostredníctvom tokov v tavenine. Vplyvom pohybu laserového zväzku, tlak pár premiestni natavený kov do zadnej časti zvarového kúpeľa, kde tuhne a vytvára zvarový spoj.

Pre dosiahnutie správneho tvaru a stability key-hole je potrebné vytvorenie tepelnej a tlakovej rovnováhy:

- Tepelná rovnováha je vytváraná medzi prívodom tepla z laserového zväzku a odvádzaním tepla. Podmienkou je, aby sa teplota rozhrania každej plôšky rovnala teplote vyparovania  $T_v$  daného kovu. Tepelnú rovnováhu je možné dosiahnuť vyvážením tepelného toku  $q_w$  a absorbovanej intenzity  $I_a$ . Tieto parametre je možné ovplyvniť uhlom sklonu steny  $\Theta_w$ . Teoreticky vypočítaný tvar key-hole, má podobu mierne zahnutého kužeľa, posun osy tohto kužeľa je závislý na rýchlosti a smere vektora zvárackej rýchlosti. Presná simulácia tvaru key-hole je veľmi komplikovaná, pretože na tvar pôsobí veľké množstvo parametrov, medzi ktoré patria laserové zváracie parametre (výkon, rýchlosť zvárania, vlnová dĺžka), fokusačné parametre a vlastnosti materiálu.
- Tlaková rovnováha je vytváraná medzi povrchovým napätím kvapalnej vrstvy kovu a ostatnými tlakmi, medzi ktoré patrí hydrostatický tlak, tlak oblaku odparujúceho sa materiálu a ďalšie.
- Tvorba plazmy môže výrazne ovplyvňovať parametre tepelnej aj tlakovej rovnováhy a tým sa podieľať na výslednom stave zvaru.

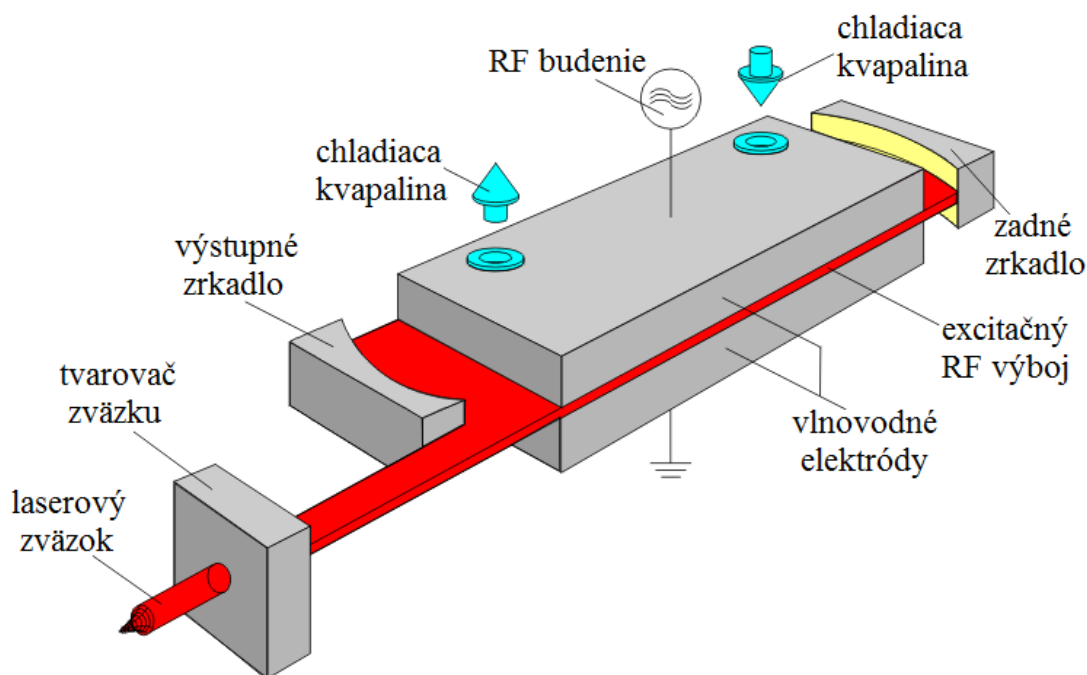
Kondukčné a penetračné zváranie môžu byť použité súčasne počas jedného zváracieho procesu. Pri striedaní penetračného a kondukčného režimu závisí na maximálnej intenzite laseru a na dĺžke trvania laserového impulzu. Je možné začať proces kondukčným zváraním a následne prejsť do penetračného režimu. V tom smere je zvárací proces veľmi variabilný, dá sa veľmi ľahko prispôbiť. Kombináciou oboch režimov dochádza k minimalizácii vneseného tepla a tým k zníženiu tvorbe trhlín.

Jednou z hlavných výhod laserového zvárania, je možnosť prispôbovať parametre tak, aby došlo k optimalizácii zváracieho procesu. U moderných zváracích systémov je toto

zabezpečované, počítačovou kontrolou čerpaceho zdroja. Počítačové systémy využívajú optické, plazmové, alebo akustického monitorovacie systémy, ktoré im poskytujú spätnú väzbu, vďaka čomu je možné prispôbovať výkon lasera v reálnom čase, počas zvaracieho procesu.

## 2.5 CO<sub>2</sub> laser [15],[26],[27],[28],[29]

Tieto lasery patria do skupiny plynových laserov. Táto veľká skupina laserov všeobecne využívajú ako aktívnu látku plyny alebo zmesi plynov a pár. Na opracovanie materiálov sa predovšetkým vyžíva CO<sub>2</sub> laser, ktorého aktívne prostredie tvoria aktívny plyn zložený zo zmesi hélia, plynného dusíku a oxidu uhličitého. Aktívne prostredie je budené buď elektrickým výbojom (DC-direkt current) alebo radio-frekvenčne (RF). U vysoko výkonových laseroch (prietokové lasery s výkonom cca nad 10kW) sa používa rezonátor s neustálym prúdením plynu. Lasery s nižším výkonom majú rezonátor hermetický uzavretý tzv. sealed-off laser. Na obrázku 13 je znázornený rezonátor, ktorý využíva na budenie aktívneho plynu radio-frekvenčné vlnenie. Prebieha medzi dvoma elektródami, ktoré vďaka svojej veľkej ploche difúzne chladia plyn v rezonátore. Veľkou výhodou týchto laserov je dlhá životnosť, vysoká spoľahlivosť a nízke prevádzkové náklady.



Obr. 13 Princíp difúzne chladeného radio-frekvenčne budeného CO<sub>2</sub> lasera [28]

CO<sub>2</sub> lasery všeobecne patria k najvýkonnejším typom laserov, dosahujú výkony cez 20kW. Najslabšie CO<sub>2</sub> lasery (do 1500W) sa využívajú na značenie, gravírovanie a rezanie nekovových materiálov, kedy nie je možné použiť lasery s malou vlnovou dĺžkou. Lasery so stredným výkonom od 500 do 6000W sa používajú prevažne na rezanie plechov (zvyčajne do hrúbky 25mm) a profilového materiálu. Na zvaranie sa používajú CO<sub>2</sub> lasery s výkonom nad 6000W, ktoré dosahujú hĺbku zvaru aj 20mm.

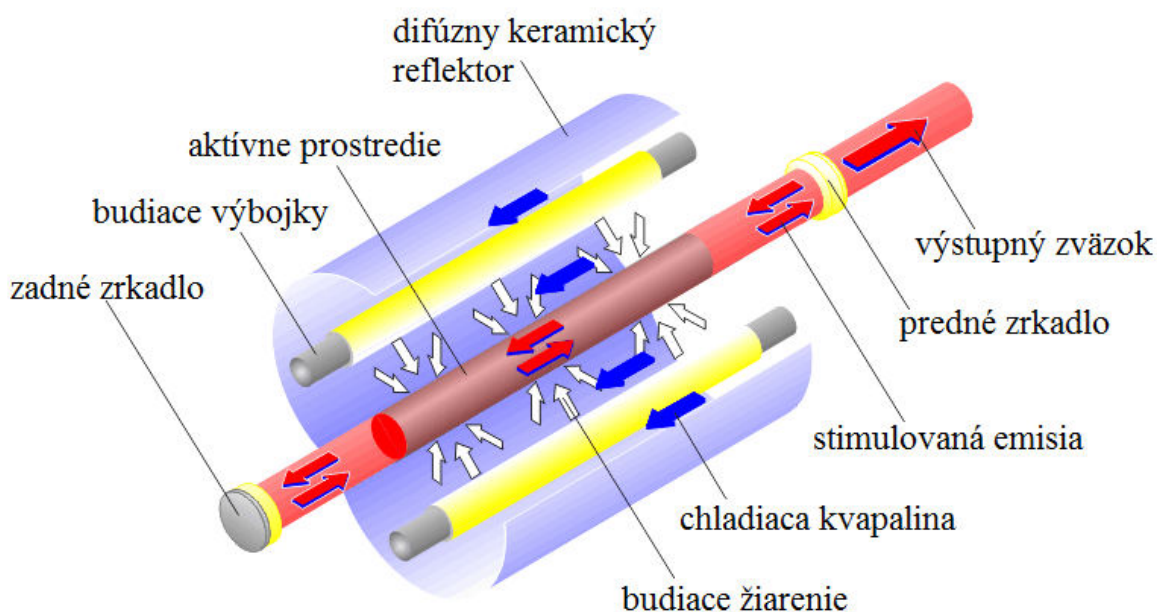
Veľká nevýhoda CO<sub>2</sub> lasera oproti ostatným je, že výstupný laserový zväzok nie je možné kvôli veľkej vlnovej dĺžke (10,6μm) viesť optickým vláknom. Z tohto dôvodu je len veľmi obťažne využívať tieto lasery na robotizovaných pracoviskách. Už pred desaťročím sa firmy rozhodli pre nový koncept a umiestnili laser priamo na rameno kĺbového robota, s čím skrátili optickú cestu laserového zväzku. Pravdaže bolo k tomu potreba zmenšiť a znížiť hmotnosť lasera a zároveň zvýšiť nosnosť a tuhosť robota.

## 2.6 Nd:YAG laser [15],[25],[27],[28]

Nd:YAG laser je najstarším typom pevnolátkového laseru používaného v priemysle. Pri zváraní ich môžeme využívať v dvoch základných režimoch:

- kontinuálny (CW)
- impulzný

Ako aktívne látky sa u neodýmových laserov používajú predovšetkým monokryštáli YAG (ytrium aluminium granát), ktoré sú aktivované iónmi neodýmia Nd. Vývoj Nd:YAG laserov sa zameriava na zvyšovanie účinnosti čerpačích zdrojov. Najstarším typom sú lasery budené pomocou kryptónových lúčových sietí označované LPSS (lamp pumped solid state). V impulznom režime sa používajú kryptónové zábleskové lampy, v kontinuálnom kryptónové oblúkové lampy. Usporiadanie jednotlivých komponentov je znázornené na obrázku 14.

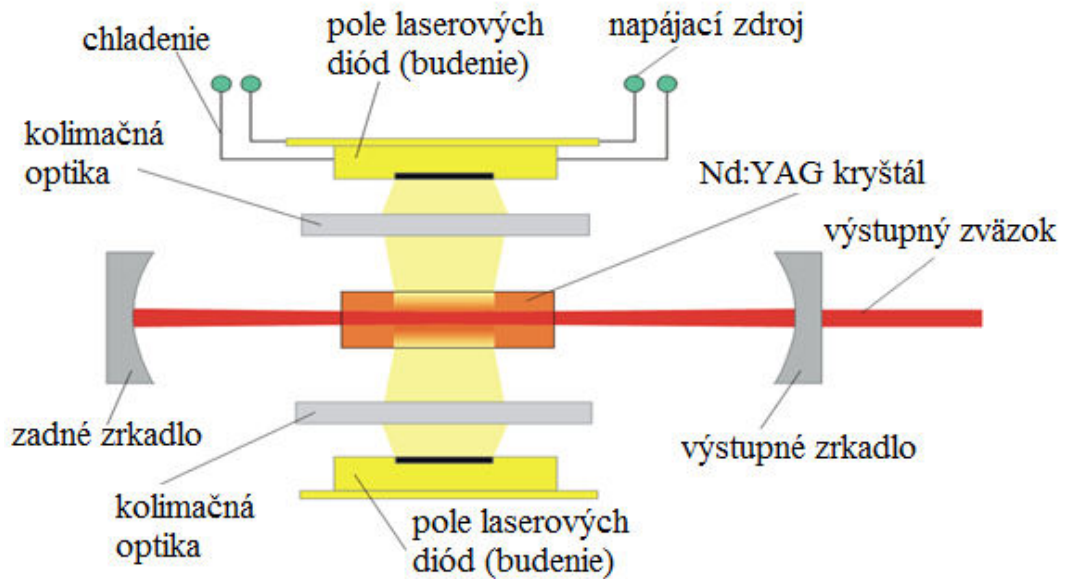


Obr. 14 Nd:YAG laser budený výbojkami [28]

Z celého spektra je však absorbované iba žiarenie v rozmedzí vlnových dĺžok zeleného a modrého svetla. Zvyšok svetla sa premieňa na teplo, ktoré sa musí odvieť chladením. Preto účinnosť laseru sa pohybuje iba okolo 5%. Priemerný výstupný výkon Nd:YAG laserov sa pohybuje medzi 0,3 – 3 kW, použitím nových technológií je možné zvýšiť maximálny výkon do 6kW. S výhodou sa používajú pri impulznom zváraní, kde dosahujú vysokú energiu pulzu pri nízkom priemernom výkone. Nevýhodou je naopak nízka účinnosť, vysoké nároky na chladenie a krátka životnosť výbojok, ktorá sa pohybuje okolo 1000 hodín.

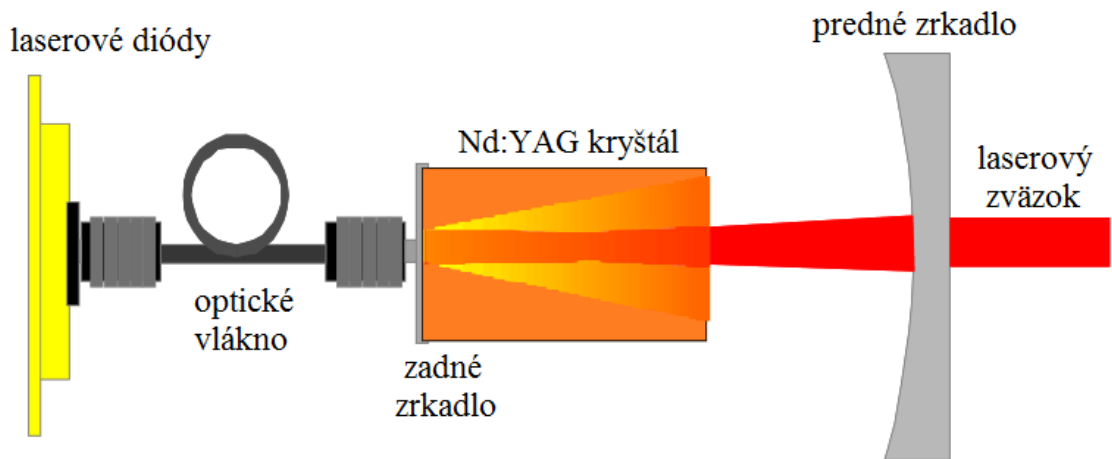
V nových typoch laserov sú používané diódy, označované DPSS (diode pumped solid state). Diódy vyžarujú iba veľmi úzke spektrum žiarenia. Vďaka tejto skutočnosti nedochádza k tak veľkým stratám a ich účinnosť je okolo 7%. Taktiež DPSS Nd:YAG laseri majú lepšiu kvalitu zväzku a dosahujú výkon až do 6kW.





Obr. 15 DPSS Nd:YAG laser s tranzverzálnym budením [28]

Diódové Nd:YAG lasere môžu mať čerpací zdroj umiestnený na boku (tranzverzálne budenie), vid' obr. 15, alebo vzadu (zadné/end-pumped budenie), vid' obr. 16. Výhodou zadného čerpania je, že diódové žiarenie je do rezonátoru privádzane optickým vláknom, a diódy môžu byť teda umiestnené mimo rezonátor. Ďalšou výhodou zadného čerpania je lepšia kvalita laserového lúča, naopak vyššie výkony je možné dosiahnuť u laseru s bočným čerpaním.

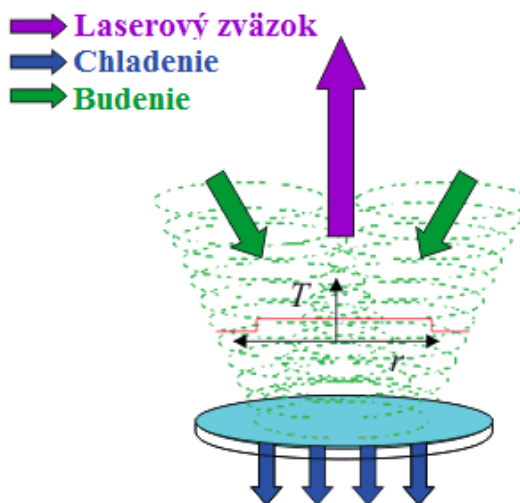


Obr. 16 DPSS Nd:YAG laser so zadným budením [28]

Jednou z dôležitých pozitívnych vlastností Nd:YAG laseru oproti CO<sub>2</sub> laseru je možnosť použitia optických káblov pri prenose laserového lúča. Výstupná vlnová dĺžka Nd:YAG laseru je 1,06  $\mu\text{m}$ . Táto hodnota spadá do rozpätia vlnových dĺžok, ktoré sú šírené optickým káblom s nízkou stratou. Vďaka tejto skutočnosti je možné šírenie laserového žiarenia aj na vzdialenosti niekoľko stoviek metrov s minimálnymi stratami. Použitie optických káblov je veľkou výhodou predovšetkým v robotických a mnohoosých uplatneniach laserového zvärania. Pri použití optických káblov je tiež možné spájanie laserových lúčov z dvoch a viac zdrojov. Zaujímavou aplikáciou tohto princípu je použitie dvoch laserov s výkonom 2 kW, ktoré pracujú v kontinuálnom móde a jedného laseru s výkonom 1 kW, pracujúceho v impulznom móde. Ďalšou možnosťou je použitie jedného zdroja laserového lúča, ktorý je v čase odkláňaný do rôznych optických káblov a je využitý vo viacerých oblastiach.

## 2.7 Diskový laser [25],[27],[28]

Tieto lasery patria do skupiny pevnolátkových laserov, líšia sa geometriou aktívneho prostredia. V klasickom Nd:YAG lasery tvorí aktívne prostredie tyčinka s dĺžkou 15-20cm a priemerom niekoľko mm, u diskového laseru je to disk s priemerom 10mm a hrúbkou 0,25mm, vid' obr. 17. Hlavnou výhodou diskového laseru je skutočnosť, že teplota v aktívnom prostredí je rovnomerná v celom objeme disku, vďaka čomu je možné dosiahnuť vysokú kvalitu výstupného laserového lúča aj pri použití vysokých výkonov, ktoré môžu dosahovať aj 16kW. Nevýhodou je nižšia účinnosť okolo 15-20% a nižšia životnosť. U diskových laserov sa okrem Nd:YAG ako aktívne prostredie využíva Nd:YVO<sub>4</sub> alebo Yb:YAG. Kotúč vyrobený z Yb:YAG v porovnaní z Nd:YAG zvyšuje účinnosť čerpania zo 76% na 91%. Lasere sú vybavené oscilátorom s vlnový rozsahom od IR 1,064μm po UV 0,355μm.

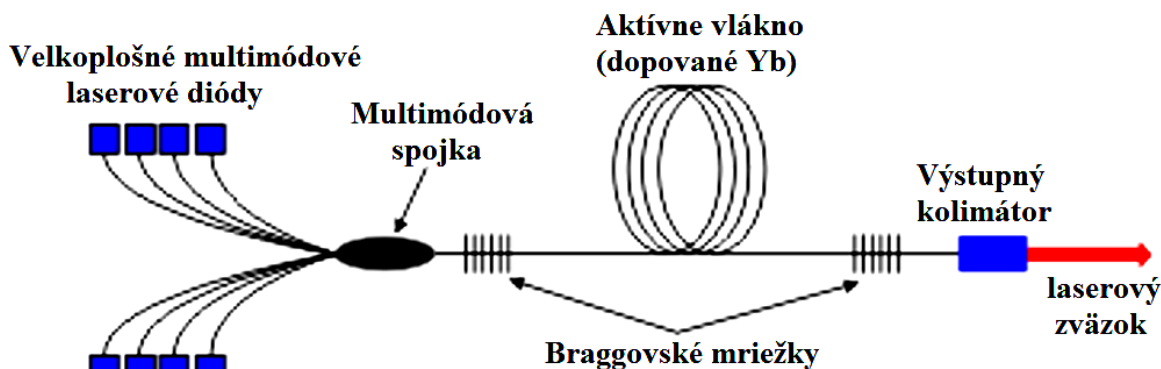


Obr. 17 Princíp diskového laseru [28]

## 2.8 Vlákňový laser [25],[28],[30]

Medzi moderné typy pevnolátkových laserov patrí vlákňový laser. Jeho aktívne prostredie vo forme optického vlákna je obohatené o yterbium (Yb). Táto konštrukcia rezonátoru je podstatne tepelne stabilnejšia. Ako čerpací zdroj sú používané laserové diódy a úlohu zrkadiel spĺňajú Braggovské mriežky, ktoré sú vytvorené na optickom vlákne, výstupný lúč prechádza optickým kolimátorom, vid' obr. 18. Vlnová dĺžka výstupného zväzku je okolo 1,06μm.

Tieto lasery môžu pracovať v kontinuálnom aj impulznom režime. Má podobné výhody ako diskový laser, avšak s vyššou účinnosťou, ktorá dosahuje 30 – 35%, dlhšou životnosťou a nízkymi pracovnými nákladmi. Vďaka použitej technológii je laser kompaktný, čo uľahčuje manipuláciu a priestorové nároky. Výhodou je tiež možnosť spájať jednotlivé laserové moduly a tým zväčšovať výkon až na 80 kW.



Obr. 18 Princíp vlákňového laseru [28]

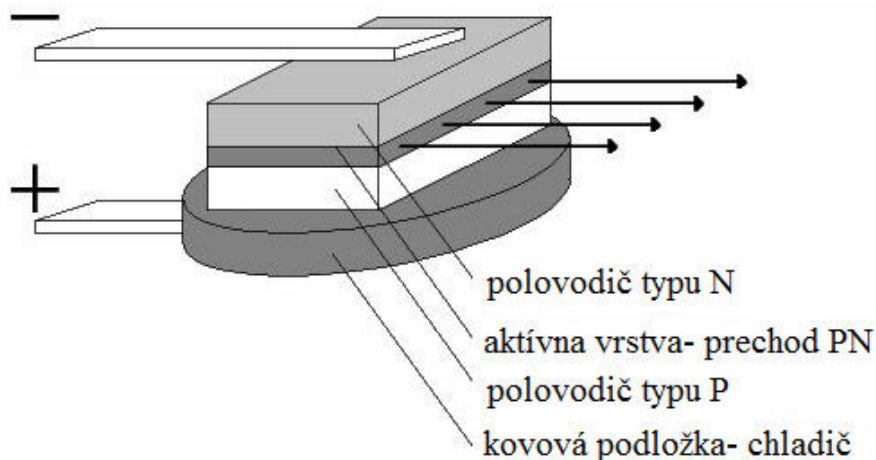


## 2.9 Polovodičový laser [12],[15],[26],[27],[28],[30]

Tieto lasery ako aj ostatné využívajú stimulovanú emisiu, ktorá prebieha v rezonátore. Na stimuláciu sa využíva časť generovaného žiarenia. U injekčných polovodičových laserov, ktoré čerpajú elektrický prúd vzniká aktívne prostredie pri injekcii elektrónov a dier z prechodu PN. Pri malom budiacom prúde prechádzajúcim prechodom PN v priamom smere vzniká spontánna emisia, ktorá sa šíri všetkými smermi a má náhodnú fázu. Zo zvyšujúcim sa prúdom sa pomaly zvyšuje rýchlosť žiarivej rekombinácie. Postupne sa zvyšuje hustota emitovaných fotónov, ktoré následne stimulujú ďalšiu rekombináciu. Keď sa vďaka zvyšujúcemu prúdu dostaneme na prahovú hodnotu  $I_p$ , pri ktorej nastáva rovnováha stimulovaného zosilnenia so stratami, žiarenie sa stáva koherentným. Je to prechod z nekoherentného superluminiscenčného žiarenia do koherentného laserového režimu. To znamená že emitované žiarenie sa stáva lineárne závislé na budiacom prúde.

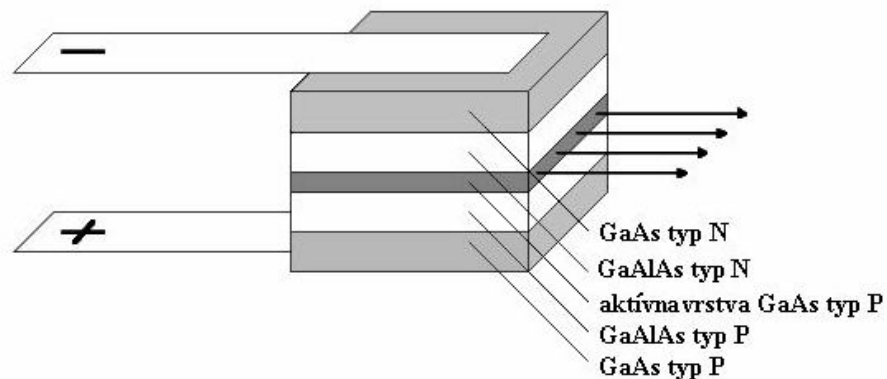
Lasery delíme podľa vnútornej štruktúry polovodiča na:

- a) Homoštruktúrny laser- na tomto type bolo prvý krát v roku 1962 dosiahnutého koherentného žiarenia. Aktívne prostredie je tvorené prechodom PN a jeho šírka je určená difúznou dĺžkou menšinových nosičov. Pri silne dopovanom GaAs je hrúbka aktívneho prostredia 1-3 $\mu$ m. Jednotlivé časti sú z materiálov, ktoré majú iba rozdielnu prímiesovú dotáciu. Kvôli tomu majú len malý rozdiel v indexe lomu a spolu s malou potenciálovou bariérou vznikajú veľké straty žiarenia v ostatných vrstvách polovodiča. Na dosiahnutie koherentného žiarenia potrebujeme vysoký prahový prúd s dostatočným chladením. Tým pádom je účinnosť veľmi malá, kvôli čomu sa tento typ veľmi nevyužíva. Štruktúra je zobrazená na obr. 19.



Obr. 19 Princíp homoštruktúrneho laseru [30]

- b) Heteroštruktúrny laser- kryštalová vrstevná štruktúra obsahuje aspoň jednu epitaxnú vrstvu odlišného chemického zloženia. V tejto oblasti vzniká heteroprechod, ktorý má skokovú zmenu indexu lomu svetla. Vďaka tomu sa sústreďuje žiarenie a injektované nosiče do zvolených oblastí. Tento optický vlnovod môže byť zároveň aj aktívnym prostredím alebo sa môžu líšiť. Heteroštruktúrne lasery delíme podľa počtu heteroprechodov na lasery s jednou heteroštruktúrou alebo s dvojitou heteroštruktúrou zobrazený na obrázku 20.

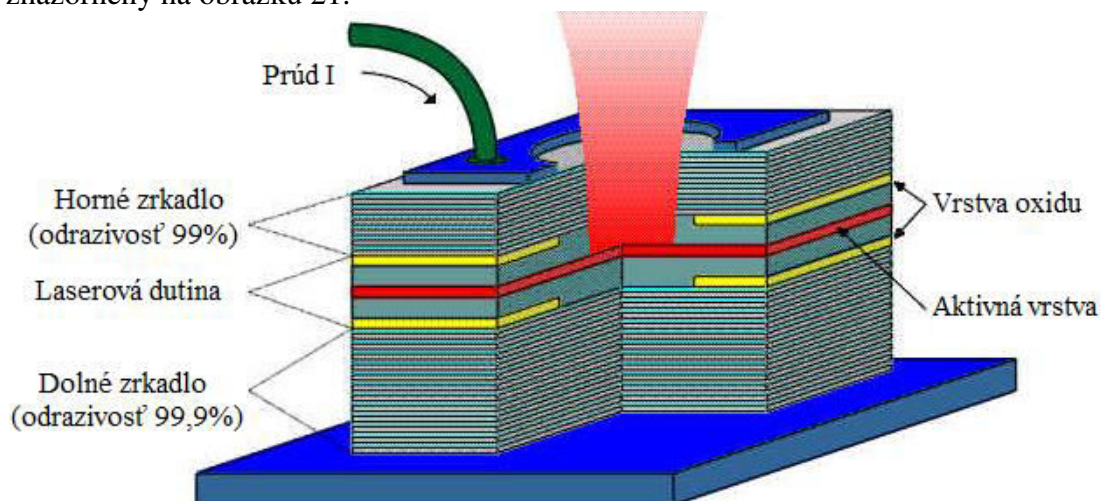


Obr. 20 Princíp laseru s dvojitou heteroštruktúrou [30]

Lasery s dvojitou heteroštruktúrou majú vysokú účinnosť, až 75%. Je to vďaka dvom epitaxným vrstvám so skokovou zmenou indexu lomu svetla. Žiarenie ako aj nosiče náboja sú z oboch strán sústredené do veľmi tenkého aktívneho prostredia s hrúbkou približne 100nm. Nahromadenie nosičov náboja je tak veľké, že režimu laseru sa dosahuje už pri malých prahových prúdoch, desiatky mA.

- c) Lasery s kvantovými jamami- laser s dvojitou heteroštruktúrou a aktívnou vrstvou, ktorá je veľmi tenká s odlišným chemickým zložením. Pri generovaní žiarenia sa v kvôli malej hrúbke aktívnej vrstvy uplatňujú kvantové javy. Preto sa aktívne prostredie nazýva kvantová jama. V súčasnosti je už možné vytvoriť vrstvu o hrúbke jednej atómovej roviny. Bežne sa hrúbka pohybuje okolo 10nm a na dosiahnutie laserového režimu postačuje prahový prúd v desiatkach mA. Dosahujú vysoké účinnosti cez 80%.

Ďalšie typy sú diódy s rozprestretou spätnou väzbou alebo POLE laserové diódy. Práve POLE laserové diódy dosahujú veľké optické výkony až niekoľko málo kW. Laserové diódy sa delia aj podľa konštrukcie, miesta vyžarovania na hranou vyžarujúce laserové diódy a plochou vyžarujúce laserové diódy. Tie druhé dosahujú vyšších účinností a ich princíp je znázornený na obrázku 21.



Obr. 21 Princíp laserovej diódy vyžarujúcou plochou [30]

Nevýhodou polovodičových laserov je nižšia kvalita výstupného zväzku. Medzi výhody patrí kompaktnosť, vysoká účinnosť, nízke obstarávacie aj prevádzkové náklady, vysoká životnosť a možnosť preladovania vlnovej dĺžky generovaného žiarenia v širokom spektre. Preladovanie sa pohybuje v rozmedzí 790-980nm a uskutočňuje sa zmenou zastúpenia jednotlivých prvkov v polovodiči. Výstupný zväzok má pravouhlý profil so skoro konštantným rozložením intenzity žiarenia. Preto sa s výhodou využívajú na povrchové tepelné spracovanie, naváranie, spájkovanie a na kondukčné zvaranie.

### 3 OCHRANNÉ PLYNY [10],[31],[32],[33],[34],[35]

Ochranná atmosféra zohráva významnú úlohu v zvaracích procesoch. Jej hlavný význam je chrániť zvarový kov pred okolitou atmosférou, ktorá obsahuje nežiaduci kyslík, dusík či vlhkosť. Zabraňuje oxidácii, vzniku nitridov či pórov. Zváranie sa väčšinou uskutočňuje v polohách PA alebo PB, preto významnú úlohu pri ochrane zvaru zohráva hustota ochranného plynu. Pri laserovom zváraní tak ako aj pri iných technológiách sa využívajú ochranné zmesi plynov. Ich základ je najčastejšie tvorený inertnými plynmi ako hélium, argón a ich kombinácia. V závislosti od základného materiálu sa pridávajú aktívne plyny ako oxid uhličitý, dusík či vodík, ktoré v aj v malých množstvách ovplyvňujú zvarový proces (termicky a metalurgicky).

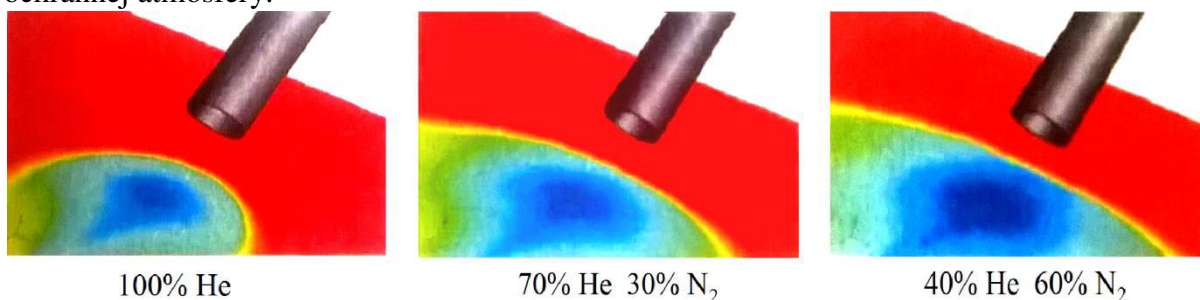
Hélium- je jednoatómový inertný plyn, ktorý má malú hustotu ( $0,18 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), niekoľko násobne menšie ako vzduch. Táto vlastnosť pri ochrane zvarového kovu je nevýhodná. Hélium stúpa hore čím sa znižuje účinnosť ochrany. Na dostatočnú ochranu je potreba väčšieho prietoku plynu ( $30 - 35 \text{ l/min}$ ). Hélium má vysoký ionizačný potenciál ( $24,56\text{eV}$ ) a odolnosť k rozpadu. To znamená, že ionizácia čiže vznik plazmy je minimálny. Zvary majú pri použití hélia väčšiu hĺbku závaru. Často sa používa pri zváraní hliníku s  $\text{CO}_2$  lasermi. Nevýhodou tohto plynu je vysoká cena, preto sa používa pri vysokých výkonoch kde je potreba zamedziť vznik plazmy.

Argón- Tak ako hélium aj argón je jednoatómový inertný plyn. Argón má väčšiu hustotu ako vzduch ( $1,78 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), čo spôsobuje jeho priaznivé klesanie k zvarovému kovu. Pri zvaracom procese preto nie je potreba k dostatočnej ochrane zvarového kovu tak veľkého prietoku ( $12 - 20 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ ). Argón má v porovnaní s Héliom nízky ionizačný potenciál ( $15,76\text{eV}$ ). To znamená, že pri vyššej hustote vnášanej energie dochádza k ionizácii plynu čiže k vzniku plazmy.

Dusík- je dvojitomový reaktívny plyn, ktorý má hustotu blížiacu sa vzduchu ( $1,25 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Spôsobuje vznik nitridov, ktoré môže mať za následok vznik zvarových chýb a zníženie mechanických vlastností zvaru. Avšak existujú prípady, kedy jeho prítomnosť zlepšuje mikroštruktúru a odolnosť pred koróziou niektorých druhov austenitických alebo duplexných ocelí. Jeho ionizačný potenciál je nízky ( $12,85\text{eV}$ ), takže jeho prítomnosť podporuje vznik plazmy.

Oxid uhličitý- je reaktívny molekulový plyn, ktorý disociuje na  $\text{CO}$  a  $\text{O}_2$ , čo spôsobuje možnosť oxidácie zvarového kovu a tvorbu karbidov. Vďaka rekombinácii vzniká širší profil zvaru. Má nižší ionizačný potenciál ( $14,4\text{eV}$ ), podporuje vznik plazmy. Má vysokú hustotu ( $1,98\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), takže priaznivo vytesňuje okolitú atmosféru. To ako prítomnosť oxidu uhličitého v ochrannej atmosfére ovplyvňuje zvar a proces zvárania je predmetom experimentu.

Na obrázku 22 zo simulácie je veľmi dobre vidieť vplyv hustoty plynu na tesniaci účinok ochrannej atmosféry.



Obr. 22 Vplyv hustoty ochrannej atmosféry na tesniaci účinok [35]

Oblasť s nulovým obsahom kyslíku je označená tmavomodrou farbou, zelená farba označuje oblasť s obsahom 10%  $\text{O}_2$  a červená s 20%  $\text{O}_2$ .

Tabuľka 3 obsahuje vhodnosť rôznych plynov a ich zmesí pre rôzne zvárané materiály CO<sub>2</sub> laserom.

Tab. 3 Vhodnosť plynov a ich zmesí pre rôzne zvárané materiály CO<sub>2</sub> laserom. [35]

Materiál	Zvárací plyn	Poznámka	Formovací plyn
Bežné uhlíkové ocele C-Mn ocele	He	Pre všetky výkony, koaxiálna a bočná tryska, vysoká kvalita zvaru	Ar
	Ar	Pre výkony do 3kW, koaxiálna a bočná tryska	
	Ar/30% He Ar/50% He	Koaxiálna a bočná tryska, vysoká kvalita zvaru	
	Ar/10% O <sub>2</sub>	Pre výkony do 5kW, koaxiálna tryska	
	Ar/20% CO <sub>2</sub>	Pre výkony do 5kW, bočná tryska, citlivé na nastavenie polohy trysky, akceptovateľná kvalita zvaru pre nízkouhlíkové oceli	
	Lasgon <sup>®</sup> C (He/Ar/CO <sub>2</sub> )	Pre výkony do 8kW, bočná tryska, vysoká kvalita zvaru hlavne pre povlakované materiály	
Austenitické a superaustenitické nerezové ocele	Ar/6-10% H <sub>2</sub>	Pre výkony do 5kW, koaxiálna a bočná tryska, vysoká zváracia rýchlosť, lesklý povrch zvaru	Ar/H <sub>2</sub>
	Ar	Pre výkony do 3kW, koaxiálna a bočná tryska	
	Ar/30% He Ar/50% He	Koaxiálna a bočná tryska	
	He	Pre všetky výkony, koaxiálna a bočná tryska	
	N <sub>2</sub>	Koaxiálna a bočná tryska, zvar obsahuje nitridy	
Feritické nerezové ocele	Ar	Pre výkony do 3kW, koaxiálna a bočná tryska	Ar
	Ar/30% He Ar/50% He	Koaxiálna a bočná tryska	
	He	Pre všetky výkony, koaxiálna a bočná tryska	
Austeniticko-feritické oceli (duplexné)	N <sub>2</sub>	Koaxiálna a bočná tryska, zvar obsahuje nitridy	N <sub>2</sub>
	Ar/N <sub>2</sub> zmesi	Koaxiálna a bočná tryska	
	He/N <sub>2</sub> zmesi	Pre všetky výkony, koaxiálna a bočná tryska	
Hliník a jeho zliatiny	Ar/30% He Ar/50% He He/30% Ar	Koaxiálna a bočná tryska, veľká hĺbka prievaru, dobrá kvalita zvaru	Ar/He
	He	Pre všetky výkony, koaxiálna a bočná tryska	

### 3.1 Doprava ochranného plynu [35],[36]

Ďalšou funkciou ochrannej atmosféry je neustále odľukovanie plazmy pri laserovom zváraní. Plazma vzniká zahriatím par kovu a odoberá energiu laserového lúča. To spôsobuje nerovnomernú hĺbku zvaru či prevýšenie koreňa. Odfúknutím plazmy sa zvyšuje účinnosť a kvalita zvaru.

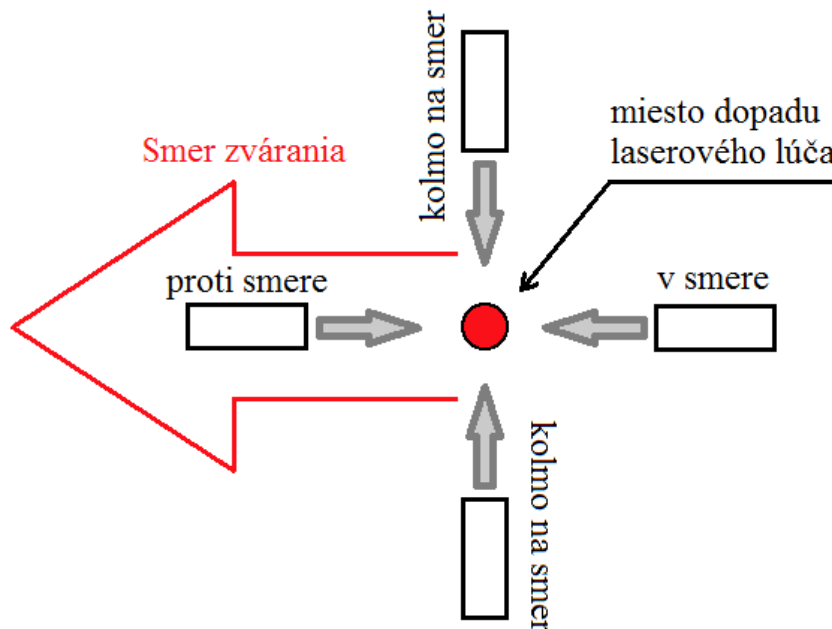
Preto je dôležité zabezpečiť správnu dopravu ochranného plynu do celej zvarovej oblasti. Vektor prúdiaceho ochranného plynu je orientovaný súosovo-koaxiálne s laserovým lúčom alebo dopadá na zvarovú oblasť z bočnej trubice, vid'. obr. 23. Prípadne sa kombinujú.



Obr. 23 Spôsoby dopravy ochranného plynu [36]

Výhodou koaxiálnej trysky je nižšia spotreba plynu s perfektnou tesniacim účinkom. Nevýhodou je slabé ochladzovanie a odľukovanie plazmy s čím vznikajú problémy s prehrievaním stien trysky a absorpciou laserového lúča plazmou. Ďalšou nevýhodou je slabá ochrana zvarového kúpeľa pri vysokých zvarových rýchlostiach.

Pri prúde plynu z bočnej trysky musíme uvažovať orientáciu trysky k vektoru zvarovej rýchlosti. Pokiaľ pri zvaracom procese sa pohybuje hlava a zvarovec je stacionárny, môžu nastať tri situácie nastavenia trysky, vid' obr. 24:



- Proti smere- je orientácia vektoru zvarovania opačná od vektoru prúdenia plynu, preto sa ich rýchlosti odčítavajú. Pokiaľ by sa jednalo o laminárne prúdenie a veľkosť oboch vektorov by bola rovnaká, potom by mal ochranný plyn voči zvarovému kúpeľu nulovú rýchlosť. To znamená, výborná ochrana zvarového kovu, ale zlé odľukovanie plazmy.

Obr. 24 Poloha bočnej trysky k smeru zvarovania [35]

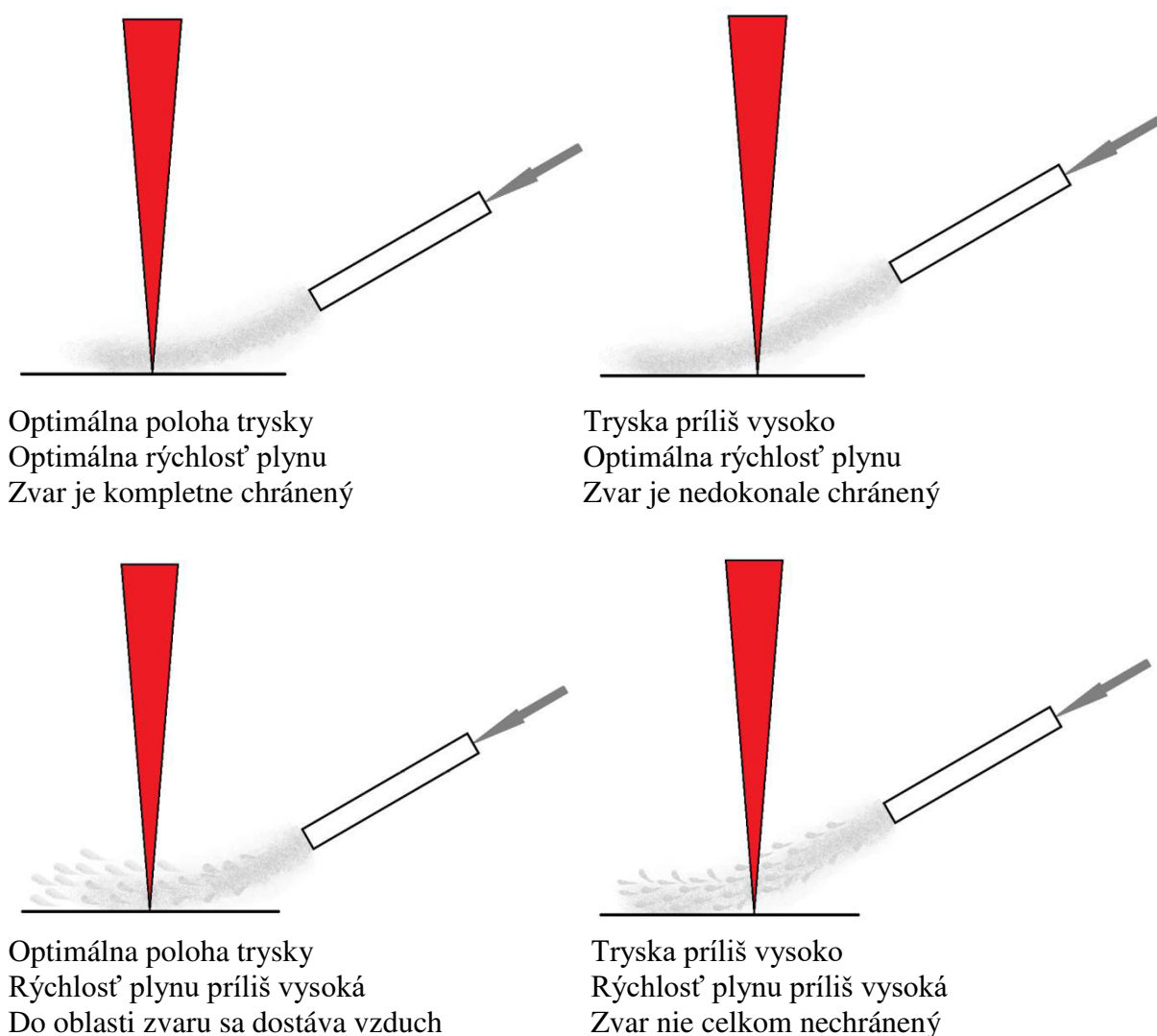
- V smere- je orientácia vektoru zvarovania a prúdenia plynu totožná, preto sa ich veľkosti sčítavajú. Súčtom získame rýchlosť prúdiaceho plynu voči zvarovému kúpeľu, ktorá je vysoká. V tomto prípade môžu nastávať prechody z laminárneho prúdenia do turbulentného. To



môže viesť k primiešaniu okolitej atmosféry do ochrannej a tým znížiť jej účinok. Výhodou tohto usporiadania je výborné odľudkovanie plazmového obláčiku.

- Kolmo na smer- oba vektory rýchlostí sa sčítavajú a získavame primeranú ochranu zvarového kovu s dostatočným odľudkovaním plazmy.

Je potrebné dôkladne zvážiť každú aplikáciu a prispôbiť jej nastavenie trysky, prípadne uskutočniť experimenty s rôznymi nastaveniami, vďaka ktorým zistíme optimálnu polohu a rýchlosť prúdenia ochranného plynu. Na tieto učili sa využíva šlírova zobrazovacia metóda, vďaka ktorej môžeme pozorovať prúdenie plynov. Na obr. 25 sú znázornené najčastejšie chyby nastavenia bočnej trysky a rýchlosti prúdenia plynu.



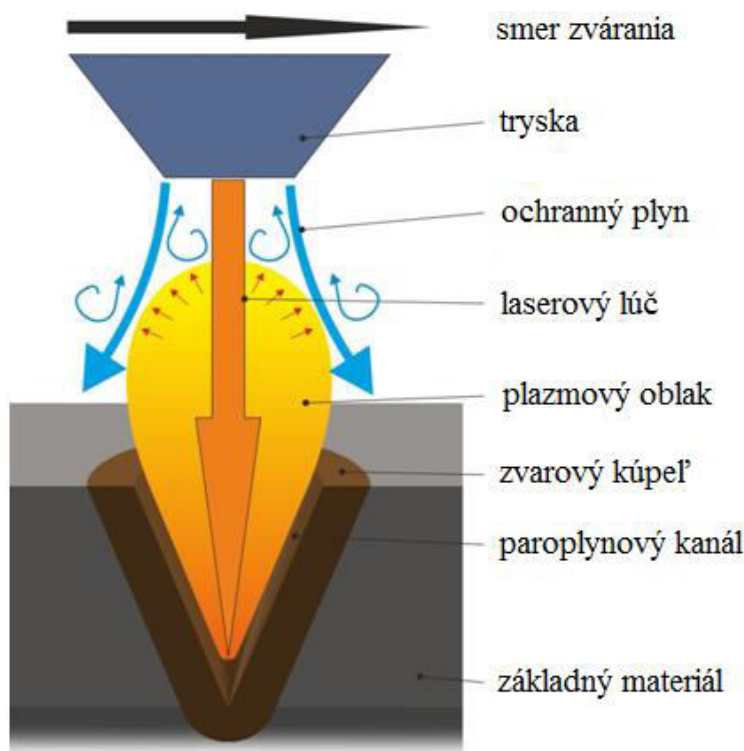
Obr. 25 Chyby nastavenia bočnej trysky a rýchlosti prúdenia plynu [35]

### 3.2 Šlírová metóda [36],[37],[38],[39]

Šlírova metóda sa využíva na vizualizáciu zmeny indexu lomu v transparentných prostrediach (kvapalnom, plynnom, tuhom, plazma) spôsobené termodynamickými procesmi, zmenou hustoty či ultrazvukovým vlnením. V súčasnosti je veľmi účinným prostriedkom využívaným v aerodynamike, balistike, pri analýze šírenia ultrazvukových vln a zvraciacich procesoch. Pri zvraciacich procesoch využívame šlírovu metódu na pozorovanie prúdiacich plynov prípadne plazmy počas procesu. Pri laserovom zváraní sa využíva vysoká hustota

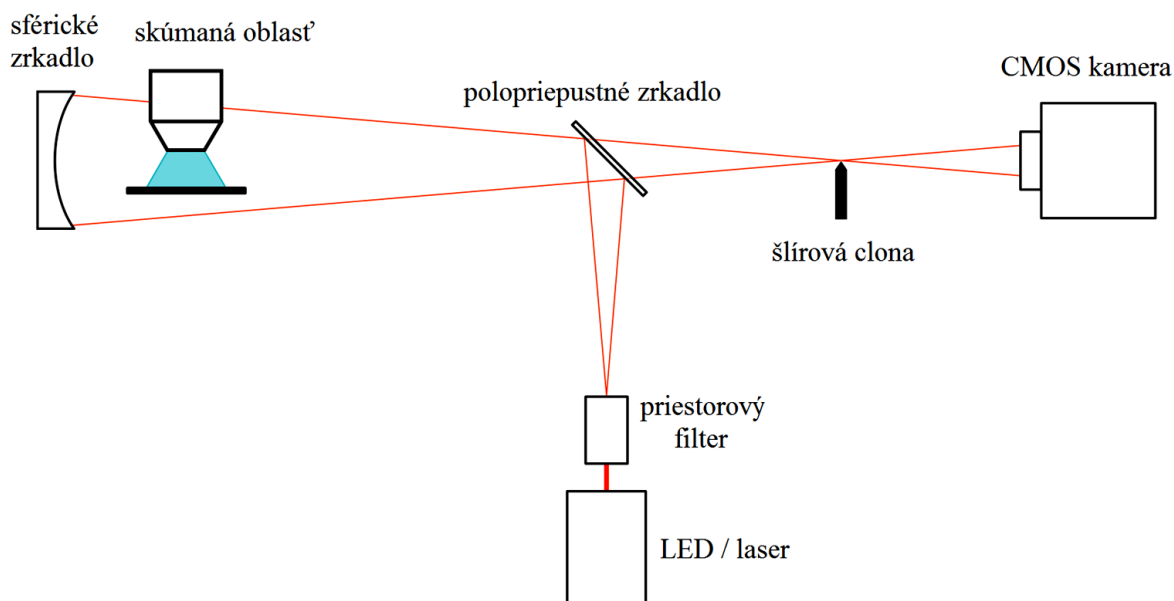
zafokusovaného laserového luča. Materiál je vďaka tomu rýchlo roztavený. Lúč prechádzajúci parami, ktoré počas procesu vznikajú, predáva energiu. Pary s absorbovanou tepelnou energiou vytvárajú plazmu, ktorá sa rýchlo šíri. Rýchlosť expanzie plazmy výrazne ovplyvňuje druh ochranného plynu použitý pri procese zvarovania. Ochranný plyn interaguje s plazmou pričom vznikajú nepredvídateľné turbulentné prúdenia, vid' obr. 26. Tento proces je dosť zložitý z dôvodu posuvu zvarového procesu a neustáleho miešania studeného ochranného plynu s horúcou plazmou.

Princípom šlirovej metódy je využitie lomu svetla s rôznymi indexmi generovaného



Obr. 26 Schéma interakcie ochranného plynu s plazmou [36]

z nerozbíhavého svetelného zdroja (dióda, laser). Svetlo prechádza sledovaným nehomogénnym prostredím a je zamerané do ohniska. V tomto bode je možné vďaka nepriehľadnému okraju noža zablokovat' odklonené svetlo odchýlené vplyvom nehomogenit indexu lomu svetla. Prechádzajúce zaznamenávané svetlo je neovplyvnené sledovaným prostredím a vytvára obraz zodpovedajúci prvej derivácii indexu lomu sledovaného plynu. Proces musí byť zaznamenávaný vysokorýchlostnou kamerou s veľmi krátkym časom uzávierky a CMOS snímačom. Schematický obr. 27 výstižne zobrazuje celý princíp šlirovej metódy.



Obr. 27 Koaxiálne šlirové usporiadanie [36]

### 3.3 Vyhodnotenie zvarového spoja [40],[41],[42],[43],[44]

Vyhodnotenie zvarového spoja je závislé od požiadaviek na zvarový spoj. Na laserom zvárané spoje oproti bežným zvaracím metódam (MIG, MAG, WIG) sú väčšinou kladené vyššie požiadavky, či už na vzhľad alebo mechanické vlastnosti. S tým spojené požiadavky na tvar zvaru, stupeň kvality zvaru alebo jeho mikroštruktúru.

Pri výrobe a skúšaní skúšobných kusov je dôležité dodržať pravidlá uvedené v normách EN ISO 13919-1 pre oceľ a EN ISO 13919-2 pre hliník a jeho zliatiny. Skúšobné kusy by mali mať dostatočnú veľkosť, aby sa zaistilo dostatočné odvádzanie tepla. Taktiež aby bolo možné uskutočniť nedeštruktívne skúšky a aby bolo možné pripraviť vhodný počet skúšobných vzoriek pre deštruktívne skúšky. Skúšobný kus a geometria skúšobného zvarového spoja by mali byť navrhnuté tak, aby čo najviac odpovedali reálnej súčasti. Pokiaľ to vyžaduje špecifikácia alebo výrobná norma, musí sa zaznačiť hlavný smer valcovania plechu.

Po dokončení zvaru by mali byť vizuálne prístupné časti zvaru (koreň a povrch zvaru) vizuálne skontrolované, či spĺňajú požiadavky normy pre použitie alebo výrobné normy prípadne iné dohodnuté požadované kritéria prípustnosti.

Všeobecne pri zváraní môže vzniknúť veľké množstvo zvarových chýb, ktoré je potreba vyhodnotiť na základe druhu, veľkosti a početnosti vyskytujúcich sa vo výrobku. Prípustnosť chýb stanovuje konštruktér a ovplyvňuje technolog, ktorý je zodpovedný za spôsob výroby. Ich hodnotenie prípustnosti vychádza z posúdenia vplyvu zvarových chýb na životnosť zvaranej konštrukcie na základe predpokladaného prevádzkového namáhania. Vyhodnocovanie môže byť vykonané podľa niektorého stupňa prípustnosti B, C alebo D, ako je definované v normách EN ISO 13919-1 pre oceľ a EN ISO 13919-2 pre hliník a jeho zliatiny. Medzné hodnoty zvarových chýb pre tieto tri stupne kvality sú uvedené v norme EN ISO 5817.

Pri laserovom zváraní vznikajú vo zvarových spojoch najčastejšie tieto typy zvarových chýb:

- Trhlina (100)- kaliaca trhlina môže vzniknúť u uhlíkových ocelí z dôvodu vysokého obsahu uhlíku a vysokej rýchlosti ochladzovania. Prevencia je buď tepelné spracovanie pred a po zváraní napríklad rozostreným laserovým lúčom alebo znížením rýchlosti zvárania či zmenou konštrukcie, ktorá by viedla k zabráneniu zmršťovania.
- Malým kryštalizačným trhlinám sa dá zabrániť zmenou základného materiálu s menším množstvom nečistôt (S a P) s odpovedajúcou voľbou zvaracích parametrov.
- Likvačné trhliny vznikajúce na hraniciach zrn sú spôsobené precipitáciou nízkotavitelných sírníkov FeS a fosfidov Fe<sub>3</sub>P a napätím zo zmršťovania behom ochladzovania. V tomto prípade je dobre zmeniť rýchlosť zvárania a geometriu zvaru, aby sa znížilo zvyškové napätie. Pomôže tiež konštrukčná úprava, ktorá zabráni zmršťovaniu alebo prídavný materiál s obsahom manganu, ktorý má k síre vyššiu afinitu ako železo a vytvára vyššietaviteľné sírniky  $\alpha$ -MnS.
- Kráterová trhlina (104)- vyskytuje sa na konci zvaru z dôvodu obmedzenia zmršťovania behom tuhnutia koncovej časti húsenice. Pri pozdĺžnom zváraní je možné presunúť tento koniec na výbehovú dosku. Pri obvodových zvaroch sa riadene znižuje výkon laserového lúča a mení umiestnenie ohniska.
- Dutina (200)- môže vzniknúť neúplným odplynením zvarového kúpeľa z dôvodu vysokej rýchlosti chladnutia alebo nestability kľúčovej dierky. Plyny a pary vznikajú odparovaním prvkov a nečistôt. Predísť tejto chybe je možné čistením



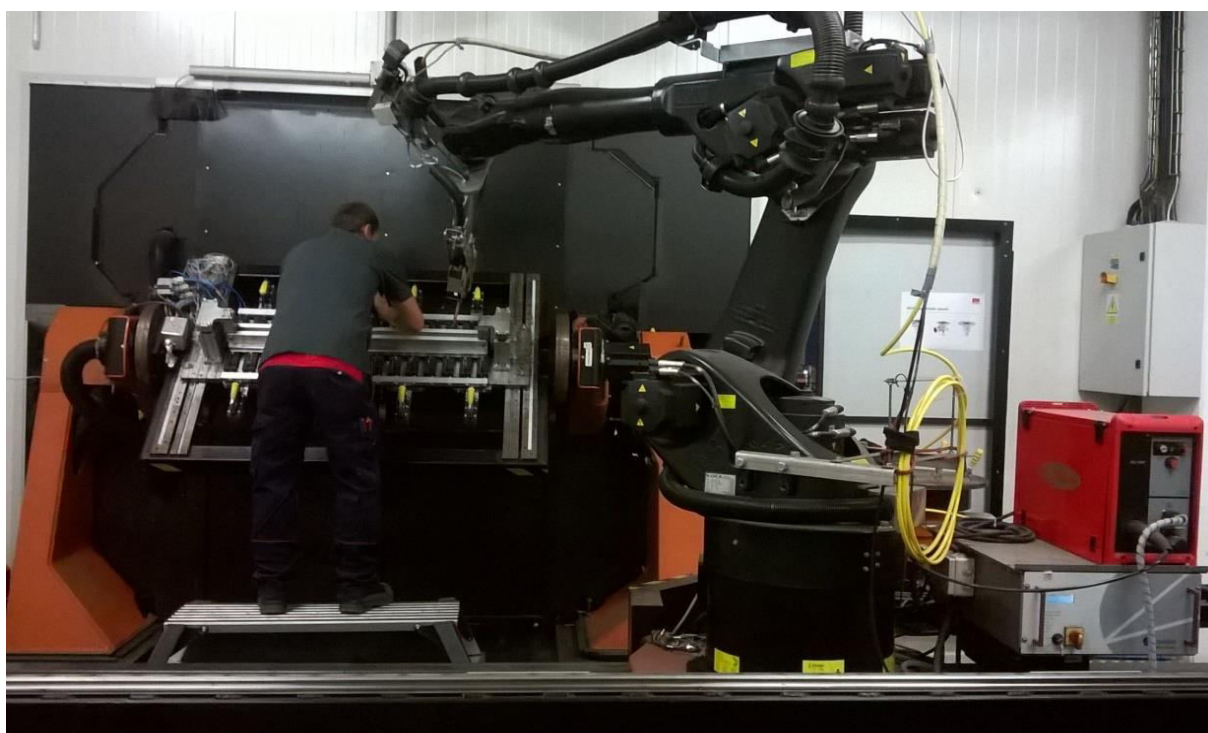
zvarových plôch, znížením teploty vo zvarovej kúpeli rozostrením lúča alebo znížením rýchlosti zvarovania.

- Zhluk pórov a riadková pórovitosť (2013 a 2014)- vyskytuje sa pri neprevarených zvarových spojov alebo pri materiáloch, ktoré obsahujú prvky s nízkym tlakom par pri odparení. Ďalej sa pórovitosť vyskytuje pri znížení výkonu laserového lúča. Zamedzenie vzniku pórov je možné riadnym očistením zvarových plôch, úpravou postupu zvarovania, prietoku ochranného plynu alebo zmenou špecifikácie materiálu.
- Stiahnutina a kráterová stiahnutina (202 a 2024)- vzniká pri neúmyselnom prerušení zvarového procesu kedy dôjde k zmršteniu kovu pri tuhnutí.
- Studený spoj (401)- vyskytuje sa z dôvodu zlého smerovania zväzku alebo prídavného materiálu prípadne kvôli nedostatočnej šírke zvaru. Preto je vhodné upraviť zväzok tak, aby vznikla dostatočná šírka zvaru. Prípadne je potreba skontrolovať zariadenie na sledovanie švu, upnutie súčasti, medzné rozmery súčastí, prídavný materiál alebo kontrola programov zvaracieho robota či polohovadla.
- Neprievar (402)- je väčša spôsobený nesprávnym nastavením zvaracích parametrov ale nesprávnou funkciou zariadenia. Je potreba správne nastaviť ohnisko, zvaraciu rýchlosť či výkon lasera.
- Zápal (5011 a 5012)- prehĺbenie je spôsobené kombináciou faktorov, ktoré vplyvajú počas procesu na zvarový kúpeľ. Pri zvislých polohách to sú premiešanie zvarového kúpeľa, povrchové napätie a povrchová viskozita. Pri vodorovnom zvaraní to sú premiešanie, povrchová viskozita kúpeľa a gravitácia. Aby nedochádzalo k zápalom je dobré zmeniť rýchlosť zvarovania, rozostriť zväzok, pridať kozmetickú vrstvu alebo plyn k ochrane koreňa.
- Nadmerne prevýšený povrch zvar (502)- vzniká z dôvodu priečného zmršťovania, premiestňovania materiálu počas tuhnutia proti smeru zvarovania. Vyskytuje sa hlavne pri neúplne prevarených zvaroch. Odstránenie je možné kozmetickou úpravou, zrazením hrán zvarových plôch. Prípadne presunutím začiatku zvaru na nábehovú dosku alebo tam kde to nie je možné je potreba riadený nábeh výkonu zväzku.
- Pretečený koreň (504)- vzniká z dôvodu vnesenia príliš veľkého množstva tepelnej energie, pôsobenia gravitácie a priečného zmršťovania. Ak sa vyskytne je potreba upraviť postup zvarovania, detaily prípravy zvaru, pridať ochranný plyn k ochrane koreňa prípadne kozmetickú vrstvu.
- Lineárne presadenie (507)- nesprávne nastehované, upnuté alebo zle obrobené diely. Je potreba detailne skontrolovať prípravy zvaru, prípadne upraviť postup zostavovania.
- Preliačený zvar (509)- vzniká prepadnutím roztaveného zvarového kovu vplyvom gravitácie. Zamedziť vzniku je možné zmenou polohy alebo postupu zvarovania.

## 4 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

Experiment bol navrhnutý tak, aby bolo možné vyhodnotiť vplyv rôznych typov ochranných atmosfér na mechanické vlastnosti, zvarové chyby a vzhľad kondukčne laserom zváraného tupého spoja. Zvárané plechy boli z konštrukčných uhlíkových oceli rôznych hrúbok.

Samotné zváranie vzorkou bolo realizované vo firme ACO Industries na robotizovanom pracovisku, vid' obr. 28. Keďže pri zváraní laserom dochádza k odrazom lúča je nevyhnutné z dôvodu bezpečnosti, aby bol celý priestor uzavretý zo všetkých strán. Obsluhujúci personál musí mať špeciálne ochranné okuliare. Pracovisko bolo vybavené aj kamerovým systémom a následnou projekciou pred vstupom na pracovisko. Tak ostatný zamestnanci videli v reálnom čase, čo sa deje vo vnútri a či je bezpečné na pracovisko vstúpiť.



Obr. 28 Robotizované pracovisko

Firma vyrába na tomto pracovisku zložitejšie zvarence z tenších plechov, ktoré sú vypaľované laserom, tvárnené a následne zvárané. Práve kvôli zložitosti, presnosti a efektívite je zvolená technológia zvárania. Na zvárané konštrukcie z tenkých plechov nie sú často kladené vysoké pevnostné nároky, preto je dostačujúci kondukčný režim zvárania, pri ktorom často nevyžadujú aby bol koreň zvaru prevarený ale aby bol povrch zvaru čo najhladší, či už z hygienického alebo vizuálneho hľadiska a aby bol zvar tesniaci.

Na tieto účely je preto v tejto firme využívaný polovodičový laser s dvojitou heteroštruktúrou, ktorý je podrobne popísaný v kapitole 2.9. Zdroj je od firmy Laserline s označením LDM 2500-60 a výkonom 2500W s variabilnou vlnovou dĺžkou od 900nm až 1 080nm.

Laserový lúč je dopravovaný zo zdroja optickým vláknom o priemere 900 $\mu$ m do zvárackej hlavy, ktorá je naklonená od zvislej osy o 5°. Ochranný plyn je privádzaný z boku trubicou o priemere 15mm pod uhlom 45°, vid' obr. 29. Ohnisková vzdialenosť laseru je 222mm a kvalita lúča BPP je 66mm.mrad. Priemer rovnobežného zväzku, čiže priemer vstupného lúča  $D_0$  bol 30mm. Z týchto parametrov vypočítame priemer zväzku v ohnisku podľa vzorca 4 z kapitoly 2.2:

$$D_{\text{foc}} = 4 \cdot \text{BPP} \cdot \frac{F_{\text{foc}}}{D_0} = 4 \cdot 0,066 \cdot \frac{222}{30} = 1,95 \text{ mm} \quad (6)$$

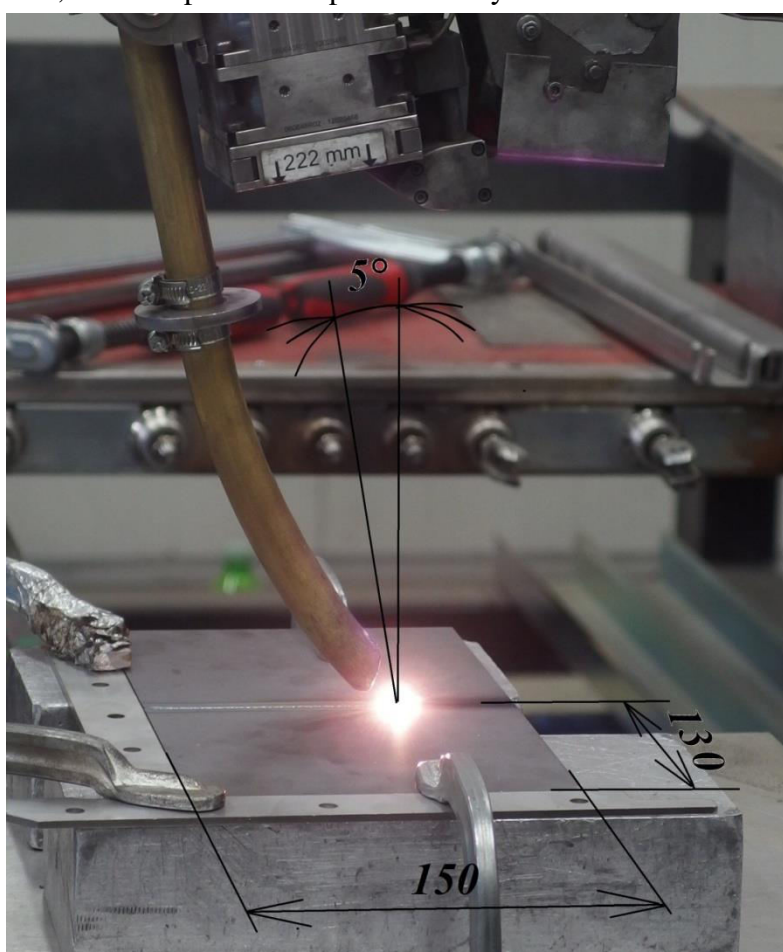
kde:  $F_{\text{foc}}$ - ohnisková vzdialenosť [  $F_{\text{foc}} = 222 \text{ mm}$  ]  
 $D_0$  – priemer vstupného zväzku [  $D_0 = 30 \text{ mm}$  ]  
 BPP- parameter kvality [  $\text{BPP} = 0,066 \text{ mm} \cdot \text{rad}$  ]

Výsledný priemer zväzku v ohnisku odpovedá šírkam zvarov dosiahnutých počas zvárania (od 2,1-2,5mm). Z vypočítaného ohniska a zvaracieho výkonu je možné vypočítať výkonovú hustotu v ohnisku nasledovne:

$$I = \frac{P}{S_{\text{foc}}} = \frac{4 \cdot P}{\pi \cdot D_{\text{foc}}^2} = \frac{4 \cdot 2\,500}{\pi \cdot 0,195^2} = 8,34 \cdot 10^4 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \quad (7)$$

kde:  $P$ - výkon laseru [W]  
 $S_{\text{foc}}$ - plocha ohniska [ $\text{cm}^2$ ]

Skúšobné vzorky zvarov pozostávali z dvoch plechov o rozmere 150x130mm, ktoré boli vypálené laserom vo firme. Laserom pálené plechy majú vysokú presnosť a kvalitný povrch čo je pre zváranie laserom dôležité. Plechy musia lícovať bez medzery. Aby v tejto polohe zostali počas celého procesu zvárania bolo nutné plechy pred zváraním pomocou svoriek upnúť čím sa zaistili pred posunutím. Pri upínaní je nutné použiť šablónu slúžiacu k ustaveniu plechov do správnej polohy. Tak sa zabezpečí rýchlá a presná opakovateľnosť. Toto opatrenie je veľmi dôležité, pretože pri zváraní sa materiál vplyvom tepla deformuje, čím by vznikla príliš veľká medzera, lineárne presadenie plechov a s tým množstvo súvisiacich chýb zvaru.



Obr. 29 Kondukčné laserové zváranie s argónovým ochranným plynom

Zváraná bola vždy dvojica plechov s rovnakých materiálov pri výkone laserového zdroja 2,5kW a prietoku ochranného plynu 20l/min. Poloha ohniska zväzku bola 1mm pod povrch materiálu.

Prvý materiál o hrúbke 3mm bol z konštrukčnej uhlíkovej oceli s označením DC01 (ekvivalent ČSN 11321). Bolo zhotovených 6 skúšobných zvarov, pri ktorých bola konštantná rýchlosť zvárania 5mm/s. Menil sa smer zvárania a druh ochranného plynu. Ako prvý bol použitý ochranný plyn čistý argón, následne dve zmesi ochr. plynov argónu s aktívnym plynom CO<sub>2</sub>. Prvá použitá zmes bola iba s malým objemovým podielom aktívneho plynu CO<sub>2</sub>, konkrétne s 3obj.%CO<sub>2</sub>. Aby bol účinok aktívneho plynu s určitou viditeľnosťou pri vyhodnocovaní bola použitá zmes s vyšším objemovým pomerom CO<sub>2</sub>, konkrétne zmes M21 s 18obj.%CO<sub>2</sub>. Pri každom plyne boli vyhotovené dva skúšobné zvary s rozdielnym smerom prúdenia ochranného plynu aby bolo možné vyhodnotiť práve tento účinok, viď tabuľka 4.

Tab. 4 Sledované podmienky pri zváraní skúšobných zvarov- hrúbka plechu 3mm.

Číslo skúšobného zvaru	Zváraný materiál	Druh ochranného plynu [obj.%]	Zváracia rýchlosť [mm/s]	Smer prúdenia ochranného plynu
1.	DC01+ DC01	100 Ar	5	v smere zvárania
2.	DC01+ DC01	100 Ar	5	proti smere zvárania
3.	DC01+ DC01	97 Ar + 3 CO <sub>2</sub>	5	v smere zvárania
4.	DC01+ DC01	97 Ar + 3 CO <sub>2</sub>	5	proti smere zvárania
5.	DC01+ DC01	82 Ar + 18 CO <sub>2</sub>	5	v smere zvárania
6.	DC01+ DC01	82 Ar + 18 CO <sub>2</sub>	5	proti smere zvárania

Aby bolo možné sledovať vplyv ochranných plynov na rôzne druhy konštrukčných ocelí bol zvolený druhý materiál s označením S235JR o hrúbke 2mm. Bolo zhotovených 8 skúšobných zvarov, pri ktorých sa menil ochranný plyn rovnako ako pri predošlom materiáli, smer prúdenia ochranného plynu voči smeru zvárania a navyše sa menila aj rýchlosť zvárania. Vďaka tomu bude možné vyhodnotiť zvary aj z tohto hľadiska. V tabuľke 5 je prehľadne vidieť aké podmienky bolo pri jednotlivých skúšobných zvaroch.

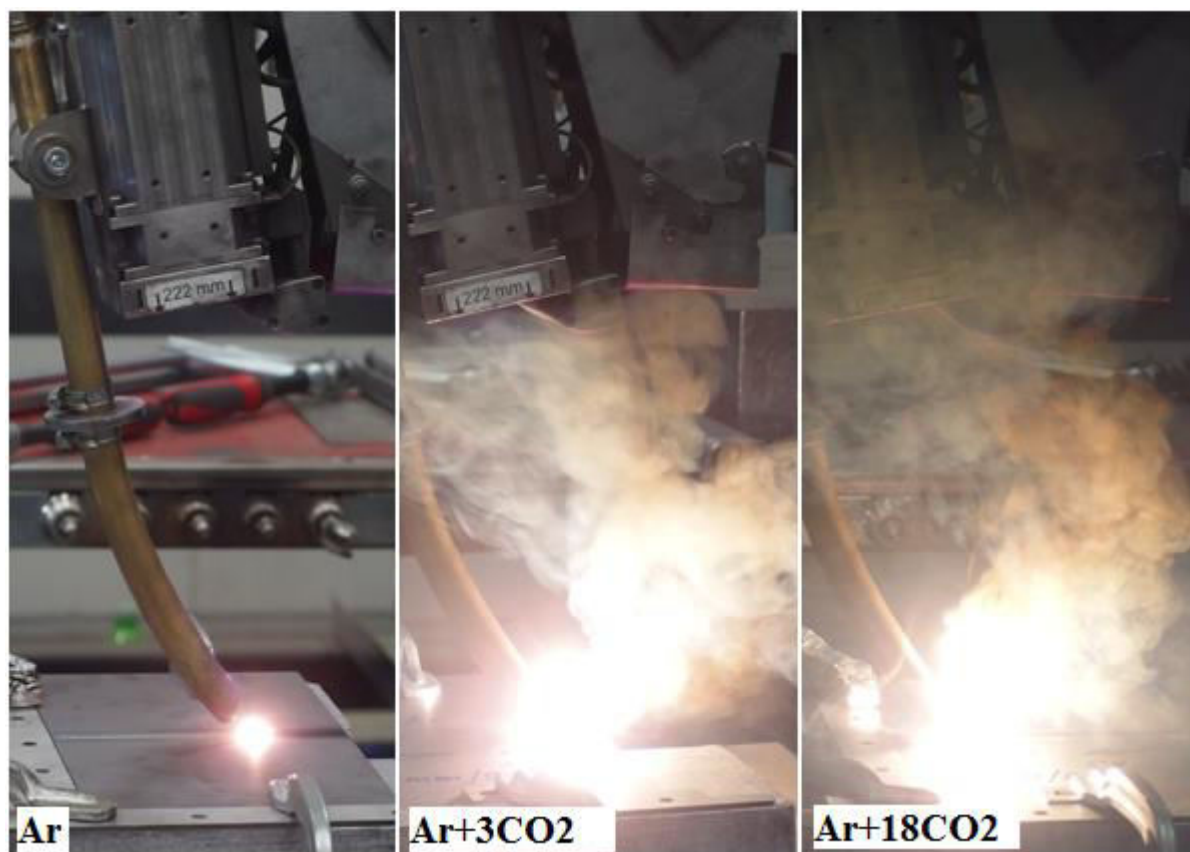
Tab. 5 Sledované podmienky pri zváraní skúšobných zvarov- hrúbka plechu 2mm.

Číslo skúšobného zvaru	Zváraný materiál	Druh ochranného plynu [obj.%]	Zváracia rýchlosť [mm/s]	Smer prúdenia ochranného plynu
7.	S235JR+S235JR	100 Ar	5	v smere zvárania
8.	S235JR+S235JR	100 Ar	8	v smere zvárania
9.	S235JR+S235JR	100 Ar	8	proti smere zvárania
10.	S235JR+S235JR	97 Ar + 3 CO <sub>2</sub>	5	v smere zvárania
11.	S235JR+S235JR	97 Ar + 3 CO <sub>2</sub>	8	v smere zvárania
12.	S235JR+S235JR	97 Ar + 3 CO <sub>2</sub>	8	proti smere zvárania
13.	S235JR+S235JR	82 Ar + 18 CO <sub>2</sub>	8	v smere zvárania
14.	S235JR+S235JR	82 Ar + 18 CO <sub>2</sub>	8	proti smere zvárania

Ostatné parametre zvárania nie sú predmetom experimentu a boli nastavené tak aby zvary zvárané v argónovej ochrannej atmosfére vyhovovali požiadavkám firmy.

Už počas zvárania bol rozdiel medzi jednotlivými ochrannými plynmi značne viditeľný. Zatiaľ čo pri ochrannej atmosfére tvorenou čistým argónom bol celý proces kľudný a stabilný,

pri zmesovej ochrannej atmosfére bol jasne viditeľný účinok aktívneho plynu. Tak ako bolo spomenuté v 3. kapitole, potvrdilo sa, že nižší potenciál oxidu uhličitého podporuje vznik plazmy. Taktiež termický účinok  $\text{CO}_2$  mal za následok dymenie sa z oblasti zvaru, čiže väčšie odparovanie materiálu, vid' obr. 30. S väčším percentuálnym zastúpením  $\text{CO}_2$  sa tieto účinky iba viac prejavovali.



Obr. 30 Procesy zvarania

#### 4.1 Charakteristika materiálov [5],[45]

Materiál má na výsledný zvar veľký vplyv, preto je potreba mu venovať dostatočnú pozornosť. Metalurgia zvaru priamo ovplyvňuje výslednú zvariteľnosť, čiže následne aj mechanické, fyzikálne vlastnosti a chemické zloženie výsledného zvaru. V súčasnosti máme veľké množstvo materiálov. Aby sme mohli vyhodnotiť zvariteľnosť, rozdeľujeme oceli do jednotných skupín, do ktorých zaradzujeme príbuzné materiály.

Ako bolo spomenuté v predchádzajúcej kapitole, pri experimente boli použité dva druhy základných materiálov. Obi dva materiály spadajú do skupiny nízkouhlíkových, jemnozrnných, nelegovaných ocelí a uhlíko-mangánových ocelí, ktoré majú maximálne 0,24hm.% C, 1,5hm.% Mn a nízky obsah fosforu a síry. Obsah uhlíku a mangánu určuje materiálové mechanické vlastnosti, najmä jeho pevnosť. Preto tieto materiály mávajú medzu klzu do 355Mpa.

Mechanické vlastnosti a chemické zloženie použitých materiálov v experimente sú uvedené v tabuľke 6 a tabuľke 7. Tieto hodnoty sú z atestov, ktoré poskytujú dodávateľské spoločnosti hutných materiálov.

Tab. 6 Chemické zloženie použitých základných materiálov

Materiál	C [hm.%]	Mn [hm.%]	Cr [hm.%]	Mo [hm.%]	V [hm.%]	Cu [hm.%]	Ni [hm.%]	S [hm.%]	P [hm.%]
DC01	0,07	0,39	0,01	0,004	0,002	0,02	0,01	0,007	0,006
S235JR	0,12	0,56	0,064	0,006	0,001	0,084	0,033	0,011	0,009

Tab. 7 Mechanické vlastnosti základných materiálov

Materiál	Re [MPa]	Rm [MPa]	A80 [%]
DC01	193	321	39
S235JR	328	425	30,1

Na výsledné vlastnosti zvarov ma najväčší vplyv hrubozrnná oblasť v tepelne ovplyvnenej oblasti. S rastúcim obsahom uhlíku v materiáli sa zvyšuje:

- náchylnosť k zakaleniu počas zvarovania
- tvrdosť vznikajúceho martenzitu
- náchylnosť na vznik studených trhlín v TOO .

Na vyhodnotenie vplyvu chemického zloženia na tvrdosť hrubozrnej oblasti je najvhodnejší parameter uhlíkový ekvivalent ocele  $C_e$ . Parameter hodnotí príspevok jednotlivých prvkov v oceli, ktoré sú zodpovedné za rast tvrdosti. Uhlíkový ekvivalent sa počíta podľa normy ČSN EN 1011-2 kde je uvedený najedujúci vzťah pre výpočet:

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} \quad [\text{hm.}\%] \quad (8)$$

Pokiaľ platí, že  $C_e \leq 0,45\text{hm.}\%$ , zároveň  $C \leq 0,24\text{hm.}\%$  a hrúbka zvaraného materiálu  $s \leq 25\text{mm}$  nie je potreba pri zvaraní špeciálnych opatrení ako napríklad predohrev, ktorý by upravil krivku chladnutia. Touto úpravou sa zväčší čas ochladzovania  $t_{8/5}$ , pri ktorom vzniká výsledná štruktúra TOO. Pomalšia rýchlosť chladnutia zabezpečí, že pri chladnutí sa vyhneme oblasti martenzitu v ARA diagrame.

Uhlíkový ekvivalent pre oceľ DC01 vypočítame podľa vzorca 8 dosadením hodnôt z tabuľky 6:

$$C_e = 0,07 + \frac{0,39}{6} + \frac{0,01 + 0,004 + 0,002}{5} + \frac{0,02 + 0,01}{15} = 0,14 \text{ hm.}\% \quad (9)$$

Uhlíkový ekvivalent pre oceľ S235JR vypočítame podľa vzorca 6 dosadením hodnôt z tabuľky 6:

$$C_e = 0,12 + \frac{0,56}{6} + \frac{0,064 + 0,006 + 0,001}{5} + \frac{0,084 + 0,033}{15} = 0,235 \text{ hm.}\% \quad (10)$$

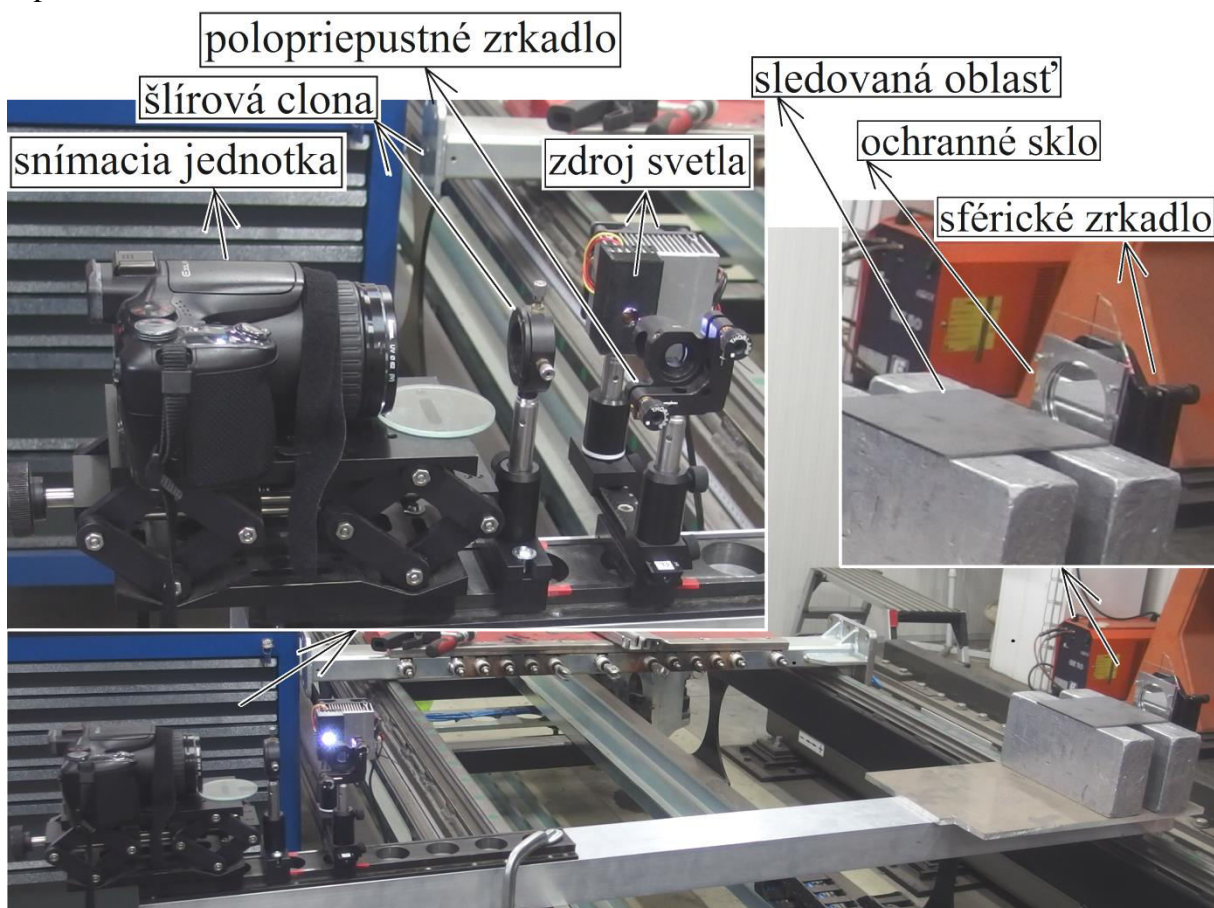
Veľkosť uhlíkového ekvivalentu u oboch ocelí je pod hranicou  $0,45\text{hm.}\%$  a zároveň obe ocele majú obsah uhlíku nižší ako  $0,24\text{hm.}\%$ . Taktiež hrúbka zvaraného materiálu je podstatne menšia ako  $25\text{mm}$ . To znamená, že všetky podmienky sú splnené z čoho vyplýva, že nie je potreba predohreву pred zvaraním. Pravdaže takto stanovený ekvivalent platí pre oblúkové metódy, ktoré majú iné charakteristiky ochladzovania než laser. Laser má



v porovnaní s nimi vyššiu rýchlosť ochladzovania, čiže predohrev by mal byť už pri nižších hodnotách uhlíkového ekvivalentu. Avšak pri použitých materiáloch sa to nepredpokladá.

## 4.2 Prúdenie ochranného plynu

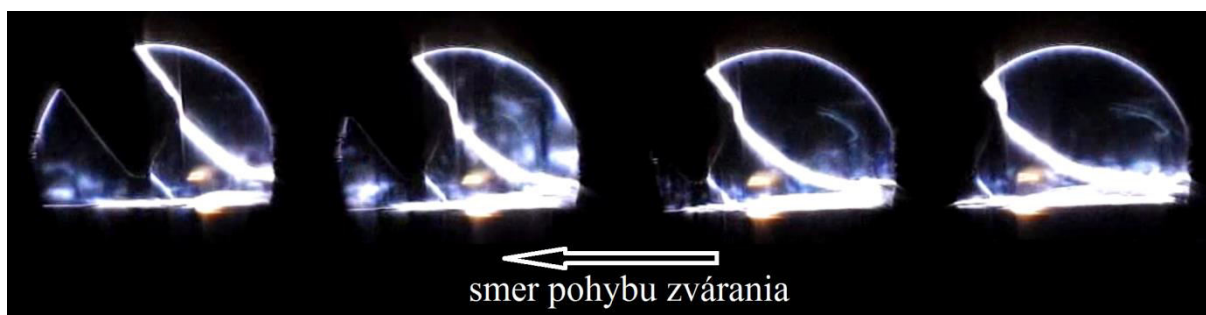
Aby sme mohli pozorovať prúdenie ochranného plynu počas zvarového procesu a sledovať jednotlivé zmeny, použili sme šlirovu zobrazovaciu metódu, ktorá je podrobne popísaná v kapitole 3.2.



Obr. 31 Schéma šlirovej optickej aparatúry

Na experiment sme použili optickú aparatúru s jednoosým koaxiálnym usporiadaním, vid' obr. 31. Ako bodový zdroj svetla bola použitá 10W LED chladená hliníkovým telesom a vetrákom. Svetlo je odrazené polopriepustným zrkadlom cez sledovanú oblasť a následne odrazené sférickým zrkadlom. Toto zrkadlo nám sústreďuje svetlo do ohniska, ktoré je zaostrené na nepriehľadný nôž šlirovej clony. Pomocou digitálnej vysokorýchlostnej kamery Casio Exilim pro EX-F1 sme zaznamenali zvarový proces s frekvenciou zápisu 600 fotiek za sekundu.

Zo záznamov sú vytvorené fotografie, vid' obr. 32. Na tomto obrázku je zaznamenané kondukčné laserové zváranie s konštantnou rýchlosťou zvárania 5mm/s. Bola použitá ochranná atmosféra tvorená čistým argónom, ktorá prúdila proti smeru zvárania. Trubica, ktorá privádza plyn nie je veľmi vysoko a plyn má vhodnú rýchlosť (nevznikajú veľké turbulencie v okolí zvarového kúpeľa, ktoré by znížili tesniaci účinok plynu). Vďaka smeru prúdenia je navyše zvarový kov dobre chránený dlho po zavarení.

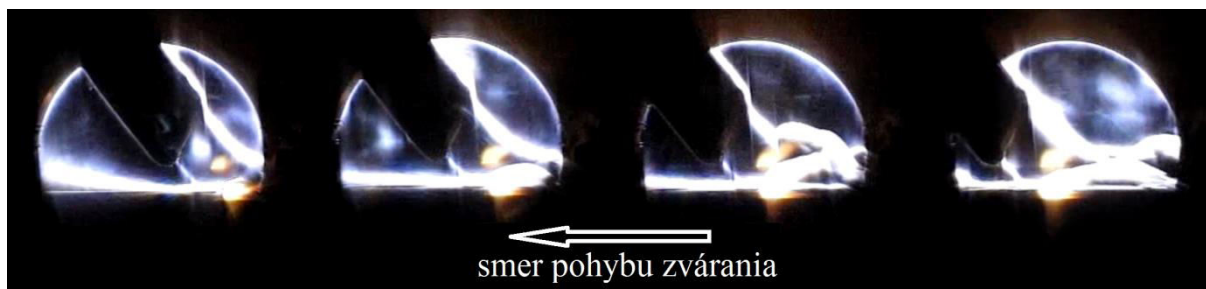


Obr. 32 Prúdenie argónovej ochrannej atmosféry proti smere zvarania pri rýchlosti zvarania  $5\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$



Obr. 33 Prúdenie argónovej ochrannej atmosféry v smere zvarania pri rýchlosti zvarania  $5\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$

Pri zmenenom smere zvarania, pri ktorom prúdi ochranný plyn v smere zvarania je z obr. 33 vidieť, že zvarový kúpeľ nie tak dobre chránený ako to bolo pri prúdení proti smere zvarania. V okolí zvarového kúpeľa vznikajú turbulentné prúdenia. Navyše zvarový kov je len krátku dobu v oblasti prúdiaceho plynu z trubice. Za trubicu síce malé množstvo ochranné plynu turbulentne prúdi ale ten sa mieša s vyparovanými plynmi, parami a okolitou atmosférou.



Obr. 34 Prúdenie zmesnej ochrannej atmosféry  $97\text{Ar} + 3\text{CO}_2$  proti smere zvarania pri rýchlosti zvarania  $5\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$

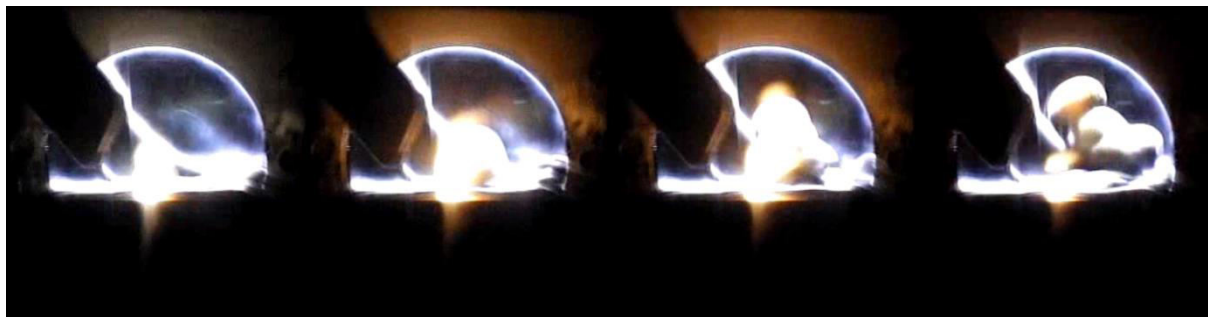


Obr. 35 Prúdenie zmesnej ochrannej atmosféry  $97\text{Ar} + 3\text{CO}_2$  v smere zvarania pri rýchlosti zvarania  $5\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$

Pri použití ochrannej atmosféry tvorenou zmesou argónu s  $3\text{obj.}\% \text{CO}_2$ , sú z obr. 34 a obr. 35 viditeľné medzi jednotlivými smermi prúdenia plynu rovnaké rozdiely ako pri ochrannej atmosfére tvorenou čistým argónom. Pri porovnaní s argónom je však viditeľné



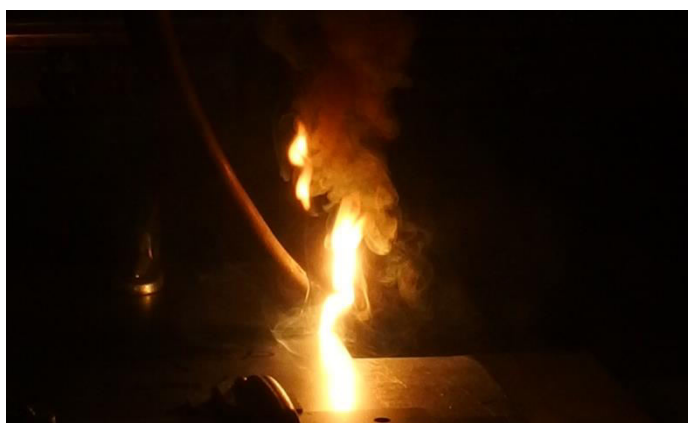
väčšie množstvo turbulentných prúdení. Laminárne prúdenie vychádzajúce z trubice je vplyvom väčšieho množstva vyparovaných par a plynov rozrušované. To spôsobuje, že zvarový kov je menej chránený od okolitej atmosféry. Navyše sa v nepravidelných cykloch vyskytujú výbuchy plazmy, ktoré tiež narušujú stabilitu procesu. Výbuchy sa vyskytovali pri oboch smeroch zvarovania približne s rovnakou frekvenciou a intenzitou. Jeden z nich je vyobrazený na obrázku 36.



Obr. 36 Výbuch plazmy pri kondukčom laserovom zvaraní s ochrannou atmosférou 97Ar + 3CO<sub>2</sub>

Pri použití ochrannej zmesi s 18obj.%CO<sub>2</sub> boli výbuchy plazmy viditeľné voľným okom, vid' obr. 37. Z časových dôvodov však šlirová metóda s týmto typom ochranného plynu nebola uskutočnená.

Nedostatočná ochrana zvarového kovu pri prúdení plynu v smere zvarovania sa prejavila aj na povrchu skúšobných zvarov. Tieto zvary majú v tepelne ovplyvnenej oblasti oxidy, ktoré potvrdzujú nedostatočnú ochranu. V tabuľke 8 sú prehľadne viditeľné povrchy jednotlivých skúšobných zvarov zo základného materiálu DC01. Jediný zvar nevykazujúci oxidy na povrchu a zároveň zvarovaný s prúdením ochranného plynu v smere zvarovania bol zvar číslo 5 (zvarovaný v ochrannej atmosfére s 18obj.%CO<sub>2</sub>). Taktiež ako jediný má nepravidelnosti v šírke zvaru, nepravidelnosti prevýšenia či kresby zvaru. Tieto nedostatky sú spôsobené nedostatočným odfukovaním plazmy. Aj keď sa výbuchy plazmy vyskytovali aj pri zvaraní iných zvarov, negatívne účinky sa na povrchu zvaru neprejavili a sú z pohľadového hľadiska vyhovujúce.



Obr. 37 Výbuch plazmy pri kondukčom laserovom zvaraní s ochrannou atmosférou 97Ar + 18CO<sub>2</sub>



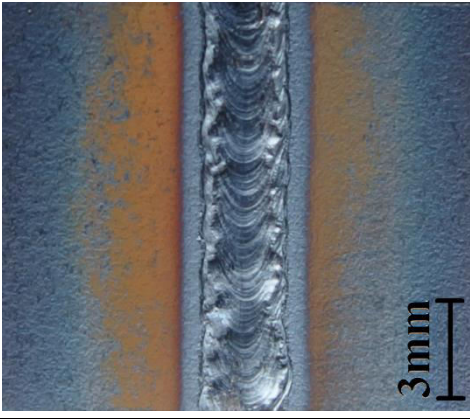

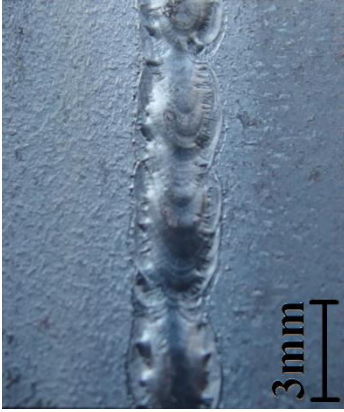
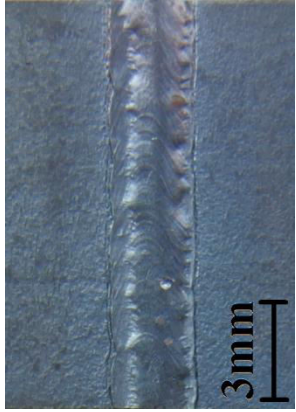
Povrchy zvarov vyhotovených zo základného materiálu S235JR, vykazujú podobne ako pri predošlom materiály oxidy v zvarovej oblasti hlavne pri prúdení ochranného plynu v smere zvarovania, vid' tabuľka 9. Zaujímavosťou je, že zvary zvarované v ochrannom plyne s 18obj.%CO<sub>2</sub> majú oproti predošlému materiálu oxidy v oboch smeroch prúdiaceho plynu. Taktiež sa u oboch vyskytujú nepravidelnosti v šírke zvaru, nepravidelnosti prevýšenia či kresbe zvaru z viackrát zmieňovaných dôvodov.

Zvary zvarované v ochrannom plyne s 3obj.%CO<sub>2</sub> aj napriek výskytu plazmy majú povrch zvaru pomerne hladký a bez veľkých nepravidelností.

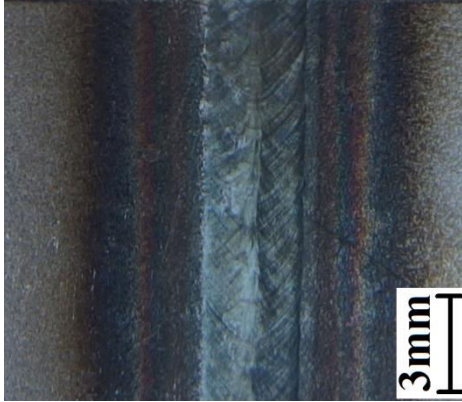

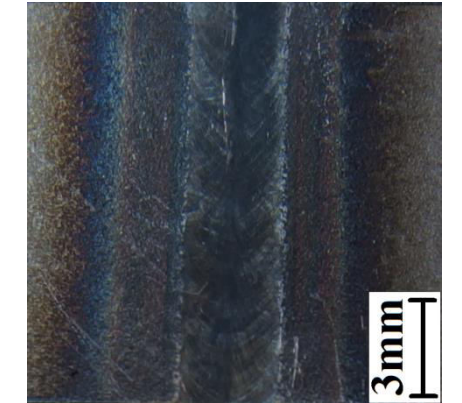



Zníženie rýchlosti zvarovania z 8mm/s na 5mm/s sa pri tomto materiály o hrúbke 2mm prejavilo negatívne hlavne na zware číslo 7. Zvary zvarované nižšou rýchlosťou sú uvedené v

tabuľke 10. Zvar číslo 7 zváraný v argónovej ochrannej atmosfére prúdiacej v smere zvárania má na rozdiel od zvaru číslo 8 nepravidelnú kresbu húsenicu.

Tab. 8 Fotografie zvarov- materiál DC01 o hrúbka 3mm, rýchlosť zvárania 5mm/s



Číslo zvaru	Prúdenie plynu v smere zvárania	Číslo zvaru	Prúdenie plynu proti smere zvárania
1. Ar		2. Ar	
3. Ar+3CO <sub>2</sub>		4. Ar+3CO <sub>2</sub>	
5. Ar+18CO <sub>2</sub>		6. Ar+18CO <sub>2</sub>	

Tab. 9 Fotografie zvarov- materiál S235JR o hrúbka 2mm, rýchlosť zvarovania 8mm/s

Číslo zvaru	Prúdenie plynu v smere zvarovania	Číslo zvaru	Prúdenie plynu proti smere zvarovania
8. Ar		9. Ar	
11. Ar+3CO <sub>2</sub>		12. Ar+3CO <sub>2</sub>	
13. Ar+18CO <sub>2</sub>		14. Ar+18CO <sub>2</sub>	



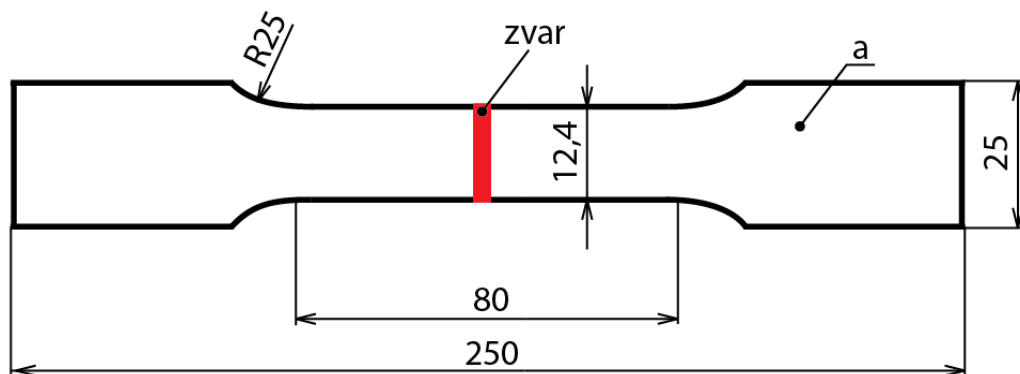
Tab. 10 Fotografie zvarov- materiál S235JR o hrúbka 2mm, rýchlosť zvárania 5mm/s

Číslo zvaru	Prúdenie plynu v smere zvárania
7. Ar	
10. Ar+3CO <sub>2</sub>	

### 4.3 Ťahová skúška

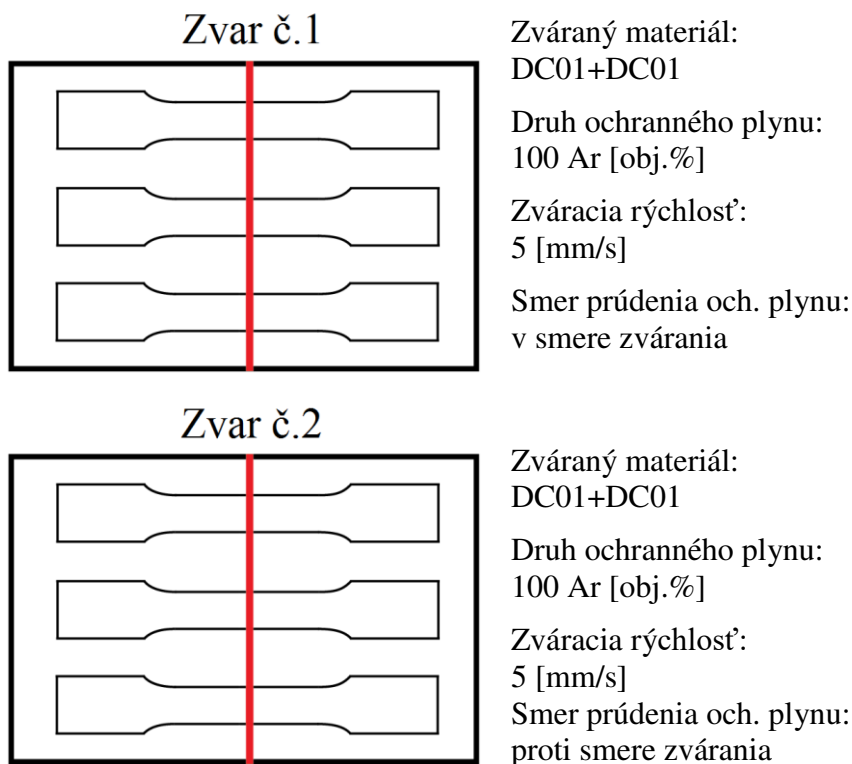
Skúška ťahom slúži k určeniu mechanických charakteristík daného materiálu pri statickom zaťažení, ktoré sa následne používajú k vyhodnocovaniu akostí materiálov alebo k obecnému posúdeniu vhodnosti materiálov pre určité technologické operácie. Jedná sa o najpoužívanejšiu skúšku pre hodnotenie mechanických vlastností konštrukčných materiálov. Podstata skúšky spočíva v deformácii skúšobnej tyče jednoosím ťahovým napätím do okamihu jej pretrhnutia a následným vyhodnotením mechanických vlastností. Skúška je normalizovaná (vid' ČSN EN ISO 6892-1).

Skúšky sa vykonávajú na hladkých normalizovaných telesách, najčastejšie kruhového alebo obdĺžnikového prierezu. Skúšobné teleso sa uchycuje do čelusti stroja. Behom skúšky sa zaznamenáva závislosť pôsobiacej sily  $F$  na predĺžení skúšobného vzorku.



Obr. 38 Rozmery skúšobnej vzorky pre skúšku ťahom

Na Ústave prístrojovej techniky Akadémie vied Českej republiky boli k tejto deštruktívnej skúške vypálené vzorky laserom, čím sa zabezpečila dostatočná rozmerová presnosť všetkých vypálených vzorkov. Z každého skúšobného zvaru boli vypálené vždy tri vzorky tak ako to je znázornené na obr. 39. Geometria skúšobnej vzorky je na obr. 38.



Obr. 39 Znázornenie polohy vyrezania vzorkou zo zvarov

Samotná ťahová skúška bola realizovaná na hydraulickom skúšobnom stroji ZD40. Stroj umožňuje uskutočňovať ťahové, tlakové a ohybové skúšky materiálov do 400kN s riadenou rýchlosťou zaťažovania a programovým spracovaním skúšok. Zariadenie je vybavené inkrementálnym dĺžkovým snímačom polohy prierečníku s rozlíšením 0,01mm a snímačom sily s riadiacou jednotkou EDC 60, vid' obr. 40.

Technické parametre:

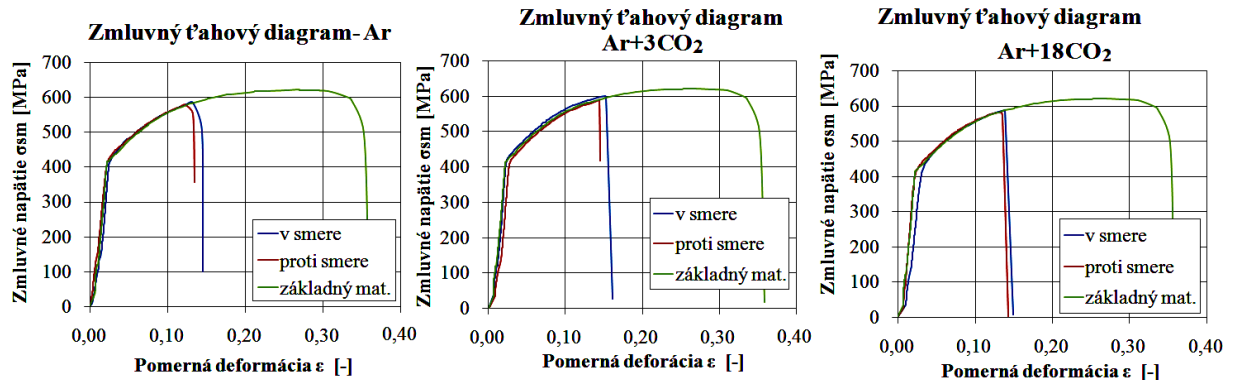
- Výrobca: HBM /SRN/
- Merací rozsah: 8 - 400 kN
- Chyba merania sily: 1/100 menovitého rozsahu sily:  $\pm 1\%$
- Trieda presnosti: 1
- Merací rozsah merania dráhy: 0 - 280 mm
- Chyba merania dráhy:  $\pm 0,01$  mm



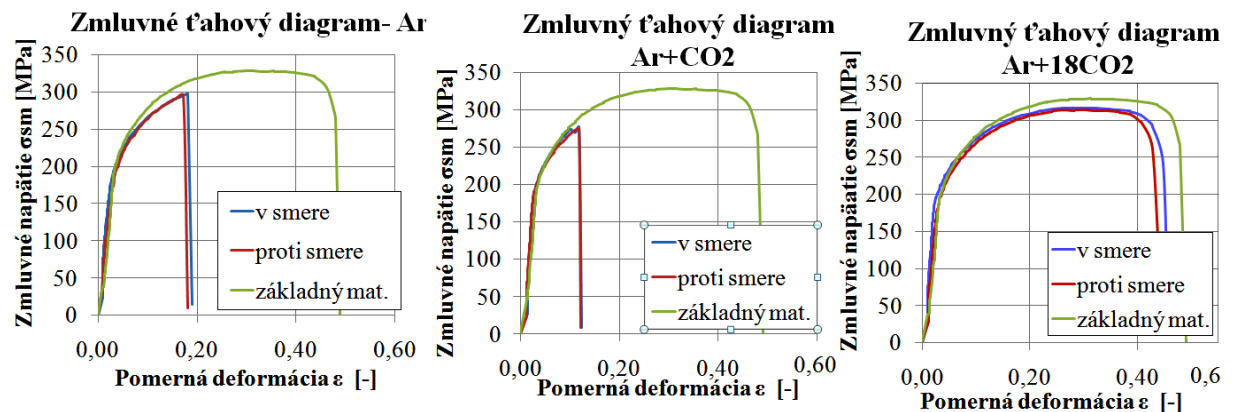
Obr. 40 Skúšobný stroj ZD40 (vľavo), riadiaca jednotka EDC60 (vpravo)

### 4.3.1 Namerané hodnoty

Namerané hodnoty zo skúšky boli zavedené do grafov, aby sa dali jednoducho porovnať a vyhodnotiť jednotlivé vplyvy ochrannej atmosféry. Na obr. 41 a obr. 42 sú uvedené grafy, v ktorých sa porovnáva vplyv smeru prúdenia ochranného plynu voči zváraniu. Z uvedeného vidieť, že rozdiely pri oboch materiáloch sú len malé, ale pri každej z atmosfér ma o trochu lepšie mechanické vlastnosti zvar zváraný v ochr. atmosfére, ktorá prúdila v smere zvárania kedy bol kov chránený podstatne kratšie.



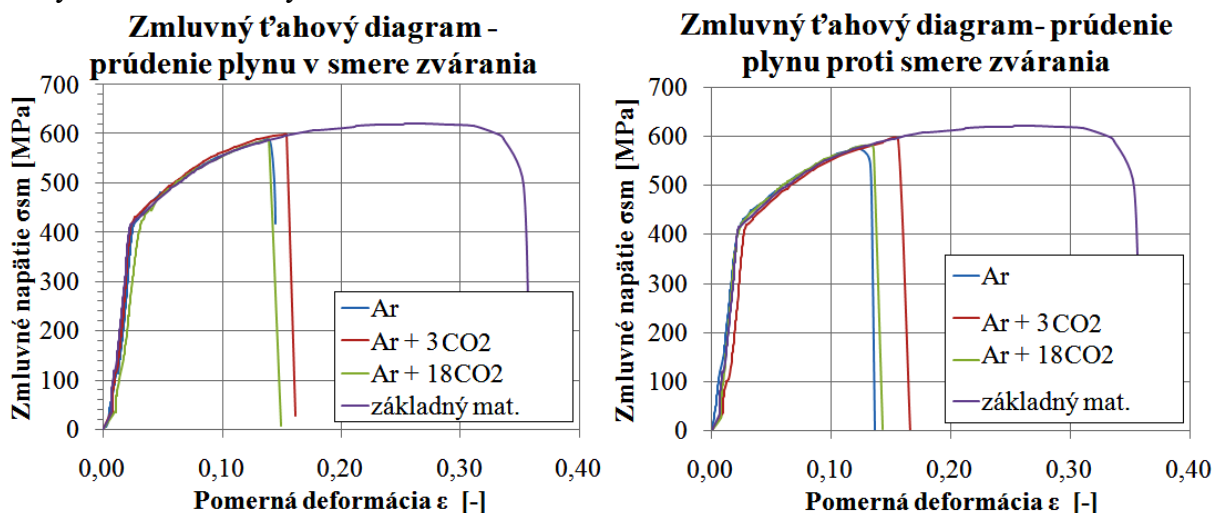
Obr. 41 Vplyv smeru prúdenia ochr. plynu- DC01 o hrúbke 3mm



Obr. 42 Vplyv smeru prúdenia ochr. plynu- S235JR o hrúbke 2mm

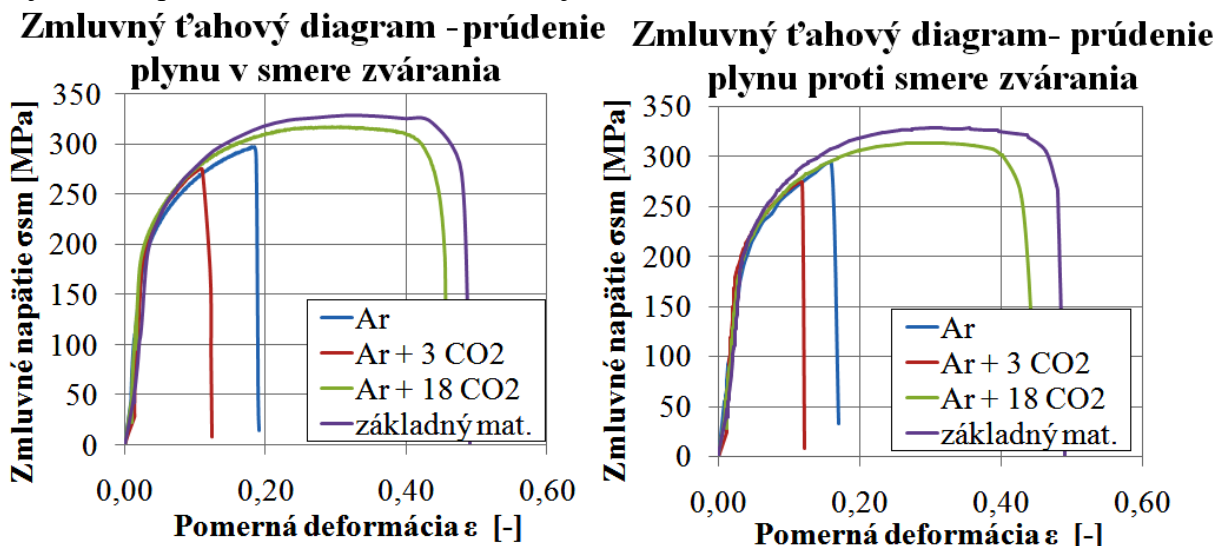


Na obr. 43 sú ťahové diagramy porovnávajúce jednotlivé typy ochranných atmosfér pre materiál DC01. Aj keď pri všetkých vzorkách došlo k porušeniu súdržnosti vo zvaru, ich pevnostné vlastnosti sú pre dané zameranie firmy vyhovujúce, aj napriek neúplnému prevareniu koreňa. Najlepšie si viedli v oboch smeroch vzorky zvárané v ochr. plyne s 3obj.%CO<sub>2</sub>. Väčšie zastúpenie CO<sub>2</sub> v ochr. plyne pri tomto materiály už nevedlo k zvýšeniu mechanických vlastností.



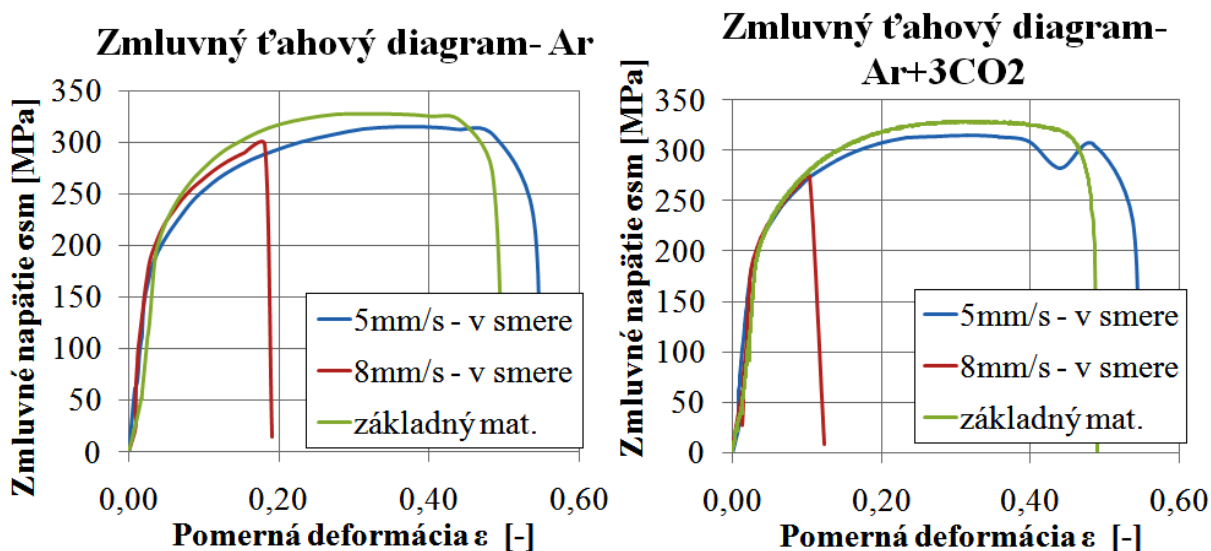
Obr. 43 Vplyv ochrannej atmosféry na pevnostné vlastnosti- DC01 o hrúbke 3mm

Rovnaké porovnanie vplyvu ochranných plynov na mechanické vlastnosti materiálu S235JR je uvedené na obr. 44. Jediná skúšobná vzorka, pri ktorej nedošlo k porušeniu vo zvaru ale v základnom materiály je zvara pri ochr. plyne s 18obj.%CO<sub>2</sub>. V oboch smeroch mali zvary prevarený koreň, čo sa prejavilo aj pri ťahovej skúške. Pri tomto materiáli najhoršie dopadla ochranná atmosféra s 3obj.%CO<sub>2</sub>.



Obr. 44 Vplyv ochrannej atmosféry na pevnostné vlastnosti- S235JR o hrúbke 2mm

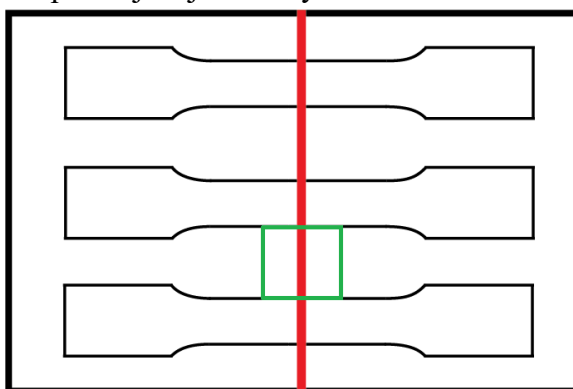
Porovnanie vzorkov zváraných pri rôznych rýchlostiach zvárania je na obr. 45. Je vidieť že nižšia rýchlosť zvárania podľa predpokladov výrazne zlepšila pevnostné vlastnosti v ťahu pri oboch použitých ochranných atmosférach.



Obr. 45 Vplyv rýchlosti zvarovania pevnostné vlastnosti v ťahu

#### 4.4 Analýza makroštruktúry

Na vyhotovenie makroštruktúry je potreba pripraviť vzorky zo skúšobných zvarov. Vzorky boli vypálené so vzorkami na ťahovú skúšku zo všetkých skúšobných zvarov, vid' zelený obdĺžnik na obr. 46. Celá ďalšia príprava vzorkou a vyhotovenie makroskopických fotografií sa uskutočnilo tiež na Ústave prístrojovej techniky Akadémie vied Českej republiky.



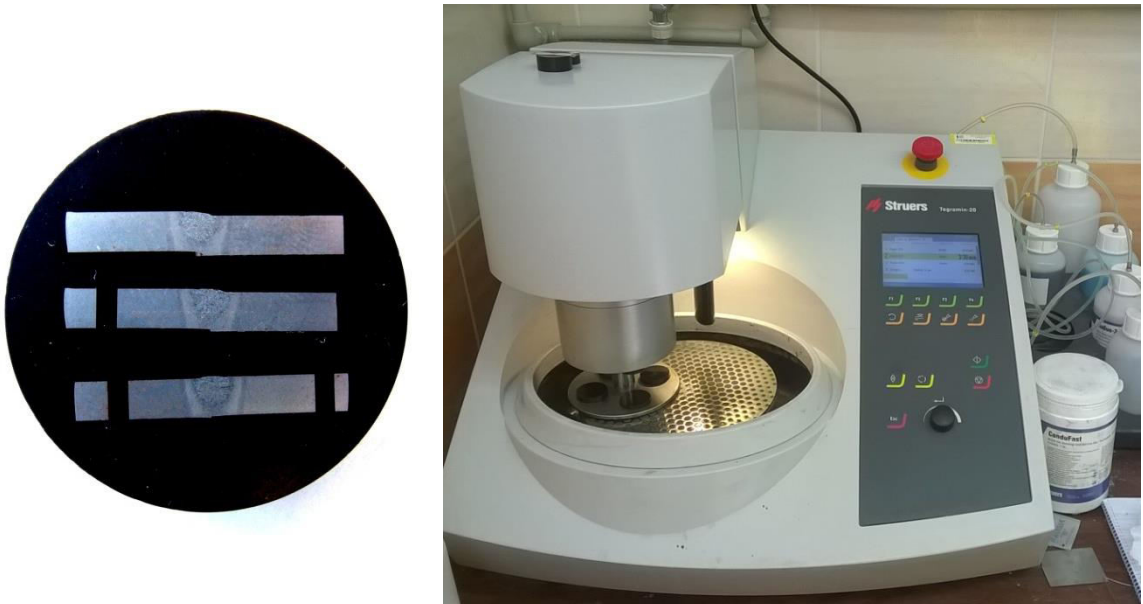
Obr. 46 Znázornenie polohy vyrezania vzorkou z jednotlivých zvarov

Keďže laserové rezanie metalurgicky ovplyvňuje materiál, všetky vzorky bolo ešte potreba prerezať metalografickou pílou bez prehriatia s dobrým chladením. Bola použitá píla MIKRON 110 od firmy MTH, vid' obr. 47. Aby nedošlo k tvárneniu za studena na rezných plochách, vzorky sa rezali malou reznou rýchlosťou. Následne sa všetky vzorky kvôli lepšej manipulácii zaliali do granulovanej fenolickej živice (MiltiFast) za pomoci lisovacieho zariadenia CitoPress-1 od firmy Struers, vid' obr. 47. Lisovanie prebiehalo pri teplote 180°C a tlaku 25MPa po dobu 3,5 minúty. Následné chladenie trvalo 1,5 minúty, po ktorom bolo možné vzorky zo zariadenia odobrať.



Obr. 47 Metalografická pila MIKRON 100 (vľavo), lis na zalievania za tepla CitoPress-1 (vpravo)

Zaliate vzorky sa následne brúsili a leštili na zariadení Tegramin-20 od firmy Struers, vid' obr. 48. Pri brúsení sa postupne vymieňali brusné disky so zrnitosťou 120, 220 a 600. Následne sa leštili diskami s tkaninou a leštiacimi diamantovými suspenziami s veľkosťou zrn od 9 $\mu$ m, 3 $\mu$ m až 1 $\mu$ m.



Obr. 48 Zaliate vyleštené vzorky (vľavo), brusička/leštička Tegramin-20 (vpravo)

Vyleštené vzorky sa následne sledovali pod mikroskopom, ktorý bol vybavený kamerovým systémom a pripojený na počítačovú techniku. Vďaka tomu bolo možné ihneď merať rozmery (prípadne chyby) zvarov a vytvoriť fotografie. Mikroštruktúrne fotografie skúšobných zvarov zo základného materiálu DC01 o hrúbke 3mm sú v prehľadnej tabuľke 11. Z týchto fotografií je vidieť, že všetky zvary majú pomerne veľkú tepelne ovplyvnenú oblasť. Taktiež žiadne zvary v tejto tabuľke nemajú prevarený koreň zvaru. Tieto znaky sú typické práve pre

kondukčné laserom zvárané zvary. Ďalej sú viditeľné malé zápaly na povrchu zvarov a lineárne presadenie plechov spôsobené nedostatočným upnutím plechov. Pozitívne je, že žiadne iné chyby sa v zvaroch nevyskytujú.

Pri porovnávaní veľkosti zvarov sa javí vplyv smeru prúdenia ochranného plynu za zanedbateľný. Zvary zvárané s prúdením plynu v smere zvárania kedy je zvarový kov podstatne kratšie chránený sa javia byť užšie a hlbšie v rámci do 0,1mm. Taktiež šírka TOO sa veľmi nelíši.

Výraznejšie rozmerové rozdiely nie sú ani medzi jednotlivými druhmi ochranných atmosfér. Účinok aktívneho plynu  $\text{CO}_2$  je o trochu viditeľnejší pri zmesi s 18obj.% $\text{CO}_2$ . Tieto zvary sú užšie približne o 0,2mm a hlbšie o 0,1mm v porovnaní s čistým argónom. Na presnejšie vyhodnotenie by bola potreba väčšieho množstva štatistických hodnôt.

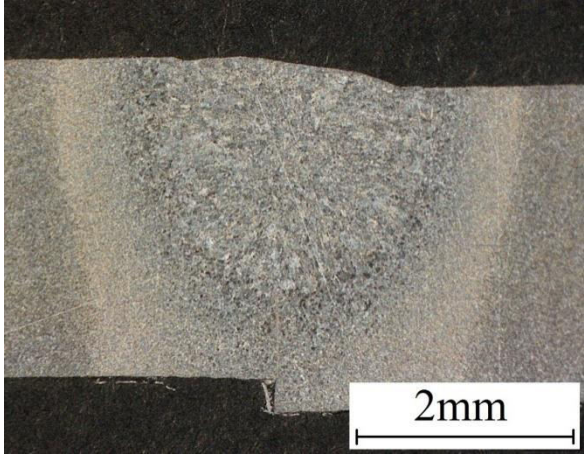
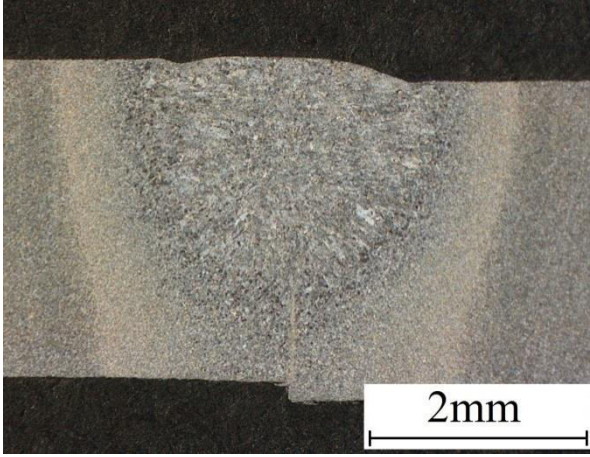
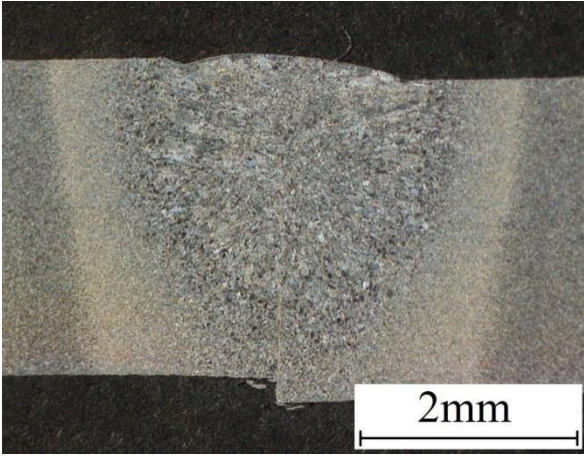
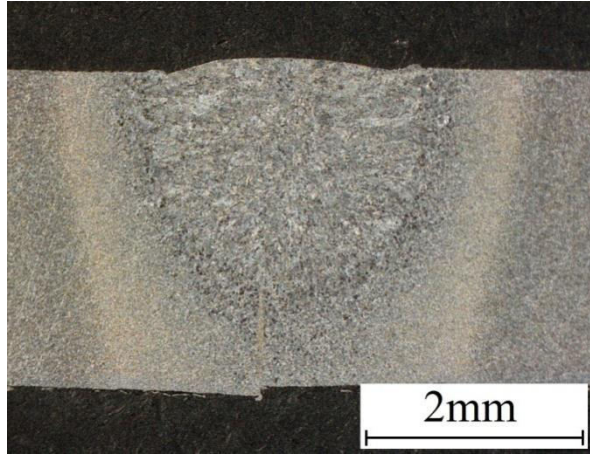
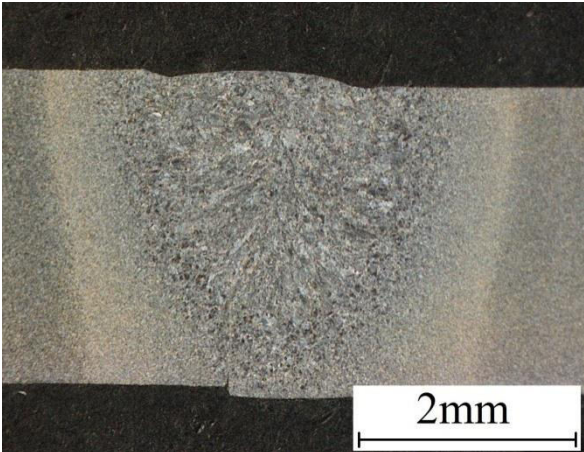
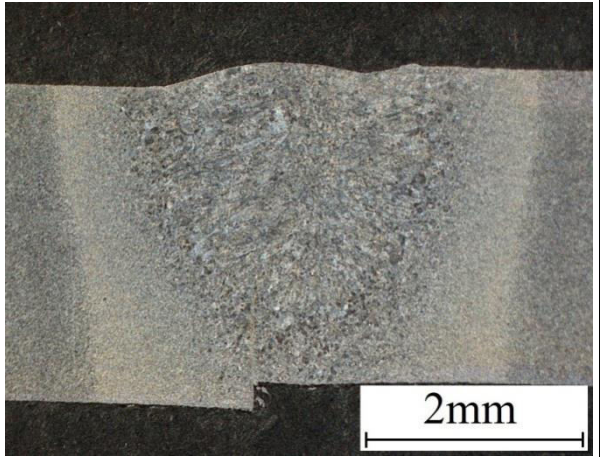
Mikroštruktúrne fotografie skúšobných zvarov zo základného materiálu S235JR o hrúbke 2mm sú v prehľadnej tabuľke 12. Tak ako to bolo u predchádzajúceho materiálu, niektoré zvary majú neprevarený koreň avšak v rezoch sa nevyskytujú žiadne chyby. Pri porovnávaní veľkosti zvarov sa taktiež aj v tejto skupine zvarov javí, vplyv prúdenia plynu za zanedbateľný.

V tejto skupine zvarov sa však veľkosť zvarov pri zmene ochranného plynu výraznejšie zmenila. Zvary zvárané v ochr. atmosfére s 3obj.% $\text{CO}_2$  sú v porovnaní s čistým argónom užšie o 0,2mm. Hĺbka zvarov je približne rovnaká. Výrazná zmena je pri ochr. atmosfére s 18obj.% $\text{CO}_2$  kedy zvary sú ešte užšie o 0,1mm ale majú aj kompletne prevarený koreň zvaru. Tu je vidieť, že aktívny plyn výrazne prispel k nataveniu materiálu a jeho celkovému prevareniu.

Zníženie rýchlosti zvárania viedlo podľa predpokladu k výrazne väčšiemu prevareniu zvarov, vid' tabuľka 13. Pri ochr. atmosfére čistého argónu zníženie rýchlosti zvárania z 8mm/s na 5mm/s spôsobilo úplné prevarenie koreňa. Koreň zvaru je prehĺbený za čo je zodpovedné zmrašťovanie. Zaujímavé je, že zníženie rýchlosti pri ochr. atmosfére s 3%obj. $\text{CO}_2$  nevedlo k tak veľkému prevareniu. V porovnaní s vyššou rýchlosťou je zvar síce o 0,5mm hlbší ale koreň zvaru prevarený nie je.

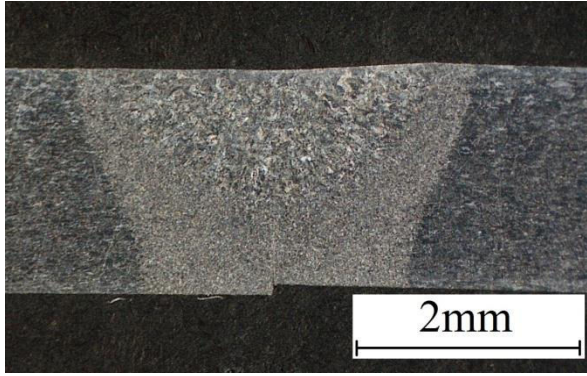
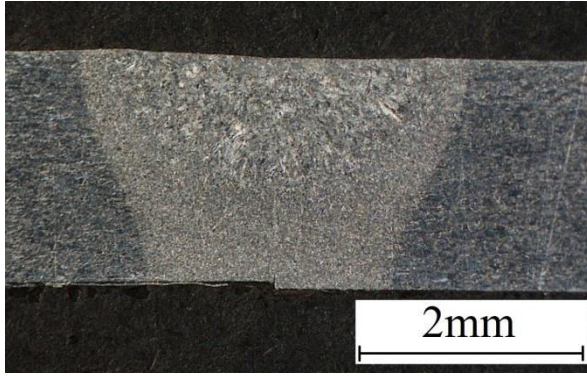
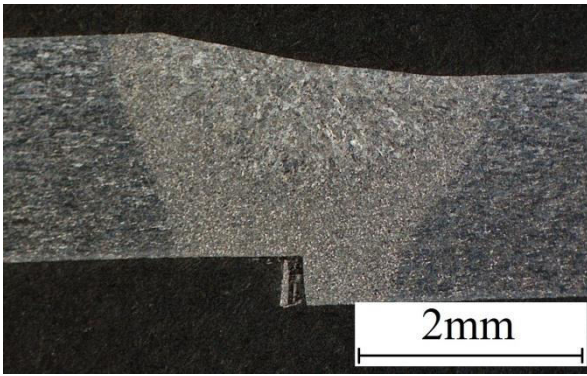
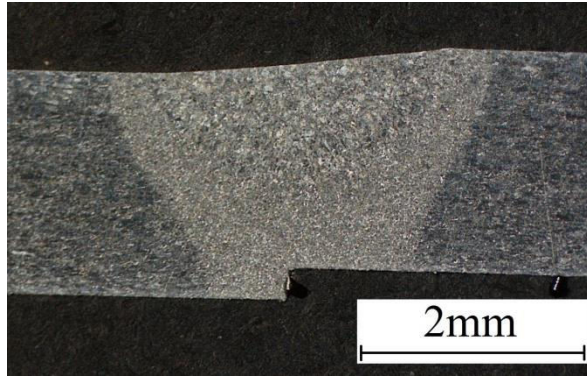
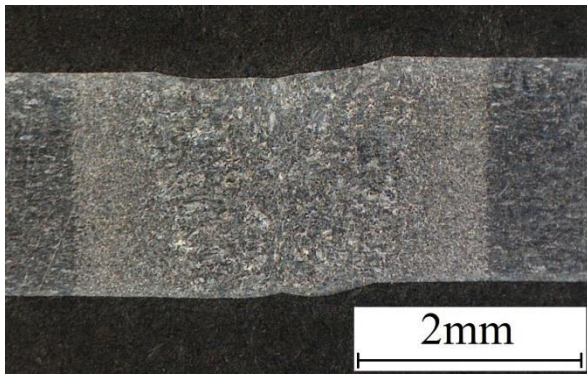
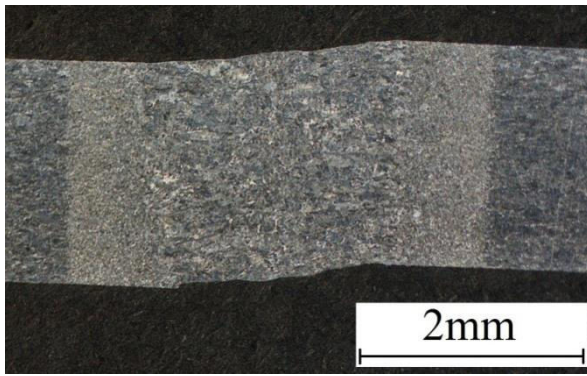


Tab. 11 Fotografie makroštruktúry metalografických výbrusov

základný materiál: DC01      hrúbka mat.: 3mm      rýchlosť zvarania: 5mm/s	
Prúdenie plynu v smere zvarania	Prúdenie plynu proti smere zvarania
<p>Číslo zvaru: 1    ochr. plyn: Ar</p> 	<p>Číslo zvaru: 2    ochr. plyn: Ar</p> 
<p>Číslo zvaru: 3    ochr. plyn: Ar+3CO<sub>2</sub></p> 	<p>Číslo zvaru: 4    ochr. plyn: Ar+3CO<sub>2</sub></p> 
<p>Číslo zvaru: 5    ochr. plyn: Ar+18CO<sub>2</sub></p> 	<p>Číslo zvaru: 6    ochr. plyn: Ar+18CO<sub>2</sub></p> 

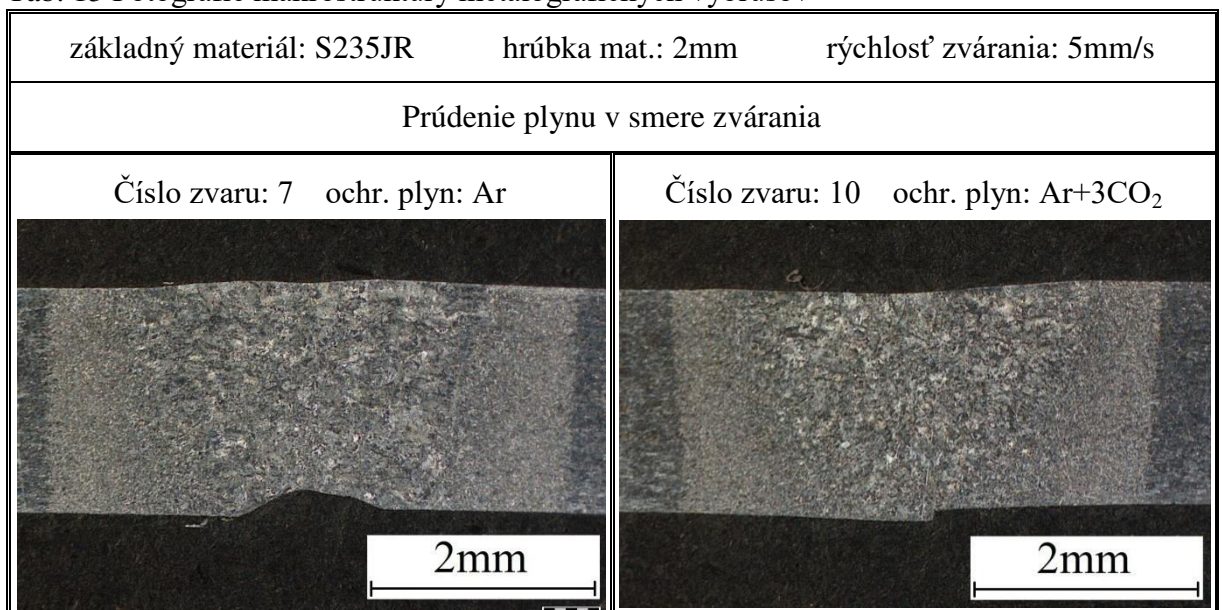


Tab. 12 Fotografie makroštruktúry metalografických výbrusov

základný materiál: S235JR      hrúbka mat.: 2mm      rýchlosť zvarania: 8mm/s	
Prúdenie plynu v smere zvarania	Prúdenie plynu proti smere zvarania
<p>Číslo zvaru: 8    ochr. plyn: Ar</p> 	<p>Číslo zvaru: 9    ochr. plyn: Ar</p> 
<p>Číslo zvaru: 11    ochr. plyn: Ar+3CO<sub>2</sub></p> 	<p>Číslo zvaru: 12    ochr. plyn: Ar+3CO<sub>2</sub></p> 
<p>Číslo zvaru: 13    ochr. plyn: Ar+18CO<sub>2</sub></p> 	<p>Číslo zvaru: 14    ochr. plyn: Ar+18CO<sub>2</sub></p> 



Tab. 13 Fotografie makroštruktúry metalografických výbrusov

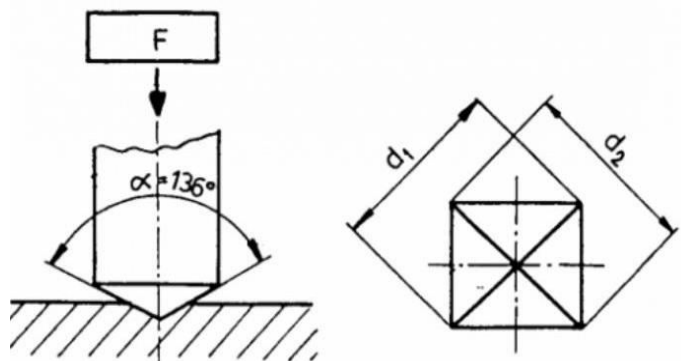


#### 4.5 Skúška tvrdosti podľa Vickersa

Norma ČSN EN ISO 6507-1 rozdeľuje metódu podľa rozsahu skúšobného zaťaženia na:

- Skúška tvrdosti podľa Vickersa
  - rozsah skúšobného zaťaženia  $F \geq 49,03\text{N}$
  - značka tvrdosti:  $\geq \text{HV } 5$
- Skúška tvrdosti podľa Vickersa pri nízkom zaťažení
  - rozsah skúšobného zaťaženia  $1,961 \leq F < 49,03 \text{ [N]}$
  - značka tvrdosti: HV 0,2 až  $> \text{HV } 5$
- Skúška mikrotvrdosti podľa Vickersa
  - rozsah skúšobného zaťaženia  $0,009 \leq F < 1,961 \text{ [N]}$
  - značka tvrdosti: HV 0,001 až  $> \text{HV } 0,2$

Princíp metódy spočíva v zatlačovaní vnikajúceho telesa do povrchu skúšobného telesa. Vnikajúce teleso je diamantový pravidelný štvorboký ihlan so štvorcovou základňou a predpísaným vrcholovým uhlom medzi priľahlými stranami. Teleso sa pomaly zatlačuje do povrchu telesa až do dosiahnutia plného zaťaženia na ktorom zotrva predpísanú dobu (10-15s sa neuvádza, iná hodnota sa musí uviesť v značení). Po následnom odľahčení skúšobného zaťaženia  $F$  sa merajú obe uhlopriečky vtláčku, vid' obr. 49. Z týchto dvoch hodnôt sa vypočíta aritmetický priemer.



Obr. 49 Princíp Vickersovej metódy

Výsledná tvrdosť sa vypočíta podľa nasledujúceho vzorca:

$$\text{Tvrdosť podľa Vickersa} = \frac{2 \cdot F \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{g_n \cdot d^2} \quad (11)$$

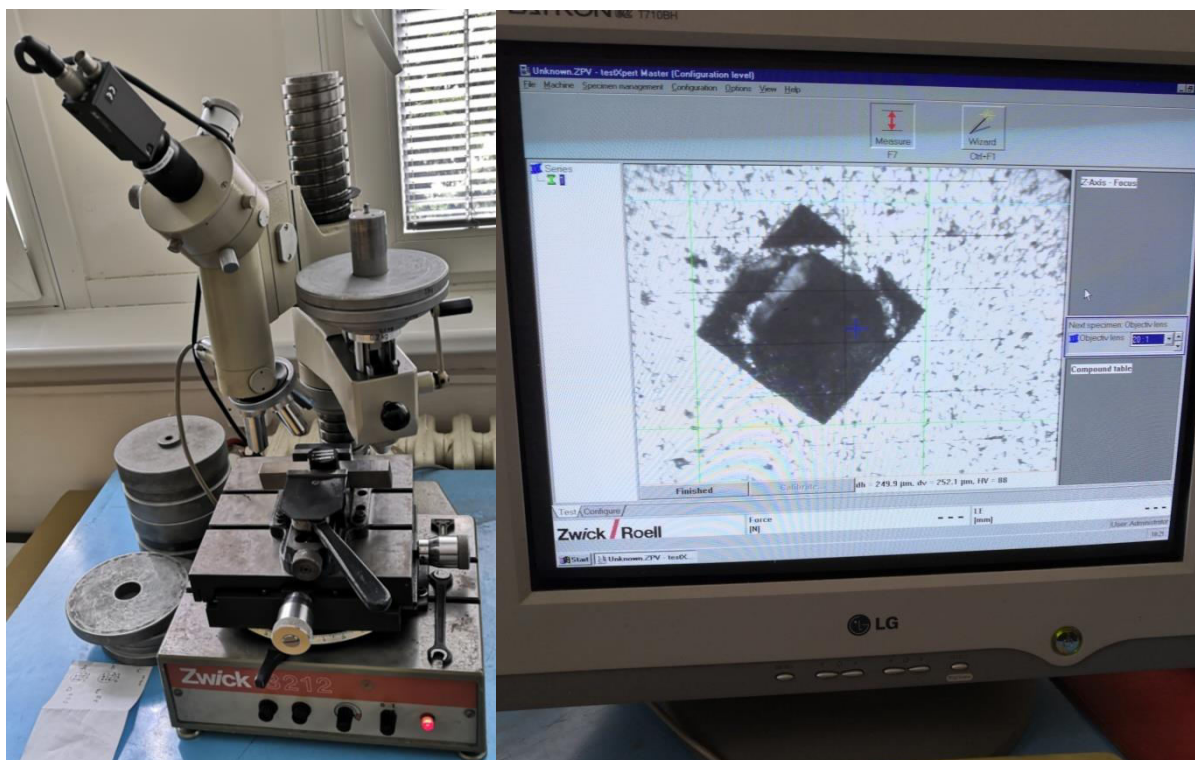
Kde:  $\alpha$  - nominálne daná hodnota vrcholového uhlu ( $\alpha = 136^\circ$ )

$g_n$  - tiažové zrýchlenie ( $g_n = 9,806 \text{ m/s}^2$ )

$d$  - aritmetický priemer uhlopriečok vtlačku [mm]

$F$  - skúšobné zaťaženie [N]

Na vyhotovených metalografických výbrusoch sa na ústave strojárenskej technológie, FSI VUT v Brne použila skúška tvrdosti podľa Vickersa pri nízkom zaťažení. Skúška sa realizovala na tvrdomere ZWICK 3212 vybavený CCD kamerou, ktorá bola pripojená na počítač, vid' obr. 50. Na vyhodnocovanie sa použil software testXpert, v ktorom sa po zaostrení na vtlačok merali jednotlivé uhlopriečky vtlačku.



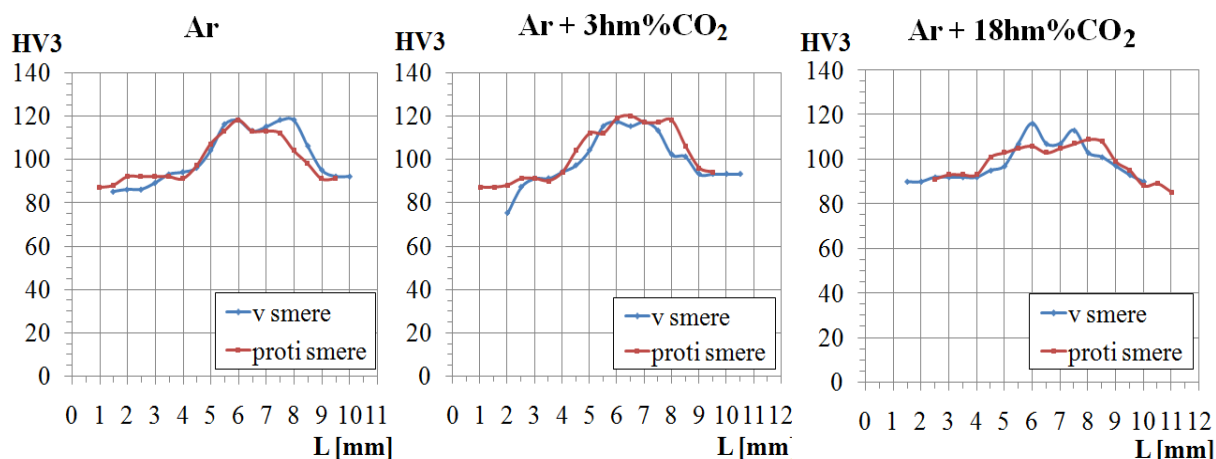
Obr. 50 Meracie zariadenie ZWICK 3212

Skúška bola vykonaná podľa normy ISO 6507-1. Veľkosť skúšobného zaťaženia sa stanovila podľa veľkosti vtlačku. Veľkosť uhlopriečok by mala byť minimálne 0,02mm, preto bola zvolená veľkosť zaťaženia  $F=29,42\text{N}$ . Doba pôsobenia po úplnom zaťažení bola 12 sekúnd. Umiestnenie jednotlivé vtlačkov tvrdosti bolo v rade, krížom cez zvarovú oblasť, vid' obr. 51. Počet vtlačkov bol zvolený tak, aby sa zabezpečilo zmeranie tvrdosti aj v tepelne neovplyvnenej oblasti. Vzďialenosť medzi stredmi vtlačkov bola 0,5mm. Namerané tvrdosti jednotlivých skúšobných zvarov sú uvedené v prílohe 1.



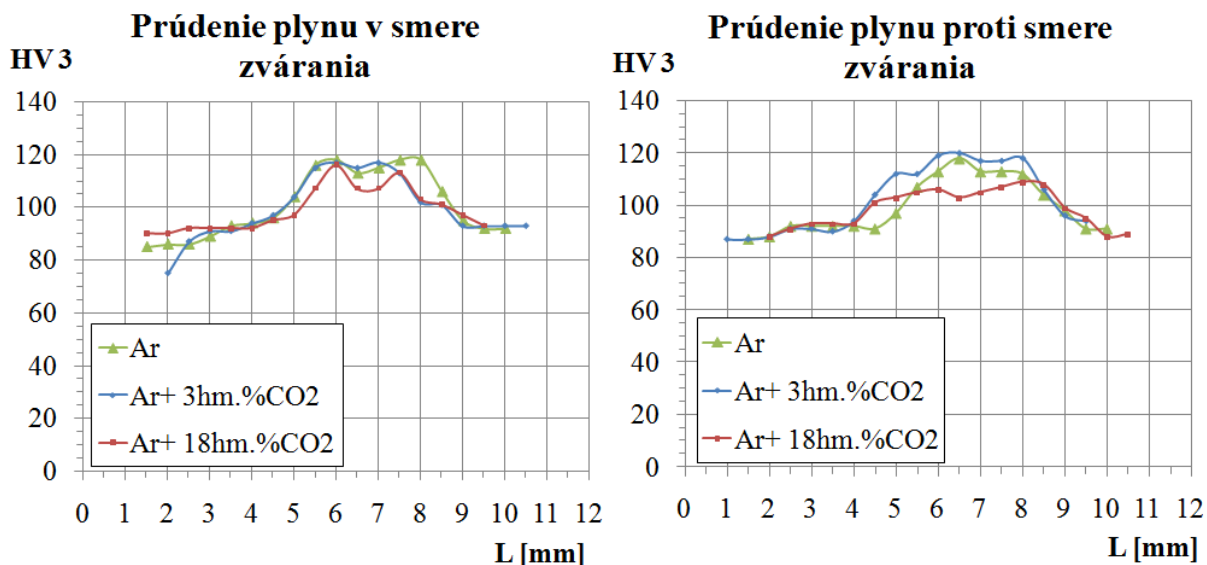
Obr. 51 Radové usporiadanie vtlačkov

Aby sa dali hodnoty ľahšie porovnať, boli vytvorené grafy. Na obr. 52 sú grafy, ktoré porovnávajú tvrdosti zvarov zváraných s prúdením ochranného plynu buď v smere alebo proti smere zvárania pre materiál DC01 o hrúbke 3mm. Z uvedeného vidieť, že smer zvárania nemá veľký vplyv na výslednú tvrdosť zvarov.



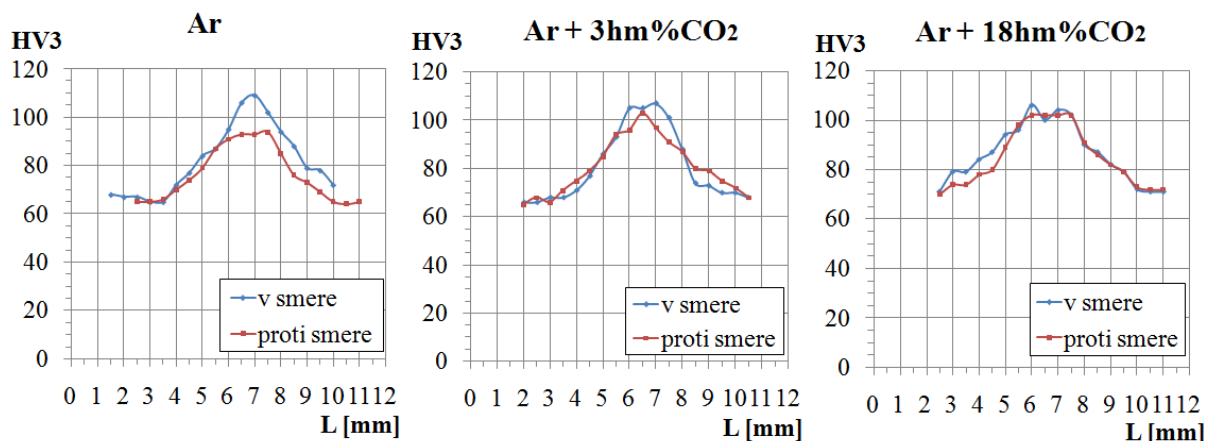
Obr. 52 Vplyv smeru prúdenia ochr. plynu na tvrdosť zvaru- DC01 o hrúbke 3mm

Na obr. 53 sú grafy, v ktorých sú porovnávané tvrdosti zvarov zváraných pri rôznych typoch ochranných atmosfér. Pri prúdení plynu v smere zvárania, kedy plyn chráni kov iba krátku dobu sú tvrdosti skoro rovnaké. Pri prúdení plynu proti smeru zvárania, bol ochranný plyn so zvarovým kovom v kontakte podstatne dlhšie. Pri tomto porovnaní sú už viditeľné väčšie rozdiely tvrdosti spôsobené účinkami ochrannej atmosféry. Najvyššie tvrdosti zvarového kovu aj tepelne ovplyvnenej oblasti sa dosiahli pri zváraní s ochr. atmosférou s 3obj.%CO<sub>2</sub>. Naopak najnižšie sú pri ochr. plyne s 18obj.%CO<sub>2</sub>. Pri tomto type je aj najväčšia TOO v porovnaní s ostatnými plynmi.



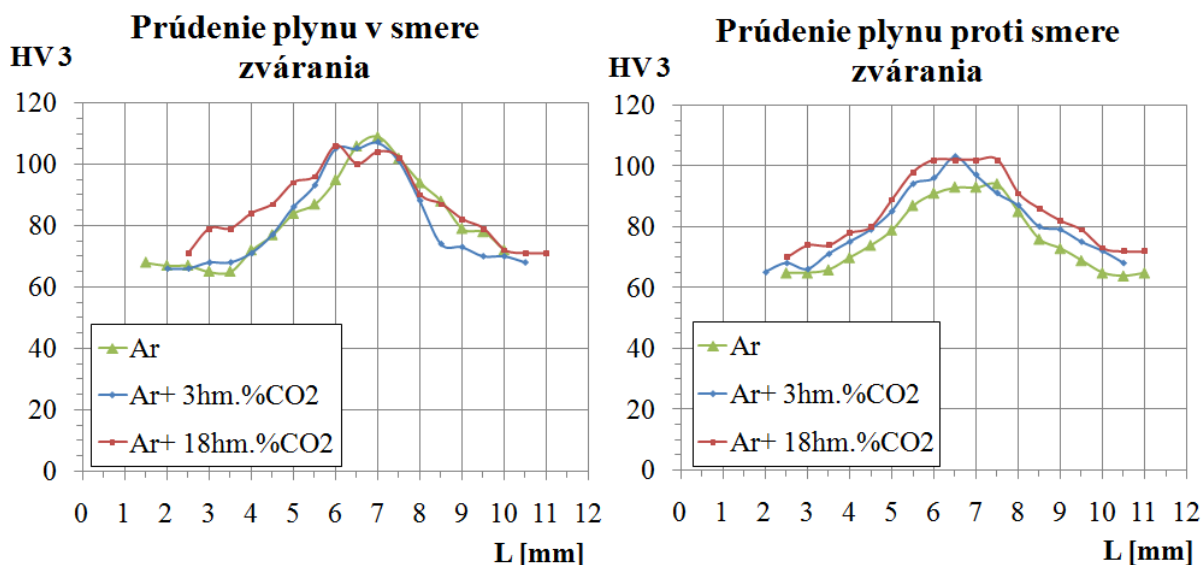
Obr. 53 Vplyv ochranej atmosféry na tvrdosť- DC01 o hrúbke 3mm

Rovnaké porovnanie pre materiál S235JR o hrúbke 2mm je na obr. 54 kde sú uvedené grafy porovnávajúce tvrdosti zvarov zváraných s prúdením ochranného plynu buď v smere alebo proti smeru zvárania. V tomto prípade sa smer prúdenia výraznejšie prejavil pri argónovej ochr. atmosfére.



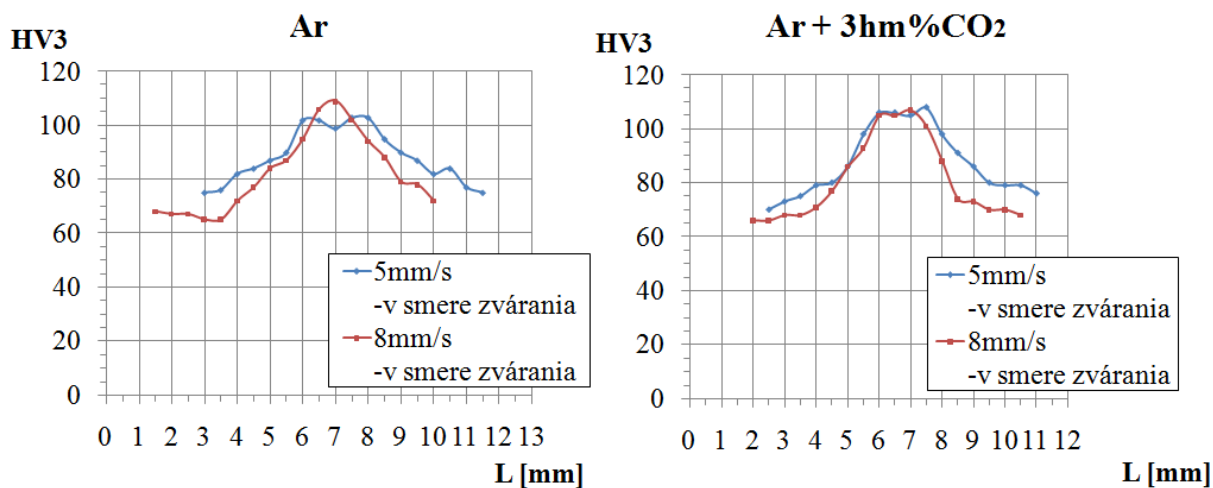
Obr. 54 Vplyv smeru prúdenia ochr. plynu na tvrdosť zvaru- S235JR o hrúbke 2mm

Pri porovnávaní tvrdosti zvarov zváraných pri rôznych typoch ochranných atmosfér z materiálu S235JR sa tiež z obr. 55 potvrdilo, že väčšie rozdiely tvrdosti sú pri prúdení plynu proti smeru zvárania. Pri tomto materiáli sa však najvyššia tvrdosť dosiahla s ochr. atmosférou s 18obj.%CO<sub>2</sub> a najnižšia s argónovou.



Obr. 55 Vplyv ochrannej atmosféry na tvrdosť- S235JR o hrúbke 2mm

Z grafov na obrázku 56, kde je porovnávaná rýchlosť zvarovania, nie sú viditeľné veľké zmeny tvrdosti. Pravdepodobne kvôli smeru prúdenia plynu. V opačnom smere sa žiaľ za nižšej zvaracej rýchlosti nevyhotovili žiadne vzorky.



Obr. 56 Vplyv rýchlosti zvarovania na tvrdosť zvaru



## 5 Technicko-ekonomické zhodnotenie

V práci sa porovnávali účinky jednotlivých ochranných atmosfér na skúšobné zvary, preto je potreba zhodnotiť jednotlivé náklady pri ich využívaní. Pretože ceny jednotlivých ochranných plynov sú rozdielne, tento rozdiel sa môže výrazne prejavovať na celoročných nákladoch na ochranný plyn. V tabuľke 14 sú priemerné ceny jednotlivých plynov zistené od viacerých dodávateľov.

Tab. 14 Priemerné ceny technických plynov

Druh plynu	Typ fľaše	Objem náplne	Plniaci tlak	Cena
Argón 4.8	50l	10,7 m <sup>3</sup>	20 MPa	2 500Kč s DPH
97% Ar + 3% CO <sub>2</sub>	50l	11,3 m <sup>3</sup>	20 MPa	2 300 Kč s DPH
82% Ar +18% CO <sub>2</sub>	50l	12,3 m <sup>3</sup>	20 MPa	2 200 Kč s DPH

Rok 2019 má celkom 251 pracovných dní v Českej republike. Pri trojzmennej prevádzke a 7,5 hodinovej pracovnej dobe je ročný pracovný fond 5647,5 hodín. Pokiaľ je z tohto reálny čas zvarového procesu okolo 70%, ročný reálny čas procesu je 3953 hodín. Pri prietoku plynu 20l/min je celoročná spotreba ochranného plynu 4 744m<sup>3</sup>. Z toho vyplýva, že celoročné náklady na argónovú ochrannú atmosféru činia po zaokrúhlení 1 108 000Kč. Celoročné náklady na zmesovú ochrannú atmosféru s 3obj.%CO<sub>2</sub> činia po zaokrúhlení 965 600Kč. Celoročné náklady na zmesovú ochrannú atmosféru s 18obj.%CO<sub>2</sub> činia po zaokrúhlení 848 500Kč. Z toho vyplýva, že využitie zmesnej atmosféry môže podstatne znížiť výrobné náklady.



## 6 ZÁVERY

V práci sa po teoretickom úvode zameraného na danú problematiku kondukčného laserového zvárania a ochrany zvarového kovu analyzovali skúšobné zvary. Skúšobné zvary boli vyhotovené kondukčným laserovým zváraním plechov z konštrukčných ocelí, konkrétne s ocele DC01 o hrúbke 3mm a z ocele S235JR o hrúbke 2mm. Zvary sa zvárali polovodičovým laserom pri výkone 2,5kW s priemerom ohniska zväzku 1,95mm. Prietok ochranného plynu bol 20l/min s tým, že sa menili tri druhy plynov. Ochranný plyn tvorený s čistým argónom, zmesou Ar s 3obj.%CO<sub>2</sub> a zmesou Ar s 18obj.%CO<sub>2</sub>. Ďalším premenlivým parametrom bol smer prúdenia plynu. Plyn prúdil buď v smere zvárania alebo proti smere zvárania. Pri zváraní materiálu DC01 o hrúbke 3mm bola konštantná rýchlosť zvárania 5mm/s. Pri zváraní tenších plechov je možné použiť vyššie zvaracie rýchlosti, preto sa pri zváraní materiálu S235JR o hrúbke 2mm použila rýchlosť 8mm/s a na porovnanie aj rýchlosť 5mm/s.

Šlirovou metódou sa pozorovalo prúdenie plynu počas zvarového procesu. Pomerne veľké rozdiely v prúdení nastali medzi prúdením plynu v smere zvárania a proti smere. Pri prúdení v smere je zo záznamov vidieť, že kov je chránený krátky čas. V opačnom prípade však vidieť, tak ako pri ochr. plyne Ar aj pri zmesi Ar s 3obj.%CO<sub>2</sub>, že prúdiaci plyn chráni zvarovú oblasť podstatne lepšie (dlhšie). Vlastnosti aktívneho plynu boli pozorovateľné pri oboch zo smerov prúdenia. Prúdenie plynu s CO<sub>2</sub> malo turbulentnejší charakter a vyskytovali sa pri procese výbuchy plazmy.

Pri zváraní oboch materiálov sa na povrchu zvarov pri prúdení plynu v smere zvárania vyskytovala oxidová vrstva s výnimkou zvaru zváraného s 18obj.% CO<sub>2</sub>. Zvary zvárané touto ochrannou zmesou majú však povrch s nepravidelnosťami šírky a prevýšenia (výbuchy plazmy). Povrchy ostatných zvarov sú pomerne hladké. Zníženie rýchlosti viedlo pri argónovom plyne tiež k nepravidelnostiam kresby húsenice

Z ťahovej skúšky vyplýva, že smer prúdenia plynu voči zváraníu nemá zásadný vplyv na pevnostné vlastnosti zvarov v ťahu. Podstatnejšie rozdiely sú medzi jednotlivými druhmi ochr. atmosfér. Pri materiály DC01 sa dosahuje lepších pevnostných vlastností v ťahu s 3obj.% CO<sub>2</sub>. Pri materiály S235JR však tento ochranný plyn skončil najhoršie. Najlepšie pevnostné vlastnosti vykazujú zvary zvárané s 18obj.%CO<sub>2</sub>.

Z metalografických výbrusov vidieť, že zvary nemajú žiadne vnútorné chyby. Pri materiály DC01 majú všetky zvary neprevarený koreň. Zvyšovaním percentuálneho zastúpenia CO<sub>2</sub> v ochrannej atmosfére viedlo k postupnému zužovaniu a prehĺbeniu zvaru. To isté platí aj pre materiál S235JR kedy zvary zvárané s 18obj.% mali ako jedinú pri rýchlosti 8mm/s prevarený koreň. Smer prúdenia plynu nemá zásadný vplyv na veľkosť zvaru.

Zo skúšky tvrdosti podľa Vickersa sa dá taktiež usúdiť, že smer prúdenia nemá zásadný vplyv na tvrdosť zvaru. Najväčší rozdiel tvrdosti bol pri zváraní S235JR s čistým Ar. V tomto prípade má nižšiu tvrdosť zvar zváraný s prúdením plynu proti smere zvárania, kedy je zvar podstatne dlhšie chránený. Pri porovnaní jednotlivých druhov ochranných atmosfér dosahuje najvyšších hodnôt tvrdosti plyn s 3obj.%CO<sub>2</sub> pri materiály DC01. Najnižšie plyn s 18obj.%CO<sub>2</sub>. Pri materiály S235JR najvyššie hodnoty tvrdosti dosahuje plyn s 18obj.%CO<sub>2</sub> a najnižšie čistý argón.

Z vyššie uvedeného sa javí ako najvhodnejší ochranný plyn pre materiál DC01 zmes argónu s 3obj.%CO<sub>2</sub> s prúdením proti smere zvárania. Takto vytvorený skúšobný zvar má povrch bez oxidov a vykazuje najlepšie mechanické vlastnosti.

Pre materiál S235JR sa ako najvhodnejší ochr. plyn javí taktiež zmes argónu s 3obj.%CO<sub>2</sub> s prúdením proti smere zvárania ale za nižšej rýchlosti, kedy sa dosiahne stále hladký povrch bez oxidov s dobrým prievarom, čiže aj dobrými mechanickými vlastnosťami.

## ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV [46]

1. Three Dimensions at the Speed of Light. In: HIGHYAG [online]. Kleinmachnow: HIGHYAG All, 2016 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <http://www.highyag.com/Laser-Processing-Heads/laser-processing-RLSK.html>
2. HYBRID LASER WELDING. In: IONIX [online]. Hyvinkää: Ionix Oy, 2018 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <http://www.ionix.fi/en/technologies/laser-processing/hybrid-laser-welding/>
3. Obloukové svařování obalenou elektrodou. In: Schinkmann [online]. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/mma-rucne-obalenou-elektrodou>
4. Základní metody svařování. Svářečky-elektrody [online]. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.svarecky-elektrody.cz/zakladni-metody-svarovani/t-87>
5. AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 1. vyd. Ostrava: Zeross, 2001,. ISBN 80-857-7181-0.
6. BARTÁK, Jiří, Václav PILOUS a Rudolf KOVAŘÍK. Učební texty pro evropské svářečské specialisty, praktiky a inspektory. Ostrava: ZEROSS, 2002. Svařování. ISBN 80-85771-97-7.
7. MINAŘÍK, Václav. Obloukové svařování. 2., aktualiz. vyd. Praha: Scientia, pedagogické nakladatelství, 1998. ISBN 80-7183-285-5.
8. VEČEŘA, Michal. Svařování kovů. Svařování kovů a plastů Olomouc [online]. 2017 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: [http://www.svarovani-olomouc.cz/svarovani\\_kovu.html](http://www.svarovani-olomouc.cz/svarovani_kovu.html)
9. TIG svařování I - základní principy. SVARINFO [online]. 2009 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2008011702%3E>
10. DULEY Walter W. Laser welding, New York 1999, A.Wiley-Interscience publication, ISBN 0-471-24679-4.
11. KANNATEY-ASIBU, E. Principles of Materials Processing, John Wiley&Sons, Inc. Publication, 2009, ISBN 978-0-470-17798-3.
12. NOVÁK, Miroslav. SERIÁL NA TÉMA LASERY - ZÁKLADNÍ PRINCIP LASERU A JEJICH DĚLENÍ [online]. In: . 2011 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
13. BENKO, Bernard, Peter FODREK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIELAK. Laserové technológie. 1. vyd. Bratislava: STU, 2000. ISBN 80-227-1425-9.
14. KENDER, Štefan. PROGRESÍVNE METÓDY ZVÁRANIA – ZVÁRANIE LASEROM [online]. Košice, 2004 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/7-2004/pdf/87-90.pdf>. Grantový projekt. Technická univerzita v Košiciach.
15. ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonenční metody obrábění – 4. díl. MM Průmyslové spektrum [online]. 2008 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil.html>

16. A lehetséges transzverzális módusok két különböző geometriában. In: Unimiskolc [online]. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: [http://www.unimiskolc.hu/~www\\_fiz/paripas/laseralap.htm](http://www.unimiskolc.hu/~www_fiz/paripas/laseralap.htm)
17. MRŇA, Libor. Základy laserové techniky. In: Odbor technologie svařování a povrchových úprav [online]. Brno [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_zaklady\\_laserove\\_techiky\\_2013\\_mrna.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_zaklady_laserove_techiky_2013_mrna.pdf)
18. KAŠPAROVÁ, Marie. Interakce infračerveného laserového záření s textilií [online]. Liberec, 2016 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/21807>. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Jakub Wiener.
19. HUBÍK, Petr. Aplikační možnosti nízko-výkonného CO<sub>2</sub> laseru při popisování (značení) materiálů. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2015, 106 s. (92 581 znaků). Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/33597>. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Sýkorová, Libuše.
20. Laserové technologie v praxi I.: Vedení laserového svazku [online]. Olomouc, 2011 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: [https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/ltp1\\_5prez.pdf](https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/ltp1_5prez.pdf). Přednáška. SLO UP a FZÚ AVČR.
21. LAPŠANSKÁ, Hana. Laserové technologie v praxi. Olomouc: Moravská vysoká škola Olomouc, 2010. ISBN 978-80-87240-65-6.
22. HROMADA, Martin. Povrchové kalení ocelí vláknovým YbYAG laserem [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2013 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/27383>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
23. Laserové svařování. ROCKWELD-GROUP [online]. Praha: Petr Bíma, 2013 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.rockweld.cz/laserove/>
24. MRŇA, Libor. Využití metod signálové frekvenční analýzy pro sledování a řízení laserového svařovacího procesu = The use of signal frequency analysis methods to monitor and control the laser welding process: zkrácená verze habilitační práce. Brno: VUTIUM, 2014, 25 s.25 : il. ISBN 978-80-214-4843-8.
25. SERIÁL NA TÉMA LASERY - LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ I. LAO Laser a Optika [online]. Praha: LAO - průmyslové systémy, 2013 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-svarovani-i-laser-welding-134>
26. ŠMÍD, Jiří. Lasery pro průmysl: Nekonenční technologie. MM Průmyslové spektrum [online]. Praha: FIREMNIWEB, 2008 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-pro-prumysl.html>
27. ŘASA, Jaroslav a Radka JINDROVÁ. Lasery, laserové technologie a stroje s laserem: Nekonenční technologie. MM Průmyslové spektrum [online]. Praha: FIREMNIWEB, 2006 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-s-laserem.html>

28. KOŘÁN, Pavel. Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. LAO Laser a Optika [online]. Praha: LAO - průmyslové systémy, 2011 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
29. KREJZLÍK, Václav. Laserové řezání nekovových materiálů. MM Průmyslové spektrum [online]. Praha: FIREMNIWEB, 2011 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-rezani-nekovovych-materialu.html>
30. LUKÁŠ, Michal. Laserové diody 2 - Typy a struktury laserových diod. Elektrovue [online]. Olomouc: Optika a optoelektronika PrF UP Olomouc, 2001 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://www.elektrovue.cz/clanky/01043/index.html>
31. NĚMEČEK, Stanislav a Jan KAŠPAR. Laserové svařování - posouzení vlivu ochranného plynu. MM Průmyslové spektrum [online]. Praha: FIREMNIWEB, 2014 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-svarovani-posouzeni-vlivu-ochranneho-plynu.html>
32. Nové ochranné plyny. MM Průmyslové spektrum [online]. Praha: FIREMNIWEB, 2004 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nove-ochranneplyny.html>
33. Přehled technologií svařování v ochranných plynech. MM Průmyslové spektrum [online]. Praha: FIREMNIWEB, 2010 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prehled-technologie-svarovani-v-ochrannych-plynech.html>
34. CHUDÍK, Ivan. Výběr ochranných plynů pro obloukové svařování. Konstrukce [online]. Ostrava: KONSTRUKCE Media, 2008 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/vyber-ochrannych-plynu-pro-obloukove-svarovani/>
35. MRŇA, Libor. Dynamika laserového svařování = Dynamics of laser welding. Brno: VUT FSI, 2007, 106 s. + Přílohy. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně.
36. PROCHÁZKA, Libor. Studium vlivu ochranné atmosféry na kvalitu svaru a parametry laserového svařování [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2017 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: [https://primo.lib.vutbr.cz/permalink/f/1roshr/420BUT\\_DSspace11012/65858](https://primo.lib.vutbr.cz/permalink/f/1roshr/420BUT_DSspace11012/65858). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
37. MRŇA, Libor, Jan PAVELKA, Petr HORNÍK a Jozef HRABOVSKÝ. Use of schlieren methods to study gas flow in laser technology [online]. Brno, 2016 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/309961266\\_Use\\_of\\_schlieren\\_methods\\_to\\_study\\_gas\\_flow\\_in\\_laser\\_technology](https://www.researchgate.net/publication/309961266_Use_of_schlieren_methods_to_study_gas_flow_in_laser_technology). Konferenční publikace. Vysoké učení technické v Brně.
38. ŽEMLOVÁ, Markéta. Studium vlivu směsné ochranné atmosféry při laserovém svařování austenitických korozivzdorných ocelí [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2016 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: [https://primo.lib.vutbr.cz/permalink/f/1roshr/420BUT\\_DSspace11012/59600](https://primo.lib.vutbr.cz/permalink/f/1roshr/420BUT_DSspace11012/59600). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.

39. KULHÁNEK, Petr. Úvod do teorie plazmatu. Praha: AGA, 2011, 375 stran : ilustrace, portréty. ISBN 978-80-904582-2-2.
40. Nedestruktivní zkoušení svarů- Vizuální kontrola tavných svarů. ISO 17637:2016. Brno: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
41. Svařování - Svarové spoje zhotovené elektronovým a laserovým svařováním - Směrnice pro určování stupňů jakosti - Část 1: Ocel. ČSN EN IS O 13919-1. Praha: Český normalizační institut, 1998.
42. Typy vad , příčiny jejich vzniku a hodnocení. Česká svářecká společnost ANB [online]. Praha: CWS-ANB, 2012 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384>
43. ŠTORKÁN, Zdeněk. Problematika hodnocení svarových spojů. Konstrukce [online]. Ostrava: KONSTRUKCE Media, 2014 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/problematika-hodnoceni-svarovych-spoju/>
44. KOŇÁR, Radoslav. Elektronický katalóg defektov a ich ultrazvukových indikácií pri skúšaní materiálov novou ultrazvukovou metódou Phased Array [online]. žilina, 2017 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: [http://kti.uniza.sk/wp-content/uploads/2018/01/E-katalog\\_KEGA.pdf](http://kti.uniza.sk/wp-content/uploads/2018/01/E-katalog_KEGA.pdf). Projekt. Žilinská univerzita v Žiline, Strojnícka fakulta Katedra technologického inžinierstva.
45. Výpočet uhlíkového ekvivalentu. SVARINFO [online]. phpRS, 2005 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/showpage.php?name=cekv>
46. Generátor citací. Citace Pro [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.citacepro.com/>

## ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

Označení	Legenda	Jednotka
BPP	parameter kvality	[mm.mrad]
C <sub>e</sub>	uhlíkový ekvivalent	[hm.%]
d	aritmetický priemer uhlopriečok vtlačku	[mm]
D <sub>foc</sub>	priemer zväzku v ohnisku	[mm]
D <sub>0</sub>	priemer vstupného zväzku	[mm]
E	energia	[J]
F <sub>foc</sub>	ohnisková vzdialenosť	[mm]
F	skúšobné zaťaženie	[N]
g <sub>n</sub>	tiažové zrýchlenie	[m/s <sup>2</sup> ]
K	kvalita zväzku	[-]
MAG	metal activetgas	[-]
MIG	metal inertgas	[-]
MMA	manual metal arc	[-]
M <sup>2</sup>	faktor kvality zväzku	[-]
T	čas	[s]
TIG	tungsten inertgas	[-]
WIG	wolframinertgas	[-]
w <sub>0</sub>	polomer pásu zväzku v ohnisku	[mm]
α	vrcholový uhol	[mrad]
ε	pomerná deformácia	[-]
σ <sub>sm</sub>	zmluvné napätie	[MPa]
λ	vlnová dĺžka	[mm]
θ	uhol divergencie	[mrad]
π	Ludolfovo číslo	[-]



## ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1 Príklady progresívnych technológií zvárania [1],[2].....	9
Obr. 2 Zváranie ručnou obalovanou elektródou [3].....	10
Obr. 3 Metóda zvárania MAG/MIG [8].....	11
Obr. 4 Princíp zvárania TIG s prídavným drôtom [9] .....	12
Obr. 5 Princíp vzniku laserového lúča [12] .....	13
Obr. 6 Znázornenie vzniku laserového lúča v rezonátore [12].....	14
Obr. 8 a) nesymetrický mód, b) nastavený symetrický mód [17].....	15
Obr. 7 Rozloženie intenzity žiarenia [16].....	15
Obr. 9 Šírenie Gausového zväzku z rezonátoru [20] .....	16
Obr. 10 Fokusácia zväzku [19] .....	17
Obr. 11 Závislosť absorpcie na vlnovej dĺžke [22].....	18
Obr. 12 Metódy laserového zvárania [25] .....	19
Obr. 13 Princíp difúzne chladeného radio-frekvenčne budeného CO <sub>2</sub> laseru [28] .....	21
Obr. 14 Nd:YAG laser budený výbojkami [28] .....	22
Obr. 15 DPSS Nd:YAG laser s tranzverzálnym budením [28] .....	23
Obr. 16 DPSS Nd:YAG laser so zadným budením [28].....	23
Obr. 18 Princíp vláknového laseru [28].....	24
Obr. 17 Princíp diskového laseru [28] .....	24
Obr. 19 Princíp homoštruktúrneho laseru [30] .....	25
Obr. 20 Princíp laseru s dvojitou heteroštruktúrou [30] .....	26
Obr. 21 Princíp laserovej diódy vyžarujúcou plochou [30].....	26
Obr. 22 Vplyv hustoty ochrannej atmosféry na tesniaci účinok [35] .....	27
Obr. 23 Spôsoby dopravy ochranného plynu [36].....	29
Obr. 24 Poloha bočnej trysky k smeru zvárania [35] .....	29
Obr. 25 Chyby nastavenia bočnej trysky a rýchlosti prúdenia plynu [35] .....	30
Obr. 27 Koaxiálne šlirové usporiadanie [36].....	31
Obr. 26 Schéma interakcie ochranného plynu .....	31
Obr. 28 Robotizované pracovisko .....	34
Obr. 29 Kondukčné laserové zváranie s argónovým ochranným plynom .....	35
Obr. 30 Procesy zvárania .....	37
Obr. 31 Schéma šlirovej optickej aparatúry.....	39
Obr. 32 Prúdenie argónovej ochrannej atmosféry proti smere zvárania .....	40
Obr. 33 Prúdenie argónovej ochrannej atmosféry v smere zvárania .....	40
Obr. 34 Prúdenie zmesnej ochrannej atmosféry 97Ar + 3CO <sub>2</sub> proti smere zvárania .....	40
Obr. 35 Prúdenie zmesnej ochrannej atmosféry 97Ar + 3CO <sub>2</sub> v smere zvárania.....	40
Obr. 36 Výbuch plazmy pri kondukčom laserovom zváraní .....	41
Obr. 37 Výbuch plazmy pri kondukčom laserovom zváraní .....	41
Obr. 38 Rozmery skúšobnej vzorky pre skúšku ťahom.....	44
Obr. 39 Znázornenie polohy vyrezania vzorkou zo zvarov .....	45
Obr. 40 Skúšobný stroj ZD40 (vľavo), riadiaca jednotka EDC60 (vpravo).....	46
Obr. 41 Vplyv smeru prúdenia ochr. plynu- DC01 o hrúbke 3mm .....	46
Obr. 42 Vplyv smeru prúdenia ochr. plynu- S235JR o hrúbke 2mm .....	46
Obr. 43 Vplyv ochrannej atmosféry na pevnostné vlastnosti- DC01 o hrúbke 3mm.....	47
Obr. 44 Vplyv ochrannej atmosféry na pevnostné vlastnosti- S235JR o hrúbke 2mm .....	47
Obr. 45 Vplyv rýchlosti zvárania pevnostné vlastnosti v ťahu.....	48
Obr. 46 Znázornenie polohy vyrezania vzorkou z jednotlivých zvarov .....	48
Obr. 47 Metalografická pila MIKRON 100 (vľavo), lis na zalievania.....	49
Obr. 48 Zaliatie vyleštené vzorky (vľavo), brusička/leštička Tegramin-20 (vpravo) .....	49

Obr. 49 Princíp Vickersovej metódy .....	53
Obr. 50 Meracie zariadenie ZWICK 3212.....	54
Obr. 51 Radové usporiadanie vtlačkov .....	55
Obr. 52 Vplyv smeru prúdenia ochr. plynu na tvrdosť zvaru- DC01 o hrúbke 3mm.....	55
Obr. 53 Vplyv ochrannej atmosféry na tvrdosť- DC01 o hrúbke 3mm.....	56
Obr. 54 Vplyv smeru prúdenia ochr. plynu na tvrdosť zvaru- S235JR o hrúbke 2mm.....	56
Obr. 55 Vplyv ochrannej atmosféry na tvrdosť- S235JR o hrúbke 2mm.....	57
Obr. 56 Vplyv rýchlosti zvarovania na tvrdosť zvaru .....	57

## ZOZNAM TABULIAK

Tab. 1 Odrazivosť materiálov [14] .....	18
Tab. 2 Kombinácie zvariteľnosti jednotlivých materiálov za pomoci laseru [24].....	19
Tab. 3 Vhodnosť plynov a ich zmesí pre rôzne zvárané materiály CO2 laserom. [35].....	28
Tab. 4 Sledované podmienky pri zváraní skúšobných zvarov- hrúbka plechu 3mm. ....	36
Tab. 5 Sledované podmienky pri zváraní skúšobných zvarov- hrúbka plechu 2mm. ....	36
Tab. 6 Chemické zloženie použitých základných materiálov.....	38
Tab. 7 Mechanické vlastnosti základných materiálov .....	38
Tab. 8 Fotografie zvarov- materiál DC01 o hrúbka 3mm, rýchlosť zvárania 5mm/s .....	42
Tab. 9 Fotografie zvarov- materiál S235JR o hrúbka 2mm, rýchlosť zvárania 8mm/s.....	43
Tab. 10 Fotografie zvarov- materiál S235JR o hrúbka 2mm, rýchlosť zvárania 5mm/s.....	44
Tab. 11 Fotografie makroštruktúry metalografických výbrusov .....	51
Tab. 12 Fotografie makroštruktúry metalografických výbrusov .....	52
Tab. 13 Fotografie makroštruktúry metalografických výbrusov .....	53
Tab. 14 Priemerné ceny technických plynov .....	58

## **ZOZNAM PRÍLOH**

Príloha 1 Namerané hodnoty tvrdosti skúšobných zvarov

## Príloha 1

Tab. 1 Namerané hodnoty skúmaných vzorkov DC01-3mm; 5mm/s

Ochranná atmosféra (obj.%)	smer prúdenia plynu	Tvrdosť HV3									
		Umiestnenie vtláčku									
		ZM		TOO		ZK		TOO		ZM	
100Ar	v smere zvárania	86	91	96	110	115	117	115	106	92	85
	proti smere zvárania	88	92	97	113	114	116	110	103	91	87
97Ar + 3CO <sub>2</sub>	v smere zvárania	79	91	103	114	116	117	112	102	93	87
	proti smere zvárania	88	90	104	112	119	120	116	106	94	89
82Ar + 18CO <sub>2</sub>	v smere zvárania	90	93	99	111	107	107	113	102	95	90
	proti smere zvárania	87	92	103	105	107	109	108	99	94	88

Tab. 2 Namerané hodnoty skúmaných vzorkov S235JR- 2mm; 8mm/s

Ochranná atmosféra (obj.%)	smer prúdenia plynu	Tvrdosť HV3									
		Umiestnenie vtláčku									
		ZM		TOO		ZK		TOO		ZM	
100Ar	v smere zvárania	86	91	96	110	115	117	115	106	92	85
	proti smere zvárania	88	92	97	113	114	116	110	103	91	87
97Ar + 3CO <sub>2</sub>	v smere zvárania	79	91	103	114	116	117	112	102	93	87
	proti smere zvárania	88	90	104	112	119	120	116	106	94	89
82Ar + 18CO <sub>2</sub>	v smere zvárania	90	93	99	111	107	107	113	102	95	90
	proti smere zvárania	87	92	103	105	107	109	108	99	94	88

Tab. 2 Namerané hodnoty skúmaných vzorkov S235JR- 2mm; 5mm/s

Ochranná atmosféra (obj.%)	smer prúdenia plynu	Tvrdosť HV3									
		Umiestnenie vtláčku									
		ZM		TOO		ZK		TOO		ZM	
100Ar	v smere zvárania	82	84	84	90	102	103	95	90	85	80
97Ar + 3CO <sub>2</sub>	v smere zvárania	75	79	81	86	105	106	98	91	84	79